الکترونیک قدرت

تألیف ریموند رمشو
ترجمهٔ ابراهیم سیدگوگانی

POWEREN.IR

مرکز نشردانشگاهی
۱۵۲

درسنامه‌ها ۳۴

POWEREN.IR

Power Electronics
Raymond Ramshaw
First Published 1973
by Chapman and Hall Ltd

الکترونیک قدرت
تألیف ریموند رمشو
ترجمهٔ ابراهیم سیدگوگانی
مرکز نشردانشگاهی، چاپ اول ۱۳۶۴
تعداد ۳۰۰۰
چاپ و صحافی: چاپخانهٔ سایه
حق چاپ برای مرکز نشردانشگاهی محفوظ است

فهرست

عنوان	صفحه
یادداشت مترجم	نه
مقدمه مؤلف	۱
۱ـ الکترونیک قدرت و محرکهای الکتریکی چرخان	۳
۱ـ۱ مقدمه	۳
۱ـ۲ الکترونیک قدرت	۴
۱ـ۲ـ۱ تیریستور	۴
۱ـ۳ محرکهای الکتریکی چرخان	۶
۱ـ۳ـ۱ محرکهای الکتریکی جریان مستقیم	۷
۱ـ۳ـ۲ محرکهای الکتریکی جریان متناوب	۱۰
۱ـ۳ـ۳ گزینش محرکها و سیستمهای کنترل	۱۲
مراجع	۱۵
مسائل	۱۶
۲ـ تیریستور	۱۹
۲ـ۱ مقدمه	۱۹
۲ـ۲ نیمه هادیها	۲۰
۲ـ۲ـ۱ دیود	۲۱
۲ـ۲ـ۲ ترانزیستور	۲۳
(الف) حالت قطع	۲۴
(ب) ناحیه خطی	۲۴

عنوان	صفحه
(پ) اشباع	۲۵
۲ـ۲ـ۳ تیریستور	۲۶
(الف)مدل دیودی تیریستور	۲۷
(ب) مدل دو ترانزیستوری تیریستور	۲۷
۲ـ۳ مشخصات تیریستور	۲۸
۲ـ۳ـ۱ با یاس معکوس تیریستور	۲۸
۲ـ۳ـ۲ تیریستور بایاس مستقیم و مسدود	۲۹
۲ـ۳ـ۳ تیریستور بایاس مستقیم و هدایت	۲۹
(الف) روشن‌کردن توسط نور	۳۰
(ب)روشن‌کردن توسطعلایم الکتریکی‌اعمال‌شده به دریچه	۳۰
(پ) روشن کردن با ولتاژ شکست	۳۳
(ت) روشن کردن dv/dt	۳۴
۲ـ۴ خاموش شدن تیریستور	۳۴
۲ـ۴ـ۱ روشهای خاموشی یا قطع	۳۴
(الف)جابه‌جایی طبیعی	۳۵
(ب) خاموشی با بایاس معکوس	۳۵
(پ) خاموشی دریچه	۳۵
۲ـ۴ـ۲ زمان خاموشی تیریستور	۳۶
۲ـ۵ مقادیر اسمی تیریستور	۳۷
۲ـ۵ـ۱ مقادیر اسمی ولتاژ	۳۷
۲ـ۵ـ۲ مقادیر اسمی جریان	۳۸
۲ـ۵ـ۳ مقادیر اسمی قدرت	۳۸
(الف)تلفات جریان بار در هدایت مستقیم	۳۹
(ب)تلفات قدرت نشتی مستقیم	۳۹
(پ)تلفات خاموشی و تلفات قدرت نشتی معکوس	۳۹
(ت) تلفات قدرت دریچه	۳۹
(ث)تلفات روشن شدن	۴۰
۲ـ۵ـ۴ مقادیر اسمی تناوبی	۴۰
۲ـ۶ مراحل ساخت تیریستور	۴۰
۲ـ۷ تیریستور در مدار	۴۲

عنوان	صفحه
۲ـ۷ـ۱ اتصال سری تیریستورها	۴۲
۲ـ۷ـ۲ اتصال موازی تیریستورها	۴۳
۲ـ۷ـ۳ مدارهای راه‌اندازی تیریستورها	۴۴
(الف) علایم فرمان جریان مستقیم	۴۵
(ب) علایم فرمان پالسی	۴۶
(پ) علایم فرمان جریان‌متناوب	۴۸
۲ـ۷ـ۴ مدارهای خاموشی (یاقطع) تیریستور	۵۰
(الف) خود جابه‌جایی توسط مدار تشدید	۵۰
(ب) خاموش کردن تیریستور توسط مدار تشدید کمکی	۵۱
(پ) خاموش کردن تیریستور توسط خازن موازی	۵۲
(ت) خاموش کردن‌تیریستور توسط خازن سری	۵۴
۲ـ۸ مدارهای حفاظت تیریستور	۵۴
۲ـ۸ـ۱ اضافه ولتاژ	۵۵
۲ـ۸ـ۲ اضافه جریان	۵۵
۲ـ۸ـ۳ خیزهای (تغییرات ناگهانی) ولتاژ	۵۶
۲ـ۹ قابلیتهای نسبی تیریستورها	۶۰
۲ـ۱۰تریود تیریستور دو طرفه یا تریاک	۶۱
۲ـ۱۱خلاصه مطالب گفته شده	۶۵
مثالهای حل شده	۶۶
مراجع	۷۰
مسائل	۷۱
۳ـ کنترل موتورهای القائی	۷۷
۳ـ۱ مقدمه	۷۷
۳ـ۲ راه اندازی موتور القائی	۷۸
۳ـ۲ـ۱ راه اندازی تیریستوری	۸۱
۳ـ۳ کنترل سرعت موتور القایی	۸۷
۳ـ۳ـ۱ سیستمهای تیریستوری کنترل سرعت	۸۸
(الف) کلید جریان متناوب	۸۸
تمرین‌حل شده	۹۲
(ب) وارونگرها	۹۴

عنوان	صفحه
(۱)طبقه‌بندی وارونگرها	۹۶
(۲) وارونگر (پ۱) برای موتور القائی تکفاز	۹۶
تحلیل مدار وارونگر (پ۱) با بار اهمی	۹۹
(۳) وارونگر کلاس ۴ برای موتور القائی سه‌فاز	۱۰۶
(پ) جابجائی وارونگر	۱۱۲
(۱) وارونگر مک ماری	۱۱۲
مثال حل شده	۱۱۴
(۲) وارونگر مک ماری ــ بدفورد	۱۱۶
(۳) منبع تغذیه جابه‌جا کن کمکی	۱۱۸
(ت) متناسب بودن ولتاژ با فرکانس	۱۲۰
(۱) ترانسفورماتور با نسبت تبدیل متغیر	۱۲۱
(۲) واگردان ولتاژ متغیر	۱۲۱
(۳) کنترل ولتاژ وارونگر	۱۲۲
(ث) حذف هارمونیکها	۱۲۶
(۱) کنترل پهنای پالس مرکب	۱۲۷
(۲) کاهش هارمونیکهای مورد نظر	۱۲۸
(۳) خنثی کردن هارمونیکها توسط ترکیب موج	۱۳۳
(ج) ارزیابی وارونگرهای سه فاز تیریستوری	۱۴۰
(چ) وارونگر در مدار گردانه موتور القائی	۱۴۲
مراجع	۱۴۶
مسائل	۱۴۷
۴ــ کنترل موتور جریان مستقیم	۱۵۷
۴ــ۱ مقدمه	۱۵۷
۴ــ۲ راه اندازی موتورهای جریان مستقیم	۱۵۸
۴ــ۲ــ۱ تیریستورها و راه انداز مقاومتی	۱۵۸
۴ــ۲ــ۲ راه اندازی تیریستوری بدون مقاومت	۱۶۰
۴ــ۳ کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم	۱۶۲
۴ــ۳ــ۱ کنترل سرعت تیریستوری	۱۶۳
۴ــ۳ــ۲ واگردانهای یکسوکننده قابل کنترل تیریستوری	۱۶۴
(الف) واگردان تک فاز نیم موج	۱۶۶

عنوان	صفحه
(ب) واگردان تک فاز تمام موج	۱۶۹
مثال حل شده	۱۷۰
(پ) واگردانهای سه‌فاز قابل کنترل	۱۷۳
(ت) کنترل میدان تحریک و آرمیچر	۱۷۴
مثال حل شده	۱۷۶
(ث) تموج ولتاژ واگردان	۱۸۱
۴ـ۳ـ۳ برشگـرهای ولتاژ تیریستوری	۱۸۴
(الف) برشگر مورگان	۱۸۵
(ب) برشگر جونز	۱۸۶
(پ) برشگر نوسانی	۱۸۷
(۱) تحلیل پر شدن خازن	۱۸۷
(۲) تحلیل مراحل جابه‌جایی	۱۸۹
۴ـ۴ کنترل وضعیت توسط موتورهای جریان مستقیم	۱۹۲
۴ـ۴ـ۱ کنترل وضعیت تیریستوری	۱۹۵
(الف)مطالعه‌طراحی سر و مکانیسم‌گسسته برای کنترل‌وضعیت تیریستوری	۱۹۵
(۱) مدار قدرت	۱۹۷
(۲) مدار کنترل	۲۰۱
مثال حل شده	۲۰۳
۴ـ۴ـ۲ مدارهای متناوب	۲۰۵
مراجع	۲۰۸
مسائل	۲۱۰
۵ـ کنترل موتور سنکرون	۲۲۷
۵ـ۱ مقدمه	۲۲۷
۵ـ۲ راه‌اندازی موتور سنکرون	۲۲۹
۵ـ۲ـ۱ وارونگر برای راه‌اندازی موتور سنکرون	۲۲۹
۵ـ۳ کنترل سرعت	۲۲۹
۵ـ۳ـ۱ مشکلات کنترل سرعت	۲۳۰
(الف)موتور پله‌ای تیریستوری	۲۳۱
(ب) واگردان سیکلی برای سرعتهای کمتر	۲۳۶

عنوان	صفحه
۵ـ۴ تحریک موتور سنکرون	۲۴۰
۵ـ۴ـ۱ کنترل خودکار تیریستوری تحریک	۲۴۰
۵ـ۵ موتور جریان مستقیم یا موتور سنکرون	۲۴۵
مراجع	۲۴۹
ضمائم	۲۵۱
الف ـ مدارهای منطقی برای کنترل وارونگر	۲۵۲
ب ـ مدارهای منطقی برای واگردان دو طرفه	۲۶۰
پ ـ مدارهای منطقی برای قطع ـ وصل خود کنترل	۲۶۷
مراجع	۲۷۳
واژه نامه فارسی ـ انگلیسی	۲۷۵
واژه‌نامه انگلیسی ـ فارسی	۲۸۷

POWEREN.IR

POWEREN.IR

فصل اول

الکترونیک قدرت و محرکهای الکتریکی چرخان[1]

۱ ـ ۱ مقدمه

از سالهای ۱۹۵۰ به بعد تکاپوی شدیدی درتوسعه ، تولید ،و کاربرد وسایل نیمه‌هادی[2] وجود داشته است . امروزه بیش از ۱۰۰ میلیون وسیله درهرسال تولید می‌شود و میزان رشد آن بیشتر از ۱۰ میلیون وسیله در سال است . این تعداد به تنهایی مشخص کننده اهمیت نیمه‌هادیها در صنایع الکتریکی است .

کنترل بلوکهای بزرگ قدرت توسط نیمه‌هادیها از اوایل سالهای ۱۹۶۰ شروع شد . بلوکهای بزرگ قدرت کـه قبلا به چندین کیلووات اطلاق می‌شد ، امروزه متضمن چندین مگاوات است . اینک تولید تعداد نیمه هادیهایی که قادرند جریانی بیشتر از ۷/۵ آمپر از خود عبـور دهند بالغ بر ۵ میلیون در سال است که ارزش کل آنها در حدود ۸/۵ میلیون لیره استرلینگ یا ۲۰ میلیون دلار (و یا ۱/۵ میلیارد ریال) است . نـرخ رشد نیمه هادیهای قدرت که به تیریستـور موسومند به پای نرخ رشد ترانزیستور رسیده است .

الکترونیک قدرت به طراحی و نقش مدارات[3] تیریستوری در کنترل قدرت الکتریکی یک سیستم مربوط می‌شود . کنترل ماشین‌آلات[4] الکتریکی یکی ازمهمترین مواردا ستعمال الکترونیک قدرت است . الکترونیک قدرت که حدفاصل بین منبع تغذیه و محرکهای الکتریکی چرخان راپر می‌کند مطالب اصلی این کتاب را تشکیل می‌دهد . بنابراین در این کتاب سعی براین است که شکاف موجود بین تکنولوژی دستگاههای الکتریکی و الکترونیکی پر شود .

1- Rotating electric drives
2- Semiconductor devices
3- Circuitry
4- Machinery

۱ ـ ۲ الکترونیک قدرت

عمده‌ترین جزء مدارهای الکترونیک قدرت تریستور است ، و آن یک نیمه هادی سریعا راه گزین[1] است که کارکردش مدوله کردن قدرت سیستمهای الکتریکی جریان مستقیم و جریان متناوب است . عناصر دیگرمورداستفاده در الکترونیک‌قدرت تمامی به منظور فرمان[2] ومحافظت تیریستورها به کار گرفته‌می‌شوند . مدوله‌کردن قدرت‌بین ۱۰۰ وات تا ۱۰۰ مگاوات با روشن و خاموش کردن تیریستوربا ترتیب زمانی خاصی امکان پذیر است .

خانواده تیریستورکه یک گروهی از وسایل چهار لایه سیلیکونی است ، مرکب از دیود ، تریود[3] ، و تترود[4] است . مهمترین کلید نیمه هادی قابل کنترل که در کنترل قدرت به کار می‌رود یکسو کننده قابل کنترل سیلیکونی[5] (SCR) است ، که یک کلید[6] قدرت یک‌طرفه‌است ، و نیز تریاک[7] که به صورت یک کلید قدرت دوطرفه عمل‌می‌کند . دراینجا ازاین نظر که ابهامی تولید نشود تریستور تریود معکوسا بندآور[8] ، فقط تیریستور نامیده می‌شود .

کلیدهای فوق می‌توانند درعمل‌یکسوسازی ، عمل تبدیل جریان‌مستقیم به جریان‌متناوب (وارونسازی)[9] ،و عمل تنظیم توان الکتریکی به کار گرفته شوند . جای تعجب نیست که‌مردم از دیدن کلیدی به اندازه یک بند انگشت ولی با قابلیت تبادل[10] قدرتی‌نزدیک به‌یک مگاوات برانگیخته شوند تیریستوراین چنین کلیدی است . این کلید اصولا یک ابزار دوحالتی (قطع و وصل)[11] است ، لکن اگر ازخروجی نسبت‌به زمان‌میانگین‌گرفته‌شود می‌تواند به‌طورخطی‌کنترل شود . لذا برای کنترل محرکهای الکتریکی مفید است .

تیریستوربه علت قابلیت ارائه یک امپدانس بینهایت یا صفر در دو سر خروجی خود یک عنصر ایده‌آل‌برای واگردانها (مبدلها)[12] محسوب می‌شود . سیستم‌تیریستوری‌می‌تواندیک‌منبع قدرت‌نامناسب رابه یک‌منبع مناسب‌تبدیل کند . مثلا ایجاد یک منبع تغذیه[13] جریان مستقیم از یک منبع تغذیه جریان متناوب و یابه دست‌آوردن یک منبع تغذیه فرکانس متغیر از یک‌منبع فرکانس ثابت ، تنوع زیاد الکترونیک قدرت را نشان می‌دهد .

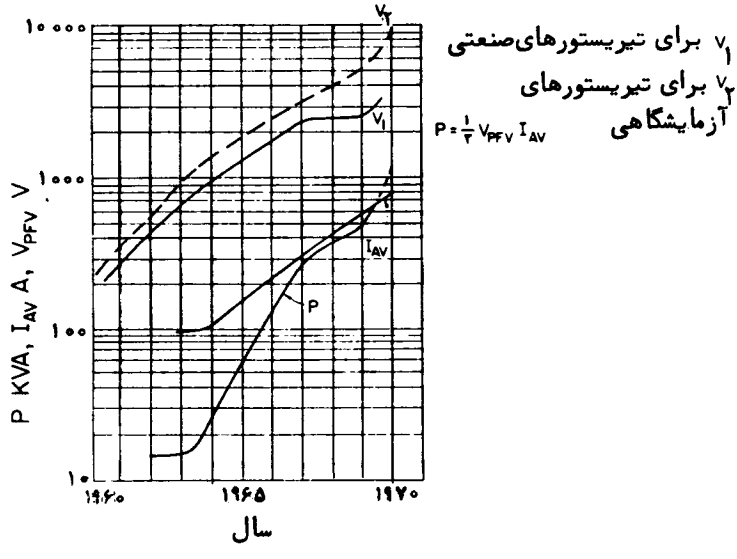
۱ ـ ۲ ـ ۱ تیریستور

تیریستورها به علت کمی وزن و حجم ، قابل اعتماد بودن ، سرعت عمل ، مصرف قدرت بسیار اندک برای راه‌اندازی ، و مبرا بودن‌ازمشکلات‌مکانیکی به دلیل نداشتن قسمتهای‌متحرک

1- Fast switching 2- Operate 3- Triode 4- Tetrode
5- Silicon controlled rectifier 6- Switch 7- Triac
8- Reverse blocking triode thyriston 9- Inversion
10- Handling 11- On-Off 12- Converter 13- Supply

جهت کنترل قدرتهای خیلی زیاد مناسب هستند . تیریستوربه عنوان کلید دارای‌معایب چندی نیزهست .موقعی‌که تیریستور روشن می‌شود و جریان را هدایت می‌کند در دو سر آن افت ولتاژ مستقیمی[1] در حدود ۱/۵ ولت ایجاد می‌شود . از آنجا که این وسایل از نظر حرارتی محدود هستند ، مقدار اسمی[2] آنها اهمیت پیدا می‌کند . به علت تغییرات صعودی‌جریان‌درطول مدت روشن شدن ممکن است حرارت متمرکزی‌به‌وجود آید . اگر اتصال سیلیکونی جریانی بـه چگالی ۱۵۰ آمپر بر سانتی‌مترمربع را با ۱/۵ ولت افت ، هدایت کند باید به طورموثر انتقال حرارت صورت گیرد و نیز در مقابل ولتاژهای گذرا محافظت شود . روشن کردن‌تیریستورساده‌است ولی ممکن است خاموش کردنش پیچیده شود .

علی‌رغم این‌معایب‌کاربردتیریستوردر دستگاههای‌مختلف‌مرتبافزونی‌یافته‌وتیریستورهای با قدرت خیلی زیادی ساختـه می‌شوند . شکل ۱ ــ ۱ به طور تقـریبی مقادیـر ولتاژ بیشینه (ماکزیمم) ، جریان بیشینه (ماکزیمم)و قابلیت انتقال قدرت بیشینه تیریستورهای یک‌جنس‌را که در طول بیش از ده سال توسعه یافته است ، نمایش می‌دهد . درمراحل‌طراحی تضادی‌وجود دارد که نمی‌گذارد تیریستوری با مقدار ولتـاژ بیشینه (ماکزیمم) دارای مقدار جریان بیشینـه ودرنتیجه مقدارقدرت بیشینه نیزباشد و [درعمل] مقادیر قدرت ، معادل یک‌سوم حاصلضرب مقادیر اسمی ولتاژ و جریان پیک[3] فرض می‌شود .



شکل ۱ــ۱ رشد مقادیـر اسمی‌تیریستورها [ازنظر قدرت ، ولتاژ ، جریان]

1- Forward voltage drop

2- Rating

3- Peak

درسال ۱۹۶۸ تیریستورهای تندکار[1] ساخت آمریکا (که زودتر از ۱۵ میکروثانیه خاموش می‌شدند)مقادیر اسمی زیر را داشتند : ولتاژ پیک‌معکوس ۱۲۰۰ ولت ،جریان نیم سیکل متوسط ۳۰۰ آمپر و فرکانس کلید زنی یک کیلو هرتز و برای تیریستورهای کند کار[2] (بیشتراز ۱۵ میکرو ثانیه زمان خاموشی) مقادیر فوق به ۱۸۰۰ ولت و ۵۵۰ آمپر افزایش یافت . این مقادیر ازنظر اقتصادی نزدیک به مقادیر حد فرض شده است . برای سیستمهایی با ولتاژ و جریان بیشتر می‌توان از چندتیریستور به طور سری و یا موازی استفاده کرد .

اگر تنها یک‌تیریستور بخواهد مقدار قدرت سیستمی را کنترل‌کند ،بایستی هر قدرجریان مورد نیاز بیشتر می‌شود سطح مقطع پولک[3] سیلیکونی نیز بزرگتر شود ، به این ترتیب احتمال بروز عیب و نقص و پایین رفتن بهره‌وری از تیریستورکاهش می‌یابد . برای ولتاژهای‌بیشترپولک سیلیکونی بایستی ضخیمتر شود و این مستلزم افت ولتاژ مستقیم بیشتر ، جریان کمتر ، میزان تغییر جریان کمتر ،و جریان دریچه[4] بیشتری برای روشن کردن‌تیریستور است . به‌نظرمی‌رسدکه راه حل مصالحه آمیز این مشکل در گرو داشتن طراحان تیریستور زیادی است .

از سال ۱۹۶۸ به بعد ژاپنی‌ها پیشگام این‌طرحهابوده‌اندوتیریستورهای دیسکی[5] شکل با مقدار اسمی ۲۵۰۰ ولت ولتاژ پیک معکوس و ۵۰۰ آمپر جریان متوسط ساخته‌اند . در این تریستورها افت ولتاژ مستقیم کمتر از ۲/۲ ولت است . در سال ۱۹۷۰ ژاپنی‌ها تیریستوری با ولتاژ ۱۰،۰۰۰ ولت و ۴۰۰ آمپر عرضه کردند ، و این به‌آن معنی‌است‌که یکی ازاین‌تیریستورها به تنهایی قادر است با بیش از ۱/۳ مگاوات قدرت سروکار[6] داشته باشد .

۱ ـ ۳ محرکهای الکتریکی چرخان

یکی از مهمترین موارد استعمال الکترونیک قدرت کنترل محرکهای الکتریکی است . البته زمینه‌های کاربرد مهم دیگری نیز از قبیل واگردانی[7] معمولی قدرت‌الکتریکی[مبدلهای جریان مستقیم به جریان متناوب و بالعکس] ، ایجاد حرارت القایی[کوره‌های القایی] ، کنترل شدت نور[8][درلامپهای الکتریکی] و گوش به‌زنگ‌نگه‌داشتن منابع‌تغذیه یدکی وجود دارد . اما دراین کتاب فقط کنترل محرکهای الکتریکی مورد بحث قرار خواهد گرفت .

ولتاژ پایانه[9] (ورودی) [محرکهای الکتریکی] یکی‌ازعمومی‌ترین‌پارامترهای تنظیم‌کردنی[10] است که برای کنترل مشخصه‌های یک موتور ، مورد استفاده قرار می‌گیرد . مهمترین‌مشخصه‌مورد

1- Fast Turn-Off
2- Slow Turn-Off
3- Wafer
4- Gate
5- Disc thyristors
6- Handle
7- Conversion
8- Light dimming
9- Terminal
10- Adjust

کنترل در موتورهای الکتریکی سرعت است . قبل از اختراع تیریستور روشهای مرسوم برای تنظیم سرعت افزودن مقاومت به خط و یا استفاده از دستگاههای موتور ــ ژنراتور بود . در این روشها موتورهای کموتاتوری مناسبتر و رضایتبخش‌تر بودند .گاهی نیز سیستم تغییر فرکانس و یا تغییر قطب مورد استفاده قرار می‌گرفتند . همچنین زمانی یکسوکننده‌های جیوه‌ای[1] و تقویت‌کننده‌های مغناطیسی در سیستمهای کنترل جایگاهی پیدا کردند ، اما اکنون به نظر می‌رسد که فقط در موارد خاصی سیستمهای کنترل تیریستوری نتوانسته‌اند جایگزین روشهای کنترل قدیمی شوند .

تیریستورها برای کنترل محرکهای الکتریکی ، از وسایل خانگی مثل مته‌برقی ، مخلوط‌کنها ، آسیابها و دستگاههای تهویه گرفته تا سیستمهایی با محرکهای فرکانس متغیر مورد استفاده در کارخانه‌های نساجی ، به قدرت ۵ مگاوات و یا دستگاههای کنترل شده با نیمه هادی برای تحریک توربو ــ آلترناتورها در کارخانه‌های نورد فولاد به قدرتهای ۵۰ مگاوات مورد استفاده قرار گرفته‌اند .

۱ ــ ۳ ــ ۱ محرکهای الکتریکی جریان مستقیم

موتور جریان مستقیم برغم اینکه جابه‌جا کن (کموتاتور) دارد و از موتور جریان متناوب با مقادیر اسمی مشابه بزرگتر است ، ولی به علت امکان وسیع کنترل سرعتش ، که توسط کنترل ولتاژ ورودی آن صورت می‌گیرد ، رایجتر است . شکل ۱ ــ ۲ نشان می‌دهد که چگونه اگر منبع تغذیه جریان مستقیم و یا جریان متناوب باشد و از تیریستور استفاده شود ولتاژ مستقیم در پایانه‌های موتور تغییر می‌کند . به این منظور منبع تغذیه به طور غیر پیوسته به نحو موثری توسط مدار تیریستوری قطع و وصل می‌شود . باتغییر نسبت زمان قطع به وصل منبع تغذیه می‌توان مقدار متوسط ولتاژ را در پایانه‌های (دو سر ورودی) موتور تنظیم کرد . فرکانس قطع و وصل یا کلید ــ زنی[3] تیریستور به قدری سریع است که موتور به جای ضربه‌های تکی با مقدار متوسط ولتاژکار می‌کند .

در شکل ۱ ــ ۲ برای مدوله کردن مقدار متوسط ولتاژ مستقیم در پایانه‌های موتور چهار روش نشان داده شده است . در دو روش اول منبع تغذیه جریان متناوب است و این جریان توسط پل یکسوساز قابل کنترل به جریان مستقیم تبدیل می‌شود . در روش کنترل سیکلی[4] انتگرالی یک یا چند تا از نیم سیکلها در خروجی یکسوساز دریک زمان حذف می‌شوند .این روش فقط در جریانهای متناوب فرکانس بالا برای اجتناب از نوسان موتور در حوالی سرعت متوسطش مناسب

1- Mercury arc rectifier 2- Direct current drive

3- Switching

4- Integral-cycle-control

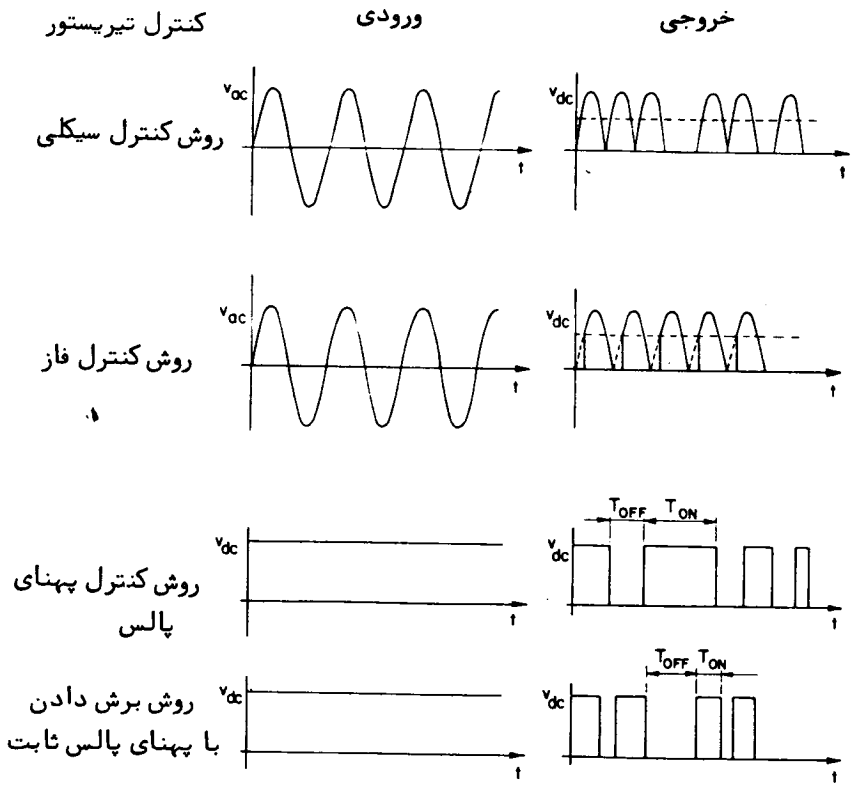
است . در این روش ضریب قدرت[1] بار الکتریکی[$\cos\varphi$]مربوط به طرف a.c. زیادی است . در روش کنترل فاز[2] برای کنترل مقدار متوسط ولتاژ مستقیم‌تیریستور فقط در طول قسمت‌معینی از هریک از نیم سیکلها هدایت می‌کند . در این روش ضریب قدرت بار کمتر ، ولی‌گستره[3] ولتاژ [به‌علت امکان روشن‌شدن‌تیریستور ازصفر تا ۱۸۰ درجه در نیم‌سیکلهای مثبت‌موجود]وسیعتر است .

دو روش دوم برای تنظیم ولتاژ پایانه (ورودی) موتور موقعی که از منبع تغذیه ولتاژثابت استفاده می‌شود ، مشابه یکدیگرند .تیریستور با قطع و وصل خیلی سریع خود ولتاژ ورودی را برش[4] می‌دهد . درخروجی مدار تیریستوریک‌سری پالس[5] ولتاژ متوسطی که کمتر از ولتاژ ورودی است ایجاد می‌کند . این‌مدارتیریستوری را مدار برشگر[6] گویند . با وجوداینکه درهردو روش زمان هدایت‌تیریستور ، T_{ON} و یا زمان قطع آن T_{OFF} ، ثابت است ، لیکن در مواقع ضروری می‌توان هر دو را تغییر داد .

برای کنترل‌سرعت اکثرموتورهای جریان‌مستقیم[به علت اینکه تیریستوردرحال‌هدایت ، در آخر نیم‌سیکل به خاطر پایین آمدن سطح ولتاژ تا صفر ولت به طور طبیعی خاموش می‌شودو درنتیجه مدارکمکی جهت قطع جریان‌تیریستور مورد نیاز نیست]استفاده از منبع تغذیه‌جریان متناوب معمول است . زیرا دراینجا تیریستوربرای خاموش شدن با مشکلی مواجه نمی‌شود . اما مواقعی که منبع تغذیه موتورهای جریان مستقیم بایستی باطریها[7] و پیلهای سوختی[8] باشند ، ازمدارهای برشگر استفاده می‌شود . در کلیدزنی سریع‌بایستی ازتیریستورهای‌مخصوصی‌استفاده شود . در این مدارها چون پس‌از روشن شدن‌تیریستور همواره ولتاژ مستقیمی بین‌آند وکاتدش وجود دارد[به طور طبیعی دیگر خاموش نخواهد شد] ، بایستی از مدارهای کمکی به‌منظور خاموشی تیریستوراستفاده کرد . چنانکه پیداست کنترل از طریق برشگر پیچیده است ، ولی با وجود این مورد استفاده قرار می‌گیرد .[این روش موارد استعمال زیادی در خودروهای برقی دارد] .

در کارخانجات نورد فولاد ، موتورهای جریان مستقیم و با سرعت قابل تنظیم سابقا توسط دستگاههای موتور ژنراتور[9] که ولتاژ d.c. متغیر و برگشت‌پذیری را فراهم‌می‌کرد کنترل می‌شد . این سیستم در حال حاضر با دستگاههای الکترونیک قدرت جایگزین شده است . در نتیجه بازده و قابلیت اعتماد آن بیشتر هزینه ترمیم و نگهداری کمتر ، و جوابدهی سریع حاصل شده است . سیستم الکترونیک قدرت بر خلاف سیستم موتور ـ ژنراتور که در آن

1- Power factor 2- Phase control 3- Range 4- Chop
5- Train of pulse 6- Chopper circuits 7- Conventional battery
8- Fuel cell 9- Motor-genarator set



شکل ۱ـ۲ روشهای مدوله کردن ولتـــاژ جریان مستقیم

موتور یک ماشین سنکرون (همزمان) است ، قادر به ایجاد ضریب قدرت پیشفـاز[1] نیست و این تنها عیب این سیستم است .

در خودروهای الکتریکی[2] موتورهای مجهزبه جابه‌جاکن[3] جریان متناوب تک‌فاز به علت مشکلات‌جابه‌جایی[4] با موتورهای جریان مستقیم کنترل‌تیریستوری جایگزین شده‌اند .

سیستم کنترل موتورهای جریان مستقیم با روش کنترل فاز تیریستوری را در یک کارخانه نوردفولاد[5] باقدرت ۱۱/۲ مگاوات به‌عنوان‌مثالی‌ازواگردانهای‌تیریستوری‌جدید، درزیرمی‌آوریم . هر یک از موتورهای اصلی‌سیستم ، دارای مقادیر اسمی[6] ۷۵۰ ولت ، ۴۱۵۰ آمپر و ۳۵ ــ ۷۰دور در دقیقه هستند . چهار واحد واگردان‌تیریستوری که بایستی قادر به تحویل ۲۷۵ درصدمقدار

1- Leading power factor
2- Electric-vehicles
3- Commutator
4- Commutation
5- Slabbing-mill
6- Rated

جریان‌موتورباشند وجود دارد ، لذا هرواحد دارای‌مقادیراسمی ۳۱۱۰ ــ ۸۵۶۰ کیلووات ، ۷۵۰ ولت و ۴۲۵۰ ــ ۱۱۴۰۰ آمپر است . هر واحد واگردان برای عمل یکسوسازی سه فاز شش بازو دارد ، و در هر بازو ۱۳ عدد تیریستور ، همگی به طور موازی ، قرار دارد . در نتیجه‌کلا ۶۲۴ عددتیریستور وجود خواهد داشت . هرتیریستور دارای‌مقادیراسمی ۲۵۰۰ولت‌ولتاژپیک مستقیم و ۴۰۰ آمپر جریان متوسط است . در این سیستم ازتیریستورهای نوع دیسکی که با نیروبی در حدود ۱۰۰ کیلوگرم ازهردو طرف به هم فشار می‌آورند با وسایل خنک‌کنندگی که از مس ساخته شده‌اند استفاده می‌شود . پولک سیلیکونی این تیریستورهادر حدود ۴ سانتی‌مترقطر دارد. هر یک ازتیریستورها مجهزبه‌سیستم خنک‌کن ، فیوز ، انتقال‌دهنده پالس برای روشن شدن ،ومدار حفاظتی‌خازن‌ــ مقاومت است .

ترکیب‌تیریستورهای انشعاب تعویض‌کن[1] وکنترل زاویه‌فازتیریستوری ، برای‌لکوموتیوهایی که تحت سیستم انرژی ۲۵ کیلو ولت ، ۵۰ هرتز کار می‌کنند کنترل‌پیوسته‌ای[2] راعرضه‌می دارد، که این مقادیر در ثانویه به ۱۱۵۰ ولت و ۲۸۰۰ آمپر تبدیل می‌شوند . عمل یکسوسازی توسط ۹۶ دیود و ۳۲ تیریستور انجام می‌شود .

مثال دیگر مربوط به محرکهای کششی[3] با کنترل‌تیریستوری ، مدار برشگر جریان مستقیم است که در تجهیزات ۱۵۰۰ ولتی دستگاههای راه‌آهن به کار می‌رود . برای هر زوج موتور یک مدارتیریستوری برشگر به کار برده شده است . درهر واحد این مدار دوشاخه‌موازی تیریستور که در هر شاخه شش تیریستورسری است ،وجود دارد . مقدار اسمی هرتیریستوربه منظورمقابله‌با ولتاژهای‌گذرا[4] ۸۰۰ولت‌است . فرکانس کلیدزنی‌بین ۱۰۰تا ۴۰۰ هرتز متغیراست . کنترل‌منتجه و هم‌چنین محرک ، دارای بازده ۹۵ درصد خواهند بود . بازده سیستم کنترل مقاومتی ۶۷ در صد است ، یعنی ، با جایگزینی برشگر افزایش بازده خواهیم داشت .

۱ ــ ۳ ــ ۲ محرکهای الکتریکی جریان متناوب

کنترل‌سرعت موتورهای جریان متناوب از طریق تغییر ولتاژ در پایانه‌های ایستانه (استاتور)[5] و یا چرخانه[6] (روتور) منحصر به موتورهای القایی (اندوکسیونی) است . روشهای‌زیادی‌که‌تا به حال برای کنترل سرعت مورد استفاده قرار گرفته است ، چه در ماشینی مجهزبه‌جابه‌جاکن وچه روش مقاومتی[قراردادن مقاومت متغیر در مدارچرخانه (روتور) یا ایستانه (استاتور)]تنها به

1- Tap Changer
2- Stepless
3- Traction drive
4- Transient
5- Stator
6- Rotor

موفقیت‌های متوسطی دست یافته‌اند . در حالی که غیر محدود بودن تغییرات‌سرعت‌موتورهای مختلف جریان مستقیم موقعیت خودرا دربازارحفظ کرده‌اند . برای تغییر و تعدیل ولتاژ از هر وسیله‌ای که استفاده شود ، تیریستورمی‌تواند به همان خوبی عمل تغییر ولتاژ را انجام دهد .

تنظیم سرعت موتورهای جریان متناوب با تغییردادن ولتاژ ورودی[به‌علت‌محدودبودن تغییرات سرعت]مناسب نیست و موارد استعمال آن نیز محدود است . ولی کنترل سرعت این موتورها با تغییر فرکانس ورودی با مدارهای‌تیریستوری دارای اهمیت زیادی است .وارونگرها[1] (معکوس کننده‌ها) ثابت بودن سرعت یعنی مشخصه ذاتی موتورهای القایی‌وموتورهای همزمان (سنکرون) را رفع می‌کنند .

روشهای تهیه ولتاژ متناوب تغییرپذیر با فرکانس تغییرپذیر از منبع ولتاژی با فرکانس ثابت یا از منبع جریان مستقیم در شکل ۱ ــ ۳ نشان داده شده است . مثل حالت جریان مستقیم شکل ۱ ــ ۲ در اینجا نیز مدوله کردن ولتاژ متوسط توسط روش کنترل سیکلی و روش کنترل فاز انجام می‌شود . مضافا بر اینکه در روش کنترل فاز از جریان متناوب‌ورودی می‌توان یک‌منبع فرکانس کم‌به وجود آورد ولی امکان‌تهیه جریان فرکانس زیادبا این روش وجود ندارد، مگر اینکه به جابه‌جایی‌اجباری (قطع هدایت‌تیریستور قبل از رسیدن به انتهای نیم سیکلها) متوسل شد . به منظور تهیه منبع جریان متناوب با فرکانس زیاد می‌توان از ولتاژ جریان‌مستقیم استفاده کرد ،و با استفاده از وارونگرها به‌صورت پله‌ای[2] کلیدزنی کرد شکل ۱ ــ ۳ و جریان را در سیم‌پیچیهای موتور متناوبا تغییر داد . گسستگیهای[3] ایجاد شده در عمل کلید زنی را می‌توان با اجزای القایی مدار و شکل دادن[4] موج به حداقل رساند . اگر منبع تغذیه جریان متناوب‌باشد این جریان را پس از یکسوکردن و تبدیل به جریان‌مستقیم توسط مدارهای‌وارونگر (معکوس کننده) می‌توان به جریان متناوب با فرکانس تغییرپذیر تبدیل کرد .

موتورهای القایی وموتورهای‌همزمان (سنکرون)چون فاقدجابه‌جاکن‌هستند، محدودیتهای موتورهای جریان مستقیم را نخواهند داشت . موتورهای همزمان (سنکرون) مزیتی که نسبت به موتورهای القایی دارند این است که آنها با سرعت دقیق به طور همزمان کارمی‌کنند درصورتی که موتورهای القایی با سرعتی کمتر از سرعت همزمانی (سنکرون)و سرعتی که وابسته به‌باراست کارمی‌کنند . سیستم‌پس‌خور (تغذیه برگشت)[5] این اشکال راحل می‌کند ولی سیستم‌حلقه‌باز[6] با موتورهای‌همزمان (سنکرون) که به تعدادخیلی زیاد به طورسری اتصال یافته‌اند اقتصادی‌تر هستند . مثلا در کارخانجات نساجی نزدیک به یکصد موتور توامـا به طور سری کار می‌کنند .

مواردا‌ستعمال موتورهای جریان‌متناوب باسرعت تغییرپذیر[7] که توسط وارونگرها (معکوس

1- Inverter 2- Stepped manner 3- Discontinuity
4- Wave shaping 5-Feedback loop 6-Openloop 7-Variable speed

کننده‌ها) کنترل می‌شوند ، شامل جرائقالها ، پمپها ، دستگاههای‌تهویه ،و کارخانجات نساجی هستند . این موارد احتیاج به تنظیم سرعت همزمان شده و یا محرکی با سرعت‌تغییرپذیرفاقد جابه‌جاکن وجاروبک ، دارند . تغییر فرکانس برای کنترل محرکهای الکتریکی معمولا از ۲۰ تا ۱۲۰ هرتز گسترش می‌یابد . تعدادی از وارونگرهای تیریستوری اگر از منبع‌فرکانس اصلی‌کنترل شوند می‌توانند به طور موازی کار کنند . وارونگرهای موازی ، موقعی که عمل احیاسازی[1] مد نظر باشد حاوی مزایایی هستند .

۱ ـ ۳ ـ ۳ گزینش محرکها و سیستمهای کنترل

کنترل سرعت را می‌توان از یک واگردان (مبدل) تیریستوری که خروجی آن موتورجریان مستقیمی را تغذیه می‌کند ، به دست آورد . جابه‌جاکن‌مکانیکی یک موتور جریان مستقیم ،تغییر دهنده فرکانسی است که جریان مستقیم ورودی‌به جاروبکها رابه‌جریان‌متناوب‌درسیم‌پیچیهای آرمیچر تبدیل می‌کند . به همین ترتیب کنترل سرعت را می‌توان از تغذیه موتورجریان‌متناوب با وارونگر تیریستوری به دست آورد . یک واگردان تیریستوری و موتورجریان‌مستقیم ارزانتر از سیستم موتور جریان متناوب و وارونگر تیریستوری است . سیستم وارونگر تیریستوری با موتور جریان متناوب در شرایط‌خاصی که محیط‌کار اجازه کاربرد جابه‌جاکن و جاروبک را نمی‌دهد ، مثل صنایع هواپیمایی و معادن ، به کار می‌رود .

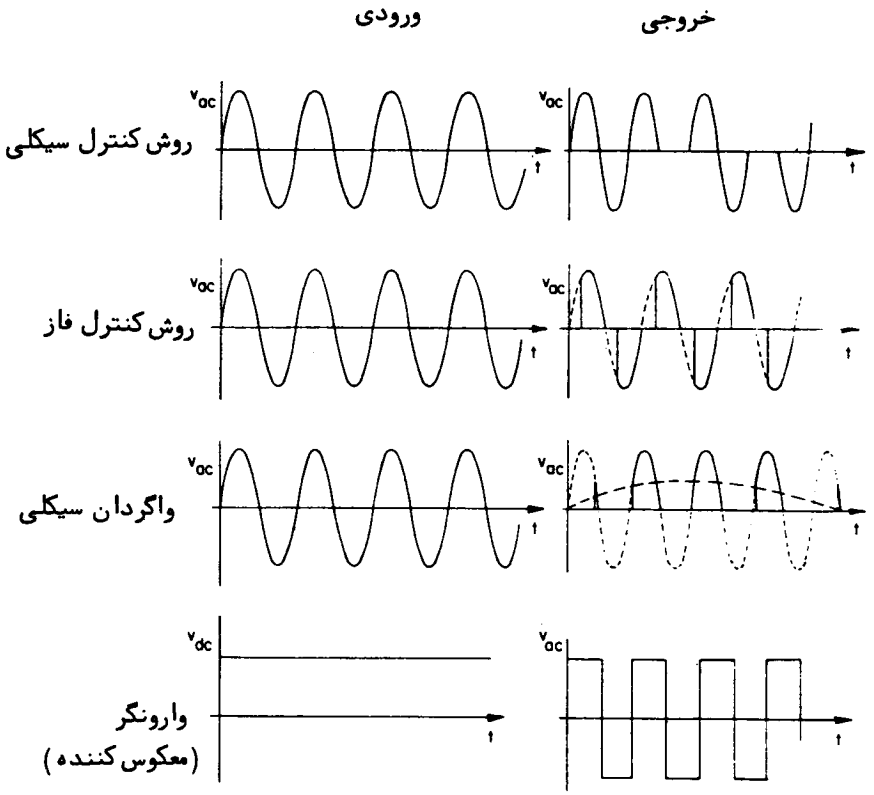
در اینجا بد نیست که سیستمهای الکترونیک قدرت را با سیستمهای دیگر که‌دارای‌همان مشخصه‌های کنترل سرعت هستند مقایسه کنیم . کوششهایی در جهت نشان دادن اختلاف قیمتها و بازده‌ها انجام و منتشر شده است . نتایج این مقایسه در شکلهای ۱ ـ ۴ و ۱ ـ ۵ نشان داده شده است . نتایج عامی که از این بررسیها به دست می‌آید این است که به نظر می‌رسد سیستمهای الکترونیک قدرت گرانتر از سیستمهای معمول[2] است ، اما در عوض‌دارای بازده بیشتری است . در هر حال برآورد هزینه سیستم تیریستوری در مقایسه با هزینه موتور مجهز به جابه‌جاکن‌ویاسیستم واردلئونارد[3] کار آسانی‌نیست ، چون هزینه سیستمها مجموعه‌ای از هزینه‌های خرید کارخانه ، نصب ونگهداری ،و هزینه‌های مختلف‌دیگر است . همچنین هزینه به نوع منبع تغذیه ، شرایط محیط، تلرانس‌های کنترل[4] سرعت و گستره سرعت و اینکه‌آیاترمز دینامیکی[5] و احیاسازی انرژی لازم است یا نه ، بستگی دارد .

امروزه یک چیز روشن است و آن اینکه محرکهای کنترل‌تیریستوری‌هرچه‌بیشتربه کار گرفته می‌شوند . هم چنین قابل ذکر است که سیستم‌های الکترونیک قدرت به صورت استاندارد در-

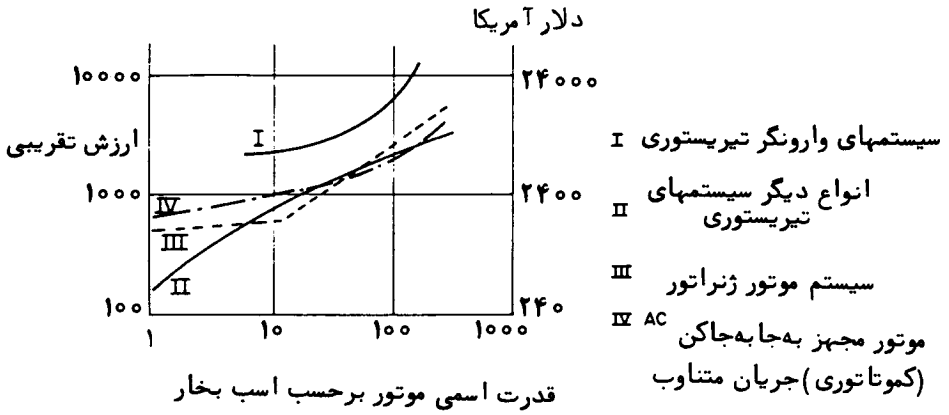
---

1- Regeneration 2- Conventional systems

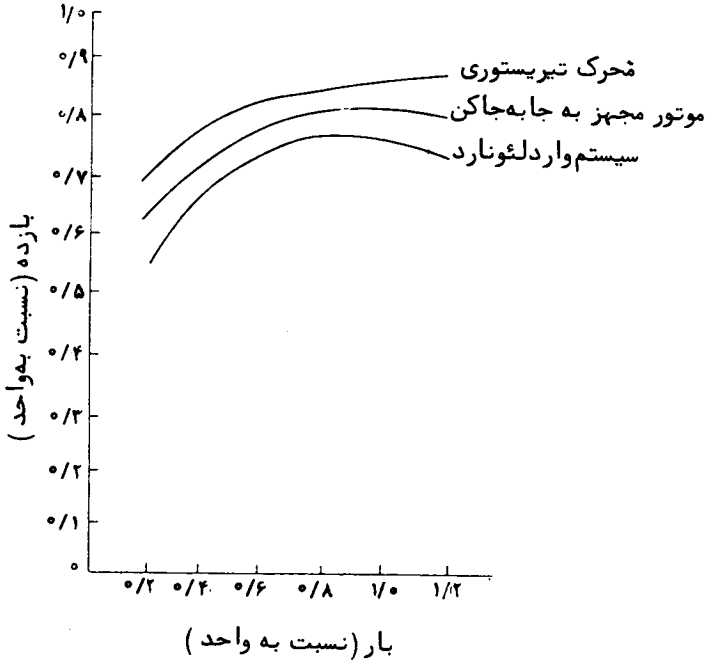
3- Vard-leonard systems 4-Control tolerance 5-Dynamic braking



شکل ۱ـ۳ روشهای مدوله کردن ولتاژ جریان متناوب و فرکانس



شکل ۱ـ۴ هزینه‌های سیستم محرک



شکل ۱ـ۵ بازده سیستم‌های محرک

می‌آیند . مدولهای [1]تیریستوری و مدارهای کنترل منطقی برای استفاده در موتورهای ساده و در برگزینی قطعات پیش ساخته الکترونیک قدرت مناسب ، برای بارهای معین ، به‌کارمی‌آیند .

1- Modular

مراجع

1. *Power applications of controllable semiconductor devices* (1965). IEE Conference Publication, No. 17.

کتابنامه

Special Issue on High-Power Semiconductor Devices (1967), *Proc. IEEE*, 55.

Gutzwiller, F. W. (1967), 'Thyristors and diodes - the semiconductor work horses', *IEEE Spectrum*, 4, 102-111.

Storm, H. F. (1969), 'Solid-state power electronics in the U.S.A.', *IEEE Spectrum*, 6, 49-59.

Power thyristors and their applications (1969). IEE Conference Publication, No. 53.

مسائل

۱ ــ ۱ . چون تیریستور یک کلیــد سریع العمل است . لذا می‌تواند باعث اعمال شدن ولتــاژ بار به هر نقطه‌ای از شکل موج شود . بــه علاوه تیریستــور می‌تواند تعداد چرخه‌های شکل موج را نیز که در بار ظاهر می‌شوند کنترل کند . درنتیجه ، درکنترل‌قدرت‌روی موج سینوسی دلخواه تغییر شکلی وجود خواهد داشت . در موارد کاربرد جریان متناوب غالبا دانستن مقدار موثــر شکل موج تغییر شکل یافته ضروری است ، در حالی که در موارد استعمال جریان مستقیــم مقدار متوسط موج اهمیت خواهد داشت .

برای حالات زیر مقادیر موثر و متوسط جریان شکل موج را محاسبه کنید :

(الف) موج سینوسی $i(t)=100 \sin 377t$

(ب) تمام موج سینوسی یکسو شده ، که در آن معادله موج برای نیم‌سیکل‌اول‌عبارت‌است از $i(t) = 100 \sin 377t$

(پ) نیم‌موج سینوسی‌یکسوشده ، که در آن معادله موج برای نیم سیکل اول عبارت است از $i(t) = 100 \sin 377t$

(ت) موج سینوسی با فاز کنترل شده $i(t) = 100 \sin 377t$ که در آن زاویه‌آتش برای نیم‌سیکلهای مثبت و منفی $\alpha = 90$ درجه است . این عمل توسط یک تریــاک یا دو تیریستــور اتصال موازی معکوس امکان پذیر است .

(ث) موج سینوسی $i(t) = 100 \sin 377t$ با کنترل قطع و وصل سیکلهــای کامل معینی طبق شکل ۱ ــ ۳ با سه سیکل وصل ، ۲ سیکل قطع و ۳ سیکل وصل و غیره .

(ج) موج مربعی با نیم سیکلهای مثبت و منفی و با دامنه ۱۰۰ آمپر و فرکانس ۶۰هرتز

(چ) موج مثلثی ، با نیم‌سیکلهای مثبت و منفی و با دامنه ۱۰۰ آمپر و فرکانس ۶۰ هرتز

جواب :

(الف)	$I_{av} = 0$	$I_{rms} = 70/7$ A
(ب)	$I_{av} = 63/6$ A	$I_{rms} = 70/7$ A
(پ)	$I_{av} = 31/8$ A	$I_{rms} = 50$ A
(ت)	$I_{av} = 0$	$I_{rms} = 50$ A
(ث)	$I_{av} = 0$	$I_{rms} = 54/8$ A
(ج)	$I_{av} = 0$	$I_{rms} = 100$ A
(چ)	$I_{av} = 0$	$I_{rms} = 57/7$ A

۱ ــ ۲ . تیریستورها می‌توانند شکل موج ولتاژ منبع تغذیه را برش دهند و آن را یکسو و وارون کنند . به منظور تحلیل اثرات تنظیم شکل موج معمولا آنرا به مولفه‌اصلی و مولفه‌های مرتبه‌بالاتر تجزیه می‌کنند . در زیر مثالهائی از این تحلیل هارمونیکها آورده شده است .

دامنهٔ مولفه‌های اصلی و هارمونیکها (تا هفتم) را برای دوحالت زیر به دست آورید .

(الف) موج مربعی با نیم سیکلهای مثبت و منفی با دامنه I آمپر و طول موج ۲n رادیان

(ب) موج سینوسی کاملا یکسوشده ، که معادله اولین نیم سیکل آن‌عبارت‌است از $i(\theta) = I_m \sin\theta$

راهنمایی : اگر

$$F(\theta) = a_0 + a_1\cos\theta + b_1\sin\theta + a_2\cos 2\theta + b_2\sin 2\theta + \cdots\cdots$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} F(\theta)\, d\theta \ , \quad a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(\theta)\cos n\theta\, d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f(\theta)\sin n\theta\, d\theta$$

جواب :

(الف) $$i(\theta) = \frac{4I}{\pi}\left(\sin\theta + \frac{1}{3}\sin 3\theta + \frac{1}{5}\sin 5\theta + \frac{1}{7}\sin 7\theta\right)$$

(ب) $$i(\theta) = \frac{2IM}{\pi} + I_M\left(\frac{2}{3}\cos 2\theta + \frac{2}{15}\cos 4\theta + \frac{2}{35}\cos 6\theta\right)$$

فصل دوم

تیریستور

۲ ـ ۱ مقدمه

تیریستور کلیدی است کـه در حالت وصل یـا روشن بودن عبور جریان را در مداری امکان ـ پذیر می‌سازد و در حالت قطـع یا خاموش بودن، مسیر جریان نیز قطع و عبـور جریان غیـر ممکن است. تیریستورفاقد قسمتهای متحرک است و در موقع کار به صورت یک کلید نیازی نیز به آنها ندارد.

تیریستورها ازچهار لایه نیمه هادی ساخته شده‌اند و دارای سه اتصال خروجی هستند، یک‌جفت‌از آنها (کاتد و دریچه) برای روشن کردن (وصل) و جفت‌دیگر (کاتد وآند) برای عبور جریان بار مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به توضیح است که یکی از اتصالهای خروجی در دو منظور فوق مشترک است. چگونگی طرز عمل تیریستوربه صورت کلید، نحوه روشن وخاموش شدنش و چگونگی محافظت آن در این فصل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

تیریستورهابه یک دسته از وسیله‌های[1] نیمه هادی متعلق هستند. شرح مختصری درباره بعضی از عناصر نیمه هادی در فهم محدودیتهای آنها به خواننده کمک‌می‌کندو اهمیت کاربرد تیریستور را درکنترل دستگاههای قدرت الکتریکـی آشکار می‌سازد. گاهی اوقـات به کلید دو طرفه‌ای موسوم به تریاک[2] نیز اشاره‌ای می‌شود، زیرا کاربرد آن در مدارهای کـم قدرت شروع و با بهبود و اصلاح تکنیکهای تولید، مصرف آن افزونتر هم می‌شود و عاقبت‌در اکثر مدارهای جریان متناوب جایگزین تیریستورخواهد شد. تریاک عنصری است که عبور جریان را در هردو جهت می‌تواند کنترل کند در حالی‌که تیریستورفقط در یک جهت‌عبورجریان را کنترل‌می‌کند.

1- Devices

2- Triac

۲ ـ ۲ نیمه هادیها

الکترونهایی که در عملکرد نیمه هادیها در مدارهای الکتریکی مهم هستند الکترونهای ظرفیت[1] نام دارند، که اینها دورترین الکترونها از هسته اتمها[2] هستند. این الکترونها می‌توانند در هدایت الکتریکی شرکت کنند زیرا آنها برای انتقال به سطح انرژی بالاتر و فرار از نیروی جاذبه هسته اتم به مقدار انرژی خیلی کم احتیاج دارند.

الکترونی که از مسیر چرخشی[3] خود خارج می‌شود اتم را که به صورت یک یون باردار مثبت درآمده است، ترک می‌کند. این یون باردار به سختی در ساختمان کریستال نگهداری می‌شود و برای هدایت، مناسب نیست.

از مهمترین نیمه‌هادیهایی که دارای چهار الکترون ظرفیت طبق شکل ۲ ـ ۱ هستند سیلیکون و ژرمانیوم هستند. چهار الکترون دیگر برای تکمیل زیر لایه انرژی ظرفیت[4] یک کریستال یا ماده جامد مورد نیاز است. الکترونهای ظرفیت یک اتم و نزدیکترین چهار الکترون همسایه‌اش مشترکا یک پیوند هم ظرفیتی[5] تولید می‌کنند. بالاتر از باند انرژی ظرفیت باند ممنوعه‌ای[6] وجود دارد که برای آزاد کردن الکترونی جهت هدایت می‌بایستی آن را تا حد بالای باند ممنوعه تحریک کرد. این ردیف انرژی به باند مجاز[7] موسوم است. بین ظرفیت و باند مجاز در ۳۰۰ درجه حرارت کلوین برای ژرمانیوم ۰/۷۲ الکترون ولت و برای سیلیکون ۱/۱ الکترون ولت پهنای شکاف انرژی موجود است. بنابراین می‌توان برای ایجاد الکترونهایی در باند هدایت و حفره‌هایی در باند ظرفیت، انرژی اضافی، خواه به شکل انرژی نورانی، حرارتی، تشعشع، هسته‌ای، میدان الکتریکی و خواه از طریق تزریق ماده ناخالصی، به نیمه‌هادی افزود و به این ترتیب جفتهای الکترون ـ حفره در ساختمان کریستال ژرمانیوم یا سیلیکون ایجاد کرد. این جفتها برای هدایت الکتریکی می‌توانند آزادانه در داخل کریستال حرکت کنند. درجایی که کریستال فقط متضمن هدایت و ظرفیت باشد آن را نیمه هادی طبیعی[8] نامند.

به منظور تغییر خواص الکتریکی نیمه هادی طبیعی سیلیکون و ژرمانیوم می‌توان به داخل کریستال آنها مقدار کمی ناخالصی وارد کرد تا اتمهای ماده آغارشی[9] محل اتمهای کریستال نیمه هادی طبیعی را اشغال کنند. ناخالصیهایی با سه الکترون در زیر لایه ظرفیتشان، در مقابل چهار الکترون ظرفیتی سیلیکون و ژرمانیوم، به ناخالصیهای پذیرا[10] موسومند. چند تا

1- Valence Electron
2- Nucleus
3- Orbital path
4- Valence Energy
5- Covalent bond
6- Forbiden band
7- Permissible band
8- Intrinsic semiconductor
9- Doping
10-Acceptor impurities

از این ناخالصیهای مورداستفاده درنیمه‌هادیها عبارتنداز بر[1] ، گالیوم ، آلومینیم وایندیوم . ناخالصیهایی که دارای ۵ الکترون در مدار ظرفیتشان هستند به ناخالصی‌های دهنده[2] موسوم هستند که به طور مثال می‌توان از آنتیموان[3] ، ارسنیک و فسفر نام برد .

یک نیمه هادی طبیعی چهار پیوند زوج الکترونی کامل دارد . در حالت آغارش نیمه ـ هادیهاباناخالصی پذیرا ، هفت الکترون برای اشتراک بین چهار اتم مجاور وجـود دارد . در نتیجه[برای تکمیل مدار الکترونی] یک الکترون کم است . نقصان یک الکترون درکریستال‌نیمه هادی را حفره می‌نامند و این بهاین‌معنی است که کریستال دارای یک بار مثبت خالص[4] است . این فقدان الکترون می‌تواند توسط الکترونی از اتم مجاور پرشده که این امر سبب حرکت حفره در جهت عکس حرکت الکترون[یعنی‌به‌داخل کریستال]می‌شود . ناخالصیهای سه ظرفیتی رابه دلیل اینکه برای‌تکمیل مدار خود ازکریستال نیمه‌هادی الکترون می‌گیرند ، ناخالصیهای پذیرا می‌گویند . نیمه هادیهای آغاریده شده[5] توسط ناخالصیهای پذیرا به نیمه‌هادیهای نوع p [6] موسومند .

نیمه‌هادیهای‌آغاریده شده توسط ناخالصیهای‌دهنده به نیمه هادیهای‌نوع n [7]موسومند ، در این حالت یک الکترون اضافی ،پس از اینکه نزدیکترین چهار اتم نیمه هادی هشت‌الکترون مورد نیاز خود را برای پرکردن باندهای ظرفیت تسهیم کردند ، باقی می‌ماند .

الکترونهای دهنده و حفره‌های پذیرا هر دو برای هدایت الکتریکی مناسب هستند .

۲ ـ ۲ ـ ۱ دیود (یا اتصال p-n)

از پیـوند نیمه هادی نـوع p با نیمه هادی نـوع n ، در صورتی کـه پیوستگی کاملی‌در شبکه کریستالی وجود داشته باشد یک اتصال p-n به‌دست‌می‌آید . این اتصال دیـود یکسو ـ کننده‌ای است کـه در شکل ۲ ـ ۲ به طور شمایی نشان داده شده است . در این اتصال p-n الکترونهای اضافی لایه n به طرف لایه p و حفره‌های اضافی لایه p به طرف لایه n اشاعه[8] می‌یابند ، که در نتیجه ولتاژ الکترواستاتیکی کوچکی برای مخالفت با عبور بارهای بیشتردر محل اتصال به وجود می‌آید .

اصطلاحا در نیمه هادی نوع n حامل اکثریت بار[9] الکتـرون است در حالی کـه حامـل

1- Boron
2- Donor impurities
3- Antimony
4- Net
5- Dopped
6- P-Type semiconductor
7- N-Type semiconductor
8- Diffuse
9- Majority carriers

اقلیت بار[1] حفره است . به همین ترتیب برای نیمه هادی نوع p حامل اکثریت ، حفره و حامل اقلیت ،الکترون خواهد بود . بعضی از حاملهای اکثریت که دارای انرژی کافی هستند می‌توانند از سد پیوندگاه[2] عبور کنند . در نتیجه الکترونی که به داخل ناحیه p عبور می‌کند با حفره‌ای ، ترکیب و یا حفره‌ای که به داخل ناحیه n عبور می‌کند با الکترونی ترکیب می‌شود .مجموع دو عبور بار فوق جریان باز ترکیبی را به وجود می‌آورند . به‌علت افزایش درجه‌حرارت، بعضی از پیوندهای الکترونی داخل کریستال شکسته ، الکترونها و حفره‌های آزادی تولید می‌شود . سد پتانسیل ، حاملهای اقلیت مجاورش را جذب کرده و آنها را در طول اتصال شتاب‌دار می‌کند تا به حاملهای اکثریت تبدیل شوند . جریان حاصل ازعبور این‌بارها راجریان‌حرارتی می‌نامند ، در هر حال جریان کل در پیوندگاه ، یعنی جریان باز ترکیبی و جریان حرارتی به علت عدم وجود مدار خارجی صفر است .

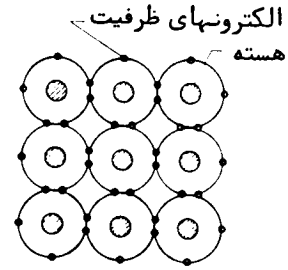
توسط بارهای ثابت دو سوی پیوندگاه p-n شکل ۲ ــ ۲ خازنی به وجود می‌آید که به خازن منطقه تهی[3] موسوم است . مقدار موثر این خازن و پهنای منطقه تهی[4] تابعی از ولتاژ اعمال‌شده به پایانه‌های کاتدوآند دیود است . بعضی‌مواقع به ولتاژ فوق‌ولتاژبایاس (گرایش)[5] اتصال گفته می‌شود .

ولتاژ بایاس معکوس خارجی کاتد را نسبت به آند مثبت می‌کند و به علت پایین بودن مقاومت مخصوص تنه[6] نیمه هادی ، در اتصال بایاس معکوسی وقوع‌می‌یابدو باعث کاهش جریان باز ترکیبی می‌شود ، اما جریان‌حرارتی مستقل‌باقی می‌ماند . حاصل جمع جریانهای بازترکیبی و حرارتی با افزایش ولتاژ بایاس معکوس افزایش‌می‌یابند ،ولی خیلی زود به یک سطح اشباع می‌رسند . این افزایش ولتاژ بایاس اگر ادامه یابدبالاخره به‌علت‌افزایش انرژی‌حاملهای‌اقلیت، حاملهای دیگر اقلیت شروع به حرکت می‌کنند ، و باعث افزایش ناگهانی جریان معکوس دیود می‌شود . به این حالت شکست بهمنی[7] می‌گویند . در بایاس معکوس بعد از عمل شکست همان طوری که در شکل ۲ ــ ۳ مشاهده می‌شود ، تغییرات ولتاژ مستقل ازجریان است .این‌خاصیت اتصال p-n بایاس معکوس همان مشخصه دیود زنر[8] است .

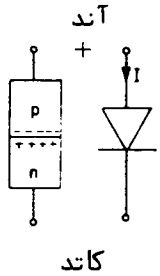
ولتاژ بایاس مستقیم‌خارجی،آند را (نسبت‌به‌کاتد)مثبت‌می‌کندو باعث کاهش‌سدپتانسیل پیوندگاه می‌شود . جریان حرارتی که همان حرکت حاملهای اقلیت است ، بدون تغییرمی‌ماند ولی تعداد زیادی از حاملهای اکثریت کم انرژی بر میدان الکتریکی ترمزکننده فایق آمده و از

1- Minority charge carriers
2- Junction
3- Depletion layer capacitance
4- Depletion layer
5- Bulk resistivity
6- Junction bias voltage
7- Avalanch breakdown
8- Zener diode

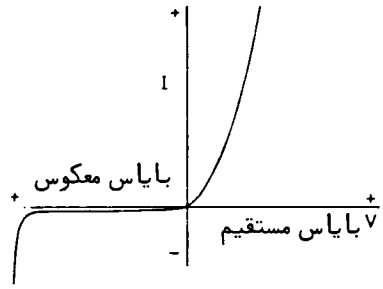
مدار خارجی عبور خواهند کرد ، و در نتیجه در مسیر عبور جریـان در حالت بایـاس مستقیم امپدانس خیلی کمی وجود خواهد داشت .



شکل ۲ـ۱ مدلی از ساختمان اتمی یک ماده نیمه هادی که در آن نحوه اشتراک الکترونهای ظرفیت نشان داده شده است .



شکل ۲ـ۲ ساختمان و نماد دیود یکسوکننده



شکل ۲ـ۳ مشخصه ولتاژ جریان یک دیود

۲ ـ ۲ـ۲ ترانزیستور (اتصال نوع n-p-n)

شکل ۲ ـ ۴ نمایش نموداری[1] ساختار پولک نیمه هادی و نمـاد الکتریکی ترانزیستور رابه‌طور ساده نشـان می‌دهد . اگـر اتصال امیتر ـ پایـه به طـور مستقیـم بایـاس شود ، پتـانسیـل الکترواستاتیکی V_{EB} کاهش خواهد یافت و حاملهای اکثریت‌زیادی ازامیتر به ناحیه‌پایه‌داخل خواهند شد . ولی به علت زیاد بودن مقاومت مخصوص ناحیه پایه ، حفره‌های زیادی از پایـه به امیتر عبور نخواهند کرد . اگر اتصال کلکتور ـ پایه به طور معکوس بایاس شود یعنی پایانـه کلکتور نسبت به پایه مثبت باشد در این صورت به علت افزایش V_{CB} حاملهای اکثریت کمی ،

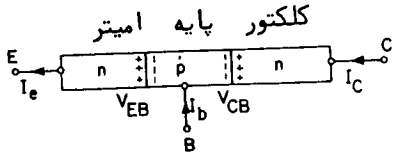
1- Diagrammatic

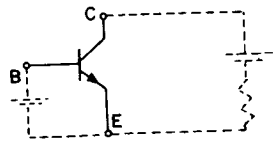
از این اتصال عبور خواهند کرد و پایه تعداد زیادی الکترون از امیتر جمع می‌کند که اگر آنها به اتصال پایه ــ کلکتور برسند ، شتابدار شده از مدار خارجی عبور می‌کنند .

(الف) حالت قطع [1]

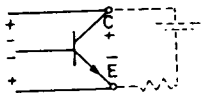
اگر هر دو اتصال (کلکتور ــ پایه وامیتر ــ پایه) به طور معکوس بایاس شوند جریان کلکتور خیلی کوچک می‌شودو تمام ولتاژ اعمال شده بین دو سر ترانزیستور یعنی کلکتور ــ امیتر قرار می‌گیرد . شکل ۲ ــ ۵ این شرایط را که به حالت قطع ترانزیستور موسوم است نشان می‌دهد.

افزایش ولتاژ بایاس معکوس، تا زمانی‌که حاملهای اقلیت که درپیوندگاه‌شتابدارمی‌شوندو انرژی کافی برای برخورد و بیرون راندن حاملهای اقلیت و اکثریت‌درکریستال راداشته‌باشند، باعث ازدیاد پهنای منطقه تهی می‌شود . نتیجه این عمل شکست بهمنی است و مقدار بیشینه ولتاژمجاز کلکتورنیز ازاین طریق تعیین‌می‌شود . اگر ولتاژ بایاس معکوس بهاندازهٔ کافی‌افزایش یابد تاجایی که منطقه‌های تهی یکدیگر را لمس کنند ، درصورتی‌که جریان کلکتور توسط مقاومت خارجی مناسبی محدود نشود ترانزیستور از بین خواهد رفت . به منظور اینکه باز ترکیب الکترونها در راه عزیمتشان از امیتر به کلکتور کمینه شود ، ترانزیستور طوری ساخته می‌شود که ناحیه پایه باریکی داشته باشد . ولی متاسفانه باریک بودن ناحیه پایه به این معنی است که اعمال ولتاژ کلکتور ــ پایهٔ کمی باعث از بین رفتن ترانزیستور خواهد شد . ولتاژی که در آن منطقه‌های تهی یکدیگر را لمس می‌کنند گاهی به ولتاژ "مسیربازکنی" [2] موسوم است .





شکل ۲ــ۴ ساختمان و نماد ترانزیستور



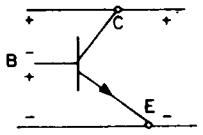
شکل ۲ــ۵ بایاس ترانزیستور برای حالت قطع یا بدون عبور جریان

(ب) ناحیه خطی [3]

اگر اتصال امیتر ــ پایه به طور مستقیم بایاس شود و اتصال کلکتور ــ پایه به طور معکوس

1- Cut-off 2- Punch-through 3-Linear region

بایاس شود جریان به نحوی که پیش از این گفته شد عبورخواهدکرد . هرچه ولتاژ پایه‌مثبت‌تر شود جریان پایه ، جریان بار کلکتور و ولتاژ دو سر بار زیادتر می‌شود ، ولی ولتاژ بین دو سر ترانزیستور تا زمانی که به نقطه اشباع نرسیده است کمتر خواهد شد . شکل ۲ ــ ۶ نحوه بایاس کردن ترانزیستور را در ناحیه خطی نشان می‌دهد .

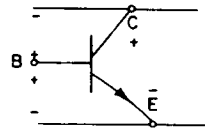


شکل ۲ــ۶ بایاس ترانزیستور برای عبور جریان کنترل شده

(پ) اشباع[1]

اگر عبور جریان ترانزیستور تنها توسط مقاومت بار محدود شود ، و هر دو اتصال ترانزیستور به طور مستقیم بایاس شوند ، حالت اشباع در ترانزیستور بوقوع می‌پیوندد . در این حالت اختلاف ولتاژ امیتر ــ کلکتور خیلی‌کم و فقط درحدود ۲۵ میلی‌ولت خواهدبود . شکل ۲ ــ ۷ بایاس ترانزیستور برای حالت اشباع را نشان می‌دهد .

با استفاده از حالتهای قطع و اشباع ترانزیستور می‌توان آن را مثل یک کلید قطع‌ووصل به‌کاربرد . یک بایاس پله‌ای مثبت[2] در پایه ترانزیستور n-p-n را بدون گذشتن‌ازناحیه‌خطی که دارای‌اتلاف‌حرارتی‌زیادی‌است ، به‌طورکامل روشن‌می‌کندیابه حالت‌اشباع‌می‌برد .قابلیتهای ولتاژ و قدرت در ترانزیستورها محدود است ، اما کلید نیمه‌هادی مشابهی با قابلیت کاربرد در ولتاژ و قدرتهای خیلی بالا وجود دارد . این کلید تیریستور یا یکسو کننده قابل کنترل سیلیکونی است .



شکل ۲ــ۷ بایاس ترانزیستور برای جریان اشباع

1- Saturation 2- Positive step

۲-۲-۳ تیریستور (یا یکسو کننده قابل کنترل p-n-p-n)

تیریستور یک وسیله نیمه هادی چهارلایه سه اتصالی با سه سر خروجی است و از لایه‌های نوع p و n سیلیکونی که به طور متناوب قرارگرفته‌اند ساخته شده است. شکل ۲ ــ ۸ نماد الکتریکی و نمایش نموداری ساختارتیریستور را نشان می‌دهد. ناحیه p انتهایی آند، ناحیه n انتهایی کاتد و ناحیه p داخلی دریچه یا گیت[1] است. آند از طریق مدار بار به طور سری به کاتد وصل می‌شود. این وسیله اساسا یک کلید است و همواره تا زمانی که به پایانه‌های آند و دریچه ولتاژ مثبت مناسبی نسبت به کاتد اعمال نشده است در حالت قطع (حالت ولتاژ مسدود کننده) باقی می‌ماند و امپدانس بینهایتی از خود نشان‌خواهدداد. در حالت وصل و عبور جریان بدون احتیاج به علامت[2] (ویاولتاژ) بیشتری روی دریچه‌به‌عبور جریان ادامه خواهد داد. در این حالت به طور ایده‌ال هیچ امپدانسی در مسیر جریان‌ازخود نشان نمی‌دهد. برای قطع کلید و یا برگرداندن‌تیریستوربه حالت‌خاموشی بایستی روی‌دریچه علامت و یا ولتاژی نباشد و جریان در مسیر آند به کاتدبه صفر تقلیل یابد. تیریستوربه‌طوری که از شکل ۲ ــ ۸ پیداست عبور جریان را فقط در یک جهت امکان پذیر می‌سازد.

در شکل ۲ ــ ۹ اگر به پایانه‌های تیریستور ولتاژ بایاس خارجی‌اعمال نشود، حاملهای اکثریت در هر لایه تا زمانی که ولتاژ الکترواستاتیکی داخلی[3] به وجود آمده از انتشار بیشتر حاملهاجلوگیری کند، منتشر می‌شوند. اما بعضی از حاملهای اکثریت انرژی کافی جهت‌عبور از سد تولید شده توسط میدان الکتریکی ترمزکن[4] هر اتصال را دارد. این حاملهاپس‌ازعبور، تبدیل به حاملهای اقلیت می‌شوند و می‌توانند با حاملهای اکثریت ترکیب شوند. حاملهای اقلیت هر لایه نیز می‌توانند توسط میدان الکتریکی ثابتی درهریک از اتصال‌ها شتابدارشوند، ولی‌چون‌دراین‌حالت[ازخارج ولتاژی‌اعمال‌نمی‌شود] مدارخارجی‌وجودنداردمجموع‌جریانهای حاملهای اقلیت و اکثریت بایستی صفر شود.

حال اگر یک ولتاژ بایاس طبق شکل ۲ ــ ۹ با یک مدار خارجی برای حمل جریانهای داخلی منظور شود این جریانها شامل قسمتهای زیر خواهند بود.

جریان I_1 ناشی از:

۱ ــ عبور حاملهای اکثریت (حفره‌ها) از اتصال J_1

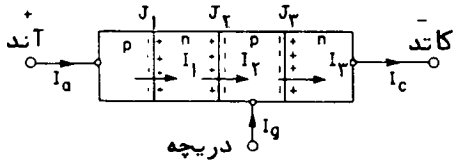
۲ ــ عبور حاملهای اقلیت از اتصال J_1

۳ ــ حفره‌های تزریق شده به اتصال J_2 که از طریق ناحیه n اشاعه‌می‌یابنداتصال J_1 را قطع می‌کند، و

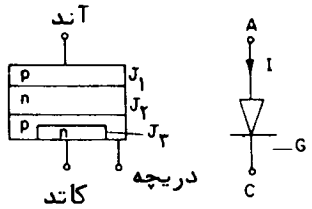
1- Gate
2- Signal
3- Built-in voltage
4- Retarding electric field

۴ ــ حاملهای اقلیت از اتصال J_2 که از طریق ناحیه n اشاعه یافته و از اتصال J_1 عبور کرده است . عینــا I_2 نیز از شش قسمت و I_3 از چهار قسمت تشکیل خواهد یافت .

برای تشریح اصول کارتیریستور از دو روش متشابه[1] مدلهای دیودی و یا دو ترانزیستوری می‌توان استفاده کرد .



شکل ۲ــ۹



شکل ۲ــ۸

(الف) مدل دیودی تیریستور

تیریستور که یک نیمه هادی سه اتصالی است ، شبیــه سه دیودی است کــه به طور سری اتصال یافته‌اند . اگر دریچه بایاس نشود ولی به دو سر آند و کاتد ولتاژ بایاسی‌اعمال شود این ولتاژ هر قطبیتی[2] که داشته باشد همواره حداقل یک اتصال معکوسا بایاس‌شده ،وجود خواهد داشت تا از هدایت تیریستور جلوگیری کند .

اگر کاتد توسط ولتاژ منبع تغذیه[نسبت به آند]منفی شود و دریچه نسبت به‌کاتدبه‌طور مثبت بایاس شود لایه p دریچه توسط کاتد از الکترون لبریز می‌شود و خاصیت خودش را به عنوان لایه p از دست می‌دهد . درنتیجه تیریستوربه دیود هدایتی معادلی‌تبدیل می‌شود .

(ب) مدل دو ترانزیستوری تیریستور

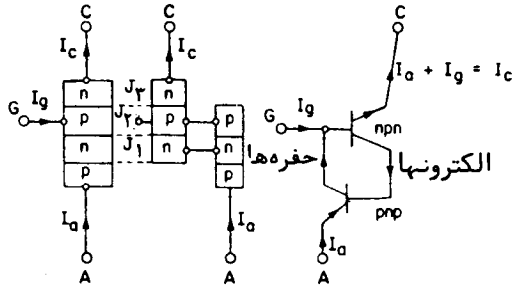
شکل ۲ ــ ۱۰ طرز اتصال و شبــاهت تیریستور را بــا دو تــرانزیستور نشان می‌دهد . پولک p-n-p-n را می‌تــوان بــه صورت دو تــرانزیستور بــا دو ناحیــه پایه در نظر گرفت . کلکتور ترانزیستور n-p-n ، جریان محرکی برای پایه ترانزیستور p-n-p که جریان کلکتورش اضافه جریان دریچه به مثابه جریان محرک[3] پایه ترانزیستور n-p-n است ، مهیا می‌کند .

برای روشن کردن تیریستورجریان دریچه به جزء خیلی حساس ترانزیستور n-p-n از اتصال p-n-p-n اعمال می‌شود . اولین ده درصد افزایش جریان آنــد ، در اصل جریان کلکتور ترانزیستور n-p-n است . پایــه n ترانزیستــور p-n-p توسط جریان کلکتور

1- Analogue 2- Polarity 3- Drive

ترانزیستور n-p-n باردار می‌شود . درنتیجه پس‌خور مثبتی توسط جریان کلکتور ترانزیستور p-n-p به منظور افزایش بارهای ایجاد شده در پایه p ترانزیستور n-p-n دایرمی‌شود . به این ترتیب جریان تیریستور شروع به افزایش می‌کند ،به‌سرعت بـه مقدار اشبـاع می‌رسد و جریان تیریستورفقط توسط امپدانس بار محدود می‌شود .

بهتر است به منظور تشریح مشخصه‌وخواص تیریستورحالتهای‌مختلف آن‌را[ازنظربایاس] مورد بررسی قرار دهیم .



شکل ۲ـ۱۰ نمایش نموداری ساختار و نمـــاد الکتریکی مدل ترانزیستوری

۲ـ۳ مشخصات تیریستور

برای اینکـه بتـوان وسیله‌های الکتـرونیکی را با کیفیت کافـی مورد استفاده قـرار داد و از آنها محافظت کرد بایستی مشخصات و خواص آنها کاملا معلوم شوند . مشخصات تیریستـور را می‌توان با ملاحظهٔ سه حالت مختلف اصلی این وسیله تعیین کرد :

۱ ــ شرایط بایاس معکوس[1]

۲ ــ بایاس مستقیم و مسدود[2]

۳ ــ بایاس مستقیم و هدایت[3]

۲ـ۳ـ۱ بایاس معکوس تیریستور (کاتدنسبت به‌آندمثبت)

در این حالت اتصالات اول و سوم بـه طور معکـوس و اتصـال دوم بـه طور مستقیم بایـاس می‌شوند و درست مثل یک اتصال p-n مقدار کمی جریان نشستی از کاتد به آند عبـور خواهد کرد .

1- Revers bias 2- Forward bias and blocking

3- Forward bias and conducting

اعمال ولتاژ محرک مثبتی به دریچه تیریستور در حالی که آند هنوز منفی است سبب می‌شود که تیریستور رفتاری‌شبیه ترانزیستور داشته باشد و جریان معکوس نشتی آند تا مقدار قابل مقایسه‌ای با جریان دریچه افزایش یابد ، از این رهگذر اتلاف قدرت قابل ملاحظه‌ای در تیریستوروقوع‌خواهدیافت . زیاد گرم‌شدن اتصال می‌تواند سبب‌افسارگسیختگی حرارتی[1] شود.

جریان آند با جریان اشباع معکوس اتصال اول به اضافه کسری ازجریان‌دریچه‌برابراست. جریان اشباع بستگی به درجه حرارت دارد بنابراین بالا رفتن درجه حرارت اتصال باعث افزایش جریان اشباع می‌شود که آن نیز موجب گرم شدن بیشتر اتصال می‌شود . ولتاژ بیشینهٔ دریچه در شرایط بایاس معکوس غالبا توسط سازندگان برای محدود کردن اثر حرارت معین می‌شود .

افزایش ولتاژ بایاس معکوس باعث پهن‌تر شدن‌لایه‌های‌تهی اتصالات‌اول وسوم می‌شود . اتصال اول معمولا بخش اعظم ولتاژ آند به کاتد را مسدودمی‌کند ، لذامنطقه تهی‌این اتصال غالبا پهن است . به خاطر اینکه ولتاژ مسیر سوراخ کنی توسط تماس لایه‌های‌تهی‌اتصالات J_1 و J_2 به وجود نیاید لایه n وسطی را کمی پهن می‌سازند .

۲ـ۳ـ۲ تیریستور بایاس‌مستقیم ومسدود(آند نسبت به‌کاتد مثبت)

اتصالات اول و سوم بایاس مستقیم و اتصال دوم بایاس معکوس می‌شود . جریان آند در خلال مدتی که یک اتصال p-n بایاس معکوس‌وجود دارد ،خیلی‌کم است و مقدارش برابر با جریان اشباع اتصال دوم به اضافه قسمتی از جریان دریچه است . جریان دریچه در طول این شیوه عمل با این که خودش بایستی کوچک باشد جریان آند را افزایش می‌دهد .

۲ـ۳ـ۳ تیریستور بایاس مستقیم و هدایت

چهار روش برای روشن کردن تیریستور وجود دارد و به محض‌این که هدایت شروع شد امپدانس صفر در مسیر عبور جریان از خود نشان می‌دهد . همان‌طوری‌که از مشخصه‌کلی‌ولتاژ ـ جریان یک‌تیریستور طبق شکل ۲ ـ ۱۱ مشاهده می‌شود ، در طول زمانی که تیریستور هدایت می‌کند افت ولتاژ بین آند و کاتد در حدود ۱ تا ۱/۵ ولت است و اصولا مستقل از جریان آند است .

چهار روش راه‌اندازی[2] تیریستور توسط علائم‌اعمال شده به دریچه‌توسط یکی ازدو روش،۱) علائم الکتریکی یا ۲)فعال سازی نوری ، به توسط ۳)ولتاژ بایاس مستقیم با دامنه زیاد و۴)ولتاژ

1- Termal runaway

2- Triggering

بایاس مستقیم با میزان صعود سریع وجود دارد . روش اول ، یعنی ، راه اندازی توسط علائم الکتریکی مهمترین و معمول‌ترین روش است ، در حالی که آخرین روش به علت‌طبیعت‌مزاحمی[1] که دارد قابل اجتناب است .

(الف) روشن کردن[2] توسط نور

یک شعاع نوری که از دریچه به سوی اتصال کاتد ، J_3 جهت‌داده می‌شود ، می‌تواندانرژی کافی برای شکستن پیوندهای الکترونی در نیمه هادی را تولید کند و حاملهای اقلیت اضافی لازم جهت وصل کلید یا روشن کردن تیریستور را مهیا کند .

(ب) روشن کردن توسط علایم الکتریکی اعمال شده به دریچه

حاملهای اقلیت اضافی لازم جهت روشن شدن تیریستور رامی‌توان از طریق سر خروجی دریچه به داخل ناحیه دریچه تیریستور تزریق کرد . اگر جریان دریچه به اندازهٔ کافی زیاد باشد به محض اینکه آند تیریستورنسبت‌به کاتد مثبت‌شود تیریستور روشن خواهد شد . جریان دریچه باتوجه به اندازه‌های متفاوت‌تیریستور از مقدار خیلی کم چند میلی‌آمپر تا حدود ۲۵۰ میلی‌آمپر و بیشتر تغییر خواهد کرد . بعد از روشن شدن از طریق دریچه مقداری زمان لازم است تا تیریستور به هدایت کامل خود برسد . خاصیت انتشار دینامیکی پلاسمایی که بیشینهٔ فرکانس عملکرد تیریستور را تعیین می‌کند به نرخ افزایش سطحی از نیمه هادی که هدایت از آن طریق به وقوع می‌پیوندد مربوط می‌شود . خواص انتشار معکوسا با افزایش ضخامت پولک تیریستور ارتباط دارد و با افزایش سطح سیلیکون به طور غیر همگن[3] افزایش می‌یابد .ازآنجا که در اثر کلفتی و افزایش سطح ، تیریستورهای ولتاژ و جریان زیاد تولید می‌شود ، انتشار پلاسما اهمیت فراوانی پیدا می‌کند .

زمان وصل[4] تیریستور به مدت زمانی اطلاق می‌شود که از شروع راه‌اندازی ، که تیریستور هنوز امپدانس بینهایتی در مسیر عبور جریان آند از خود نشان‌می‌دهد ، تا لحظهٔ ایجادافت ولتاژ پایدار مستقیم ، همراه با توزیع بار مساوی در سرتاسر تیریستور ، به درازا می‌کشد . زمان وصل برای تیریستورهای تجارتی درحدود یک‌تاسه میکروثانیه است . در تیریستورهای‌سفارشی که برای مصارف خاصی از قبیل مدولاتورهای پالس رادار[5] ساخته می‌شوند ، زمان صعودجریان آند می‌تواند در حدود ۳۰۰ نانو ثانیه باشد .

1- Spurious
2- Turn-on
3- Inhomogenezies
4- Turn-on-time
5- Radar pulse modulator

برای روشن شدن تیریستور، جریان دریچه کمینه‌ای[1] (حداقلی) وجود داردکه تیریستور در جریانی کمتر از آن روشن نخواهد شد. اگر به دریچه تیریستور جریانی بیشتر از جریان کمینه دریچه تزریق شود، زمان وصل سریعی به دست‌خواهدآمد. هدایت در آند پس ازتزریق مقدار معینی بار به داخل ناحیه دریچه شروع می‌شود. هرچه دامنه جریان‌دریچه‌بیشتر باشد جهت ایجاد حاملهای اقلیت مورد نیاز برای روشن شدن تیریستور، بـه زمان کمتری احتیاج خواهد بود. سرعت کلید زنی برای بارهای القایی در مدارآند، اگر جریان نهایی بـه همان اندازهٔ جریان بار اهمی‌باشد، کاهش می‌یابد، ولیکن اتلاف‌قدرت درتیریستور نیزکم‌می‌شود.

علامتی با لبهٔ مقدم تیز بهترین شکل علامت دریچه است، و برای روشن شدن توام با اطمینان تیریستور، در حدود امکان، بایستی مقدار علامت بزرگترانتخاب‌شود. بلافاصله‌پس از روشن شدن تیریستور عبور جریان از دریچه برای ادامه هدایت تیریستور دیگر مورد نیاز نخواهدبود، لذا برای‌دریچه‌یک‌ضربه[2] [بامشخصات‌گفته شده] کافی است. برای‌تیریستورهایی که برای کاربردهای عمومی صنعتی مورد استفاده‌اند، ضربه دریچه‌ای با زمان صعود[3] ۱۰ آمپر بر میکروثانیه تیریستور را در زمانی حدود ۰/۱ میکروثانیه روشن می‌کند، اگـرچه ضربه‌ای به طول کمتر از ۰/۲ میکروثانیه معمولا بی‌تأثیر است. تیریستورها، برای‌کاربردهایی نظیر مدولاتورهای پالسی ممکن است، علامت دریچه‌ای با زمان صعود ۴۰ آمپربرمیکروثانیه لازم‌داشته باشند.

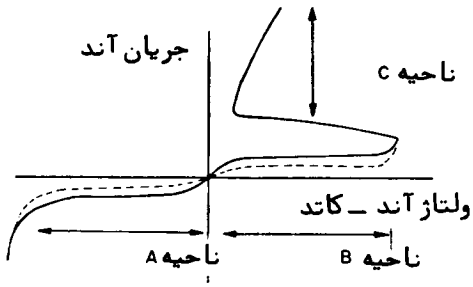
اگر علامت دریچه قبل از اینکه جریان صعودی آند به جریان قفلی[4] [به حداقل جریان لازم برای ادامه هدایت] برسد بـه صفر تنزل یابد، تیریستـور دوباره خاموش خواهد شد. بلافاصله پس از آنکه جریان در آند از جریان قفلی تجاوز کرد تیریستور تا زمانی‌که‌جریان‌آند از جریان نگهدارنده[5]، که کمتر از جریان قفلی است، کمتـر نشده است روشن خواهد ماند (این مسأله پس زنی[6] الکتریکی است). در جریانهای بار کم، به منظور اینکه در طول روشن بودن تیریستور متجاوز بودن جریان آن از جریان نگهدارنده تضمین شود، ممکن است از یک مدار تخلیه خازنی‌یامقاومت‌سالم‌ساز[7] استفاده شود. جریان قفلی با جریانهای‌دریچه‌بزرگتر، به‌آهستگی اضافه می‌شود.

در فاصله اولین روشن شدن تیریستور فقط سطح کوچکی‌درنزدیکی الکترود دریچه‌جریان آند را هدایت می‌کند به همین علت افزایش قابل ملاحظه جریان آند در مدتی کوتاه، یعنـی di/dt بزرگ، قبل از گسترش هدایت در بین اتصال ممکن است سبب بالارفتن حرارت‌موضعی

1- Minimum 2-Pulse 3- Rise time
4- Iatching (or pickup)Current 5- Holding current
6- Electric backlash 7- Bleed resistor

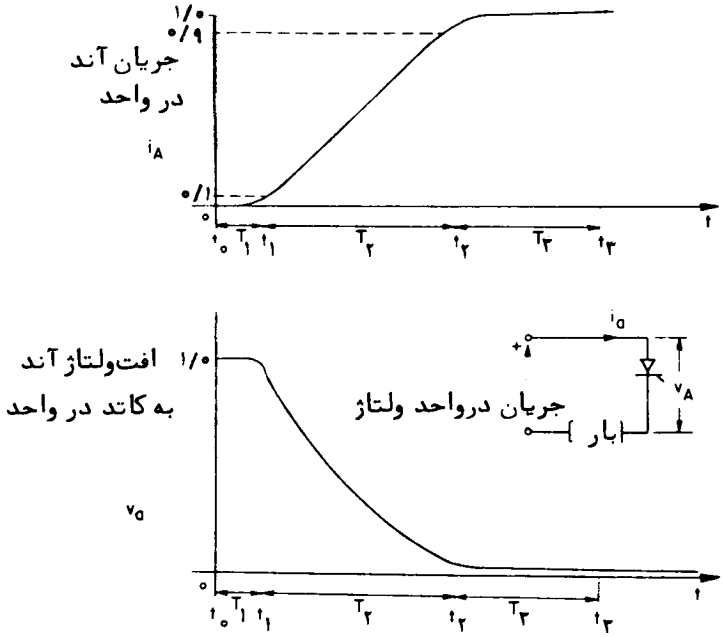
به اندازه‌ای‌که کافی برای خسارت‌دیدن تیریستور است ، شود . این گرم‌شدگی بیشینه‌تغییرات di/dt را درطول روشن‌شدن‌بین۳ تا ۳۰ آمپر برمیکروثانیه‌محدود می‌کند ، گرچه تیریستورهای مخصوص سریع ممکن است قابلیت تغییرات جریانی تا 10^3 آمپر بر میکرو ثانیه را هم داشته باشند . یک سلف سری شده با آند تغییرات di/dt را کاهش می‌دهد و پس از آنکه‌تیریستور به هدایت‌کامل رسید ممکن است کاری‌کرد تاسلف به حد اشباع برسد و di/dt مقداربیشتری، تا جریان بار کامل ، داشته باشد . این سلف همچنین باعث کاهش تلفات روشن‌وخاموش شدن می‌شود . ولی قادر است سبب صعود ولتاژگذرای معکوس،که به نوبه خودمخرب‌است ،نیزشود . جریان دریچه بالاتر نیز به افزایش قابلیت‌ایستادگی [1] آند در مقابل di/dt منجرمی‌شود .

شکل ۲ ــ ۱۲ تغییــرات جریان را در طول زمان گذرا از حالت خاموشی‌به هدایت‌کامل نشان می‌دهد . زمان t_0 ، شروع روشن شدن تیریستور توسط ولتاژ پله‌ای اعمال شده به‌دریچه رامعین‌می‌کند . دوره [2] T_1 تاخیر زمانی‌بین پیشانی پالس دریچه و شروع افزایش سریع جریان آند است . بنابراین پالس دریچه بایستی حداقل دارای دوره T_1 ثانیه باشد . اتلاف قدرت در تیریستور در دوره T_2 ، به علت افزایش سریع جریان در روی یک سطح کوچک در حالی‌که افت ولتاژ هنوز قابل ملاحظه است بیشترین مقدار را خواهد داشت . دوره T_3 زمان گسترش رسانندگی [3] است و نیز مدت زمانی است که افت ولتاژ در تیریستور به حالت پایدارمی‌رسد .



شکل ۲ــ۱۱ مشخصات حالت پایدار تیریستور

1- Witnstand capability 2- Period 3- Conductivity



شکل ۲ـ۱۲ تغییر ولتاژ و جریان در مدت زمان روشن شدن

(پ) روشن کردن با ولتاژ شکست [1]

افـزایش ولتاژ مستقیـم آند به کاتد باعث افزایش پهنای منطقـه تهی اتصال ۲ وهمچنیـن ازدیاد ولتاژ شتاب دهنده حاملهای اقلیت همان اتصال می‌شود. این حاملها بااتمهای‌ثابت برخوردمی‌کنندوحاملهای اقلیت بیشتری را تا رسیدن بـه شکست بهمنـی در اتصال به جلـو می‌رانند[2]. این شکست اتصال ۲ را در جهت مستقیم بایاس می‌کند، و در این حالت جریان آند تنها توسط امپدانس بار مدار خارجی محدود می‌شود.

در ولتاژ شکست V_{BO} (به‌قسمت ۵ ـ ۱ مراجعه شود) تیریستور از وضعیت ولتاژ زیاد در دو سر خود با جریان نشتی خیلی کم به وضعیت ولتاژ خیلی کم با جریان مستقیم زیاد تغییر مشخصه می‌دهد، یعنی، با ولتاژ V_{BO} تیریستور روشن می‌شود.

اثرات سطحی پولک سیلیکونی احتمالا لایه‌بارفضا[3] رابه‌طورموضعی‌فشرده می‌سازد و ولتـاژ قطع راکاهش می‌دهد. این‌پدیده معمولا دراطراف‌سطح برونی[4] پیوندگاه به طور غیریکنواخت

1- Breakover voltage turn-on
2- Dislodge
3- Space-charge
4- Periphery

اتفاق می‌افتد . در نتیجه ممکن است کل جریان بهمنی ازطریق سطح کوچکی عبورکند واتصال p-n در اثر گرمازدگی[1] ازبین برود . در ساختمان تیریستورهای ولتاژبالا این‌نقیصه‌محیطی رایج است . کناره مناسب یا پخ بودن لبه پولک جایی که انتشار اتصال[2] سطح را قطع می‌کند، ساخت و تولید تیریستورهای ولتاژ بالا و قابل اعتمادی را ممکن می‌سازد .

ولتاژشکست‌از ولتاژ معکوس اسمی‌بیشتراست ، واین روش روشن‌کردن فقط برای دیودهای چهارلایه p-n-p-n مورد استفاده قرار می‌گیرد .

(ت) روشن کردن dv/dt

میزان افزایش سریع ولتاژ مستقیم‌آند به کاتد سبب می‌شود که توسط خازنهای موجود بین آند ـ دریچه و دریچه ـ کاتد جریان گذرا در دریچه ایجاد شود . این تغییر سریع‌ولتاژ می‌تواند تیریستور را روشن کند ولی بایستی از آن اجتناب ورزید . تیریستورها محدودیتی‌از ۲۰ الی ۲۰۰ ولت بر میکروثانیه تغییرات ولتاژ برحسب‌زمان در آند دارند ، با این حال تیریستورهای ولتاژ بالای ۱۶۰۰ ولت با مقدار dv/dt بیشتر از ۵۰۰ ولت‌برمیکرو ثانیه وجود دارد که در آنها حساسیت دریچه کمتر است . عملا مقدار dv/dt برای کلیدزنی‌با استفاده از یک مقاومت کوچک خارجی در مسیر دریچه به کاتد یا از طریق کوتاه کردن داخلی پیوندگاه دریچه به کاتد درقسمتی ازسطح برونی‌پیوندگاه ویا وسیله پخش مقداری طلا در مراحل‌نهایی تولید ، قابل افزایش است .

۲ـ۴ خاموش شدن[3] تیریستور

خاموش شدن تیریستور به این معنی است که هدایت درجهت مستقیم قطع‌می‌شود و اعمال دوباره ولتاژ مثبت به آند بدون وجودعلامت‌دریچه باعث‌عبور جریان‌نخواهدشد ، جابه‌جایی فرآیند خاموش شدن تیریستور است‌و مدارهای جابه‌جایی برای تسهیل خاموشی‌تیریستورشامل اجزای اضافی است .

۲ـ۴ـ۱ روشهای خاموشی یا قطع

سه روش زیر برای قطع تیریستور وجود دارد که عبارتند از: جابه‌جایی طبیعی[4]،خاموشی با بایاس معکوس[5] ، و خاموشی دریچه[6] .

1- Overheating
2- Diffused Junction
3- Turn-off
4. Natural Commutation
5- Reverse-bias turn-Off
6- Gate turn-off

(الف) جابه‌جایی طبیعی

موقعی کـه جریان آنـد به مقدار کمتر از جریان‌نگهدارنده کاهش یابـد تیریستور خاموش یـا قطع می‌شود . به هر حال لازم به تذکر است که میزان اسمی جریان آند معمولا بیشتر از ۱۰۰۰ برابر جریان نگهدارنده است . از آنجا که در مدارهای جریان مستقیم ولتاژ آند نسبت به‌کاتد همواره مثبت باقی می‌ماند ، جریان آند فقط در موقع قطع کلید خط، افزایش امپدانس مدار ، ویا انشعاب قسمتی از جریان بار توسط مدار موازی[از طریق موازی کردن مداری] باتیریستور ، یعنی همانا اتصال کوتاه[1] کردن تیریستور می‌تواند کاهش یابد .

(ب) خاموشی با بایاس معکوس

ولتـاژ آند به کاتد معکوس (کاتـد نسبت به آنـد مثبت) به قطع جریان آنـد منجر خواهد شد . معکوس شدن ولتاژ در هر نیم سیکل در یک مدار جریان متناوب ، تیریستور واقع در خط را درنیم‌سیکلهای‌منفی به‌علت‌معکوس بایاس شدنش‌خاموش می‌کند . این خاموش‌شدن‌تیریستور به جابه‌جایی فاز[2] ، یا جابه‌جایی خط جریان متناوب[3] موسوم است .

به منظور ایجاد ولتاژ بایاس معکوس در دو سر تیریستوری که در خط جریان مستقیم قرار دارد ، می‌توان از خازنها استفاده کرد . روش تخلیـه خازن بـه طور موازی با تیریستور برای خاموشی تیریستور را ، جابه‌جایی اجباری[4] گویند .

یکی‌از مزایای استفاده از تیریستورها در الکترونیک‌قدرت ، تراکم‌وفشرده بودن آنهاست . همچنین اگر از مدارهای مجتمع[5] استفاده شود وسایل کنترل نیز متراکم و فشرده خواهندبود . به این‌منظور درمدارهای جابه‌جایی اجباری وصافی‌ها نیزسعی‌می‌شود که ازخازنهای‌مینیاتوری[6] استفاده شود . مدارهای جابه‌جایی اجباری چون دارای جریان زیاد هستند و افت حرارتی در مسائل مربوط به طراحی اولویت‌زیادی دارد ، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند .خازنهای‌اندازه کوچک در حال حاضر با استفاده از غشای پلاستیکی فلز اندود ، یا غشای‌پلاستیکی و ورقه‌نازک آلومینیمی به دست می‌آیند .

(پ) خاموشی دریچه

بعضی از تیـریستورهای مخصوص طوری طراحی شده‌اند کـه اعمال جریـان منفی بـه دریچـه باعث افزایش جریان نگهدارنده تا حد بیشتر از جریان‌بارمی‌شود ، درنتیجه می‌توان‌تیریستور را به این ترتیب خاموش کرد . این تیریستورها در حال حاضـر تا زیـر ۱۰ آمپر اسمی ساخته

1- Short-cikcuiting
2- Phase-commutation
3- A.C. line commutation
4- Forced-commutation
5- Integrated circuit
6- Miniaturize capacitor

شده‌اند و موارد استعمال این تیریستورها خارج از بحث این کتاب است .

۲ـ۴ـ۲ زمان خاموشی تیریستور

زمـان خاموشی زمانـی است که در طـول آن بارهای الکتریکی حاضـر در ساختمان سیلیکـون به نزدیکی سطح تراز انرژی حالت قطع ، نـزول کنند . اگر در طـول این فاصله زمانی ، ولتاژ بایاس مستقیمی به تیریستور دوباره اعمال شود هدایت شروع خواهد شد . زمـان خاموشی به درجه حرارت‌حساسیت دارد وبین ۲۵ و ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد دوبرابر می‌شود . زمان‌خاموشی برای تریستورهای معمولی در جابه‌جایی طبیعی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکروثانیه است ، درصورتی‌که در جابه‌جایی اجباری این زمان بین ۷ تا ۲۰ میکروثانیه خواهد بود ، ولی این اعداد شامـل تیریستورهای مخصوص نیست . اگربخواهیم کمی‌دقیق‌تر و مشخص‌تر گفته باشیم ، زمان‌خاموشی تیریستورها حدودا به قرار زیر است :

۱۰ میکروثانیه برای تیریستورهای ولتاژ کم و جریان کم

کمتر از ۲۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۵۰۰ ولت

کمتر از ۳۵ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۸۰۰ ولت

کمتر از ۵۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۱۲۰۰ ولت

و ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ولت

عمل خاموشی‌تیریستوربه ترتیب‌زیر است . ولتاژ بایاس معکوسی‌که به منظورقطع تیریستور اعمال می‌شود ، اجازه می‌دهد که بارهای متحرک در جهت ولتاژ کاتد به آند عبورکنند .تغییر جهت عبور بارهای الکتریکی ممکن است به ایجاد جریان‌معکوس خیلی زیادی‌درآند ، با اینکه تغییرات di/dt توسط مدار خارجی تعیین می‌شود ، منجر شود . این جریان تا زمانی که اکثر حاملهای اتصالات J_1 و J_3 شکل ۲ ـ ۹ جابه‌جا نشده‌اند تا این اتصالات به‌حالت مسدود در آیند و جریان صفر شود ، بایستی عبور کند . تیریستور ولتاژ معکوس را به علت بایاس معکوس بودن اتصالات J_1 و J_3 مسدودمی‌کند . ولی‌با این حال اتصال J_2 هنوز دربایاس مستقیم است و بارهای الکتریکی زیادی دارد که به تله افتاده‌اند . تیریستور زمانی‌که حاملهای‌اضافی‌اتصال J_2 با هم باز ترکیب شدند ولتاژ بایاس مستقیم را مسدود می‌کند ، اما این باز ترکیب‌مستقل از مدار خارجی است . زمان‌خاموشی در درجات حرارت‌بالا به علت‌طولانی‌ترشدن ترکیب‌بارهای الکتریکی افزایش می‌یابد .مقدار بار الکتریکی در نزدیکی اتصال J_2 به جریان مستقیم ارتباط دارد و درنتیجه جریان زیاد به مفهوم ازدیاد زمان‌خاموشی‌است . جریان‌معکوس زمان‌خاموشی را به علت این که اتصالات J_1 و J_3 مدت کوتاهتری بایاس معکوس می‌شوند ، کاهش می‌دهد .

۲ ـ ۵ مقادیر اسمی تیریستور

مقادیراسمی ولتاژ ،جریان‌وقدرت‌با وجودارتباط باهم‌به طور مجزا موردبررسی‌قرارخواهندگرفت.

۲ـ ۵ ـ ۱ مقادیر اسمی ولتاژ

در تیریستورهای سه ولتاژ مختلف برای بررسی وجود دارد :

ولتاژ مستقیم پیک[1] PFV حد نهایی ولتاژ مثبت آند است کـه در صورت تجاوز از آن امکان خرابی و از بین رفتن تیریستور وجود دارد .

ولتاژ شکست مستقیم[2] V_{BO} حداقل ولتاژ مثبت آند نسبت به کاتـد است کـه بدون اعمال علامتی‌به دریچه باعث‌راه‌اندازی تیریستورمی‌شود . برای تعیین مقدار این ولتاژبایستی دریچه در حالت مدار باز و درجه حرارت اتصال در حداکثر مقدار مجازخودباشد . با این‌حال V_{BO} هنوز تابعی از dv/dt است . با در نظر گرفتن این که عموما V_{PFV} از V_{BO} بزرگتر است لذا برای تیریستور مقداری حفاظت ذاتی وجود خواهد داشت . به هر حال اگر یک ولتاژ گذرا یا دامنه‌ای بیشتر از مقادیر اسمی‌گذرای تیریستور به آن اعمال شود ،با این‌که‌خراب شدن تیریستور غیر محتمل است ، ولی با روشن کردن تیریستور در لحظهٔ غلط،باعث‌بدعمل کردن مدار می‌شود . در صورتی که دمای اتصال کم باشد ، امکان دارد V_{PFV} از V_{BO} کمترشود .

ولتاژ معکوس پیک[3] PRV حداکثر ولتاژ تکراری است که به تیریستوراعمال‌می‌شودوکاتد را نسبت به آند مثبت می‌کند . درصورت افزایش ولتاژ PRV شکست بهمنی رخ می‌دهد و اگر جریان توسط مدار خارجی محدودنشود تیریستور خراب خواهد شد .

در سال ۱۹۶۷ برای کاربردهای صنعتی با قدرت زیاد ، تیریستورهایی کـه مقدار اسمی PRV آنها تاحدود ۱۶۰۰ ولت بود به بازار عرضه شد . دراین‌تیریستورهای ولتاژ زیاد مقدار اسمی‌متوسط جریان‌هرنیم‌سیکل‌درحدود ۲۵۰ آمپراست . درسال ۱۹۶۸ ژاپنی‌هاتیریستورهایی با ولتاژ ۲۵۰۰ ولت و جریان ۴۰۰ آمپر راساختندو به بازار عرضه کردند . در همان سال بـه این نتیجه رسیدندکه اگر درموقع ساخت‌پولک چهار لایه سیلیکونی کنترل دقیقتری در فرآیند نفوذدادن[4] انجام شود می‌توان تیریستورهای ۴ کیلوولتی نیز تولید کرد ، لذا به دنبـال آن در سال ۱۹۶۹ تیریستورهایی با ولتاژ ۱۰ کیلو ولت و جریان ۴۰۰ آمپر (۴ مگاولت‌آمپر)برای استفاده در توقف‌سازهای نمونه‌وار[5] و مبدلهای ایستایی تولید و به بازار روانه شدند .

در حال حاضر تیریستورهایی با مقادیر اسمی ولتاژ بالا به ازای زمان‌های خاموشی سریع و افت‌های ولتاژ مستقیم کم ، قابل دسترسی هستند . برای طراحی تیریستورهای ولتـاژ بـالا

1- Peak forward voltage 2- Forward braekdown voltage

3- Peak reverse voltage 4- Diffusion 5- Prototype interrupter

به‌ناچار بایستی پولک سیلیکون ضخیم باشد ، و در طرح تیریستورهای جریان بالا و di/dt بالا بایستی پولک سیلیکون نازک باشد . لذا طراحان تیریستورهای مورد کاربرد در قدرت بالا با تناقضی مواجه می‌شوند ، که مجبورند به مصالحه‌ای تن در دهند .

۲ـ ۵ ـ۲ مقادیر اسمی جریان

به منظور ساختن تیریستورهای با بهترین مقدار اسمی جریان ممکن ، بایستی کریستال دارای سطح فعال بزرگ ، ضخامت کم و انتقال حرارت برونی خوب باشد . ضخامت‌کم‌کریستال به مفهوم‌قابلیت ولتاژ کم وسطح سیلیکون بزرگ به معنی کاهش بازده تیریستورهای ولتاژ زیاد است که این امر در اثر افزایش چگالی ناخالصیها و توزیع غیر یکنواخت ضریب‌مقاومت‌به‌وجود می‌آید . تعریف دیگری از مقدار اسمی جریان را می‌توان با استفاده از درجه حرارت متوسط خنک کنندگی معینی در اتصالات به دست آورد و سپس مقدار جریانی را مشخص کردکه اتصال یا تیریستور را به بیشینه دمای مجاز نزدیک می‌سازد .

بعضی‌ازتیریستورها قادرندکه‌تا ۵۰۰ آمپر جریان‌متوسط نیم‌سیکل‌را به‌خوبی هدایت‌کنند . این تیریستورهای تجارتی می‌توانند تحملی تا حدود ۷۰۰۰ آمپر جریان موجی پیک در یک سیکل داشته باشند . نمونه‌های محدودی وجود دارند که برای استفاده در مدوله‌کننده‌های پالس رادار ، پالسهایی با دامنه جریان بالا و کوتاه مدت ، تولید می‌شوند . یک مورد از این قبیل تیریستورها با مشخصات ارائه شده توسط سازنده عبارت است از :

۱۰۰ آمپر جریان پیک	(۳۰ آمپر جریان متوسط)
di/dt تکراری بیشینه	۱۲۰۰ آمپر بر میکروثانیه
زمان صعود جریان تا ۳۰۰ آمپر	۳۰۰ نانوثانیه
ولتاژ اعمال شده	۴۰۰ ولت
جریان دریچه	۴ آمپر با زمان صعود ۰/۱ میکروثانیه

۲ـ ۵ ـ۳ مقدار اسمی قدرت

چون مقدار اسمی قدرت دقیقا با هدایت جریان الکتریکی و افت ولتاژ مستقیم تیریستور ارتباط دارد از این رو بهتر است ، خنک‌کنندگی یا تلفات در تیریستور مورد بررسی قرارگیرد. دمای بیشینه‌ای که یک وسیله سیلیکونی در اتصال خود دارد بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه‌سانتی ـ گراد است ، هرچه درجه حرارت بدنه افزایش یابد بایستی مقدار قدرت‌تلف شده در تیریستور نیز کاهش یابد واین یعنی نقصان مقدار اسمی آن .

تلفات قدرت تیریستورها را می‌توان به پنج قسمت که توسط سازندگان مشخص می‌شوند ، تقسیم کرد :

(الف) تلفات جریان بار در هدایت مستقیم

مقدار متوسط جریان آند ضرب در افت ولتاژ مستقیم بین دو سر تیریستور (۱/۲ تا ۱/۵ ولت) مقدار متوسط قدرت تلف شده در تیریستور است . تیریستوری با مقادیر اسمی ۱۰ کیلو ولت و ۴۰ آمپر که به صورت کپسول ساخته شده است به راحتی در کف دست قرار می‌گیرد . در جریان اسمی مقدار متوسط اتلاف هدایت[حرارتی] مستقیم آن درحدود ۶۰۰ وات‌خواهد بود . برای اینکه دمای‌سیلیکون کاملا زیر ۱۲۰ درجه سانتیگراد نگهداشته شود بایستی‌حرارت تولید شده در تیریستور سریعا انتقال یابد . لذا خنک‌کن بزرگ و خنک کنندگی موثری ضروری است .

کلید جریان متناوب‌پیوستهٔ ۱۲۰ آمپر جریان‌موثر ،مثالی است برای سیستمهای خنک ـ کنندگی ، به این منظور از دو تیریستور موازی معکوس که در بین یک انتقال‌دهنده‌حرارتی‌آبی قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود . در این جا برای نگهداری دما در ۴۰ درجه سانتی‌گراد موقعی که حداکثر قدرت‌تلف شده ۱۸۰۰ وات است یک گالن آب در هر دقیقه موردنیاز خواهدبود .

(ب) تلفات قدرت نشتی مستقیم

اگر در موقع‌خاموشی تیریستور ولتاژ مثبتی بر آند اعمال شود یک جریان نشتی وجود خواهد داشت . این‌تلفات ، انتگرال حاصلضرب‌ولتاژ درجریان (حاصلضرب‌شکل موجها)است ، که درمقایسه با تلفات هدایت خیلی کوچک است .

(پ) تلفات خاموشی و تلفات قدرت نشتی معکوس

در طول خاموش شدن سریع تیریستور امکان افزایش جریان معکوس تا اندازه قابل مقایسه با جریان مستقیم وجود دارد . موقعی که امپدانس تیریستور شروع به افزایش می‌کند ، جریان پایین می‌آید و ولتاژ معکوس به طور مداوم زیاد می‌شود ، در نتیجه تلفات[خاموشی و تلفات نشتی معکوس]حاصل می‌شود . برای محدودکردن میزان تغییرات‌جریان درموقع خاموش‌شدن ، و در نتیجه کاهش انرژی تلف شده ، از خود القای مدار استفاده می‌کنند . خود القا در مدار همچنین میزان افزایش جریان مستقیم را محدود می‌کند که این خود مزیتی است ولی‌همچنین می‌تواند باعث افزایش زیاد مقادیر گذرای ولتاژ معکوس در مدت خاموشی شود .

(ت) تلفات قدرت دریچه

در صورتی که برای روشن کردن تیریستور از علایم پالسی استفاده شود تلفات دریچه خیلی‌کوچک‌می‌شود . به‌شرط اعمال علایم‌پیوسته‌ای‌به دریچه مقدار این تلفات‌برابرحاصلضرب ولتاژ و جریان دریچه خواهد بود .

(ث) تلفات روشن شدن

چون فرآیند کلید زنی مدت زمان معینی لازم دارد و در آن مدت به ازای عبور جریان بین دو سر تیریستور ولتاژ زیادی وجود دارد لذا تلفات روشن شدن نسبتا از تلفات خاموش شدن زیادتر است . به عنوان مثال زمانی که جریان به حد ۹۰ درصد مقدارنهایی خودمی‌رسد هنوز امکان وجود ده درصدولتاژ تغذیه در دوسرتیریستور وجود دارد (به شکل ۲ ــ ۱۲مراجعه شود) . به این ترتیب در فاصله زمانی روشن شدن مقدار قابل ملاحظه‌ای قدرت تلف خواهد شد . برای کاهش تلفات کلیدزنی در فرکانس بیشتر از ۴۰۰ هرتز احتیاج به مدارهای‌اضافی یا تغییر مقدار اسمی جریان مستقیم است که این خود مقداری تلفات اضافی دربرخواهد داشت.

به‌علت اینکه ثابت زمانی‌حرارتی‌تیریستورها کم است نبایستی ازمقادیر اسمی آن‌تجاوز کرد . گرمازداهای[1] بشقابی پهن متصل به تیریستور در مقایسه با آن خیلی بزرگ هستند . گرمازداها برای انتقال‌حرارت به صورت‌جابه‌جایی آزادهستند ومی‌توانند با هوای فشرده و آب نیز خنک شوند .

۲ـ ۵ ـ۴ مقادیر اسمی تناوبی[2]

به علت اینکه تیریستورها دارای ثابت زمانی حرارتی کمی هستند ، بین مقادیر اسمی پیوسته و تناوبی در دوره هدایت ، اختلافی بیشتر از چند ثانیه ، وجود نخواهد داشت . در دوره‌های کوتاه مدت ، اگر گرمازدا در طی اولین دوره روشن شدنش آنقدر گرم نشود که به مقادیر اسمی‌پایدارخود برسد ، افزایش مقادیر اسمی امکان‌پذیر خواهد بود . معمولا اطلاعات مربوط به هرنوع تیریستور ازطرف‌سازندگان در کاتالوگهای مخصوصی دراختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد .

به عنوان مثالی از مقدار اسمی تناوبی ، تیریستورهای به کار رفته درمدولاتورهای رادار پالسی را در نظر می‌گیریم که جریان تکراری پیک آن ۱۰۰۰ آمپر است در صورتی که جریان متوسط‌آن فقط ۳۰ آمپر است .

به منظور دست‌یابی به حداکثر مقادیر اسمی تیریستورها ، بایستی توصیه سازندگان درباره روشهای خنک کردن دقیقا به مورد اجرا گذاشته شود .

۲ـ۶ مراحل ساخت تیریستور

یکی از فوت و فنهای ساخت تیریستور در اصل استفاده از یک ماده نوع n ضخیم داخلی است . برای تشکیل دو لایه p به طور همزمان در اطراف لایه داخلی n ،از روش‌نفوذجامد

1- Heat sink

2- Intermittent

به کمک یکی از مواد پذیرنده ، گالیوم یا آلومینیم به عنوان نفوذ کننده[1] استفاده می‌شود . پیوندگاه کاتد و اتصالهای آند همان طوری که در شکل ۲ ــ ۱۳ مشاهده می‌شود به ترتیب توسط آلیاژ طلا ــ آنتیموان به عنوان ناخالصی نیمه هادی نوع n و آلومینیم شکل‌می‌گیرند .

صفحه تنگستنی یا مولیبدنی را در طرفین بدنه تیریستور به منظور کمک به موازنه یا جبران گسترش ضرائب‌مختلف‌حرارتی مواد ، موقعی‌که درحالت گداخته هستند جوش‌می‌دهند . قبل از مونتاژ سیستم[2] روی یک پایه مسی که به سختی جوش داده شده و قسمتهای داخلی را محکم و مسدود می‌کند اتصال دریچه به لایه p متصل می‌شود . بعضی از وسایل الکترونیکی به منظور اجتناب از مشکلات فرسودگی‌مونتاژجوش، دارای اتصالهای مکانیکی که از طریق بستن تحت فشار درست می‌شوند ، هستند . ولی با این حال اتصال بسته شده تحت فشار خود نیز دارای مشکلات خاصی است .

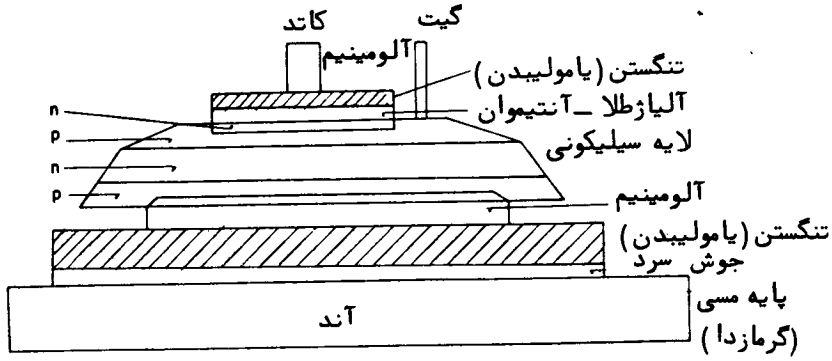
در تیریستورهای قدرت بالا به منظور ایجاد پایانه مخصوصی برای اعمال علایم دریچه اتصال کاتد دومی‌درنزدیک دریچه‌تعبیه‌می‌شود . این اتصال باعث‌به‌حداقل‌رسیدن‌تداخل‌های نامتعادل الکتریکی بر روی سیمهای اتصالی دریچه و کاتد می‌شود . ولتاژ القایی نامتعادل که توسط میدانهای پراکنده[3] تولید می‌شود امکانا سبب روشن شدن تیریستور در زمان نامطلوب می‌شود .

همچنین در تیریستورهای قدرت بالا اخیرا سلولهای سیلیکونی‌درمحفظه‌های دو رویه‌ای کار گذاشته می‌شوند که به آنها تیریستور دگمه‌ای[4] می‌گویند . گرمازدای‌یکپارچه[5] دو طرف‌سلول تیریستور برای توده حرارتی ، اتصال خوبی با پولک ایجاد می‌کند . موقعی که گرمازداها آبی باشند ، اضافه بار کوتاه مدتی در مدار پدید می‌آید .

درطی فرآیندساخت تیریستورهای ولتاژ بالا ، کنترل خواص سطحی سیلیکون به نحوی که شکست سطحی نابهنگامی اتفاق نیفتد مسئله‌ای است که باید به آن توجه کرد . معمولابا اریب کردن دو طرف سیلیکون همان طوری که در شکل ۲ ــ ۱۳ مشاهده می‌شود با این اشکال‌مبارزه می‌کنند . سطح هدایت‌در اثر اریب شدن دو طرف سیلیکون کاهش می‌یابد ، در نتیجه مقادیر اسمی‌جریان‌کمترمی‌شود . ازکم‌شدن‌مقادیراسمی‌جریان‌تنهابا اریب کردن سطح نزدیک اتصالات می‌توان جلوگیری کرد که به عنوان مثال اریب دو درجه برای تیریستورهای ۳ کیلو ولتی رضایت‌بخش است .

1- Diffusant 2- Assembly 3- Stray field

4- Button thyristor 5- Integral heat sink



شکل ۲ـ۱۳ سطح مقطع شمایی یک تیریستور

۲ـ۷ تیریستور در مدار

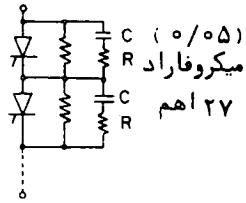
چگونگی کار تیریستور به طور مختصر شرح داده شد . اما قبل از اینکه به مدارهای ویژه کنترل ماشینهای الکتریکی پرداخته‌شود ، هنوز برخی‌موضوعات عمومی‌که برای کلیه کاربردهای‌تیریستور مشترک هستند وجود دارند و بایستی مورد بحث قرار گیرند . اینها عبارتند از ترتیبات‌لازم به منظور افزایش قابلیت کاربرد قدرت تیریستورها ، مدارهای دریچه برای روشن کردن‌تیریستورها و امر مهم حفاظت تیریستورها .

۲ـ۷ـ۱ اتصال‌سری تیریستورها

موقعی کـه ولتاژ منبـع تغذیه بیشتر از مقادیر اسمی ولتاژ تیریستور باشد می‌توان تعدادی از تیریستورها رابه‌طور سری اتصال داد تا ولتاژمستقیم و معکوس را تسهیم کنند .بایستی ترتیبی داده شودکه ولتاژ ،بین تیریستورها به طور مساوی تقسیم شود . برای انجام این کار درشرایط پایدار ، ازمقاومت و یا دیود زنر به‌طورموازی با هرکدام از تیریستورها استفاده می‌کنند .برای تسهیم ولتاژ بین‌تیریستورها درحالت گذرا از مقاومت غیرسلفی کوچکی ، که با یک خازن‌سری شده است ، و موازی با هر تیریستور قـرار می‌گیرد ، شکل ۲ ـ ۱۴ استفاده می‌شود .چون بـار الکتریکی‌خازن C می‌تواند ازطریق تیریستور درمدت روشن‌شدن آن‌تخلیه شود امکان‌افزایش تلفات مدار وجود خواهد داشت . اما جریان کلید زنی از طریق خازن C توسط مقـاومت R محدود می‌شود . این مقاومت همچنین نوسانات طنینی [1] حاصل از خازن C و سلف مدار رادر مدت جابه‌جایی مستهلک [2] می‌کند .

1- Ringing 2- Damp

اگر علایم راه اندازی را به طور همزمان‌به‌دریچه تیریستورهایی که به طور سری اتصال یافته‌اند اعمال‌کنیم ، بایستی‌کلیه آنها دریک‌لحظه روشن‌شوند . برای به‌تأخیرانداختن افزایش جریان آند ، تا زمانی که همه تیریستورها روشن شوند و ولتاژ آند به کاتد آنها به مقدارحداقل خود افت کند عناصری را می‌توان به مدار اضافه کرد . این عمل از ظهور ضربه[1] ولتاژ در دوسر تیریستوری با طولانی‌ترین زمان روشن شدن،جلوگیری می‌کند .



شکل ۲-۱۴ اتصال سری تیریستورها و تسهیم ولتاژ

۲-۷-۲ اتصال موازی تیریستورها

موقعی که جریان بار بیشتر از مقادیر اسمی جریان تیریستور باشد می‌توان تعدادی از تیریستورها را به طور موازی اتصال داد تا جریان بار را بین خود تسهیم کنند . اگر افت‌ولتاژ مستقیم‌در دو سر تیریستورها تغییر کند نسبت تقسیم جریان نیز تغییر خواهد کرد ، مگر آنکه ازتیریستورهای تطبیق‌شده[2] [وکاملا مشابه] استفاده شودکه این هم باعث کاهش مقادیر اسمی جریان می‌شود .

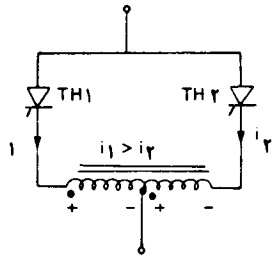
تعداد تیریستورهای مورد لزوم برای اتصال موازی به تنهایی توسط شرایط پیوسته بار تعیین نمی‌شوند بلکه همچنین تعیین آن توسط تعداد وسایل مورد لزوم برای حمل جریان در یک دوره کوتاه مدت اضافه بار مفروض و یا برای حل جریان خطای محدود شده فقط توسط امپدانس منبع تغذیه و یا برای مدت تعیین‌شده به وسیله زمان بازگشتی[3] وسایل‌حفاظتی‌صورت می‌گیرد .

تیریستورهای تطبیق شده[یا مشابه] به خاطر تلرانس موجود و اثرات‌حرارتی‌درمحاسبه تنها احتیاج به کاهش مقادیر اسمی به اندازه ۲۰ درصد دارند و تیریستورهای موازی معمولا روی یک گرمازدا نصب می‌شوند تا درجه حرارت اتصال یکسان نگهداشته شود .

1- Spike 2- Matched thyristor 3- Clearing time

علائم دریچه بایستی تا آنجا که افزایش جریان قفلی کلیه تیریستورها[ازحداقل‌جریان لازم برای ادامه هدایت] وقوع یابد ، اعمال شود ؛ زیرا به محض هدایت یکی از تیریستورها ولتاژ دو سرش به کمی بیشتر از یک ولت افت می‌کند که این ، ولتاژ دو سر تیریستورهای‌موازی دیگر نیز خواهد بود .

به منظورتسهیم‌جریان به طورمساوی بین تیریستورها از مقاومت متعادل کننده[1] خارجی ویا راکتورها[2] (واکنشگرها) می‌توان استفاده کرد . افت ولتاژ بین مقاومت متعادل کننده قابل مقایسه با افت ولتاژ بین کاتد و آند تیریستور خواهد بود . راکتورها (واکنشگرها) را می‌توان طبق شکل ۲ ــ ۱۵ در مدار آند دو تیریستور قرارداد ، به طوری که آمپر دورهای دو مدار متعادل شوند . اگر تیریستور $TH1$ جریان متغیر و زیادی را از خود عبور دهد نیروی محرکه الکتریکی emf القاء شده در راکتور(واکنشگر) سری با این جریان مخالفت خواهد کرد . به خاطر جهت‌سیم‌پیچی وکوپلاژ[3] (جفت‌شدگی)راکتور (واکنشگر) ، ولتاژ القاء شده سری‌باتیریستور $TH2$ به افزایش جریان در آن کمک می‌کند و در نتیجه یک عمل متعادل کنندگی وجودخواهد داشت . با این مدار تغییرات جریانی تا حدود ۱۰ درصد را می‌توان متعادل کرد .



شکل ۲ــ۱۵ تسهیم جریان توسط راکتور (واکنشگر) متعادل کننده

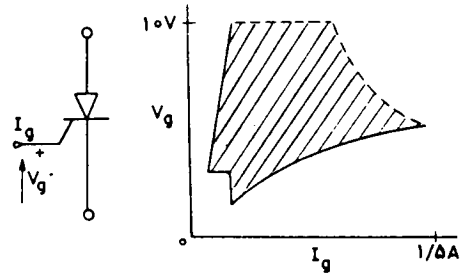
۲ـ۷ـ۳ مدارهای راه‌اندازی تیریستورها

مدارهایی که در زیر تشریح خواهند شد علایم مورد لزوم برای دریچه نسبت به کاتدرا جهت راه‌اندازی تیریستور مهیا می‌سازند . دریچه به ولتاژی بین ۲ تا ۱۰ ولت برای ایجاد جریانی معادل ۱۰۰ میکروآمپر تا ۱۵۰۰ میلی آمپر نیازمند است . تیریستورهای دارای‌ظرفیت قدرت‌بالا احتیاج به جریان‌دریچه بالایی‌دارند . مشخصه‌هایی‌که توسط سازندگان تهیه‌می‌شود جایی در داخل سطح هاشور خورده شکل ۲ ــ ۱۶ واقع خواهد بود . همان طوری که مشاهده

1- Balancing resistors 2- Reactor 3- Coupling

می‌شود برای ولتاژ و جریان دریچه مقادیر کمینه‌ای وجود دارد که کمتر از آن مقادیر تیریستور روشن نخواهد شد . شکل عجیب نزدیک مرکز مقدار قدرت بالاتر لازم در دمای پایین‌پیوندگاه را برای دریچه نشان می‌دهد . برای علایم دریچه مقادیر بیشینه‌ای نیز وجود دارد که تجاوز از این حد سبب خرابی تیریستور خواهد شد . تیریستوری که به دریچه آن علایمی درمحدوده سطح هاشور خورده اعمال شود همواره روشن خواهد بود .

در این قسمت ، از مدارهای متعددی که برای راه‌اندازی تیریستورها موجود است فقط چندمدار موردبررسی قرارمی‌گیرد ، بقیه طی‌مثالهای مشروح فصلهای‌مربوط به کنترل موتورهای الکتریکی مورد بحث قرار خواهند گرفت . این مدارها را می‌توان‌به سه‌نوع پایه‌ای تقسیم‌بندی کرد : علایم فرمان جریان مستقیم [1] ، علایم‌پالسی [2] ، و علایم فاز جریان متناوب [3]



شکل ۲–۱۶ منحنی مشخصه‌های دریچه تیریستور

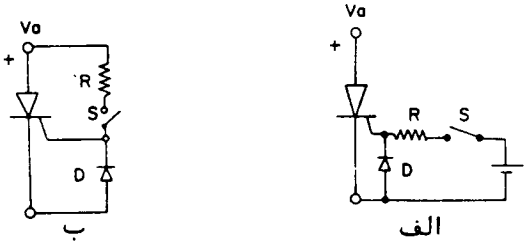
(الف) علایم فرمان جریان مستقیم

اعمال علامت فرمان مداوم به دریچه به علت اینکه با تلفات قدرت در تیریستور توأم است ، معمولا مناسب و قابل قبول نیست مگر در مواردی که تیریستور ممکن است قبل از زمان مورد لزوم خاموش شود ، که در این صورت این تلفات اضافی را باید تحمل کرد .

شکل ۲ – ۱۷ (الف) یک مدار فرمان برای تیریستور را نشان می‌دهد . کلید S ممکن‌است یک‌کلیدمکانیکی تک‌قطبی یا رله ، کلیدزبانه‌ای [4] ، کلیدترانزیستوری ، یا یک تیریستور دیگری باشد ، به شرطی که علامت کلید زنی خیلی کوچکی از منبع کنترل دست‌یافتنی‌باشد . شکل ۲ – ۱۷ (ب) نیز یک مدار اصلاح کننده است ، که[بر خلاف شکل ۲ – ۱۷ (الف)]احتیاج به منبع تغذیه جداگانه‌ای ندارد . موقعی‌که کلید S بسته و آند نسبت به کاتد مثبت‌است جریان

1- D.C. firing signals
2- Pulse signals
3- A.C. Phase-signals
4- Reed switch

دریچه توسط مقاومت R محدودمی‌شود . موقعی که آند مثبت و تیریستور روشن است ، جریان دریچه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد ، زیرا ولتاژی که در دریچه جریان تولید می‌کند ، ولتاژ دو سر تیریستور است . که همان افت ولتاژ مستقیم تیریستور یعنی حدود ۱ ولت خواهد بود . موقعی که جریان در مدار قطع می‌شود ، دیود موجود در مدار برای جلوگیری از اعمال ولتاژ زیاد معکوس به پایانه‌های دریچه و کاتد در نظر گرفته شده است . این‌دیود ولتاژ معکوس‌رادر یک ولت محدود می‌کند گرچه تا حدود ۵ ولت نیز مجاز است .



شکل ۲ـ۱۷ علایم فرمان جریان مستقیم

یکی دیگر از روشهای معمول برای تهیه علایم فرمان جریان مستقیم استفاده از چند ضربانی (نوسانساز) دو حالتی[1] است . انواع چند ضربانی‌ها (نوسانسازها) به صورت مدول[2] ساخته می‌شوند به طوری‌که عناصرمنطقی ومدارهای فرمان‌عملی به طورحاضری و بدون احتیاج به طراحی مدارهای جداگانه درست شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند .

موقعی‌که از مدارکنترل پالس کوچکی‌به ورودی چندضربانی (نوسانساز) دوحالتی برسد ، حالت آن عوض می‌شود ، که در چنین صورتی از دو حال خارج نیست یا در خروجی ولتاژی ظاهر می‌شود و به عنوان علامت دریچه استفاده می‌شود و یا این ولتاژ در پایانه‌های خروجی پیش از اعمال علامت ظاهر و حذف می‌شود .

(ب) علایم فرمان پالسی

برای فرمان تیریستور، استفاده از پالس مزایای زیادی نسبت به جریان مستقیم پیوسته دارد . اعمال علایم به دریچه تیریستور به وسیله ترانسفورماتور امکان‌پذیر است و این عمل سبب جداشدگی[3] (عایق) مدارهای کنترل دریچه از منبع تغذیه می‌شود . لذا اکثر مدارهای

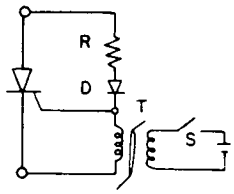
1- Bistable multivibrator 2- Module

3- Isolation

دریچه می‌توانند[مستقیما] از منبع ، تغذیه کنند . اتلاف قدرت در مدار دریچه یا کاهش می‌یابد و یا موقعی که از پالس‌به‌جای‌علایم پیوسته استفاده شود ، قدرت در پالسهای منفرد قوی است‌و روشن شدن سریع و قابل اعتماد و اطمینانی را موجب می‌شود .

اگر در مواقع خاصی علایم فرمان پیوسته‌ای مورد احتیاج باشد در آن صورت از سری پالسهای مداوم با فرکانس زیاد می‌توان استفاده کرد . بنابراین ، علایم پالسی را می‌توان به پالسهای منفرد[1] و یا چندگانه[2] که از نظر زمانی قابل کنترل‌اند و یا پالسهای ساده قطع ــ وصل تقسیم بندی کرد .

پالسهای قطع ــ وصل را می‌توان از چند ضربانی (نوسانساز) تک‌حالتی[3] ترانزیستوری به دست آورد . هرعلامت‌کوچک‌ورودی پالسی به چندضربانی (نوسانساز) پالس بزرگی با دامنه و استمرار[4] معین درخروجی فراهم‌می‌کند . شکل ۲ ــ ۱۸ مداری رانشان‌می‌دهدکه با استفاده از ترانسفورماتور با هسته اشباع پذیر پالسهای قطع ــ وصل تولید می‌کند . موقعی‌که‌آندنسبت به کاتد مثبت و ترانسفورماتور اشباع نشده است تیریستور روشن می‌شود . ولی وقتی‌که کلید S بسته شود ترانسفورماتور T اشباع می‌شودوتیریستور به علت اینکه دریچه آن‌توسط امپدانس خیلی کوچک ثانویه ترانسفورماتور اتصال کوتاه می‌شود ، روشن نخواهد شد .

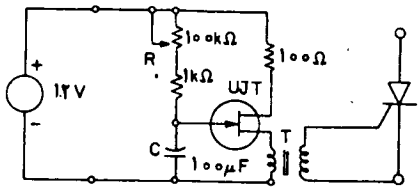


شکل ۲ــ۱۸ پالسهای قطع ــ وصل

پالسهای منفرد یا چندگانه را هم می‌توان از مدارهای ترانزیستور تک پیوندی[5] UJT که یکی از آنها در شکل ۲ ــ ۱۹ نشان داده شده است به دست آورد . این مدار حاوی یک کنترل کننده ساده دستی است . خازن C تا موقعی شارژ می‌شود که ترانزیستور تک پیوندی شکست الکتریکی پیدا کند (به‌هدایت‌درآید) و سپس در دو سر ترانسفورماتور پالسی ظاهر می‌شود . زمان لازم برای ظاهر شدن پالس بستگی به مقدار ثابت زمانی RC دارد .

چند ضربانی (نوسانساز) آزاد هیچ حالتی[6] نیز یکی دیگر از مدارهائی است‌که‌می‌تواند

1- Single Pulses
2- Multiple Pulses
3- Monsotable Multivibrator
4- Defined Magnitude
5- Unijunction transistor
6- Astable of free runing multi-vibrator



شکل ۲ـ۱۹ مدار فرمان ترانزیستور تک‌پیوندی

یک سلسله پالسهای فرکانس زیاد تولید کند . موقعی که منبع تغذیه جریان متناوب و بارسلفی است این مدار یکی از قابل اعتمادترین مدارها برای اعمال علامت‌به دریچه است . لذا امکان ندارد که جریان قفلی به حداقل مقدارلازم برای هدایت برسد ، تا زمانی که آند کاملا مثبت شود . این روش فرمان را در علامت جریان مستقیم نیز می‌توان به کار برد .

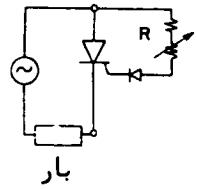
(پ) علایم فرمان جریان متناوب

کنتـرل فاز یک روش عمومی بـرای تغییر قدرت باری است که با جریان متناوب‌تغذیه می‌شود . قدرت بار را می‌توان با تغییر قسمتهایی از سیکل ولتاژ که درطول آن‌عبور جریان‌برای هدایت مجاز است مدوله کـرد شکل ۲ ــ ۲۰ . یعنی ، این که پالس فرمان برای روشن کردن تیریستور در قسمت صحیحی از سیکل ، با منبع تغذیه جریان متناوب همزمان[1] است و فاز آن نسبت به ولتاژ منبع تغذیه کنترل می‌شود .

شکل ۲ـ۲۰ ولتـاژ آند نسبت به کاتد درطی‌کنترل فاز (الف)
بدون‌هدایت (ب) ۹۰درجه هدایت (پ) ۱۵۰ درجه هدایت

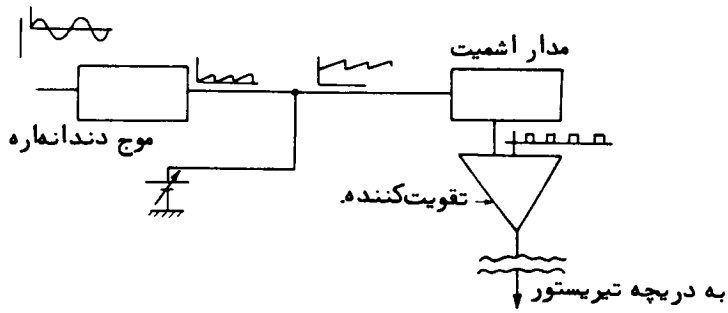
روش ساده‌ای که می‌تواند زاویه هدایت را تا ۹۰ درجه کنترل کند بسط‌وگسترشی ازمدار شکل ۲ ــ ۱۷ است ، کـه در شکل ۲ ــ ۲۱ با یک مقاومت متغیـر R دوباره ترسیم‌شده‌است . افزایش مقاومت R باعث تأخیر زمان یا فاز در سیکل جریان متناوب‌می‌شودتا ولتاژمثبت‌مکفی برای عبور جریان لازم و کافی از دریچه برای روشن کردن تیریستور ایجاد کند .

1- Synchronized with A.C. supply



شکل ۲ـ۲۱ مـدار کنترل فاز تا ۹۰ درجه

مدار فرمان دقیق‌تری به صورت نمودار بندالی[1] در شکل ۲ ـ ۲۲ نشان داده شده است . منبع تغذیه جریان‌متناوب علامت‌همزمانی ارائه می‌دهدکه به موج دندانه‌ارهای[2] تبدیل‌می‌شود و این موج به نوبه خود مدارفرمان اشمیت[3] را که از انواع چندضربانیها است تغذیـه می‌کند . این مدار ، پالس ساز[4] فرمان تیریستور است . موقعی که علامت ورودی به مدار فرمان‌اشمیت‌به سطح معینی برسد علامتی‌با پیشانی صعودی تند [مثل ضلع عمودی یک‌زاویه‌قائمه] درخروجی ظاهر می‌شود . حال وقتی ورودی مدار فرمان اشمیت از مقدار معینی‌کمترشود خروجی‌پالس‌ساز به صفر تنزل خواهد کرد . موج دندانه ارهای قادر است خروجی مدار فرمان اشمیت‌رادر لحظه معینی از هر سیکل به صفر تنزل دهد ولی لحظه صعود و یا شروع پالس خروجی را می‌توان با تغییر سطح جریان‌مستقیم‌موج ورودی تغییرفاز داد ، درنتیجه لحظه شروع هدایت‌مدار اشمیت قابل کنترل می‌شود . این تغییر فـاز تقریبا تمام ۱۸۰ درجه موجود در یک نیـم‌سیکل جریان متناوب را می‌تواند در برگیرد .



شکل ۲ـ۲۲ مدار فرمان کنترل فاز

1- Block diagram
2- Sawtooth
3- Schmidt Trigger
4- Pulse shaper

۲ـ۷ـ۴ مدارهای خاموشی یا (قطع) تیریستور

تـاکنون روشهای عمومی خاموش کردن تیریستـور تشریح شده است و این شیوه‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند. (الف) قطع جریان در مدار (ب) جابه‌جایی اجبـاری. در روش اول انجام این‌کار توسط بازکردن کلیدمدار بار و یا وصل کلیدموازی با تیریستور به منظور عاری کردن[1] آن از جریان امکان پذیر است. در روش دوم این عمل را به طرق زیادی می‌توان عملی کرد. ساده‌ترین روش، جابه‌جایی فاز است یعنی موقعی‌که منبع تغذیه متناوب‌است، پس ازنیم سیکل تیریستور به طور معکوس بایـاس، و خاموش خواهد شد. گذشت ۲۰ میکروثانیه از زمـان مثبت شدن کاتد الزاما موجب خاموشی نمی‌شود، بلکـه تیریستور موقعی قطع یـا خاموش می‌شود که جریان مستقیم در آن به صفر تنزل کند و این بستگـی به راکتانس بارخواهد داشت. اگر بار خازنی باشد جریان قبل از ولتاژ به صفر تقلیل می‌یابد، که این خود را، به مثابه جابه جایی اجباری ازطریق تشدید و درحالی‌که منبع‌تغذیه مدار ازنوع جریان‌مستقیم است نشان‌می‌دهد.

خازنها از عناصر اصلی مدارهای جابه‌جایی اجباری هستند. تنها مداری که احتیاج به خازن ندارد مداری است‌که برای‌خاموش کردن‌تیریستور، پالسی‌ازخارج وازطریق‌ترانسفورماتور به آن اعمال می‌کند. در زیر چهار نوع مدار خاموش کننده خازنـی تشریح شده است. لیکـن انتخاب یکی از چهار نوع و یا روش دیگر اغلب به کاربرد تیریستور ارتباط دارد.

(الف) خود جابه‌جایی توسط مدار تشدید[2]

شکل ۲ ــ ۲۳ (الف) یک مدار تشدید LC را نشان می‌دهد. صفحه X خازن C موقعی‌که تیریستور می‌خواهد روشن شود و جریان بار را هدایت کند مثبت است، وبه محض روشن شدن تیریستور خازن از طریق تیریستور و سلف L (در مدار تشدید) تخلیه، و قطبیت[3] صفحاتش عوض می‌شود. جریان تشدید پس از نیم‌سیکل معکوس خواهد شد و اگر مقدارش بزرگتر ازمقدار جریان بار باشد تیریستور خاموش می‌شود. حال اگر بار اتصال کوتاه شود در آن صورت مـدار تشدید نمی‌تواند جریان زیادی به اندازهٔ کافی برای خاموش کردن تیریستور مهیاسازد. لذا، بایستی برای کلیه بارها رابطه زیر برقرار باشد.

$$C > t_{\text{off}}/R_L \ \mu\text{F}, \qquad \text{میکروفاراد}$$

که در آن t_{off} زمان جابه‌جایی برحسب میکروثانیه و R_L مقاومت بار است. عملامقدارخازن C از این مقدار به مقدار کمینه‌ای که جابه‌جایی قابل اعتمادی ایجاد کند تقلیل می‌یابد.

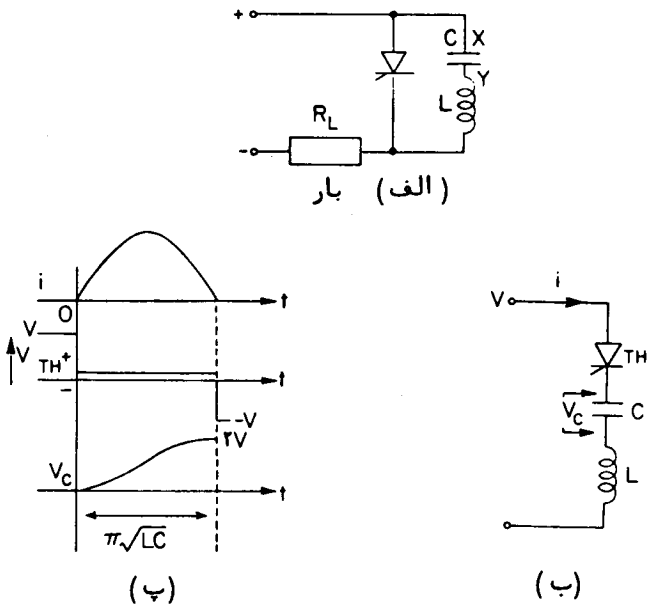
مدارمشابهی‌که ولتاژمعکوس توسط خاصیت‌تشدیدمدارفراهم‌می‌کند در شکل ۲ ــ ۲۳ (ب)

1- Starve

2- Self commutation by resonance

3- Polarity

و شکل موجهای مربوط به این مدار در شکل ۲ ــ ۲۳ (پ) مشاهده می‌شود. شکل موجها عمل خاموشی را در تیریستور تشریح می‌کنند. یعنی اینکه وقتی خازن باردار شد مدار تشدید سعی در ایجاد جریان‌معکوسی برای خاموش کردن‌تیریستور می‌کند. دوره هدایت بامقادیر L و C که مقادیر ثابتی هستند تعیین می‌شود.



شکل ۲ــ۲۳ خود جابه‌جایی

(الف) خاموش شدن با مدار تشدید موازی (ب) خاموش شدن با مدار تشدید سری (پ) شکل موجهای مدار

(ب) خاموش کردن تیریستور توسط مدار تشدید کمکی

چگونگی کنترل لحظه خاموشی تیریستور به کمک تیریستور دیگری $TH2$ و توام با مدار تشدید LC، در شکل ۲ ــ ۲۴ نشان داده شده است. در این مدار تیریستور $TH2$ بایستی به منظور باردارشدن خازن C قبل از تیریستور اصلی روشن‌شود تابه محض باردار شدن‌خازن وافت‌جریان مدار به مقدار زیرجریان نگهدارنده، تیریستور $TH2$ خاموش شود. اکنون‌تیریستور $TH1$ می‌تواند برای عبور جریان بار و جریان تشدید مدار LC روشن شود. موقعی که خازن C قطبیت خود را عوض کرد، یعنی موقعی که صفحه Y نسبت به صفحه X مثبت شد و اختلاف پتانسیل بین دو صفحه به دو برابر ولتاژ منبع تغذیه نزدیک شد، دیود از تغییر بیشتر بار در

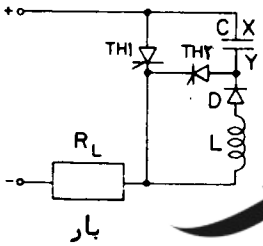
صفحات خازن جلوگیری می‌کند . در این لحظه اگر تیریستور $TH۲$ برای دومین بار روشن شود ولتاژ دو سر خازن تیریستور $TH۱$ را بایاس‌معکوس، و آن را خاموش می‌کند . همانند قسمت الف در این مدار بایستی‌بین‌ظرفیت خازن و زمان خاموش شدن ومقاومت بار رابطه زیر برقرارباشد.

$$C > t_{off}/R_L \ \mu F.$$ میکروفاراد

زمان هدایت تیریستور $TH۱$ نبایستی خیلی طولانی شود چون وجودجریان‌نشتی معکوس در دیود و تیریستور باعث تخلیه خازن می‌شود و در طول زمان معینی ولتاژ دو سر خازن‌برای خاموش کردن توام با اطمینان تیریستور $TH۱$ کافی نخواهد بود . بنابراین معمولا از این مدار درمواقعی‌که جریان مستقیم متوسط متغیری مورد لزوم است استفاده می‌شود ، با کلید زنی‌سریع تیریستور و تغییر نسبت زمان وصل به قطع ، به این منظور نائل می‌شوند .

(پ) خاموش کردن تیریستور توسط خازن موازی

یکی از روشهای متعدد خاموش کردن تیریستور توسط خازن موازی در شکل ۲ ــ ۲۵ نشان داده شده است . طرز کار این‌مدار به این صورت‌است که در زیر تشریح می‌شود : مدارباخاموش بودن تیریستور $TH۲$ و هدایت جریان بار توسط تیریستور $TH۱$ شروع به کار می‌کند . صفحه Y ازخازنCتقریبا به علت افت کم ولتاژ در دو سر تیریستور دارای پتانسیل معادل زمین یا صفر است و صفحه X دارای پتانسیل مثبتی معادل پتانسیل منبع تغذیه خواهد بود ، زیراخازن C



POWEREN.IR

شکل ۲ــ۲۴ خاموشی مدار تشدید قابل کنترل

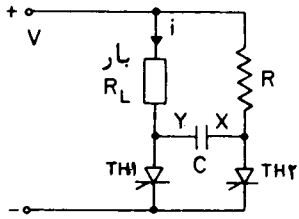
از طریق R ، C و $TH۱$ باردار می‌شود . اگر انرژی ذخیره شده در خازن C موقعی که $TH۲$ روشن می‌شود به اندازهٔ کافی زیاد باشد ، خازن C شروع به خالی‌شدن‌می‌کندو $TH۱$ رابه‌مدتی بیش از زمان خاموش شدن (تیریستور) بایاس معکوس می‌کند . روشن شدن یکی از تیریستورها باعث خاموش شدن تیریستور دیگر می‌شود ، این سیستم مرتبا تکرار می‌شود .

اگر مقاومت R بار مصرفی دیگری غیر از بار مصرفی اصلی مدار نباشد در انتخاب مقدار آن بایستی دقت کافی مبذول داشت تا اولا اتلاف قدرت در آن کمینه باشد ، ثانیا مطمئن شد

که ثابت زمانی RC در مقایسه با مقادیر اسمی کلیدزنی خیلی زیاد و طولانی نباشد ، ثالثا بایستی مقدار آن به حد کافی کوچک باشد تا اینکه جریان عبوری از آن از جریان نشتی $TH۲$ بیشتر شود ، به عبارت دیگر خازن صفحه X را به طور مثبت باردار نخواهد کرد .

به منظور محاسبه مقدار ظرفیت خازن C برای خاموش کردن مطمئن تیریستورتعیین زمان لازم برای بایاس مستقیم شدن تیریستور $TH۱$ پس از روشن شدن دوباره تیریستور $TH۲$ضرورت دارد . در حالی که تیریستور $TH۱$ بایاس معکوس است ، خازن C جریان بار کامل را از خود عبور می‌دهد ، لذا اگر V ولتاژ منبع تغذیه باشد جریان بار به صورت زیر خواهد بود :

$$i = \frac{۲V}{RL} e^{-t/CRL}$$



شکل ۲ــ۲۵ خاموش کردن تیریستور با خازن موازی

ولتاژ دو سر تیریستور $TH۱$ عبارت است از :

$$V_{TH۱} = V - iR_L$$

یعنی :

$$V_{TH۱} = V(۱ - ۲e^{-t/CR_L})$$

و زمان لازم برای به صفر رسیدن این ولتاژ که همان زمان لازم برای بایاس مستقیم شدن تیریستور $TH۱$ است ، عبارت است از :

$$t = ۰/۷CR_L.$$

که بایستی از زمان خاموش شدن تیریستور $TH۱$ بیشتر باشد ، یعنی :

$$t_{off} < ۰/۷CR_L$$

و یا :

$$C > t_{off}/۰/۷R_L.$$

توصیه می‌شود که از خازنی با ظرفیت بیشتر از مقدار محاسبه شده استفاده شود ،وسپس در عمل خازن C را به حدی کاهش داد تا کمی بیشتر از مقداری شودکه‌به ازای آن جابه‌جایی امکان‌پذیر نخواهد بود . اگر بار شامل القا باشد مقدار ظرفیت خازن C کاهش می‌یابد . با این حال مطالب گفته شده در بالا برای هر نوع باری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد .

(ت) خاموش کردن تیریستور توسط خازن سری

یکی از روشهای خاموش کردن با خازن سری در مدار وارونگر (معکوس کننده) که دارای موج ولتاژ خروجی مربعی است را شکل ۲ ــ ۲۶ نشان می‌دهد. اگر تیریستور TH_2 قطع و TH_1 وصل باشد جریان از بار عبور خواهد کرد و در صورت قطع TH_1 و وصل TH_2 جریان از بار در جهت معکوس عبور خواهد کرد.

اغلب، جریان خروجی مورد درخواست از مدار سینوسی شکل است. که در آن صورت برای‌داشتن تنظیم‌صفردرفرکانس اصلی[1] وتضعیف‌زیاد درفرکانسهای‌ناخواسته[یا هارمونیکها] از صافی استفاده می‌شود. اگر اتصال صافی وارونگر (معکوس کننده)، بار مدار را خازنی‌کند، این امر موجب معکوس شدن جریان قبل از معکوس شدن ولتاژ می‌شود. جریان معکوس از طریق دیود عبور، و یک ولتاژ بایاس معکوسی در دو سر تیریستور ایجاد می‌کند، که باعث خاموش شدن تیریستور می‌شود. قابل توجه است که در این حالت ولتاژ معکوس از افت ولتاژ مستقیم در دو سر دیود، یعنی، حدود یک ولت بیشتر نخواهد بود.

عناصر سلف و خازن در مدار با فرکانس اصلی در حال تشدید هستندو امپدانس صفری بین مدار وارونگر (معکوس کننده) و فرکانس مورد احتیاج ایجاد می‌کنند، بهاین‌ترتیب عناصر LC مثل یک صافی پایین گذر عمل، و فرکانسهای ناخواسته را تضعیف می‌کنند. خازن C_1 به طور موازی با بار اتصال می‌یابد تا بار را خازنی کند، در نتیجه جریان از نظر فاز از ولتاژ جلومی‌افتد و تیریستور به راحتی خاموش می‌شود.

همان طوری که در شکل ۲ ــ ۲۶ نشان داده شده است برای تکمیل یک سیکل کامل در مدار چهار مرحله به ترتیب زیر وجود دارد:

(۱) تیریستور TH_1 هادی و TH_2 قطع

(۲) دیود D_1 هادی و TH_1 و TH_2 قطع

(۳) تیریستور TH_2 هادی و TH_1 قطع

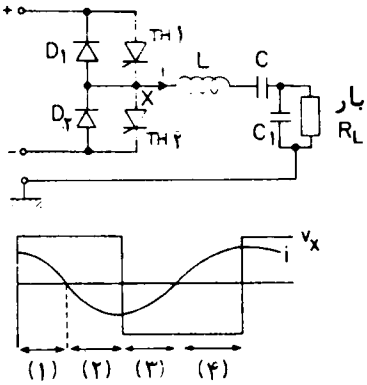
(۴) دیود D_2 هادی و TH_1 و TH_2 قطع

هرگز نبایستی دو تیریستور تواما و در یک لحظه روشن، و باعث اتصال کوتاه منبع تغذیه شوند.

۲ـ ۸ مدارهای حفاظت تیریستور

تیریستورهابه ولتاژ زیاد، اضافه جریان، و به هر شکلی از گذراها (هم از لحاظ مقدارو هم میزان تغییر) حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند. از آنجایی که مدارهای حفاظتی

1- Fundamental frequency



شکل ۲ـ۲۶ خاموش کردن تیریستور با خازن سری

پیچیده و گران هستند ، مهندسان طراح که سعی دارند به بهترین وجهی عناصر حفاظتی مورد استفاده مدارها را به حداقل برسانند ترجیح می‌دهند از تیریستورهایی که مقادیر اسمی آنها در حدود سه برابر ملزومات مقادیر حالت دایمی بار است استفاده کنند .

۲ـ ۸ ـ ۱ اضافه ولتاژ[1]

در تیریستورها حفاظت در برابر ولتاژهای مستقیم زیاد ذاتی است . تیریستور قبل از رسیدن به ولتاژ مستقیم پیک pfv شکست الکتریکی پیدا ، و شروع به هدایت می‌کند ، لذا ولتاژ زیادی به قسمت دیگری از مدار که اکثرا بار مصرفی است منتقل می‌شود . روشن شدن تیریستور سبب عبور جریان زیادی از مدار می‌شود که مشکل حفاظت از نظر اضافه جریان را به وجود می‌آورد .

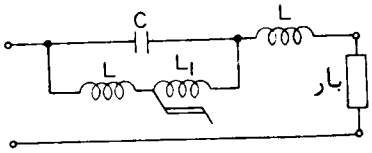
۲ـ ۸ ـ ۲ اضافه جریان[2]

عموما جریان زیاد در هر مداری توسط فیوزها و یا مدار برها[3] محدود می‌شود . مدارهای تیریستوری نیز به همین ترتیب حفاظت می‌شوند ، ولی در کاربرد آنها قیدو شرط و استثناهایی وجود دارد . فیوز بایستی دارای ظرفیت قطع کنندگی بالا و توقف سریع جریان باشد ،بایستی تشابهی بین ظرفیت اسمی I^2t تیریستور و فیوز وجود داشته باشد بدون اینکه اضافه ولتاژگذرای بالا که تیریستورها را در شرایط قطع و یا امپدانس بینهایت به مخاطره می‌اندازد تولید شود . اینها ملزومات متناقضی هستند ، که در مواقع استفاده از فیوزهای سریع العمل لزوم حفاظت از

1- Overvoltage 2- Overcurrent 3- Circuit breaker

نظر ولتاژ را ایجاب می‌کنند . فیوزها همیشه مورد استفاده قرار نمی‌گیرند ، ولی موقعی که ازآنها استفاده می‌شود ، ولتاژهای قوس [1] آنها زیر ۱/۵ برابر ولتاژ پیک مدار محدود می‌شود . در مدارهای کم قدرت ، در صورتی که ارزش فیوزهای سریع‌العمل بیشتر از خود تیریستور باشد کاربرد فیوز حفاظتی بی‌معنی است . در اکثر مدارها از بازیابی [2] مقدار جریان می‌توان استفاده کرد و عمل حفاظت را انجام داد . موقعی که اضافه جریانی آشکار شد مدار دریچه تیریستور از دو طریق یعنی خاموش کردن تیریستورهای ویژه و یا در جابه‌جایی فاز با کاهش دوره هدایت و در نتیجه تقلیل مقدار متوسط جریان کنترل می‌شود .

اگر خروجی مدار تیریستوری که بار را تغذیه می‌کند متناوب باشد مدار تشدید LC علاوه بر عمل صافی عمل حفاظت در برابر اضافه جریان را نیز انجام خواهد داد . شکل ۲ ــ ۲۷ محدود کننده جریانی که حاوی واکنشگر اشباع‌پذیر [3] است را نشان می‌دهد . درجریانهای مجاز واکنشگر اشباع پذیر L_1 ، امپدانس زیاد ظاهر می‌سازد و خازن C همراه با سلف L که در تشدید سری هستند ، دربرابر عبور جریان‌هارمونیک اصلی امپدانس صفر ازخودنشان می‌دهند. ولی برای اضافه جریان L_1 اشباع شده و دارای امپدانس قابل اغماضی خواهد بود . همچنین مدار تشدید LC موازی درمقابل عبورجریان به ازای فرکانس تشدید امپدانس بینهایتی ایجاد می‌کند .



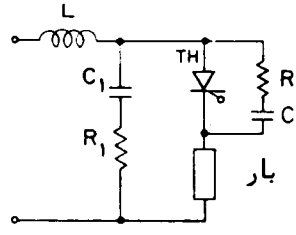
شکل ۲ــ۲۷ محافظت در برابر اضافه جریان

۲ـ۸ـ۳ خیزهای (تغییرات ناگهانی) ولتاژ [4]

انواع اشتباهات و ناکامی‌ها در نتیجه خیزهای ولتاژ پدید می‌آید ، زیرا در واقعیت امر تیریستور ضریب اطمینانی در ظرفیت اسمی خود ندارد . انرژی اضافی اندکی ، می‌تواند سبب خرابی تیریستور شود . حفاظت در برابر خیزهای ولتاژ با ذخیره [5] سریع انرژی در عناصرسلف وخازن واتلاف آهسته ویاسریع آن درمقاومتهای غیرخطی به صورت حرارت در متوقف سازهای خیز ولتاژ [6] یا وسایل شکست بهمنی انجام می‌گیرد .

1- Arc voltage
2- Detection
3- Saturable reactor
4- Voltage surges
5- Storage
6- Surge suppressor

خیزهای ولتاژ خارجی ، قابل کنترل توسط طراحان مدارهای تیریستوری نیست و فقط می‌توان سعی در حفاظت دستگاههای قدرت در برابر این خیزهای ولتاژ کرد . شکل ۲ ــ ۲۸ یکی از این روشها را نشان می‌دهد . وقتی‌کلیداصلی در شرایط بی‌بار قطع می‌شود انرژی‌میدان مغناطیسی هسته ترانسفورماتور می‌تواند به خازن C انتقال یابد . خازن C همچنین‌تیریستور را در برابر انرژی مغناطیسی میدان‌نشتی همان ترانسفورماتور یا در برابر سلف صافی[1] L (در موقع کاهش بار) حفاظت می‌کند . خازن C انرژی الکترواستاتیکی تولیدشده توسط خازن‌سیم‌پیچی‌های داخلی‌ترانسفورماتور را موقعی‌که وصل درحالت بی‌باری اتفاق‌می‌افتد ،جذب‌می‌کند. اما ممکن است در اثر این عمل در مدار حفاظت LC_1 نوساناتی ایجاد شود . لذا R_1 بـه عنوان مقاومت میراکن[2] (خفه کننده) از افزایش ولتاژ به دو برابر بیشینه مقدار منبع در دو سر C_1 جلوگیری می‌کند .



شکل ۲ــ۲۸ حفاظت در برابر خیزهای خارجی

انرژی همراه با خیزهای ولتاژ داخلی که توسط کلید زنی تیریستورهای جداگانه ایجاد می‌شوند اندک است وبرای‌حفاظت این انرژی اجزاءکوچکی مورد نیاز است . در شکل ۲ ــ ۲۸ مقاومت R به‌طورسری با خازن C برای جلوگیری از عیب ناشی از ذخیره حاملهای اقلیت‌در طی نوسانات جابه‌جایی اضافه شده است . خازن C مسیری برای جریان معکوسی که موقع‌مسدود‌شدن[3] ناگهانی‌تیریستور در انتهای زمان ذخیره حاملهای اقلیت‌ایجاد می‌شود ، مهیامی‌کند . اما این خازن در طی مسدود بودن مستقیم تیریستور با قطبیت مخالف شارژ می‌شود وبه‌هنگام روشن‌شدن‌تیریستور سریعا ازطریق آن‌تخلیه‌می‌شود .مقاومت R جریان‌مستقیم‌ابتدایی راموقعی که تیریستور روشن می‌شود محدود می‌کند و نوسانات مربوط به آثار ذخیره (انبارش) حاملهارا در موقع قطع تیریستور میرا می‌کند .

برای حفاظت در برابر سوختن موضعی اتصالات تیریستـور که مربوط به تغییرات شدید di/dt درموقع روشن‌شدن است ، سلف L و مقاومت R تواما افـزایش جریان آنـد را محـدود

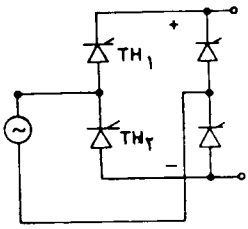
1- Smoothing choke 2- Damping 3- Block

می‌کنند ، همچنین ازخازن متوقف ساز خیز ولتاژ C_1 و خازن ذخیره حفره C می‌توان‌تخلیه‌ای بیش از ۳۰ آمپر بر میکروثانیه به وجود آورد .

تغییرات شدید مستقیم ولتاژ dv/dt می‌تواند تیریستور را درمواقع‌ناخواسته روشن کند و همچنین باعث خرابی مربوط به اضافه بار در تیریستور شود . اگر منبـع تغذیه ولتاژ جریان مستقیم باشد به هنگام وصل کلید اصلی ، تغییرات شدید dv/dt که در وضع ایده‌ال‌یک‌تغییر پله‌ای است ، غیرقابل اجتناب خواهد بود . در یک واگردان (مبدل) تیریستوری که قسمتی از آن در شکل۲ ــ ۲۹ نشـان داده شده است ، موقعی که $TH۲$ روشن می‌شود $TH۱$ ولتاژجریان مستقیم کاملی که دارای افزایش اولیه ۴۰۰ ولت بر میکروثانیـه است دریافت می‌کند . تمامی عناصر L ، R ، C و مدار شکل ۲ ــ ۲۸ به حفاظت تیریستور در برابر تغییرات dv/dt کمک می‌کنند . اگر V ولتاژ جریان مستقیم اعمال شده و V_c ولتاژ دو سر خـازن C باشد معادله ولتاژ در ابتدا خواهد شد :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V - V_c}{L/R}$$

که در آن L/R ثابت زمانی سلف است .



شکل ۲ ــ ۲۹ تغییرات شدید dv/dt

اگر دیودی بامقاومت R موازی شود در ولتاژهای پله‌ای مستقیم ، به منظور پایین‌نگه‌ــ داشتن dv/dt کنارگذاشته[1] شدن‌مقاومت R راموجب‌می‌شود . ولی‌هنگام روشن‌شدن تیریستور برای کنترل جریان اولیه آن R را وارد مدار[2] خواهد کرد . خازن دو سر تیریستور اجازه بروز تغییر ناگهانی در ولتاژ را نمی‌دهد و دقیقا مثل یک سلف با تغییرات جریان مخالفت می‌کند . اگر از دیود استفاده شود ممکن است خازن کوچکی موازی با آن اتصال‌یابدتا ولتاژهای‌نوسانی فرکانس زیادی را که ثابت زمانی RC شکل ۲ ــ ۲۸ نمی‌تـواند پاسخگو باشد جذب کند .

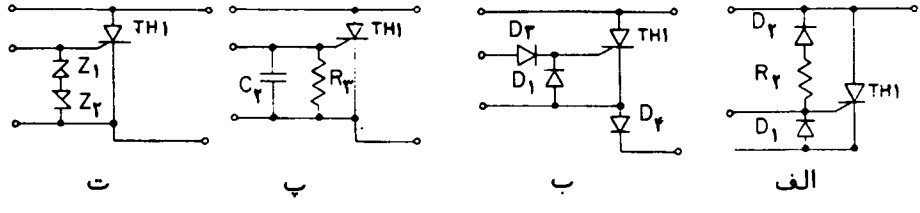
مدارهای دریچه نیز به خاطر اینکـه با قدرت و ولتـاژ کوچکی کار می‌کند نیاز به اجزاء

1- By-pass

2- Switch-in

حفاظتی دارند . تغییرات سریع ولتاژ و جریان‌درسیمهای اتصال‌دریچه ولتاژهای ناخواسته‌ای القا می‌کنند ، بنابراین حفاظ کشی[1] دقیق ، زمین کردن و صافی ضرورت دارد . همچنین قرار دادن سیمهای اتصال روی یکدیگر و ترجیحا بهم پیچیدن آنها ، هرگونه تداخلی[2] را در دو سیم به حالت تعادل‌می‌رساند و آن را خنثی می‌کند . برخی از اشکال ممکن حفاظت دریچه در شکل ۲ ــ ۳۰ نشان داده شده‌اند . شکل ۲ ــ ۳۰ (الف) یــک مدار محــدود کننده[3] است که از مقاومت R_2 و $D2$ تشکیل‌می‌شود و علایم‌مثبت دریچه رابه هنگام منفی شدن آند تضعیف[4] می‌کند ، در نتیجه تلفات در جهت معکوس نیــز محدود می‌شود . در مدار شکل ۲ ــ ۳۰ (ب) دیود $D4$ که بایستی جریان مسدود کننده معکوس کمتری از $TH1$ داشته باشد در تقسیم ولتــاژ معکوس سهم بزرگی را از آن خود می‌سازد . دریچه تیریستور چون نسبت به کاتد هرگــز نباید بیشتر از مقدار محدودی (در حدود ۵ ولت) منفی شود لذا دیود $D1$ یا $D3$ در شکل (ب) و دیود زنر Z_1 و Z_2 در شکل (ت) از منفی شدن بیش از حد دریچه جلوگیری می‌کنند .دیود $D1$ ولتاژ بایاس منفی را با افت مستقیم که در حدود یک ولت است ، محدودخواهدکردودیودهای زنر ولتاژها را به یک حد معین و مناسبی کــه برای علایم دریچه جریــان متناوب مفید باشند قیچی[5] خواهد کرد . در شکل (پ) خازن C_2 فقط در مدارهای کم‌قدرت تیریستوری‌که ازعلایم فرمان جریان‌مستقیم استفاده می‌کندبه کار می‌رود و دربرابر زودگذراهای خط، عمل‌حفاظت را انجام می‌دهد و مقاومت R_3 در این مدار برای محدود کردن dv/dt آند و کاتد قرار داده شده است .

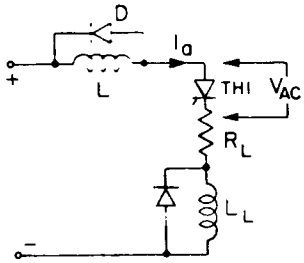
کاربرد سلف به عنوان صافی در خط و یا بار سلفی (القایی) سبب تولیدولتاژهای‌گذرای شدیدی در موقع قطع سریع جریان بار می‌شود . دیودهای چرخش‌آزاد[6] [موازی باسلف] شکل ۲ ــ ۳۱ انــرژی ذخیره شده در سلفها را در مسیر دیگری غیر از مدار تیریستور تلف می‌کنند . بررسی شکل ۲ ــ ۱۲ کــه مشخصه‌های روشن شدن ولتاژ دو سر تیریستور و جریان عبوری از آن



شکل ۲ــ۳۰ عنــاصر حفاظتی در مدار دریچه

1- Screening 2- Pick-up 3- Clamping circuit
4- Attenuate 5- Clip 6- Free-wheeling diods

را نشان می‌دهد ، حاکی از آن است که اتلاف انرژی مستقیم در تیریستور نسبت به زمان‌روشن شدن سریع‌بایستی در سطحی پایین نگهداشته شود ، به این معنی که زمان صعود جریان‌دریچه چندین آمپر بر میکروثانیه باشد . برای رسیدن به این منظور عناصر اضافی برای محافظت‌لازم نیست بلکه طراحی و انتخاب مدارهای فرمان مناسب مورد نیاز است .



شکل ۲ـ۳۱ اتـلاف انرژی ذخیره شده از طریق دیودهای چرخش آزاد

۲ـ۹ قـابلیت‌هـای نسبی تیریستورها

تیریستورها ، ترانزیستورها ، تیراترونها [1] ، لامپهای قوس جیوه‌ای [2] و رله‌های الکترو مغناطیسی همگی کلیدهای الکتریکی هستند . چه چیز در انتخاب این وسایل تعیین کننده است ؟

رله‌ها ،ساده، و به لحاظ تولید ارزان هستند . آنها عمل یکسوسازی‌انجام‌نمی‌دهند ،ولی دارای مشخصه‌های کلید زنی به راحتی کنتـرل شونده‌ای هستند . در رلـه‌ها قسمتهای‌متحرک مکانیکی وجود دارد که تولید ساییدگی [3] و پرش در اتصال [4] می‌کنند . در رله‌های‌ساده‌ظرفیت عبور قدرت اندک است . به علت وجود خود القا در سیم پیچ ، بیـن ورودی و خروجی تأخیر [فازی] وجود خواهد داشت‌که سبب محدودشدن سرعت کلیدزنی به حدود میلی‌ثانیه‌می‌شود .

تیراترونها و لامپهای قوس جیوه‌ای کلیدهای یک طرفه‌ای هستندکه جریان رادریک‌جهت هدایت‌می‌کنند و ازنظر ساختمانی‌حجیم و شکننده هستند . درحالت‌هدایت ،افت‌ولتاژمستقیم بین الکترودها حدود ۱۰ ولت برای تیراترونها و حدود ۵۰ ولت برای لامپهای قوس جیوه‌ای است و این افت‌تلفات زیادی پدیدمی‌آورد . به‌علت وجود اشکال در خاموش شدن تیراترونها و لامپهای‌قوس جیوه‌ای ، آنها فقط باجریان متناوب کارمی‌کنند . خاموشی موقعی انجام‌می‌گیرد که ولتاژ مثبت آند تقریبا به صفر تقلیل یابد .

تیریستورها و ترانزیستورها که کلیدهای نیمه‌هادی‌هستند ازنظرساختمانی فاقد قسمتهای

1- Thyratron
2- Mercury arc tube
3- Wear
4- Contact bounce

متحرک بوده و دارای وزن کم و حجم اشغالی خیلی کمی هستند . هم چنین زمانهای خاموش شدن آنها چندین بار از کلیدهای قبلی سریعتر هستند . این دلایل برای پذیرش آنها به‌عنوان کلید ، درکلیه‌موارد کلیدزنی تقریبا کافی‌است . مزیت‌بزرگ لامپ‌قوس جیوه‌ای‌قابلیت‌ایستادگی آن در مقابل ولتاژ خیلی زیاد است .

حال انتخاب تیریستور و ترانزیستور مورد بررسی قرار می‌گیرد . ترانزیستور دارای دو خاصیت برجسته است : یکی افت ولتاژی در حدود ۲۵ میلی ولت (در مقایسه با یک ولت برای تیریستور) ودیگری عدم‌نیاز به مدارخاموشی ، گرچه در حالت روشن‌بودنش یک‌جریان‌پیوسته‌ای برای پایه مورد نیاز است ؛ در صورتی که برای تیریستور فقط یک جریان پالسی در دریچه کافی است . تیریستور به علت وجود لایه سیلیکونی داخلی پهن از نوع n دارای ولتاژهای اسمی بهتری است و به خاطر یکنواخت بودن جریان در پیوندگاهها حد تحمل جریان بیشتری را دارد . به این ترتیب قابلیت تبادل قدرت تیریستورها بهتر و بیشتر از ترانزیستورها است در حقیقت تیریستور را می‌توان از قدرت میلی وات تا مگاوات به کار برد ، با این تفاوت که در قدرتهای زیاد تیریستورها همواره به کار می‌روند ، و از این لحاظ ترانزیستورها نمی‌توانند با آنها رقابت کنند . با وجود اینکه تیریستورها در سال ۱۹۵۷ تولید شده‌اند بلافاصله برای استفاده پذیرفته نشدند ، زیرا قابلیت‌تبادل‌قدرت آنها در اول زیادنبود ودارای‌مشخصه‌های ناپایداری بودند . این ناپایداری از نظر تغییر آسان پارامترها با زمان و درجه حرارت ومدت استفاده ، وهمچنین‌مشخصه‌های آنها ، ازیک‌نمونه تا نمونه دیگر کاملا متفاوت‌بودند . درصورتی که هم اکنون وضع تغییر یافته و پایداری تیریستورها خیلی خوب ، مشخصه‌های آنها یکنواحت و مشابه و عالی ، و قدرت آنها در ردیف مگاوات است .

۲ـ۱۰ تریود تیریستور دوطرفه یا تریاک[1]

تیریستور جریان را فقط در یک جهت عبور می‌دهد و یک یکسوکننده قابل کنترل است . برای کنترل جریان‌متناوبی در یک بار با نیمه هادیهای قدرت ، احتیاج به دو تیریستوراتصال معکوس موازی[2] ، طبق شکل ۲ ــ ۳۲ (الف) هست . ساختمان شمایی دو تیریستور اتصال‌موازی معکوس طبق شکل ۲ ــ ۳۲ (ب) نشان می‌دهد که لایه‌های مشابه و مشترک مثل p-n-p وجود دارد ، و امکان این هست که عنصری بسازیم که وظیفهٔ این دو تیریستور را انجام دهد . به این ترتیب ساختمان شمایی شکل ۲ ــ ۳۲ (پ) از تلفیق لایه‌های مشترک به دست می‌آید ، که دارای عملکردی مشابه دو تریستور (اتصال موازی معکوس) است . این‌ترکیب‌جدید خود دارای مشخصه‌های خاصی نیز هست ، و معایب و مزایایی نسبت به دو تیریستور موازی

1- The bidirectional Triode Thyristor (triac) 2- Back to back

معکوس دارد . دربعضی‌حالات و نه درهمه مواقع تیریستورها رامی‌توان با این وسیله جایگزین کرد .

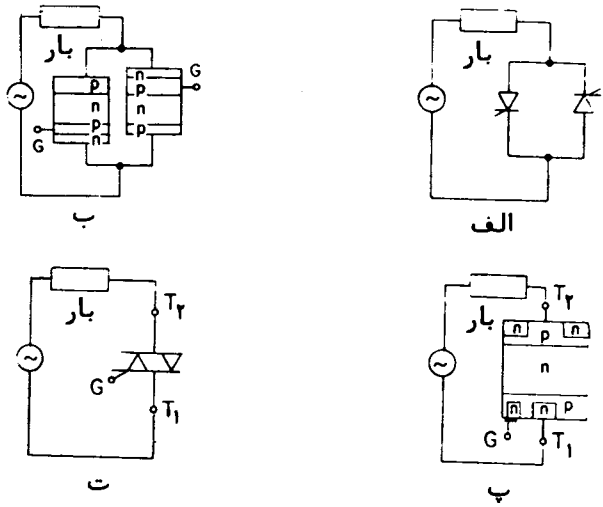
این کلید تازه دارای نمادی طبق شکل ۲ ــ ۳۲(ت) ، و نام تجارتی‌اش تریاک است که در آن تری معرف آن است که این عنصر دارای سه پایانه یعنی T_1 و T_2 و G است و اک معرف آن است که این عنصر جریان متناوب را کنترل می‌کند ، و یا جریان رادر دوجهت عبور و مورد کنترل قرارمی‌دهد . پایانه‌های T_1 و T_2 معرف آند و کاتد تیریستور هستند ؛ولی امکان تمیز دادن جهت هدایت با نامگذاری مشابهی مقدور نیست . پایانه G معرف الکترود دریچه است . ولی دریچه در تریاک به هر دو لایه p و n اتصال یافته است و بر خلاف دو تیریستور که احتیاج به دو جفت پالسهای مجزا از هم برای پایانه‌های مختلف‌دارد ، درتریاک فقط یک جفت پایانه GT کافی خواهد بود .

برای عملکرد تریاک‌پالس جریان چند میلی‌آمپری به دریچه آن اعمال‌می‌شود .اگرپایانه T_2نسبت به T_1 مثبت باشد تریاک روشن می‌شود (وسیله از وضعیت‌امپدانس بینهایت‌به‌حالت امپدانس صفر تغییر می‌یابد) و جریان معمولی از T_2 به طرف T_1 عبور خواهد کرد و اگر T_1 نسبت به T_2 مثبت باشد و علامتی به دریچه اعمال شود این بار جریان از T_1 به T_2 عبور خواهد کرد . بنابراین تریاک را می‌توان به صورت یک کلید جریان متناوب یا کنترل فاز ولتاژ جریان متناوب برای تنظیم قدرت انتقال یافته از منبع به بار مورد استفاده قرار داد . شکل ۲ ــ ۳۲ منحنی مشخصه ولت ــ آمپر تریاک را نشان می‌دهد . موقعی که تریاک روشن می‌شود افت ولتاژ در دو سر تریاک تقریبا " مستقل از دامنه جریان می‌شود و درحدود یک ولت است .

برای روشن کردن تیریستور فقط اعمال علامت مثبتی (نسبت به کاتد)به دریچه و وارد کردن ولتاژ مثبتی به آند کافی است در صورتی که برای دریچه تریاک هر علامتی چه مثبت و چه منفی باعث روشن شدن آن می‌شود ، که این خود مزیت اضافی دیگر تریاک است ، زیرا مدارهای پالس در این حالت ساده‌تر خواهند بود به هر حال یکی از مشخصه‌های تریاک این است که اگر T_1 نسبت به T_2 مثبت باشد ، برای روشن شدن‌تریاک ، پالس منفی‌نسبت‌به‌پالس مثبت در دریچه به بار کمتری نیازمند است . برای ایجاد حساسیت بیشینه بایستی‌پالس‌منفی به کار برد .

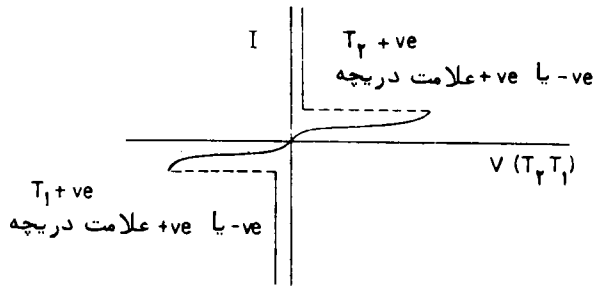
بدون اعمال علامتی روی دریچه یا حتی بدون الکترود دریچه ، تریاک رامی‌توان توسط پدیده شکست بهمنی روشن کرد . درست مثل تیریستور یا دیود چهار لایه[1] p-n-p-n ؛ با اعمال ولتاژ زیاد کافی ، یعنی ، V_{BO} به آند یا در صورتی که حدودتغییرات‌ولتاژاعمال‌ــ

1- Two terminal



شکل ۲ــ۳۲ تیــریستورهای اتصال موازی معکوس و تریاک

شده به آند dv/dt بالاتر از مقدار بحرانی شود تریاک به راحتی روشن‌می‌شودو کلیه مطالب مذکور در تیریستور در مورد ساختمان مرکب تریاک‌نیزصادق خواهدبود . در تریاک ولتاژ V_{BO} یا تغییرات سریع dv/dt را می‌توان به هر دو پایانــه T_1 و T_2 اعمال و آن را روشن کرد . حفاظت این وسیله در مقابل خطر ناشی از این امر به عهده بقیه مدار است . این ابزار با دو پایانه بدون الکترود دریچه به دیود دو طرفه موسوم ، و دارای نام تجارتی دیاک[1] است .

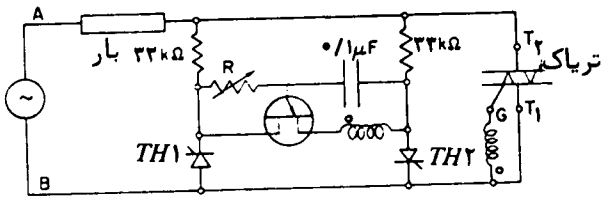


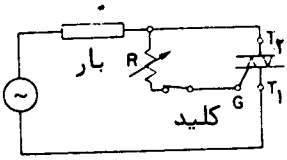
شکل ۲ ــ ۳۳ مشخصه تریاک

روش راه‌اندازی تریاک متنوع‌تر از تیریستور است . ساده‌ترین آرایش ممکــن برای روشن

1- Diac

کردن تریاک در هر نیم سیکل در شکل ۲ ــ ۳۴ نشان داده شده است . در این مدار موقعی که T_1 مثبت است دریچه علامت منفی حساستری دریافت می‌کند . این مدار را با ساده‌ترین مدار دریچه لازم برای‌فرمان دو تیریستور اتصال‌موازی معکوس برای‌کنترل قدرت‌جریان متناوب مقایسه کنید . مدار دیگری که عبور جریان را در یک جهت و یا در هر دو جهت با کنترل فاز دستی مجاز می‌سازد در شکل ۲ ــ ۳۵ با استفاده از ترانزیستور تک پیوندی UJT و دو تیریستور کم قدرت مشاهده می‌شود . موقعی که خط [1] A مثبت است تیریستور $TH2$ روشن می‌شودوهدایت‌تریاک را ممکن می‌سازد و موقعی که خط B مثبت است برای هدایت تریاک ، تیریستور $TH1$ روشن می‌شود . در غیر این صورت $TH1$ و$TH2$هر دو خاموش می‌شوند و جریان باری از طریق تریاک عبور نخواهد کرد . اگر خط A مثبت و$TH2$روشن باشد خازن C به میزانی بسته به مقدار مقاومت R باردار خواهد شد . در ولتاژ مخصوصی‌ترانزیستورتک‌پیوندی (UJT) خواهد شکست [2] و اولیه ترانسفورماتور یک پالس انرژی دریافت می‌کند و این پالس از طریق ثانویه ترانسفورماتور به دریچه تریاک انتقال می‌یابد و دریچه را نسبت به T_1 منفی می‌کند . موقعی که تریاک هدایت می‌کند مدار فرمان دریچه را اتصال کوتاه می‌کند . در نتیجه خازن در انتهای هر نیم سیکل در همان شرایط ابتدایی خود باقی خواهد ماند . پالس فرمان مشابهی موقعی که خط B مثبت و$TH2$ روشن می‌شود به وجودمی‌آید و به همان‌ترتیب‌ذکر شده تریاک را هادی خواهد کرد .





شکل ۲ ــ ۳۴ مدار ساده تریاک

شکل ۲ ــ ۳۵ کنترل جریان متناوب یا جریان مستقیم دوطرفه

درموقع بررسی روشهای‌خاموش کردن معلوم‌می‌شود که تیریستور قابل انعطاف‌تر ازتریاک، است . ازآنجایی که تریاک یک کلید دو طرفه است ، جابه‌جایی اجباری با بایاس معکوس‌کردن نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد . اعمال یک ولتاژ بایاس معکوس ناگهانی بین دو سر تریاکی که در حال هدایت است باعث می‌شود در اثر پدیده شکست بهمنی هدایت در جهت دیگر

1- Rail

2- Breakdown

صورت‌گیرد .بنابراین خاموش کردن یا به کمک انحراف جریان[1] که معمولا غیر عملی است و یا با جابه‌جایی خط جریان متناوب امکان‌پذیر است . جریان تریاک مجاز است‌به صفرکاهش پیدا کند و این نقطه‌ای است که تریاک بـه طور طبیعی حالت مسدود خود را باز می‌یابد ، و سپس برای دوره[2] هدایت بعدی ، هر جهتی که انتخاب شده باشد منتظر می‌ماند .

در حال حاضر دو محدودیت در مقابل کاربرد تریاک برای وسایل با مقادیر اسمی ۲۰۰ آمپر و ۱۰۰۰ ولت معکوس پیک وجود دارد . اولین محدودیت مربوط است به قابلیت تبادل فرکانس حاصل ازتغییرات dv/dt محدودی که در موقع فقدان علامت دریچه ، تریاک درحالت مسدود باقی می‌ماند . تغییرات dv/dt در حدود ۲۰ ولت بر میکروثانیه است که در مقایسه با مقدار معمولی آن برای تیـریستور یعنی ۲۰۰ ولت بـر میکروثانیـه خیلی کمتراست .بنابراین محدودیت فرکانس در تراز قدرت ۶۰ هرتزی است . این محدودیت تغییرات dv/dt به‌مفهوم این است که مقاومتی بودن بار قابل کنترل ارجحیت دارد . در بارهای سلفی ولتاژ دو سر بار تا مقداری که بستگی به ضریب قدرت مدار دارد قبل از صفر شدن جریان منفـی می‌شود . در جریان صفر تریاک‌خاموش می‌شودو به‌حال‌مسدود درمی‌آید ، یعنی ، در کمتر از چند میکروثانیه امپدانس تریاک از صفر به مقدار تقریبی بینهایت تغییر می‌یابد . در همین موقع ولتاژمعکوسی که در دو سر بار بود حالا در دو سر تریاک ظاهر می‌شود . اعمال[این ولتاژ] به مدت کوتاهی موجب تولید dv/dt شدیدی می‌شود که امکان دارد تریاک دوباره روشن شود ، در صورتی که بایستی خاموش باقی‌می‌ماند . برای جذب مقداری از انرژی مربوط به تغییرات dv/dt بایستی به طور موازی یک‌مدار RC به‌تریاک وصل‌شود .تریاکهای ۲۵ آمپری‌وجود دارند که‌تغییرات dv/dt آنها محدود به ۲۰۰ ولت بر میکروثانیه است .

تریاکها به خاطر نکات مذکور ، کاربرد محدودتر وخیلی کمتری نسبت‌به تیریستوردارند و در حال حاضر برای کنترل حرارت ، روشنائی و موتورهای محرک مورداستفاده قرارمی‌گیرند . مواقعی کـه احتیاج به فـرکانس زیاد ، و تغییرات dv/dt شدید باشد تیریستوراتصال‌موازی معکوس را نمی‌توان با تریاک جایگزین کرد . بنابراین در موارد استعمال نیمه هادیهای قدرت برای کنترل محرکهای الکتریکی از تریاک به ندرت اسم برده می‌شود .

۲ـ۱۱ خلاصه مطالب گفته شده

تیـریستور یک وسیله کلیـد زنی دو حالتی است کـه همواره قطع یـا وصل است . تیریستور در یکی از دو حالت زیر عمل می‌کند : (الف) در حالت اشباع یـا هدایت کامل کـه دارای امپدانس صفر است و (ب) در حالت مسدود یا غیرهادی کـه دارای امپدانس بینهایت (در

1- Starvation

2- Period

مقابل عبورجریان) خواهد بود . تیریستور اصولا به صورت یکسوکننده قابل کنترل به‌کارمی‌رود و با ولتاژ بایاس مستقیم جریان قابل ملاحظه‌ای از خود عبور نمی‌دهد ولی با ولتاژ بایاس مستقیم و یک پالس کوچک بین دریچه و کاتد ، جریان قابل ملاحظه‌ای از آند به کاتد عبور می‌کندواین فقط با امپدانس بار سری و با آند محدود می‌شود . تیریستور در موقع هدایت نیازی به علامت روی دریچه برای ابقای هدایت نخواهد داشت . جریان را برای‌خاموش‌کردن تیریستور می‌توان توسط دو روش زیر مستهلک کرد .

۱ ــ افزایش امپدانس باربه‌منظور کاهش جریان‌به کمتر ازمقدار معین‌جریان نگهدارنده .

۲ ــ کاتد را نسبت به آند مثبت کرد . جریان آندی که در حالت مسدود از تیریستور عبور می‌کند به جریان نشتی موسوم ، و قابل اغماض است .

اگرچه در اکثر موارد می‌توان گفت که تیریستور از کلیدهای دیگر بهتر است ولی محدودیتهایی از لحاظ مقادیر اسمی وسایل نیمه هادی وجود دارد زیرا که حفاظت ، قسمت ضروری یک مدار تیریستوری را تشکیل می‌دهد . اگر جریان مستقیم افزایش سریعی داشته‌باشد تغییرات di/dt درموقع روشن شدن خیلی سریع می‌شود ، که می‌تواند موجب سوختن‌موضعی در نزدیکی اتصال دریچه شود . در صورت ایجاد هدایت ناخواسته‌ای به علت تغییرات بسیار شدید dv/dt مستقیم ، در حالت وجود اضافه بار ، در صورت اعمال ولتاژ معکوس بیش از حد و یا تمرکز جریان معکوس موضعی ، نقصی در اثر سوختگی به وجود خواهد آمد .

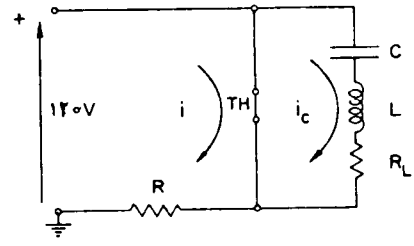
اگرچه تریاک با اعمال پالسهای مثبت یا منفی به دریچه‌اش می‌تواند جریان را در دو جهت مختلف ازخود عبوردهد و در نتیجه آنرا می‌توان مانند دوتریستور موازی‌اتصال‌معکوس فرض کرد ، ولی مقدار کم تغییرات dv/dt آن در حال حاضر مورداستعمالش را محدودساخته است .

مثالهای حل شده

مثال ۲ ــ ۱ باری با مقاومت اهمی ۵۵۰ اهم قرار است پالسهای جریانی با استمرار یک هزارم ثانیه داشته باشد . زمان بین پالسهای جریان ممکن است نسبتا بزرگ باشد . مدار تیریستوری که این شرایط‌را با منبع تغذیه ۱۲۰ ولت تأمین کند تحلیل کنید .

مدار تشدید موازی‌شکل ۲ ــ ۳۲ (الف) را درنظرمی‌گیریم ، منظور از تحلیل مدارتعیین مقادیر خازن C و سلف L است ، به طوری که تیریستور برای مدت تقریبی یک هزارم ثانیه در حال هدایت باشد و برای مدتی کافی به منظور خاموش شدنش بایاس معکوس شود .

تحلیل مدار از لحظه‌ای که تیریستور شروع به هدایت‌می‌کند شروع‌می‌شود ودراین حالت خازن تغییرقطبیت‌می‌دهد تا به ولتاژ بیشینه V_c برسد که این لحظه مبداء زمان‌ه $t = 0$ است . رابطه مشخص‌کننده i_c از مدار معادل طبق شکل ۲ ــ ۳۶ عبارت است از :



شکل ۲ـ۳۶ خود جابه‌جایی با مدار نوسانسازی

$$I(s)=\frac{\frac{V_c}{L}}{\left(s+\frac{R_L}{2L}\right)^2+\left(\frac{1}{LC}-\frac{R_L^2}{4L^2}\right)} \quad \text{یا} \quad \left[\frac{1}{C_s}+Ls+R_L\right]I(s)=\frac{V_c}{s}$$

که در آن s عملگر لاپلاس است.

تبدیل معادله فوق به حوزهٔ زمان[1] مستلزم حل معادله است، یعنی:

$$i_c(t)=\frac{V_c}{L}\cdot\frac{1}{A}e^{(-R_L/2L)t}\sin At,$$

که در آن:

$$A^2=\frac{1}{LC}-\frac{R_L^2}{4L^2}.$$

مقدار بیشینه جریان تخلیه خازن عبارت است از:

$$i_{c\ \max}=\frac{V_c}{L}\left(\frac{4L^2C}{4L-CR_L^2}\right)^{1/2}$$

مقاومت اهمی سلف دارای اثرخیلی‌کمی روی دامنه اولین جریان‌بیشینه دارد به طوری که اگر: $R\simeq 0$ داریم:

$$i_{c\ \max}\simeq V_c\sqrt{\frac{C}{L}}.$$

جریان تخلیه خازن $i_{c\ \max}$ بایستی از جریان بار تیریستور بیشتر شود تا آنرا خاموش کند. اگر جریان‌تخلیه خازن‌کمترشود جریان‌تیریستور هرگزبه مقدار کمتر از جریان نگهدارنده نزول نخواهد کرد، فرض می‌شود: $i_{c\ \max}=i$

برای حالتی که ورودی نداریم دوره T مدار تشدید عبارت است از:

$$T=\frac{2\pi}{A}\simeq 2\pi\sqrt{LC}.$$

معادله آخر حل مسئله را در هر شرایطی امکان‌پذیر می‌سازد برای‌اینکه لحظه روشن‌شدن تیریستور تا زمان خاموشی آن T ۰/۷۵ است. خازن به محض مسدود شدن تیریستور به‌تخلیه خود از طریق بار ادامه می‌دهد. پاسخ جدیدی بایستی محاسبه شود. ولی می‌توان گفت‌با

1- Timedomain

تقریب اول پالس جریان از طریق بار موقعی که تیریستور خاموش می‌شود به اتمام می‌رسد . اگر طول زمان پالس t_p باشد داریم :

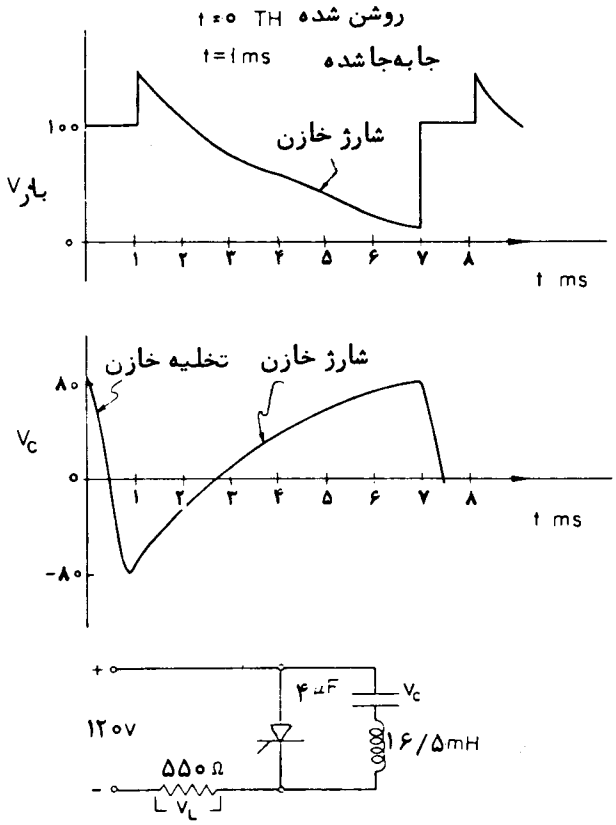
$$C = ۲t_p/۳\pi R_L \simeq ۰/۴\,\mu F$$

و

$$L = ۲t_p R_L/۳\pi \simeq ۱۲۰\,mH$$

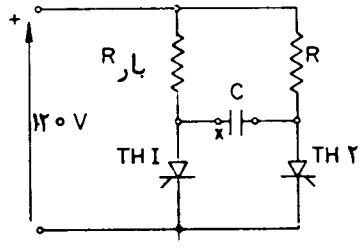
فرض شده است که ولتاژ بین خازن به مقدار پیکی که دامنه‌اش همان ولتاژ منبع تغذیه است خواهد رسید .

پالس دریچه که تیریستور را روشن می‌کند بایستی استمرارش کسری از میلی‌ثانیه باشد . یک‌پالس دریچه پیوسته تیریستور را از بازیابی حالت‌مسدودش جلوگیری می‌کند . شکل موجهای ولتاژ در شکل ۲ ــ ۳۷ برای حالت عملی علامت دریچه پیوسته‌ای نشان داده شده است .



شکل ۲ــ۳۷ شکل موجهای ولتاژ مدار خود جابه‌جایی

مثال ۲ ــ ۲ مدار جابه‌جایی اجباری شکل ۲ ــ ۳۸ را برای تعیین استمرار کمینه ،



شکل ۲ــ۳۸ جابه‌جایی اجباری

t_{min} پالس جریان بار برای ردیفی از بارها بررسی کنید .

برای اینکه خازن امکان ذخیره انرژی کافی برای خاموش کردن تیریستور $TH۱$ را داشته باشد ظرفیت خازن از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$C > t_{off}/R_{بار}$$

که در آن t_{off} زمان خاموش شدن تیریستور است . مقدار مقاومت R تعیین‌کننده زمان پرشدن خازن است . و این زمان پر شدن خازن است کـه سرعت جابه‌جایی تیریستور $TH۱$ را پس از روشن شدن تعیین می‌کند . برای اطمینان ، مقدار R بایستی طوری باشد که جریان عبوری از طریق $TH۲$ و R محدود و کمتر از جریان نگهدارنده تیریستور باشد . بنابراین همواره تیریستور $TH۲$ پس از باردار شدن C در حالت خاموشی خواهد بود . اگـر مقدار R خیلی کم باشد و تیریستور $TH۱$ پس از روشن شدن $TH۲$ خاموش نشود هر دو تیـریستور به هدایت خـود ادامه خواهند داد . درنتیجه خازن C باردارنمی‌شود و در تیریستور نیز عمل جابه‌جایی به وقـوع نخواهد پیوست :

داده‌های به دست آمده در جدول زیر درج شده است .

R_L, Ω	R, kΩ	C, μF	t_{min}, s
۶۰	۱ M	۴	۲
۶۰	۱۵۰ k	۴	۰/۵
۱۳	۳۳۰ k	۴	۵
۱۳	۳۳ k	۴	۰/۵
۱۰	۱۵۰ k	۴	۵
۱۰	۳۳ k	۴	۰/۵
۸	۱۵۰ k	۱۵	۵
۸	۱۲ k	۱۵	۰/۲
۶	۱۵۰ k	۱۵	۵
۶	۵ k	۱۵	۰/۱

مراجع

1. Yates, W. J. and Stevens, R. S. (1969) 'Selecting the correct capacitor for use in thyristor circuits', *Power Thyristors and their Applications,* I.E.E.E. Conference Publication, No. 53, 140-145.
2. Watabe, S. (1969) 'A 3ph 250 kVA no break power supply with current limiting filter', *Power Thyristors and their Applications,* I.E.E. Conference Publication, No. 53, 216-224.

کتابنامه

Gentry, F. E. *et al.* (1964), *Semiconductor Controlled Rectifiers,* Prentice-Hall.

Bedford, B. D. and Hoft, R. G. (1965), *Principles of Inverter Circuits,* John Wiley and Sons Inc., London and New York.

Griffin, A. W. and Ramshaw, R. S. (1965), *The Thyristor and its Applications,* Chapman and Hall, London.

S.C.R. Manual, General Electric Co., U.S.A.

Silicon Controlled Rectifier Designers Handbook, Westinghouse Electric Co.

Power Applications of Controllable Semiconductor Devices (1965), I.E.E. Conference Publication, No. 17.

Gentry, F. E., Scace, R. I. and Flowers, J. K. (1965). 'Bidirectional Triode P-N-P-N Switches', *Proc. I.E.E.E.,* 355-369.

Howell, E. K. (1964), 'The Triac-Gate-Controlled Silicon A.C. Power Switch', *I.E.E.E. Int. Conv. Record,* **12** (9), 86-91.

Power Thyristors and their Applications, (1969), I.E.E. Conference Publication, No. 53.

مسائل

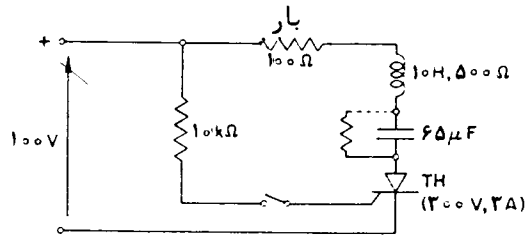
۲ ــ ۱ مدار شکل ۲ ــ ۲۴ را می‌توان به عنوان کنترل کننده روشنایی (نورگاه) لامپ توسط تغییر ولتاژ دو سر یک ردیف لامپ مورد استفاده قرار داد . برای هر مقدار سلف بین ۲ و ۳۰ میلی هانری مقدار بیشینه جریانهای باری که ممکن است هنگام استفاده از خازنهای ۱ ، ۴ ، ۷ ، ۸ و ۱۰ میکروفاراد درمدار قطع شوند ، پیدا کنید . پاسخ کامل مدار را نیز تعیین‌کنید.

توجه کنید که : چه مدتی خازن بار لازم برای خاموش کردن TH_1 را موقعی که به TH_1 فرمان روشن شدن می‌رسد نگاه می‌دارد . بیشینه ولتاژ بین بار ۱۲۰ ولت است .

جواب : مقادیر عملی ۴/۴ ، ۶/۲ ، ۸/۳ ، ۱۰ و ۱۱/۲ آمپر

۲ ــ ۲ شکل (۲ ــ ۳۹) مدار تیریستوری را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی با تشدید امکان‌پذیر است . مقادیر خازن C و سلف L تا حدی است که یک دوره هدایت طولانی به تیریستور بدهد . پاسخ مدار را تعیین کنید . شکل موجهای عملی ولتاژ بین هر یک از عناصر را هم موقعی که جریان دریچه پالس ۱ میلی ثانیه استمرار داشته باشد و هم وقتی که پالس پیوسته‌ای اعمال شود با یکدیگر مقایسه کنید .

جواب : $i(t) = ۰/۴\, e^{-۳۰t} \sin ۲۵/۳$ و استمرار عبور جریان اندازه گرفته شده ۱۵۰ هزارم ثانیه



شکل ۲ــ۳۹

۲ ــ ۳ مقادیر عناصر شکل ۲ ــ ۲۷ را طوری تعیین کنید که جریان از طریق بار مقاومتی ۲۴۰ اهم محدود به ۰/۵ آمپر شود . وارونگر (معکوس کننده) قدرت را در فرکانس ۶۰۰ هرتز به بار اعمال می‌کند .

جواب : میلی‌هانری $L = ۴۳/۵$ میکروفاراد $C = ۱۶۱/۵$

۲ ــ ۴ بــا روش تجربی عنــاصر لازم بــرای حفاظت تیــریستور در مقــابل خیــزهای ولتــاژ خارجی را در مدار ساده شکل ۲ ــ ۲۸ محاسبه کنید .

جواب : اهم ۴۷ تا ۱۱ = R_1 و میکروفاراد ۰/۵ تا ۰/۰۱ = C_1

یک فرمول تجربی برای C_1 عبارت است از .

$$C_1 = \frac{VA}{31 f (V_p)^2}$$

که در آن C_1 برحسب فاراد ، VA مقدار اسمی ولت آمپر ترانسفورماتورمنبع تغذیه ، f فرکانس منبع تغذیه برحسب هرتز و V_p ولتاژ پیک گذرای تیریستور است . همچنین :

$$C = \frac{10 I_f}{V}$$

که در آن C برحسب میکروفاراد ، I_f جریان عبوری از طریق تیریستور بلافاصله پس ازجابه ــ جایی ، و V ولتاژ بیشینه معکوس پیوسته PRV تیریستور است .

۲ ــ ۵ . درمدار یکسوکننده کنترل شده نیم موج شکل ۲ ــ ۲۱ زاویه آتش α را می‌توان به‌منظور تغییر ولتاژ متوسط دو سر بار تغییر داد . با این حال ، مولفه‌های هارمونیک به وجود می‌آیند و سبب افزایش‌تلفات وایجاد گشتاورهای ترمز و نوسانی‌عبوری درماشینهای گردان می‌شوند . اگر ولتاژ منبع تغذیه سینوسی و زاویه آتش آن $\alpha = 90^\circ$ باشد ، دامنه موءلفه‌های هارمونیک ولتاژ بار را به دست آورید .

جواب :

$$V_L = \frac{\hat{V}}{2\pi} - \frac{\hat{V}}{2\pi} \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\hat{V}\left(\cos n\pi + n \sin n\frac{\pi}{2}\right)}{\pi\left(1 - n^2\right)} \cos nw +$$

$$\frac{\hat{V}}{4} \sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{-n\ V\ \left(\cos n\ \pi/2\right)}{\pi\left(1 - n^2\right)} \right] \sin n\,\omega t$$

۲ ــ ۶ یک منبع تغذیه جریان مستقیم ۱۰۰ ولتی بار سلفی‌خالص ۰/۱ هانری‌راتغذیه‌می‌کند . تیریستوری سری شده با منبع تغذیه و بار ، کنترل کننده مدار است . از روی پاسخ این مدار تیریستوری‌ساده حداقل‌پهنای پالس دریچه برای اطمینان از روشن‌شدن تیریستور راتعیین‌کنید . مشخصات تیریستور جریان قفلی را ۴ میلی آمپر تعیین می‌کند .

جواب : ۴ میکرو ثانیه

۲ ــ ۷ مدار شکل ۲ ــ ۲۸ مفروض است . فرض می‌شود که عناصر R و C تنها اجزاء حفاظت ــ کننده هستند و عناصر L ، C و R_1 حذف شده‌اند . یک منبع تغذیه ۱۰۰ ولتی بار اهمی خالص ۲۰ اهمی را تغذیه می‌کند . دیودی به دو سر مقاومت R که مقدارش ۱۰ اهم است طوری وصل شده است که آندهای تیریستور و دیود به یکدیگر متصل‌اند .

فرض می‌شود که تیریستور تازه خاموش شده است . مقدار حداقل C را طوری تعیین کنید که تیریستوربه‌خاطر شکست dv/dt دوباره روشن‌نشود.خازن اتصالی داخلی‌تیریستور ۲۰پیکوفاراد و حداقل مقدار جریان بار مورد لزوم برای روشن شدن تیریستور ۴ میلی آمپر است .

جواب : ۰/۰۲۵ میکروفاراد

۲ ــ ۸ . مدار تیریستوری ساده‌ای شامل منبع تغذیه جریان متناوب $V = \hat{V} \sin \omega t$ ویک‌کنترل‌کننده تک تیریستوری سری شده با بار اهمی خالص است . تیریستور جریان را موقعی هدایت می‌کند که ولتاژ آندش مثبت باشد یعنی $\omega t = 0$ تا π ، $\omega t = 2\pi$ تا 3π وغیره . تیریستور در زاویه α ، در محدوده $0 \leqslant \alpha \leqslant \pi$ آتش می‌شود ، و هدایت برای مدت زمان α تا π درهر نیم سیکل مثبت اتفاق می‌افتد ، زیرا جریان با ولتاژ همفاز است .

نشان دهید که ولتاژ خروجی در دو سر بار ، ولتاژ d.e. α متغیری با مقدار متوسط زیر است .

$$V_{av} = \frac{\hat{V}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

۲ ــ ۹ . ولتاژ منبع تغذیه $V = 100 \sin 377t$ بار اهمی ۱۰۰ اهمی را از طریق تیریستوری‌که عمل یکسوسازی کنترل شده نیم موجی را انجام می‌دهد ، تغذیه می‌کند . اگر زاویه آتش‌نسبت‌به شکل موج ولتاژ منبع تغذیه‌در ۴۵درجه ثابت باشد ، قدرت متوسط بار را محاسبه کنید .

جواب : ۲۲/۷ وات

۲ ــ ۱۰ . در مدار مسئله ۲ ــ ۸ بار به صورت بار اهمی R و سلفی L تغییر یافته‌است‌وتیریستور نیز در زاویه‌$\alpha = 0$ آتش‌می‌شود .جریان حالت پایدار نسبت به ولتاژ پسفاز است .

درمدت‌زمانی‌که‌جریان‌به‌مقدار قله خود صعودمی‌کند ، منبع تغذیه R و L راتغذیه‌می‌کند. از زمان‌جریان‌قله تا زمانی‌که ولتاژ ازصفر عبورمی‌کند ، منبع تغذیه R راتغذیه وانرژی را از L (جهت‌کاهش‌پیوند شار) اخذ می‌کند . نهایتا ،از زمان‌جریان‌صفرعبورولتاژ تازمان‌جریان صفر انرژی را از اندوکتانس(برای دوباره به صفر آوردن‌پیوند شار) جذب می‌کند و به R و منبع برمی‌گرداند . مطلوب است محاسبه مقدار لحظه‌ای جریان بار غیر صفر .

جواب : $tg\phi = L/R$ ، $i(t) = \frac{\sqrt{2}}{R} \hat{v} \sin \frac{\omega t}{2} \cos \frac{\omega t - 2\phi}{2}$

۲ ــ ۱۱ . برای خاموش کردن تیریستور جریان عبوری به طور لحظه‌ای بایستی به صفر تقلیل یابد . برای این‌منظور از ذخیره انرژی درخازنی توسط مدارتشدید ، جلوگیری از نوسانات‌اضافی وسیله یک دیود و در نتیجه فراهم آوردن امکانات تخلیه خازن جهت گرایش معکوس تیریستور ،

استفاده می‌کنند .

شکل ۲ ــ ۴۴ مدار اساسی برای معکوس کردن قطبیت خازنی را نشان می‌دهد ،که‌تا ولتاژ ۱۰۰ ولت برای شرایط اولیه باردار شده است . در صورتی که تیریستور TH در زمان $t = 0$ آتش شده‌باشد ،مقدار لحظه‌ای جریان عبوری از L را در هر لحظه‌ای از t ، و همچنین‌شکل‌موج ولتاژ دو سر سلف را تعیین کنید .

جواب : $i(t) = 0/577t$ برای $0 \ll t \ll \frac{\pi}{3}$ که در آن $\omega = 577$ رادیان بر ثانیه

۲ ــ ۱۲ تیریستور یک کلید ،ومداربار مشتمل برترکیبی از R،L و C ، و است . بنابراین ،اینکه بخواهیم پاسخ گذرا را در زمان اتصال‌ناگهانی منبع تغذیه توسط یک کلید یا تیریستور پیداکنیم، امری طبیعی است .

دو حالت ذیل مفروض است :

(الف) یک پیل سری با یک تیریستور ، یک مقاومت R ، سلف L و خازن C

(ب) یک پیل سری با یک تیریستور ، یک سلف L و ترکیبی موازی از یک مقاومت R ویک خازن C.

برای این حالتها موارد زیر را تعیین کنید :

(۱) بستگی‌های پارامتر برای شرایط زیر میرا

(۲) فرکانس تشدید برحسب پارامترها ، و

(۳) شکل موج جریان در زمانی که تیریستور روشن می‌شود .

جواب :

(الف) (۱) $R < 2\sqrt{L/C}$ (۲) $\omega_0 = \frac{1}{2}\sqrt{4/LC - R^2/L^2}$

(ب) (۱) $R < 0/5\sqrt{L/C}$ (۲) $\omega_0 = \frac{1}{2}\sqrt{4/LC - 1/C^2R^2}$

۲ ــ ۱۳ یک تریاک قدرت باری که شامل یک مقاومت ۱۰ اهمی و یک سلف ۰/۰۲۶۵ هانری است را کنترل می‌کند . اگر منبع تغذیه ۱۱۰ ولتی ۶۰ هرتزی باشد و تریاک در زاویه $\alpha = 75$ درجه در هر دو نیم سیکلها آتش‌شود .مطلوب است محاسبه مقدار جریان لحظه‌ای بار .

جواب :

$$j(t) = 11 \sin\left(277t - \frac{\pi}{4} + 1/31\right) - 5/5 \exp\left(-t/0/00265\right)$$

۲ ــ ۱۴ مدار شکل مسئله ۲ ــ ۱۳ مفروض است . رابطه‌ای برای مقدار جریان لحظه‌ای‌مدار ، را برحسب زاویه آتش α پیدا کنید .

جواب :

$$j(t) = \frac{\hat{V}}{\left[R^2 + (\omega L)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \sin(\omega t - P + \alpha) - \frac{\hat{V}\sin(\alpha - \varphi)}{\left[R^2 + (\omega L)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \exp(-Rt/L)$$

۲ ــ ۱۵ . یکسو کننده کنترل شده نیم موج سه فازی با زاویه آتش $\alpha = 0$ رادیان برای هر سه تیریستور مفروض است . اگر ولتاژهای سه فاز

$$V_1 = \hat{V} \sin \omega t \ ، \ V_2 = \hat{V} \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3}) \ و \ V_3 = \hat{V} \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

باشند ، مطلوب است محاسبه مقدار متوسط ولتاژ خروجی برای یک بار اهمی .

جواب : $0/827 \ \hat{V}$

۲ ــ ۱۶ . نوع خاموشی با خازن موازی طبق شکل ۲ ــ ۲۵ مفروض است . مقاومت بار ۵ اهم و ولتاژ جریان مستقیم اعمال شده ۱۲۰ ولت فرض می‌شود .

مطلوب است محاسبه حداقل مقدار ظرفیت خازن C اگر زمان خاموشی تیریستور در جابه جایی اجباری مشخص شده توسط سازنده ۱۵ میکروثانیه باشد . اگر تیریستور TH_1 در هر میلی‌ثانیه آتش شود مقدار مناسب مقاومت R چقدر است ؟

جواب : ۳ میکروفاراد ، ۵۵ اهم

۲ ــ ۱۷ . مدار شکل ۲ ــ ۲۸ ، بدون عناصر L ، C_1 و R_1 و با دیود اضافی در دو سر R به طوری که آندهای دیود و تیریستور به یکدیگر متصل‌شده باشند ، مفروض‌است . ولتاژ منبع تغذیه جریان مستقیم ۵۰۰ ولت و مقاومت بار ۳/۵ اهم است . افت ولتاژ مستقیم دیود قابل اغماض فرض می‌شود . ظرفیت خازن اتصالات تیریستور ۲۰ پیکوفاراد و بیشینه $\frac{dv}{dt}$ مستقیمی که تیریستور آن را تحمل می‌کند ۱۸۰ ولت بر میکروثانیه است .

مطلوب‌است محاسبه مقدارکمینه ظرفیت خازن C به منظورجلوگیری از روشن‌شدن‌بی‌موقع تیریستور وقتی که مدار بر منبع تغذیه بسته می‌شود . هدف از مقاومت R چیست و مقدار آن چگونه تعیین می‌شود ؟

جواب : ۰/۸ میکروفاراد

۲ ــ ۱۸ . یک مدار تشدید سری برای خاموشی تیریستور در شکل ۲ ــ ۲۳ (ب) نشان‌داده‌شده است . عمل خاموشی راتوضیح دهید . به طور ریاضی نشان دهید که جریان عبوری از تیریستور و ولتاژدوسرتیریستوربرای فاصله‌زمانی‌آتش‌شدن تاشروع‌خاموشی‌شبیه‌شکل ۲ ــ ۲۳ (پ) است .

۲ ــ ۱۹ .

(الف) $\frac{dv}{dt}$ محدود کننده یک تیریستور را چگونه پیدا می‌کنید .

(ب) ترتیب آتش شدن یک وارونگر سه فاز را توضیح دهید .

(پ) هدف از عمل موازی تیریستورها چیست ؟

(ت) در موقع موازی کردن تیریستورها چه مسائلی را باید در نظر گرفت .

(ث) کاربرد دیود چرخش‌آزاد را توصیف کنید .

(ج) چگونه یک کلیدقدرت نیمه‌هادی را برای کنترل‌سرعت موتور القائی‌به کار می‌برید ؟

(چ) چگونه یک کلید قدرت نیمه هادی را برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم به‌کار می‌برید ؟

(ح) از خاموشی تیریستور چه می‌فهمید ؟

(خ) زمان خاموشی یک تیریستور چیست ؟

(د) کدام یک بزرگتر است ، جریان‌قفلی یا جریان نگهدارنده ؟

(ذ) چرا تیریستور در مقابل افزایش سریع جریان در مدت روشن شدن بایستی محافظت شود ؟

(ر) محدودیت تقریبی di/dt در مدت زمان روشن شدن تیریستور چیست ؟

(ز) چه نوع حفاظتی برای محدود کردن di/dt بایستی به کار برد ؟

(ژ) تیریستور چه فرقی با تریاک دارد ؟

(س) چه اختلاقی بین فرمانهای دریچه تیریستور و تریاک وجود دارد ؟

(ش) هدف از سری بستن تیریستورها چیست ؟

(ص) تیریستورهای سری به چه نوع حفاظتی احتیاج دارند ؟

(ض) تیریستورهای نوع دیسکی چه مزایایی نسبت به بقیه دارند ؟

(ط) واگردانهای سیکلی چه مزایایی نسبت به وارونگرها دارند ؟

(ظ) واگردانهای سیکلی چه معایبی نسبت به وارونگرها دارند ؟

فصل سوم

کنترل موتورهای القایی

۳ـ۱ مقدمه

گاهی لازم می‌شود کـه یک موتور (یا بـار مکانیکی چرخان) را از سکـون به حـرکت دورانی با سرعت معینی واداشت . در طی کار امکان دارد لزوم تغییر سرعت ، تعویض جهت چرخش ، تغییر وضعیت و شاید برگشت به شرایط اولیه در کوتاهترین زمان ممکن پیش آید . دوره کار[1] را می‌توان با تنظیم انرژی الکتریکی موتوری که محرک بار است کنترل کرد .

موتورهای القایی ماشینهای نسبتا ارزان و محکمی هستند ، زیـرا آنها را می‌توان بدون جابه‌جاکن یا حلقه‌های لغزان[2] ساخت . در نتیجه بنابه علل مذکور تاکنون درموردکنترل این موتورها ازلحاظ راه‌اندازی ، ترمز ، معکوس‌سازی سرعت ، تغییرسرعت و کنترل وضعیت ، مطالعه و بررسی‌های زیادی انجام گرفته است .

در حال حاضر تیریستور به علت داشتن عمر زیاد و فقدان قسمتهای متحرک جایگـزین عناصر معمولی کنترل موتورهای القایی‌شده است . علاوه براین که تیریستور درکنترل‌محرکهای تجاری به کار می‌رود ، مطالعه شیوه‌های کاربردی برای پیشبرد و بهبود روشهای موجود وابداع روشهای جدید همچنان مورد توجه محققین است . یکی از مهمترین موارد استعمالی کـه توجه زیادی را به خود جلب کرده است اتومبیلهای برقی است .

جایگزینی محرکهای الکتریکی با موتورهای احتراق داخلی سبب‌کاهش شدید آلودگی‌هوا می‌شود و به این دلیل کوشش زیادی لازم است تا این جابه‌جایی با توجه‌به‌جنبه اقتصادی آن ممکن شود . یکی ازعوامل مهم‌در این جایگزینی مربوط به روشهای ذخیره انرژی‌الکتریکی‌است.

1- Duty cycle

2- Slip-rings

باتریهای سرب‌اسید[1] سنگین، بزرگ‌وگران قیمت بایستی با سلولهای سوختی[2] جایگزین شوند تابتوانند ازپس کنترل‌کننده و محرکهای الکتریکی‌که می‌تواند یک موتور القایی باشد، برآیند. به عنوان مثال می‌توان از محرک الکتریکی با سرعت دورانی ۱۰۰۰۰۰ دور در دقیقه، که با واحد تیریستوری کنترل می‌شود، نام برد. حجم و اندازه موتورهای الکتریکی تقریبا با مقدار گشتاور متناسب است و از آنجایی که قدرت خروجی متناسب با گشتاور و سرعت است، در سرعتهای زیاد اندازه موتور کوچک‌تر خواهد بود. از اشکالاتی که در سرعتهای زیاد پدید می‌آید، انتقال حرارت از حجم کوچک موتور و انتقال [نیرو] به چرخها است.

در این فصل روشهای مختلف کنترل موتورهای القایی با واحدهای تیریستوری مورد بررسی قرار می‌گیرند و در خاتمه چند مثال عملی معرفی خواهد شد.

۳-۲ راه اندازی موتور القایی

به منظور روشن شدن شکل راه‌اندازی موتور القایی موقعی که ولتاژ منبع تغذیه مستقیما به ورودی موتور اعمال می‌شود، ناگزیر از مراجعه به مدار معادل موتور القایی هستیم تا جریان عبوری از موتور را بر حسب لغزش و امپدانسهای ماشین محاسبه کنیم. استفاده از مدار معادل تقریبی شکل ۳ــ۱ خطای خیلی کم و قابل اغماضی در محاسبه مقدار جریان ایجاد خواهد کرد. پارامترهای مدار معادل تقریبی شکل ۳ــ۱ برای هر فاز موتور عبارتند از:

Y_0 ادمیتانس مغناطیس کنندگی[3] موتور

r_1 مقاومت سیم‌پیچی ایستانه (استاتور)

r'_2 مقاومت سیم‌پیچی گردانه (روتور) منتقل شده به ایستانه (استاتور)

x_1 راکتانس نشتی[4] سیم‌پیچی ایستانه (استاتور)

x'_2 راکتانس نشتی سیم‌پیچی گردانه (روتور) منتقل شده به ایستانه (استاتور) (در فرکانس منبع تغذیه)

s لغزش

I جریان هر فاز برای لغزشهای s عبارت است از:

$$I = \frac{V}{\sqrt{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}} \qquad (۱-۳)$$

1- Lead-acid batteries 2- Fuel cell

3- Magnetizing admittance 4- Leakage reactance

و ضریب قدرت عبارت است از:

$$\cos\theta = \frac{r_1 + r'_2/s}{\sqrt{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}} \qquad (۲-۳)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{x_1 + x'_2}{r_1 + r'_2/s}\right)^2\right]}}$$

قدرت خروجی خالص هر فاز عبارت است از:

$$P_m = I^2 r'_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \qquad (۳-۳)$$

بنابراین گشتاور الکترومغناطیسی هر فاز عبارت است از:

$$T = \frac{p}{\omega} I^2 \frac{r'_2}{s} \qquad (۴-۳)$$

که در آن p معرف زوج قطبها، و $\omega = (2\pi f)$ فرکانس زاویه‌ای است.

شرایط ایده‌ال در راه‌اندازی یک موتور القایی وجود جریان تهاجمی[1] کم است و منظور از آن عبارت است از:

۱ ــ داشتن درصد تنظیم مناسب برای ولتاژ تغذیه.

۲ ــ داشتن گشتاور زیاد برای آنکه هرچه سریعتر بار شتاب‌بگیرد وبه‌سرعت‌پایدارعادی خود برسد.

۳ ــ داشتن ضریب قدرت بیشتر برای‌محدودکردن ولت‌آمپر موتوربه‌ازای‌قدرت دلخواه.

بررسی روابط فوق برای راه‌اندازی، به ازای $s = 1$ نشان می‌دهدکه جریان‌مقداربیشینه و ضریب قدرت مقدار کمینه را دارا است. گرچه جریان زیاد باعث‌افزایش گشتاور راه‌اندازی می‌شود ولی بیشینه شدن مقدار لغزش در مخرج رابطه گشتاور باعث کاهش مقدار گشتاور راه‌اندازی (به ازای مقدارثابت‌مقاومت‌گردانه) می‌شود. این‌مقادیر باشرایط ایده‌ال راه اندازی مذکور وفق نمی‌دهد ولی آنها برای‌موتورهای کوچک‌تاقدرت چند اسب‌بخار قابل تحمل‌هستند. این مشخصه‌های نامطلوب موقعی ظاهر می‌شوند که موتور مستقیما به منبع تغذیه اتصال یابد، یعنی راه‌اندازی به روش اتصال مستقیم به خط[2] باشد و تغییر آنها با افزودن بعضی از عناصر

1- Inrush current

2- Direct-on-line starting

مداری به منظور کنترل مشخصه‌های فوق و نزدیک شدن‌به شرایط ایده‌آل راه‌اندازی امکان‌پذیر است .

راه‌اندازی موتورهای کوچک با روش راه‌اندازی اتصال مستقیم به خط دارای چند مزیت است . اولا روش ساده و ارزانی است و ثانیا جریان راه‌اندازی زیاد به مفهوم‌حداقل‌تاخیر در رسیدن موتور به سرعت نرمال است . راه‌اندازی اتصال مستقیم به خط در موتورهای‌بزرگ‌ممکن است اثرات نامطلوب‌متعددی‌داشته باشد . اولا جریان‌بینهایت‌زیادی که از منبع تغذیه‌کشیده می‌شود ،ایجادافت ولتاژی بر روی منبع تغذیه می‌کند ، که باعث تضعیف نور و یا چشمک زدن لامپها می‌شود که از نظر مصرف‌کننده‌های خانگی و صنعتی محلی غیرقابل تحمل است ، ثانیا اگر به عنوان مثال چند موتور با هم شروع به کار کنند جریان راه‌اندازی آنها ممکن است‌ازحد ظرفیت کابل تغذیه کننده بیشتر شود ، در نتیجه وسایل حفاظتی شروع به کار و منبع تغذیه را قطع می‌کنند . ثالثا جریان راه‌اندازی زیاد در موتورهای بزرگ به خاطر زیاد بودن گشتاور لختی (ممان اینرسی)[1] مدت زمان بیشتری نسبت به موتورهای کوچک ادامه خواهدیافت . جریان راه‌اندازی معمولا در حدود ۶ برابر جریان بار کامل‌موتورها است . عبوراین‌جریان‌زیاد برای هر مدتی‌که باشد باعث ایجادحرارت در سیم‌پیچها می‌شود و ممکن است‌عایق بندی آنها را که از آسیب‌پذیرترین قسمتهای این نوع ماشینها هستند خراب کند .

به منظور رفع معایب حاصل از جریانهای خیز بالا ، بایستی جریان را با کاهش ولتاژ اعمال شده به موتور و یا با افزایش امپدانس به مدار برای مدت کوتاه راه‌اندازی ،محدودکرد . روشهای راه‌اندازی عبارتند از :

(۱) راه‌اندازی اتصال مستقیم به خط

(۲) راه‌اندازی با مقاومت ایستانه (استاتور)

(۳) راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور

(۴) راه‌اندازی ستاره ــ مثلث

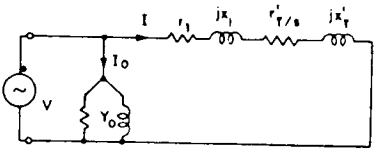
(۵) راه‌اندازی با موتور القایی قفس سنجابی (تغییر شکل هادیهای گردانه یا گردانه‌دو قفسی)

(۶) راه‌اندازی با مقاومت گردانه (روتور)

(۷) راه‌اندازی با کنترل تیریستوری

روشهای راه‌اندازی (۱) تا (۶) روشهای معمولی است که می‌توان آنها را در کتابهای (متون) استاندارد ماشینهای الکتریکی (مرجع ۱) به تفصیل مطالعه کرد . ازتیریستور می‌توان برای کاهش جریان راه‌اندازی و افزایش گشتاور راه‌اندازی استفاده کرد .

1- Moment of inertia

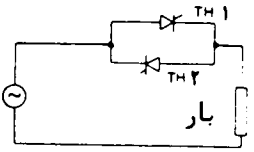


شکل ۳ـ۱ مدار معادل موتور القایی

۳ـ۲ـ۱ راه اندازی تیریستوری

تیریستور کلیدی است که می‌تواند با انرژی بسیار کم ، قطع و یا وصل شود و در ضمن تیریستور فاقد قسمتهای متحرک است . کاربرد تیریستور به عنوان کلیدهای قطع و وصل‌ویادر وارونگرها (معکوس کننده‌ها) قطع و وصل قدرتهای زیاد کاملا آشکار است و بازده زیاد یکی‌از مهمترین مزایای تیریستور است .

موتور القایی که احتیاج به وسایل مخصوص راه‌اندازی ندارد و جریان راه‌اندازی آن به شش یا هفت برابر جریان بار کامل نرسد دارای ایده‌آل‌ترین وضعیت است . کاربرد مدارهای تیریستوری در جریانهای زیاد و کوتاه مدت با اینکه می‌تواند جریانها را تا حد قابل قبولی محدود سازد ، ولی غیر اقتصادی است . سیستمی که احتیاج به وسایل راه‌اندازی‌اضافی‌نداشته باشد سیستمی است که به کنترل سرعت در یک گستره وسیعی محتاج است‌وبنابراین کاربردیک وارونگر فرکانس متغیر[1] ضرورت خواهد داشت . درموقع راه‌اندازی ،فرکانس را در کمترین حد ممکن تنظیم می‌کنند و چون سرعت متناسب با فرکانس است سرعت سنکرون نیز کم می‌شود . کنترل افزایش فرکانس باعث تنظیم‌سرعت چرخشی[2] می‌شودوخیزهای جریان را محدودمی‌کند. در هر حال ، اگر موتور القایی برای محرکهای سرعت ثابت مورد استفاده قرار گرفته باشد یک کلید تیریستوری ساده می‌تواند به سادگی راه‌اندازی را کنترل کند .



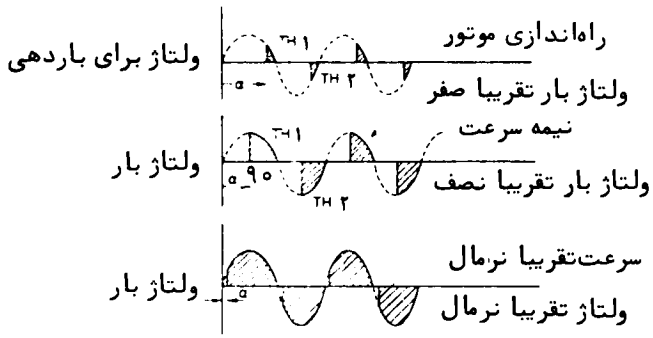
شکل ۳ـ۲ تنظیم کننده ولتاژ تک‌فاز

شکل ۳ ـ ۲ تنظیم کننده ولتاژ جریان متناوب تکفاز را برای راه‌اندازی موتور القایی نشان می‌دهد . چون تیریستور دریک‌جهت جریان را از خود عبور می‌دهد ، لذا دو تیریستور

1- Variable frequency inverter

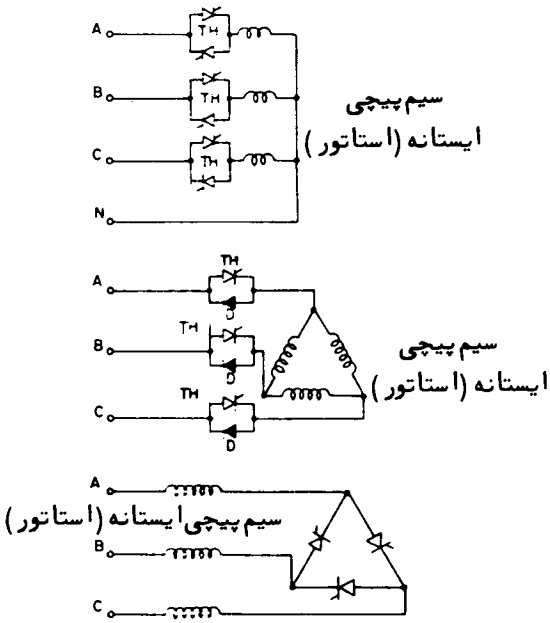
2- Run-up

اتصال موازی معکوس برای عبور جریان در دو جهت مختلف بـه کار برده شده است . ولتـاژ ورودی مدار ثابت است ولی ولتاژ خروجی با کنترل مدت زمان هدایت تیریستورها قابل تنظیم خواهد بود . تیریستورها متناوبا و به تقارن نسبت به شکل موج ورودی روشن می‌شوند . فرمان روشن شدن تیریستور طبق شکل ۳ ــ ۳ در نقاط قابل تنظیمی از سیکل موج ورودی به‌دریچه اعمال می‌شود . این روش فرمان و تنظیم ولتاژ را جابه‌جایی فاز نامند .زاویه آتش تیریستورها α از ۱۸۰ درجه شروع به کاهش می‌کند تا ولتاژ کمتری برای راه‌اندازی موتور اعمال کند ، و در سرعت کامل موتور و موقعی که ولتاژ پایانه‌های موتور به مقدار اسمی برسد ، به صفر درجه می‌رسد . وظیفه اصلی این کلید تیریستوری محدود کردن جریـان توسط کنترل مقدار متوسط دامنه ولتاژ اصلی است . با این مدار مقادیر جریان قابل پذیرشی را بدون اتلاف انرژی زیاد می‌توان برقرار کرد . بعضی از مدارهای سه فاز کنترل ولتاژ با جابه‌جایی فاز در شکل ۳ ــ ۴ نشان داده شده است . برای سیستم سه فاز چهار سیمه تیریستورهای اتصال‌موازی‌معکوس مورد نیاز است ولی‌برای‌سیستم سه فاز سه‌سیمه ، دیودها می‌توانند جایگزین یکی از زوج تیریستورها شوند . و بنابراین فقط سه تیریستور مورد استفاده قرار خواهد گرفت .



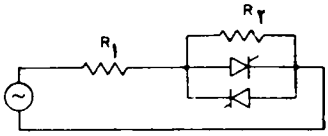
شکل ۳ ــ ۳ تغییرات ولتاژ توسط جابه‌جایی فاز

زوج تیریستورهای اتصال موازی معکوس را می‌توان بـه صورت امپدانس متغیری در نظر گرفت . امپدانس آنها موقعی که زاویه آتش از صفر به 180° تغییر می‌یابد به ترتیب از صفر تا بینهایت افزایش خواهد یافت . این امپدانسهای افراطی را می‌توان با افزودن عناصر دیگری قابل تنظیم‌کرد . به عنوان مثال درشکل ۳ ــ ۵ امپـدانس معادل مدار رامی‌توان بین‌مقادیر R_1 تا $(R_1 + R_2)$ به‌آرامی تغییر داد . این مـدار را می‌تـوان به عنـوان مقاومت متغیر برای راه‌اندازی مقاومت ایستانه‌ای (به طور سری با استاتور) با سیم‌پیچی ایستانه سری کرد . برای کنترل بهتر گشتاور می‌توان مدار مشابهی را در مدار گردانه (روتور) موتور القایی قرار داد .



شکل ۳ ــ ۴ مدارهای کنترل ولتاژ سه فاز

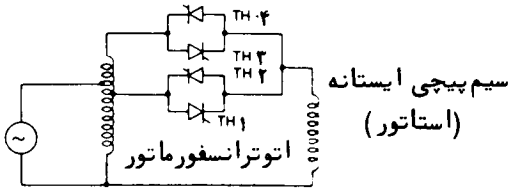
روش راه‌اندازی اخیر مشکلات زیادی نسبت به روش راه‌اندازی قبل از آن از نظر روشن کردن تیریستورها دقیقا در نقاط معینی از سیکل ایجاد می‌کند، زیرا که این جا بایدلغزش فرکانس سیکل آشکار شود.



شکل ۳ــ۵ امپدانس غیر خطی متغیر

موقعی که تیریستورها به طور کامل هدایت نمی‌کنند شکل موج اعوجاج پیدا می‌کند. درصدهارمونیکهابا افزایش زاوید آتش تیریستورها α افزایش خواهد یافت. این‌هارمونیکها بدون افزایش انرژی مکانیکی تولید حرارت اضافی در بار مصرفی خواهند کرد. ضریب قدرت حتی در بار اهمی نیزکم‌است و با کاهش ولتاژ خروجی تقلیل بیشتری خواهد یافت. شیوه‌ای که اعوجاج بسیار کمتری به همراه دارد استفاده از تنظیم کننده‌های کامل اتوترانسفورماتوری طبق شکل ۳ ــ ۶ است، که فقط یک‌فاز درآن نشان داده‌شده است. راه‌اندازی موتور القایی

در ولتاژ کمی با شکل موج سینوسی خوبی ، در صورت هدایت کامل تیریستورهای TH_1 و TH_2 انجام‌پذیر خواهدنبود . درسرعتهای بالاتر ترتیب‌کلیدزنی بایستی‌طوری‌باشدکه تیریستورهای TH_1 و TH_2 را روشن کند ، تا ولتاژ بیشتری به سیم پیچیها اعمال شود و تیریستورهای TH_1 و TH_2 را خاموش کند .



شکل ۳ـ۶ راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور

شکل ۳ ـ ۶ اصول کلی راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور رانمایش می‌دهد . دومثال‌عملی (مرجع ۲) دوشیوه رامشخص می‌کندکه در آن تیریستور درتعویض محل انشعاب [1] ترانسفورماتور به منظورتنظیم ولتاژ برای راه‌اندازی موثراست . یک‌مثال مربوط به‌کاربرد انشعاب تعویض‌کن مکانیکی معمولی است که در آن از تیریستور فقط در طی تعویض محل انشعاب استفاده‌می‌شود . جرقه را در این روش می‌توان از بین برد زیرا تیریستورها می‌توانند جریان را از اتصالها [2] در طی فرآیند قطع و وصل [3] منحرف‌کنند . مثال دوم عبارت‌است از جایگزینی انشعاب تعویض‌کن مکانیکی با واحدهای تیریستوری که در این صورت قسمتهای متحرک وجود نخواهد داشت .

یک کلید مکانیکی در شکل ۳ ـ ۷ نشان داده شده است . برای راه‌اندازی موتور القایی ، کلید اتصال ۲′ را اتصال کوتاه می‌کند . از میان دو ولتاژآن که پایین‌تر است ، به فاز سیم‌ـ پیچی ایستانه (استاتور) اعمال می‌شود ، لـذا جریان راه‌اندازی از مقـدار قابل قبولی تجاوز نخواهد کرد . بعد از اینکه موتور القایی سرعت گرفت کلید از طریق اتصالهای ۲′ ، ۲′۱′ ، ۱′ به اتصال ۱۱انتقال می‌یابد و ولتاژ بالاتر وارد عمل می‌شود و موتور با قدرت کامل اسمی خودبار را به حرکت درمی‌آورد .

زمانی که اتصالهای ۲′ اتصال کوتاه بودند فقط دریچه تیریستورهای TH_5 و TH_6 دارای علایمی بودند[یعنی روشن بودند] . درطول مراحل تغییرکلید [از ۲′ به ۱′] اتصال ۲′مدار بـاز و کلید فقط به ۲′ وصل می‌شود . عبور جریان در بار همچنان از طریـق مسیری کـه توسط تیریستور TH_5 و TH_6 مهیا شده بود ادامه پیدا می‌کند . در مسیر مذکور موقعی که اتصال ۲′ باز

1- Tap 2- Contact 3- Make-and-break

می‌شود جرقه‌توسط تیریستورها به‌حداقل‌ممکن‌می‌رسد . دراین هنگام علایم دریچه‌تیریستورهای $TH5$ و $TH6$ برداشته‌می‌شودودراولین‌مرحله که جریان به صفر نزول می‌کند تیریستورها خاموش می‌شوند و جریان بار از طریق مقاومت R_2 عبور می‌کند . حال علائم دریچه بـه تیریستورهای $TH3$ و $TH4$ اعمال می‌شود تا موقع اتصال کوتاه اتصالهای ۲′ و ۱′ جرقه به حداقـل ممکن برسد (اتصالهای ۲′ و ۱′ قبل از اتصال به هم توسط کلید ، دارای پتانسیل‌های متفاوتی هستنـد) . امپدانس نشتی اتوترانسفورماتور بین انشعابها ، مرکب از مقاومتهای R_1 و R_2 جریان دورانی[1] را محدود می‌کند . با باز شدن اتصال ۲′ تیریستورهای $TH3$ و $TH4$ جرقه را به حداقل‌ممکن‌کاهش می‌دهند . پس از باز شدن اتصال ۲′ علائم دریچه $TH3$ و $TH4$ برداشته شده و این تیریستـورها در جریان‌صفربعدی قطع و خاموش‌می‌شوند . کلید دراین مرحله فقط به اتصال ۱′ اتصال‌می‌یابد و جریان بار از طریق مقاومت R_1 از انشعاب‌گیری ولتاژ زیادتر عبور خواهد کرد . تیریستورهای $TH1$ و $TH2$ روشن می‌شوند تا جریان بار را حمل کنند و موقع‌اتصال‌کوتاه اتصالهای ۱ و ۱′ جرقه را به حداقل ممکن برسانند . سرانجام جریان مستقیما از انشعاب‌گیری ولتاژ زیادتر از طریـق اتصال ۱ عبور می‌کند ولی علائم دریچه تیریستورهای $TH1$ و $TH2$ بـرای آمادگی تغییر محل انشعاب بعدی به طور مداوم اعمال می‌شوند .

به علت اینکه کلیدهای مکانیکی جریان‌های خطا و اضافه ولتاژها را درطی‌کار عادی‌خود حمل می‌کنند ، حفاظت کمی برای تیریستورها مورد احتیاج است . در هر حال برای‌حفاظت‌در مقابل تغییرات dv/dt گذرا و ولتاژ انشعاب‌پیکی که به طورمکانیکی کلیدزنی می‌شود ،بایستی یک مدار RC در مدار اتصال یابد .

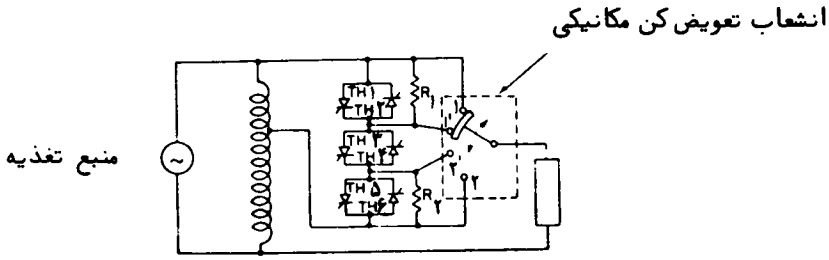
دومین مثال عملی شامل ترانسفورماتوری است که جعبه دنـده تعویض محل انشعاب آن معمولی‌نیست بلکه سیم‌پیچی ثانویه ترانسفورماتور حاوی تعدادی پیچکهای مستقل‌وجدا ازهم است . هر تعدادی از این پیچکها را می‌توان برای تهیه ولتـاژ مورد لزوم به طور سری اتصال داد . اتصالات‌ازطریق روشن کردن به موقع و صحیح تیریستورها عملی می‌شوند .شکل ۳ ــ ۸ پنج پیچک را در ثانویه نشان می‌دهد که می‌توان با آرایش دوتائـی آنها ، ۳۱ مقدار مختلف ولتاژ تولید کرد . بنابراین ولتاژ خروجی از مقدار V تا ۳۱ برابر V با قدرنسبت V قابل‌تغییر خواهد بود . برای به‌دست‌آوردن ۱۷ ولت برای نیم سیکل مثبت بایستی تیریستورهای ۱ ، $S2, S3, S4$ و ۵ روشن و بقیه خاموش باشند و برای نیم‌سیکل‌منفی تیریستورهای ۱′، $S2', S3', S4'$ و ۵′ روشن و بقیه خاموش باشند .

زوج تیریستورهای در حال هدایت که با پیچکها سری شده‌اند ولتاژها را قادر می‌سازند تا در ایجاد ولتاژ در خروجی سهیم شوند . درحالی‌که زوج تیریستورهای‌درحال‌هدایت موازی

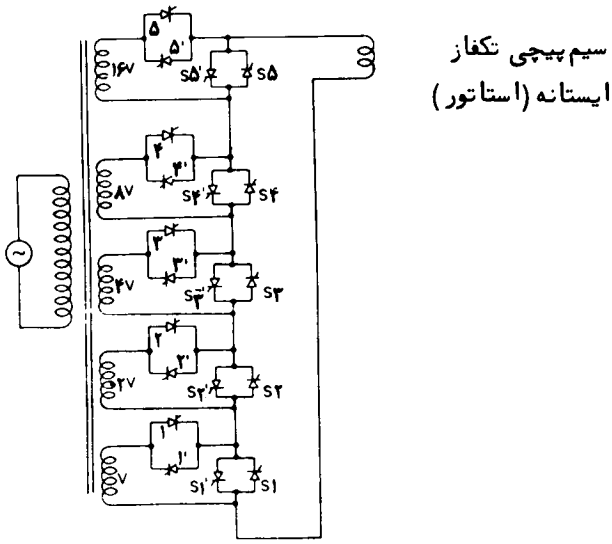
1- Circulating Current

شده‌باپیچکها ، ولتاژهای منبع تغذیه را غیر سهیم می‌سازند . هیچکدام از زوج تیـریستورهای سری و موازی با یک پیچک نباپستی دریک زمان هدایت کنند .

یک تریاک یا یک تیریستور تکی بسته شده به‌دو سر یک پل دیودی ، می‌تواند مطابق‌شکل ۳ ــ ۸ جایگـزین زوج تیریستورهای‌مدارشوند . کاربرد تریاک‌بستگی به دامنه‌تغییرات dv/dt گذرا دارد و استفاده از پل یکسو کننده دیودی بستگی به قیمت مقایسه‌ای آن‌با تیریستوردارد .



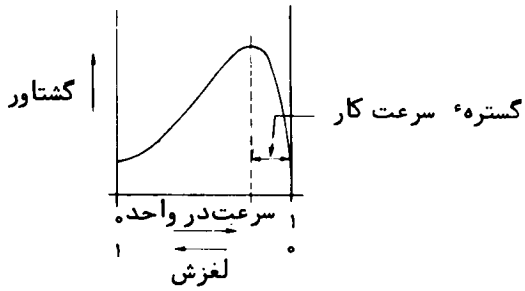
شکل ۳ ــ ۷ انشعاب تعویض‌کن مکانیکی



شکل ۳ ــ ۸ ترانسفورماتور چند سیم‌پیچی برای تغییرات ولتاژ

۳ ـ ۳ کنترل سرعت موتور القایی

موتور القایی به علت محکم بودن و ساخت نسبتا ساده و ارزان آن یک محرک با موارد استعمال عمومی است. شکل ۳ ـ ۹ منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت یک ماشین معمولی بازده بالایی را که از یک منبع تغذیه ولتاژ ثابت و فرکانس ثابتی تغذیه می‌شود نشان می‌دهد. گستره[1] سرعت از بی‌باری تا باری که موتور را از حرکت بازمی‌دارد تقریبا فقط ده درصد سرعت سنکرون است. در نتیجه این ماشین اساسا یک موتور سرعت ثابت است. لکن بنابه دلایل سادگی موتورهای القایی و موارد استعمال مخصوص آنها، روشهای متعددی برای تنظیم سرعت موتور القایی پیدا شده است.



شکل ۳ ـ ۹ منحنی مشخصه سرعت برحسب گشتاور یک موتور القایی

روشهای کنترل سرعت موتورهای القایی مبتنی بر تنظیم ولتاژ ایستانه و گردانه، تعویض تعداد قطبها و تغییر فرکانس منبع تغذیه است. روشهای کنترل سرعت، توسعه روشهای راه ـ اندازی هستند ولی آنها را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱) فرکانس منبع تغذیه
۲) تعویض تعداد قطبها (مدوله کردن دامنه قطب[2])
۳) تغییرات ولتاژ منبع تغذیه (یا امپدانس اضافی در ایستانه)
۴) ولتاژ تزریق شده به گردانه
۵) مقاومت گردانه (روتور)
۶) اتصال زنجیره‌ای موتورها[3]
۷) موتورهای جابه‌جاکن دار
۸) سیستمهای تیریستوری

روشهای هفتگانه اول روشهای معمولی کنترل سرعت است که در اکثر کتابهای ماشینهای

1- Range 2- Pole amplitude modulation 3- Cascading

الکتریکی تشریح شده‌اند . سیستمهای تیریستوری تشریح شده در این فصل شیوه‌های کنترل دیگری را پیشنهاد می‌کنند لکن اصول کلی بدون تغییر می‌مانند .

۳ ـ ۳ ـ ۱ سیستمهای تیریستوری کنترل سرعت

تیریستورها یکی از مهمترین عناصر در کنترل موتورهای القایی هستند و مدارها یا شیوه‌هایی که از آنها استفاده می‌کنند متعددند . در ابتدا برای‌کنترل موتورهای القایی اغلب ازمدارهای تیراترونی زیادی استفاده‌می‌شد ،ولی کاربرد نیمه‌هادیها و مدارهای ساخته شده با آنها،چنان تفاوتها ومزایایی‌نسبت به مدارهای‌لامپی داردکه هم‌اکنون مدارهای نیمه‌هادی اکثراجایگزین مدارهای لامپی شده‌اند .

وجه تشابهی بین بعضی از روشهای راه‌اندازی و بعضی از شیوه‌های کنترل سرعت وجود دارد و تعجب‌آور نیست اگر گفته شود که مدارهای‌ساخته‌شده برای‌یکی ،قابل‌توسعه برای دیگری نیز هست .

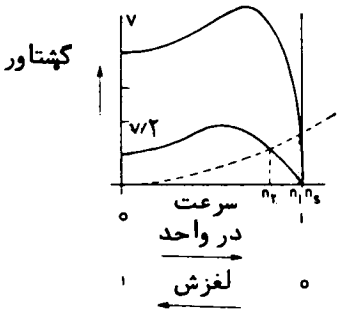
(الف) کلید جریان متناوب

کلید جریان متناوب نیمه هادی در مهندسی قدرت شامل دو تیریستور اتصال موازی معکوس، یا یک تیریستور بسته شده به دو سر یک پل دیودی و یا یک تریاک است . وظیفه‌اصلی‌این‌کلید قابل کنترل کردن ولتار ورودی موتور القایی است . دو روش برای کنترل و تنظیم ولتاژ توسط کلید وجود دارد . روش اول کنترل فاز با روشن شدن کلید است . و روش دوم‌اتصال‌پایانه‌های موتور از یک گروه از سیم پیچی‌های یک ترانسفورماتور به گروه دیگر آن ، شبیه عمل تعویض انشعاب است .

گشتاور راه‌اندازی موتور القایی متناسب با مجذور ولتاژ اعمال شده است . منحنی های گشتاور ـ سرعت متعارفی [1] برای ولتاژ اسمی و نصف ولتاژ اسمی طبق شکل ۳ ـ ۱۰ است که تغییرات سرعت را برای بار معینی نشان می‌دهد . حدود تغییرات سرعت زیادنیست‌ولی روش دستیابی این تغییر سرعت ساده است .

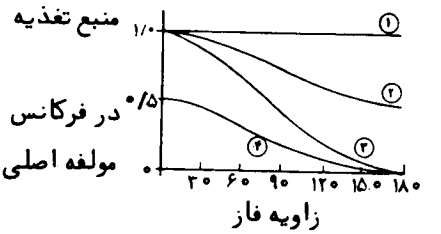
از تنظیم‌کننده‌های ولتاژ جریان متناوب تیریستوری‌که در قسمت ۳ ـ ۲ ـ ۱ آمده است می‌توان‌عینا درراه‌اندازی‌موتورهای القایی‌برای‌تغییر مقدار سرعت حالت پایدار نیز استفاده کرد .مدارهای‌نشان‌داده‌شده‌درشکلهای ۳ ـ ۲ تا ۳ ـ ۸ ، بامنظورمشابهی‌مانندتغییرولتاژ منبع تغذیه ، افزودن امپدانس به مدار ایستانه‌یاگردانه موردا ستفاده‌قرارمی‌گیرند .مدار شکل ۳ ـ ۶ ولتاژ موتور رافقط ازنظردامنه‌تغییرمی‌دهدوبه‌صورت‌یک‌انشعاب‌تعویض‌کن‌بی‌اتصال[2] عمل‌می‌کند.

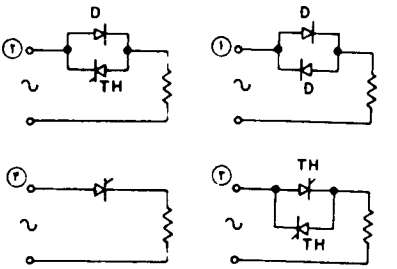
1- Typical 2- Contactless



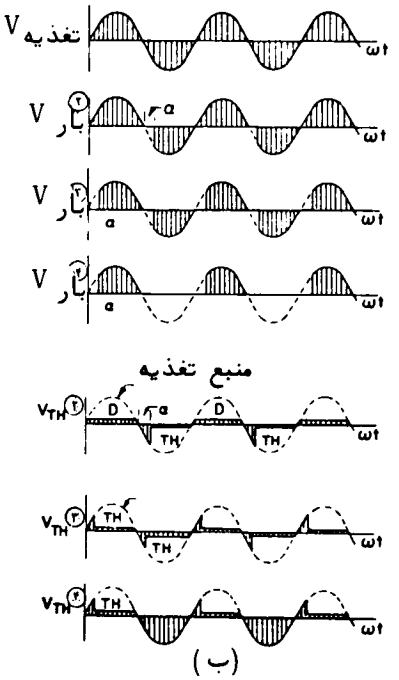
شکل ۳ ـ ۱۰ منحنـی گشتاور ـ سرعت برای ولتاژهای اعمال شده مختلف

شکل موج ولتاژ در خروجی این مدارها سینوسی باقی می‌ماند ، در حالی‌که تنظیم‌کننده کنترل زاویه فاز ضریب قدرت‌وهارمونیکها بازاویه فاز آتش α ، به نحوی‌که درشکل ۳ ـ ۱۱ (الف)، (ب) ، (پ) ، و (ت) نشان‌داده‌شده است‌وبه‌شرطی‌که امپدانس بار اهمی باشد ، تغییرمی‌کند .

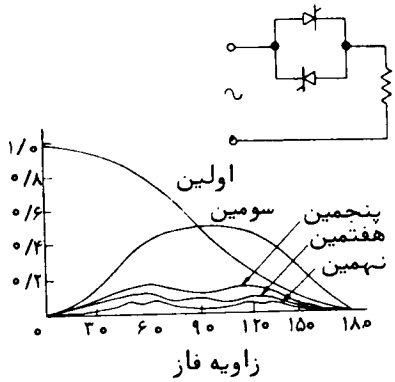




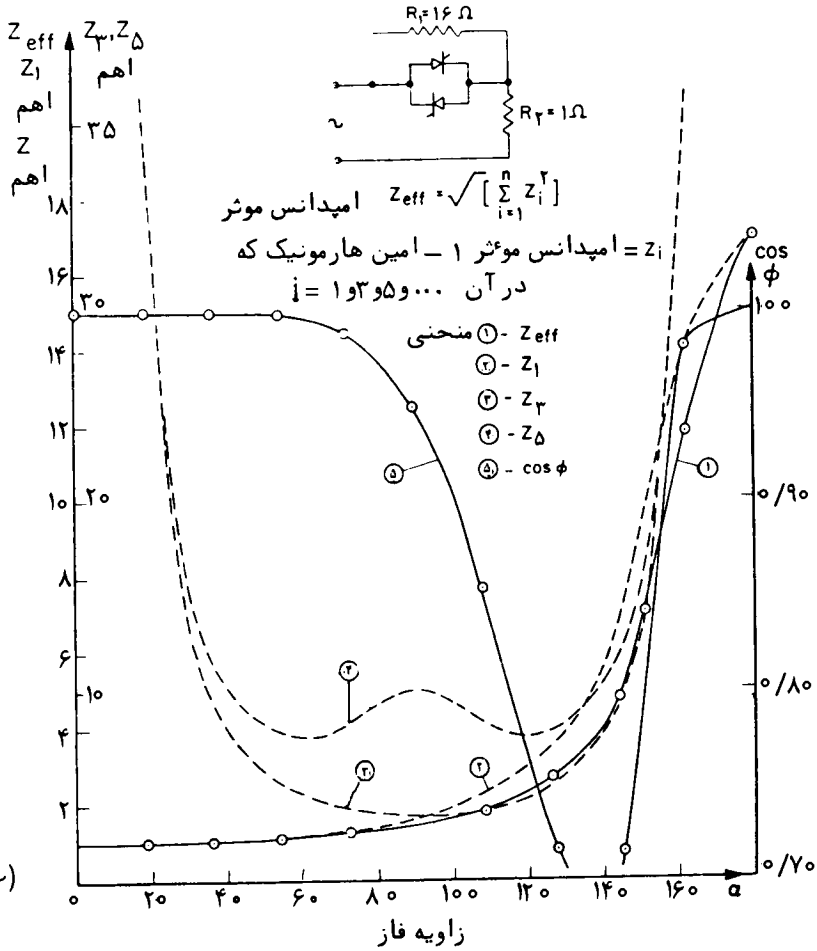
(الف)



(ب)



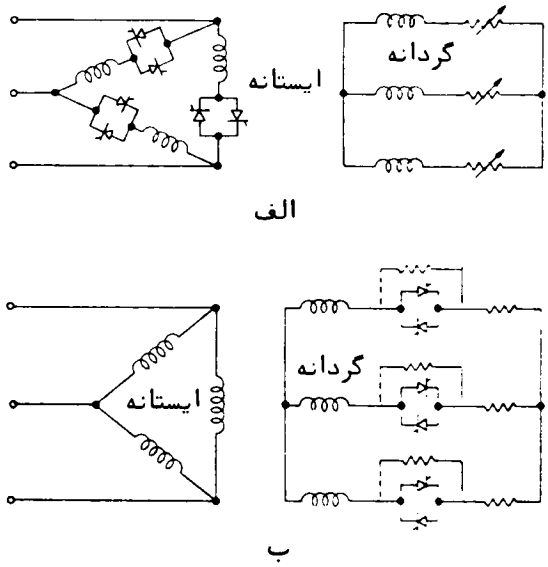
(پ)



(ت)

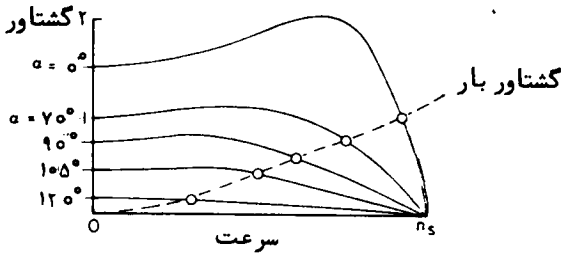
شکل ۳ ـ ۱۱ مشخصه‌های تنظیم‌کننده جریان. (الف) ولتاژ بار اصلی؛ (ب) شکل موجهای ولتاژ؛ (پ) هارمونیکهای تنظیم‌کننده موج کامل؛ (ت) تغییرات امپدانس موثر و ضریب قدرت.

این شکلها معرف تلفاتی است که از وجود هارمونیکهای بالاتر ناشی می‌شود ، ولی سادگی و ارزانی این روش برای گستره کوچکی از سرعت مزایایی است که روشهای دیگر فاقد آن هستند . مدارهای نمونه‌ای برای موتورهای القایی سه‌فاز باگردانه (روتور) سیم‌پیچی‌شده در شکل ۳ ــ ۱۲ نشان داده شده است . مدار (الف) را می‌توان به سادگی در موتورهای القایی قفس سنجابی نیز به کار برد . منحنی‌های گشتاور ــ سرعت را می‌توان طبق شکل ۳ ــ ۱۳ نشان داد که این منحنی‌ها در حالتی که تنظیم کننده هم در مدار باشد به مقاومت گردانه بستگی دارد .



شکل ۳ــ۱۲ مدارهای کنترل سرعت متعارف

تنظیم با کنترل فاز ، در مدار گردانه به مراتب مشکلتر از مدار ایستانه (استاتور) است ، زیرا در این جا مدارهای فرمان به موج سینوسی مرجعی درفرکانس لغزش احتیاج دارند .هرچند که ازسیستمی باکمی تفاوت و بدون‌نیاز به موج سینوسی بافرکانس لغزشی نتایج مشابهی می‌توان به دست آورد . شکل ۳ ــ ۱۴ این سیستم را طرح وار نشان می‌دهد . قدرت‌لغزشی‌ازگردانه ، از طریق یکسوسازی به جریان مستقیم تبدیل می‌شود . مقدار مقاومت مابین حلقه‌های لغزان گردانه از مقدار صفر تا R بسته به میزان سرعت کلیدزنی تیریستور ، تغییر خواهد کرد . مدار احتیاج به یک تیریستور اصلی ویک‌تیریستور کمکی برای خاموش‌کردن دارد . یکی دیگرازمزایای این‌مدار دراین‌است‌که فقط یک‌مقاومت‌است‌که‌تعادل کامل مدار را بین فازها ایجادمی‌کند . ولی وجود تلفات‌در روشهای کنترل مقاومتی‌قدرت موتورهای محرک راتا مثلا " ۱۰۰ کیلووات‌محدود



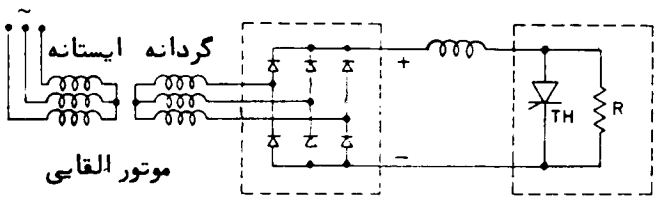
شکل ۳ ــ ۱۳ منحنی‌های نمونه گشتاور ــ سرعت برای زاویه فازهای (α) مختلف

می‌کند . ولتاژهای پایین به علت اینکه انرژی ذخیره شده در خازنهای جا به جایی کم است مشکلاتی برای خاموش کردن تیریستور ایجاد می‌کنند بنابراین در مراحل‌طراحی‌دقت مخصوصی برای این مدار مورد احتیاج خواهد بود .

تمرین‌حل‌شده ۳ ــ ۱. یک مدار ساده تنظیم‌کننده جریان متناوب تیریستوری برای موتور القایی تک فاز $\frac{1}{4}$ اسب بخار ۲۲۰ ولتی طرح و مشخصه‌های سرعت آن را تعیین کنید .

موتور القایی تک فاز را می‌توان با هر کدام از تنظیم کننده‌های مذکور در فوق مجهز کرد تابا کنترل ولتاژ ورودی آن تاحدود معینی‌سرعتش کنترل شود . شکل ۳ ــ ۱۵ یکی از روشهای مذکور را با مدار دریچه ساده‌ای نشان می‌دهد .

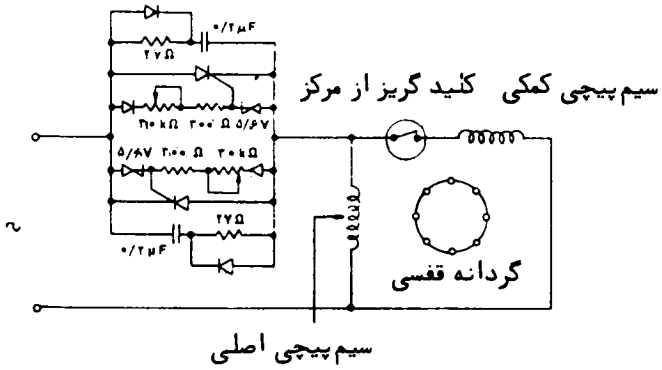
مشخصه‌های موتور عبارتند از: ۲۲۰ ولت ، ۲/۲۵ آمپر ، $\frac{1}{4}$ اسب بخار ، چهار قطب ، ۵۰ هرتز ، جریان راه‌اندازی ۸ آمپر و کلید گریز از مرکز با سرعت ۹۰۰ دور دردقیقه‌بازمی‌شود .



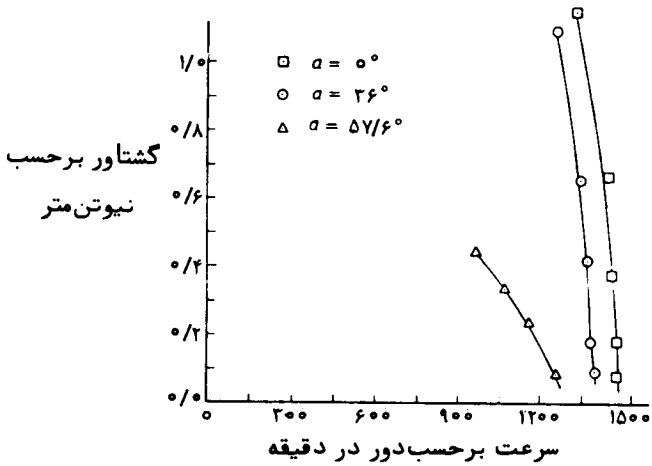
متوسط مقاومت از صفر تا R مبدل (واگردان)

شکل ۳ ــ ۱۴ مقاومت متغیر گردانه توسط کنترل پالس

کنترل فاز محدود به ۹۰ درجه برای هر نیم سیکل است و این برای ماشینهای کوچکی که با سیم‌پیچی کمکی راه اندازی می‌شوند و با یک سیم‌پیچی اصلی می‌چرخند کاملا رضایت‌بخش است . منحنی‌های گشتاور ــ سرعت برای این مثال طبق شکل ۳ ــ ۱۶ است .



شکل ۳ ــ ۱۵ یک تنظیم‌کننده‌ولتاژ ساده برای‌موتور: ۲۲۰ ولتی ــ ۲/۲۵ آمپری ــ $\frac{1}{4}$ اسب‌ــ بخار چهار قطب ۵۰ هرتز با جریان راه‌انداز ۸ آمپر و کلید گریز از مرکزی که در ۹۰۰ دور در دقیقه باز می‌شود.



شکل ۳ ــ ۱۶ تغییرات سرعت برای موتور القایی تک‌فاز $\frac{1}{4}$ اسب بخار

مثال فوق نشان می‌دهد که تغییر زاویه فاز بیشتر از ۹۰ درجه برای هدایت لزومی‌ندارد. حدود تغییرات سرعت به علت وجودسیم‌پیچی فاز کمکی[1] فقط بین ۹۰۰ تا ۱۴۵۰ دور دردقیقه

1- Split phase

است ؛ این تغییرات سرعت در داخل زاویه فاز صفر تا ۶۰ درجه عملی می‌شود .

(ب) وارونگرها (تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب)

وارونگرها قادرند منبع تغذیه جریان مستقیم یا جریان متناوب فرکانس ثابتی را به منبع تغذیه جریان متناوبی با یک یا چند فرکانس متفاوتی تبدیل کنند . تبدیل قدرت ازمیلی‌وات تا مگاوات را می‌توان با وارونگرهای تیریستوری ،که جایگزین اکثر ماشینهای الکتریکی چرخان مبدل فرکانس شده‌اند ، به انجام رسانید .

سرعت سنکرون موتور القایی که همان سرعت چرخش موج نیروی محرکه مغناطیسی mmf در فاصله هوایی است عبارت است از :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{دور در ثانیه}$$

که درآن f فرکانس منبع تغذیه (برحسب سیکل در ثانیه یا هرتز) و p تعداد زوج قطبهای موتور است . سرعت واقعی گردانه موتور با مشخصه‌ای شبیه شکل ۳ ــ ۹ نزدیک به سرعت سنکرون است و با نوسان بار تغییر قابل توجهی نمی‌کند . بنابراین با تعداد قطبهای ثابت تغییر در فرکانس منبع تغذیه باعث تعویض سرعت سنکرون و درنتیجه متناسب با آن تغییر در سرعت واقعی گردانه ایجاد خواهد شد .

موتور القایی به منظور کار در چگالی فلوی مغناطیسی معینی طراحی می‌شود وچون گشتاور الکترومغناطیسی متناسب با فلوی مغناطیسی است ، داشتن فلوی مغناطیسی نسبتا زیادی بدون نزدیک شدن به ناحیه اشباع ، مورد لزوم است . انتخاب قسمت زانوی منحنی مغناطیسی به‌منظور رسیدن به بالاترین مقدارگشتاور درکم‌ترین مقدارتلفات ، شیوه معمول طراحان ماشینهای الکتریکی است . اگر ولتاژ اعمال شده به موتور را به توان تقریبا برابرنیروی محرکه الکتریکی القاشده فرض کرد ، از رابطه نیروی محرکه القا شده نتیجه می‌شود که :

$$V = k\Phi f \qquad (۵ - ۳)$$

که در آن :

k ضریب ثابتی است که متضمن ، ضریب شکل[1] ، ضریب سیم پیچی[2] وتعداد دورسیم پیچی است .

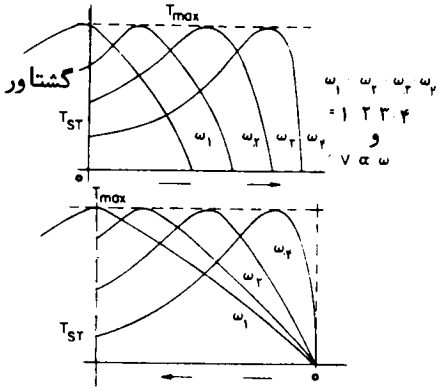
Φ فلوی مغناطیسی بیشینه هر قطب

V مقدار موثر ولتاژ اعمال شده به پایانه‌های موتور

برای ثابت نگهداشتن فلوی مغناطیسی در فرکانسهای مختلف ، بایستی ولتاژ اعمال‌شده به پایانه‌های موتور القایی متناسب با فرکانس قابل تنظیم شود ، به عبارت دیگر همان طوری

1- Form factor 2- Winding factor

که رابطه (۳ ــ ۵) نشان می‌دهد لازم است که نسبت ولتاژ اعمال شده به فرکانس مقدار ثابتی باشد .



شکل ۳ ــ ۱۷ مشخصه‌های گشتاور ــ سرعت و گشتاور ــ لغزش موتور القایی برای فرکانس قابل‌تنظیم .

وارونگرها (معکوس‌کننده‌ها) ، موتور القایی قفس سنجابی را از قید اساسی تک‌سرعتی بودن رها می‌سازند . این موتور دارای مزایای دیگری از قبیل ساخت نسبتا ساده و ارزان است و احتیاج به اتصالات لغزنده روی حلقه‌های لغزان‌با جابه‌جاکن‌هاندارد . موتورهای القایی که دارای وارونگر فرکانس متغیر به منظور تامین قدرت برای ایستانه هستند ، به شرط تنظیم‌شدن ولتاژ در تناسب با فرکانس مشخصه‌های ایده‌آل شکل ۳ ــ ۱۷ را خواهند داشت .

اکنون واحدهای بزرگ موتور القایی تغذیه شده توسط وارونگرها از نظر قیمت ، بازده ، نگهداری و تنوع با واحدهای جریان مستقیم یا واحدهای جریان متناوب جا به جاکن دار ، رقابت شایان توجهی می‌کنند . مطالب ذکر شده جنبه عمومی دارد وبایستی‌مثالهای متعددی از موارد استعمال ویژه آورده شود تا مزایای خاص سه نوع فوق نسبت به یکدیگر معلوم شود . لکن موتور القایی را به علت سادگی و بادوامی تقریبا می‌توان در هرمحل وهرجایی قرار داد . درحالی که وارونگر (معادل جا به جا کن) را می‌توان دریک محل و جایگاه ساکنی ، هر جا که مناسب باشد گذاشت ، که این‌خود مزیت بزرگی نسبت به ماشینهای جابه‌جاکن دار است . به این دلیل ساده که دستگاههای الکترونیک قدرت برای موتورهای کوچک نسبتا گران تمام‌می ــ شوند ، استفاده از واحدهای‌بزرگ‌تاکیدمی‌شود ولی باید توجه داشت که‌با افزایش اندازه موتور قیمت وارونگر (معکوس کننده) متناسب با آن زیاد نمی‌شود ، بلکه کسر کوچکتری از قیمت کلی سیستم می‌شود .

وارونگرها نه تنها می‌توانند در مدار ایستانه قرار گیرند بلکه آنها را می‌توان در مدار

گردانه نیز برای جایگزینی با تغییر دهنده‌های فرکانس گردان قرار داد . در این صورت سیستم توانایی تولید گشتاور ثابت و یا اسب بخار ثابت در طول مدت تنظیم سرعت توسط کنترل عبور قدرت در دو جهت ، بین مدار گردانه ومنبع تغذیه را خواهد داشت .

انواع زیاد مدارهای وارونگر تیریستوری وجود دارد که می‌توان آنها را باتوجه‌به ترکیب مدار تیریستوری و شیوه جابه‌جایی [1] تیریستور طبقه‌بندی کرد . به جرأت می‌توان گفت که تعداد این مدارها به قدری زیاد است که یک کتاب را به طور کامل پر می‌کنند . در اینجا شرح کوتاه و جامعی درباره آنها داده می‌شود و با بحثی در مورد روشهای طراحی و کاربردهای مختلف وارونگرهای (معکوس کننده‌های) مشابه برای دستیابی به ولتاژ متغیر و فرکانس متغیر جهت تحریک موتورهای القایی دنبال می‌شود .

(۱) طبقه‌بندی وارونگرها

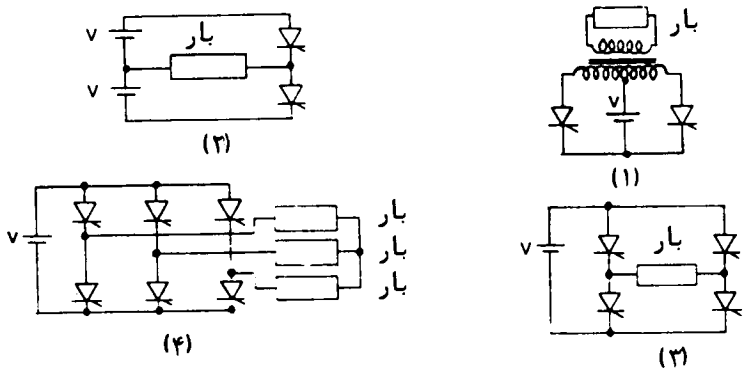
در شکل ۳ ــ ۱۸ چهار ترکیب اصلی از وارونگرها نشان داده شده است . بر خلاف ترکیبهای دیگر تنها پل‌تک‌فاز ترکیب شماره ۳ احتیاج به بیش از دو تیریستور در هر فازخواهد داشت . با کلید زنی متوالی تیریستورها می‌توان علامت ولتاژ دو سر بار را به تناوب [2] تغییر داد و جریان متناوبی در بار مصرفی تولید کرد . حتی جایی که منبع تغذیه جریان متناوب از پیش وجود داشته باشد لازم‌است آن را اول‌به‌جریان مستقیم تبدیل کرد وسپس توسط وارونگر به جریان متناوب فرکانس متغیر برگرداند . مدارهای واگردان سیکلی [3] که در قسمت کنترل ماشینهای سنکرون تشریح‌خواهند شد ،از این امر مستثنی هستند .

هر کدام از ترکیبات شکل ۳ ــ ۱۸ حداقل شامل شش شیوه مختلف جابه‌جایی می‌باشد که قبلا در فصل ۲ به آنها اشاره شده و در شکل ۳ ــ ۱۹ تکرار شده است . بنابراین با توجه به تلفیق شکل‌های ۳ ــ ۱۸ و ۳ ــ ۱۹ بیست و چهار نوع وارونگر مختلف می‌توان به دست آورد که تعداد زیادی از آنها را با تغییرات کمی باز می‌توان به وجود آورد . چون‌برای‌هرمورد استعمال وارونگر ، طرح بهینه‌ای وجود دارد ، نحوه انتخاب می‌تواند مختلف و متنوع باشد . به هر حال کاربرد وسیع وارونگرها (معکوس کننده‌ها) توسط مثالهای زیر روشن و واضح خواهد شد . اولین مثال ، وارونگر (معکوس کننده) نوع (پ ۱) که در حقیقت عبارت است‌ازنوع (پ) از شکل ۳ ــ ۱۹ جایگزینی و ترکیب شماره ۱ از شکل ۳ ــ ۱۸ است .

(۲) وارونگر (پ۱) برای موتور القایی تک‌فاز

از نظر کارکرد تنها وارونگری که احتیاج به ترانسفورماتور دارد نوع (پ ۱) است ،اگرچه

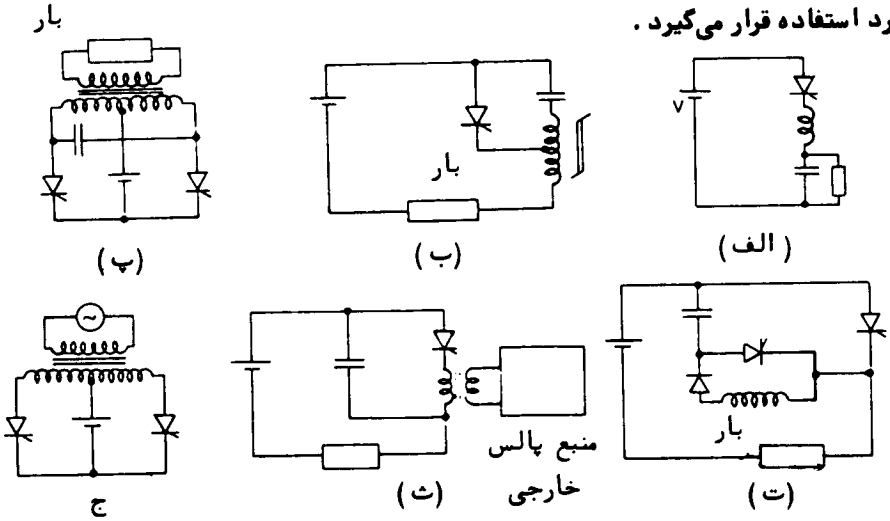
1- Commutation 2- Cyclically 3- Cycloconverter



شکل ۳ـ۱۸ طبقه‌بندی بنیادی وارونگرها

۱) با سیم اتصال سر وسط[1]
۲) با منبع تغذیه سر وسط
۳) پل تک‌فاز
۴) پل سه فاز

جریان متوسط تیریستور تنها نصف جریان منبع تغذیه است ولی هر تیریستور بایستی قابلیت انسداد دو برابر ولتاژ منبع تغذیه را داشته باشد. این نوع وارونگر (معکوس کننده) به علت مشکلات تغییر فاز برای مدارهای سه فاز مناسب نیست و برای قدرتهای تا حدود ۱۰ کیلو وات مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳ـ۱۹ شیوه‌های جابه‌جایی

الف ـ خود جابه‌جایی توسط بار تشدیدی
ب ـ خود جابه‌جایی با مدار LC
پ ـ خازن باردار[2] متصل به تیریستور بار دیگر
ت ـ خازن باردار متصل به تیریستور کمکی
ث ـ منبع پالس خارجی
ج ـ جابه‌جایی خط جریان متناوب

1- Centre-tappedlead
2- Charged

شکل ۳ ــ ۲۰ آرایش اساسی اتصالات این نوع وارونگر را نشان می‌دهد . تنها تفاوت بین این مدار و مدار وارونگر نوع (پ ۱) در شکلهای ۳ ــ ۱۸ و ۳ ــ ۱۹ این است که در آن سلف جابه‌جایی L اضافه شده است . عمل این سلف جهت دادن به ولتاژ دو سر خازن به منظور تعیین طول زمان جابه‌جایی و به خاطر محدود کردن مقدار تغییرات di/dt است .

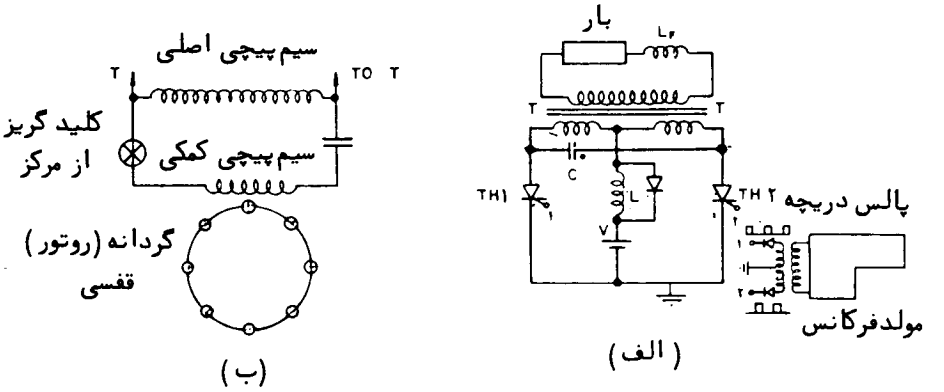
دو تیریستور TH_2 و TH_1 به طور متناوب روشن می‌شوند تا جریان متناوبی در بار به وجود آید ، اما چون منبع تغذیه جریان مستقیم است ، خازن C به دو سر سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور بسته می‌شود تا انرژی لازم برای خاموش کردن یکی از تیریستورها را موقعی که دیگری شروع به هدایت می‌کند مهیا سازد .

در آغاز کار مدار هیچ جریانی از بار و یا مدار به علت این که تیریستورها مسدود هستند عبور نمی‌کند . مولد فرکانس ، پالس جریانی به دریچه تیریستور TH_1 اعمال و تیریستور را روشن می‌کند . حال تمامی ولتاژ منبع تغذیه V روی نصف سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور قرار می‌گیرد که بنا به خاصیت القا الکترومغناطیسی (یا عمل ترانسفورماتوری) بین تمامی سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور ولتاژی معادل ۲V به وجود خواهد آمد . خازن C نیز تا دو برابر ولتاژ منبع تغذیه پر می‌شود ، به‌طوری که جوشن نقطه‌دار [(طبق شکل ۳ ــ ۲۰ (الف)] حاوی بار مثبت است . تیریستور TH_2 تا زمانی که دومین پالس جریان به دریچه این تیریستور اعمال نشده و آنرا روشن نکرده است در مقابل ولتاژ $2V$ ایستادگی می‌کند . روشن شدن تیریستور TH_2 باعث تخلیه خازن C و بایاس معکوس شدن تیریستور TH_1 و خاموش کردن آن می‌شود ، همچنین ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچی اولیه دراثر روشن‌شدن تیریستور TH_2، سبب تغییر قطبیت سیم‌پیچی ثانویه می‌شود و سیم‌پیچی [یا بار] جریان متناوبی از خود عبور می‌دهد . تغییر قطبیت در جوشنهای خازن جابه‌جایی نیز اتفاق می‌افتد و موقعی که پالس سوم به تیریستور TH_1 اعمال می‌شود سیکل عمل خودبه‌خود تکرار می‌شود .

فرکانس جریان بار ، و بنابراین سرعت موتور ، همان فرکانس تعویض جریان سیم پیچی است . بنابراین میزان تکرار علایم دریچه به یکی از تیریستورها است که فرکانس بار را تعیین می‌کند . یک نوسانساز (چندضربانی) چرخش آزاد[1] به راحتی می‌تواند به عنوان واحد کنترل‌ـ کننده دریچه عمل و میزان[2] کلیدزنی قابل تنظیمی ایجاد کند .

شکل موج ایده‌آل بار بستگی به پارامترهای مدار دارد و می‌تواند به صورت موج‌مربعی (اگر ترانسفورماتور قادر به عمل با موج مربعی باشد) و یا سینوسی باشد . برای به دست‌آوردن موج سینوسی بایستی از طبیعت تشدید مدار که دستیابی به حالت پایدار درمدار اولیه راهرگز مجاز نمی‌سازد استفاده کرد .

1- Free running multivibrator 2- Rate



شکل ۳ ــ ۲۰ وارونگر نوع پ ۱

(الف) مدار اصلی وارونگر پ ۱ (ب) موتور القایی تک فاز به عنوان بار

دیود بین دو سر سلف L بدون ایجاد ضربه‌های ولتاژ معکوس بالا ، انرژی‌ذخیره شده را در فواصل جابه‌جایی از بین می‌برد .

عناصر مدار بایستی طوری انتخاب شوند که کارکرد قابل اعتمادی رابه‌مفهوم جابه‌جایی مداوم و موفق مهیا کنند . تحلیل مدار روابط لازم برای طراحی را آماده خواهد کرد .

در برخی موارد این وارونگر به علت اینکه خازن جابه‌جایی به طور موثر موازی با بار عمل می‌کند ، به عنوان وارونگر موازی بنیادی مورد توجه قرار می‌گیرد . یکی ازمعایب‌این‌مدار اتصال کوتاه شدن منبع تغذیه با از بین رفتن علامت فرمان تبریستورهاست .

تحلیل مدار وارونگر (پ ۱) با بار اهمی

بررسی شکل ۳ ــ ۲۰ و عناصر یک طرفه‌ای که دارد نشان می‌دهد که روابط مدار غیر ــ خطی خواهدبود . ولی اگر عناصر مدار را ایده‌آل فرض کنیم ، ازجمله تیریستورها را کلیدکامل درنظر بگیریم ، برای بیش از یک نیم سیکل سیستم خطی می‌شود و می‌توان از روش تبدیل لاپلاس برای حل معادلات گذرا استفاده کرد . در طول مدت نیم‌سیکلی که‌تیریستور TH_1 هدایت می‌کند شکل ۳ ــ ۲۰ را می‌توان به صورت شکل ۳ ــ ۲۱ (الف) رسم و فرض کرد که تیریستور TH_2 قبلا" هدایت و خازن C را پر کرده است . با سیم پیچی دو لایه[1] اولیه که دارای ضریب تبدیل ۱ به ۱ است ، خازن C با نسبت مجذور دورها قابل تبدیل به اولیه است . در نتیجه مقدار ظرفیت معادل آن عبارت است از :

1- Bifilar winding

$$C_e = \left(\frac{1+1}{1}\right)^2 \cdot C = 4C \qquad (3-6)$$

اگر نسبت دورهای اولیه به ثانویه ۱ به n باشد در این صورت مقاومت‌معادل‌تبدیل‌شده به اولیه عبارت است از:

$$R_e = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L \qquad (3-7)$$

بنابراین مدار معادل به صورت شکل ۳ ــ ۲۱ (ب) در خواهد آمد و شرایط اولیه‌ای برای بررسی مدار ایجاد می‌شود. قبل از هدایت $TH1$ جریان حالت پایدار

$$I(0+) = \frac{V}{R_e} \qquad (3-8)$$

از طریق $TH2$ و L عبور می‌کند. قبلا هم که خازن C تا ولتاژ $2V$ باردار شده بود در نتیجه ولتاژ در دوسر C_e عبارت است از:

$$V_{ce}(0+) = \left(\frac{1}{1+1}\right) V_c(0+) = \frac{V_c}{2}(0+) = V \qquad (3-9)$$

معادلات دیفرانسیل تشریح کننده عملکرد حالت گذرای مدار شکل ۳ ــ ۲۱ (ب) عبارت است از:

$$Vu(t) = (Lp + R_e)i(t) - R_e i_1(t) \qquad (3-10)$$

و

$$0 = \left(R_e + \frac{1}{C_e p}\right) i_1(t) - R_e i(t) \qquad (3-11)$$

که در آن $u(t)$ تابع پله‌واحداست، یعنی تابع برای $t \leqslant 0$ برابر صفر و برای $t \geqslant 0$ یک است. $p = \frac{d}{dt}$ و $\frac{1}{p} = \int_{-\infty}^{t} dt$ با به کار بردن تبدیل لاپلاس با عامل[1] s روابط (۳ ــ ۱۰) و (۳ ــ ۱۱) به صورت زیر در می‌آیند.

$$\frac{V}{s} = [LsI(s) - LI(0+)] + R_e I(s) - R_e I_1(s) \qquad (3-12)$$

1- Operator

و

$$0 = R_e I_1(s) + \left[\frac{I_1(s)}{C_e s} - \frac{Q(0+)}{C_e s}\right] - R_e I(s) \qquad (۱۳-۳)$$

که در آن $Q(0+)$ بار الکتریکی اولیه خازن C_e است و مطابق شکل در سمت جوشن نقطه دار مثبت است؛ لذا از رابطه (۳ ــ ۹) می‌توان نوشت:

$$\frac{Q(0+)}{C_e} = V_{ce}(0+) = V. \qquad (۱۴-۳)$$

از رابطه (۳ ــ ۱۳)

$$I_1(s) = \frac{VC_e}{1 + R_e C_e s} + \frac{R_e C_e s}{1 + R_e C_e s} I(s) \qquad (۱۵-۳)$$

با جایگزینی مقدار I_1 در رابطه (۳ ــ ۱۲) داریم:

$$\frac{V}{s} + \frac{LV}{R_e} + \frac{VR_e C_e}{1 + R_e C_e s} = \left[\frac{R_e + Ls + LR_e C_e s^2}{1 + R_e C_e s}\right] \cdot I(s). \qquad (۱۶-۳)$$

اگر ثابتهای زمانی مدار یعنی τ_c و τ_L طبق روابط زیر باشند.

$$\frac{L}{R_e} = \tau_L \qquad (۱۷-۳)$$

و

$$R_e C_e = \tau_c \qquad (۱۸-۳)$$

رابطه (۳ ــ ۱۶) به صورت زیر درمی‌آید:

$$I(s) = \frac{V}{R_e s} \frac{[\tau_L \tau_c s^2 + (\tau_L + 2\tau_c)s + 1]}{(\tau_L \tau_c s^2 + \tau_L s + 1)}. \qquad (۱۹-۳)$$

با استفاده از ضریب بدون ابعاد مورفی و نامبیار[1] (۴) می‌توان رابطه‌را به صورت‌بدون‌بعدزیر نوشت:

$$Q = \left(\frac{\tau_c}{\tau_L} - \frac{1}{4}\right)^{1/2} \qquad (۲۰-۳)$$

تبدیل معکوس رابطه (۳ ــ ۱۹) عبارت است از:

1- Murphy and Nambiar

$$i(t) = \frac{V}{R_e}\left[1 + \frac{2}{Q}(Q^2 + \tfrac{1}{4})\exp(-t/2\tau_c)\sin\frac{Qt}{\tau_c}\right]. \qquad (۳-۲۱)$$

برای مقدار حقیقی Q شرط جدیدی از رابطه (۳ ــ ۲۰) به وجود می‌آید که عبارت است از:

$$\frac{\tau_c}{\tau_L} \geqslant \frac{1}{4} \qquad (۳-۲۲)$$

و یا

$$4R_eC_e \geqslant \frac{L}{R_e}. \qquad (۳-۲۳)$$

اگر حالت حدی رابطه فوق یعنی برابری دو طرف آن را در نظر بگیریم داریم:

$$Q = 0 \qquad (۳-۲۴)$$

و رابطه (۳ ــ ۲۱) نشان می‌دهد که جریان $i(t)$ دارای مقدار ثابت و غیر متغیری است:

$$i(t) = \frac{V}{R_e}. \qquad (۳-۲۵)$$

اگر:

$$4R_eC_e < \frac{L}{R_e}, \qquad (۳-۲۶)$$

POWEREN.IR

یعنی اگر Q موهومی شود، جریان منبع تغذیه بطور نمایی تا اشباع سلف L صعود می‌کند.

هرقدر Q افزایش یابد جریان منبع تغذیه طبق شکل (۳ ــ ۲۲) حالت نوسانی بیشتری پیدا خواهد کرد. نه تنها حداقل مقدار بلکه حداکثر مقدار هم برای Q وجود دارد. اگر Q بیش از اندازه افزایش یابد جریان نوسانی طوری خواهد بود که در سیکل دوم جریان منبع تغذیه منفی‌می‌شود. منفی‌شدن جریان‌باعث انسداد TH_1 شده و هدایت قطع می‌شود بنابراین هرگز نبایستی این حالت اتفاق بیفتد. حالت حدی (برای اینکه جریان منفی نشود) طبق شکل ۳ ــ ۲۲ برای حالت Q_3 موقعی است که جریان صفر می‌شود. به منظور اتخاذ حداکثر مقدار ممکن برای Q بایستی محور طول پس‌از سه چهارم سیکل کامل بر تابع جریان $i(t)$ مماس شود؛ یعنی، موقعی که:

$$\frac{Qt}{\tau_c} = \frac{3\pi}{2} \qquad (۳-۲۷)$$

از قسمت سینوسی رابطه (۳ ــ ۲۱) و در نتیجه:

$$i(t) = 0 \qquad (۳-۲۸)$$

با جایگزینی رابطه (۳ ــ ۲۸) در رابطه (۳ ــ ۲۱) داریم:

$$0 = 1 - \frac{2}{Q}(Q^2 + \tfrac{1}{4})\,e^{-3\pi/4Q} \qquad (۳-۲۹)$$

حل این معادله منجر می‌شود به:

$$\frac{\tau_c}{\tau_L} < ۳/۲۴. \qquad (۳۰-۳)$$

که تواما با شرایط دیگر نتیجه می‌شود:

$$۰/۲۵ < \frac{\tau_c}{\tau_L} < ۳/۲۴. \qquad (۳۱-۳)$$

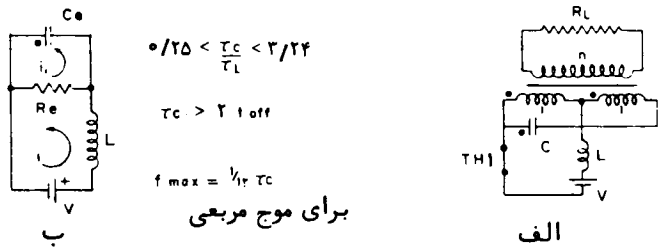
این گستره ازتغییرات ثابت زمانی، برای هدفهای طراحی مدار کافی نیست. شرط نهایی (مورد لزوم برای طراحی) این است که تیریستور $TH۲$ پس از روشن شدن تیریستور $TH۱$ (در لحظه $t = ۰$) بایستی به مدت کافی بایاس معکوس شود تا اینکه تیریستور $TH۱$ به حالت مسدودش برگردد. با ادامه تحلیل مدار به همان روش، ولتاژ دو سر بار (همچنین $TH۲$) خواهد شد:

$$v_{R_e}(t) = V\left(۱ - ۲\exp(-t/۲\tau_c)\cos\frac{Qt}{\tau_c} + \frac{۱}{Q}\exp(-t/۲\tau_c)\sin\frac{Qt}{\tau_c}\right). \qquad (۳۲-۳)$$

این شکل موج (ولتاژ دو سر بار طبق رابطه فوق) با میرایی کمی بیشتر یا کمی کمتر شبیه شکل ۳ ــ ۲۳ است، ولی هرچه میرایی کمتر می‌شود، τ_c/τ_L بیشتر می‌شود. زمانی که ولتاژ دو سربارصفر می‌شودبایستی $TH۲$ خاموش‌شود. درغیراین‌صورت‌پس اززمان t_1 تیریستور $TH۲$ بایاس مستقیم یافته و دوباره هدایت‌خواهدکرد. تحمل این وضع غیرممکن است، لذا اگرفرض می‌شود که شیب منحنی در لحظه صفر تا زمان t_1 بدون تغییر می‌ماند می‌توان زمان t_1 را بر حسب پارامترهای مدار محاسبه کرد:

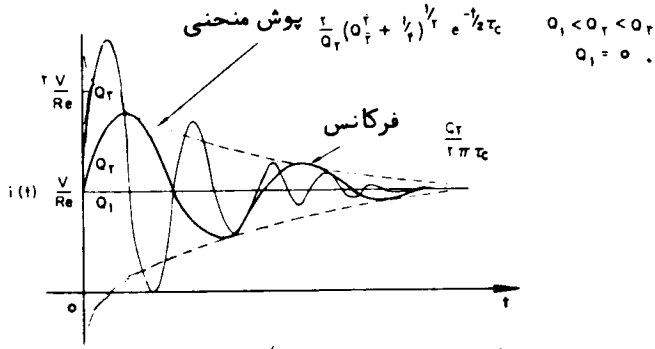
$$\left(\frac{dv_{R_e}}{dt}\right)_{t=۰} = \frac{۲V}{\tau_c}. \qquad (۳۳-۳)$$

ولی تا زمان t_1 فرض می‌شود که شیب منحنی به صورت زیر است:

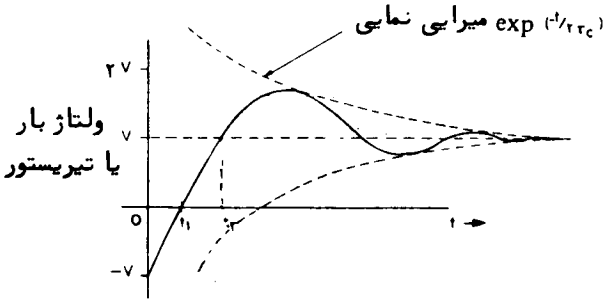


شکل ۳ ــ ۲۱ مدارهای معادل برای یک‌نیم‌سیکل موقعی که تیریستور $TH۱$ روشن است.

الف ــ مدار در حال کار ب ــ مدار معادل شکل (الف)



شکل ۳ ــ ۲۲ جریانهای تغذیه برای مقادیر مختلف ثابت زمانی



شکل ۳ ــ ۲۳ ولتاژ بار

$$\frac{dv_{Re}}{dt} = \frac{V}{t_1}. \qquad (۳ــ۳۴)$$

در نتیجه:

$$t_1 = \frac{\tau_c}{۲}, \qquad (۳ــ۳۵)$$

اما:

$$t_1 > t_{off}$$

که در آن t_{off} زمان خاموش تیریستور است، در نتیجه:

$$\tau_c > ۲t_{off}. \qquad (۳ــ۳۶)$$

در تمام این تحلیل فرض بر این بوده است که حالت پایدار قبل از به وقوع پیوستن عمل کلیدزنی بعدی برقرار شده باشد که در غیر این صورت شرایط اولیه برای کارکرد روابط (۳ ــ ۱۵ و ۳ ــ ۱۶) نادرست خواهد بود. کیفیت پایداری این مدار، صرفنظر از جابه‌جایی اولیه‌پالس، کارکردن با موج مربعی را ایجاب می‌کند. حالت پایدار را می‌توان به طور تقریبی چنین تعریف کرد که هر وقت مقدار قسمت نمایی معادله (۳ ــ ۲۲) به‌حدود ۵ درصد مقدارنهایی خودبرسد حالت پایدار برقرار می‌شود؛ یعنی،

$$\exp(-t/۲\tau_c) = ۰/۰۵ \qquad (۳ــ۳۷)$$

یا

$$t = 6\tau_c \qquad (۳-۳۸)$$

این زمان معرف حداقل زمان یک نیم‌سیکل موج مربعی است در نتیجه بیشینه مقدارفرکانس‌بار عبارت است از:

$$f_{\max} = \frac{1}{2t} = \frac{1}{12\tau_c} = \frac{1}{12C_eR_e} = \frac{n^2}{48CR_L}. \qquad (۳-۳۹)$$

در حقیقت شرایط اولیه تقریبا موقعی که کلیدزنی در زمان t_2 نشان داده شده در شکل ۳ ــ ۲۳ ، اتفاق افتــد برقرار می‌شود . در نتیجه شکل موج تقریبا سینوسی‌خواهدبود . درمورد طراحی خاص، اول حداکثر فرکانس کارکرد را انتخاب و از رابطه زیر استفاده می‌کنند .

$$f_{\max} \leqslant \frac{1}{12\tau_c} \qquad (۳-۴۰)$$

در نتیجه:

$$\tau_c < x_1 \qquad \text{(فرض می‌کنیم)} \qquad (۳-۴۱)$$

سپس زمان خاموشی تیریستور را تعیین و رابطه زیر اعمال می‌شود .

$$\tau_c > 2t_{\text{off}} > x_2 \qquad \text{(فرض می‌کنیم)} \qquad (۳-۴۲)$$

این رابطه رواداشت[1] (تلرانس) زیر را ارائه خواهد داد .

$$x_2 < \tau_c < x_1. \qquad \text{(فرض می‌کنیم)} \qquad (۳-۴۳)$$

مقاومت باربایستی مشخص شود و به دنبال آن مقــدار C_e و C تعیین شود . رابطه (۳ ــ ۳۱) حدود L را نیز معین می‌کند .

اگر به جای مقاومت بار R_L در شکل ۳ ــ ۲۱ (الف) یک بار سلفی گذاشته شود پس‌ازعمل جابه‌جایی خازن C تنها مسیر را برای جریان بار سلفی مهیــا خواهد کرد . بنابراین بایستی مقدار C به اندازهٔ کافی زیاد باشد تا از صعود ولتاژ اضافی پس از جابه‌جایی جلوگیری و L_L را حذف کند .

در یک مدار عملی متعارف (مرجع ۵) مطابق شکل ۳ ــ ۲۴ (الف) ، برشگر کلاس B با خروجی صاف شده ، وارونگــر نوع (پ ۱) را که عملکرد اصلی آن قبلا ذکر شد ، با ولتاژ متغیر تغذیه می‌کند . برشگر کلاس A یک منبع تغذیه خارجی برای جابه‌جایی وارونگــر تامین‌می‌کند . اگر وارونگــر مولد شکل موج مستطیلی باشد ، این مدار بــرای مدولاسیون پهنای پالس مناسب خواهد بود . این تکنیکی است که هم برای حذف هارمونیکهــا و هم برای [ایجاد] ولتاژ بــر فرکانس ثابتی مورد استفاده قرار می‌گیرد . شکل ۳ ــ ۲۴ (الف) دیودهای پسخور اضافه‌شده

1- Tolerance

D_1 و D_2 را که برای اصلاح بارهای سلفی منظور شده‌اند نشان می‌دهد . موقعی که جریان نسبت به ولتاژ پسفاز است و تیریستور جا به جا شده باشد دیود برای جریان بار یک مسیر تناوبی ایجاد می‌کند . زیرا تیریستور تازه روشن شده مناسب نیست . اگر TH_1 خاموش شود ، جریان پسفاز از طریق سیم‌پیچی اولیه دست راستی ، منبع تغذیه و دیود D_1 عبور می‌کند . دیود D_2 در قسمتی از نیم سیکل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد . در نتیجه دیود اجازه می‌دهد انرژی راکتیو (واکنشی) [1] ، در طول قسمت آخرین نیم سیکل ، در سلف‌بار ذخیره‌شود و در طی اولین قسمت‌نیم‌سیکل بعدی به منبع‌تغذیه جریان مستقیم برگردد . دیودها همچنین قدرت واکنشی بار خازنی را به منبع تغذیه منتقل می‌کنند . اگر وظیفه وارونگر (معکوس‌کننده) عوض شود و در حالت انرژی واکنشی به صورت واگردانی با همان قطبهای مثبت و منفی وتنها با کمک دیودها مورداستفاده قرار گیرد ، شاید فهم موضوع ساده‌تر شود ؛ یعنی ،موقعی‌که ولتاژ معکوس دو سر تیریستور از ولتاژ منبع تغذیه زیادتر می‌شودجریان ازطریق دیودها عبورمی‌کند. علامت فرمان پیوسته‌ای روی دریچه تیریستور در حال هدایت ، برای بارهای سلفی (القایی) ضرورت خواهد داشت . دو دیود به منظور دستیابی به حداکثر بازده ، به انشعابهای روی ترانسفورماتور وارونگر (معکوس کننده) که در حدود ده درصد از انتهای سیم‌پیچی قراردارد ، اتصال می‌یابند (۶) . اگر دیودها به انتهای‌ترانسفورماتور وصل‌می‌شدند ، هیچ مقدار ازانرژی ذخیره شده در سلف L در مدت جابه‌جایی ، امکان برگشت به منبع تغذیه را پیدا نمی‌کرد .

شکل ۳ ــ ۲۴ (ب) اصولا شبیه وارونگر نوع (پ ۱) است که در آن ترتیب روشن شدن تیریستورهای TH_1 و TH_2 تعیین کننده فرکانس است . دو مدار دیگر شکل ۳ ــ ۲۴ (الف) وارونگرهای (معکوس کننده‌های) ولتاژ ثابت هستند ، با افزودن L_1 ، C_1 ، TH_3 و دو دیود D ولتاژ متوسط مدار اکنون می‌تواند یک پارامتر قابل تنظیم باشد . در هر نقطه‌ای از نیم سیکل اعمال علامت فرمان به تیریستور TH_3 تیریستورهای در حالت هدایت بار را بایاس معکوس و خاموش می‌کند و تیریستور TH_3 خود به خود پس از مدت زمان کوتاهی به علت مدار نوسان‌ــ کننده LC_1 خاموش می‌شود .

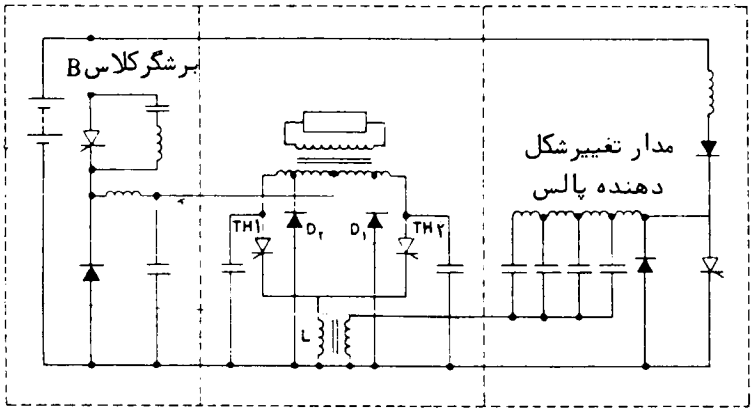
(۳) وارونگر کلاس ۴ برای موتور القایی سه فاز

وارونگر کلاس ۴ دارای شکل بندی پل مانند است و در شکل ۳ ــ ۱۸ نشان داده شده است .

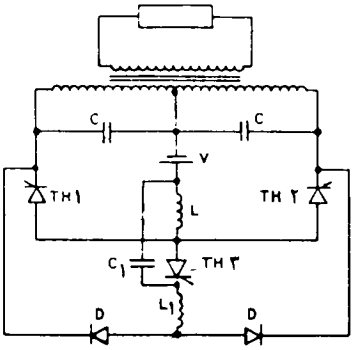
به طور ایده‌آل تیریستور یک‌کلیداست و دو وضعیت‌قطع و یا وصل دارد . اگر منبع‌تغذیه جریان مستقیم باشد و از گذراهای کلیدزنی خازن C و سلف مدار صرفنظر شود تیریستور واقع در خط در دو سر بار ولتار موج مستطیلی تولید خواهد کرد . برای بارهای سه فاز ، مثل موتور

1- Reactive power

برشگر کلاس A وارونگر نوع (پ ۱)



(الف) وارونگر عملی



(ب) وارونگر (پ ۱) با ولتاژ متغیر

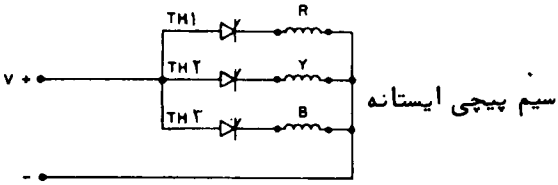
شکل ۳ ــ ۲۴

القایی ، که سیم‌پیچی‌های آن دارای ۱۲۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز فضایی هستند ، تولید ولتاژ سه فاز که ۱۲۰ درجه اختلاف فاز زمانی نسبت به هم ، توسط کلیدزنی با ترتیب معینی، به وجود آید ضرورت دارد . اصول و آرایش مقدماتی این چنین کلیدزنی و ولتارتولیدشده در شکل ۳ ــ ۲۵ و ۳ ــ ۲۶ نشان داده شده است .

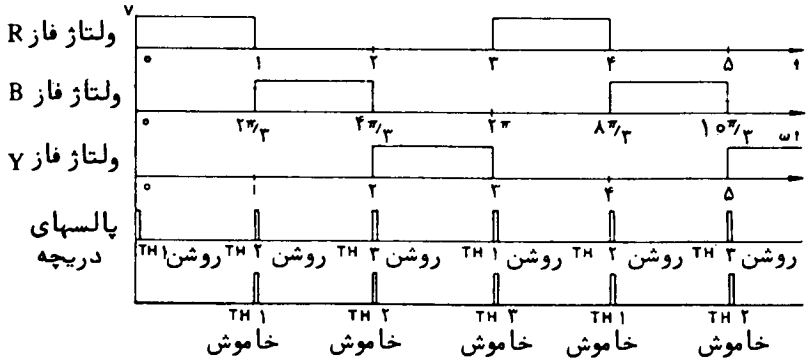
بافرمان دورهای تیریستورها ،باوجودویاعدم وجود درجات متفاوتی ازروی هم افتادگی[1]،منبع تغذیه شبه سه فازی[2] تولید می‌شود . ولتاژهای سیم‌پیچی با پالسهای فرمان تیریستورها برای حالت بدون روی هم افتادگی ولتاژ در شکل ۳ ــ ۲۶ نشان داده شده است .

1- Overlap

2- Quasi three-phase supply



شکل ۳ ــ ۲۵ وارونگر پل نیم موج

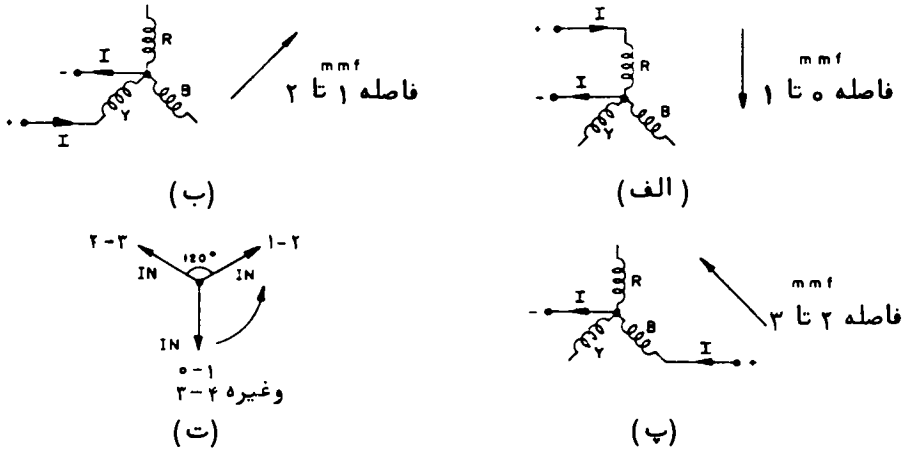


شکل ۳ ــ ۲۶ شکل مــوج ولتاژ بار و ترتیب فرمان تیریستورها

شکل۳ ــ ۲۷ رفتار نیروی‌محرکه‌مغناطیسی mmf موتور رادرفاصله هوایی به‌عنوان‌تابعی‌از زمان نشان می‌دهد . در فاصله زمانی صفر تا ۱ مطابق با شکل ۳ ــ ۲۶ جریــان تنها ازفاز R عبــور و نیــروی محرکه مغناطیسی طبق شکل ۳ ــ ۲۷ (الف) تولید می‌کند . در فاصله زمانی بعدی یعنی ۱ تا ۲ تنها فاز Y هدایت می‌کند و همان طوری که از شکل ۳ ــ ۲۷ (ب) پیداست نیروی محرکه مغناطیسی mmf ازنظر مقدار بدون تغییر ولی ازنظر جهت به اندازه ۱۲۰درجه الکتریکی تغییر جهت می‌دهد در طول فاصله زمانی ۲ تا ۳ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) دوباره به اندازه ۱۲۰ درجه دیگر تغییر مکان می‌دهد ، تا اینکه در فاصله زمانی ۳ تا ۴ موقعی که به جهت اولیه خودبرمی‌گردد به اندازه ۳۶۰ درجه الکتریکی‌یعنی‌یک سیکل کامل[درخلاف جهت عقربه‌های ساعت] چرخیده باشد . این نیروی محرکه مغناطیسی mmf پله‌ای یک‌فلوی مغناطیسی شبه چرخان[1] که برای کار موتور القایی لازم است تولید می‌کند .تغییر مقدارفواصل زمانی متوالی هدایت تیریستورها ، باعث تغییر فرکانس و در نتیجه تغییر سرعت‌موتور خواهد شد .

روشهای متعددی برای ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی چرخان و پله‌ای وجود دارد .مثلا عبور جریان ، توأما از فازهای R و B و سپس B و Y شکل ۳ ــ ۲۵ ، حداکثــر استفــاده را از

1- Quasi rotating

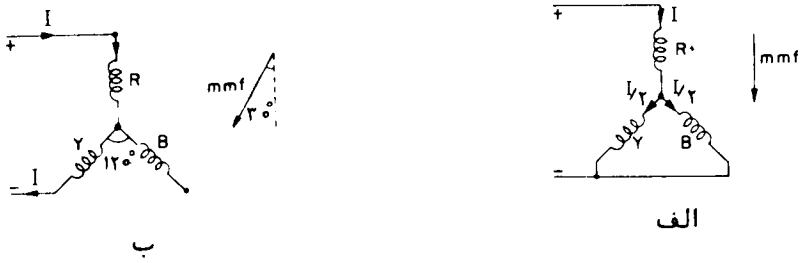


شکل ۳ ــ ۲۷ الگوی نیروی‌محرکه مغناطیسی mmf (الف) نیروی محرکه مغناطیسی درفاصله صفر تا ۱ (ب) نیروی محرکه مغناطیسی در فاصله ۱ تا ۲ (پ) نیروی‌محرکه مغناطیسی درفاصله ۲ تا ۳ (ت) ارتباط فازی نیروی محرکه مغناطیسی برای هرکدام از فاصله‌ها .

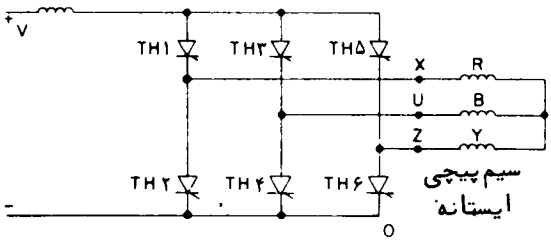
سیم‌پیچی‌ها می‌کند و با وجود اینکه "گام[1] "هنوز ۱۲۰ درجه است نیروی‌محرکه‌مغناطیسی mmf بالایی تولید می‌کند . در انتهای دیگر درجه‌بندی ، بدون اتصال ستاره و فقط با عبور جریان در دو جهت هریک ازسیم‌پیچها ، تولید یک اختلاف فازپله‌ای ۳۰ درجه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود . این مطلب ترتیب کلیدزنی جدیدی مثل $(+R)$، $(-B)$ ، و $(-Y)$ و به دنبال آن $(+R)$ و $(-Y)$، و غیره را طبق شکل ۳ ــ ۲۸ در بر خواهد داشت . مقدار هر یک از نیروهای محرکه مغناطیسی به اندازه ۳۰ درجه نوسان می‌کند . در نتیجه یک عدم تعادل به وجود می‌آید به منظور موثرترین استفاده از سیم‌پیچی‌ها و دستیابی به یک منبع تغذیه حتی‌المقدور نزدیک به سه فاز سینوسی ، می‌توان از پل سه فاز کامل تمام موج استفاده کرد ، چه در این صورت جریان در سیم‌پیچی‌ها قادر به نوسان است . شکل ۳ ــ ۲۹ آرایش عمومی مدار پل سه فاز تمام موج را بدون اشاره به مدار جابه‌جایی آن نشان می‌دهد . شکل ۳ ــ ۳۰ ولتاژهای سیم پیچی و شکل ۳ ــ ۳۱ نمایش نیروی محرکه مغناطیسی را برای ۶۰ درجه چرخش پله‌ای‌نشان‌می‌دهد .

شکل موج ولتاژ مستطیلی با وجود آنکه دو جهته است ، یک جریان پایدار ایده‌آل‌تولید می‌کند و بنابراین نیروی محرکه مغناطیسی mmf پله‌ای خواهد بود . با این حال تحلیل‌موج مذکور ، یک موج اصلی سینوسی با دامنه بزرگ به اضافه هارمونیکهای بالاتر با دامنه کوچکی را تولید می‌کند . این موج اصلی است که حاوی انرژی مفید برای انجام کار است و هارمونیکهای

1- Step



شکل ۳ ــ ۲۸ تغییر گام ۳۰ درجه نیروی محرکه مغناطیسی . (الف) جریان از طریق $+R \ -B \ -Y$ (ب) جریان از طریق $+R \ -Y$

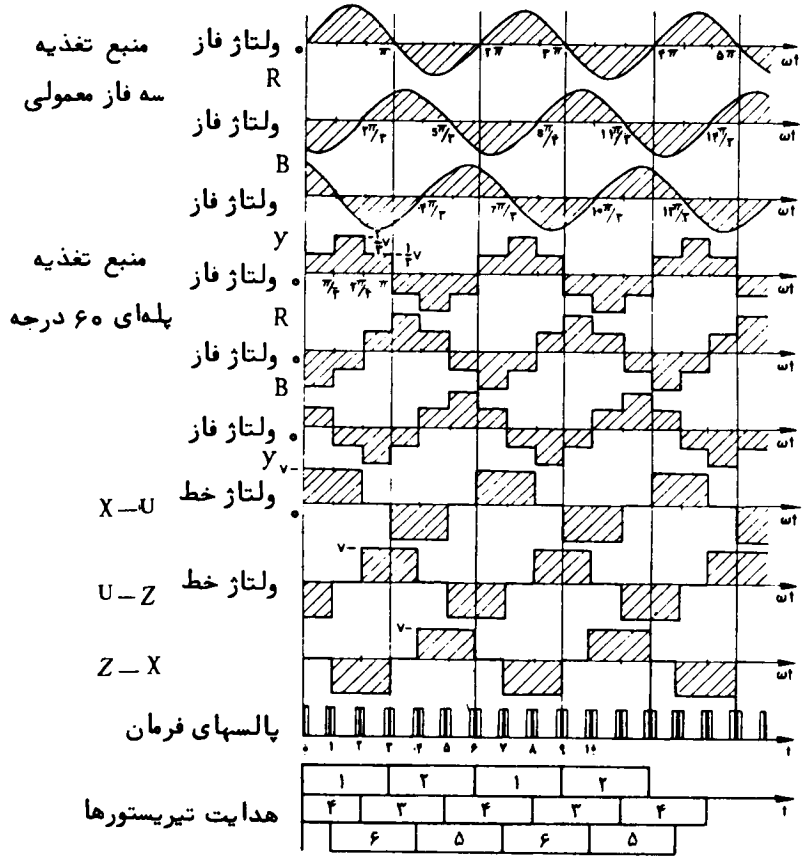


شکل ۳ ــ ۲۹ وارونگـر پل سه فاز کلاس ۴

بالاتر سبب بروز تلفات موتور می‌شوند . موج اصلی ، با صرفنظر کردن از هارمونیکهای بالاتر ، نیروی محرکه مغناطیسی mmf چرخشی با سرعت ثابتی در اطراف فاصله هوایی موتور تولید خواهد کرد ، که این سرعت تحت کنترل مدارهای تیریستوری است و آنها نیز بسته به اینکه چه میزان تنظیمی مورد نیاز باشد ، تحت یک کنترل برنامه‌ریزی شده برای سیستم مدار باز یا مدار بسته‌ای قرار دارند .

ولتاژهای خط موتور القایی نشان داده شده در شکل ۳ ــ ۳۰ مغایرت زیادی بـا شکل موج سینوسی ندارندوبه علت تقـارن نیم دورهای منفـی و مثبت ، هارمونیکهای زوج وجـود نخواهندداشت . همچنین به علت وجود ۶۰ درجه تأخیر فاز بین قسمتهای مثبت‌ومنفی امواج [ولتاژهای خط] هارمونیکهای سوم و مضارب آن نیـز وجود نخواهند داشت . بنابـراین تنها هارمونیکهای پنجم ، هفتم ،یازدهم‌وغیره در طیف این ولتاژها وجود خواهند داشت که‌سبب افزایش تلفات انرژی و ضرباناتی[1] روی گشتاور می‌شوند ، اگرچه هارمونیکهای یازدهم و بالاتـر از نظر دینامیکی روی گشتاور بی‌اثر هستند .

1- Ripple

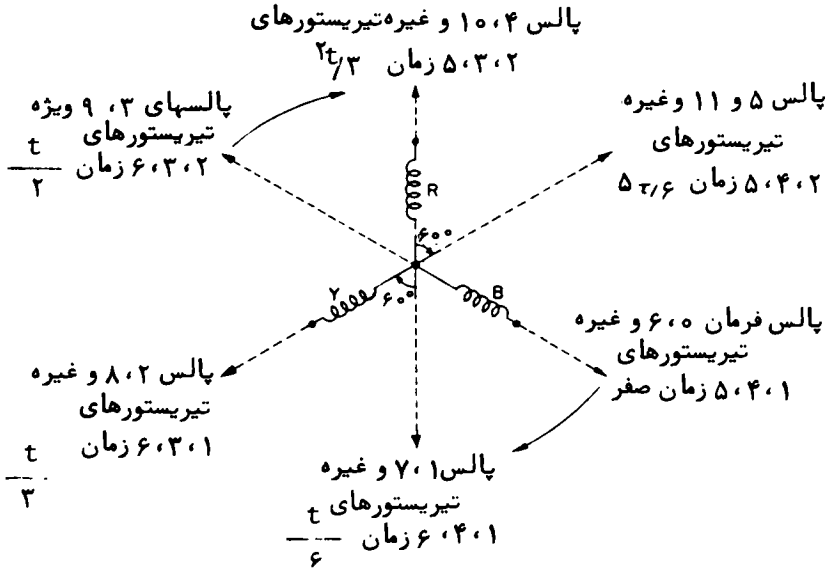


شکل ۳ ــ ۳۰ مثالــی در مورد یک مجموعه از شکل موجهای وارونگـر و دوره‌های هدایت آنـها

شکل ۳ ــ ۳۰ نشان می‌دهد که دوره هدایت و نیز دوره خاموشی هریک از تیریستورها برابر یک نیم سیکل کامل است . درعمل ،کلیدزنی پس از هر $\frac{1}{6}$ دوره[تناوب] اتفاق خواهد افتاد ؛ یعنی ، در شکل ۳ ــ ۲۹ کلیــد زنی اگر از تیریستور $TH1$ شروع شود ؛ تیریستورهای ۱ و ۴ و ۵ برای اولین $\frac{1}{6}$ دوره[تناوب] روشن می‌شوند و در انتهای این $\frac{1}{6}$ دوره[تناوب] ایــن تیریستورها خاموش می‌شوند . به محض اینکه یک ششم دوره اول کامل‌شد تیریستورهای ۱ و ۴ و ۶ روشن خواهند شد و آنها نیــز برای یک ششم دوره تنــاوب دیگر قبل از خاموشی و دادن جایشان به تیریستورهای ۱ و ۳ و ۶ و هدایت همه آنها ،روشن‌خواهند بود . به همین ترتیب کلیدزنی طبق شکل ۳ ــ ۳۱ کــه از نظر زمانی و آرایش فضایــی نشان داده شده است ادامه می‌یابد . در این شیوه هارمونیکهای پایین‌تر کمی کاهش پیدا می‌کنند .

این نوع جابه‌جایی اجباری که برای وارونگـر پل تمام موج شکل ۳ ــ ۲۹ انتخــاب شده

است می‌تواند تغییرات زیادی با توجه به شش نوع نشان داده در شکل ۳ ــ ۱۹ را تقبل کند. تاکنون بعضی از این تغییرات تشریح شده است و تغییرات جدید در قسمت بعدی ارائه خواهد شد.



شکل ۳ ــ ۳۱ محورهای گام نیروی محرکه مغناطیسی: نیروی محرکه مغناطیسی در فضانسبت به سیم‌پیچی‌ها و ترتیب کلیدزنی تیریستورها رسم شده‌اند. شش پله در فضا تغییر مکان داده شده است و زمان نیز با $\pi/3$ رادیان (یعنی ωt و θ). فرکانس $1/\tau$ است.

(پ) جابه‌جایی وارونگر

سه نوع مختلف جا به جایی در مورد کلاسهای (پ) و (ت) شکل ۳ ــ ۱۹ در سه قسمت زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت. این سه نوع مختلف جابه‌جایی در وارونگرها عبارتند از مک‌ماری[1] (مرجع ۷)، وارونگر اصلاح شده مک‌ماری ــ بدفورد[2] (مرجع ۸) و وارونگری با منبع تغذیه جابه‌جایی کمکی (مرجع ۹) مراحل طراحی و انتخاب عناصر L و C در مراجع اشاره شده، داده شده است.

(۱) وارونگر مک‌ماری

وارونگر مک ماری یک وارنگر جابه‌جایی ضربه‌ای[3] است که بر عملکرد مدار LC و تیریستور

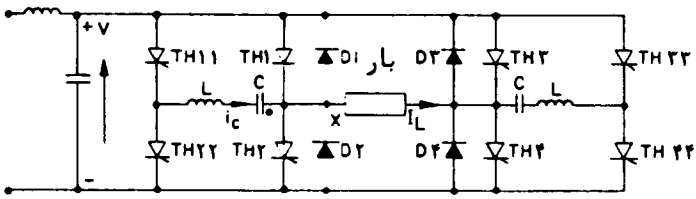
1- McMurray inverter 2- Improved McMurray-Bedford inverter

3- Impulse

کمکی در مدار بار تکیه می‌کند . ضربه از مدار تشدید LC حاصل ، و بـه دریچه تیریستوری کـه جریان بار را حمل می‌کند اعمال می‌شود ، تا آنرا خاموش کنـد . شکل ۳ ــ ۳۲ ، تنهـا مدار وارونگـر پل تکفاز را نشان می‌دهد .

در این مدار به تناوب تیریستورهای $TH1$ و $TH4$ سپس تیریستورهای $TH2$ و $TH3$ هدایت می‌کنند و جریان را از بار عبور می‌دهند . کلیهٔ عناصر اندیس دار دیگر به منظورفراهم‌کردن خاموشی موفقیت‌آمیز تیریستورها تعبیه شده‌اند و دیودها نیز در قسمتی‌ازهر نیم‌سیکل هدایت می‌کنند و قدرت را موقعی که بار سلفی است به منبع تغذیه برمی‌گردانند .

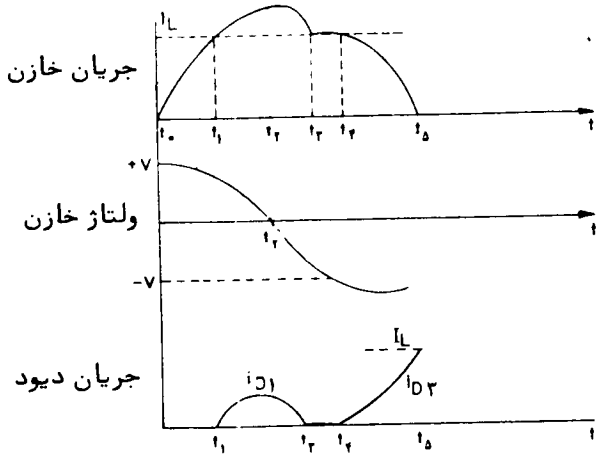
فرض می‌شودکه‌تیریستورهای $TH1$ و $TH4$ درحال هدایت هستندوخازن C قبلا (در محل علامت‌گذاری شده روی یکی از جوشنها) به مقدار $+V$ باردار شده است . شکل ۳ ــ ۳۳ عمـل مدارراپس‌ازروشن‌شدن $TH11$ برای‌شروع‌جابه‌جایی درلحظه t_0 نشان می‌دهد ، به محض روشن شدن‌تیریستور $TH11$ خازن C شروع به تخلیه می‌کند و باعث افزایش جریان i_c می‌شود ، تا در عبور جریان بار از تیریستور $TH1$ شرکت کند . در لحظهٔ t_1 جریان خازن شروع به پیشی گرفتن از جریان خازن می‌کند و امکان عبور جریان را از تیریستور $TH1$ به کمینه می‌رساند . درنتیجه اختلاف این دو جریان را دیود $D1$ عبور می‌دهد تاتیریستور $TH1$ بایاس‌معکوس وخاموش شود .



شکل ۳ ــ ۳۲ وارونگر جابه‌جایی ضربه‌ای با تیریستورهای کمکی

وجود سلف در بار به طور محسوسی جریان بار را در طول جابه‌جایی ثابت نگهمی‌داردو عبورجریان I_L را حتی‌پس از جابه‌جایی تیریستور $TH1$ تامین می‌کند . علاوه براین جریان‌خازن در زمان t_2 با تغییر قطبیت آن ضمن باردار شدن شروع‌به‌کاهش می‌کند ، عبورجریان از دیود $D1$ در زمان t_3 ؛ یعنی ، موقعی که بار دیگر جریان بار با جریان خازن یکسان می‌شود متوقف می‌شود . بار ، تازمانی‌که‌توسط دیود $D2$ درنقطه X به $-V$ محدودنشده[1] است‌جریان I_L رامتحمل می‌شود . انرژی ذخیره شده در سلف L به صورت بارهای اضافی متناسب با جریان بارعبوری از C ، L ، بار ، $D3$ ، و $TH11$ به خازن C انتقال خواهدیافت . اکنون تیریستورهای $TH2$ و $TH3$

1- Clamp



شکل ۳ ــ ۳۳ شکل موجهای جابه‌جایی

را می‌توان پس از صفر شدن جریان i_c و به صفر تنــزل کردن انرژی ذخیره شده در سلف بــار مصرفی روشن کرد . موقعی که جریان خازن کمتر از جریان بار شد دیــود $D2$ جریان اضافی را عبور می‌دهد و انرژی را به منبع تغذیه برمی‌گرداند . در این مدار افزایش بار الکتریکی خازن با جریان بار ، خود واقعیتی است که کمک قابل ملاحظه‌ای به جابه‌جایی خوب و مورد اطمینان می‌کند .

عیب این مدار وجود تغییرات شدید جریان dv/dt است که می‌تواند به تیریستور جابه‌جا ــ شده در موقع کاهش جریان بار ، از جریان خازن اعمال شود و دیــود $D1$ را مسدود و $D3$ را هادی کند تا اختلاف جریان [1] را تغذیه کند . اگر تغییرات dv/dt خیلی زیاد باشد بایستی مواظب بود و تیریستورها را محافظت کرد .

چندین[نوع] آرایش مدار ، که در آن معمولا بار را از طریق ترانسفورماتور تغذیه‌می‌کند، وارونگر چند فازی به دست می‌دهد .

مثال حل‌شده ۳ ــ ۲ یک مدار جابه‌جایی برای وارونگر مک‌ماری طرح کنید ، که موتورالقایی سه فازی با این مشخصات را تامین کند :

$\frac{1}{2}$ اسب بخار ، ۶۰ هرتز ، ۲۰۸ ــ ۳۶۰ ولت ، ۱۸۰۰ دور در دقیقه و جریان ۲/۳۳ ــ ۱/۳۴

1- Deficiency in current

آمپر تیریستورهای موجود دارای ولتاژ شکست مستقیم ۴۰۰ ولت هستند .

سه فاز ایستانه موتور القایی به منظور کار با ولتاژ ۲۰۸ ولت ، منبع تغذیه سه فاز و تیریستورهای ولتاژ اسمی پایین ، بایستی به صورت مثلث بسته شوند . تیریستورهای موردلزوم برای وارونگرها به‌علت فرکانس کلیدزنی بایستی‌دارای زمان‌خاموشی کم باشند .تیریستورهای سریع خاموش شونده احتیاجات مدار جابه‌جایی را نیز کاهش می‌دهند . زمان خاموشی مناسب برای وارونگرها ۱۲ میکروثانیه است .

تیریستوری باجریان ۷/۴ آمپر برای راه‌اندازی در خط[1] ،موتور القایی کافی نخواهد بود بنابراین راه‌اندازی ولتاژ کم به‌منظور فراهم‌کردن شتاب جریان محدود شده[2] به‌این‌معنی‌است که استفاده از تیریستورهای ارزان قیمت و جریان‌کم‌که به سادگی‌در دسترس هستندمقدوراست.

دیودهای با موارد مصرف عمومی ۱۲ آمپر ۴۰۰ ولتی را می‌توان برای پل پسخور مورد استفاده قرار داد . میزان جریان این دیودها بایستی بیشتر از تیریستورها باشد .تحت شرایط بی‌باری دیودها بایستی جریان پیک جابه‌جایی را که از جریان بیشینه بار بیشتر است از خود عبور دهند .

چون تیریستورهای ارزان‌قیمت انتخاب‌می‌شوند ، بایستی‌فیوزهای‌حفاظتی‌آنهانیزارزان‌ـ قیمت باشند . بنابراین فیوزهای تندکار مورد لزوم نخواهند بود . اگرجریان‌به‌حدود دو برابر جریان اسمی ، یعنی به ۵ آمپر محدود شود ، در این صورت‌فیوزهای‌کندکار را می‌توان انتخاب کرد . چون میزان جریان اسمی فیوزها تا ۷۰ درصد جریان تیریستورهاست ، در نتیجه مقدار منهدم‌سازی حرارتی[3] (i^2t اسمی) آن بایستی کمتر از تیریستور (۴۰ A^2s) باشد .

سلف و خازن جابه‌جایی شکل ضربه جابه‌جایی را تعیین‌خواهندکرد .جریان‌ضربه بایستی ازجریان بیشینه در دوره‌ای‌بیشتراز زمان خاموشی‌تیریستور ، تجاوز کند . مقدار انرژی کمینه* موقعی که جریان جابه‌جایی پیک ۱/۵ برابر جریان بار بیشینه طرح شود ، به دست می‌آید . یعنی ، اینکه ۷/۵ آمپر ارتفاع پیک ،بهینه ضربه جابه‌جایی‌برای این‌وارونگر است . مقدارخازن جابه‌جایی طبق رابطه زیر برابر است با :

$$C = ۰/۸۹۳ \frac{I_L t_۰}{E_c} \text{ F.}$$ فاراد

که در آن :

I_L حداکثر جریان بار طرح شده

$t_۰$ مدت زمان جابه‌جایی لازم برای بایاس معکوس تیریستور

E_c مقدار ولتاژ منبع تغذیه کمینه

1- On-line starting

2- Current-limited acceleration

3- Thermal destrative

* رجوع شود به قسمت (۷ ــ ۱) مرجع شماره ۶

مقدار ولتاژ منبع تغذیه کمینه ممکن است ۲ ولت باشد که برای کمتر از این مقدار کار موتور توام با شک و تردید خواهد بود . برای اطمینان از جابه‌جایی قابل اعتماد زمان t_0 را می‌توان ۲۰ میکروثانیه انتخاب کرد که در نتیجه:

$$C = ۰/۸۹۳ \times \frac{۵ \times ۲۰ \times ۱۰^{-۶}}{۲} = ۴/۴۶$$ میکروفاراد

برای اطمینان از جابه‌جایی یک خازن ۱۰ میکروفارادی انتخاب می‌شود .
مقدار سلف مطابق با آن عبارت است از:

$$L = ۰/۳۹۷ \frac{E_c t_0}{I_L}$$ هانری

$$= ۳۱/۷۶$$ میکروهانری

در مقادیر محاسبه شده مقدار تلفات به حساب نیامده است .

یک شبکه ساده RC در دو سر هر تیریستور به علت وجود تغییرات شدید dv/dt بلافاصله پس از جابه‌جایی در دو سر تیریستور ضرورت خواهد داشت . مقادیر ۲۲۰ اهم و ۵/۱ میکروفاراد مقادیر معمول هستند . ولتاژ بیشینه منبع تغذیه جریان مستقیم به دو سر یک تیریستور اعمال می‌شود که این ولتاژ از دامنه مولفه اصلی موج مربعی خروجی وارونگر به دست می‌آید؛ یعنی،

$$E_{max} = \frac{۲\sqrt{۳}}{\pi}(۲۰۸ \times \sqrt{۲}) \simeq ۲۶۰$$ ولت

این مقدار بدترین حالت زمان صعود را طبق رابطه زیر تعیین می‌کند:

$$\frac{E_{max}}{RC} = \frac{۲۶۰}{۲۲۰ \times ۰/۱ \times ۱۰^{-۶}} = ۱۲$$ ولت بر میکروثانیه

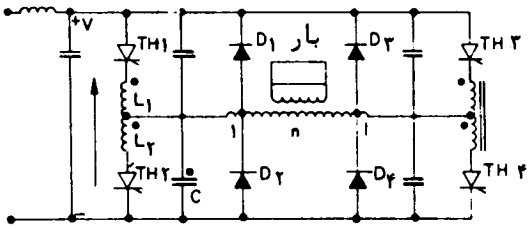
در مورد مدارهای منطقی[1] کنترل که به منظور ایجاد علائم متوالی دریچه‌تیریستورها و حفاظت از آنها به‌کارمی‌روند (به ضمیمه ۱ مراجعه شود) .

(۲) وارونگر مک‌ماری ـ بدفورد

مدار شکل ۳ ـ ۲۳ به تعداد زیادی تیریستور احتیاج دارد . اگر از شکل (پ) ، جا به جایی

1- Logic

استفاده شود تعداد تیریستورهای مورد نیاز را می‌توان به چهار عدد برای پل تک فاز و تنها شش عدد برای وارونگر سه فاز تقلیل داد . که آن در حقیقت دارای یک تیریستور بار مکمل برای خاموش کردن تیریستورهای در حال هدایت ، درست مثل وارونگر موازی شکل ۳ ــ ۲۰ است . این نوع وارونگر دارای دوبازوی کاملا مستقل از یکدیگر طبق شکل ۳ ــ ۲۴ است . به طور اختصار با روشن شدن تیریستورهای $TH1$ و $TH4$ خازن C در محل علامت‌گذاری شده به طور مثبت باردار می‌شود . روشن شدن تیریستور $TH2$ باعث کاهش ولتاژ L_2 در آند $TH2$ به مقدار صفر ولت می‌شود . ولی به علت اینکه خازن C حاوی ولتاژ V ولت است ، لذا ولتاژ دو سر سلف L_2 دارای V ولت در نقطه علامت‌گذاری شده خواهد بود که این برای نشان دادن استقلال ذکرشده کافی است . اگربین L_1 و L_2 جفت‌شدگی[1] کاملی وجود داشته باشد و از هر نظر با هم برابر باشند ولتاژ V توسط عمل تبدیل به سلف L_1 القا شده و ولتاژ V ۲ به علت وجود V در محل اتصال L_1 و L_2 در نقطه علامت‌دار ایجاد می‌شود ،و تیریستور $TH1$ گرایش معکوس می‌یابد و خاموش می‌شود . اما انرژی ذخیره شده در سلف L_1 که مربوط به عمل القای ولتاژ در



شکل ۳ ــ ۳۴ وارونگر جابه‌جایی ضربه‌ای مکمل مک‌ماری ــ بدفورد

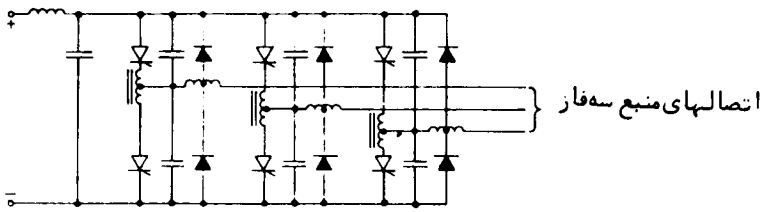
طی جابه‌جایی است چه خواهد شد؟ این انرژی توسط دیودهای اتصال‌یافته به محل‌های اتصال (انشعاب) سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور پسخور (تغذیه برگشت) می‌شود .

در مدت جابه‌جایی ، سلف بار جریان ثابتی را که از خازن تغذیه می‌شود نگهداری می‌کند ، خازن C همچنین جریان را در L_2 و $TH2$ تامین می‌کند و موقعی که ولتاژ دو سر L_2 صفر است ، مقدار جریان بیشینه خواهد بود . موقعی که نقطه انشعاب ترانسفورماتور به شین[2] منفی ولتاژ(OV)می‌رسد ، دیود $D2$ حامل جریان L_2 است و به‌جای‌اینکه این انرژی به تله بیفتد از طریق دیودها و طی عمل اتوترانسفورماتوری انرژی انتقالی به منبع پسخور می‌شود . چون دیود $D2$ ولتاژ سیم‌پیچی اولیه اصلی را ، پس از تقلیل انرژی ذخیره شده در L_2 به‌صفر ،

1- Coupling 2- Bus

به OV محدود می‌کند ؛ دیود D_2 به هدایت ادامه می‌دهد و عبور جریان بار نیز به‌علت‌خود-القای (سلف) خیلی زیاد ادامه پیدا می‌کند تا این انرژی از طریق دیود D_3 به منبع تغذیه برگردد . در طی مدت اخیر ولتاژ القایی در قسمت انتهایی سیم‌پیچی ترانسفورماتوربه صورت ولتاژ بایاس معکوس در دو سرتیریستور TH_2 ظاهر می‌شود و آنرا خاموش می‌کندو این تیریستور همان طور باقی می‌ماند مگر اینکه علامت دریچه آن یک سری پالس باشد .

عمل تخلیه خازن C نمایانگر رفتار هر یک از چهار و یا هر تیریستوری است که برای خاموش شدن به کار می‌رود . تیریستورهای TH_1 و TH_2 مکمل یکدیگرند ؛ یعنی یکی ، دیگری‌را خاموش می‌کند . و تیریستورهای TH_3 و TH_4 نیز مکمل یکدیگر هستند .



شکل ۳ ــ ۳۵ وارونگر مک ماری ــ بدفورد سه فاز

شکل ۳ ــ ۳۵ مدار وارونگر سه فاز مک ماری ــ بدفورد را نشان می‌دهدکه این‌مدارداراى محدودیتهایی از نظر ولتاژ خروجی متغیر است .

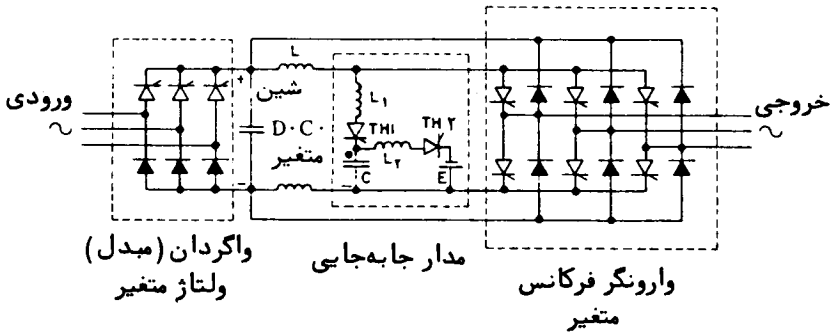
(۳) منبع تغذیه جابه‌جاکن کمکی

اگر ولتاژ شین جریان مستقیم تغییر پیدا کند و برای مشخصه ولتاژ ــ فرکانس وارونگر مورد نظر مناسب شود ، در این صورت ممکن است جابه‌جایی تیریستورها غیرقابل‌اعتمادشود . در ولتاژهای کم و جریانهای زیاد خازنها نمی‌توانند انرژی کافی از شین‌جریان‌مستقیم بگیرند تا در موقع لزوم فعالانه با عبور بارهای الکتریکی از طریق تیریستور مقابله کنند . به کمک یک منبع تغذیه کمکی‌می‌توان براین‌شکل فایق آمد . شکل ۳ ــ ۳۶ چنین سیستمی را نشان‌می‌دهد .

مبدل نشان داده شده در شکل ، قابل کنترل است و یک منبع ولتاژ متغیر جریان‌مستقیم برای تغذیه وارونگر مهیا می‌سازد و به علت وجود دیودهای چرخش‌آزاد در وارونگر سه فاز انرژی واکنشی بار می‌تواند به شین جریان مستقیم برگشت داده شود . این‌جابایستی‌دقت‌کرد که اگر وارونگری که انرژی واکنشی را به منبع تغذیه جریان متناوب برمی‌گرداند موجود نباشدو

همچنیــن اگر روی شین‌های جریان مستقیم ، مصرف کننده دیگری (برای جذب این انــرژی) وجود نداشته باشند ، لازم است وسایل ذخیره ساز انرژی به مدار اضافه شود . به همین منظور مطابق شکل خازن بزرگ بین شینهای جریان مستقیم متصل شده است .

طرز کار مدار جابه‌جا کننده به ترتیب زیر است . بعد از اولیــن جا بــه جایی به وسیله تیریستور $TH1$ که‌هنوزدرحال هدایت است ، خازن C تا ولتاژ کمی بیشتر از ولتاژ منبع جریان مستقیم (مثلا V_1 ولت) ، به طوری که جوشن نقطه‌دار مثبت‌است ،باردار می‌شود . باردارشدن خازن به اندازه ولتاژ V_1 مربوط به‌انرژی‌ذخیره شده درسلف است . تیریستور $TH1$ به طورطبیعی پس از راه‌اندازی تیریستور $TH2$ خاموش‌می‌شود . پس از یک نیم سیکل تشدید L_2C ، خازن به مقدار V_1+E باردارمی‌شود به طوری که علامت ولتاژ آن در سمت جوشن نقطه‌دارمنفی‌می‌شود . این ولتاژ به طور طبیعی باعث خاموشی تیریستور $TH2$ می‌شود .



شکل ۳ ــ ۳۶ جابه‌جایی توسط منبع تغذیه کمکی

حال تمام سیستم برای فاصله (زمانی) جابه‌جایی بعدی آماده است . دو یا سه عدد از تیریستورهای وارونگر در حال هدایت خواهند بود . در زمان معینی علایم دریچه آنها به‌صفر تقلیل یافته و تیریستور $TH1$ راه اندازی می‌شود ، خازن C خالی می‌شود . قطبیت شین جریان مستقیم به طور لحظه‌ای معکوس می‌شود و تیریستورهای وارونگر خاموش می‌شوند جریان‌واکنشی (سلفی) در بار مصرفی برای پسخور کردن (تغذیه برگشت) انــرژی به شیــن جریان مستقیم ، دارای مسیری از طریق دیودهاست و سیکل جابه‌جایی با باردار شدن مجدد خازن C ،به‌طور مثبت در جوشن نقطه‌دار ، شروع می‌شود .

برای ولتاژ کمکی E باید مصالحه‌ای‌به عمل آید یا مدار کنار گذرای[1] اضافه شود .به‌عبارت

1- By-Pass

دیگر ، در فرکانسهای بالا ، موقعی که ولتاژ شین جریان مستقیم برای جابه‌جایی کافی است ، ولتاژ خازن به مراتب بالا خواهد بود .

(ت) متناسب بودن ولتاژ با فرکانس

کار موتور در بالاترین چگالی فلوی مغناطیسی مناسب ، تحت شرایط مختلف بار و سرعت مثمر ثمرترین بهره‌برداری از موتور القایی را امکان‌پذیر می‌سازد . این به این معنی است که موتور با چگالی فلوی مغناطیسی ثابتی در محلی نزدیک به زانوی منحنی مغناطیسی کار کند . رابطه ۳ ــ ۵ نشان‌داد که برای رسیدن‌به فلوی مغناطیسی‌ثابت ، بایستی ولتاژ مستقیما متناسب با فرکانس باشد . روش ثابت نگهداشتن فلوی مغناطیسی کل ، موقعی که سرعت قابل تنظیم است ، می‌تواند با استفاده از قانون القا فاراده مشاهده شود :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

با ترتیبی دوباره می‌توان نوشت :

$$|\Phi| = \int e dt. \qquad (۴۴ - ۳)$$

سطح هاشور خورده روی شکل ۳ ــ ۳۷ که شکل موج ولتاژ است معرف $\int e dt$ ؛ یعنی ، همان فلوی مغناطیسی کل خواهد بود . در نتیجه بدون توجه به اینکه فرکانس چقدر باشد ، تا زمانی که می‌توان مساحت زیر منحنی ولتاژ مولفه اصلی را ثابت نگهداشت موتور القایی قادر به کار در شرایط گشتاور بهینهٔ خود خواهد بود ، و این به معنی ثابت‌ماندن‌نسبت ولتاژ بردور درثانیه است .

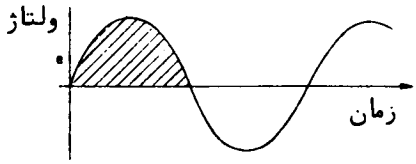
تغییر مستقل دو عامل به منظور رسیدن به سرعت قابل کنترلی که موثر باشد ، یک عیب اضافی به همراه می‌آورد . برای موتورهای‌کوچک ویا برای مواقعی که گستره تغییر سرعت‌محدود باشد این روش مقرون‌به صرفه نیست ولی‌در محرکهای بزرگ[در گستره سرعتهای وسیع] تغییر ولتاژ مطابق با فرکانس ضروری و الزامی است .

زمانی به علت ضرورت کاربرد یک محرک (موتور) اولیه سرعت‌متغیر برای به‌حرکت‌در ــ آوردن آلترناتور[1] (تناوب‌ساز) به منظورتغییرفرکانس ، از فرکانس به‌عنوان یک عامل‌تغییرپذیر به ندرت استفاده می‌شد . میدان این آلترناتور (تناوب‌ساز) طوری تنظیم‌می‌شدکه دامنه ولتاژ مناسبی تهیه می‌کرد . این سیستم تغییر فرکانس حجیم‌وهمراه با تعمیر ونگهداری مورد لزومش فقط در کشتی‌ها قابل کاربرد بود . ولی اکنون جایگزینی موتور محرک و (تناوب‌ساز) آلترناتور

1- Alternator

همراه با عناصر نیمه‌هادی قدرت ، این روش را برای گستره وسیع و زیادی از کاربردها مخصوصا برای خودروها و قطارها مناسب کرده است .

سه روش مختلف برای تهیه ولتاژ متناسب با فرکانس وجود دارد . خروجی وارونگر می‌تواند ترانسفورماتوری را ،که نسبت‌تبدیل متغیری‌دارد و خروجی‌اش به موتوری (بمنزله بار) وصل است ، تغذیه کند . ولتاژ ورودی وارونگر می‌تواند همان پارامتر کنترل باشد و سرانجام ولتاژ حاصل شده در خروجی وارونگر می‌تواند با اتخاذ مدوله سازی پالسی دارای مشخصه‌های دلخواه شود .



شکل ۳ ــ ۳۷ ولتاژ اعمال شده سینوسی

(۱) ترانسفورماتور با نسبت تبدیل متغیر

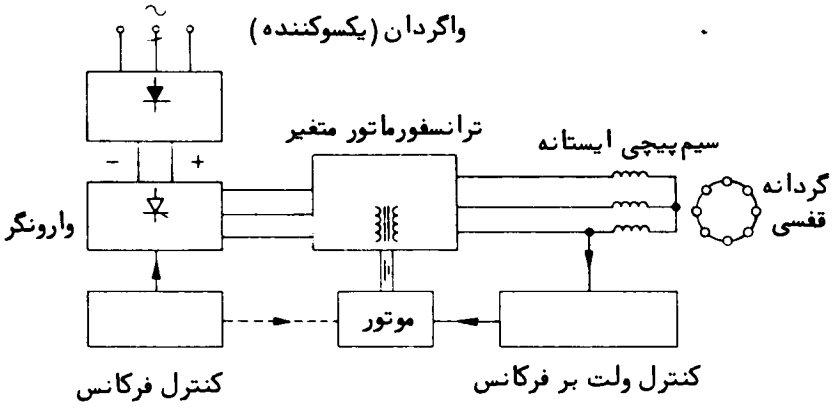
شکل ۳ ــ ۳۸ یک سیستم معمولی و قابل اعتمادی ارائه می‌دهد . ولتاژ جریان متناوب به توسط یکسوکننده بدون کنترلی که وارونگر را تغذیه می‌کند ، به ولتاژ ثابت جریان مستقیمی تبدیل می‌شود . خروجی وارونگر در حالت مدار باز دارای ولتاژ ثابت و فرکانس متغیر است . همچنین ترانسفورماتور کاهنده[1] متغیری‌که مدار پسخور بسته‌ای‌داردتوسط موتوری‌که‌انشعابهای ترانسفورماتور را تغییر می‌دهد عمل تطبیق ولتاژ بافرکانس را امکان‌پذیر می‌سازد . مدارکنترل فرکانس نیز برای موتور علامت ایجاد می‌کند .

این روش یک‌راه‌حل ساده‌ای است‌که به‌علت استفاده از انشعاب‌تعویض کن الکترومکانیکی دارای پاسخ آرامی است . ولی از لحاظ‌اقتصادی قیمت ترانسفورماتوربه‌عنوان‌یک وسیله اضافی زیادی است . مزیت کاربرد ترانسفورماتور کاهنده ، ظرفیت‌آن‌برای‌تبادل‌جریانهای راه‌اندازی زیاد است . اگر به‌جای موتور از انشعاب‌تعویض‌کن تیریستوری استفاده شود طبق شکل ۳ ــ ۶ می‌توان پاسخ مدار را سریع‌تر کرد که در نتیجه آن هزینه سیستم باز هم بیشتر می‌شود .

(۲) واگردان ولتاژ متغیر

مناسبترین محل برای تشریح جزئیات واگردانهای ولتاژ متغیر قسمت کنترل موتورهای

1- Stepdown



شکل ۳ ــ ۳۸ کنترل ولتاژ با ترانسفورماتور

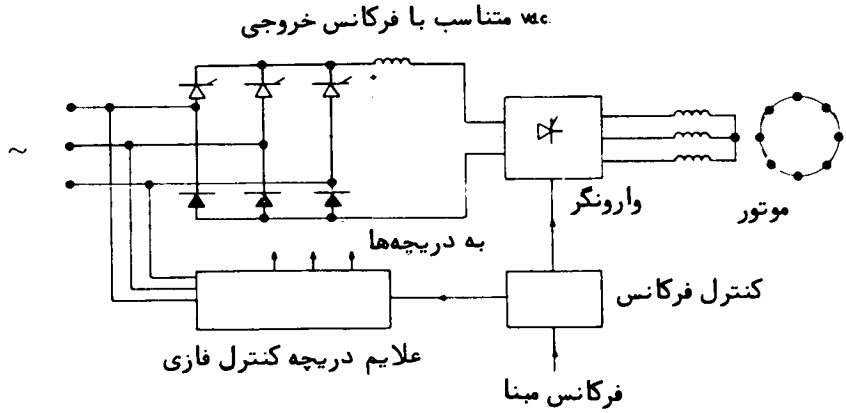
جریان مستقیم است . ولی به طور خلاصه در شکل ۳ ــ ۳۹ یک نمونه عمومی‌ازاین واگردانها معرفی می‌شود . با استفاده از واگردان‌یکسوکننده قابل کنترل توسط کنترل فازی ،می‌توان‌ولتاژ جریان مستقیم خروجی متناسب با فرکانس تهیه کرد ، واین به طور خودکار بـه متناسب شدن ولتاژ موتور القایی با فرکانس منجر می‌شود .

کاربرد تیریستورها به جای دیودها در یکسوکننده ، باعث افزایش قیمت می‌شود اما عیب اصلی در این روش مشکل تهیه جابه‌جایی قابل اطمینان در وارونگر برای ولتـاژهای ورودی با ردیف تغییرات وسیع است . در ولتاژهای پاییـن ، خازن برای این کـه انرژی کافی به منظور جابه‌جایی ذخیره کند بایستی بزرگ باشد مگر اینکه منبع ولتاژ کمکی‌جهت‌باردارکردن خازنها موجود باشد (مرجع ۱۰) .

(۳) کنترل ولتاژ وارونگر

یکسو کننده بـدون کنترل معمولی برای تهیـه ولتاژ جریان مستقیـم ثابتی به عنـوان ورودی وارونگر مورد استفاده قرار می‌گیرد . دراین‌حالت احتیاجی‌به ترانسفورماتور متغیربین خروجی وارونگر و موتور نخواهد بود . ولتاژ خروجی وارونگـر متناسب با فـرکانس را ، می‌توان توسط مدارهای کلید زنی کنترل دریچه‌ای به دست آورد . دقیق‌تر خواهد بود اگر بگوئیم که ولت‌بر سیکل در ثانیه $V c^{-1} s^{-1}$ یا Vs بدون توجه به مقدار فرکانس ثابت می‌ماند .

در رابطه (۳ ــ ۴۴) نشان داده شد که برای ثابت ماندن فلوی مغناطیسی بایستی سطح زیر منحنی ولتاژ درهرنیم‌سیکل ثابت بماند . در ساده‌ترین حالتی که وارونگر از ورودی‌جریان مستقیم‌ثابتی‌موج مربعی‌تولیدمی‌کند ،دامنه‌ثابت‌باقی‌می‌ماند . نکته‌اصلی‌آن‌است‌که مدت زمانی



شکل ۳ـ۳۹ واگردان ولتاژ متغیر

که‌درطول یک نیم سیکل در خروجی ولتاژ وجود دارد ، کاملا منطبق با کنترل مدارهای کنترلی برای راه‌اندازی تیریستور است . به این منظور برای ثابت بودن فلوی مغناطیسی بایستی دامنه ولتاژ و پهنای پالس ثابت بماند . شکل ۳ ــ ۴۰ مدولــه کردن پالس رابرای‌سه فرکانس‌مختلف نشان می‌دهد که در هر یک ولتاژ V برای یک زمان معینی درهرنیم‌سیکل فلوی‌مغناطیسی‌ثابتی تولید می‌کند ؛ یعنی :

$$\int_{0}^{\tau/a} V\mathrm{d}t = VT = \phi = \text{ثابت} \qquad (۴۵-۳)$$

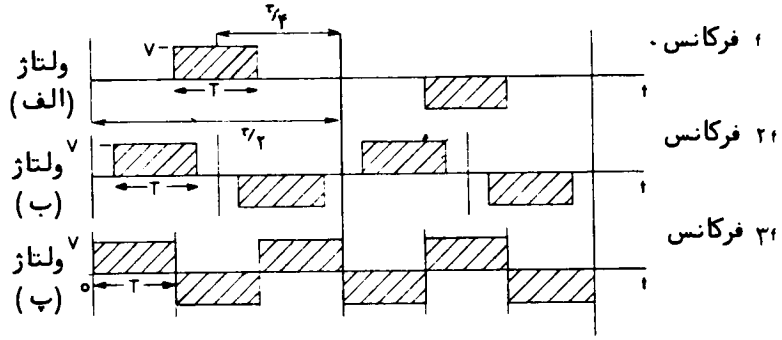
بالاترین فرکانس ممکن موقعی است که فرکانس برابر با :

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2T} \qquad (۴۶-۳)$$

باشد که در آن T طول پالس است که در شکل ۳ ــ ۴۰ (پ) مشاهده می‌شود .

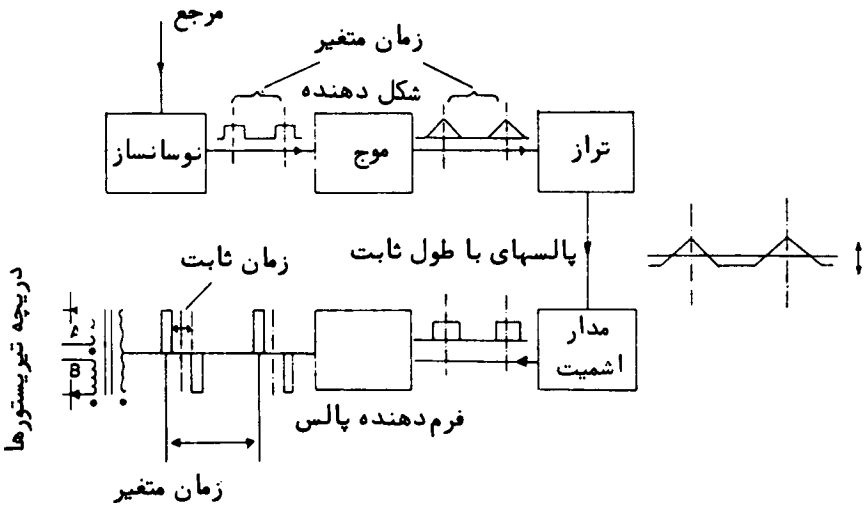
پاسخگویی به دو سؤال لازم است ، یکی هارمونیکهای موجود در چنین شکل موجی‌کدام است ؟ و دیگری نحوه تولید چنین موجی از وارونگر چگونه است ؟

نوسانساز‌فرکانس‌قابل‌تنظیمی‌به‌عنوان‌مبنابرای راه‌اندازی تیریستورها دریک‌ترتیب صحیح وجود خواهدداشت .همین‌نوسانساز ،به‌عنوان‌علامت‌دهنده‌ای که ثابت ماندن طول‌موج V شکل را مجاز می‌سازد و آن را طبق شکل ۳ ــ ۴۰ (الف) به طور متقارن عرضه می‌کند قابل استفاده است . شکل ۳ ــ ۴۱ نمودار بندالی این چنین سیستمی را نشان می‌دهد . موج مثلثی شکل



شکل ۳ ــ ۴۰ فلـوی مغناطیسی ثابت با مدولاسیون پالس

دارای مقدار پیکی در نقطه وسط نیم سیکل است . ولتاژ تراز[1] جریان مستقیم اجازه می‌دهدکه در یک زمـان معینی در دو طرف راس مثلث ، ولتاژ در تراز ثابتی به وجود آید تا مدار فرمان اشمیت به ازای این مقادیـر روشن و خاموش شود پالسهایی با طول ثابت ولی فـرکانس متغیر تولید کند . پالسهای تولید شده در A و B ، تیریستور مشابهی را روشن و خاموش می‌کند تا پالس با استمرار ثابتی در هر فرکانس ایجاد کند .



شکل ۳ ــ ۴۱ نمـودار بندالی راه‌انداز تیریستوری که ولتاژی با فرکانس متغیر و با زمان‌ثابت تولید می‌کند .

1- Level

اگر محورهای افقی شکل ۳ ــ ۴۰ بر حسب رادیان باشند ، شکل ۳ ــ ۴۲ نشان دهنده شکل موج عمومی پالسهایی است که تولید می‌شوند . شکل موج مربعی را می‌توان با سری فوریه به شکل زیر تجزیه کرد .

$$v(\omega t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \cdots + a_n \cos n\omega t + \cdots$$
$$+ b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \cdots + b_n \sin n\omega t + \cdots \qquad (۴۷ - ۳)$$

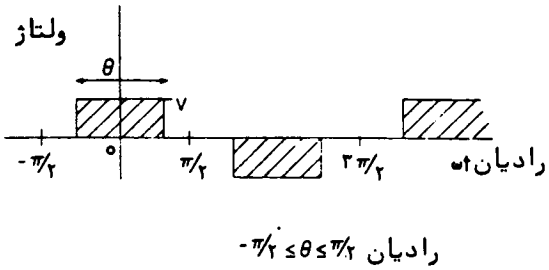
که در آن ضرایب عبارتند از :

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} v(\omega t) \cos n\omega t \, d(\omega t) \qquad (۴۸ - ۳)$$

و

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} v(\omega t) \sin n\omega t \, d(\omega t) \qquad (۴۹ - ۳)$$

که $n = ۱ ، ۲ ، ۳ ، ۴ ، ۵ ، \ldots$ معرف هارمونیکهای موج هستند .



شکل ۳ ــ ۴۲ شکل موج خروجی وارونگر

شکل موج نشان داده شده در شکل ۳ ــ ۴۲ یک تابع زوج است . و در نتیجه :

$$b_n = ۰ \qquad (۵۰ - ۳)$$

شکل موج نسبت به محور افقی متقارن است . لذا ترازجریان مستقیم وجود نخواهد داشت؛ یعنی :

$$a_۰ = ۰ \qquad (۵۱ - ۳)$$

و چون شکل موج نسبت به هرنیم سیکل تقارن دارد ، هارمونیکهای زوج نیزوجودنخواهند

داشت؛ یعنی:

$$a_2 = a_4 = a_6 = \cdots = 0. \qquad (۳-۵۲)$$

مضافا رابطه زیر برای شکل موج فوق وجود دارد:

$$v(\omega t) = V \quad \text{برای} \quad -\frac{\theta}{2} \leqslant \omega t \leqslant \frac{\theta}{2} \qquad (۳-۵۳)$$

و

$$v(\omega t) = 0 \quad \text{برای} \quad \frac{\theta}{2} \leqslant \omega t \leqslant \left(\pi - \frac{\theta}{2}\right). \qquad (۳-۵۴)$$

بنابراین

$$a_n = \frac{4V}{\pi} \int_0^{\theta/2} \cos n\omega t \, d(\omega t) \qquad (۳-۵۵)$$

و در نتیجه

$$v(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi} \left(\sin \frac{n\theta}{2}\right) (\cos n\omega t) \qquad (۳-۵۶)$$

اگر $4V/\pi$ برای یک سیستم در واحد، ولتاژ مبنا باشد در نتیجه شکل ۳ــ۴۳ نشان‌دهنده تغییرات هارمونیک به صورت‌نسبتی‌از مولفه اصلی[1] [به مولفه‌های‌دیگر] برای یک‌مقدار معین از θ خواهد بود. این منحنی ها اهمیت نسبی هارمونیکها را بـرای تغییرات θ نشان می‌دهند.

گرچه اصل ایجاد فلوی مغناطیسی ثابت، سهل است؛ ولـی روشهای حذف هارمونیکها مخصوصا در قدرتهای پایین احتیاج به بررسی دقیق دارد. سیستمی نسبت به سیستم دیگر از نظر کاربرد ارجحیت دارد که از لحاظ قیمت‌وکارکرد ارزانتروقابل‌اعتمادترباشد. پرهارمونی‌بودن به‌معنی‌پربازده‌بودن نیست. لذا روشهای‌متعددی‌برای حل این‌مشکل‌وحذف‌هارمونیکها، و در نتیجه از بین بردن تلفات آنها، وجود دارد.

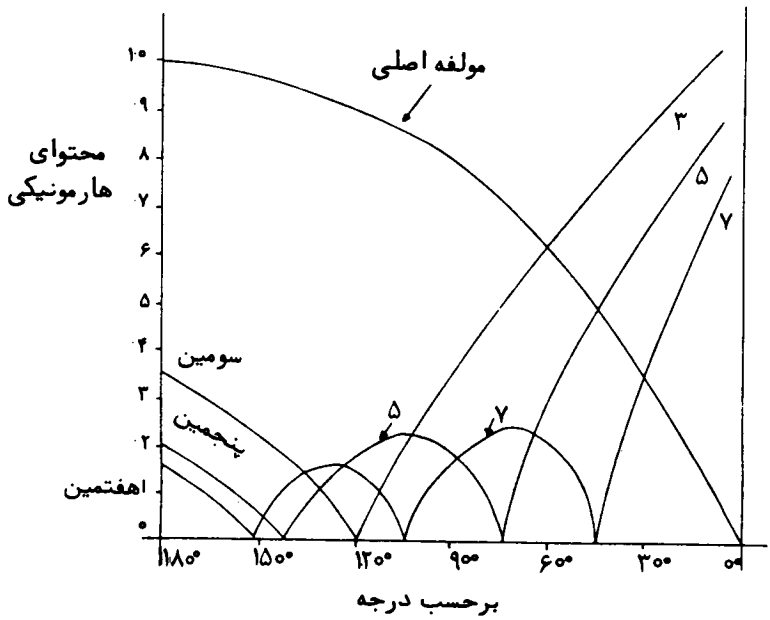
(ث) حذف هارمونیکها

به منظور بهبودشکل موج خروجی وارونگر (معکوس کننده) تغییر شکل آن به طوری که تلفات‌در خط،وباربه حداقل ممکن‌برسد ضروری است. به همین‌دلیل ساختن‌موجی حتی‌الامکان نزدیک به سینوسی از خروجی وارونگر ضروری است. به این منظور از صافـی اتصال یافتـه بین بار و وارونگر می‌توان استفاده کرد. در قدرتهای زیاد، صافی خیلی حجیم و گـران می‌شود و برای صافیهای LC فرکانس متغیر دارای محدودیت هستند. همچنین می‌توان یک موج پله‌ای ساده خروجی وارونگری را به یک ترانسفورماتور چند انشعابی وصل کرد و با استفاده ازتیریستورهای اتصال معکوس موازی مـوج پله‌دار متغیـر مرکبی ایجاد کرد. هرچه تعداد پله‌ها در هر سیکل

1- Fundamental compont

بیشتر شود همان قدر شکل موج خروجی به سینوسی نزدیکتر خواهد شد ، که باز دستگاههای ایجاد کننده این موج بزرگ و گران قیمت خواهند بود . دقیقا از نقطه نظر دامنه ولتاژ ، شکل موج را می‌توان طوری مدوله کرد که اگر هم کاملا سینوسی نباشد ، ولی هر یک از هارمونیکهای مورد نیاز حذف شوند . این مدوله‌سازی توسط مدارهای راه انداز تیریستور قابل کنترل وعملی است .

ازبین سه‌نوع[1] مختلف مدوله‌سازی معروف‌به مدوله‌سازی‌پهنای‌پالس ، به عنوان‌مناسبترین نوع برای این‌منظور ، انتخاب‌شده‌اند که عبارتنداز : پهنای پالس مرکب[2] (مرجع ۱۱) ، کاهش هارمونیکهای موردنظر[3] (مرجع ۱۲) و خنثی کردن هارمونیکها[4] (مرجع ۱۳)



شکل ۳ ــ ۴۳ محتــوای هارمونیکی شکل موج مربعی

(۱) کنترل پهنای پالس مرکب

بــرای دسترسی به پالسهای مرکب در طــی یک نیم سیکل ، بایستی تیــریستور در وارونگــر (معکوس کننده) قبل از اینکه کنترل به تیریستور بار دیگری منتقل شود ، چندین بــار روشن و

1- Variation
2- Multiple pulse width
3- Selected harmonic reduction
4- Harmonic neutralization

خاموش شود . انجام این کار فقط با کاربرد وارونگر کلاس(ت) جا به جایی ممکن است که آن عبارت است از خاموش کن خازنی با یک تیریستور کمکی ، یا خاموش کن تکمیلی در صورتی که بازوهای پل وارونگر (معکوس کننده) کاملا مستقل باشند .

پالس تکی ولتاژ که در شکل ۳ ــ ۴۲ آمده است هارمونیک سومی دارد که مخصوصا در قدرتهای پایین مقدار آن زیاد است . افزایش تعداد پالسها به دو پالس در هرنیم‌سیکل ، مثل شکل ۳ ــ ۴۴ (الف) ، هارمونیک سوم را حذف می‌کند . تجزیه فوریه به ازای θ متغیر(زمان ثابت ولی‌کسرمتغیری ازسیکل وابسته به فرکانس)هارمونیکهای اندکی طبق شکل ۳ ــ ۴۴ (ب) تولیدمی‌کند . هارمونیکهای دیگر نیز با افزایش تعداد پالسها حذف می‌شوند .

روش دسترسی به پالسهای‌مرکب‌طبق‌شکل ۳ ــ ۴۵ عبارت است ازتغذیه مدار پالس‌ساز[1] به منظور فرمان روشن و خاموشی دادن‌به تیریستور باترکیبی ازموج دندانه‌ارهای و موج‌سینوسی مبنا است . روش پیچیده‌تر برای منظور فوق آن است که از دو موج سینوسی مبنا با اختلاف‌فاز متغیری که خود تشریحی[2] (بی‌نیاز از توضیح) باشد استفاده شود شکل ۳ ــ ۴۶ در تمام‌حالات بایستی سطح کلی پالسها در هر نیم سیکل، یعنی $(\int v(t)\,dt)$ثابت باقی بماند .

(۲) کاهش هارمونیکهای مورد نظر

با یک مدار راه‌اندازی که خیلی ساده‌تر از قسمت قبلی باشد و با امکان استفاده از جا به جایی کلاس"پ"یا"ت" (که در اولی تعداد تیریستور کمتر خواهد بود) پالسی با سه پالس مثبت و دو پالس منفی درنیم‌سیکل‌مثبت طبق شکل ۳ ــ ۴۷ می‌توان به‌دست‌آورد . جابه‌جایی‌های کمتری در هر سیکل در مقایسه با کنترل پهنای پالس مرکب می‌تواند مورد احتیاج باشد .

در وارونگر تک‌فاز هارمونیکهای سوم و پنجم را می‌توان حذف کرد در حالی که در یک وارونگر سه فاز با همین تکنیک اولین هارمونیک در ولتاژ خط هارمونیک یازدهم خواهدبود . این موضوع برای تمام گستره توسط تغییر مولفه اصلی ولتاژ از صفر تا مقدار نرمال و یابه‌عبارت دیگر توسط ثابت نگهداشتن نسبت$V\,c^{-1}\,s^{-1}$ انجام می‌گیرد .

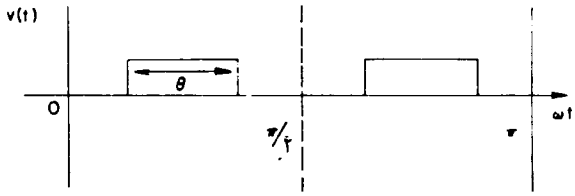
در موج مستطیلی شکل‌تکی شکل ۳ ــ ۴۲ ولتاژ هارمونیک عبارت است از :

$$v(n\omega t) = \frac{4V}{n\pi}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)(\cos n\,\omega t) \qquad (۳ - ۵۷)$$

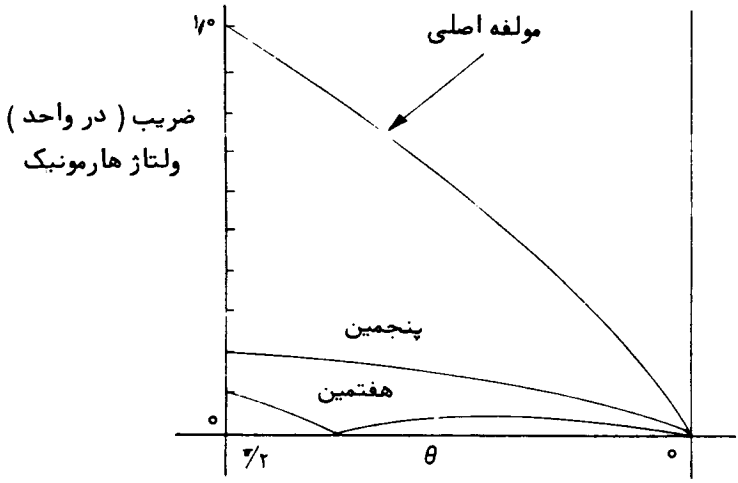
در نتیجه با تحلیل مشابهی ولتاژ هارمونیکها برای شکل موج ۳ ــ ۴۷ عبارت خواهد بوداز :

$$v(n\omega t) = \frac{4V}{n\pi}(1 - 2\cos n\alpha_1 + 2\cos n\alpha_2)\left(\cos n\frac{\theta}{2}\right)(\sin n\omega t) \qquad (۳ - ۵۸)$$

1- Pulse forming 2- Self explanatory

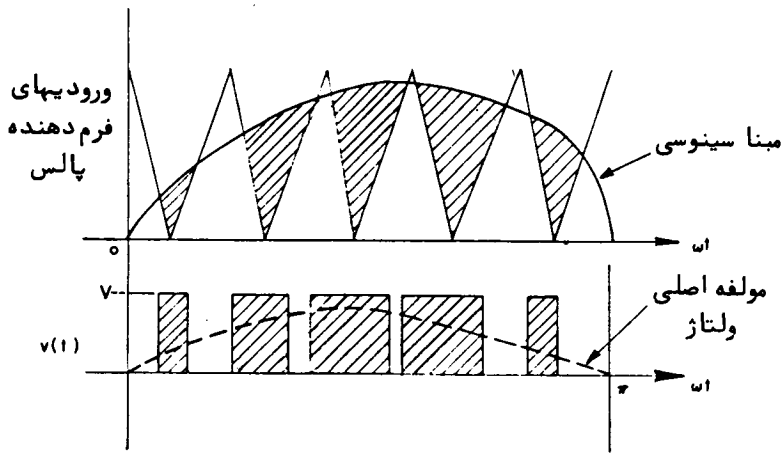


الف

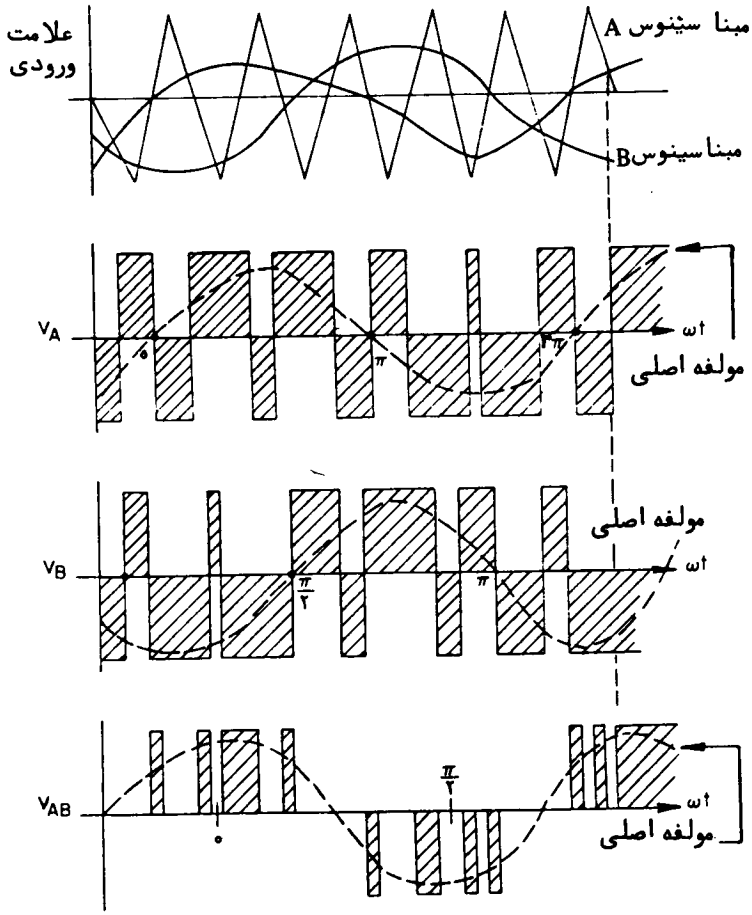


(ب)

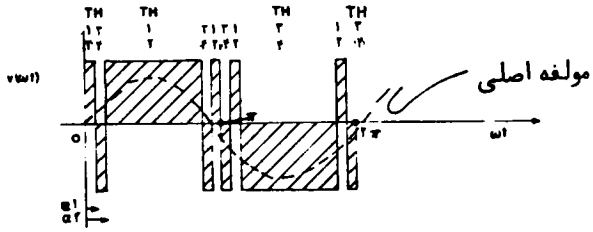
شکل ۳ ــ ۴۴ شکل موج پالس دوتائی



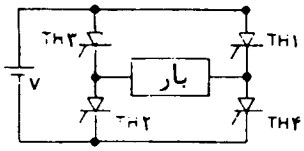
شکل ۳ ــ ۴۵ پالسهای مرکب توسط ترکیب علایم



شکل ۳ ــ ۴۶ پالسهای مرکب توسط ترکیب مختلط



شکل ۳ ــ ۴۷ کاهش هارمونیکهای مورد نظر



شکل ۳ ــ ۴۸ وارونگر پل تک‌فاز

در اینجا θ زاویه اختلاف فاز بین محورهای پالسهای راه‌انداز برای دستیابی به ولتاژ مولفه اصلی متناسب با فرکانس است و خاصیت حذف هارمونیکهای سوم و پنجم را نیز حفظ می‌کند.

اگر بین تیریستورهای TH۱، ۲ و TH۳، ۴ مدار وارونگر تک فاز شکل ۳ ــ ۴۸ اختلاف فازی موجود نباشد، راه‌اندازی تیریستور طبق شکل ۳ ــ ۴۷ خواهد بود، که آن معرف بیشینه ولتاژ در بیشینه فرکانس است. از رابطه (۳ ــ ۵۸) با زاویه $\theta = ۰$ قسمت‌های شامل α_1 و α_2 نشان می‌دهد که هر دو هارمونیکها ممکن است حذف، و α_1 و α_2 از حل دو معادله زیر تعیین شوند.

$$v(n_1\omega t) = ۰ = ۱ - ۲\cos n_1\alpha_1 + ۲\cos n_1\alpha_2 \qquad (۳ - ۵۹)$$

و

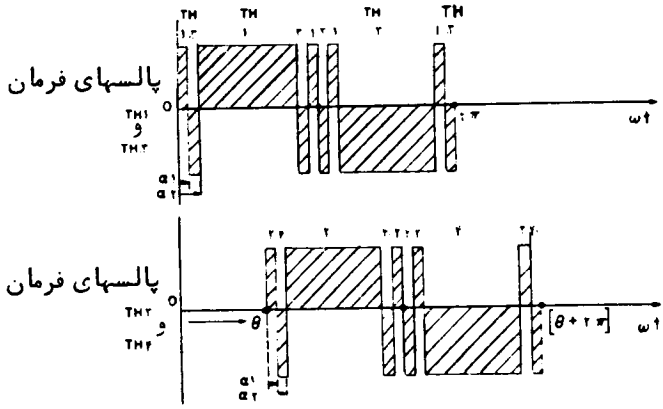
$$v(n_2\omega t) = ۰ = ۱ - ۲\cos n_2\alpha_1 + ۲\cos n_2\alpha_2 \qquad (۳ - ۶۰)$$

که در آن n_1 و n_2 هارمونیکهایی هستند که قرار است صفر شوند، برای اینکه هارمونیکهای سوم و پنجم ($n_1 = ۳$ و $n_2 = ۵$) صفر باشند داریم:

$$\alpha_1 = ۲۳/۶^\circ \qquad (۳ - ۶۱)$$

و

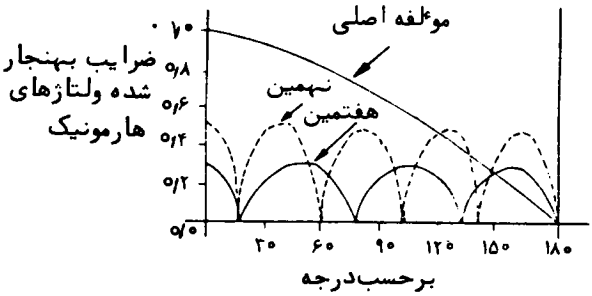
$$\alpha_2 = ۳۳/۳^\circ \qquad (۳ - ۶۲)$$



شکل ۳ ــ ۴۹ جا به‌جاسازی فاز برای ولتاژ متغیر

عمل روشن کردن طبق آرایش شکل ۳ ــ ۴۷ ، با داشتن ولتاژ متغیر و ثابت نگهداشتن α_1 و α_2 به منظورحذف هارمونیکهای‌مشابه ، ناجور خواهد بود . لذا به این‌منظور هارمونیکهای مورد نظر را در صفر نگهداشته و ولتاژ را می‌توان متناسب با فرکانس توسط‌آرایش اختلاف فاز شکل ۳ ــ ۴۹ کرد . در این روش α_1 و α_2 همیشه یکسان باقی می‌مانند ، اما مولفه اصلی ولتاژ از مقدار بیشینه در $\theta = 0$ که‌در آن پالسهای راه‌انداز بر هم منطبق می‌شوند ، به‌مقدارصفر در $\theta = 180$ درجه ، که در آن هیچ زمانی از بار جریان عبور نمی‌کند ،تغییرمی‌کند . طبیعتا مدار منطقی از روشن شدن تیریستورهای $TH_{1,4}$ یا $TH_{3,2}$ با یکدیگر و یا ازهدایت‌توامان آنها برای اتصال کوتاه‌کردن منبع‌تغذیه ، ممانعت‌خواهد کرد . همچنین فرض براین است که یک تیریستور قبل ازآنکه تیریستور مقابلش روشن نشده است خاموش شود . تنها درشکل ۳ ــ ۳۴ است که‌اگر هدایت TH_1 به دنبال هدایت TH_2 باشد اتصال کوتاهی رخ نخواهد داد . با جابه‌جاسازی[1] θ به هیچ وجه ولتاژی در دو سر بار وجود نخواهد داشت مگر آنکه در همان زمان روی دریچه ۲ و TH_1 یا ۴ و TH_3 علایمی وجود داشته‌باشد وبه محض اینکه علامت‌دریچه یکی از زوج تیریستورها از بین رفت هر دو تیریستور به طور خودکار خاموش شوند .

رابطه (۳ ــ ۵۸) ضرایب تمام ولتاژهای هارمونیک برای هر جا به جایی فاز را هنگامی می‌دهد که هارمونیکهای سوم و پنجم به وسیله α_1 و α_2 که مقادیر آنها در روابط ۳ ــ ۶۱ و ۳ ــ ۶۲ داده شده‌اند حذف می‌شوند .



شکل ۳ ــ ۵۰ محتوای هارمونیک برای جابه‌جاسازی فاز متغیر

این امر در شکل ۳ ــ ۵۰ نشان داده شده است . این شکل ، منحنی‌های نظری را نشان می‌دهد . و درآن زمان محدودروشن شدن و مهمتر ازآن زمان خاموشی به‌حساب نیامده است ، اما اختلاف‌زیادی‌به همراه نخواهد داشت . بهنجارسازی[2] با استفاده ازولتاژ مبنای $0/839 \times \frac{4V}{i\pi}$

1- Displacement 2- Normalization

که ازضریب مولفه اصلی ولتاژ در زاویه جابه‌جا سازی صفر ($\theta = 0$) به دست آمده است ، محاسبه شده است .

(۳) خنثی کردن هارمونیکها توسط ترکیب [1] موج

ترکیب موج روش جالبی برای حذف هارمونیکهای پایین‌تر است ، ولی چون برای این کار تیریستورهای متعددی مورد احتیاج است ، لذا فقط برای قدرتهای بالاتر از ۲۰ کیلو ولت‌آمپر این روش اقتصادی خواهد بود . اصول این روش عبارت است از اتصال تعدادی وارونگر تک‌فاز باهم که متوالیا روشن وخاموش می‌شوند ومجموع‌خروجی‌ها یک‌موج پله‌ای نزدیک‌به‌موج سینوسی تولید می‌کند . هرچه تعداد وارونگرها بیشتر باشد همان‌قدرتعداد پله‌ها درموج خروجی بیشتر بوده و در نتیجه تعداد هارمونیکهای حذف شده نیز بیشتر خواهد بود . طبق شکل ۳ ــ ۴۸ هر یک از وارونگرهای تک‌فازمی‌توانند وارونگر نوع پل باشند . بار نیزممکن‌است‌سیم‌پیچی‌اولیه ترانسفورماتوری باشد . مزیت مهم این سیستم در آن است که اگر یک تیریستور و یا یک واحد تکی از کار بیفتد موج خروجی تولید شده توسط واحدهای دیگر موجود است ، فقط‌اعوجاج هارمونیکی مقداری افزایش خواهد یافت . این سیستم بهتر از وارونگر (معکوس کننده) سه فاز پل‌است ،که با از کار افتادن یک تیریستور ، تمام سیستم از کارمی‌افتدودر خروجی‌موجی تولید نمی‌شود .

یک‌مدار شش مرحله‌ای [2] به‌عنوان مثال انتخاب‌شده است تانشان دهدکه اولین‌هارمونیک حذف نشده هارمونیک یازدهم است که از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$H = 2kN \pm 1 \qquad (۶۳ - ۳)$$

که در آن :

H هارمونیکهای موجود در موج

N تعداد طبقات وارونگر ، و

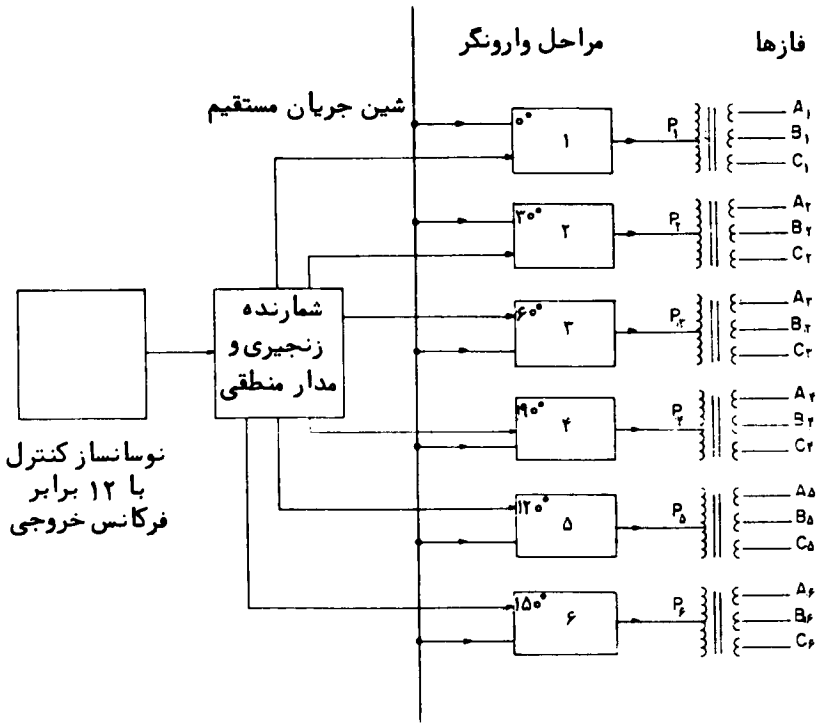
k اعداد صحیح ۱ و ۲ و ۳ و . . . هستند .

چون موتورالقایی قادربه پاسخگویی‌به هارمونیکهای‌بیشتر از هارمونیک‌یازدهم‌نمی‌باشد ، لذا داشتن بیش‌از ۶ طبقه غیر ضروری‌به نظر می‌رسد . در طی تشریح مقدماتی مقدار بیشینه فرکانس و ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد . ظرفیت کلی سه فاز شش برابر kVA اسمی هرطبقه تکی است .

شکل ۳ ــ ۵۱ این وارونگر را به طور نموداری نمایش می‌دهد . نوسانساز کنترل شده‌ای که در دوازده برابر فرکانس خروجی مورد لزوم کار می‌کند ، علایمی را به یک شمارنده زنجیری

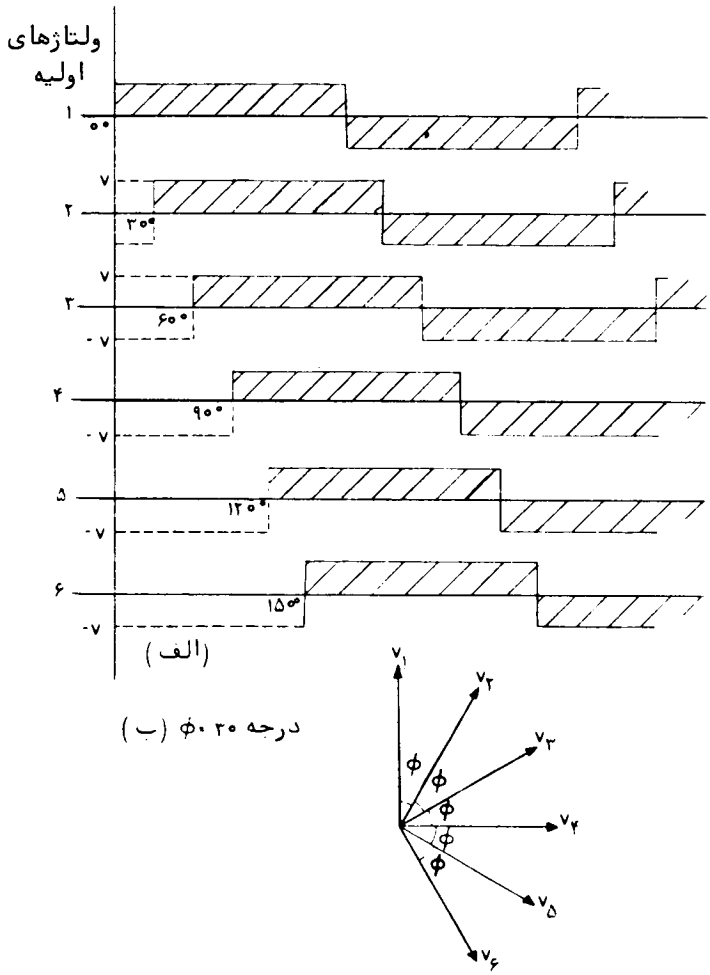
1- Synthesis 2- Stage

دوپایداری‌شش‌تایی اعمال می‌کند. به عنوان مثال اولین علامت، نوسانساز دو پایه‌ای اول را روشن می‌کند که آن نیز وارونگر طبقه اول را در صفر درجه مبنا روشن می‌کند. طبقه اول تازمانی که نوسانساز اول‌پالس بعدی رادریافت نکرده است تا آنرا تغییر دهد در حالت روشن باقی خواهدماند، واین‌حالت تابعد از پالس ششم نوسانساز ادامه می‌یابد. دومین پالس، نوسانساز [چند ضربانی] اول را روشن‌می‌یابد، لذا نوسانسازبعدی را روشن کرده و آن نیز وارونگر طبقه دوم را در دوره[تناوب] مبنا ۳۰ درجه روشن می‌کند. هر علامت به طور موفقیت آمیز مراحل بعدی را راه‌اندازی می‌کند تا اینکه همگی روشن شوند، و نیم سیکل موج را کامل کنند. شش علامت بعدی، به ترتیب آنها را معکوس می‌کند تا نیم‌سیکل‌بعدی راکامل کنند. و سیکل کاملی پس از دوازده علامت درست شود.



شکل ۳ ــ ۵۱ ترتیب عمومی یک ترکیب کننده موج

روی اولیه، p، هر ترانسفورماتور، ولتاژی که در شکل ۳ ــ ۵۲ (الف) نشان داده شده وجود خواهد داشت. این ولتاژها دارای دامنه مساوی ولی اختلاف فاز ۳۰ درجه نسبت به‌هم هستند. اگر این ولتاژها به‌طور سری باهم‌جمع شوند نتیجه به صورت یک موج تک‌فاز چند پله‌ای



شکل ۳ ــ ۵۲ ولتــاژهای فازی وارونگر

الف : فاز بندی[1] ولتاژ طبقات وارونگر

ب : نمودار فازوری [2] ولتاژ مربوط به سیم پیچی‌های اولیه

در می‌آید که دارای هارمونیک خیلی کمی مطابــق شکل ۳ ــ ۵۳ است . البته ترکیب این موجها نه در اولیه ترانسفورماتورها ، بلکه در ثانویه آنها صورت می‌گیرد .

در هر حال ، برای تهیه ولتاژ سه فاز متعادلی مثل شکل موج ۳ ــ ۵۳ احتیــاج به تعدادی

1- Phasing 2- Phasor

سیم‌پیچی درثانویه هرترانسفورماتور است . شکل ۳ ــ ۵۱ سه سیم‌پیچی درثانویه بانسبت‌های تبدیل ولتاژ P/A ، P/B و P/C که یکسان بودنشان ضرورت ندارد را نشان می‌دهد . ترکیب این سیم‌پیچها با یکدیگر به طور سری برای به دست آوردن ولتاژ سه فاز متعادل اتصال‌ستاره ، در شکل ۳ ــ ۵۴ نشان داده شده است . این فازها لازم نیست که بافازهای سیم‌پیچی‌ثانویه شکل ۳ ــ ۵۱ مطابقت داشته باشند ، زیرا برای ترکیب ولتاژها به منظور به دست آوردن یک ولتاژ سه فاز متعادل روشهای متعددی وجود دارد . ضرایب تبدیل ترانسفورماتور برای اینکه هارمونیکهای مورد نیاز را خنثی سازند عبارتند از :

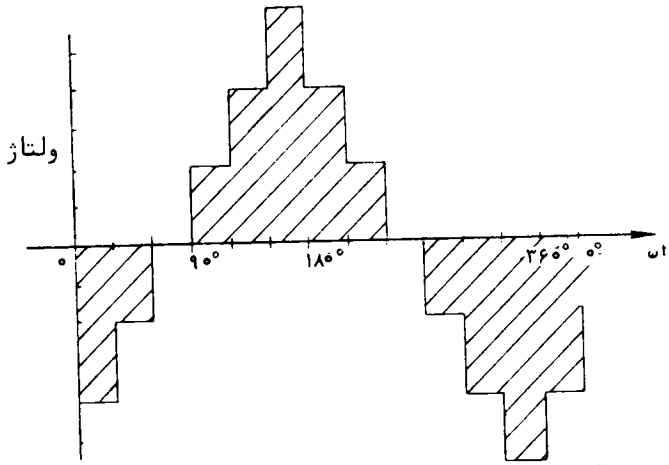
$$P/A = ۱ \qquad (۶۴ - ۳)$$

$$P/B = \frac{۳}{\sqrt{۳}} \qquad (۶۵ - ۳)$$

$$P/C = \frac{۳}{۲\sqrt{۳}} \qquad (۶۶ - ۳)$$

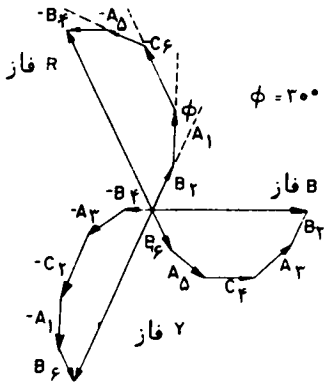
مطابق آنچه که گفته شد در این حالت دو سیم‌پیچی A_1 با یک سیم‌پیچی معکوس شده ، و بدون B_1 و C_1 در طرف ثانویه ترانسفورماتور وجود خواهد داشت .

شکل موج خروجی فاز R ، شکل ۳ ــ ۵۴ مجموع مقادیر لحظه‌ای ولتاژهای B_2 ، $-A_5-C_6$ و $-B_4$ است‌که در شکل ۳ ــ ۵۵ نشان داده شده است . فازهای B و Y نیزمشابه فاز R هستند ولی نسبت به ۱۲۰ ± درجه اختلاف فاز دارند . رسیدگی به‌محتوای



شکل ۳ ــ ۵۳ ولتاژوارونگر موقعی که ولتاژهای اولیه با هم جمع شده باشند .

هارمونیک این شکل موج ضرورت دارد و با جمع سری فوریه‌های هریک‌ازشکل موجهای مستطیلی شکل ۳ ــ ۵۵ (الف) می‌توان این کار را انجام داد (چون این سری‌ها تاحال‌محاسبه‌شده‌اند). به هر حال با در نظر گرفتن ارتباط با چگونگی تغییرات ولتاژها بهتر است این موضوع را برای ولتاژهای کلیه فرکانسها عمومیت داد و این امر بسته به این است که ولتاژ چگونه تغییرمی‌کند. داشتن دو وارونگری‌که ولتاژهای آنها به طورسری جمع می‌شوند ولی این ولتاژها دارای‌اختلاف فازی نسبت به هم هستند یکی از امکانات است. این چنین ولتاژهایی، نشان داده شده در



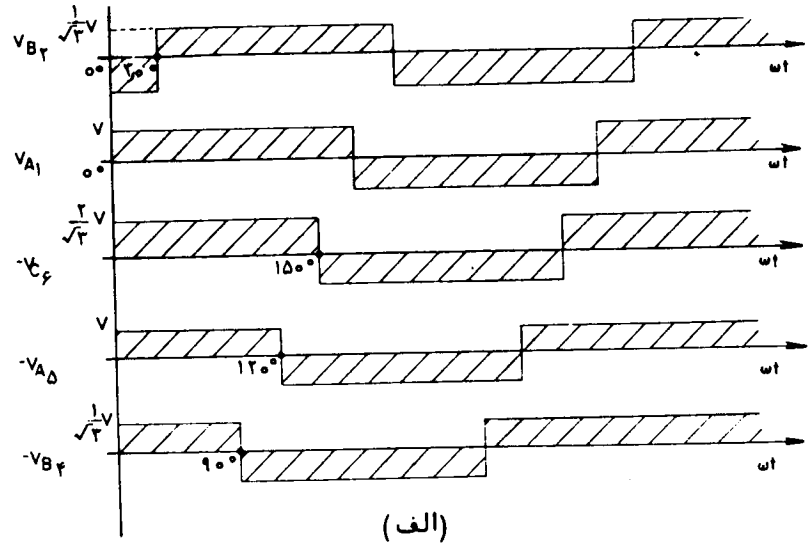
شکل ۳ ــ ۵۴ ترکیب فازهای ثانویه جهت تولید منبع سه فاز متعادل

شکل ۳ ــ ۵۵ (ب)، که ۱۸۰ درجه اختلاف فاز نسبت به هم دارند صفر هستند، درصورتی‌که در اختلاف فاز صفر درجه بیشینه ولتاژ را نتیجه خواهند داد. اختلاف فاز بین دو ولتاژ هر قدر باشد هارمونیکهای مجموع، مشابه هارمونیکهای امواج تکی خواهد بود. همین‌روش جابه‌جا سازی فاز برای دسترسی به ولت بر سیکل در ثانیه ثابت را می‌توان توسط مدارهای راه‌انداز وارونگر (معکوس کننده) تکی نیز، درست مثل شکل ۳ ــ ۴۹ انجام داد. در غیر این صورت راه‌اندازی ولتاژبایستی‌طوری‌باشدکه مشابه شکل ۳ ــ ۴۰، طول پالس رابتوان‌ثابت‌نگهداشت.

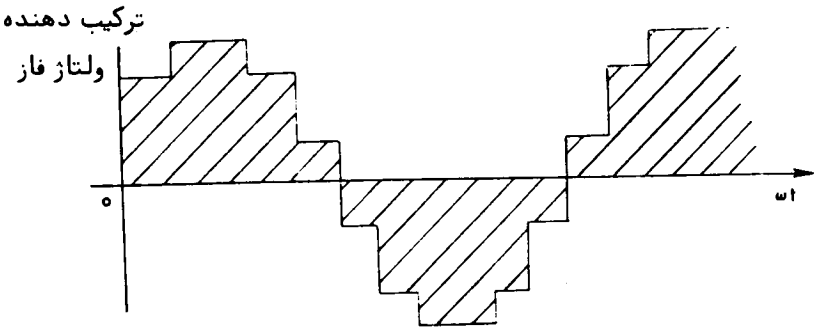
با در نظر گرفتن مطالب اخیر برای تحلیل وارونگر تکی ولتاژ واحد شکل موج طبق شکل ۳ ــ ۵۶ که تعمیم شکل ۳ ــ ۴۲ است. اگر جا به جا سازی فاز ψ در مد نظر باشد معادله ۳ ــ ۵۶ به صورت زیر درمی‌آید:

$$v(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)[\sin n(\omega t + \Psi)] \qquad (۶۷ - ۳)$$

که در آن $n = 1, 3, 5, \ldots$



(الف)



(ب)

شکل ۳ ــ ۵۵ ولتاژهای وارونگر

(الف) ولتاژهای ثانویه‌ای که با یکدیگر جمع می‌شوند ،

(ب) یکی از ولتاژهای فاز اعمال شده به موتور

برای فاز R مجموع ۵ قسمت به شکل معادله (۳ ــ ۶۷) وجود دارد که برای پیدا کـردن نتیجه ، داریم :

$$v(\omega t) = v_{B_2}(\omega t) + v_{A_1}(\omega t) - v_{C_6}(\omega t) - v_{A_5}(\omega t) - v_{B_4}(\omega t) \qquad (۳ ــ ۶۸)$$

که در آن :

$$v_{B_2}(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sin n\frac{\theta}{2}\right) [\sin n(\omega t + 30°)] \qquad (۳ ــ ۶۹)$$

$$v_{A_1}(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)[\sin n\omega t] \qquad (۳-۷۰)$$

$$v_{C_6}(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi}\cdot\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)[\sin n(\omega t + 150^\circ)] \qquad (۳-۷۱)$$

$$v_{A_5}(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)[\sin n(\omega t + 120^\circ)] \qquad (۳-۷۲)$$

و

$$v_{B_4}(\omega t) = \sum_{n=1}^{n} \frac{4V}{n\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}}\left(\sin n\frac{\theta}{2}\right)[\sin n(\omega t + 90^\circ)] \qquad (۳-۷۳)$$

از رابطه (۳ــ ۶۹) تا (۳ــ ۷۳) و با جایگزینی مولفه‌های اصلی در رابطه (۳ــ ۶۸) خواهیم داشت:

$$v_1(\omega t) = \frac{8\sqrt{3}}{\pi}\sin\frac{\theta}{2}\sin\omega t \qquad (۳-۷۴)$$

در نتیجه ولتاژ فاز اصلی عبارت است از:

$$V_R \propto \sin\frac{\theta}{2} \qquad (۳-۷۵)$$

ولی

$$V_R \propto f \qquad (۳-۷۶)$$

f فرکانس منبع تغذیه است و در نتیجه:

$$f \alpha \sin\frac{\theta}{2}. \qquad (۳-۷۷)$$

چون بیشینه فرکانس موقعی که $\theta = 180$ است اتفاق می‌افتد لذا:

$$f = f_{max}\sin\frac{\theta}{2}. \qquad (۳-۷۸)$$

طبق روال فوق اگر برای هارمونیکهای سوم، پنجم، هفتم، و نهم جمع فوق را اعمال کنیم خواهیم دید دامنه همگی صفر است و فقط هارمونیکهای:

$$H = 2kN \pm 1, \qquad (۳-۷۹)$$

که در حقیقت تکرار رابطه (۳ــ ۶۳) است وجود دارد، و ولتاژهای این هارمونیکها عبارتند از:

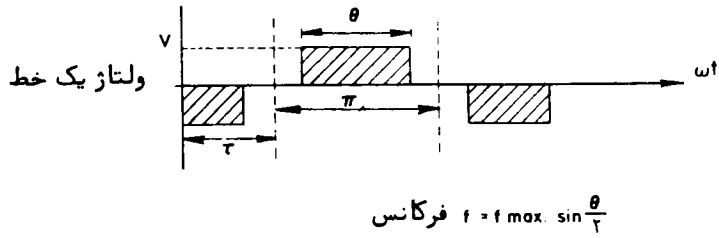
$$v_n(\omega t) = \frac{8\sqrt{3}}{n\pi}\sin n\frac{\theta}{2}\sin n\,\omega t. \qquad (۳-۸۰)$$

اعوجاج کلی هارمونیک[1] (THD) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$THD = \sqrt{\left[\sum_{n}^{\infty} (\text{هارمونیک } n \text{ ام به مثابه درصدی از مولفه اصلی})^2\right]}$$

که در آن ۰۰۰و۴و۳و۲ = n است.

شکل موج شکل ۳ ــ ۵۵ ب درست بالای ۱۵ درصد THD دارد در صورتی که ولتاژ فاز شکل ۳ ــ ۳۰ دارای بیشتر از ۳۰ درصد THD است.



شکل ۳ ــ ۵۶ مدوله‌سازی پهنای پالس ساده برای کنترل ولتاژ

(ج) ارزیابی وارونگرهای سه فاز تیریستوری

ارزیابی مختصر در حقیقت کوششی است در جهت انتخاب یک وارونگر برای موتور یا موتورهای خاص، و این کوششی است تا دریابیم که حداقل هزینه برای ساختن (موتوری) با ویژگیهای معین ولتاژ، جریان، قدرت، فرکانس، هارمونیکها و رواداشتهای[2] تنظیمی کدام است. هر کاربردی بایستی با شایستگی مربوط به خود مورد رسیدگی قرار گیرد اما زمینه‌های وسیع انتخاب را می‌توان در نظر گرفت.

این زمینه‌ها مدار راه‌انداز الکترونیکی، که مدارکنترل منطقی و تعدادی تیریستور مورد لزوم درسیستم را نیز شامل می‌شود، دربرمی‌گیرند. اگر کسی فکر کند که وارونگر جانشینی برای جابه‌جاکن ماشین جریان‌مستقیم است، درقدرتهای‌کم‌بایستی دلایل خاصی‌برای کاربرد وسایل استاتیکی داشته باشد. این به آن علت است که الکترونیک قدرت در مقایسه با جا به جاکن یا حتی موتور القایی پر هزینه‌تر است. هزینه مدارهای کنترلی متناسب با اندازه سیستم افزایش نمی‌یابد، به طوری که برای قدرتهای چند صد اسب بخار هزینه مدارهای فوق چندان گرانتر از سیستم جریان مستقیم مثل دستگاه وارد لئونارد نخواهد بود، شاید، مقدارکمی‌نیز پر بهره

1- Total Harmonics Distortion 2- Tolerence

باشد . همچنین دارای مزایای ماشین بدون جاروبک از قبیل محل استقرار کمتر ، نگهداری و مراقبت کمتر است و همچنین خطرات کمتری (جرقه جاروبکها در بعضی مواقع خطرناک است) دارد .

مدارهای راه‌انداز برای یک وارونگر با موج خروجی مربعی شکل ، با توجه به یک مولد (نوسان‌ساز) فرکانس مبنا و شمارنده زنجیری ساده‌ترین هستند . به محض اینکه نیازها پیچیده‌تر شدند مدارهای منطقی کنترل کننده پالسهای راه‌انداز نیز پیچیده‌تر خواهند شد . برای مثال مدوله‌سازی پهنای باند برای تناسب ولتاژ بر فرکانس و تقلیل هارمونیکها باعث بغرنج شدن شدید می‌شود . مثال ساده دیگر ، مدار کنترل وضعیت جریان مستقیم در فصل کنترل ماشین جریان مستقیم است .

تعداد تیریستورهای به کار رفته بستگی کامل به نوع سیستم انتخاب شده دارد . سیستمی که دارای تعداد تیریستور کمینه است (شش تا از آنها) و با وجود این در خروجی ولتاژ متغیر با فرکانس متغیر برای موتور تهیه می‌کند ، سیستمی است که در آن واگردان یکسو کننده غیرقابل کنترل است و وارونگر توسط تیریستورهای بارکمکی جابه‌جا می‌شود و ولتاژ توسط ترانسفورماتور تغییر می‌کند . این سیستم در شکلهای ۳ ــ ۳۵ و ۳ ــ ۳۸ نشان داده شده است .

موتورهای با پاسخ سریع غالبا وجه ویژه‌ای دارند ، به طوری که در این مورد کنترل الکترومکانیکی انشعابهای ترانسفورماتور غیرقابل‌قبول خواهد بود . به‌محض اینکه ولتاژ کنترل‌شده به واگردان انتقال پیدا کرد سه تیریستور دیگر نیز مورد لزوم است و برای جابه‌جایی قابل اعتماد در تمام اوقات ، خاموشی کمکی طبق شکل ۳ ــ ۳۶ لازم می‌شود ، که درنتیجه مجموعا " ۱۰ تیریستور به کار خواهد رفت .

برای انتقال کنترل دامنه ولتاژ به خود وارونگر حداقل شش تیریستور طبق شکل ۳ ــ ۳۶ مورد لزوم خواهد بود ، زیرا هر بازو بایستی کاملا مستقل باشد . مدار شکل ۳ ــ ۳۴ این موضوع را نمایش می‌دهد . اگر تیریستورهای TH_1 و TH_4 جریان بار را حمل کنند تیریستور TH_1 توسط TH_2 که خودش توسط ولتاژ معکوس توان واکنشی بار برگردانده شده به شین جریان مستقیم خاموش می‌شود ، جابه‌جا می‌شود . در نتیجه جریان بار بلافاصله پس از خاموش شدن TH_1 مجبور به عبور از طریق TH_2 نخواهد بود . با اضافه کردن تیریستورهای کمکی تعداد تیریستورها دوبرابر می‌شود . موقعی که تقلیل هارمونیکها یک مشخصه اضافه شده وارونگر باشد تعداد تیریستور باید افزایش یابد زیرا سه وارونگر تکفاز به‌ترتیب برای چند برابر کردن پهنای پالس و تقلیل هارمونیکهای انتخاب شده شکلهای ۳ ــ ۴۵ و ۳ ــ ۳۷ به کار می‌رود . این عمل مستلزم استفاده از ۱۲ تیریستور برای انجام خاموشی تکمیلی است . خنثی سازی هارمونیکی می‌تواند تعدادی از طبقات تکفازی که برای حذف تعداد خاصی از هارمونیکها مورد لزوم است را داشته باشد . شش طبقه شکل ۳ ــ ۵۱ برای حذف هارمونیکها تا هارمونیک یازدهم

احتیاج به ۲۴ تیریستور دارد ، به شرطی که وارونگر همچنین مجبور به ثابت نگهداشتن نسبت ولتاژ به دور در ثانیه باشد . در هر حال در مقام دفاع هر طبقه فقط یک‌ششم‌کل کیلووات‌آمپر بار را می‌تواند از خود عبور دهد .

در حالت کلی ممکن است گفته شود که هر قدر وارونگر پیچیده‌تر باشد همان قدر کاربرد آن در قدرتهای بالاتر اقتصادی‌تر خواهد بود .

(چ) وارونگر در مدار گردانه موتور القایی

سیستم محرک گشتاور ثابت نوع کرامر[1] در شکل ۳ ــ ۵۷ نشان داده شده است . این سیستم‌از سه ماشین گردان اضافی برای تبدیل توان‌لغزشی‌گردانه به جریان‌مستقیمی که بعدا " به‌جریان متناوب با فرکانس منبع تغذیه تبدیل شود ، استفاده می‌کند . همچنین امکان عبور توان از دو طریق که ایجاد سرعتی زیر و بالای‌سرعت‌سنکرون‌کند نیز وجود دارد . واگردانی و وارون‌سازی اشاره برسیستمهای‌ساکن[2] تیریستوری‌دارد .قسمتهای‌عمده سیستم‌معادل کرامر در شکل ۳ ــ ۵۸ نشان داده شده است .

دو وارونگر در شکل مشاهده می‌شود که یکی از آنها جریان متناوب را به جریان مستقیم برمی‌گرداند و دیگری جریان مستقیم را به جریان متناوب با فرکانس مورد لزوم وارون سازی می‌کند . زیر سرعتهای سنکرون ، وارونگر A قدرت لغزشی گردانه را به جریان مستقیم بر ــ می‌گرداند ، این جریان توسط وارونگر B وارون سازی و به منبع تغذیه برگردانده می‌شود. اتوترانسفورماتوری به منظور تهیه ولتاژی با دامنه مناسب و صحیح به سیستم اضافه شده است و به علت اینکه وارونگر در موقع روشن و خاموش شدن توسط منبع تغذیه ولتاژ کنترل می‌شود ، لذا ممکن است به ترانسفورماتور احتیاجی نباشد . وارونگر B یعنی وارونگر کنترل فازی با جا ــ به جایی خط ولتاژمتناوب (۶)است و با اینکه ولتاژجریان‌مستقیم‌ذاتا کم است ولی وارون سازی با جابه جایی تاخیری انجام می‌پذیرد . جا به جایی تاخیری به این معنی‌است‌که توان واکنشی شدیدی از منبع تغذیه اصلی جریان متناوب اخذ شود و این نمی‌تواند یک مزیت برای سیستم محسوب شود .

هومن[3](مرجع ۱۴) برای حذف این قدرت واکنشی اظهار می‌دارد که می‌توان سیستم را مثل شکل ۳ ــ ۵۹ توسط یک وارونگر پالس در خط جریان مستقیم طوری تنظیم کرد که در این واگردان عمل کنترل با روشن و خاموش کردن خیلی سریع تیریستور $TH1$ امکان‌پذیر است . این واگردان ولتاژ متغیر گردانه را قادر می‌سازد که به ولتاژ ثابت قابل‌شمارش برای سیستم

1- Kramer 2- Static

3- Heuman

وارونگر (به منظور ایجاد ولتاژ کامل) تطبیق داده شود . جریانهای پالسی خروجی احتیاج به خازنهای ضربه‌گیر[1] دارند . عملکرد سیستم را می‌توان از نقطه‌نظر انرژی نیز بررسی کرد. موقعی که وارونگر خاموش است ، تیریستور $TH1$ گردانه را به طور موثر اتصال کوتاه می‌کند و چون موتور در اثنای یک سیکل منبع تغذیه نمی‌تواند سرعت را تغییر دهد انرژی به صورت انرژی واکنشی درسلف مدار ذخیره می‌شود . با روشن‌کردن وارونگر و خاموش‌کردن $TH1$ به طور همزمان ، انرژی ذخیره شده برای انتقال به منبع تغذیه آزاد می‌شود . از طرف دیگر موقعی که $TH1$ گردانه را اتصال کوتاه می‌کند جریان صعود می‌کند و با خاموش کردن $TH1$ ، جریان نزول کرده و سبب القای ولتاژ شدیدی در دو سر سلف می‌شود که این ولتاژ جهت ابقای جریان تقلا می‌کند . ولتاژ فوق به ولتاژ یکسو شده گردانه اضافه می‌شود ، به طوری که مجموع این ولتاژها بیشتر از ولتاژ منبع تغذیه شود و در نتیجه قدرت فعالی به منبع تغذیه تزریق می‌شود .

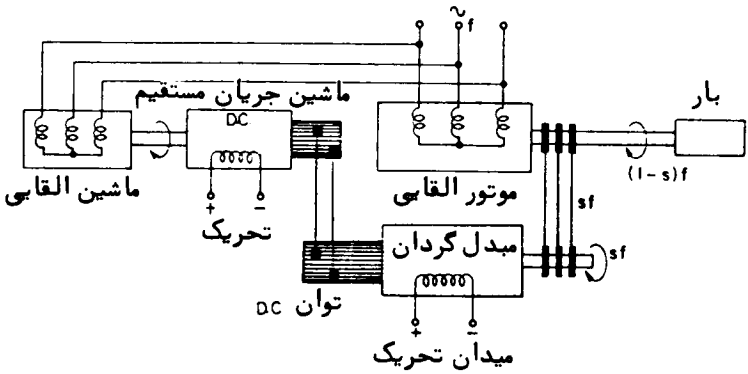
در بالای سرعت سنکرون ، وارونگر B شکل ۳ ــ ۵۸ برای ایجاد ولتاژ ثابت جریان مستقیمی یکسوسازی می‌کند و وارونگر A جریان متناوبی در فرکانس و ولتاژ معینی به منظور تزریق به سیم‌پیچی‌های گردانه موتور القایی تولید می‌کند . وارونگر A نمی‌تواند مثل وارونگر B جابه جایی خط باشد زیرا در سرعت سنکرون وارونگر B از شین ، جریان مستقیم می‌گیرد و جریان مستقیم را ، البته در ولتاژهای متفاوتی ، به گردانه تزریق می‌کند . در نتیجه ولتاژ متناوب برای جا به جایی نخواهیم داشت . جا به جایی اجباری ، با استفاده از خازنها برای ذخیره انرژی جا به جایی ، تنها روشی است که گستره کاملی از سرعت که سرعت سنکرون را نیز شامل می‌شود ، مهیا می‌سازد . این روش کاربرد راه‌انداز با زاویه فاز برای ایجاد ولتاژ خروجی متغیر را حذف می‌کند . به جای آن بایستی از روش مدوله‌سازی پهنای‌باند پالس استفاده کرد . در ولتاژهای کم ، جا به جایی توسط کاربرد خازن ، به علت اینکه انرژی ($\frac{1}{2}CV^2$) به‌مقدار کافی ذخیره نمی‌شود ، غیر قابل اطمینان است . مگراینکه ازخازنهایی با مقادیر بزرگ استفاده شود. از خازنهای کوچک موقعی می‌توان استفاده کرد که جهت اطمینان از ذخیره بار کافی در طول جا به جایی ، یک منبع انرژی کمکی (باطری) به سیستم اضافه شود . در حقیقت این کار نیز زیاد رضایت‌بخش نیست ، دلیلش این است که وارونگر B به صورت یک یکسوکننده قابل کنترلی که ولتاژ جریان‌مستقیم شینی را به مقادیرکوچک موردنیاز برای گردانه تبدیل کند عمل‌نمی‌کند. واگردان ولتاژ ثابت زیادی تولید می‌کند و اجازه می‌دهد که وارونگر A کنترل ولتاژ را انجام دهد .

سیستم مذکور گران قیمت‌وپیچیده است . اصولا " چرا از آن استفاده می‌شود ؟ زیرا خیلی کارآمد و موثر است ، که این را در مورد یک جعبه دنده با سرعت متغیر که بایستی سرعت را

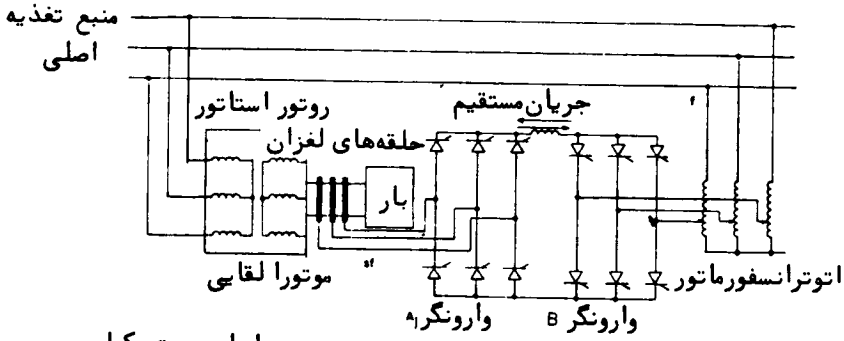
1- Buffer capacitors

تنظیم کند[1] نمی‌توان گفت . عبور توان در هر دو جهت به منظور تولید سرعتی کاملا زیر و یا کاملا بالای سرعت سنکرون امکان‌پذیر است . این کار نمی‌تواند بدون‌کنترل‌پارامترهای ایستانه امکان‌پذیر باشدمگراینکه از یک وارونگر فرکانس متغیراستفاده شود . این وارونگر(معکوس‌کننده) شبیه وارونگرهای A و B از نوع تزریق گردانه خواهد بود ؛ با این تفاوت که گستره فرکانس آن بایستی معادل دو برابر فرکانس آنها باشد . بنابرایـن دو حالت بـرای انتخاب وجود دارد ، موتور قفسی تحریک شده توسط وارونگری که فرکانس آن دو برابر فرکانس منبع تغذیه باشد و یا موتور با حلقه لغزان (روتور سیم‌پیچی شده) در حال کنترل با وارونگری کـه فرکانس آن همان فرکانس منبع تغذیه باشد .

تغییـر مختصری در شکل ۳ ــ ۵۸ کـه‌فقط سرعت متغیر پایین‌تر از سنکرون را امکان‌پذیر می‌سازد ، وارونگر A را به یک یکسوکننده غیـر قابل کنترل تبـدیل می‌کند . وارونگر B کـه وارونگری با جا به جایی خط جریـان متناوب و کنترل فازی است نسبتا ساده است و واگردان پالس شکل ۳ ــ ۵۹ می‌تـواند باز برای تهیه سیستمی با بازده بیشتر مورداستفاده واقع شود .

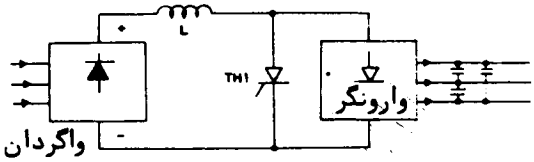


شکل ۳ ــ ۵۷ سیستم کرامری برای گشتاور ثابت



شکل ۳ ــ ۵۸ سیستم تیریستوری معادل سیستم کرامر

1- Set up



شکل ۳ ــ ۵۹ یکسوکننده کنترل شده پالسی

مراجع

1. Hindmarsh, J. (1965), *Electrical Machines,* Pergamon Press, Oxford.
2. *Power thyristors and their applications* (1969), I.E.E. Conference Publication, No. 53, 185 and 168.
3. Shepherd, W. and Stanway, J. (1964), 'The silicon controlled rectifier a.c. switch for the control of one phase series and transformer loads', *I.E.E.E. Int. Con. Rec.* **4**, 155-163.
4. Murphy, R. H. and Nambiar, K. P. P. (1961), 'A design basis for SCR parallel inverters', *Proc. I.E.E.* (B), **108**, 556-562.
5. Mapham, N. W. (1964), 'The classification of SCR inverter circuits, *I.E.E.E. Int. Con. Rec.* **4**, 99.
6. Bedford, B. D. and Hoft, R. G. (1964), *Principles of inverter circuits,* John Wiley, New York, p. 190.
7. McMurray, W. (1964), 'SCR inverter commutated by an auxiliary impulse', *I.E.E.E. Trans. Comm. Elec.* **83**, 824-829.
8. McMurray, W. and Shattuck, D. P. (1961), 'A silicon-controlled rectifier inverter with improved commutation', *I.E.E.E. Trans. Comm. Elec.* **80**, 531-542.
9. Bradley, D. A. *et al.* (1964), 'Adjustable frequency inverters and their application to variable speed drives', *Proc. I.E.E.* **111**, 1833-1846.
10. Bradley, D. *et al.* (1964), 'Adjustable frequency inverters . . . ', *Proc. I.E.E.* **111**, 1833-1846.
11. Molcrytyki, B. (1966), 'Pulse width modulated inverters for a.c. motor drives', *I.E.E.E. Int. Con. Rec.* **8**, 8-23.
12. Turnbull, F. G. (1964), 'Selected harmonic reduction in static d.c. to a.c. inverters', *I.E.E.E. Trans. Comm. and Elec.* **83**, 374-378.
13. Kernick, A. *et al.* (1962), 'Static inverter with neutralization of harmonics', *A.I.E.E. Trans.* (II) **81**, Appl. and Ind. 59-68.
14. Heumann, K. (1964), 'Pulse control of d.c. and a.c. motors by silicon controlled rectifiers', *I.E.E.E. Trans. Comm. and Elec.* **83**, 397.

مسائل

۳ ـ ۱ . ثابت کنید مشخصه‌های گشتاور سرعت موتور القایی موقعی که ولتاژ ورودی متناسب با فرکانس تغییر کند ،طبق شکل ۳ ـ ۱۷ است . همچنین چگونگی تغییرات بازده موتور را با فرکانس تشریح کنید .

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} \qquad (۳ - ۸۲)$$

که در آن :

P_m قدرت خروجی مکانیکی هر فاز

ω_m سرعت زاویه‌ای محور موتور

رابطه زیر بین قدرتهای موتور موجود است :

$$P_1 : P_2 : P_m = 1 : s : (1 - s) \qquad (۳ - ۸۳)$$

و لغزش موتور طبق رابطه زیر تعریف می‌شود :

$$s = \frac{\omega/p - \omega_m}{\omega/p} \qquad (۳ - ۸۴)$$

که در آن

P_1 قدرت انتقالی از طریق فاصله هوایی هر فاز

P_2 تلفات مسی‌گردانه (روتور) (که آن عبارت است از انرژی تلف شده در مقاومت‌سیم پیچی گردانه ؛ یعنی ، "$I_2^2 r$") در هر فاز .

ω فرکانس زاویه‌ای منبع تغذیه و

p تعداد زوج قطبهاست .

در نتیجه :

$$T = \frac{p}{\omega}\frac{P_2}{s} \qquad (۳ - ۸۵)$$

$$= \frac{p}{\omega} I_2^2 \frac{r_2}{s} \qquad (۳ - ۸۶)$$

که در آن :

I_2 = جریان گردانه در هر فاز

r_2 = مقاومت سیم‌پیچی گردانه در هر فاز و، اگر

E_2 = نیروی محرکه الکتریکی القا شده در هر فاز گردانه در حال سکون ، و

x_2 = راکتانس سلفی نشتی گردانه در هر فاز درحال‌سکون باشند ،دراین صورت خواهیم‌داشت :

$$T = \frac{p}{\omega}\frac{E_2^2 r_2}{(r_2^2 + s^2 x_2^2)} \qquad (۸۷-۳)$$

مشتق رابطه اخیر نسبت به لغزش s و معادل صفر قرار دادن آن رابطه گشتاور بیشینه را به صورت زیر نتیجه می‌دهد :

$$T_{max} = \frac{p}{\omega}\frac{E_2^2}{2x_2} \qquad (۸۸-۳)$$

این گشتاور در لغزش زیر بوقوع می‌پیوندد :

$$s = \frac{r_2}{x_2} = a \quad (\text{فرض می‌شود}) \qquad (۸۹-۳)$$

اگر افت ولتاژ در دو سر امپدانس ایستانه (استاتور) $I_1(r_1 + jx_1)$ قابل اغماض باشد ، که این امر با بزرگتر شدن موتورها قابل قبولتر است ، در مورد فلـوی مغناطیسی ثابت خواهیـم داشت :

$$V \propto E_1 \propto E_2 \propto \omega \qquad (۹۰-۳)$$

و چون

$$x_2 \propto \omega \qquad (۹۱-۳)$$

بنابراین در هر فرکانسی رابطه زیر با تقریب خیلی کم صادق خواهد بود .

$$T_{max} = \text{مقدار ثابت} \qquad (۹۲-۳)$$

به این ترتیب تا زمانی که ولتاژ اعمال شده به موتور با فرکانس متناسب باشد ، گشتـاور بیشینه موجود درهرفرکانس مقدار ثابتی‌خواهد بود . همچنین با استفاده از روابط(۳ ــ ۸۸)، (۳ ــ ۹۰) رابطه زیر برای هر مقدار لغزش به دست می‌آید :

$$T = T_{max}\frac{2as}{a^2 + s^2} \qquad (۹۳-۳)$$

و

$$a \propto \frac{1}{\omega} \qquad (۹۴-۳)$$

البته به شرطی که r_2 را بتوان مستقل از فرکانس فرض کرد و راکتانس نشتی را نیز ثابت دانست . در موقع راه اندازی مقدار لغزش یک است و گشتـاور راه اندازی از رابطه (۳ ــ ۹۳) به صورت زیر خواهد بود :

$$T_{ST} = T_{max}\frac{2a}{a^2 + 1} \qquad (۹۵-۳)$$

یا :

$$T_{ST} = \text{مقدار ثابت} \times \frac{\omega}{b^2 + \omega^2} \qquad (۹۶-۳)$$

که درآن b ثابت‌دیگری است . هرگاه فرکانس منبع تغذیه افزایش یابد مخرج رابطه (۳ ــ ۹۶) بیشتر از صورت افزایش پیدا کرده و نشان می‌دهد که در فرکانسهای زیـاد گشتاور راه اندازی مقدار کمتری خواهد داشت .

از روابط (۳ ــ ۹۲) و (۳ ــ ۹۶) می‌توان مشخصه‌ها را طبق شکل (۳ ــ ۱۷) رسم کرد. وجود گشتاور راه‌اندازی زیاد در فرکانسهای پایین مزیتی است که در کاربرد محرکهای کششی مخصوصا" موقعی که ولتاژ اعمال شده نسبتا کمتر باشد اهمیت زیادی دارد. نکات دیگری که لازم به یادآوری است این است که در لغزشهای کم و موقع کار موتور گشتاور برای فرکانسهای زیاد بیشتر از فرکانسهای کم است و رابطه بین گشتاور و لغزش تقریبا خطی است. درگشتاور بار ویژه‌ای اسب بخار خروجی به‌طور مستقیم متناسب با فرکانس است و با افزایش فرکانس بازده نیز افزایش می‌یابد. نکته اخیر توسط رابطه زیر برای بازده به فرمول درمی‌آید.

$$\eta = \frac{P_m - \text{تلفات اصطکاک و تهویه}}{P_1 + \text{تلفات هسته و تلفات مسی ایستانه}} \qquad (۳ــ۹۷)$$

با صرفنظر کردن از تلفات، رابطه فوق را می‌توان به صورت ساده زیر نوشت:

$$\eta \simeq \frac{P_m}{P_1} \qquad (۳ــ۹۸)$$

بنابراین طبق رابطه (۳ ــ ۸۳)

$$\eta \sim (1 - s). \qquad (۳ــ۹۹)$$

با استفاده از اطلاعات نشان داده شده در شکل (۳ ــ ۱۷) برای گشتاور بار ثابت، با افزایش فرکانس منبع تغذیه مقدار لغزش، s تقلیل خواهد یافت. همچنین بازده موتور با (افزایش) فرکانس افزایش می‌یابد. شایسته است که موتور، به منظور سرعت گرفتن پرشتابش، با فرکانس کمی که گشتاور زیادی دربرخواهد داشت راه‌اندازی شود. اما این [نیز] یک اقدام لازم اقتصادی است که [موتور] در بالاترین فرکانس ممکن گردانده شود. با به دست آوردن فلوی مغناطیسی تقریبا ثابت و درنتیجه گشتاور قابل‌دسترسی بیشینه درتمام سرعتها توسط ولتاژ اعمال‌شده‌ای که با فرکانس تناسب مستقیمی داشته باشد، اسب بخار خروجی متناسب با سرعت و در نتیجه با فرکانس افزایش خواهد یافت. این افزایش موردنیاز نیست و همیشه نیز امکان‌پذیرنمی‌شود. در فرکانسهای خیلی پایین موقعی که راکتانس خیلی کوچک می‌شود محدود سازی جریان تنها توسط مقاومت سیم‌پیچی عملی می‌شود. در نتیجه ولتاژ زیادتر در فرکانس پایینی، اگرگشتاور زیادی مورد نیاز باشد مطلوب خواهد بود. اغلب مثلا" در مورد محرکهای کششی، بیشتر از سرعت معینی توان ثابتی مورد نیاز است، به این منظور زمانی که فرکانس افزایش می‌یابد، ولتاژ را بایستی ثابت نگهداشت. در کاربردهای مختلف بایستی مشخصه‌های نسبت ولتاژ بر فرکانس را در چهارچوب کارکرد بهینه موتور برنامه‌ریزی کرد.

در این تحلیل تقریبهایی در نظر گرفته شد، از آن جمله تناسب ولتاژ با فرکانس، و همواره فرض بر این بود که مقادیر سینوسی باشند. در مورد وارونگرهای نیمه هادی این موضوع

بایستی مد نظر قرار گیرد . علاوه بر این خارج ازگستره محدودی‌از فرکانس بایستی ولتاژ ثابت نگهداشته شود ؛ ولی کاهش فرکانس بیش از حد معینی باعث اشباع مغناطیسی می‌شودو تلفات زیادتری ایجاد می‌کند .

۳ ــ ۲ در مورد مدار جا به جایی وارونگر مک‌ماری (به‌مثال ۳ ــ ۲ و قسمت ۳ ــ ۳ ــ ۱پ (۱) مراجعه شود) ثابت کنید که :

$$C = ۰/۸۹۳ \frac{I_L t_0}{E_c}$$ فاراد

و

$$L = ۰/۳۹۷ \frac{E_c t_0}{I_L}$$ هانری

۳ ــ ۳ . ثابت کنید که اولین هارمونیک بعد از مولفه اصلی درخروجی وارونگری باخنثی سازی هارمونیک قسمت (۳ ــ ۳ ــ ۱ ــ ۵ ــ پ) ، هارمونیک یازدهم است .

۳ ــ ۴ . نشان دهید که چطور یک وارونگر واقع در مدار گردانه موتور القایی یک وسیله کنترل سرعت است .

این موضوع بیشتر به کنترل ولتاژ تزریق شده بــه گردانه (روتور) مربوط است تا کنترل فرکانس؛ ولتاژ تزریق شده به حلقه‌های لغزان گردانــه بایستی دارای فرکانسی مشابــه فرکانس جریان گردانه باشد ، علت استفاده از وارونگر نیز همین است .

اگر گردانه سیم‌پیچی شده یک‌موتورالقایی دارای‌سرهای خروجی اتصال‌یافته به حلقه‌های لغزان باشد ، می‌توان ترتیبی داد که فازهای آن مــدار باز باشند . این امر از عبور جریان در سیم‌پیچی گردانه جلوگیری می‌کند . لذا گشتاور و بنابراین سرعت گردانه صفــر خواهند بود . بنابراین اگر ولتاژی از یک منبع تغذیه خارجی به سیم‌پیچی گردانه از طریق حلقه‌های لغــزان تزریق شود بین این ولتاژ و نیروی محرکه الکتریکی القایی ترانسفورماتور به سیم پیچی گردانه تداخلی به وجود آمده و عبور جریانی را موجب می‌شود . گشتاور الکترومغناطیسی ثابت موثری موتور القایی را در سرعت پایدار معینی با در نظر گرفتن اینکه فرکانس ولتاژ تزریق شده مشابه فرکانس نیروی محرکه القایی گردانه باشد به حرکت وادار خواهدکرد . تغییردامنه یا فاز ولتاژ تزریق‌شده جریان را وادار به‌تغییرمی‌کند که این تغییر به نوبه خود روی‌گشتاور نیز اثر می‌گذارد و در نتیجه سرعت پایدار جدیدی به وجود می‌آید .

این موضوع به وضوح با بررسی نمایش مداری موتور القایی که دارای ولتاژ تزریق شده‌ای به گردانه آن است روشن می‌شود . معادله حلقه‌ای[1] مدار ثانویه موتور به صورت فازوری عبــارت است از :

1- Mesh

$$s\bar{E}_2 \pm \bar{E}_k = \bar{I}_2(r_2 + jsx_2) = \bar{I}_2\bar{Z}_2$$

که در آن Ek ولتاژ تزریق شده به گردانه از منبع تغذیه خارجی است.

موتور القایی اساسا موتور سرعت ثابت یا تقریبا شبیه آن است، بنابراین حالت بی‌باری تعبیر و تفسیر معادله فوق را ساده خواهد ساخت. در حالت بی‌باری تنها فائق آمدن گشتاور بـر اصطکاک برای کار موتور کافی است، به طوری که جریان گردانه یا جریان در ثانویه تقریبا صفر است. در نتیجه برای حالت بی‌باری داریم:

$$s\bar{E}_2 \pm \bar{E}_k \simeq 0$$

بنابراین مقدار لغزش عبارت است از:

$$s = \mp \left|\frac{E_k}{E_2}\right| = \mp k$$

(فرض می‌شود)

E_2 مقـــدار نیروی محرکـه القایـی گردانه در هر فاز در حالت سکون[1] و یا در فرکانس منبع تغذیه($s = 1$)است و بنابراین مقدار ثابتی است. اکنون لغزش مستقیما متناسب با مقدار ولتـاژ تزریق شده است و چیزی که اهمیت دارد علامت لغزش است که می‌تواند منفی‌نیز باشد، واین به مفهوم دسترسی به سرعت فوق سنکرون است. سرعت بی‌بار عبارت است از:

$$n_0 = (1 \pm k)n_s$$

که در آن n_s سرعت سنکرون موتور است که با فرکانس منبع تغذیه و تعدادقطبهای ایستانه‌معین می‌شود.

برای موتورهای القایی مخصوصا آنهایی که دارای نسبت مقاومت به راکتانس سلفی کمی هستند تغییرات سرعت بین بی‌باری و بار کامل کوچک‌است. بنابراین گرایش عمومی سرعت در هر باری عبارت است از:

$$n \simeq n_0 = (1 \pm k)n_s.$$

با ولتاژ تزریق شده‌ای که سرعتهای زیر و فوق سنکرون را مجاز می‌سازد، منطقی خواهد بود که فرض شود سرعت سنکرون واقعی (از موتور در هر باری) می‌تواند به دست آید. دراین سرعت لغزش صفر است و جریـان گردانه دارای فرکانس صفر خواهد بود. در نتیجه، ولتاژ القا شده یک ولتاژ جریان مستقیم است. موتور القایی که درست با سرعت سنکرون کار کنـد در حقیقت حالت خاصی از ولتاژ تزریق شده است و تبدیل به موتور القایی سنکرون می‌شود. عملکرد این موتور در طول راه‌اندازی مثل موتور القایی است، سپس جریان مستقیمی بـه داخل سیم‌پیچی گردانه تزریق می‌شود وموتور باسرعت سنکرون، یعنـی، در سرعـت ثابتی مثل ماشین‌سنکرون می‌چرخد.

1- Stand still

روشهای کاربرد ولتاژ تزریق شده به منظور رسیدن به سرعت قابل تنظیم متعدد است. روشها از ساده‌ترین ولی پرتلفات‌ترین شیوه که در حقیقت اتصال مقاومت متغیر بین حلقه‌های لغزان است تا استفاده از ماشینهای جا به جاکن دار برای اخذ یا برگشت دادن‌توان لغزشی به منبع تغذیه اصلی، به منظور رسیدن به بازده بیشینه تغییر می‌کنند.

معمولترین شیوه برای داشتن ولتاژ ثانویه القایی گردانه و ولتاژ تزریق شده واقعی در همان فرکانس، نیازمند استفاده از جا به جاکن روی محور گردانه است‌تابه صورت تعویض‌کننده فرکانس عمل کند. حال وارونگر می‌تواند جایگزین ماشین جا به جاکن دار شود.

۳ ــ ۵ . یک وارون‌ضربه‌ای جابه‌جا شونده کمکی، به شکلی بنیادی، در شکل ۳ ــ ۶۰ تصویر شده است. عملکرد آنرا توضیح دهید، و جا به جایی مدار بـه منظور تعیین فرکانس بیشینه وارونگر را تحلیل کنید.

ملاحظه شکل ۳ ــ ۶۰ (ب) برای‌توضیح عملکرد کافی‌است که در اصل همان شکل ۲ ــ ۲۶ است که برای راحتی در اینجا تکرار شده است. مقدار خازن بایستی به حد کافی زیاد باشدتا اینکـه بار موثر همیشه دارای ضریب قدرت پیش فاز باشد. موقعی کـه تیریستور $TH1$ در زمان $t = 0$ راه‌اندازی می‌شود:

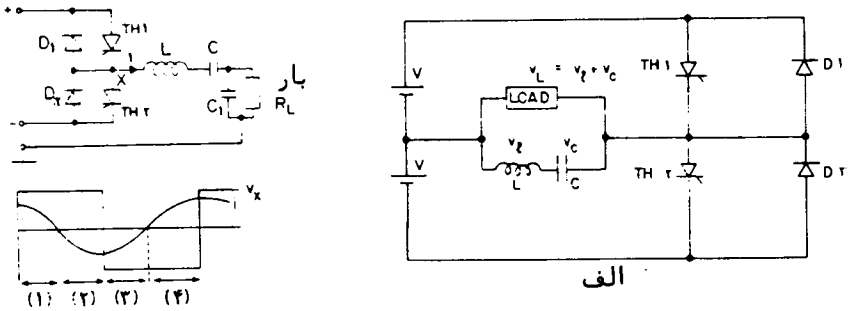
$$V = \frac{1}{C}\int_0^t i_c \, dt + L\frac{di_c}{dt}. \qquad (۳ــ۱۰۰)$$

اگر مقدار اولیه جریان خازن برابر باشد با:

$$i_c(0+) = I \qquad (۳ــ۱۰۱)$$

ومقدار ولتاژ اولیه خازن صفرباشد تبدیل لاپلاس معادله (۳ ــ ۱۰۰) به صورت زیر خواهدبود:

$$\frac{V}{s} = \frac{1}{sC} i_c(s) + Lsi_c(s) - LI. \qquad (۳ــ۱۰۲)$$



شکل ۳ ــ ۶۰ (الف) و (ب) وارونگر ضربه‌ای جابه جاشونده کمکی.

به طوری که :

$$i_c(s) = \frac{v/L + sI}{s^2 + 1/LC}. \qquad (۱۰۳-۳)$$

بنابراین از عکس تبدیل لاپلاس نتیجه می‌شود که :

$$i_c(t) = \frac{v}{s} \sin \omega t + I \cos \omega t \qquad (۱۰۴-۳)$$

که در آن :

$$x = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

POWEREN.IR

و به طور مشابه

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (۱۰۵-۳)$$

$$v_c = V + xI \sin \omega t - V \cos \omega t.$$

دوره[تناوب] T ولتاژ موج مربعی بین دو سر بار زمان یک سیکل کامل است ، یعنی $TH1$ روشن ، $D1$ روشن و $TH1$ خاموش ، $TH2$ روشن و $D2$ روشن و $TH2$ خاموش . این دوره[تناوب] مشابه دوره تناوب v_c است . رابطه زیر را در نظر می‌گیریم :

$$T = \frac{2\pi + \theta}{\omega}. \qquad (۱۰۶-۳)$$

بیشینه جریان جا به جایی موقعی رخ می‌دهد که :

$$\omega t = \frac{\theta}{4}$$

با جایگزینی این رابطه در رابطه (۳ ــ ۱۰۴) نتیجه می‌شود :

$$\hat{I}_c = \frac{v}{x} \sin \frac{\theta}{4} + I \cos \frac{\theta}{4}. \qquad (۱۰۷-۳)$$

مقدار I از رابطه (۳ ــ ۱۰۴) یا محاسبه i_c در آخر نیم سیکل بدست می‌آید ؛ یعنی :

$$\omega t = \frac{\omega T}{2} = \pi + \frac{\theta}{2}.$$

بنابراین :

$$I = \frac{v}{x}\cot\frac{\theta}{۴}. \qquad (۱۰۸-۳)$$

حداکثر ولتاژ $\hat{V}_c$ دو سر خازن موقعی رخ می‌دهد که :

$$\omega t = \frac{\pi}{۲} + \frac{\theta}{۴}$$

و عبارت است از :

$$\hat{v}_c = V + xI\cos\frac{\theta}{۴} + V\sin\frac{\theta}{۴}. \qquad (۱۰۹-۳)$$

جایگزینی مقدار I در این رابطه نتیجه می‌دهد که :

$$\hat{v}_c = V\left(۱ + \operatorname{cosec}\frac{\theta}{۴}\right). \qquad (۱۱۰-۳)$$

حاصلضرب دو رابطه :

$$\frac{C\hat{v}_c^{۲}}{TIV} = \frac{(۱ + \operatorname{cosec}\theta/۴)^{۲}}{(۲\pi + \theta)\cot\theta/۴} \qquad (۱۱۱-۳)$$

و

$$\frac{L\hat{i}_c^{۲}}{TIV} = \frac{\sec^{۲}(\theta/۴)\cot(\theta/۴)}{۲\pi + \theta} \qquad (۱۱۲-۳)$$

متناسب با مقادیر حدی انرژی ذخیره شده به ترتیب در خازن و یا سلف است . درمجموع موقعی که $\theta/۴$ تقریبا ۴۵ درجه ، انتخاب بهینه برای $\theta/۴$، است کمینه خواهد بود . زمان خاموشی ، t_{off} دست‌یافتنی‌برای‌خاموشی ، زمانی‌است‌که‌دیود قبل‌از روشن‌شدن تیریستور بعدی روشن شود ، در نتیجه :

$$t_{off} = \frac{(\theta/۲)}{\omega} = \frac{(\theta/۴)T}{\pi + (\theta/۲)} \qquad (۱۱۳-۳)$$

موقعی که

$$\frac{\theta}{۴} \simeq \frac{\pi}{۴}$$

پس :

$$t_{off} = \frac{T}{۶}. \qquad (۱۱۴-۳)$$

رابطه اخیر معرف بیشینه فرکانسی است که وارونگر می‌تواند با آن به کار خود ادامه دهد .

۳ ــ ۶ . وارونگر شکلهای ۳ ــ ۱۹ (پ) ، ۳ ــ ۲۰ (الف) و ۳ ــ ۲۱ را با فرض اینکه سلف L دارای مقدار بینهایت باشد در نظر بگیرید . مقدار بار مدار اهمی $۳۰R_L$ اهم و $n = ۱$ است . زمان خاموشی بیشینه تیریستور را برای عمل رضایتبخش وارونگر در صورتی که ظرفیت خازن جابه‌جایی ۰/۱۸ میکروفاراد باشد ، تعیین کنید .

جواب : ۱۵ میکروثانیه

۳ ــ ۷ . وارونگر تک‌فازی را از نوع شکل ۳ ــ ۱۸ (پ) با اضافه کردن سلفی سری شده با پیل و یک خازن جابه‌جایی که خود با بار اهمی ۳۰ اهمی موازی است ، در نظر بگیرید . در صورتی که برای برقراری جریان پیوسته پیل مقدار سلف L بینهایت فرض شود . مقدار خازن برای عمل

رضایتبخش وارونگر موقعی که زمان خاموشی هر تیریستور ۳۰ میکروثانیه باشد چقدر است؟

جواب: ۱/۴۴ میکروفاراد

۳ ــ ۸ . وارونگر سه فاز نشان داده شده در شکل ۳ ــ ۲۹ با شکل موج ولتاژ خروجی طبق شکل ۳ ــ ۳۰ مفروض است . توسط سری فوریه دامنه‌های تا پنجمین هارمونیک ولتاژ خط خروجی را تعیین کنید . $\frac{\sqrt{6}}{\pi}V$ ، ۰ ، ۰ ، ۰ ، $\frac{\sqrt{6}}{5\pi}V$

۳ ــ ۹ . وارونگر سه فاز نشان‌داده شده در شکل ۳ ــ ۲۹ مفروض است . اگر بار وارونگر یک موتور القایی باشد . هارمونیک پنجم خط ولتاژ چه اثری روی کار موتور خواهد گذاشت؟

فصل چهارم

کنترل موتور جریان مستقیم

۴ ـ ۱ مقدمه

ماشین جریان مستقیم پیش از شروع قرن حاضر؛ یعنی، موقعی که منبع تغذیه موجود جریان مستقیم بود ساخته شد. امروزه تعداد کثیری موتور جریان مستقیم به‌علت اینکه دارای مشخصه‌های خوب و مناسبی برای اکثر محرکهای سرعت متغیر هستند هنوز ساخته می‌شوند.

موتورهای جریان‌مستقیم علی‌رغم مزایای ذکرشده دارای معایب‌ونقصهای زیادی هستند. برای آنها بایستی منابع تغذیه قدرت جریان مستقیم مخصوصی تولید کرد. [از نظر مقایسه] برای توان مشابهی موتورهای جریان‌مستقیم‌نسبت به موتورهای القایی بزرگتر وگران قیمت‌ترند به استثنای موتورهای خیلی کوچک موتورهای جریان مستقیم به‌منظور محدود کردن جریان‌زیاد (جریان تهاجمی) نیاز به تدابیر خاصی برای راه‌اندازی دارند. همچنین‌به علت وجود جا ـ به جا کن در موتورهای جریان مستقیم این ماشینها احتیاج به نگهداری و تعمیرات بیشتری نسبت به موتورهای القایی دارند. جا به جاکنها محدودیتهای دیگری نیز به وجود می‌آورند. انتقال جریان از هادیهای ساکن به هادیهای متحرک مستلزم داشتن اتصالات لغزنده است که باعث قطع و وصل جریان در کلافهای[1] سیم‌پیچی و در نتیجه باعث تغییر فرکانس می‌شوند. در جاروبکها به خاطر وجود اصطکاک و جرقه و قوس الکتریکی سائیدگی ایجاد خواهد شد. حداکثر ولتاژ بین تیغه‌های[2] جابه‌جاکن برای جا به جایی موفقیت آمیز، در حدود ۲۰ ولت است. لذا حداکثر ولتاژ ورودی برای موتورهای جریان مستقیم نمی‌تواند بالاتر از ۶۰۰ ولت باشد در صورتی که به ورودی موتورهای القایی می‌توان تا چندین کیلو ولت اعمال کرد.

1- Coil 2- Segment

علی‌رغم معایب ذکر شده ، موتورهای جریان مستقیم دارای مزایایی هم هستند . یکی از مشخصات اصلی آنها داشتن گشتاور راه‌اندازی خیلی زیاد است که در محرکهای کششی مورد نیاز است . گستره تغییرات سرعت آنها هم در زیر و هم در بالای سرعت اسمی خیلی وسیع است . بالاخره روشهای کنترل این موتورها در اکثر مواقع برای دسترسی به مشخصه‌های کاری مشابه ، ساده‌تر و ارزانتر از روشهای کنترل موتورهای جریان متناوب هستند . این چند مزیت برای جبران معایب‌ذکر شده در مواردی که کاربرد محرک‌سرعت ثابت الزامی‌نیست کافی به نظر می‌رسد .

۴ ـ ۲ راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم

کلیه موتورهای جریان مستقیم به استثنای موتورهای خیلی کوچک بایستی در موقع راه‌اندازی به خاطر ممانعت از عبور جریان ورودی خیلی زیاد به ماشین ، که موجب گرما و خرابی عایق‌بندی آن می‌شود تحت کنترل قرار گیرند .

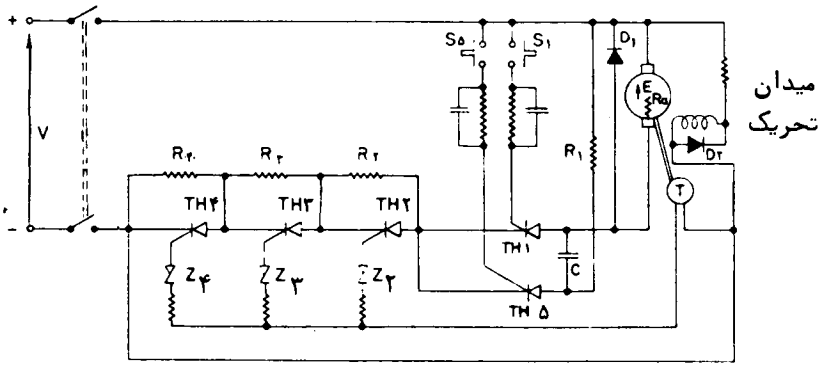
اصول راه‌اندازی تغییر نمی‌کنند ولی روشهای محدود کردن جریان تا میزان مورد قبولی که از نقطه نظر محیطی و اقتصادی مناسب باشد قابل تغییر هستند . موقعی که مقاومتها به‌طور مکانیکی وسیله اتصال لغزنده و یا اتصال دهنده[1] ها از مدار خارج می‌شوند [در لحظه قطع] جرقه و قوس الکتریکی به وجود می‌آید که باعث‌ساییدگی اتصالات‌می‌شود وبه نگهداری وترمیم دقیقی احتیاج دارد با این حال این روشهای معمول ارزان و ساده هستند .

کاربرد الکترونیک قدرت می‌تواند کلیه قسمتهای متحرک راه اندازمقاومتی را حذف‌کند ؛ و یا می‌توان از تیریستور ، به ویژه به منظور راه‌اندازی و کنترل سرعت ، برای جایگزینی راه‌اندازهای معمولی استفاده کرد .

۴ ـ ۲ ـ ۱ تیریستورها و راه انداز مقاومتی

شکل ۴ ـ ۱ آرایش یک راه انداز مقاومتی بدون قسمتهای متحرک را نشان می‌دهد که در آن تیریستورها عمل قطع و وصل اتصالات‌مکانیکی را انجام ، و راه انداز خودکار بدون قسمتهای متحرک را تشکیل می‌دهند . موقعی که کلید راه‌انداز قدرت کم S_1 وصل می‌شود . تیریستور TH_1 روشن و عبور جریان از آرمیچر شروع می‌شود . جریان توسط مقاومتهای R_2 ، R_3 و R_4 محدود می‌شود . کلید راه‌انداز S_1 تبادل قدرتی معادل چند میلی وات و یا حداکثر چند وات را به عهده می‌گیرد . در صورتی که اتصال دهنده‌های معمولی قدرتی معادل چند هزار برابر بیشتر از آن را بایستی تقبل کند . جریان بار کامل میدان به محض اتصال کلید اصلی برقرار

1- Contactor



شکل ۴ ــ ۱ راه‌انداز مقاومتی بدون قسمتهای متحرک

می‌شود .

اکنون فرایند راه‌اندازی خودکار است ، به این ترتیب که به محض شروع جریان آرمیچر خازن جا به جاکن C شروع به باردار شدن می‌کند . جریان آرمیچر ومیدان تحریک‌برای شتاب دادن به آرمیچر و بار ، تولید گشتاور الکترومغناطیسی می‌کنند . با افزایش سرعت ، نیروی ضد محرکه E آرمیچر افزایش می‌یابد . جریان آرمیچرکاهش پیدامی‌کند و ولتاژ خروجی مولدسنجش[1] تا موقعی که دیود زنر Z_2 به ولتاژ شکست برسد و تیریستور$TH2$را راه‌اندازی کند افزایش می‌یابد . پس از هدایت تیریستور$TH2$مقاومت R_2 اتصال کوتاه می‌شود و جریان آرمیچردوباره شروع به افزایش می‌کند . در نتیجه گشتاور و سرعت افزایش می‌یابند و دوره عملیات‌فوق تکرار می‌شود ، تا این که کلیه مقاومتها (سری شده برای راه‌اندازی) اتصال کوتاه شوند و موتوربا سرعت‌اسمی دوران کند . دیودهای زنر Z_2 و Z_3 و Z_4 را می‌توان برای حدود سرعتهای $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ سرعت اسمی قرار داد ، و مقاومتها نیز برای محدود کردن جریان زودگذر برای مقدار قابل قبولی تقسیم می‌شوند .

برای متوقف کردن موتور کافی است با اتصال کلید S_5 تیریستور $TH5$ را روشن کرد تا خازن C تخلیه شود و تیریستور$TH1$ را بایاس معکوس و خاموش کند ، در نتیجه تمام جریان آرمیچر موتور قطع می‌شود و تیریستورهای$TH2$ و$TH3$ و$TH4$مسدود خواهند شد[تا در موقع احتیاج به روشن شدن دوباره موتور ، مراحل مذکور را تکرار کنند] .

1- Tacho genarator

۴ـ ۲ـ ۲ راه‌اندازی تیریستوری بدون مقاومت

حذف کلیه مقاومتهای مورد لزوم در راه‌اندازی ، مستلزم استفاده از اصل برش ولتاژ است . که برای این منظور منبع تغذیه را به طور سریع قطع و وصل می‌کنند تا نسبت زمان قطع ولتاژ به زمان وصل آن‌به طورمتغیر به دست‌آید . این‌نسبت بعضی مواقع‌نسبت فضا ـ علامت[1] نامیده می‌شود که تغییر آن باعث تغییر مقدار متوسط ولتاژ و در نتیجه مقدار متوسط‌جریان آرمیچر می‌شود . برای محدود کردن جریان موقعی که موتور شروع به حرکت می‌کند ولتاژ متوسط کمی موردنیاز است‌وبه تدریج نسبت‌فضا ـ علامت زیاد می‌شود تا به مقدار حداکثر خود در سرعت اسمی برسد . مدار تیریستوری که این عمل را انجام می‌دهد به مدار برشگر موسوم است .

روش راه‌اندازی بدون مقاومت دارای بازده بیشتری‌است‌ومزیت عمده‌این‌سیستم‌خودکار‌بودن و به حداقل رساندن زمان راه‌اندازی است .

در اینجا تنها به خلاصه‌ای از مدارهای برشگر به عنوان راه‌انداز اشاره می‌شود . رفتار این مدارها در قسمت کنترل سرعت موتور جریان مستقیم به طورمفصل تشریح خواهد شد . شکل ۴ ـ ۲ مدار برشگر ساده‌ای را که فاقد تیریستورهای حفاظتی است نشان می‌دهد . این مدار از نوع خاموشی LC تشدیدی یا نوسانی به همراهی یک تیریستور کمکی به منظور کنترل جابه‌جایی است .

تیریستور TH_1 برای یک فاصله خاصی روشن می‌شود . جریان آرمیچر تامقدارتعیین شده‌ای توسط این فاصله زمانی (روشن‌شدن‌تیریستور) و مقاومت مدار صعودمی‌کند . میزان صعود جریان توسط سلف‌آرمیچر وسلف‌صافی اضافه‌شده L_1 که تیریستور را نیزمحافظت‌می‌کند محدودمی‌شود . تیریستور TH_1 سپس برای مدت زمان معین دیگری خاموش می‌شود و دراین‌مدت جریان آرمیچر شروع به کاهش از طریق دیود D_1 می‌کند و منبع تغذیه در این فاصله هیچ جریانی از مدارعبور نمی‌دهد . روشن و خاموش شدن تیریستور همان طور که شرح داده شد تا رسیدن سرعت‌موتور به سرعت اسمی تکرار و ادامه خواهد یافت .

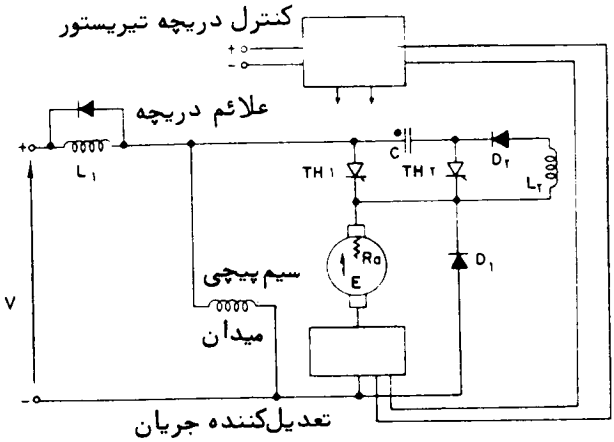
یک راه برای ایجاد بهترین نسبت‌فضاـ علامت‌به منظور دسترسی به سرعت اسمی موتور در حداقل زمان ممکن داشتن یک وسیله تعدیل و کنترل کننده [2] جریان سری با آرمیچر است . موقعی که جریان تا مقدار تعیین شده‌ای افزایش می‌یابد علامتی از وسیله تعدیل کننده برای خاموشی تیریستور اصلی ارسال می‌شود همچنین طبق شکل ۴ ـ ۳ موقعی که جریان به مقدار معینی کاهش پیدا می‌کند از همان وسیله تعدیل کننده علامت دیگری تیریستور اصلی را روشن می‌کند تا جریان شروع به افزایش کند و عملیات تکرار شود .

روشن شدن تیریستور با اعمال علامتی به‌دریچه‌تیریستور TH_1 انجام‌می‌گیردولی‌خاموش

1- Mark Space Ratio 2- Monitor

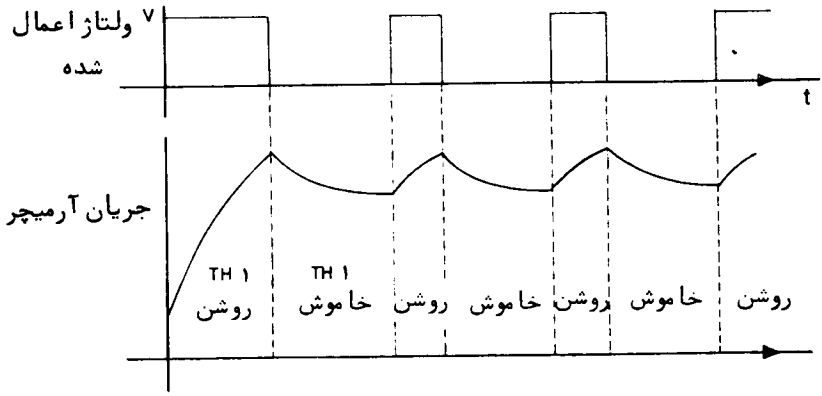
کردن آن احتیاج به تیریستور دیگر TH_2 خواهد داشت . مدار تشدید شامل TH_2 ، خازن C ، دیود D_2، و سلف L_2 است . ترتیب عملکرد مدار طوری است که تیریستور TH_2 بایستی قبل از همه علامتی روی دریچه دریافت کند . این علامت آن را روشن ، و خازن C را به‌طور مثبت‌در محل علامت‌گذاری شده باردار می‌کند . به محض اینکه خازن باردار شد تیریستور TH_2 به‌طور طبیعی خاموش می‌شود زیرا ولتاژ دو سر آن به صفر تقلیل می‌یابد .

اکنون علامت دریچه به تیریستور TH_2 اعمال شده ، آن را به هدایت وامی‌دارد و عبور جریان در آرمیچر موتور را مجاز می‌سازد . در همان زمان ، خازن C از طریق TH_1 و سلف L_2 و D_2 شروع به خالی شدن می‌کند . به خاطر طبیعت نوسانی این مدار ، ناشی‌از وجود L_2 ،خازن C نه تنها تخلیه می‌شود بلکه با قطبیت معکوس دوباره باردار شده و دیود D_2 بارهای‌جمع شده روی خازن را نگه می‌دارد . اکنون ولتاژ روی خازن در صفحه علامت‌گذاری شده $+V$ و درصفحه دیگر آن حدود $2V+$ است . موقعی که جریان آرمیچر به مقدار حداکثر جریان مجازافزایش یافت دوباره علامتی به دریچه تیریستور TH_2 اعمال می‌شود تا آن را روشن کند . تخلیه خازن C از طریق تیریستور TH_2 تیریستور TH_1 را بایاس معکوس می‌کند و آن را خاموش می‌سازد . دور عملیات تا موقعی که جریان آرمیچر به یک مقدار معینی کاهش پیدانکرده است‌تا وسیله‌تعدیل‌کننده به طور غیر مستقیم تیریستور TH_1 را دوباره روشن کند ، تکرار نمی‌شود .



شکل ۴ ــ ۲ راه‌انداز موتور بدون مقاومت

مفهوم کلی این مدار آن را بیشتر از راه‌اندازی متنوع می‌سازد ، مضافا بر این که سرعت باتغییرمقدار متوسط ولتاژقابل‌تنظیم است‌و موتورهای خود کنترل (سروو موتور) قطع ــ وصل بزرگ نیز می‌توانند در برگیرنده این شکل کنترل باشند .



شکل ۴ ــ ۳ جریان آرمیچر کنترل شده توسط نسبت فضا ــ علامت

۴-۳ کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم

وارون‌سازی و احیا سازی یا ترمزکنی پویای[1] (ترمز دینامیکی) ماشین، ارتباط ذاتی با کنترل سرعت دارد. برای تنظیم سرعت عوامل کنترل کننده را می‌توان از روابط اصلی حالت پایدار ماشین به وضوح دید.

$$E = \frac{p}{a}\phi n Z \qquad (۱-۴)$$

$$V = E - IR_a \qquad (۲-۴)$$

و

$$\varphi = K_1 I_f, \qquad (۳-۴)$$

که در آن

E = نیروی محرکه الکتریکی القا شده برحسب ولت

p = تعداد زوج قطبها

a = تعداد زوج مسیرهای موازی کلافهای آرمیچر

ϕ = حداکثر فلوی [مفید] هر قطب برحسب وبر

n = سرعت آرمیچر برحسب دور در ثانیه

Z = تعداد کل هادیهای آرمیچر به طور سری

V = ولتاژ منبع تغذیه یا ولتاژ ورودی برحسب ولت

I = جریان آرمیچر بر حسب آمپر

1- Dynamic

R_a = کل مقاومت آرمیچر برحسب اهم

K_1 = عدد ثابت فزونی[1] منحنی مغناطیس شدن و

I_f = جریان سیم پیچی میدان برحسب آمپر

با استفاده از روابط فوق رابطه سرعت به صورت زیر درمی‌آید :

$$n = \frac{V - IR_a}{KI_f}. \qquad (۴-۴)$$

جریان آرمیچر کمیتی است گسترش‌یاب[2] که به بار بستگی دارد . مقاومت آرمیچر R_a ، ولتاژ V وجریان‌میدان I_f کمیت‌های مشدد[3] هستندکه کنترل سرعت موتورها را تأمین‌می‌کنند. سرعت با ولتاژ اعمال شده به موتور ، به شرط کوچک بودن افت ولتاژ آرمیچر متناسب است . افزایش مقاومت معادل آرمیچر ویا افزودن مقاومت به ورودی موتور سبب کاهش سرعت می‌شود. کاهش جریان میدان تحریک سبب افزایش سرعت موتور خواهد شد . هر یک از روشهای مذکور به تنهایی دارای محدودیتهایی هستند . ولی ترکیب این روشها کاربردهای کنترل سرعت ، از قبیل تنظیم‌سرعت‌با گشتاور ثابت ، با اسب بخارثابت و یا هر دو متغیر را امکان‌پذیرمی‌سازد . برحسب متغیرهای گسترش یاب ، سرعت مستقیما با نیروی محرکه الکتریکی القا شده یا نیروی ضدمحرکه الکتریکی و به طور معکوس با فلوی مغناطیسی میدان اصلی متناسب است .

سه نوع موتور جریان مستقیم از نظر اتصال سیم‌پیچی میدان با آرمیچر به صورت میدان موازی و میدان سری و مختلط وجود دارد که تمامی دارای تناسب‌های مختلفی بین متغیرهای ولتاژ ، جریان و فلوی مغناطیسی هستند . بنابراین مشخصه‌های گشتاور ـ سرعت آنها مختلف خواهند بود . به همین دلیل وجود تعدادی متغیر قابل کنترل و تعدادی مشخصه‌های متفاوت، موتور جریان مستقیم را یک ماشین متنوع می‌سازد .

۴ - ۳ - ۱ کنترل سرعت تیریستوری

اصول عمومی کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم مشخص و معینی است . تیریستورها را می‌توان با ترکیب‌های مختلفی مورد استفاده قرار داد ، ولی در هریک از روشهای انتخاب‌شده مسئله کلی تنظیم ولتاژ اعمال شده به آرمیچر و یا به سیم‌پیچی میدان تحریک بایستی مدنظر قرار گیرد . البته در بعضی مواقع تنظیم هر دو نیز امکان‌پذیر است .

نوع منبع تغذیه می‌تواند یکی از دو نوع جریان متناوب و یا جریان مستقیم باشد . یک واحد تیریستوری تطبیق کننده[4] را می‌توان بین منبع تغذیه و موتور جریان مستقیم به منظور

1- Constant over much
2- Extensive
3- Intensive
4- Matching

کنترل سرعت قرار داد . دو نوع اصلی واحد تیریستوری وجود دارد . یکی واگردان (مبدل) تیریستوری که از جریان متناوب تغذیه می‌شود و دیگری مدار برشگر که از منبع جریان مستقیم تغذیه می‌کند . به جای نوع اول می‌توان از ترکیب واگردان غیر قابل کنترلی که ولتاژ جریان مستقیم ثابتی تولید می‌کند ، و مدار برشگر تیریستوری که ولتاژ خروجی جریان مستقیم متوسط قابل تنظیمی می‌دهد ، نیز استفاده کرد .

برای درجات تنظیم سرعت وعملکرد قابل اعتماد ، انواع مختلفی ازهر مدار تیریستوری پایه‌ای و اشکال گوناگون کنترل وجود دارد . در اینجا فقط به چند مثال می‌توان اشاره کرد تا روشهای ساخت سیستمهای خاص از سیستمهای عام روشن شود . منابع آخر این فصل گستره وسیعی از مثالهای ویژه کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم موجود را در دسترس قرار می‌دهند .

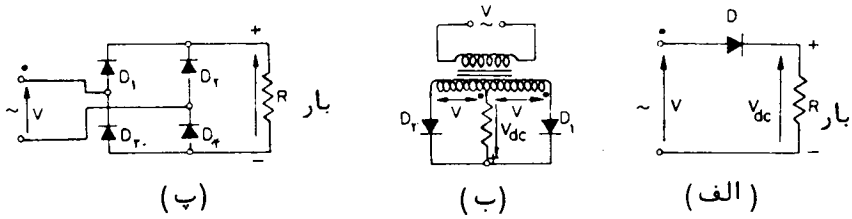
۴ ـ ۳ ـ ۲ واگردانهای یکسو کننده قابل کنترل تیریستوری

از اصطلاح واگردان موقعی استفاده می‌شود که منبع تغذیه جریان متناوب است و موتوری که تحت‌کنترل قرارخواهد گرفت ماشین جریان‌مستقیم باشد . از واگردانها علاوه برکنترل‌موتورها در کنترل میدان مولد برای سیستم وارد لئونارد نیز استفاده می‌شود ، و یا آنها می‌توانند جایگزین سیستم موتور ژنراتور و یا سیستم یکسوکننده قوس جیوه‌ای‌شوند . اگرچه در اکثرمواقع واگردانهای تیریستوری نسبتا گران قیمت‌تر هستند ولی در طول تمام ردیف باروکنترل سرعت با بازده بیشتری کار می‌کنند و از نظر سوار کردن و نصب‌سیستم دارای‌قیمتهای کمتری هستند.

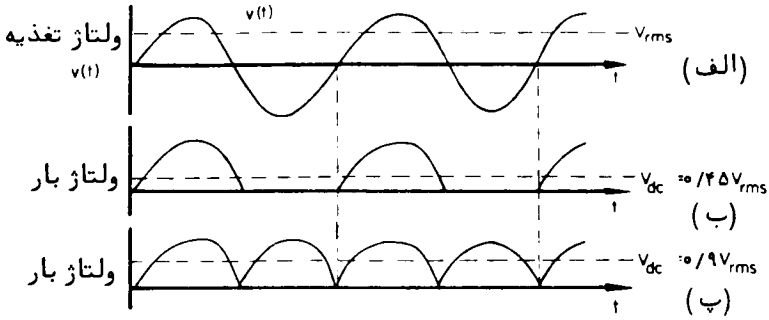
استفاده از واگردانهای تیریستوری به جای سیستم وارد لئونارد معایبی دارد . برخلاف مولدها که در احیاسازی عمل ترمز می‌توانند مثل موتور کار کنند ، جهت جریان در واگردانها نمی‌تواند معکوس شود . برای حل این‌مشکل ، موقعی‌که عمل احیاسازی‌موردنیاز باشد ، واگردان بایستی قادربه عمل وارون‌سازی باشد به طوری‌که بازوهای پل[درمدار واگردان‌حاوی‌تیریستور] قابل کنترل باشد . برای وارون‌سازی جایی که پاسخ آرام ، رضایتبخش باشد ، می‌توان تعویض جهت میدان تحریک‌موتور را به‌کار برد . به منظور دریافت پاسخ سریع یا کنترل موضعی دقیق دو واحد واگردان تیریستوری با اتصال‌پشت‌به پشت [مخالف] بایستی مورداستفاده قرارگیرد .

نوع واگردان به مقدار قدرتی که می‌تواند سر وکار داشته باشد و میزان‌تحمل مقدار ولتاژ تموجی بستگی خواهد داشت . برای قدرتهای کم از صفر تا ۲۰ کیلو وات مدارهای تکفاز کافی است ولی‌خود آنها انواع‌مختلفی‌دارند . شکل ۴ ـ ۴ ترکیبهای ممکن رابرای یکسوکننده‌های تکفاز غیر قابل کنترل نشان می‌دهد . در مدار نیم موج شکل ۴ ـ ۴ (الف) موقعی که منبع تغذیه جریان متناوب ، و محل علامت گذاری شده روی شکل مثبت باشد ، دیود D امپدانس ناچیزی درمقابل عبورجریان از خودنشان می‌دهد و ولتاژ کامل منبع تغذیه به صورت‌یک‌ولتاژ

جریان مستقیم متغیر بین دو سر مقاومت بار ظاهر می‌شود . موقعی که محل علامت گذاری شده در سیکل بعدی منفی می‌شود دیود جریان را مسدود می‌کند و امپدانس بینهایتی از خود نشان می‌دهد وتمام ولتاژ منبع تغذیه در دو سر دیود ظاهر ، و در دوسر بار ولتاژی معادل صفر ولت اعمال می‌شود . برای حالتهای دیگر نشان داده شده در شکل ، دیـودها دارای عمل مشابهی هستند . اما ترتیب قرار گرفتن آنها طوری است که استفاده بهتری از ولتاژ را امکان‌پذیر می‌سازند . موقعی که محل علامت‌گذاری شده مثبت باشد دیود D_1 هدایت می‌کند و در موقع منفی بودن در نیم سیکل بعدی دیود D_2 هدایت می‌کند . شکل مـوج ولتـاژها در شکل ۴ ــ ۵ بـه نمایش گذاشته شده است .



شکل ۴ ــ ۴ یکسوکننده‌های تک‌فاز غیرقابل کنترل (الف) مدار نیم موج (ب) مدار تمام موج با تغذیه انشعاب وسط (پ) مدار پل تمام موج



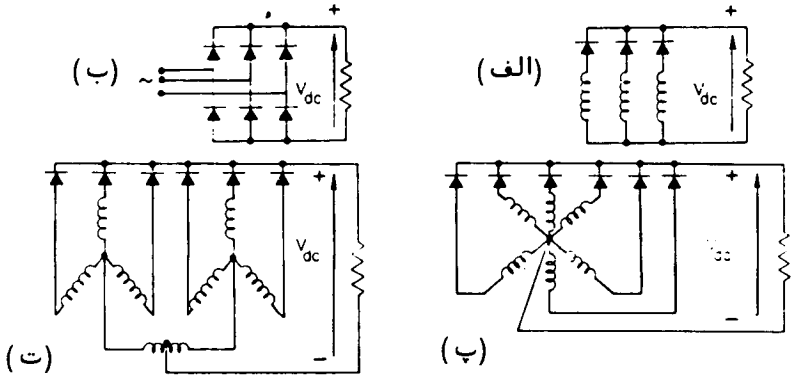
شکل ۴ ــ ۵ شکل موجهای ولتاژ یکسوکننده : (الف) ولتاژ منبع تغذیه (ب) ولتاژ خروجی نیم موج (ج) ولتاژ خروجی مدار انشعاب وسط و پل تمام موج

در قدرتهای زیاد ترتیب اتصال مدار تمام موج پل را می‌توان به مدارهای بامنبع تغذیه سه فاز و یا چند فاز انشعاب وسط تعمیم داد . تموج ولتاژ به لحاظ مقدار تـا حد زیادی کاهش می‌یابد ، ولی فرکانس تموج افزایش خواهد یافت . شکل ۴ ــ ۶ ترکیبهای ممکن برای یکسو ــ کننده‌های سه فاز و چند فاز را از قبیل سه فاز نیم موج ، تمام موج ، انشعاب‌وسط وحتی اتصال

ستاره دوتایی و شکل ۴ ــ ۷ شکل موجهای ولتاژ را نشان می‌دهند . تمام این‌یکسو کننده‌های غیرقابل‌کنترل ، ولتاژخروجی جریان‌مستقیمی بامقدار متوسط ثابت تولید می‌کنند . با تعویض چند یا کلیه دیودهای این مدارها با تیریستورها می‌توان ولتاژ خروجی قابل تنظیمی به‌دست آورد . روش تنظیم ، کنترل فاز است و روش جابه‌جایی تیریستور جا به جایی طبیعی یا فازی خواهد بود . هر یک از تیریستورها با ولتاژ جریان متناوبی کار می‌کنند و بنابراین در هر نیم سیکل گرایش معکوسی پیدا کرده وخاموش می‌شوند . مدارهای اساسی‌یکسوکننده‌های قابل‌کنترل با بعضی از شکل موجهای خروجی در شکل ۴ ــ ۸ نشان داده شده است . در این مدارها ترانسفورموتورها ، صافی‌ها و مدارهای حفاظتی و علامت‌دهی[1] نشان داده نشده است .

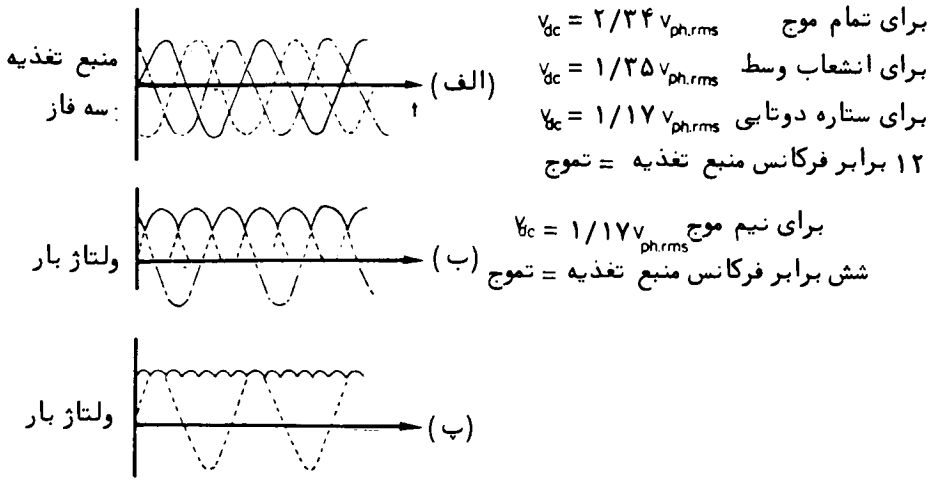
الف ــ واگردان تکفاز نیم موج

چون تنها نیمی‌ازقدرت موجود را می‌توان‌مورداستفاده قرارداد لذا مدار شکل ۴ ــ ۸ (الف) برای ماشینهای باقدرت کسری از اسب بخار محدود می‌شود . دراین‌مدار ترانسفورماتورعایق‌ــ کننده‌ای که به ورودی اتصال‌می‌یابدنشان‌داده‌شده است . این ترانسفورماتور غیر از عایق ــ کنندگی عمل تطبیق ولتاژ را نیز انجام می‌دهد . همچنین سلف آن به جا به جایی واگردان کمک و شکل موج ، جریان مستقیم خروجی را اصلاح می‌کند .این عمل باعث کمک به جابه‌جایی موتور می‌شود .



شکل ۴ ــ ۶ مدارهای یکسوکننده سه فاز (الف) نیم موج (ب) پل تمام موج (پ) انشعاب وسط (ت) ستاره دوتایی

1- Gating



شکل ۴ ــ ۷ شکل امواج ولتاژ خروجی برای منبع تغذیه سه فاز

برای اتلاف انرژی ذخیره شده در بار سلفی ، موقعی که تیریستور مسدود می‌شود دیود چرخش آزادی مورد نیاز است . بدون آن تیریستور مجبور است مسیر جریانی برای آن مهیا سازد که این عمل برای تیریستور زیان آور است .

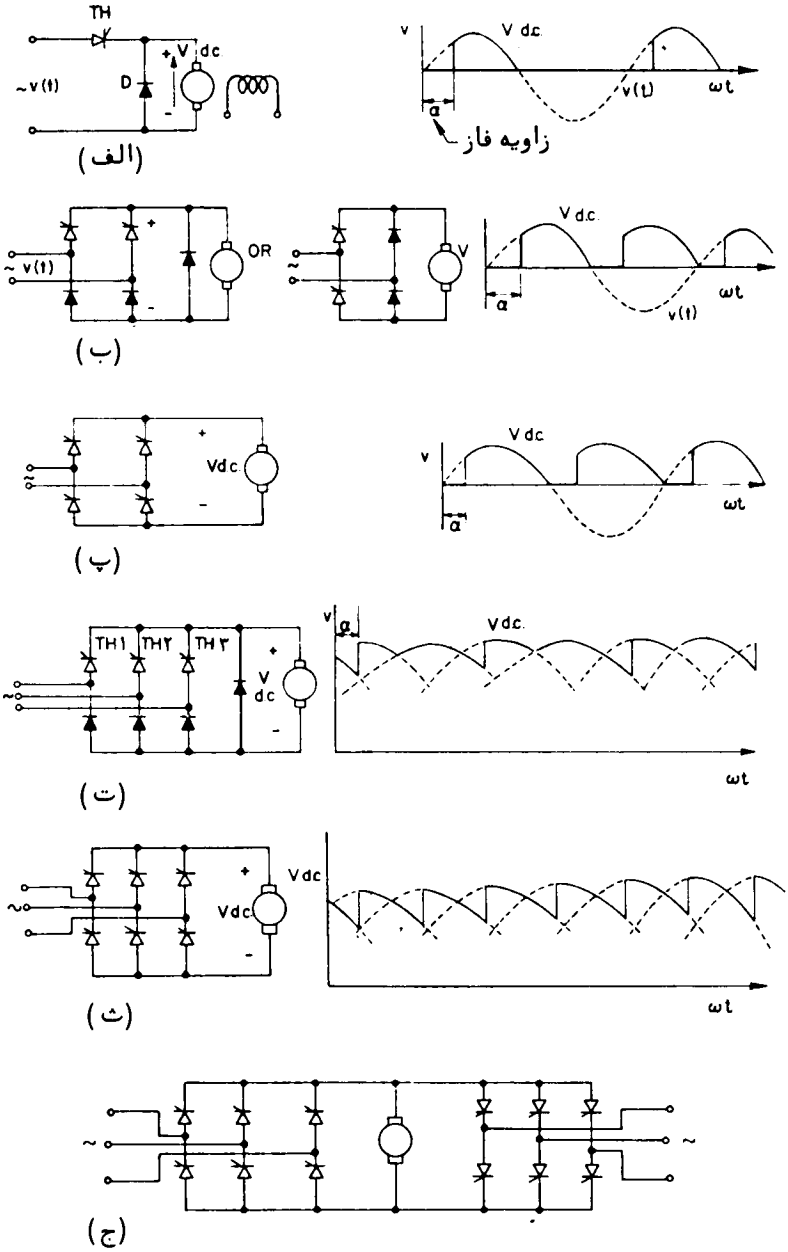
در کلیه مدارهای واگردان ضریب شکل[1] از رابطه زیر تعیین می‌شود :

$$\text{ضریب شکل} = \frac{\text{مقدار موثر ولتاژ (یا جریان)}}{\text{مقدار متوسط ولتاژ (یا جریان)}} \qquad (۴ ــ ۵)$$

مقدار ضریب شکل برای مدار نیم موج بیشترین و در نتیجه بدترین خواهدبود . این‌امر نشانگر وجود مقدار متوسط ولتاژ خروجی نسبتا " کمی است . در ماشینهای جریان‌مستقیم‌مقدار متوسط ولتاژ کمیت مفیدی است . علاوه بر آن از مقدار ضریب شکل فوق می‌توان فهمید که خروجی مدار دارای مقدار جریان موثر نسبتا بالا و تموج ذاتی زیادی است که اینها موجب افزایش حرارت و مشکلات جا به جایی در موتور می‌شوند .

زاویه α درشکل ۴ ــ ۸ زاویه علامت‌دهی فاز یا نقطه لحظه‌ای روی‌موج جریان متناوب است که در آن تیریستور روشن می‌شود . با افزایش α ولتاژ خروجی ، و در نتیجه سرعت‌موتور نیز کاهش می‌یابد . مداری که تقریبا تا ۱۸۰ درجه گستره آتش برای تیریستور را تهیه می‌کند درشکل ۴ ــ ۹ نشان داده شده است . شبکه انتقال فاز R_1 ، R_2 ، C و D ولتاژ را در

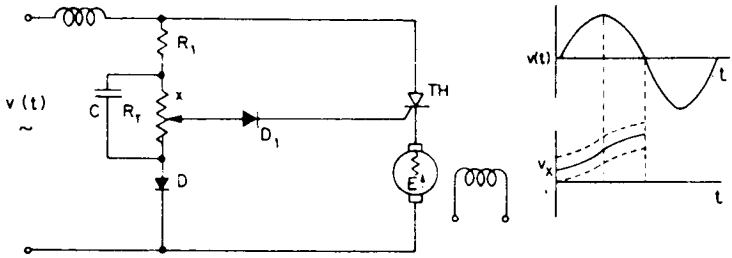
1- Form factor



شکل ۴ ــ ۸ مدارهای یکسوکننده قابل کنترل (الف) نیم موج کنترل شده (ب) مدارهای پل تمام موج نیمه قابل کنترل (پ) پل تکفاز با کنترل کامل (ت) پل سه فاز تمام موج نیمه‌قابل کنترل (ث) پل تمام موج سه فاز با کنترل کامل (ج) پل دوتایی تمام موج با کنترل کامل

نقطه x قادر می‌سازد که به مقدار تقریبا ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ منبع تغذیه پسفاز باشد و تقسیم‌کننده ولتاژ یک‌تراز جریان مستقیم قابل‌تنظیم فراهم می‌کند ، حالت سراشیبی[1] V_x است که بسیار مفید است . گرایش جریان مستقیم ویژهٔ ν_x ، موتور را روی سرعت مطلوب تنظیم می‌کند زیرا در مقدار خاصی از ν_x ، تیریستور روشن خواهد شد و آرمیچر دارای جریان از طریق آن خواهدبود . افزایش تراز جریان مستقیم موثر ν_x به مفهوم زودتر آتش شدن تیریستور در سیکل جریان متناوب است که موجب ایجاد ولتاژ متوسط بار بیشتر و در نتیجه سرعت بیشتر می‌شود .

علی‌رغم بی‌نقص نبودنش ، آرمیچر موتور در این مدار پسخور ساده‌ای را به منظور تنظیم سرعتهای پایین مهیا می‌سازد ، ولی در صورت قرار گرفتن موتور در مدار آند این پسخور وجود نخواهد داشت . اگر بار زیادی به موتور اعمال شود سرعت و نیروی محرکه الکتریکی تمایل به افت پیدا می‌کنند . چون ولتاژ ν_x که تیریستور را راه‌اندازی می‌کند ، برابر افت ولتاژ دو سر دیود ، افت مقاومتی آرمیچر ، افت ولتاژ دریچه ـ کاتد به اضافه نیروی ضدمحرکه الکتریکی E است ، لذا تیریستور در سیکل زودتر آتش خواهد شد . کوچکتر بودن زاویه α به معنی بیشتر بودن قدرت و زیادتر شدن سرعت است تا این که نیروی محرکه الکتریکی به طور ایده‌آل به مقدار E اولیه برگردد که در نتیجه موتور نیز به همان سرعت قبل برمی‌گردد .



شکل ۴ ـ ۹ واگردان نیم موج با زاویه کنترل آتش ۱۸۰ درجه‌ای

ب ـ *واگردان تک فاز تمام موج*

مدار پل دارای مزایایی نسبت به مدار تغذیه انشعاب وسط است ، زیرا برای یک ولتاژ خروجی جریان مستقیم مشابهی ، واگردان انشعاب وسط برای مسدود کردن احتیاج به دو برابر ولتاژ جریان متناوب دارد . در مقایسه با مدار نیم‌موج پیشینی این مدار که در شکلهای ۴ ـ ۸ (ب) و (پ) نشان داده شده است دارای ضریب شکل بهبود یافته‌تری است . بنابراین تنزل مقدار اسمی[2] کمی برای موتور مورد نیاز است . محرکهای موتوری قابل کنترل با این روش از ۱ تا ۲۰ کیلو ـ

1- Ramp 2- Derate

وات قدرت را شامل‌می‌شوند . درمدار نیمه قابل کنترل شکل ۴ ــ ۸ (ب) که در آن هیچ عمل وارون سازی اتفاق نمی‌افتد ، مدار اول دارای دیـود چرخش‌آزاد است . در صورتی کـه مدار دوم دارای چرخش‌آزاد ذاتی است . در مدار پل تمام کنترل شکل (۴ ــ ۸ (ب) عمل وارون ــ سازی و در نتیجه ترمز احیایی [1] امکان‌پذیر است ولی اگر پـل دو برابر نشود آنـوقت قطبیت سیم‌پیچی میدان موتور بایستی عوض شود . مواقعی که احیا [2] مورد لزوم نیست ، بایستی فقـط از مدارهای نیمه قابل کنترل استفاده کرد .

مثال حل شده ۴ ــ ۱. یکی از واگردانهای نیمه قابل کنترل تمام موج شکل ۴ ــ ۸ (ب) را تحلیل کنید .

یک مدار عملی در شکل ۴ ــ ۱۰ نشان داده شده است . زاویه‌فازبرای‌تنظیم‌هدایت ، توسط مقاومت R در مدار دریچه کنترل می‌شود . برای α در این مثال خاص تنهایک‌گستره ۹۰ درجه تأمین شده است ، گرچه ۱۸۰ درجه به سهولت امکان‌پذیـر است . شکل ۴ ــ ۱۱ شکل ولتاژ و جریان اعمال شده به موتور را نشان می‌دهد .

در یک زاویه فاز α برابر θ_1 ، در شکل ۴ ــ ۱۱ مقاومت R طوری تنظیم شده است کـه یکی از تیریستورها درهرنیم سیکل هدایت کند . در شرایط موتوری پایدار و بنابراین بانیروی محرکه الکتریکی E القا شده توسط موتور ، جریان $i(t)$ از منبع تغذیه به علت سلف موجود در آرمیچر و سیمهای رابط به طور آرام افزایش خواهد یافت . این سلف‌باعث‌تداوم هدایت حتی بعد از منفی شدن ولتاژ سرهای خروجی می‌شود ، تا این که جریان به‌صفر برسد و ولتاژ سرهای خروجی برابر E شود .

به علت وجود نیروی ضد محرکه الکتریکی E در حالی که تیریستورها در شکل ۴ ــ ۱۱ بین زوایای α_1 و α_2 راه‌اندازی می‌شوند جریان تنها از طریق منبع تغذیه عبـور خواهد کرد . هدایت باقی مانده بین α_2 و θ_2 به خاطر وجود انرژی ذخیره شده $\frac{1}{2}Li^2$ در سلف‌است وبرای آن مسیری از طریق دیود چرخش‌آزاد مهیا می‌شود .

حل معادله گذرای مدار

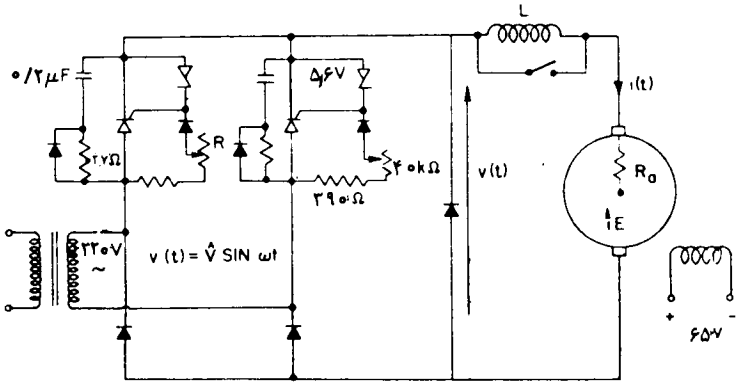
$$L\frac{di}{dt} + R_a i = \hat{V}\sin\omega t - E \qquad (۴ــ۶)$$

عبارت است از :

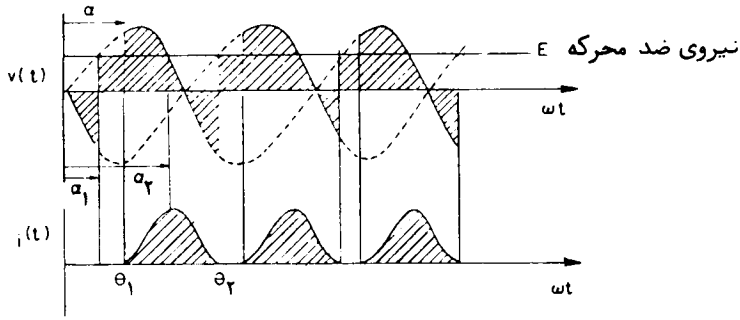
$$i(t) = A\,e^{-R_a t/L} + \frac{\hat{V}}{\sqrt{R_a^2 + \omega^2 L^2}}\sin(\omega t - \phi) - \frac{E}{R_a}, \qquad (۴ــ۷)$$

که در آن A عدد ثابت ، و ϕ عبارت است از :

1- Regenerating braking 2- Regeneration



شکل ۴ ــ ۱۰ مدار عملی واگردان تمام موج نیمه کنترل



شکل ۴ ــ ۱۱ ولتاژ و جریان اعمال شده به موتور شکل ۴ ــ ۱۰

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R_a} \qquad (۴ - ۸)$$

عدد ثابت A از شرایط اولیه زیر محاسبه می‌شود :

$$\omega t = \theta_1 \qquad (۴ - ۹)$$

سپس

$$i(t) = 0 \qquad (۴ - ۱۰)$$

دو شرط برای بررسی وجود دارد :

اول ، موقعی که جریان غیر پیوسته باشد ،

$$\theta_1 > \theta_2 - \pi \qquad (۴ - ۱۱)$$

$$(۴ - ۱۲)$$

$$i(t) = \frac{\hat{V}}{R_a}\left\{\cos\phi\sin(\omega t - \phi) - \frac{E}{\hat{V}} + \left[\frac{E}{\hat{V}} - \cos\phi\sin(\theta_1 - \theta)\right] e^{-(R_a/\omega L)(\omega t - \theta_1)}\right\}$$

برای گستره :

$$\theta_1 \leqslant \omega t \leqslant \theta_2. \qquad (۱۳-۴)$$

دوم موقعی که جریان پیوسته باشد :

$$\theta_2 - \theta_1 > \pi$$

و

$$i(t) = \frac{\hat{V}}{R_a}\left\{\cos\phi \sin(\omega t - \phi) - \frac{E}{\hat{V}} - \frac{2\cos\phi \sin(\theta_1 - \phi) \cdot e^{-(R_a/\omega L)(\omega t - \theta_1)}}{(1 - e^{-(\pi R_a/\omega L)})}\right\} \qquad (۱۴-۴)$$

با استفاده از گستره:

$$\omega t = \theta_1 \qquad (۱۵-۴)$$

$$\omega t = \theta_2 = \theta_1 + \pi \qquad (۱۶-۴)$$

گشتاور عبارت است از:

$$T = \frac{EI_{av}}{2\pi n} = \frac{(v - I_{av}R_a)}{2\pi n} \cdot I_{av}. \qquad (۱۷-۴)$$

برای هدایت محدود شده ،

$$T = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\pi} \cdot \frac{(v - I_{av}R_a)}{2\pi n} \cdot I_{av} \qquad (۱۸-۴)$$

اما

$$I_{av} = \frac{1}{\pi}\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\hat{V}\sin\omega t - E}{R_a} d(\omega t) \qquad (۱۹-۴)$$

به طوری که برای هدایت محدود شده،

$$I_{av} = \frac{\hat{V}}{\pi R_a}\left[\cos\theta_1 - \cos\theta_2 - \frac{E}{\hat{V}}(\theta_2 - \theta_1)\right] \qquad (۲۰-۴)$$

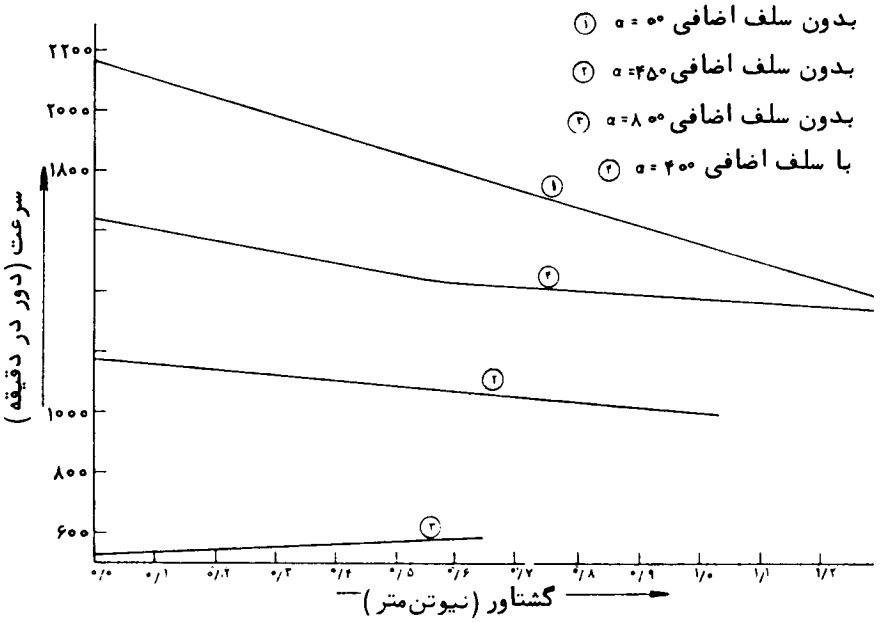
و برای هدایت پیوسته ،

$$I_{av} = \frac{\hat{V}}{\pi R_a}\left(2\cos\theta_1 - \frac{E}{\hat{V}}\pi\right). \qquad (۲۱-۴)$$

بنابراین انتظار می‌رود که تنظیم سرعت برای گستره جریان غیر پیوسته بیشتر از گستره جریان پیوسته باشد . نتایج عملی در شکل ۴ ــ ۱۲ نشان داده شده است .

برای مستقل شدن سرعت از بار بایستی از پسخور سرعت استفاده کرد . نیروی محرکه الکتریکی القا شده با سرعت متناسب است ، لذا علامتی متناسب با این ولتاژ برای پسخور بایستی مورد استفاده قرار گیرد . اندازه‌گیری این ولتاژ عملا غیر ممکن است . بهترین وسیله دیگر انتخاب ولتاژ اعمال شده[به عنوان مبنا] و تفریق نیروی محرکه الکتریکی القا شده ، که همان افت IR_a باشد ، از آن است . زیرا ولتاژ دو سر هر مقاومت در مسیرجریان با افت مقاومت

آرمیچر متناسب است . عملکرد حالت ناپایدار مدار با کنترل فاز ، بر مشکلات می‌افزاید .



شکل ۴ ــ ۱۲ مشخصات سرعت موتور

پ ــ واگردانهای (مبدلهای) سه فاز قابل کنترل

شکلهای ۴ ــ ۸ (ت ، ث ، ج) برخی از (ولی نه تمام) آرایشهایی را که ، از چند کیلو وات تا چند صد کیلووات برای شکلهای (ت و ث) و تا ۲۰۰۰ کیلو وات برای شکل (ج) ، مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان می‌دهد . مدار اخیر همان ترکیبی است که با سیستم وارد لئونارد رقابت می‌کند و جایگزین موتور محرک جریان متناوب و مولد جریان مستقیم می‌شود ، و تمام قسمتهای متحرک را به استثنای موتور محرک نهایی حذف می‌کند .

شکل ۴ ــ ۸ (ج) تعویض جهت چرخش و احیا را نیز مجاز می‌سازد . برای دریافت سریعترین پاسخ می‌توان هر دو پل را با هم راه‌اندازی کرد ولی این عمل احتیاج به سلفهای محدود ــ کننده جریان دورانی دارد . این شرایط که همان اجبار جریان آرمیچر[1] است ، به علت وجود اختلاف در سلف مدار ، سریعتر از اجبار جریان میدان تحریک[2] است .

برای ولتاژهای زیاد (۶۰۰ ولت برای ماشینهای جریان مستقیم ولتاژ زیادی است) از دو پل به طور سری می‌توان در راه‌اندازی استفاده کرد . موقعی‌که نیازی به عمل وارون‌سازی نباشد

1- Armature current forcing 2- Field current forcing

یکی از پلها را می‌توان غیر قابل کنترل انتخاب کرد که در این صورت انتخاب پل دیودی با راه‌اندازی آزاد ، دستگاهها با قدرت kVAr کاهش یافته‌ای کار خواهند کرد . علاوه براین کلیه ترکیبات‌مختلف پل درشکل ۴ ــ ۱۳ نشان داده شده‌اند که[در حقیقت] برگردانهای[1]ولتاژ بالای شکلهای ۴ــ۸(ث و ج)هستند . ثانویه‌های دو ترانسفورماتور درشکل دارای جابه‌جایی فازی معادل ۳۰ درجه هستند . در نتیجه این کار ضریب قدرت بیشتر و اعوجاج هارمونیک در جریان اخذ شده از منبع تغذیه کمتر خواهد بود . یکسو کننده‌های جعبه‌ای در شکل معرف واگردانهای سه فاز هستند .

ت ــ کنترل میدان تحریک و آرمیچر

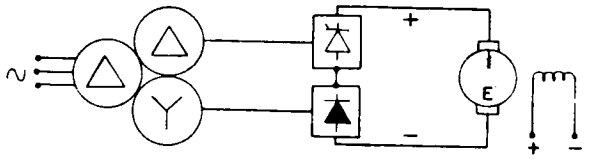
در شکلهای ۴ ــ ۸ و ۴ ــ ۱۳ آرمیچر موتور به صورت بار واگردان است که در این صورت افزایش زاویه فاز کاهش سرعت‌ازمقدارسرعت‌اسمی رابه دنبال‌خواهد داشت . با واگردانهای کنترل کامل ، وارون سازی امکان پذیر است ، ولی تعویض جهت چرخش موتور تنهاموقعی‌که دو واگردان کنترل‌کامل به طورپشت به پشت به موتور متصل شوند امکان‌پذیر است . واگردان دو-تایی را می‌توان به طور جداگانه در هر جهتی از چرخش موتور یا برای ترمز احیایی راه‌اندازی کرد ویامی‌توان هر دو را با یکدیگر برای دریافت‌پاسخ سریع راه‌اندازی کرد . انتخاب واگردان بستگی به قدرت اعمال شده و چگونگی یکنواخت کردن جریان مورد نیاز ، بدون عبورازصافی ، دارد .

کنترل آرمیچر این چنینی برگردان ایستایی (استاتیکی)[2] سیستم وارد لئونارد است . تنها مزیت‌سیستم‌وارد لئوناردقابلیت‌ترمز کنندگی احیایی‌ذاتی آن است . واگردان تیریستوری در هر حال احتیاج به مدارهای کنترل مشابهی برای محافظت ولتاژ و جریان و برای حلقه‌های پسخور دارد و اگر یک واگردان دوتایی به طور جداگانه مورد استفاده قرار گیرد آشکارسازی جریان الزامی است به طوری که تغییر وضعیت[3] تا زمانی که جریان آرمیچر در حال عبوراست اتفاق نخواهد افتاد .

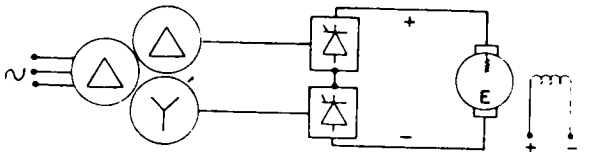
درباره مدارهای فرمان تیریستورها در واگردانهای تیریستوری تاکنون چیزی گفته نشده است . در دو فصل گذشته اندکی در این مورد بحث شد ، ولی این بحث عمومیت نداشت . ترتیب فرمان تیریستورها مثل وارونگرها خواهد بود و نوع مدارهای فرمان برای کنترل فازدر حقیقت بستگی به انتخاب طراح دارد . روش عمومی که تاکنون شرح داده شده است کاربرد ولتاژ منبع تغذیه به عنوان علامت مبنا برای فاز است . در نتیجه موج سینوسی معمولا به موج دندانه اره‌ای که تراز جریان مستقیم قابل کنترلی دارد تبدیل می‌شود و سپس به مدار فرمان

1- Version 2- Static 3- Change over

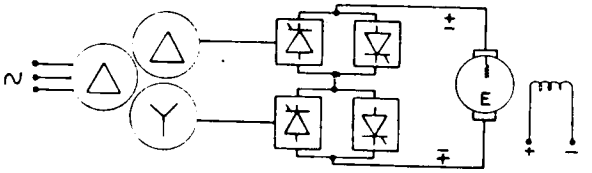
اشمیت و یک چند ضربانی دو حالتی و یک تقویت کننده دیفرانسیلی و خروجی علامتدهی و بالاخره یک تقویت کننده پالس منتهی می‌شود . سرانجام علامت دریچه ممکن است به دریچه



(الف)



(ب)



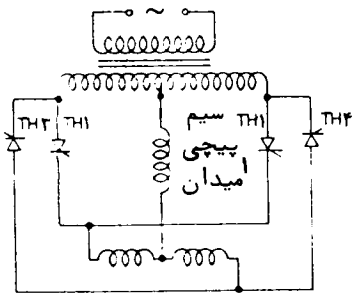
(پ)

شکل ۴ ــ ۱۳ مبدلهای ولتاژ زیاد (الف) پلهای اتصال سری نیمه کنترل (ب) پلهای اتصال سری تمام کنترل (پ) پلهای دوتایی اتصال سری تمام کنترل

تیریستور از طریق یک ترانسفورماتور عایق کننده اعمال شود . مثال حل شدهٔ زیر مدارهای فرمان تیریستوری تطابق یافته با شبکه مدار منطقی را تشریح می‌کند .

توضیحات مذکور درباره کنترل آرمیچرتوسط واگردانها رامی‌توان به طور مشابه درکنترل میدان تحریک نیز به کار گرفت ، با این تفاوت که افزایش زاویه فاز باعث افزایش سرعت موتور می‌شود . در این حالت قدرت مورد لزوم هرگز از چند کیلو وات تجاوز نمی‌کند ، در نتیجه کاربرد تقویت کننده میدان به فرم شکل ۴ ــ ۴ (پ) که در آن دیودها با تیریستورها عوض شده ، امکان پذیر است . اصطلاح تقویت کننده از آن جهت به کار می‌رود که قدرت علامتهای کنترل کننده ؛ یعنی ، آنهایی که به مدارهای راه‌انداز دریچه اعمال می‌شوند ، در مقایسه با خروجی تیریستور روی سیم‌پیچی میدان تحریک اندک است . مدار اصلی که در قطارهای برقی اروپایی مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۴ ــ ۱۴ نشان داده شده است . دراین روش

میدان تحریک موتور کششی به طور جداگانه توسط مدار کنترل‌فاز ولتاژ ، تحریک‌می‌شودو بدون احتیاج به کلیدهای مکانیکی تعویض جهت حرکت و ترمزکنندگی را مجاز می‌سازد . پیداست‌که عملکرد این مدار واگردان با انشعاب‌وسط، عکس مدار وارونگرنوع (پ ۱) تشریح شده درفصل قبل است . به علت جا به جایی خط‌جریان متناوب احتیاجی به خازن نیست و دیودهای پسخور ، باتیریستورهای TH_3 و TH_4 برای‌عمل وارون‌سازی و تعویض جهت چرخش ، جایگزین شده‌اند . حتی موقعی که اجبار جریان میدان مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان پاسخ را با کنترل در آرمیچر مقایسه کرد .



شکل ۴ ــ ۱۴ تقویت کننده تیریستوری برای کنترل میدان تحریک

مثال حل شده ۴ــ۲ سیم‌پیچی میدان موتور جریان مستقیم بزرگی دارای‌سلفی‌معادل یک هانری و مقاومتی معادل ۱ اهم است . جریان اسمی میدان تحریک ۳۰ آمپر است . لازم است جریان اسمی این موتور در حدود یک‌دهم درصد تنظیم‌شود . جریان نیز درحداقل زمان‌ممکن بتواند تغییر جهت دهد . یک واگردان تیریستوری با این ویژگی‌ها طراحی کنید .

دراین مثال واگردان دوجهته‌ای بایستی مورداستفاده قرار گیرد تا جریان‌میدان‌تحریک را تنظیم و در موقع لزوم تغییر جهت دهد . خلاصه‌ای از احتیاجات‌طراحی دراینجاپیشنهاد می‌شود و شرح دقیق و کامل مقادیر عناصر و مدار منطقی را در ضمیمه (ب) می‌توان پیدا کرد .

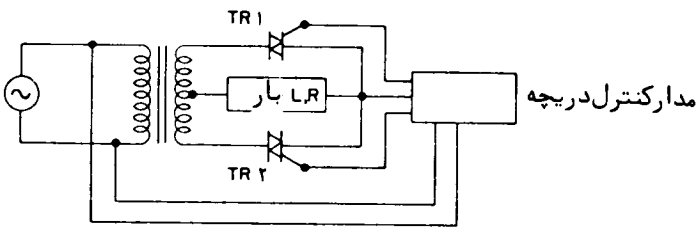
سیم‌پیچی تحریک شامل سلف زیادی است که از تغییر سریع جریان ممانعت ، و انرژی مغناطیسی را در خود ذخیره می‌کند . این مشخصات موجب ممانعت‌تعویض جهت‌جریان در یک زمان کوتاه می‌شود . برای مثال ، چون سیم‌پیچی دارای سلفی به مقدار یک هانری ومقاومتی‌به مقدار یک اهم است ، ثابت زمانی آن یک ثانیه خواهد بود . مقدار کمی بیشتر از ۸ ثانیه‌لازم است که جریان با نزول و صعود طبیعی تغییر جهت دهد . این زمان را می‌توان تسریع کرد . از زمانی که ولتاژ به کلاف اعمال می‌شود زمان صعود جریان‌برای رسیدن‌به مقدار پایدارنهایی را می‌توان توسط‌اجبار جریان میدان کاهش داد . یعنی آن که ابتدا یک ولتاژ شدیداعمال

می‌شود . در نتیجه جریان خیلی سریع صعود می‌کند و موقعی که جریان به مقدار مناسب خود رسید ولتاژ تنزل می‌کند .

به جای حذف منبع ولتاژ و اجازه دادن به جریان تا اینکه از طریق دیود چرخش آزاد جاری شود و به صفر نزول کند ، می‌توان واگردان را برای پمپ انرژی ذخیره شده به منبع تغذیه به صورت وارونگر مورد استفاده قرار داد . موقعی که جریان صفر است ولتاژ اعمال شده به کلاف را می‌توان وارون کرد و بار دیگر اجبار جریان میدان را به کار برد .

به منظور تنظیم جریان مستقیم در کلاف تحریک ، به طرف اجبار جریان میدان ، برای بازگرداندن انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی به منبع تغذیه و برای معکوس کردن جهت جریان مستقیم احتیاج به منبع تغذیه جریان متناوب کنترل شده فازی است .

شکل ۴ ــ ۱۵ مدار قدرت را نشان می‌دهد و شکل ۴ ــ ۱۶ معرف شکل موج ولتاژ خواهد بود که این شکل موج ایده‌آلی است . فرض براین است که حالتهای گذرا میرا می‌شود و منبع تغذیه دارای امپدانس صفر است . موقعی که ولتاژ در دو سر بار صفر می‌شود معرف آن است که جریان از طریق عنصر یکسوکننده صفر شده است و این عنصر جلوی عبور جریان بیشتر را سد می‌کند تا این که یک علامت راه‌اندازی دیگری اعمال شود . عناصر یکسوکننده در شکل ۴ ــ ۱۵ یک تریاک است که به جای آن از تیریستورهای اتصال موازی معکوس نیز می‌توان استفاده کرد. نحوه انتخاب بستگی به مشخصه‌های بار و جنبه‌های اقتصادی خواهد داشت . در اینجا تریاک یا دو تیریستور به کار برده می‌شود تا این که بتوان جهت جریان را معکوس کرد .

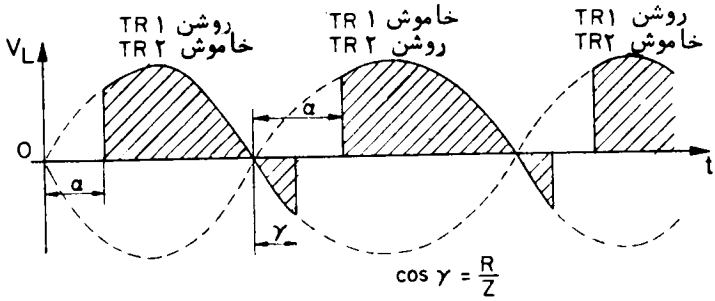


شکل ۴ ــ ۱۵ مدار قدرت

اگر زاویه فاز α ، که در آن تریاک کلیدزنی می‌کند تغییر یابد ، قدرت عبوری از بار نیز تغییر خواهد کرد . بنابراین کنترل زاویه فاز در مدار یکی از مهمترین عوامل در طرح مدار است . علامت راه‌اندازی بایستی هم با منبع تغذیه همزمان باشد و هم دارای تأخیر[1] قابل تنظیمی باشد . برای کلیدزنی ، ولتاژ سینوسی شکل موج مناسبی نیست . بهترین شکل موج به علت

1- Delay

داشتن زمان صعود خیلی سریع ، پالس مستطیلی شکل است . موج مستطیلی شکل را می‌توان‌با یک‌مدار پالس‌ساز[1] ازموج سینوسی‌به‌دست‌آورد . شکل ۴ ــ ۱۷ یک پالس‌ساز را با مشخصه‌های مربوطه‌به صورت‌مدارمجتمع[2] نشان می‌دهد . برای ورودی‌تا ۱/۳ ولت ، خروجی‌به شکل اعداد



شکل ۴ ــ ۱۶ شکل موج ولتاژ بار

دودویی[3] معرف ۱ ، و برای ورودی بزرگتر از ۱/۵ ولت خروجی [باز در این سیستم اعداد] معرف ۰ خواهد بود . شکافی[4] معادل ۰/۲ ولت وجود دارد .

برای اینکه تغییرات ولتاژ منبع تغذیه روی نقاط کلید زنی x_2 و x_1 در شکل ۴ ــ ۱۷ اثرات اندکی داشته باشد بهتر است که دامنه ولتاژ ورودی سینوسی بزرگ انتخاب شود . برای ولتاژ سینوسی با درصد تنظیم ۱۰ ± درصد و مقدار موثر ۲/۵ ولت حدود تغییرات x_1 عبارت است از :

$$۲۲^\circ ۴۵' \leqslant x_1 \leqslant ۲۸^\circ ۱۲'$$

در صورتی که اگر مقدار موثر آن ۱۲۰ ولت باشد داریم :

$$۲۸' \leqslant x \leqslant ۳۳'$$

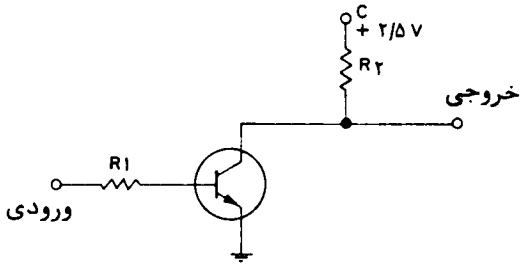
گرچه ولتاژ زیاد ، به دلایل گفته شده مناسب و خوب است اما محافظت مدار پالس‌ساز ضرورت پیدا می‌کند . دیودهای زنر این محافظت را می‌توانند به عهده گیرند ، به طوریکه‌موجهای مربعی مبنا را می‌توان از چنین مداری که در شکل ۴ ــ ۱۸ نشان داده شده به دست آورد . مدار پالس ساز قسمتی از مدار مجتمع IC دریچهNORاست و به خاطر این که در موقع کلید ــ زنی موج خروجی دارای زمان صعود کوتاهی باشد ، مورد استفاده قرار گرفته است . هر یک از قسمتهای منطقی ریز[5] ، شامل دو عنصرNOR است . اگر تنها یک ورودی مورد استفاده قرار گیرد هر عنصر یک عنصرNOT خواهد بود .

1- Pulse shaper
2- Integrated circuit
3- Binary
4- Backlash
5- Micro logic unit

قابل تنظیم بودن جریان تحریک کلاف یکی از موارد احتیاج این مدار است. حلقه پسخور (تغذیه برگشتی) ساده‌ای که به موجب آن علامتی متناسب با اختلاف بین جریان مبنا و جریان واقعی که سبب افزایش یا کاهش زاویه فاز می‌شود، مورد نیاز است. زمانی که اختلافی بین جریان مبنا و جریان واقعی نباشد زاویه فاز ثابت خواهد بود. مدار تأخیر دهنده‌ای که دارای عناصر منطقی است، در شکل ۴ ــ ۱۹ نشان داده شده است که در آن ورودی در A، معکوس خروجی مدار پالس ساز شکل ۴ ــ ۱۸ است. این مدار درحقیقت یک چند ضربانی تک ضربه‌ای با یک دریچه دودویی است. طول پالس برحسب ثانیه عبارت است از:

$$T = \frac{KRC}{E}$$

مقدار ثابت $K = ۰/۸۵$



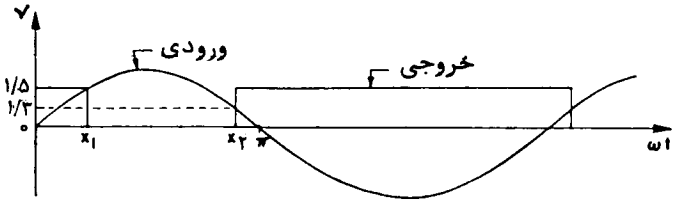
۱ ــ ورودی = ۰

خروجی = ۲/۵ ولت، موقعی که V_C = ۲/۵ ولت باشد.

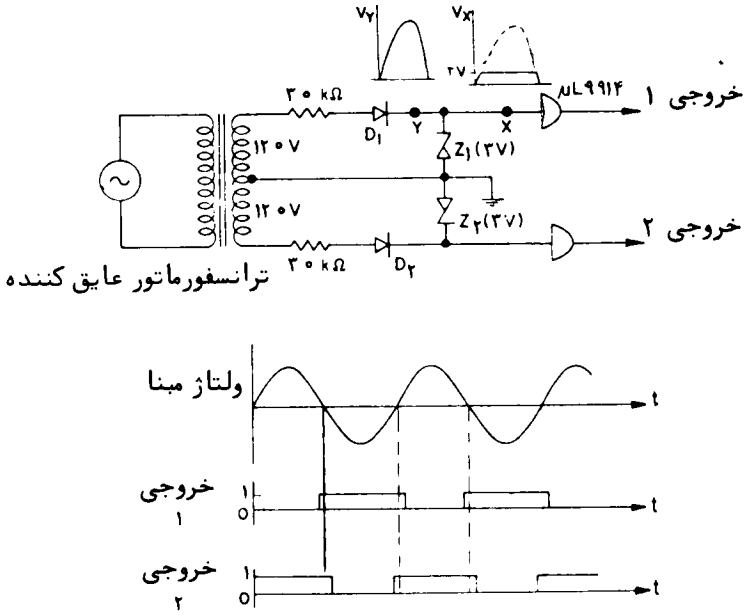
۲ ــ افزایش ورودی موقعی که ورودی = ۱/۵ ولت و خروجی = ۰

۳ ــ کاهش ورودی از ۱/۵ ولت موقعی که ورودی = ۱/۳ ولت یا کمتر

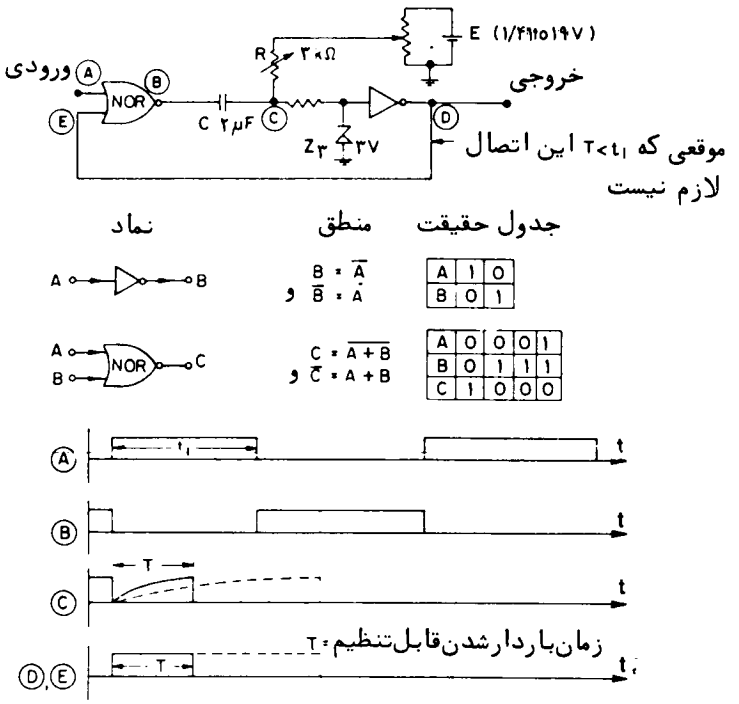
و دوباره خروجی = ۲/۵ ولت



شکل ۴ ــ ۱۷ مدار پالس ساز



شکل ۴ ــ ۱۸ مدار ولتاژ مبنا و ولتاژهای خروجی برای راه‌اندازی مدار کنترل تریاک



شکل ۴ ــ ۱۹ مدار تاخیری برای زاویه فاز

مفهوم مدار را می‌توان همراه با معرفی نمادهای[1] منطقی و نمودار علائم با ورودیها وبدون آنها درک کرد . اعمال علامت ورودی ، در خروجی علامتی را با طول زمان قابل تنظیم T مهیا می‌سازد .

خروجی‌های مدار پالس‌ساز در شکل ۴ ــ ۱۸ برای قسمتی از سیکل روی هم[2] می‌افتند. اعمال این علامت به هر تریاک به طور همزمان امکان اتصال کوتاه شدن ترانسفورماتور قدرت شکل ۴ ــ ۱۵ را به وجود می‌آورد . علامت روی هم منطبق شده ، با افزایش عنصر NOR به سری با خروجی‌های پالس ساز قابل حذف است .

خروجی چند ضربانی را نمی‌توان برای راه‌اندازی تریاک به کار برد زیرا در هر سیکل علامت در همان نقطه از سیکل شروع می‌شود . مدار منطقی برای تغییر زمان صعود علامت فرمان نسبت به علامت مبنا ، به مدار اضافه می‌شود ، به این طریق زاویه فاز α طبق شکل ۴ ــ ۲۰ تغییر می‌کند . دو تا دریچه NOR باعث بیشتر مربعی شدن علامت می‌شود . با وجود این با کاهش زمان T چند ضربانی شکل ۴ ــ ۱۹ زاویه فاز α به طوری که در نقشه[3] زمانی علامت شکل ۴ ــ ۲۰ نشان داده شده کاهش می‌یابد . کاهش α به مفهوم افزایش جریان بار است .

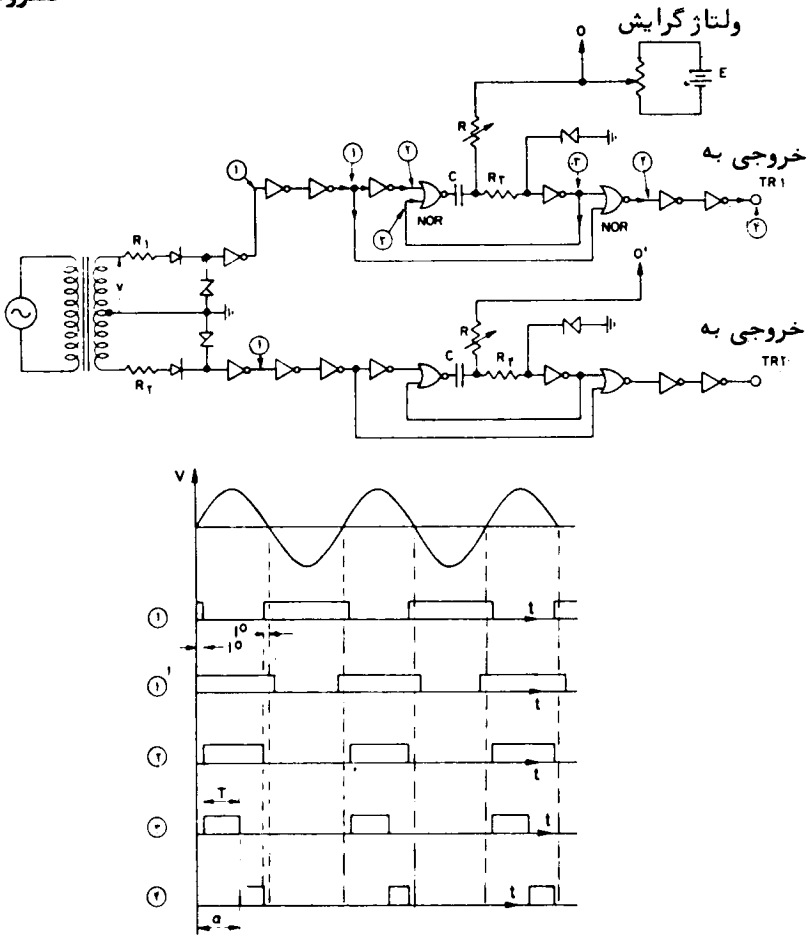
عملکرد واگردان توسط قسمتهای نشان داده شده درصورت نمودار بندالی شکل ۴ ــ ۲۱ کنترل می‌شود . در موقع راه‌اندازی ، اجبار جریان میدان توسط صفر کردن زاویه فاز قابل دسترسی است . تمام ولتاژ به واگردان اعمال می‌شود به طوری که میزان صعود جریان بیشینه باشد . برای α تغییری پله‌ای از صفر تا حدود ۷۰ درجه ، موقعی که جریان به ۳۰ آمپر رسیده باشد ، وجود دارد . جریان در این مقدار قابل تنظیم است . به منظور تعویض جهت جریان در حداقل زمان ممکن جریان را توسط عمل وارون سازی به صفر تقلیل می‌دهند . اگر زاویه فاز تا حدود ۱۷۷ درجه به طور پله‌ای تغییر کند ، در نتیجه کلاف میدان مثل مولد عمل می‌کندو انرژی ذخیره شده مغناطیسی را به منبع تغذیه برگشت خواهد داد . در جریان صفر ، اجبار جریان میدان دوباره اتفاق می‌افتد و جریان را به طور سریع درجهت معکوس عبورخواهد داد.

ث ــ تموج ولتاژ واگردان[4]

درموقع جایگزینی واگردانها به جای مولدهای جریان‌مستقیم مشکلات جابه‌جایی موتورافزایش می‌یابد و حتی این مشکلات موقعی که از واگردان کنترل فاز استفاده می‌شود به حالت بحرانی می‌رسد . تموج ولتاژ به علت مقدار زیاد ولتاژ خود القایی $[L(di/dt)]$ مربوط به میزان تغییر جریان ، مشکلاتی می‌آفریند .

اثرات تموج ولتاژ را روی جا به جایی موتور می‌توان ازمطالعه معادله ولتاژ تشخیص‌داد .

1- Symbol 2- Overlap 3-Chart 4- Converter voltage ripple



شکل ۴ ــ ۲۰ مدارهای کنترل زاویه فاز برای تنظیم جریان و نقشه زمانی تکی

$$v(t) = L\frac{di}{dt} + E + iR_a \qquad (۴ــ۲۲)$$

که در آن

$v(t)$ = ولتاژ ورودی لحظه‌ای

E= نیروی ضدمحرکه الکتریکی موتور که ثابت فرض شده است .

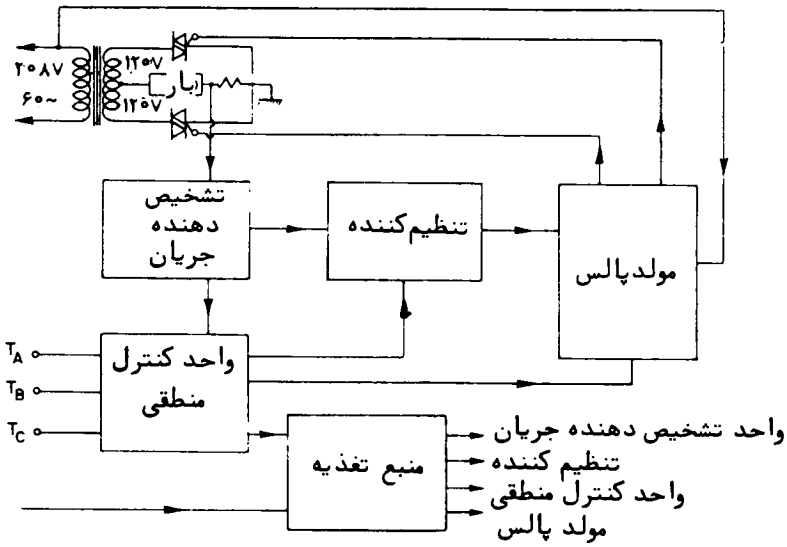
L = سلف آرمیچر

R_a = مقاومت معادل موتور بین سرهای خروجی آن

i = جریان لحظه‌ای آرمیچر

اگر ولتاژ منبع تغذیه بدون تموج باشد در آن صورت داریم :

$$V_D = E + IR_a \qquad (۴ــ۲۳)$$



شکل ۴ ــ ۲۱ نمودار بندالی مدار کنترل

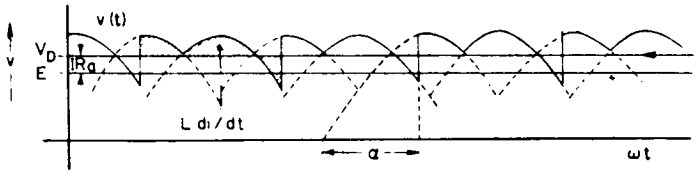
این رابطه حالت پایدار موتور است . اگر افت کوچک مقاومت آرمیچر قابل صرفنظرکردن باشد ، در آن صورت $L\,di/dt$ از اختلاف ولتاژ موجود بین دو سر ورودی موتور ، $v(t)$ و نیروی محرکه الکتریکی القایی E درست خواهد شد . شکل ۴ ــ ۲۲ برای یک واگردان سه فاز مقدار این ولتاژ تموج را نشان می‌دهد . چون V_D و E برای بار وسرعت ثابتی کلا ثابت می‌ماند ،لذا $L\,di/dt$ بایستی شدیدا با اثر معکوسش بر جا به جایی موتور تغییر کند . مضافا بر اینکه $L\,di/dt$ با افزایش زاویه فاز α افزایش می‌یابد .

علاوه بر مشکلات جا به جایی اثرات حرارتی تموج جریان ، که کارمفیدی تولید نمی‌کند ، نیز به آن اضافه می‌شود . تلفات آرمیچر یا تلفات در مس، متناسب با مجذور جریان آرمیچر است بنابراین هر تموجی نتیجه‌اش افزایش تلفات در مس خواهد بود . تموج جریان همچنین تلفات در آهن را در هسته آرمیچر و قسمتهای یکپارچه[1] قطبهای کمکی[2] به علت مولفه‌برداری مغناطیس کنندگی[3] عکس العمل آرمیچر افزایش می‌دهد .

مطالب گفته شده برای درک اهمیت صافیهایی در خط، به منظور حذف هارمونیکها در طرف جریان متناوب و صاف کردن طرف جریان مستقیم کافی است .

1- Non-laminate 2- Interpole

3-Crossmagnetizing component



شکل ۴ ــ ۲۲ تموج ولتاژ

۴-۳-۳ برشگرهای ولتاژ تیریستوری

کنترل سرعت موتور توسط برشگر ولتاژ تیریستوری موقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که منبع تغذیه یا جریان مستقیم باشد، و یا واگردان غیرقابل کنترلی قبلا منبع تغذیه جریان متناوب رایکسو کرده باشد. یکی ازمواردی که منبع‌جریان‌مستقیم بیشترین کاربردها را دارد محرکهای کششی است. این به علت ضرورت ذخیره انرژی در باطریها و یا به علت مشخصه‌های عالی گشتاور ــ سرعت ماشینهای جریان‌مستقیم است و برشگرهای ولتاژ بیشترین کاربردها را در محرکهای کششی (از قبیل تراموا‌ها، قطارها، اتومبیل‌های برقی، و . . .) پیدا کرده‌اند.

همان طوری که از اسم برشگر پیداست ولتاژ جریان مستقیم توسط تیریستوری طبق شکل ۴ ــ ۲۳ برای زمانهای معینی‌قطع و وصل می‌شود. این‌به آن معنی‌است‌که گرچه ولتاژ ورودی ثابت است ولی مقدار متوسط ولتاژ جریان مستقیم می‌تواند قابل تنظیم باشد. برای کنترل ولتاژ در این مدارها با سه روش می‌توان نسبت علامت ــ فضا یا نسبت زمان وصل به زمان‌قطع را تغییر داد. این سه روش عبارتند از:

۱) زمان وصل t_{on} ثابت و T (یا فرکانس) قابل تنظیم

۲) T ثابت و زمان وصل t_{on} قابل تنظیم

۳) زمان وصل t_{on} و T هر دو قابل تنظیم باشند، که برای هر سه می‌توان نوشت:

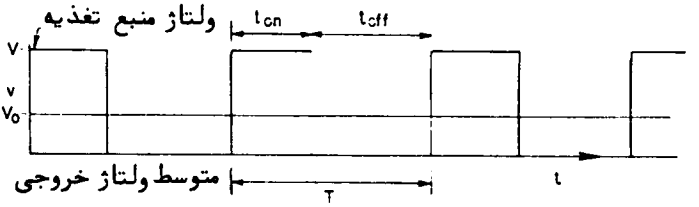
$$V_o = Vt_{on}/T. \qquad (۴-۲۴)$$

فرکانس کلیدزنی را به منظور اینکه صاف کنندگی به حداقل برسد و پاسخ مدار، در مقایسه با روشهای تنظیم ولتاژ به طریق‌کنترل‌فازی فرکانس قدرت، سریع باشد، زیاد انتخاب می‌کنند. فرکانسهای بین ۵۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز در این مدارها معمولی هستند. در فرکانسهای بیشتر، خازنهای جا به جایی زمان کافی برای باردار شدن نخواهند داشت.

در این قسمت از کتاب، سه مدار برشگر مورگان[1]، جونز[2] و مدارهای نوسانی[3] توصیف می‌شوند ولی فقط این آخری است که تحلیل مفصلی درباره‌اش به عمل آمده است.

1- Morgan chopper 2- Jones

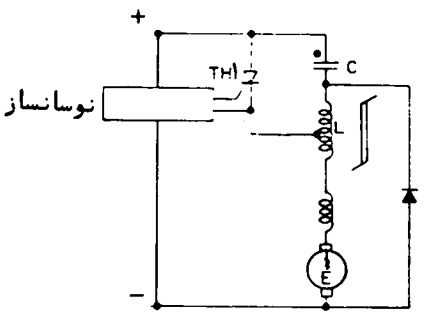
3- Oscillation circuits



شکل ۴ ــ ۲۳ برش دادن ولتاژ

الف ــ برشگر مورگان

این مدار در شکل ۴ ــ ۲۴ نشان داده شده و جزو طبقه‌بندی کلاس (ب) جا به جایی، یعنی خود جابه‌جایی توسط مدارتشدید یاری شده به وسیله واکنشگر قابل اشباع است و مزیت اصلی آن کاربرد تنها یک تیریستور است. لذا زمان وصل، t_{on} ، توسط پارامترهای LC ثابت می‌شود و مقدار متوسط دو سر موتور وسیله تنظیم T تغییر می‌یابد. به این ترتیب که نوسانساز دریچه تیریستور، فرکانس متغیری تولید می‌کند.



شکل ۴ ــ ۲۴ برشگر مورگان

موقعی که تیریستور $TH1$ شروع به هدایت می‌کند خازن باردار بطور مثبت در محل علامت‌گذاری شده روی شکل ۴ ــ ۲۴ از طریق مدار C ، $TH1$ ، L شروع به تخلیه می‌کند و در جهت معکوس باردار می‌شود. از آنجایی که جریان دوباره ولتاژ دو سر سلف L را معکوس می‌کند وبرای مدت‌معینی‌نگه می‌دارد، هسته اشباع‌شده و تمام ولتاژ دوسر خازن‌روی تیریستور ظاهر می‌شود. در نتیجه تیریستور گرایش معکوس پیدا می‌کند و در صورتی که جریان تخلیه خازن بیشتر از جریان بار تیریستور شود تیریستور خاموش می‌شود. خازن عبور جریان‌بار را تا موقعی که به طور کامل و مثبت در محل علامت‌گذاری شده باردار شود از خود ادامه می‌دهد. دیود چرخش آزاد مسیری برای اتلاف انرژی ذخیره شده $\frac{1}{2} Li^2$ اضافی مهیا می‌سازد و اگر

این انرژی قبل از روشن شدن دوباره تیریستور از بین برود موتور باز زا می‌شود .

از بین تعدادی تغییرات که در این مدار داده می‌شود ، افزودن دیود معکوس به دو سر تیریستور ،برای‌تهیه جا به جایی ضربه ممکن است ، که این‌موضوع‌قبلا درقسمت وارونگرها شرح داده شده است .

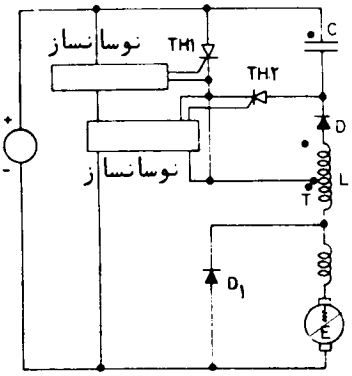
گرچه فرکانس کلیدزنی تحت کنترل دقیق نوسانساز است . ولـی نوسانات بـار می‌تواند روی زمان روشن بودن تیریستور موثر باشد .

ب ــ برشگر جونز

این مدار در شکل ۴ ــ ۲۵ نشـان داده شده و جزو طبقه بندی کلاس(ت) جابه‌جایی ، خازن بارداری که توسط تیریستـور کمکی $TH۲$ و اتوترانسفورماتور کلیدزنی می‌شود ، است . بـه علت وجود تیریستور $TH۲$، هم‌زمانی روشن‌شدن t_{on} و هم‌زمانی‌خاموشی t_{off} قابل تغییر هستند ،اما طبق شکل ، زمان خاموشی t_{off} و یا دوره[تناوب] T پارامتر کنترل شده‌ای است کـه توسط تیریستور $TH۱$ تعیین می‌شود ؛ با درنظرگرفتن این موضوع نوسان‌ساز ، $TH۲$ را ثابت ساخته تا زمان روشن t_{on} بدون تغییر باقی بماند .

این مدار از مدار اصلـی مورگان پایدارتـر است و اتوترانسفورماتـور جا به جایی قابل اعتمادتری برای تیریستور بار تأمین می‌کند .

مشابه برشگر مورگان ، موقعی که تیریستور $TH۱$ برشگرجونز روشن می‌شود خازن C درمحل علامت‌گذاری شده باردار ، و از طریق C ، $TH۱$ ، L و D مدار شروع‌به تخلیه می‌کند تاقطبیت خود را معکوس کند . دیود D از تشدید اضافی مدار LC جلوگیری می‌کند . بنابراین خازن بار خود را تا روشن شدن تیریستور $TH۲$ نگه می‌دارد . به محض روشن شدن $TH۲$ خازن در دو سر $TH۱$ تخلیه می‌شود و آن را خاموش می‌کند . خازن دوباره شروع‌به باردارشدن می‌کند و به طور



شکل ۴ ــ ۲۵ برشگر جونز

مثبت در محل علامت‌گذاری شده باردار می‌شود و تیریستور $TH۲$ را بـه علت این که جریان عبوری ازآن پس از باردارشدن به زیرجریان نگهدارنده تیریستور افت می‌کند خاموش می‌سازد. سیکل عملیات با روشن شدن دوباره $TH۱$ خود به خود تکرار می‌شود.

اگر خازن در زمانی که تیریستور $TH۱$ دوباره روشن می‌شود به اندازهٔ کافی باردارنشده باشد اهمیتی نخواهد داشت زیرا جریان بار باعث می‌شود که نیروی محرکه الکتریکی القاشده در L اتوترانسفورماتوری انرژی جا به جایی کافی را به خازن بدهد. به این علت تیریستورها بایستی دارای بیشترین میزان ولتاژ باشند.

پ ــ *برشگر نوسانی*

برشگر نوسانی ازآنجایی که در مدار بارش سلف قابل اشباع و یا اتوترانسفورماتـور نیست، از برشگرهای دیگرمتمایز است. وجه تسمیه این برشگر به علت طبیعت نوسانی یا تشدیدی جابه‌ــ جایی کلاس (ت) است. گرچه مراحل کلیدزنی شبیه به مدار جونز است ولـی مشخصه فرکانس کلیدزنی بالاتری دارد.

مراحل عمل عبارت است از آنکه تیریستور $TH۲$ (شکل ۴ ــ ۲۶) بایستـی اول راه‌اندازی شود تا خازن C به طور مثبت در محل علامت‌گذاری شده باردار شود، غیر از این جا به‌جایی ممکن نیست. سپس موقعی که $TH۱$ روشن می‌شود و جریان از بار عبور می‌کند خازن C نیز از طریق مدار تشدید C، $TH۱$، $R_۲$، $L_۲$ و $D_۲$ تغییر قطبیت می‌دهد و به طور معکـوس باردار می‌شود که در همان حالت بارداری به علت وجود دیود $D_۲$، باقی‌می‌ماندتا این که $TH۲$ آتش شود و خازن C را تخلیه کند و تیریستور $TH۱$ را بایاس معکوس و خاموش کند.

باهیچ مدارتشدیدی، خازن‌نمی‌تواند بار الکتریکی‌با قطب معکوسش رابه طورنامحدودی نگهداری‌کند. عناصر مدار ایده‌آل‌نیستند وخازن C به آرامی‌ازطریق $TH۲$ و $D_۲$، توسط جریان نشتی تخلیه خواهد شد. به هر حال اگر شرایط را به استثنای وجود مقاومت $R_۲$ (طبق شکل) در مدار جابه جایی ایده‌آل فرض کنیم، در آن صورت تحلیل مدار جا به جایی به صورت زیر خواهد بود.

۱ ــ *تحلیل پرشدن خازن*. شرایط اولیـه عبارت است از اینکـه در موقـع روشن شدن تیریستور $TH۱$ در زمان صفر، بایستی خازن در محل علامت‌گذاری شده طبـق شکل ۴ ــ ۲۷ تا V ولت پرشده باشد. مدار را تنها موقعـی می‌توان تحلیل کـرد که جریانـی در جهت عکس ساعتگرد[1] درحال عبور باشد. روابط لحظه‌ای در این مدار عبارت است از:

1- Anticlockwise

$$L_2 \frac{di}{dt} + R_2 i + \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i dt = 0 \qquad (۴-۲۵)$$

و

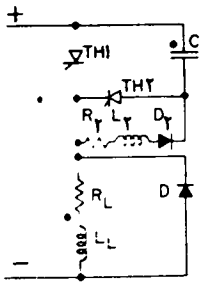
$$v_c = -\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i dt \qquad (۴-۲۶)$$

و تبدیل لاپلاس این روابط عبارتند از:

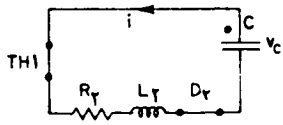
$$i(s) = \frac{V}{L_2(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)} \qquad (۴-۲۷)$$

و

$$v_c(s) = \frac{V}{s} - \frac{V}{L_2 Cs(s^2 + 2\xi\,\omega s + \omega^2)}, \qquad (۴-۲۸)$$

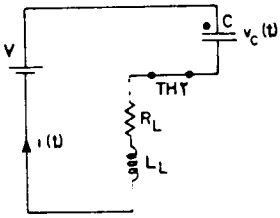


شکل ۴ــ ۲۶ مدار برشگر نوسانی



در $t = 0$
$v_c = V$

شکل ۴ــ ۲۷ مدار معادل جابه جایی



شکل ۴ــ ۲۸ جا به جایی و مدار اولین تخلیه

که در آن ضریب میرایی[1] ξ عبارت است از:

1- Damping factor

$$\xi = \frac{R_2}{2}\sqrt{\frac{C}{L_2}} \qquad (۴-۲۹)$$

و فرکانس طبیعی مدار نوسانی؛ یعنی، ω عبارت است از:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C}} \quad \frac{\text{رادیان}}{\text{ثانیه}} \qquad (۴-۳۰)$$

حل روابط (۴ــ۲۵) و (۴ــ۲۶) عبارتند از:

$$i(t) = \frac{V}{L_2 \omega \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin(\omega t \sqrt{1-\xi^2}) \qquad (۴-۳۱)$$

و

$$v_C(t) = V e^{-\xi\omega t}\left[\cos(\omega t\sqrt{1-\xi^2}) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin(\omega t\sqrt{1-\xi^2})\right]. \qquad (۴-۳۲)$$

خازن سرانجام تاموقعی پرخواهد شد که عبور جریان در جهت عکس ساعتگرد[1] در مدار قطع شود. جریان در جهت ساعتگرد به علت وجود دیود نمی‌تواند عبور کند و در هر حالت روابط فوق نمی‌توانند معتبر باشند. موقعی که خازن باردار شد شرایط حدی اتفاق می‌افتد.

$$i(t) = 0 \qquad (۴-۳۳)$$

و رابطه (۴ــ۳۱) زمان لازم برای باردار شدن، t_c را به دست می‌دهد که عبارت است از:

$$t_c = \frac{\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} = \sqrt{L_2 C}, \qquad (۴-۳۴)$$

موقعی که ولتاژ دو سر خازن v_C عبارت است از:

$$v_c = V e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \simeq V e^{-(\pi R_2/2)\sqrt{(C/L_2)}}, \qquad (۴-۳۵)$$

که از رابطه (۴ــ۳۲) به دست می‌آید. قابل تذکر است که ولتاژ منفی درمحل علامت‌گذاری‌شده نسبت به صفحه دیگر خازن به علت تلفات انرژی مربوط به مقاومت $R2$ کمتر از V است.

۲ــ *تحلیل مراحل جا به جایی*. موقعی که تیریستور $TH2$ شروع به هدایت کند خازن تخلیه می‌شود و تیریستور $TH1$ را بایاس معکوس می‌کند. $TH1$ خاموش می‌شود و از هدایت می‌افتد ولی هنوز جریان از بار عبور می‌کند و مسیر خود را در مداری که طبق شکل ۴ــ۲۸ داده‌شده است کامل می‌کند. این مدار را می‌توان فقط برای نیم سیکل از مدار تشدید طبیعی C و L_L تحلیل کرد. موقعی که جریان معکوس می‌شود مسیر مداری به C، V، D، R_2، L_2، و D_2 تغییر می‌کند. فرض می‌شود که به محض خاموش شدن TH_1 تیریستور $TH2$ روشن می‌شود، ولی البته تیریستور حالت مسدودش را نمی‌تواند به طور آنی احراز کند. روابط لحظه‌ای مدار عبارت است از:

$$L_L \frac{di}{dt} + R_L i + \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i\,dt = V \qquad (۴-۳۶)$$

و

1- Transient

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i\,dt. \qquad (۳۷-۴)$$

از شرایط اولیه داریم :

$$t = 0 \qquad (۳۸-۴)$$

$$i = I_L$$

$$v_c(0) = -V_c$$

به طوری که برگردان تبدیل لاپلاس عبارت است از :

$$i(s) = \left[\frac{(V+V_c)}{L_L} + I_L s\right] \Big/ (s^2 + 2\xi_c\omega_c s + \omega_c^2) \qquad (۳۹-۴)$$

و

$$v_c(s) = \left\{\left[\frac{(V+V_c)}{L_L Cs} + \frac{I_L}{C}\right] \Big/ (s^2 + 2\xi_c\omega_c s + \omega_c^2)\right\} - \frac{V_c}{s} \qquad (۴۰-۴)$$

که در آن :

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_L C}} \qquad (۴۱-۴)$$

و

$$\xi_c = \frac{R_L}{2}\sqrt{\frac{C}{L_L}}. \qquad (۴۲-۴)$$

برای حل معادلات فوق ، بسته به این که سیستم زیر میرا[1] ($\xi_c < 1$) ، میرای بحرانی[2] ($\xi_c = 1$) و یا فوق میرا[3] ($\xi_c < 1$) باشد ــ که اینها نیز به نوبه خود به بار بستگی دارد ــ سه راه حل وجود خواهد داشت . اینجا سؤالی مطرح است و آن اینکه راه حلهای فوق چه اطلاعاتی ارائه خواهند داد؟ اطلاعات طراحی مورد نیاز برای انتخاب L_2 و C که TH_1 را قادر می‌سازد قبل از بازیافتن حالت مسدود خود به مدت کافی بایاس معکوس شود . اکنون چون در طی عمل جا به جایی خازن شروع به تخلیه می‌کند تیریستور TH_1 آماده می‌شود تا پس از صفر شدن ولتاژ دو سر خازن دارای بایاس مستقیم شود . زمان لازم برای صفرشدن ولتاژ خازن بایستی بیشتر از زمان بازیافت[4] تیریستور بار باشد .

موقعی که مدار در حالت زیر میرا باشد ؛ یعنی :

$$\xi_c < 1 \qquad (۴۳-۴)$$

حل رابطه (۴ ــ ۴۰) عبارت است از :

$$v_c(t) = V - [(V+V_c)e^{-\xi_c\omega_c t}]\,\frac{\cos(\omega_c t\sqrt{1-\xi_c^2} - \phi)}{\cos\phi} \qquad (۴۴-۴)$$

که در آن :

$$\phi = \tan^{-1}\left[\xi_c - \frac{I_L}{\omega_c C(V+V_c)}\right] \Big/ \sqrt{1-\xi_c^2}. \qquad (۴۵-۴)$$

1- Underdamped
2- Critical damped
3- Over damped
4- Recovery time

معادله (۴ ــ ۴۴) تا برقراری شرایط زیر معتبر است :

$$\left.\begin{aligned} \frac{di}{dt} &< 0 \\ v_c(t) &= V \end{aligned}\right\} \qquad (۴۶-۴)$$

با جایگزینی $v_c(t) = 0$ در معادله (۴ ــ ۴۴) که زمان خاموشی بیشینه تیریستور ، t_{off} ، را می‌دهد داریم :

$$\phi > 0 \qquad (۴۷-۴)$$

$$t_{off} = \frac{\xi_c}{\omega_c} \ln\left(\frac{V + V_c}{V}\right) + \frac{2\sqrt{1 - \xi_c^2}}{\omega_c} \phi \qquad (۴۸-۴)$$

و برای (۴ ــ ۴۹)

$$\phi \leqslant 0$$

$$t_{off} = \frac{\xi_c}{\omega_c} \ln\left(\frac{V + V_c}{V}\right) = \frac{R_L C}{2} \ln\left(1 + \frac{V_c}{V}\right). \qquad (۵۰-۴)$$

موقعی که مدار میرای بحرانی و یا فوق میراست ، یعنی :

(۵۱ ــ ۴)

رابطه زیر به دست می‌آید :

$$t_{off} \simeq \frac{CV_c}{I_L} \qquad (۵۲-۴)$$

معادله (۴ ــ ۵۰) به علت اینکه در شرایط زیر میرا است ، یعنی به شدت نوسانی است، کوتاهترین زمان را به دست می‌دهد . اما رابطه (۴ ــ ۵۲) می‌تواند مهمتر باشد . علاوه بر بایاس معکوس کردن TH_1 ، برای زمان خاموشی تیریستور نیز ، ضروری است ، خازن C دریک زمان کوتاه کافی به اندازه :

$$v_c(t) = V \qquad (۵۳-۴)$$

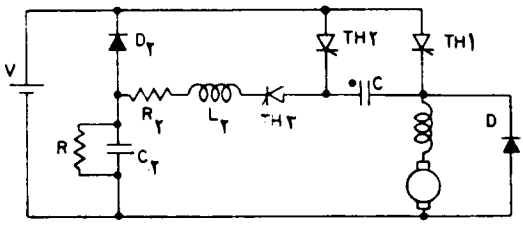
مثبت درمحل علامت‌گذاری‌شده ، قبل از دوباره روشن‌شدن تیریستور ، باردارشود . درغیر این صورت جا به جایی موفقیت آمیز نخواهد بود . دوره هدایت TH_1 را می‌توان با اضافه کردن دیودی به‌طور سری با یک سلف و موازی با TH_1 کوتاهتر کرد . جهت جلوگیری از اتصال کوتاه ــ شدن خازن در طی جا به جایی ، سلفی به مدار اضافه می‌شود . تغییر مناسب دیگری جایگزینی دیود D_2 بایکی از تیریستورها است به‌طوری که درطول جا به جایی در نیم سیکل دوم نوسانات جریان معکوس را مسدود کند و ظهور ولتاژ مثبت بیشتری را در محل علامت‌گذاری شده خازن

مجاز سازد . این کار یقینا ، موقعی که بار تنها آرمیچر موتور باشد و نیروی ضدمحرکه الکتریکی به محدود ساختن مقدار باردار شدن در جهت مثبت (جوشن نقطه‌دار) گرایش نشان دهد ، ضروری خواهد بود .

مدار برشگر نوسانی دیگری که مشکل باردار شدن خازن را در مقابل نیروی ضد محرکه الکتریکی حل می‌کند و ضرورت راه‌اندازی تیریستور کمکی را در وهلهٔ اول ، حذف می‌کند در شکل ۴ ــ ۲۹ نشان داده شده است .

اگر اول تیریستور $TH۲$ هدایت کند ، خازن C در محل علامت‌گذاری شده به طورمثبت پر و سپس $TH۲$ خاموش می‌شود . تیریستور $TH۱$ راه‌اندازی به‌جریان‌بار اجازه‌عبورمی‌دهد ، اما $TH۳$ همواره به طور همزمان با $TH۱$ راه‌اندازی می‌شود . حال یک مدار نوسانی یک طرفه $TH۳$، C ، $L_۲$ ، $D_۲$ و $TH۱$ وجود دارد برای اینکه خازن C قطبیت خود را عوض کند و تا شروع هدایت دوباره $TH۲$ در همان قطبیت باقی بماند تا یکبار دیگر $TH۱$ بایاس معکوس و خاموش شود .

اگر $TH۱$ و $TH۳$ اول روشن شوند خازن به طور منفی در محل علامت‌گذاری شده پرمی‌شود و آماده برای جا به جایی تیریستور بار خواهد بود . مدار باردارشدن ، خازن $TH۱$، C، $TH۳$ ، $R_۲$، $L_۲$ و $C_۲$ است که مستقل از مدار بار است ، در نتیجه C بدون توجه به اینکه نیروی ضد محرکه الکتریکی چقدر است به میزان همان ولتاژ باردار می‌شود .



شکل ۴ ــ ۲۹ مدار برشگر نوسانی متناوب

۴ـ۴ کنترل وضعیت توسط موتورهای جریان مستقیم

دو روش کنترل وضعیت ، شامل بالا بردن بار تا روی یک سطح مسطح ، و هدایت کردن بار در یک مسیر مشخصی تا یک هدف هستند . هر یک از این دو ، برخوردهای متفاوتی را می‌طلبند . معمولا " در روش اول عملکرد حلقه باز[1] دستی امکان‌پذیر بوده ، در صورتی که در روش دوم عملکرد حلقه بسته[2] خودکار ضروری است . هر دو سیستم برای تأمین حرکت احتیاج به موتور الکتریکی دارند .

1- Open loop 2- Closed loop

"پویش سانتیمتری[1] " معمولا نامی است که به کنترل وضعیت دستی اطلاق می‌شود که در اینجا موتور مجاز است به طور آهسته فواصل کوتاهی را با سرعتهای خیلی‌کم و با گامهای‌مجزا از هم دوران کند .

این روش کنترل را با مقاومت سری شده با آرمیچر ، درست شبیه مقاومت راه‌انداز موتور، می‌توان عملی کرد . یک همسایشگر[2] ، منبع تغذیه را قادر خواهد ساخت تا به دلخواه عملگر[3] قطع و وصل شود . مراحل کار به این ترتیب خواهد بود که در موقع اتصال منبع تغذیه ، مقاومت اضافه شده جریان آرمیچر را تا حد معینی محدود می‌کند تا گشتاورالکترومغناطیسی راه‌اندازی خیلی بیشتر از گشتاور بار نباشد . در نتیجه شتاب راه‌اندازی و سرعت نهایی‌موتور کم خواهد بود . راه‌اندازی و ایستادن متوالی و سریع ، در صورت لزوم ، به حرکات بار ، کمتر از ۲/۵ سانتیمتر ، در هر مرتبه منجر می‌شود ؛ و این یعنی " پویش سانتیمتری " .انجام "پویش سانتیمتری " در عمل ، شبیه همان راه‌اندازی موتوری است‌به استثنای‌اینکه فقط مقاومت واحدی که خارج از مدارآرمیچر کلیدزنی‌نمی‌شود مورد استفاده قرارمی‌گیرد . بنابراین کلیه سیستمهای تشریح شده برای راه‌اندازی را می‌توان در این مورد نیز به کار برد . این شامل مدارهای‌برشگر تیریستوری شکلهای ۴ ــ ۲۴ ، ۴ ــ ۲۵ ، ۴ ــ ۱۶ است ، که این مدارها کاربرد مقاومت را حذف می‌کنند و به جای آن نسبت علامت ــ فضای ثابت اندکی برای نگهداری مقدار ولتاژ متوسط کمی در دو سر آرمیچر ، توام و با جریان کم و گشتاور کم و در نتیجه سرعت کم ، قرار می‌دهند .

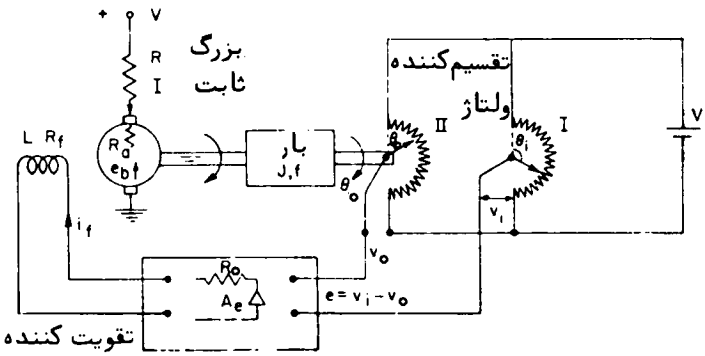
اگر بار موردنظر برای تغییر وضعیت دادن سبک وزن باشد درآن صورت موتوری که آن را بایستی کنترل کند نیز کوچک است و آرمیچر می‌تواند از یک منبع جریان ثابت کوچک تغذیه کند . گشتاور تنها به یک عامل قابل تنظیم بستگی خواهد داشت و آن میدان تحریک است که می‌تواند ابتدا به طور شدید تحریک شده و بار را به وضعیت مورد نظر برساند و سپس دوباره صفر شود .

شکل ۴ ــ ۳۰ اصول روش کنترل‌وضعیت‌خودکار رامعرفی‌می‌کند .طبق شکل ، دوتقسیم‌ــ کننده ولتاژ ، ازمنبع‌تغذیه با ولتاژ ثابتی تغذیه می‌شوند . تقسیم‌کننده ولتاژ I ، ولتاژ مبنای v_i را ، که به زاویه وضعیت موردلزوم محور شباهت‌دارد به دست می‌دهد ، در حالی‌که‌لغزنده[4] تقسیم کننده II با محور موتور تماس دارد و شباهت ولتاژ خروجی v_0 را با وضعیت‌اصلی‌مقدور می‌سازد . خطای e با اختلاف این دو ولتاژ تقویت کننده‌ای را تغذیه وجریانی‌متناسب با این اختلاف تولید می‌کند که آن نیز سیم‌پیچی میدان موتور را تحریک می‌کند .

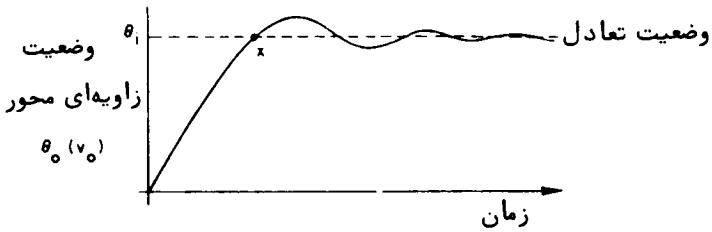
1- Inching
2- Contactor
3- Operator
4- Wipper

برای ولتاژ مبنای مخصوصی ، موتور گشتاوری متناسب با جریان میدان تحریک‌و بنابراین متناسب با ولتاژ خطا تولید می‌کند . موتور ، توأم با لغزنده تقسیم کننده II ، تا زمانی که ولتاژ v_0 برابر با v_i شود خواهد چرخید . در این نقطه ، یعنی ، x از شکل ۴ ــ ۳۱ ، محور موتور به زاویه وضعیت مورد نیاز خواهد رسید . محور ، به خاطر اندازه حرکت[1] خود از این وضعیت ، به اندازه‌ای‌که بستگی‌به ضریب میرایی سیستم دارد ، تجاوزخواهد کرد . با این‌حال ولتاژ خطا اکنون جهت جریان تحریک را معکوس می‌کند و یک گشتاور معکوس برای برگرداندن محور به وضعیت اصلی تولید می‌کند . تحریک مشابهی قبل از اینکه محور به وضعیت پایداری برسد ، طبق شکل ۴ ــ ۳۱ وجود خواهد داشت که تقریبا معرف یک سیستم زیر میرایی آرام است .

نمودار بندالی مدار کنترل وضعیت خودکار دارای شکلی نظیر ۴ ــ ۳۲ است .



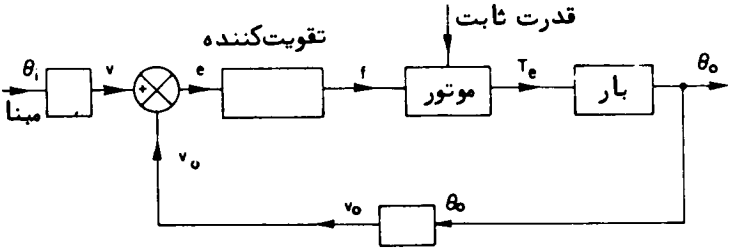
شکل ۴ ــ ۳۰ کنترل وضعیت خودکار



شکل ۴ ــ ۳۱ حرکت محور برای کنترل وضعیت

1- Momentum

POWEREN.IR



شکل ۴ ـ ۳۲ نمودار بندالی برای کنترل وضعیت ساده

۴ـ ۴ ـ ۱ کنترل وضعیت تیریستوری

در کنترل وضعیت خودکار قسمت پیشینی ضریب القای زیاد سیم پیچی میدان پاسخ الکتریکی نسبتا آرامی را نتیجه می‌دهد . ضریب القای کم آرمیچر با اینکه مستلزم کنترل قدرت‌زیادی است پاسخ خیلی سریعی تامین می‌کند ، بنابراین بهره زیاد تیریستور اجازه کنترل خودکار در موتورهای قدرت زیاد را می‌دهد .

اکنون یک‌سیستم کنترل وضعیت بهینه وار[1] از طریق آرمیچر ، به‌طورنسبتا مشروحی مورد تحلیل قرار می‌گیرد . این تحلیل بینشی در مورد پیچیدگی طراحی مدار کنترل‌پس ازانتخاب مدار اصلی ، ارائه خواهد داد .

الف ـ مطالعه طراحی سرومکانیسم[2] گسسته برای کنترل وضعیت تیریستوری

سرومکانیسم‌ها ، سیستم‌های حلقه بسته‌ای برای کنترل وضعیت ، سرعت یا شتاب یک بار جرمی هستند . آنها به طور خودکار کارمی‌کنندوتوسط علائم خطاتحریک‌می‌شوند ، به طوری که مقایسه مداومی بین ورودی‌موردقبول‌و خروجی واقعی وجودخواهد داشت . اختلاف‌بین این‌دوعلامت ، یا خطا پس از تقویت به میزان معین ، وسیله بعضی از محرکها یا کنترل کننده‌ها برای تصحیح خروجی ، مورد استفاده قرار می‌گیرد .

وسیله خودکار غیر پیوسته عبارت است از سیستم بنگ ـ بنگ[3] و یا قطع ـ وصل ،که در آن قدرت اعمال شده به کنترل کننده یا کاملا" وصل ، و یا به طور کلی قطع است . تیریستور به عنوان یک‌کلید ، برای این‌عملکرد به نحواحسن مناسب است . اینجا سؤالی مطرح می‌شود و آن اینکه‌چرا سیستم قطع ـ وصل به کار می‌رود ؟ زیرا کنترل‌کننده‌های قطع‌ـ وصل تاحدخیلی زیادی ساده‌تر ، و ارزان‌قیمت‌تر از کنترل کننده‌های پیوسته مورد استفاده در قسمتهای قبلی ،

1- Quasi-optimized
2-Servomechanism
3- Bang - bang

هستند . با پیشرفتهای قابـل ملاحظه‌ای کـه در سیستمهای پسخور خطـی حاصل شـده است ، کنترل کننده‌های پیوسته از نظر تحلیل آسانتر و کار آنها برای پیش بینی سهلتر است . بهمر- حال با افزایش علاقمندی به کنترل بهین ، توجه دوباره‌ای به کنترل کننده‌های قطع و وصل به وجود آمده است .

در اطراف موضوعات عام کنترل بهین ، نوشته‌های خیلی زیادی وجود دارد ، کـه از آن میان مسئله کنترل زمان کمینه رابطه تنگاتنگی باخود کنترلهای[1] وضعیتی دارند . ازیک خود- کنترل وضعیتی عموما انتظار می‌رود کـه خروجی سیستم را از یک مقـدار اولیه 'a' به یک‌مقدار نهائی 'b' ، در حداقل زمان ممکـن ، برساند . از بیـن محققین بلمن[2] ، فلدبوم[3] ، لاسال[4] ، پونتیاگین[5] و شاندوسی[6] مسئله زمان کمینه را موردبررسی قرار دادند و با تدقیق و تعمیم‌های مختلف ثابت کردند که سیستم قطع ـ وصل یک‌سیستم بهین زمان[7] است . سیستم‌قطع و وصل ، به صورت سیستمی که در تمام اوقات قدرت بیشینه‌ای را به مصرف می‌رساند ، تعریف شده و به طور ریاضی می‌توان چنین نوشت :

$$U_{opt} = U_{max}(\text{بعضی‌ازتوابع})Sgn \qquad (۵۴-۴)$$

که درآن

U_{opt} عبارت است از متغیر بهینه اجباری

U_{max} عبارت‌است‌از مقداربیشینه متغیر اجباری (مثالی‌از متغیر اجباری‌عبارت از ولتاژاعمال- شده به موتور است .)

Sgn عبارت است از تابع علامت (Sign)

سیستم قطع ـ وصل غیر خطی است و مشخصه اساسی سیستم غیرخطی آن است که اصل جمع آثار[8] درآن دیگر صادق‌نخواهد بود . به این‌علت تحلیل تئوری لاپلاس یا روشهای حوزه فرکانس[9] ، دیگرغیرقابل استفاده خواهندشد . روشهای متعددی ازقبیل لیاپونف[10] ، و روشهای توصیف تابع[11] صفحه فاز[12] برای تحلیل سیستمهای غیر خطی وجود دارد . دو روش اول‌در مورد سیستمهای مرتبه بالاتر[13] قابل استفاده بوده و در اصل اطلاعاتی‌درباره پایداری به‌دست می‌دهند . روش صفحه فاز برای‌همه‌سیستمهای مرتبه‌دوم یا سیستمهائی که قابل‌تقلیل‌به سیستم مرتبه دوم‌خطی یاغیرخطی هستند قابل استفاده است ومتضمن مزیت دادن اطلاعات کامل در

1- Servo
2- Bellman
3- Feldbaum
4- La Salle
5- Pontryagin
6- Chandhusi
7- Time optimal
8- Super Position
9- Frequency
10- Lyapunov
11- Describing-
12- Phase-Plane
13- High order

شرایط‌گذرا است . بنابراین ، این روش در سیستم مورد مطالعه بعدی‌مورداستفاده قرار خواهد گرفت .

اگر گشتاور لختی [1] موتور جریان مستقیم و بار آن J باشد ، ضریب چسبندگی اصطکاک [2] B باشد وگشتاور موتور بر روی‌گستره سرعت عملکردی‌به مقدارثابت T باشد ، پس‌گشتاورخروجی سیستم خودکار نشان‌داده‌شده در شکل ۴ ــ ۳۳ بستگی به علامت خطا خواهد داشت؛ یعنی اینکه :

$$T = Sgn(e)T_{max} \qquad (۴ - ۵۵)$$

که در آن

$$e = \theta_i - \theta_0 \qquad (۴ - ۵۶)$$

θ_i معرف ورودی مبنای وضعیتی و θ_0 معرف خروجی وضعیتی هستند . رابطه گشتاور بار و موتور به صورت زیر است :

$$J\ddot{\theta}_0 + B\dot{\theta}_0 = \pm T. \qquad (۴ - ۵۷)$$

با فرض اعمال ورودی پله‌ای به سیستم ، رابطه (۴ ــ ۵۷) به صورت زیر درمی‌آید :

$$\ddot{e} = \mp \frac{T}{J} + \frac{B}{J}\dot{e}. \qquad (۴ - ۵۸)$$

چون

$$\ddot{e} = \dot{e}\frac{d\dot{e}}{de} \qquad (۴ - ۵۹)$$

با جایگزینی رابطه (۴ ــ ۵۸) در رابطه (۴ ــ ۵۹) ، رابطه زیر :

$$\frac{\dot{e}\, d\dot{e}}{\mp \frac{T}{J} + \frac{B}{J}\dot{e}} = de \qquad (۴ - ۶۰)$$

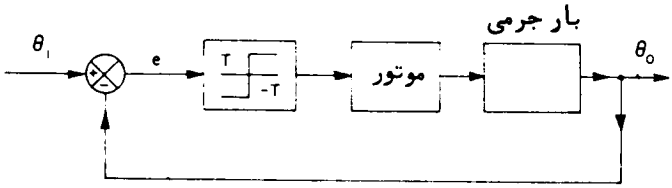
حاصل می‌شود ، و حل آن ، مسیر صفحه ــ فاز خطای e را برحسب میزان خطای $\dot{e}$ به دست می‌دهد ، عبارت است از :

$$\frac{T}{J}e = \frac{T}{B}\dot{e} \pm \frac{T^2}{B^2}\ln\left(1 \pm \frac{B}{T}\dot{e}\right). \qquad (۴ - ۶۱)$$

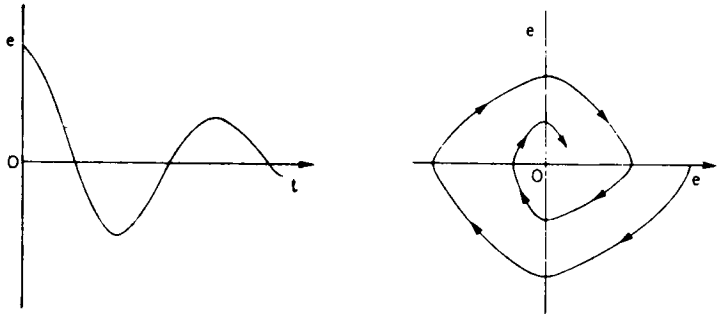
مسیر فاز سیستم و خروجی واقعی آن در شکل ۴ ــ ۳۴ نشان‌داده‌شده است . بنابراین به طور تئوریکی یک سیستم خود کنترل وضعیتی با ورودی پله‌ای ، که گشتاور خروجی آن‌دارای همان علامتی است که خطا دارد ، سیستمی را با میرایی شدید نتیجه خواهد داد .

۱ ــ مدار قدرت . برای تعویض ناگهانی جهت گشتاور موتورجریان‌مستقیم‌که اندکی پیش مورد بررسی قرار گرفت بایستی جهت جریان میدان تحریک و یا جهت ولتاژ اعمال شده به

1- Moment of Inertia 2- Viscous friction factor



شکل ۴ ــ ۳۳ سیستم خود کنترل وضعیتی قطع و وصل



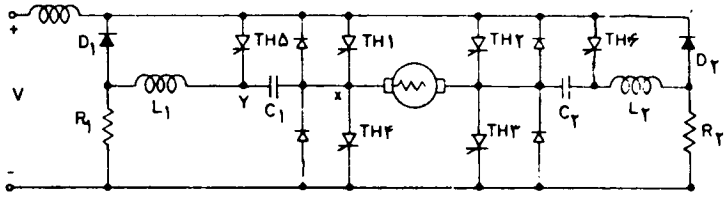
(ب) (الف)

شکل ۴ ــ ۳۴ مسیرهای سیستم خودکنترل وضعیتی قطع ــ وصل با یک ورودی پله‌ای
(الف) مسیر صفحه ــ فاز (ب) خروجی واقعی برحسب زمان

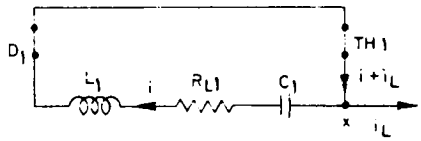
آرمیچر را تعویض کرد . روش اخیر گرچه مستلزم قطع جریان شدیدی است ولی چون پاسخ سریعتری دارد انتخاب می‌شود . مدار اصلی برای کنترل عبور قدرت در شکل ۴ ــ ۳۵ نشان داده شده که اساسا " یک مدار پل است . این مدار در حوالی بار مصرفی ، که همان آرمیچر ماشین جریان مستقیم تحریک جداگانه است ، متقارن است . اجزای $TH1$ ، $TH3$ ، $TH5$ ، C_1 ، L_1 ، $D1$ ، R_1 برای کنترل عبور قدرت از طریق بار در یک جهت بکار برده شده در حالی که عناصر $TH2$ ، $TH6$ ، $TH4$ ، C_2 ، L_2 ، $D2$ ، R_2 برای عبور دادن قدرت در جهت مخالف مورد استفاده قرار گرفته‌اند . بنابراین تنها بررسی عملکرد نصف مدار کافی خواهد بود .

این مدار شبیه برشگر نوسانی قسمت (۴ ــ ۳ ــ ۳) است . فرض می‌شود که خازن C_1 در ابتدا توسط هدایت تیریستورهای $TH3$ و $TH5$ باردار می‌شود به طوری که ولتاژ در نقطه Y به‌اندازه V ولت‌بالاتر ازنقطه X باشد . اگر $TH1$ و $TH3$ راه‌اندازی شوندجریان‌ازطریق‌بارعبور می‌کند و درهمان زمان ولتاژنقطه X به ولتاژ V افزایش می‌یابدوسبب‌افزایش ولتاژ Y به $2V$ می‌شود . در نتیجه عبور جریان از Y از طریق L_1 و $D1$ شروع می‌شود . رفتار مدار را می‌توان توسط مدار معادل ایده‌آل شکل ۴ ــ ۳۶ تحلیل کرد .

جریان در مدار شکل ۴ ــ ۳۶ به صورت لاپلاس یا حوزه s عبارت است از :



شکل ۴ ــ ۳۵ مدار قدرت



شکل ۴ ــ ۳۶ مدار معادل موقعی که $TH1$ هدایت می‌کند

$$I(s)\left(L_1 s + R_{L1} + \frac{1}{C_1 s}\right) + \frac{V(0+)}{s} = 0, \qquad (۶۲-۴)$$

حل این معادله عبارت است از:

$$i(t) = -\frac{V(0+)}{L_1 b}\, e^{-at} \sin bt \qquad (۶۳-۴)$$

که در آن

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{R_{L1}}{2L_1} \\ b &= \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R_{L1}}{4L_1^2}} \end{aligned}\right\} \qquad (۶۴-۴)$$

اکنون ولتاژ خازن را توسط انتگرال گیری می‌توان محاسبه کرد که عبارت است از:

$$v_c = \frac{1}{C_1}\int_{-\infty}^{t} i\,dt \qquad (۶۵-۴)$$

$$v_c = -\frac{V(0+)}{L_1 b}\int_{-\infty}^{t} e^{-at} \sin bt\, dt. \qquad (۶۶-۴)$$

و آن عبارت است از:

$$v_c(t) = \frac{V(0+)\, e^{-at}}{b}\,(a \sin bt + b \cos bt). \qquad (۶۷-۴)$$

چون R_{L1} مقاومت سلف L_1 است

$$b \gg a, \qquad (۶۸-۴)$$

در نتیجه

$$v_c(t) \simeq V(0+)\, e^{-at} \cos bt. \qquad (۶۹-۴)$$

شکل معادلات (۴ ــ ۶۳) و (۴ ــ ۶۹) در شکل ۴ ــ ۳۷ نشـان داده شده است . توسط دیود D_1 در مدار ، در زمان t_1 داده شده توسط رابطه

$$t_1 = \frac{\pi}{b}, \qquad (۴ - ۷۰)$$

جریان سعی در معکوس شدن می‌کند ، لیکن مسدود می‌شود ؛ در نتیجه خازن در جهت معکوس و به میزان ولتاژ در Y ، که بیشتر از X است باردار می‌شود .

$$v_c = -v \exp(-\pi a/b) \qquad (۴ - ۷۱)$$

که مقدار مطلق آن دقیقا " کمتر از V است .

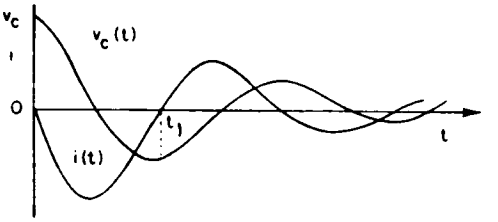
راه‌اندازی تیریستور TH_5 باعث افزایش ولتاژ در نقطه Y تا V ولت می‌شود و ولتاژ نقطه X را به $2V$ ولت تغییر می‌دهد . این ولتاژ موقتا TH_1 را بایاس معکوس می‌کندواجازه می‌دهد که دوباره حالت‌مسدودمستقیم را بازیابد . خازن C_1 دوباره با نقطه Y به اندازه V ولت‌بیشتر از X ،باصرفنظر کردن از نیروی ضد محرکه الکتریکی که در این نقطه ممکن است خیلی کم و یا صفر باشد ، باردار خواهد شد و TH_5 به علت این که جریان عبوری از آن‌تـوسط مقـــاومت R_1 محدود به کمتر از جریان نگهدارنده می‌شود خاموش خواهد شد . باتوقف‌جریان‌بار ، تیریستور TH_3 حالت مسدود خود را باز می‌یابد ،یابه‌خاطر طبیعت نوسانی خازن C_1،سلف‌آرمیچر ،ومنبع تغذیه موقعی که جریان بارمعکوس می‌شود تیریستور TH_3 خاموش می‌شود . عمل یک سیکل اینجا تکمیل می‌شود و تیریستورهای TH_1 و TH_3 یا TH_2 و TH_4 اکنون دوباره می‌تواننـد روشن شوند و سیکل بعدی را تکرار کنند .

وظیفه اولیه مقاومت R_1 تأمین مسیر درروبی[1] برای جریان‌نشتی دیود D_1 وتیریستور TH_5 است و تا موقعی که تیریستورهای TH_1 و TH_5 در حال هدایت هستند مانع افزایش ولتـاژ نقطه Y تا ولتاژ نقطه X می‌شوند . در هر حال مقاومت R_1 [همراه] با مقاومت مسدود کننده دیـود D_1 و تیریستور TH_5 به مثابه تقسیم‌کننده ولتاژ عمل‌می‌کند ، و در نتیجه ولتاژ نقطه Y درمقدار ولتاژ کمینه‌ای محدود[2] می‌شود . چون برای هدفهای جا بـه جایی ، داشتن اختلاف پتانسیل حتی‌الامکان زیادی در دو سر صفحات خازن C_1 مطلوب است ، لذا مقاومت R_1 بایستی به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا جریان مسیر TH_5 را درحدود کمتر ازجریان نگهدارنده محدود کند .با یک مقاومت سالم‌ساز کوچکی ثابت زمانی R_1C_1 نیز کمتر می‌شود و اگر تیریستورهای بار TH_1 و TH_3 روشن نباشند ولتاژ نقطه Y به طور سریع به صفر تقلیل خواهد یافت . بنابـراین برای القای ولتاژ زیادی بین‌نقاط Y و X دراین وضعیت ، تیریستور TH_5 بایستی‌به طور مداوم‌تحت‌فرمان باشد .

آرمیچر موتور برای اتلاف انرژی القایی ذخیره شده ، دارای دیود چرخش‌آزاد نیست ،

1- Bieeding Path 2- Clamp

زیرا جهت چرخش قابل تعویض است . در مورد ماشینهای کوچک با یک سلف کم این مشکل قابل تحمل خواهد بود ولی درمورد ماشینهای قدرت بالا مدارهای دیگری بایستی مدنظر قرارگیرند . پل دیودی به طور موازی با پل تیریستوری ، راه حل برگشت انرژی القایی به منبع تغذیه است .



شکل ۴ ــ ۳۷ جریان و ولتاژ خازن مدار شکل

۳ ــ *مدار کنترل* . یک مدار منطقی برای کنترل عمل کلیدزنی تیریستورها در پل شکل ۴ ــ ۳۵ ، مورد نیاز است . سه تابع کلیدزنی [تیریستورهای این مدار] به ترتیب زیر وجود دارند :

الف) کلیدزنی تیریستورهای $TH1$ و $TH3$

ب) کلیدزنی تیریستورهای $TH2$ و $TH4$

پ) کلیدزنی تیریستورهای $TH5$ و $TH6$

متغیرهای کلیدزنی در اینجا تعیین و توابع منطقی نهایی (ضمیمه پ III) [به صورت نمودار بندالی] معرفی شده‌اند . متغیرها عبارتند از :

الف) T_{13} متغیری است که روشن یا خاموش بودن تیریستورهای $TH1$ و $TH3$ را مشخص می‌کند .

ب) T_{24} متغیری است که روشن یا خاموش بودن تیریستورهای $TH2$ و $TH4$ را مشخص می‌کند .

پ) T_{56} متغیری است که روشن یا خاموش بودن تیریستورهای $TH5$ و $TH6$ را مشخص می‌کند .

ت) P_{13} متغیری است که خطای وضعیتی را که با روشن کردن تیریستورهای $TH1$ و $TH3$ می‌تواند یکسو شود مشخص می‌کند .

ث) P_{24} متغیری است که خطای وضعیتی را که می‌تواند با روشن شدن تیریستورهای $TH2$ و $TH4$ یکسو شود را معین می‌کند .

ج) C متغیری است که حدود جریان بار را مشخص می‌کند .

توابع منطقی کلیدزنی عبارت است از:

$$T_{۵۶} = C + \bar{P}_{۱۳} \cdot \bar{P}_{۲۴} + T_{۱۳} \cdot P_{۲۴} + T_{۲۴} \cdot P_{۱۳} \qquad (۴-۷۲)$$

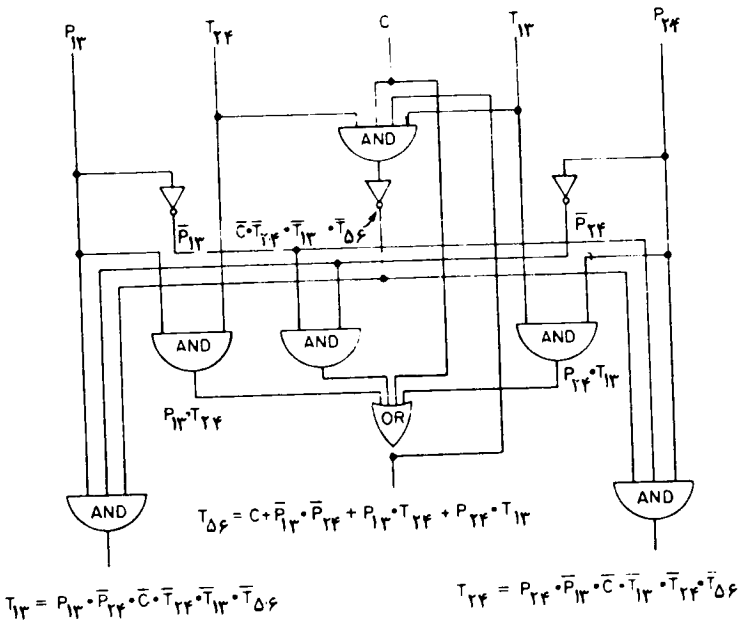
$$T_{۱۳} = P_{۱۳} \cdot \bar{P}_{۲۴} \cdot \bar{C} \cdot \bar{T}_{۱۳} \cdot \bar{T}_{۲۴} \cdot \bar{T}_{۵۶} \qquad (۴-۷۳)$$

$$T_{۲۴} = \bar{P}_{۱۳} \cdot P_{۲۴} \cdot \bar{C} \cdot \bar{T}_{۱۳} \cdot \bar{T}_{۲۴} \cdot \bar{T}_{۵۶} \qquad (۴-۷۴)$$

رابطه (۴ ــ ۷۲) نشان می‌دهد که تیریستورهای $TH۵$ و $TH۶$ به شرط تجاوز جریان بار از حداکثرمجاز C (OR) عدم‌وجودخطای‌وضعیتی $(P_{۱۳} \cdot P_{۲۴})$ یا(OR)روشن‌بودن‌یکسری‌ازتیریستورهای باروشن‌خواهندشد ،ولی‌خطای‌موضعی‌طوری‌است که سری دیگری $(T_{۱۳} \cdot P_{۲۴} + T_{۲۴} \cdot P_{۱۳})$ بایستی روشن شوند ، به طور مشابه رابطه (۴ ــ ۷۳) نشان دهندهٔ آن است که تیریستورهای $TH۱$ و $TH۳$ برای روشن شدن زمانی علائم دریچه را دریافت می‌کنند که خطا آن چنان باشدکه $P_{۱۳}$ وجود داشته باشد ولی $P_{۲۴}$ نباشد$(P_{۱۳} \cdot P_{۱۴})$ و AND جریان زیرمقدار حداکثر $(\bar{C})$ باشدAND کلیه تیریستورها $(\bar{T}_{۱۳} \cdot \bar{T}_{۲۴} \cdot \bar{T}_{۵۶})$ را مسدود می‌کنند .

توابع کلیدزنی روابط(۴ ــ ۷۲) ، (۴ ــ ۷۳) و (۴ ــ ۷۴) را می‌توان بــه صورت نمودار منطقی بندالی شکل ۴ ــ ۳۸ رسم و نشان داد .

ورودی مدار کنترل منطقی را بایستی از شبکه‌های آشکارساز گــرفت و خروجی مدار نیــز

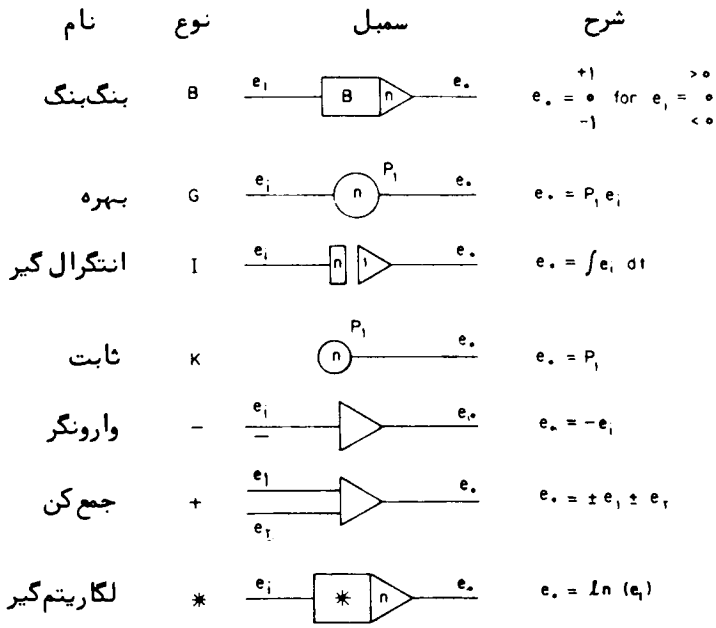


شکل ۴ ــ ۳۸ نمودار بندالی توابع [نهایی] کلیدزنی

بایستی مدارهای راه‌انداز دریچه تیریستورها را تغذیه کند .

مثال حل شده ۴ ــ ۳ . پاسخ یک سیستم خودکار قطع ــ وصل را به ازای ورودی تابع پله‌ای تعیین کنید .

از شکل ۴ ــ ۳۳ و رابطه (۴ ــ ۵۷) ، به منظور شبیه‌سازی کردن یک سیستم واقعی بر روی یک‌شبیه‌ساز قیاسی‌کامپیوتری[1] (برنامه PACTOLUS) استفاده به عمل آمده است . علایم اختصاری در شکل ۴ ــ ۳۹ به نمایش گذاشته شده و نمودار بندالی برای شبیه سازی خطای کلیدزنی وضعیتی ساده‌ای در شکل ۴ ــ ۴۰ نشان داده شده است . مقادیر گشتاور لختی و گشتاور ثابت هستند اما از چندین ضریب اصطکاک استفاده شده است . شکل ۴ ــ ۴۱ نتایج نمونه‌ای کامپیوتر را نشان‌می‌دهد درحالی که شکل ۴ ــ ۴۲ نتایج آزمایشی را نشان‌می‌دهد .

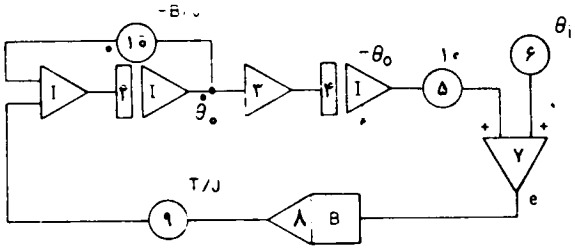


شکل ۴ ــ ۳۹ نمادهای شبیه ساز

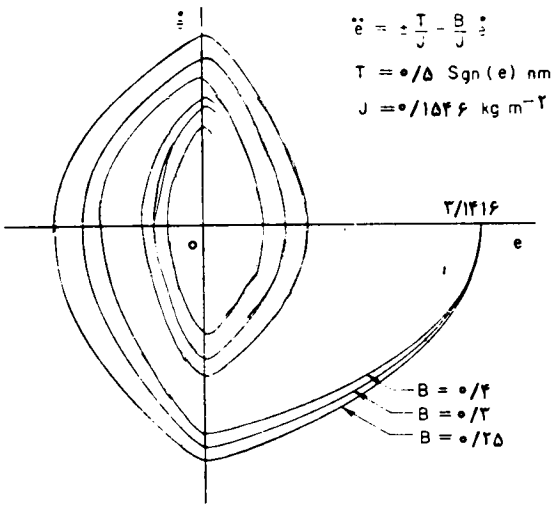
سیستم نشان داده شده به آهستگی میرا می‌شود و برای پاسخ بهین احتیاج به اصلاح دارد . یک روشی برای بهبود ، اضافه کردن مدار جبران کننده فاز[2] بین علامت خطا و مدار منطقی است . این مدار ممکن است باعث تعویض جهت چرخش موتور جریان مستقیم قبل از

1- Analogue computer simulator

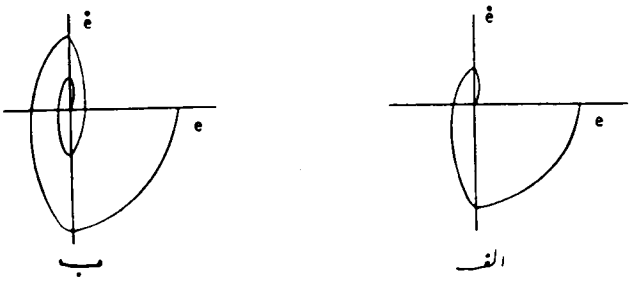
2- Phase-compensating



شکل ۴ ــ ۴۰ نمودار بندالی برای شبیه‌سازی کردن خطای کلیدزنی ساده



شکل ۴ ــ ۴۱ نتایج قیاسی خود کلیدزنی وضعیتی روی علامت خطا



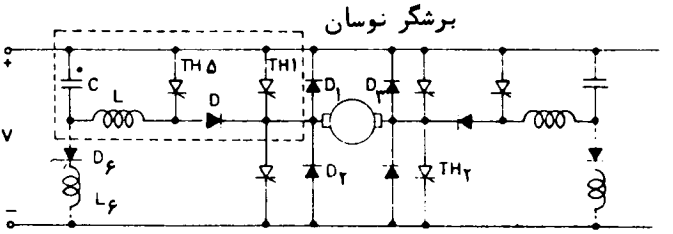
شکل ۴ ــ ۴۲ مسیرهای فازی سیستم آزمایشی (الف) جریان آرمیچر ۴/۷ آمپرباورودی پله‌ای ۱۵ ولت، (ب) جریان آرمیچر ۷ آمپر با ورودی پله‌ای ۱۵ ولت

رسیدن به وضعیت مورد لزوم شود . در نتیجه موتور ترمز شده و در حالت استراحت بـا نقطه خطای صفر بدون نوسان اضافی[1] باقی خواهد ماند .

۴ ـ ۴ ـ ۲ مدارهای متناوب

مدار پل مورد استفاده برای کنترل وضعیت ،کـه در شکل ۴ ـ ۳۵ نشان داده شده تا اندازه‌ای مدار برشگر نوسانی است . این مدار معایبی[نیز] دارد . به علت این کـه خازن از طریق بار مصرفی تخلیه می‌شود ، زمان تخلیه و دوباره پرشدن می‌تواند در مقایسه با زمان واقعی جابه‌جایی طولانی باشد . بار فعالی مثل موتـور جریان مستقیم ، به علت وجود نیروی ضـد محرکه الکتریکی ، می‌تواند از ذخیره شدن انرژی جابه جایی کافی در خازن جلوگیری کند . اگر موتور کوچک باشد و سرعت چرخش توسط خطاهای وضعیتی کوچکی پایین‌نگه داشته شود درآن صورت مدار پل‌به‌طور رضایت‌بخشی عمل‌خواهد کرد . شکل ۴ ـ ۴۳ آرایش متناوبی‌را نشان‌می‌دهد.

جریان بار موقعی که تیریستورهای $TH1$ و $TH2$ راه‌اندازی شوند عبـور می‌کند و پیوستگی مدار $(C, L, D, TH2)$ را برای باردار شدن خازن C تا $+V$ ولت درمحـل‌علامت گذاری‌شـده



شکل ۴ ـ ۴۳ مدار پل متناوب برای کنترل وضعیت

تأمین می‌کند . برای جا به جایی جریان بار ، تیریستور $TH5$ راه‌اندازی می‌شود . مدارنوسانی $TH5, C$ و L خازن C را برای معکوس‌ساختن قطبیتش قادرمی‌سازد به طوری‌که در حالت ایده‌آل $+V$ ولت در محل علامت گذاری شده و $2V+$ ولت درصفحه دیگر خازن وجود خواهد داشت . در انتهای اولین نیم سیکل نوسانات جریان سعی در معکـوس شدن دارد بـه طوری کـه $TH5$ مسدود ، و خاموش می‌شود و خازن C از طریق بار تخلیه می‌شود و جریان $TH1$ را می‌بلعد[2] . موقعی که جریان خازن از جریان بار تجاوز کند جریان اضافی از طریق دیود $D1$ عبـور خواهد کرد . تیریستور $TH1$ بایاس معکوس، و خاموش می‌شود . هنگامی که خازن C در محل علامت ـ گذاری شده به طور مثبت باردار می‌شود و نقطه X تا ولتـاژ خط منفی افت می‌کنـد و در آنجا

1- Overshoot 2- Starve

توسط دیود D_2 محدودمی‌شود . عبورجریان بار از طریق دیود D_2 و D_3 برای برگرداندن انرژی القایی باربه‌منبع تغذیه است . موقعی‌که جریان بار به صفر تقلیل پیداکند ، زوج تیریستورهای دیگر پل ممکن است شروع به هدایت کنند .

برای بارهای خیلی سبک یا شرایط مدار باز ، خازن نبایستی باردار شود مگر اینکه دیود D_6 و سلف L_6 به مدار اضافه شود . افزودن این دو عنصر باردار شدن خازن را در هر شرایطی مطمئن می‌سازد . ولی مقدار L_6 بایستی چندین برابر مقدار L باشد تا اینکه در طول جابه‌جایی سلف L_6 جریان تخلیه را بیش از اندازه گریز[1] ندهد .

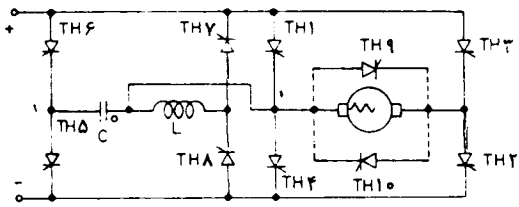
مدار دیگری نیز که از وارونگر وک[2] (۲) اقتباس شده است وجود دارد . گرچه این مدار تعداد زیادی تیریستور لازم دارد ، ولی در نشان دادن مشکلات موجود در انتخاب بهترین سیستم تیریستوری برای هر کاربرد معینی به کار می‌آید . این مدار در شکل ۴ ــ ۴۴ نشان داده شده است .

تیریستورهای TH_1 ، TH_2 و TH_5 در یک زمان راه‌اندازی می‌شوند . TH_1 و TH_2 اجازه می‌دهندکه جریان‌بارجاری شودو TH_5 می‌گذاردکه خازن به طورمثبت درمحل علامت گذاری‌شده مستقل از شرایط بار ، باردار شود .

راه‌اندازی تیریستور TH_6 خازن C را از طریق بار تخلیه می‌کند و در همان زمان TH_1 را بایاس معکوس می‌کند و خاموش می‌سازد . عمل مدار در اینجا تمام نمی‌شود ، زیرا خازن C هنوز در حال تخلیه شدن است و جریان بار نیز هنوز از طریق TH_6 و C عبور می‌کند .

تیریستور TH_7 به محض خاموش شدن TH_1 روشن می‌شود و باعث خالی‌شدن‌خیلی سریعتر C ازطریق L و TH_7 ، TH_6 و C و سپس ازطریق بارمی‌شود . TH_7 دوباره موقعی که جریان در مدار نوسانی LC شروع به معکوس شدن کند خاموش می‌شود .

TH_4 راه‌اندازی شده و خازن C با سرعت هرچه ممکن شروع به باردارشدن از طریق TH_6 C و TH_4 با قطبیت‌معکوس می‌کندو درموقعی‌که جریان معکوس از بار عبورکند آماده جابه‌جایی می‌شود .



شکل ۴ ــ ۴۴ مدار پل دیگری برای کنترل وضعیت

1- Fleed 2- Wouk

این مدار اجازه استفاده ازپل‌دیودچرخش آزادمعکوس رانمی‌دهد بلکه‌مدارتیریستورهای پشت به پشت چرخش‌آزاد را به منظور تهیه مسیری برای جریان سلفی بار نشان می‌دهد . در سیکل حاضر ، تیریستور $TH۵$ درست در همان زمانی که تیریستورهای $TH۶$ یا $TH۷$ یا $TH۴$ راه‌اندازی می‌شوند شروع به هدایت خواهد کرد . قبل از اینکه $TH۳$ و $TH۴$ ، بـرای معکوس کردن جریان در بار آتش شوند تیریستور $TH۱۰$ بایستی دوباره درحالت مسدود خود باشد . زمان لازم بین راه‌اندازی تیریستور $TH۶$ و $TH۴$ تنها درحدود ۵۰ میکروثانیه است .

دور کلیدزنی برای جریان در جهت معکوس بایستی با $TH۳$ ، $TH۴$ ، $TH۶$ ، $TH۵$ ، $TH۹$ و $TH۸$ و سرانجام $TH۱$ کامل شود .

مراجع

1. Pelly, B. R. (1971), 'Thyristor phase. Controlled converters & cyclo-converters', John Wiley, Interscience, New York.
2. Wouk, V. (1967), 'High power thyristor battery drive for high peak low average power pulser', *Proc. I.E.E.E.*, 1456.
3. Mills, J. (1961), 'An output prediction system to improve the performance of on/off and saturating control systems', *Proc. I.E.E.*, **108** (B), 667-671.

کتابنامه

Griffin, A. W. J. and Ramshaw, R. S. (1965), 'The thyristor and its applications', Chapman and Hall, London.

Power applications of controllable semiconductor devices (1965), I.E.E. Conference Publication, No. 17.

Morgan, R. E. (1966), 'Basic magnetic functions in converters and inverters including new soft commutation', *I.E.E.E. Trans.*, IGA-2 (No. 1), 58-65.

Sato, N. (1967), 'Improvement of SCR chopper circuit', *Electrical Engineering in Japan*, 87 (2), 75-83.

'Morgan Chopper Circuit', *I.E.E.E. Communications and Electronics*, **80**, 152; (1961); **83**, 336, (1964); **83**, 198, (1964).

Mapham N. W. and Hey, J. C. (1964), 'Jones chopper circuit', *I.E.E.E. Int. Conf. Rec.* p. 124.

Heumann, K. (1964), 'Oscillation chopper circuit', *I.E.E.E. Communications and Electronics* **83**, 390.

Turnbull, F. (1963), 'D-C to D-C 30 HP motor drive', *A.I.E.E.* **81** (1), 458-62.

Heumann, K. (1964), 'Pulse control of d.c. and a.c. motors by SCRs', *I.E.E.E. Communications and Electronics*, **83**, 390-399.

Engelhart, R. (1963), 'A study of the Morgan D-C to D-C stepdown circuit', *Proc. Intermag. Conf.* 11.5.1-8.

McMurray, W. (1970), 'Analysis of thyristor d.c. chopper power converters including non-linear commutating reactors', *I.E.E.E. Transactions on Magnetics*, **MAG-6** (1).

Dewan, S. B. and Duff, D. L. 'Analysis of energy recovery transformer in d.c. choppers and inverters', *I.E.E.E. transactions on Magnetics*, **MAG-6** (1).

Maresca, T. J. (1970), 'Regulated DC-D-C converter', *I.E.E.E. Transactions on Magnetics*, **MAG-6** (1).

Ramshaw, R. S. and Padiyar, K. R. (1970), 'Digital simulation of a full wave single phase converter system', *Proc. I.E.E.*, **117** (11), 2151-2158.

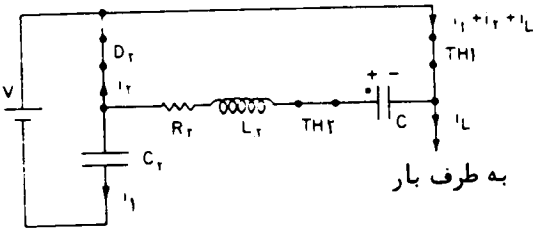
Sato, N. and Murase, K. (1969), 'A step-up and step-down d.c. voltage converter using thyristor time ratio control', *Electrical Engineering in Japan*, 89 (11).

Kusko, A. (1971), *Solid-state d.c. motor drives*, M.I.T. Press, USA.

مسائل

۴ ــ ۱ . مدار شکل ۴ ــ ۲۹ ولتاژ جابه‌جاکننده‌ای بین دو سر خازن که مستقل از نیروی ضد محرکه الکتریکی موتور است مهیا می‌سازد . مدارهای جا به جایی را برای دوحالت زیر مورد بررسی قرار دهید . (الف) موقعی که تیریستور $TH۲$ برای اولین بار راه‌اندازی می‌شود و خازن C به طور مثبت در محل علامت‌گذاری شده باردار شود . (ب) موقعی که تیریستور $TH۱$ برای اولین بار راه‌اندازی شود .

حالت (الف) : موقعی‌که تیریستور $TH۲$ برای اولین‌بار راه‌اندازی می‌شود ، خازن C را به طورمثبت درمحل علامت‌گذاری‌شده تا رسیدن به ولتاژحالت‌پایدار V_c باردار می‌کند سپس در لحظه $t = ۰$ (شکل ۴ ــ ۴۵) حالت نهایی باردار شدن را برای جابه‌جایی تیریستوربار ارائه می‌کند . از مقاومت تخلیه R صرفنظر شده است .



شکل ۴ ــ ۴۵ باردار شدن نهایی مدار جابه‌جاکننده

روابط مدار را می‌توان با بررسی شکل ۴ ــ ۴۵ به صورت زیر نوشت :

$$R_2(i_1+i_2)+L_2\frac{d(i_1+i_2)}{dt}-v_c=0 \qquad (۴-۷۵)$$

$$R_2(i_1+i_2)+L_2\frac{d(i_1+i_2)}{dt}-v_c+v_{c2}=V \qquad (۴-۷۶)$$

$$v_c=-\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t}(i_1+i_2)\,dt \qquad (۴-۷۷)$$

و

$$v_{c2}=-\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t}i_1\,dt. \qquad (۴-۷۸)$$

شرایط اولیه عبارتند از :

$$\left.\begin{aligned} t &= 0 \\ i_1 = i_2 &= 0 \\ v_c &= V_c \\ v_{c2} &= V_{c2} \end{aligned}\right\} \qquad (۷۹-۴)$$

تبدیل لاپلاس رابطه ولتاژ عبارت است از :

$$v_c(s) = \frac{V_c}{s} - \frac{V_c}{L_2 Cs(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)} \qquad (۸۰-۴)$$

و

$$v_{c2}(s) = \frac{V}{s}. \qquad (۸۱-۴)$$

ولتاژ $v_c(s)$ همان است که قبلا"بود . لذا $v_c(t)$ از رابطه (۴ ــ ۳۲) با جایگزینی V_c با V به دست می‌آید و مقدار نهایی ولتاژ نیز مثل رابطه (۴ ــ ۳۵) بـاز با جایگزینی V_c با V خواهد بود . خازن به علت وجود دیود $D2$ تا زمانی که تیریستور $TH2$ راه‌انـدازی شود در این ولتاژ باقی می‌ماند . ولتاژ دو سر خازن C_2 درلحظه $t = 0+$ از V_{c2} به V صعود می‌کند کـه V_{c2} توسط دوره مسدود مدار برشگر و ثابت زمانی تخلیه RC_2 تعیین می‌شود .

حالت (ب) : موقعی که تیریستور $TH1$ برای اولین‌بار روشن می‌شود . دیود $D2$ هدایت نمی‌کند . مدار باردار شدن طبـق شکل ۴ ــ ۴۶ است و بـار اولیه روی خازن C صفـر است . روابط در این حالت عبارتند از :

$$R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + v_c + v_{c2} = 0, \qquad (۸۲-۴)$$

$$v_c = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i\,dt \qquad (۸۳-۴)$$

و

$$v_{c2} = \frac{1}{C_2}\int_{-\infty}^{t} i\,dt. \qquad (۸۴-۴)$$

شرایط اولیه عبارت است از :

$$\left.\begin{aligned} t &= 0 \\ i &= 0 \\ v_c &= 0 \\ v_{c2} &= V_{c2} \end{aligned}\right\} \qquad (۸۵-۴)$$

در نتیجه حل معادلات (۴ ــ ۸۲) ، (۴ ــ ۸۳) و (۴ ــ ۸۴) عبارت است از :

$$i(t) = (V - V_{c2})\, e^{-\xi\omega t} \frac{\sin \omega t\sqrt{1-\xi^2}}{L_2\, \omega \sqrt{1-\xi^2}}, \qquad (۸۶-۴)$$

$$v_c(t) = \frac{C_2(V - V_{c2})}{(C + C_2)}\left[1 - e^{-\xi\omega t}\frac{\cos(\omega t\sqrt{1-\xi^2} - \phi)}{\sqrt{1-\xi^2}}\right] \qquad (۸۷-۴)$$

و

$$v_{c2}(t) = V_{c2} + \frac{C_2(V - V_{c2})}{(C + C_2)}\left[1 - e^{-\xi\omega t}\frac{\cos(\omega t\sqrt{1-\xi^2} - \phi)}{\sqrt{1-\xi^2}}\right] \qquad (۸۸-۴)$$

که در آن

$$\omega = \sqrt{\frac{C + C_2}{CC_2L_2}}, \qquad (۸۹-۴)$$

$$\xi \frac{R_2}{2}\sqrt{\frac{CC_2}{L_2(C + C_2)}} \qquad (۹۰-۴)$$

و

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}. \qquad (۹۱-۴)$$

شکل ۴ ــ ۴۶ یک مدار تشدید است. خازنها باردار می‌شوند، جریان به حداکثرخود صعود می‌کند ودرشرایط حدی‌معادلات دیفرانسیل، به صفر نزول می‌کند. خارج از این[حدود] به علت یکطرفه بودن مدار و در نتیجه غیرخطی بودن آن، آنها صدق نخواهند کرد. بـه هر حال در این شرایط حدی است که مقادیری از ولتاژ روی خازنها مورد نیاز است ,[دراین‌شرایط] از عمل مدار تشدید، نیم سیکل گذشته است به طوری که:

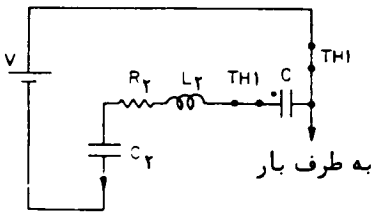
$$i(t) = 0, \qquad (۹۲-۴)$$

موقعی که:

$$\omega\sqrt{1-\xi}\, t = \pi \qquad (۹۳-۴)$$

و ولتاژ معکوس دو سر $TH1$ در موقع جابه‌جایی، از $v_c(t)$ به دست می‌آید و اگر:

$$\xi \ll 1, \qquad (۹۴-۴)$$



شکل ۴ ــ ۴۶ باردار شدن مدار جابه‌جایی

یعنی اینکـه مدار زیر میرا است، سپس

$$v_c(t)_{i=0} = \frac{2C_2(V - V_{c2})}{(C + C_2)} \qquad (۹۵-۴)$$

و

$$v_{c2}(t)_{i=0} = V_{c2} + \frac{2C(V - V_{c2})}{(C + C_2)} \qquad (۹۶ - ۴)$$

چون ω درحالت (الف) کمتر از ω در حالت (ب) است ، لـذا مدت باردار شدن حالت دوم بایستی کوتاهتر باشد .

مقاومت R ، درطی دوره غیر هدایت تیریستور $TH1$ خازن C_2 را تخلیه می‌کند تا V_{c2} موقع روشن شدن $TH1$ دارای مقدار کمتری باشد .

۴ ــ ۲ . مقادیر اجزای مناسبی را برای مـدار قطع و وصـل قدرت خودکار قسمت (۴ ــ ۴ ــ ۱) تعیین کنید . مدارحفاظت مناسبی برای تیریستورها اضافه کنید و مدار فرمانی که مابین خروجی مدار منطقی و دریچه‌های تیریستور قرار می‌گیرد طرح کنید .

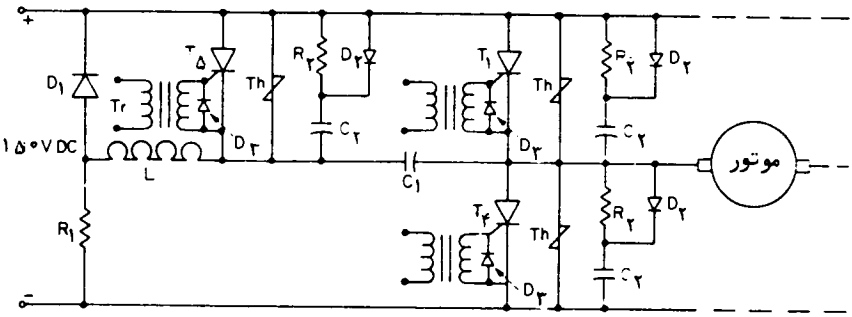
فرض می‌شود که مقدار اسمی بار ۲ کیلووات و ولتاژ منبع تغذیه جریان مستقیم ۱۵۰ ولت باشد . نیمی از مدار قدرت متقارن در شکل ۴ ــ ۴۷ نشـان داده شده است ، و مقادیر اجزای مدار به طریق زیر است :

T_1, T_2, T_3, T_4	تیریستورهای GEC۳۸D ۳۵ آمپر ، ۴۰۰ ولت
T_6, T_5	تیریستورهای ۲۰ آمپری ، ۴۰۰ ولتی
L	۲۰۰ میلی هانری
$D1$	۴JA۴۱D
$D2, D3,$	IN۵۵
C_1	۲۸ میکروفاراد
C_2	۳۳ پیکوفاراد
Th	۶RS۲۱VA/۵D (تیرکتور[1] ، محافظ ولتاژ خیز)
R_1	۱۵ کیلو اهم
R_2	۱۰ اهم
موتور	ماشین تعمیم یافته چهار قطبی مداسلی[2] با تحریک جداگانه

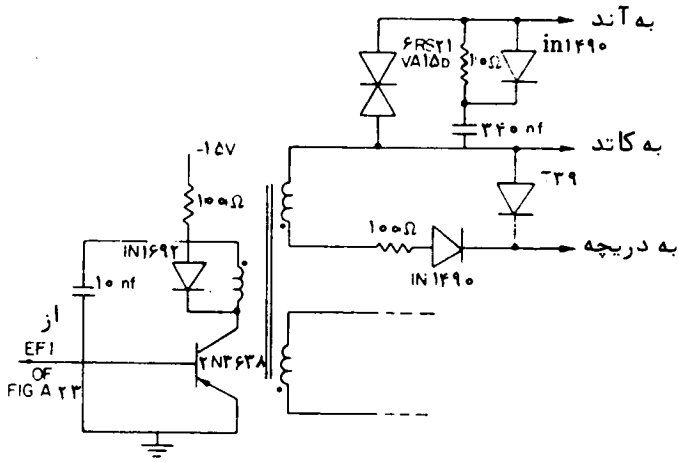
قسمتی ازمدارهای کنترل (شکل ض ــ ۲۳) قطع و وصل خود کنترل که بـا برچسب $PS1$ نوسانساز معین شده است ، پالس موج مربعی ۱۸ کیلو هرتزی با دامنـه ۲/۲ ولت پیک تـا پیک تولید می‌کند . از خازن ۲۲۰ پیکوفارادی برای به دست آوردن این فرکانس استفـاده می‌شود . این علامت معکوس و تقویت می‌شود تا مدار محرک را برای تیریستورها تغذیه کند . طبـق شکل

1- Thyrector 2- Mawdsley

۴ ــ ۴۸ هر یک از این مدارهای محرک تنها دو تیریستور را تحریک می‌کنند ، ترانسفورماتور پالس دارای نسبت دوره‌های $\frac{۲۵۰۰}{۱۰۰۰}$ است ، حفاظت تیریستورها نیز درشکل‌نشان داده شده است .



شکل ۴ ــ ۴۷ مدار قدرت

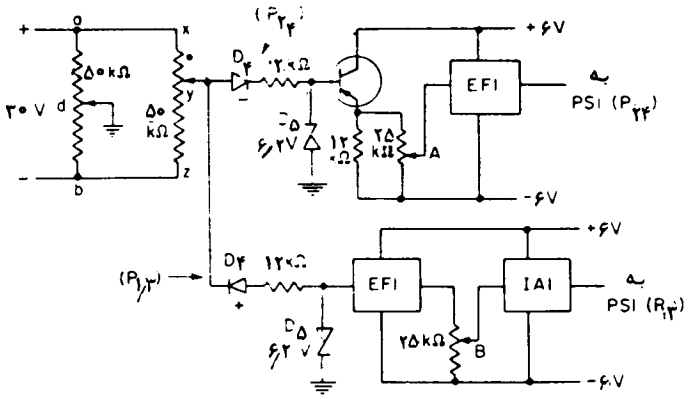


شکل ۴ ــ ۴۸ مدار محرک و متوقف ساز [1]

۴ ــ ۳ . قطع و وصل خود کنترل در قسمت (۴ ــ ۴ ــ ا) و ضمیمه (پ) به طور مفصل بررسی شده است . جزئیات مدارهای آشکارساز موردتوجه قرارنگرفته است ، مدارهای آشکارساز مناسبی طرح کنید .

شش متغیر $C, T_{۱۳}, T_{۲۴}, T_{۵۶}, P_{۱۳}, P_{۲۴}$ وجود دارند که حالتهای آنها برای کار رضایت‌بخش مدار بایستی تعیین شوند .

1- Suppressor



شکل ۴ ــ ۴۹ آشکارسازی خطای وضعیتی

آشکارساز خطای وضعیتی ($P_{۱۳}$، $P_{۲۴}$): یک پل دو پتانسیومتری یک دور[1] ۵۰ کیلواهمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از پتانسیومترها ورودی مبدا و دیگری، که به محور موتور بسته شده است، معرف وضعیت خروجی است. مدار کامل آشکارساز وضعیتی شامل اصلاحات لازم برای تطبیق علامتش به مدارات کنترل، در شکل ۴ ــ ۴۹ نشان داده شده است. چون پتانسیومترها مساویند

$$\frac{ad}{db}=\frac{xz}{zy}$$

و ولتاژ خطایی بین d و z وجود خواهد داشت. ولتاژ خطا به علت زمین شدن محور مبدأ می‌تواند، مثبت یا منفی باشد. دو دیود $D_۴$ دو تراز ولتاژ را از هم مجزا می‌کند. به منظور محافظت مدارات کنترل، دیودهای زنر $D_۵$ برای نگهداری ولتاژ درمقدار بیشینه ۶/۲ ولت اتصال یافته‌اند و مقاومت ۱۲ کیلواهمی برای محدود کردن جریان است.

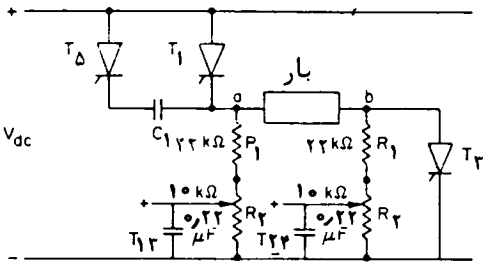
به منظور تنظیم[2] پتانسیومتر ۲۵ کیلواهمی برای $P_{۱۳}$ (یا $P_{۲۴}$)، بایستی خروجی مدار پل را در صفر یا ولتاژ منفی تنظیم کرد. حال پتانسیومتر ۲۵ کیلواهمی طوری تنظیم می‌شود که خروجی نوسانساز پالس (طبق شکل ض ــ ۲۳) روی صفر ولت کلید شود.

آشکارسازی قطع ــ وصل تیریستوری ($T_{۱۳}$، $T_{۲۴}$): در شکل ۴ــ۵۰ اگر تیریستورهای $TH_۱$ و $TH_۳$ روشن و $TH_۲$ و $TH_۴$ خاموش باشند، ولتاژ در نقطه 'a' به مقدار V ولت و نقطه 'b' تقریبا در ولتاژ زمین خواهد بود. بنابراین علامت خروجی برای $T_{۱۳}$ وصل و $T_{۲۴}$ قطع وجود خواهد داشت.

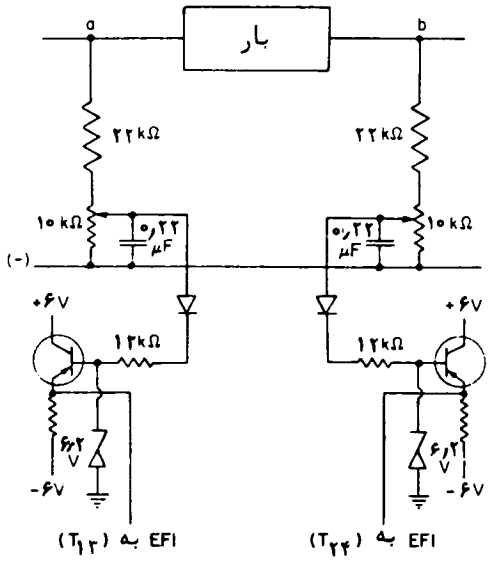
در طول جابه‌جایی، موقعی که $TH_۵$ و $TH_۶$ روشن هستند ولتاژ در 'a' و 'b' V ولت است و بنابراین علامتی برای $T_{۱۳}$ و $T_{۲۴}$ که وصل هستند وجود خواهد داشت. چون ولتاژ مثبت

1- One - turn 2- Set

است علامت‌نمی‌تواند مستقیما به قسمت‌منطقی مدار اعمال شود ، زیرا آن در صفر تا ۶ ــ ولت کار می‌کند . این علامت توسط مدار ترانزیستوری شکل ۴ ــ ۵۱ معکوس می‌شود . مقادیر مقاومتهای R_1 و R_2' به ترتیب ۲۲ و ۱۰ کیلو اهم هستند . مقاومت به طریق زیر تنظیم می‌شود . بایستی ولتاژ مثبت خط را به نقطه 'a' اعمال کرد ، و سپس مقاومت R_2 را تنظیم کرد به طوری‌که خروجی پالس ساز (طبق شکل ض ــ ۲۳) درست در ۶ ــ ولت کلید شود .خازن ۰/۲۲ میکروفاراد برای صاف کردن اغتشاشات اضافه شده است .



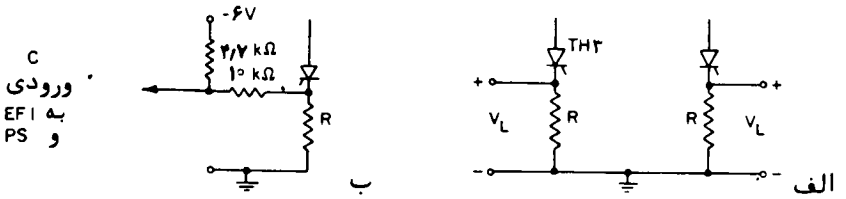
شکل ۴ ــ ۵۰ آشکارساز قطع ــ وصل تیریستوری



شکل ۴ ــ ۵۱ رابط بین مدارهای‌منطقی و آشکارسازی

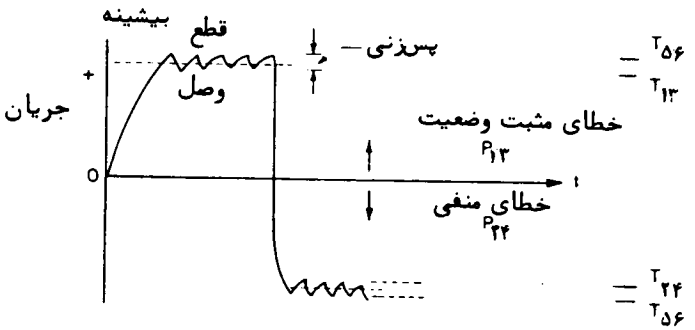
آشکارسازی جریان بار: مقاومت R در شکل ۴ ــ ۵۲ مقدار لحظه‌ای جریان بار را اندازه‌گیری خواهد کرد . اگر جریان از مقدار مجاز بیشینه خود تجاوز کند ولتاژ V_L به اندازه

کافی بالا خواهد بود تا علامتی به مدارات کنترل وارد کند . برای نیازهای خیلی دقیق مقاومتهای ۴/۷ و ۱۰ کیلواهمی بایستی توسط یک پتانسیومتر جایگزین شوند . به این ترتیب ، علامت ورودی به امیترفالور[1] بین ۴/۰۸ ــ و ۲/۱۴ ــ ولت و بین صفر و جریان بیشینه تغییر خواهد کرد . مقدار مقاومت R دلخواه است لیکن برای حداقل تلفات انتخاب می‌شود .



شکل ۴ ــ ۵۲ آشکارکننده جریان بار
(الف) آرایش عمومی (ب) اتصال مدار به کنترل منطقی

در این روش جریان هرگز از مقدار بیشینه خود تجاوز نمی‌کند و القای مدار و پس زنی[2] مطمئنی را ممکن می‌سازد ، جریان برای سیستم قطع و وصل طبق شکل ۴ ــ ۵۳ خواهد بود . برای چنین سیستم کنترل شده‌ای نیازی به راه‌انداز نخواهد بود . مقدار سلف مدار به قدر کافی هست تا مدارهای کلید زنی را ، به منظور جلوگیری از اخذ جریانهای خطرناک به موقع به عمل وادارد . برای موتوری با کارکرد وضعیتی نوبتی[3] ، جریان بیشینه می‌تواند بیشتر از جریان بار کامل باشد .



شکل ۴ ــ ۵۳ جریان ثابت برای سیستم قطع و وصل

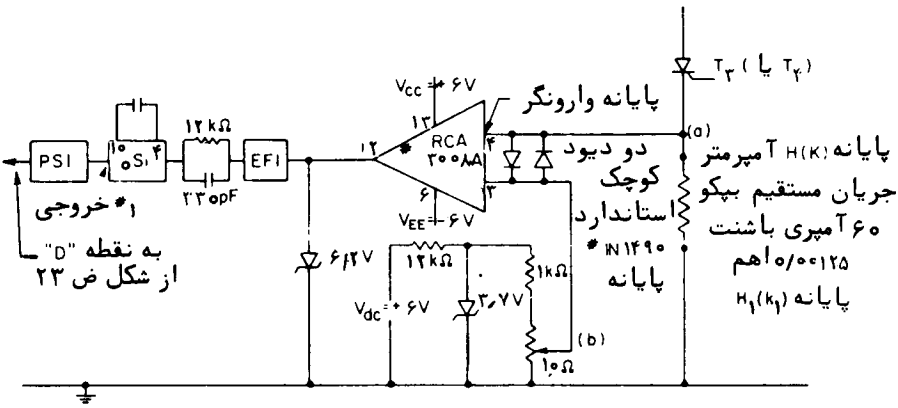
برای به حداقل رساندن تلفات می‌توان از مقایسه کننده دیفرانسیلی استفاده کرد . این

1- Emitter follower
2- Certain backlash
3- Intermittent

سیستم ولتاژ'a' و 'b' شکل ۴ ــ ۵۴ را بـا هـم مقایسه می‌کنـد . اگر 'a' مثبت تراز 'b' بـاشد مقایسه کننده خروجی‌ای که سبب ایجاد پالسی در چند ضربـانی تک ضربه‌ای[1] (OS_1) می‌شود تولید می‌کند . استمرار این پالس برای روشن کردن TH_5 و TH_6 به حد کافی طویل خواهدبود . واحد EF_1 در مقابل واحد OS_1 از اضافه بـار مقایسه کننده دیفـرانسیلی جلوگیری می‌کند . پالس ساز واحد(PS_1)به دنبال واحد OS_1 علامت را تغییر شکل می‌دهد و آن را در خروجی به تراز جریان مستقیم (یا ۶ ــ ولت) استاندارد برمی‌گرداند .

۴ ــ ۴ . خود کنترل خطای ساده برای کنترل وضعیت که در قسمت (۴ ــ ۴ ــ ۱) تشریح شـد به آرامی میرا می‌شود . بنابراین این سیستم دارای پاسخ ضعیفی است . روشهایی که از طریـق آنها زمان رسیدن به وضعیت مورد لزوم را می‌توان بهینه ساخت بررسی کنید . بهبودسازی را توسط شبیه‌سازی آنالوگ (قیاسی) نشان دهید .

بهینه سازی[2]: به طور تجربی و نظری ثابت شده است که سیستم قطع و وصل با کلیدزنی گشتاوری و با علامت خطای وضعیتی ، سیستم نوسانی و به آرامی میرا شونده‌ای را نتیجه‌می ــ



شکل ۴ ــ ۵۴ آشکارساز جریان با استفاده از مقایسه کننده دیفرانسیلی

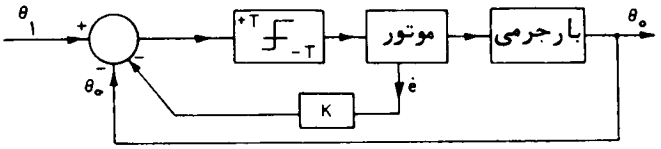
دهد . روشهای متعددی برای بهبود این سیستم وجود دارد . بعضی از این روشهـا در اینجا معرفی می‌شوند :

1- One-shot maltivibrator 2- Optimization

پسخور سرعت: اگر پسخور سرعت به سیستم شکل ۴ ــ ۳۳ طبق شکل ۴ ــ ۵۵ اضافه شود، کلیدزنی تیریستورها وهمچنین گشتاور موتور اکنون به علامت $(e + K\dot{e})$ ، که در آن $\dot{e} = \theta_o$ است، بستگی خواهد داشت، منظور از علامت همان (+ یا ــ) تابع است و K بهره (ضریب تقویت) پسخور است. تابع

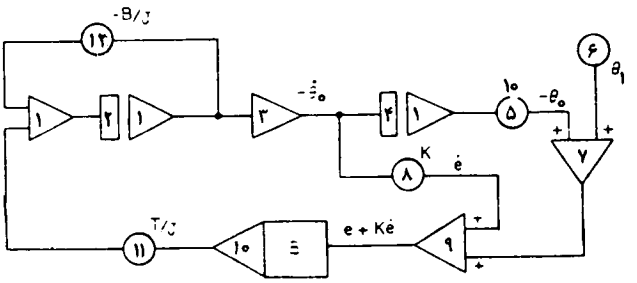
$$e = -\frac{1}{K}e$$

خط راستی با شیب $-1/K$ در صفحه فاز است.



شکل ۴ ــ ۵۵ سیستم خود کنترل وضعیتی با پسخور سرعت

این سیستم را می‌توان دوباره با برنامه پاکتولوس[1] با مقادیر مورد استفاده قبلی شبیه سازی کرد. نمودار بندالی سیستم درشکل ۴ ــ ۵۶ و نتایج به دست آمده در شکل ۴ ــ ۵۷ نشان داده شده‌اند. از این نتایج مستفاد می‌شود که کار سیستم به بهره پسخور برای گشتاور معین و ورودی بستگی خواهد داشت. اگر K کوچک باشد سیستم هنوز نوسانی خواهد بود. اگر $K=995$ باشد کار سیستم نزدیک به بهین است. اگر K بزرگ باشد خروجی توسط تکاپوی مداومی در حدود خط کلیدزنی به صفر خواهد پیوست.



شکل ۴ ــ ۵۶ نمودار بندالی برای شبیه‌سازی خطا و میزان کلید زنی خطا از شکل ۴ ــ ۵۵

مدار تصحیح فاز[2]: اگر یک مدار تصحیح فازی به سیستم آزمایشی، طبق شکل ۴ ــ ۵۸ اضافه شود گشتاور خروجی به علامت بستگی خواهد داشت.

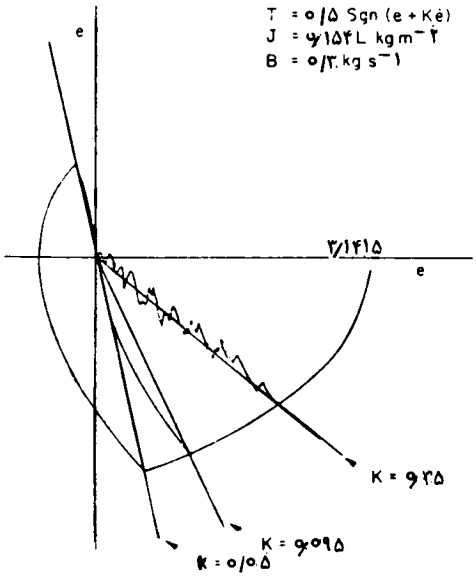
1- Pactolus Program 2- Phase advance network

که در آن :

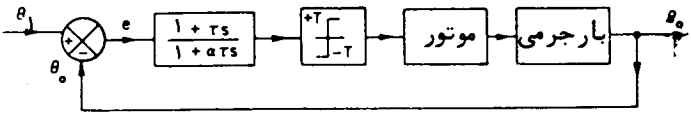
τ = ثابت زمانی میراکنندگی تصحیح فاز

α = مقدار ثابت و ($\alpha \ll 1$) و

s = عملگر لاپلاس



شکل ۴ ــ ۵۷ کلیدزنی خود کنترل وضعیتی روی علامت خطا و میزان خطا



شکل ۴ ــ ۵۸ خود کنترل وضعیتی با مدار تصحیح فاز

اگر تبدیل لاپلاس مدارتصحیح فاز به صورت‌سریهای توان‌گسترش یابد ، با صرفنظرکردن از قسمتهای α یا بیشتر ، یک معادلهٔ دیفرانسیلی غیرخطی به دست می‌آید . به هر حال ، اگر فرض شود که α در حالت ایده‌آل به صفر میل کند ، معیار کلیدزنی‌به صورت‌زیر ساده می‌شود .

$$T = Sgn\,[e(1 + \tau s)]\,T_{max}$$

یعنی

$$T = Sgn\,[e + \tau\dot{e}]\,T_{\max}.$$

تابع

$$\dot{e} = \frac{-1}{\tau}\,e$$

خط مستقیمی درصفحه فاز ، باشیب $-1/\tau$ ، خواهدبود . بنابراین کارکرد سیستم شباهت زیادی با پسخور سرعت خواهد داشت .

این یکی‌ازساده‌ترین روشهای انجام کلیدزنی بهین یا شبه بهین است . میلز[1] (۳) نشان داده است که با دانستن مشخصه‌های موتور خودکنترل (سروموتور) مدارتصحیح فاز راممکن‌است طوری ترکیب کرد که کلیدزنی در حدود یک درصد زمان کلیدزنی بهینه شود .

کلیدزنی‌بهین[2]: برای داشتن سیستم بهین لازم است که خطا و میزان خطابه‌طورهمزمان به صفر برسند . در معادله (۴ ــ ۶۱) نشان داده شده است که مسیرهای موتور خودکنترل(سرو موتور) در صفحه فاز ، غیرخطی هستند . اگر ، به هرحال ، مسیرهای عبوری از طریق مبدا ، به عنوان خط کلیدزنی مورد استفاده قرار گیرند ؛ یعنی

$$T = |T|\left[Sgn\left(\dot{e} \pm \frac{T}{B}\ln\left(1 \mp \frac{B}{T}\dot{e}\right) - \frac{B}{J}e\right)\right]$$

پس سیستم به طور بهین کار خواهد کرد . خطای صفر و میزان خطا با تنها یک کلید زنی و در حداقل زمان‌خواهدرسید . سیستم‌آزمایشی‌دوباره باشبیه‌سازآنالوگ ــ دیجیتال(قیاسی ــ رقمی) شبیه سازی می‌شود و نمودار بندالی آن در شکل ۴ ــ ۵۹ و نتایج آن در شکل ۴ ــ ۶۰ مشاهده می‌شوند .

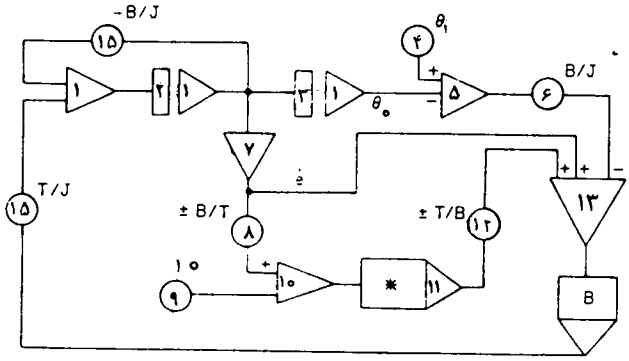
بهینه سازی عملی توسط مدار تصحیح فاز تنها به یک تغییر در مدار کنترل نیاز دارد و آن ارائه مدار طبق شکل ۴ ــ ۶۱ است .

۴ ــ ۵ واگردان تک فاز تمام موج شکل ۴ ــ ۱۵ را به منظور تعیین جریان بار گذرا برای تغییر پله‌ای زاویه آتش α ، برای دو حالتی از (۱) که از مقاومت ظاهری منبع تغذیه بتوان صرفنظر کرد تحلیل کنید .

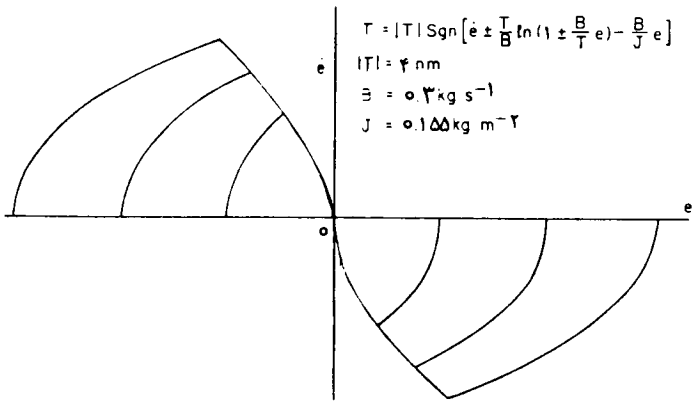
$$i(t_n) = \frac{E_m}{z}\,[\sin(\varphi - \alpha)\,e^{-(R/L)t_n} + \sin(\omega t_n - \varphi + \alpha)] + e^{-(R/L)t_n}\,I_{n-1}$$

که در آن :

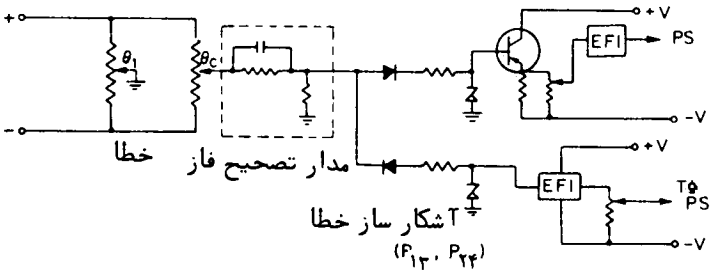
1- Mills 2- Optimal switching



شکل ۴ ــ ۵۹ نمودار بندالی برای شبیه‌سازی‌کلیدزنی بهین



شکل ۴ ــ ۶۰ نتایج شبیه سازی آنالوگ (قیاسی) کلیدزنی بهین



شکل ۴ ــ ۶۱ آشکارکننده خطا با افزودن مدار تصحیح فازی که به صورت پیش بینی کننده کلیدزنی عمل می‌کند .

$i(t_n)$ = مقدار لحظه‌ای جریان طی دوره (تناوب) $(n-1)T_L \leqslant t \leqslant nT_L$

$t_n = t - nT_L$ زمان متغیری درطی n ام دوره (تناوب) شکل موج ولتاژ یکسوشده

$T_L = \frac{1}{2} f$ دوره (تناوب) شکل موج ولتاژ یکسو شده

z = امپدانس بار

E_m = حداکثر مقدار ولتاژ سینوسی اعمال شده به تریاک ۱ یا ۲

ϕ = زاویه فاز امپدانس

α = زاویه آتش تریاکها

R = مقاومت بار

L = سلف بار

ω = فرکانس زاویه‌ای ولتاژ سینوسی اعمال شده و

I_n = جریان بار در شروع n امین دوره (تناوب) شکل موج ولتاژ یکسو شده

POWEREN.IR

۴ ـ ۶ یک‌موتور جریان مستقیم سری توسط مدار برشگر تیریستوری که ازمنبع تغذیه ۶۰۰ولتی جریان مستقیمی تغذیه می‌کند ، کنترل می‌شود . فرکانس برشگر را برای محدود کردن دامنهٔ تغییرات جریان آرمیچر در ۲۰ آمپر (اختلاف بین مقادیر کمینه و بیشینه) موقعی‌که‌نسبت زمان روشن به تناوب‌پالس تیریستور بار ۰/۵ باشد ، تخمین‌بزنید . مقدار سلف مداربار ۰/۱ هانری و مقاومت آن قابل اغماض است .

جواب : مقدار متوسط ولتاژ موتور به ولتاژ تغذیه عبارت است از :

تناوب پالس = T و زمان پالس = t_{on} که در آن $\frac{V_m}{V} = \frac{t_{on}}{T} = ۰/۵$

بنابراین : $V_m = ۰/۵ \times ۶۰۰ = ۳۰۰\ V$

اختلاف بین ولتاژ متوسط و ولتاژ قله پالس همراه با ایجاد فلو است . یعنی

$$V_L = L\frac{di}{dt} = L\frac{\Delta i_a}{\Delta t}$$

چون صعود و نزول جریان خطی است .

$$V_L = V - V_m = ۶۰۰ - ۳۰۰ = ۳۰۰\ V$$

و

$$\Delta L_a = ۲۰A \quad \Delta t = t_{on}$$

در نتیجه :

$$t_{on} = \Delta t = \frac{۰/۱ \times ۲۰}{۳۰۰} = ۶/۶۷\ ms$$

لیکن

$$\frac{t_{on}}{T} = ۰/۵$$

درنتیجه :

$$\text{فرکانس پالس} = \frac{1}{T} = \frac{۰/۵}{t_{on}} = ۷۵ \text{ پالس در ثانیه}$$

۴ ــ ۷ مدار برشگر نوسانی شکل ۴ ــ ۲۶ را در نظر بگیرید فرض کنید بار یک موتور جریان مستقیم به مقاومت آرمیچر قابل اغماض باشد . نسبت زمان پالس به تناوبش، موقعی که‌فرکانس کلیدزنی آن ۲۰۰ هرتز است ، چیست ؟ سلف آرمیچر ۱۰ میلی هانری ، جریان عبوری ۱۰ آمپر و ولتاژ تغذیه جریان مستقیم ۲۰۰ ولت است .

جواب : ۰/۹ یا ۰/۱

۴ ــ ۸ منبع جریان متناوب $v = 100 \sin 377t$ با یک مقاومت ۱۰ اهمی ، یک تیریستور و یک باطری ۵۰ ولتی ، که آندش به کاتد تیریستور متصل است ، بـه طور سری وصل شده است . مقدار متوسط جریان را در مدار اگر تیریستور توسط یک علامت جریان مستقیـم پیوسته‌ای آتش شود ، محاسبه کنید .

جواب : ۱/۰۹۵ آمپر

موقعی‌که زاویه‌های آتش تیریستور $\alpha = 80$ درجه باشند ، تناوب دنده خلاصی $\frac{\pi}{2}$ رادیان خواهد بود . افت سرعت بین تناوبهای هدایت را پیدا کنید .

جواب : ۳ / ۶ دور در دقیقه

۴ ــ ۹ . یکسو کننده کنترل شده نیم موج تک فازی از منبع تغذیه ۱۱۰ ولتی ۶۰ هرتزی تغذیه می‌شود و ولتاژ متغیری‌به موتورجریان مستقیمی اعمال‌می‌کند . تیریستور مدار یکسو کننده‌کنترل شده توسط علامت‌جریان‌مستقیمی‌آتش می‌شود . مقاومت مدار آرمیچر ۱۰ اهم و به علت تحریک ثابت موتور واینرسی زیاد ، سرعت موتور ثابت فرض می‌شود ، تا اینکه نیروی ضد محرکه موتـور برابر با ۵۵/۵ ولت شود .

در صورتی که از سلف آرمیچر صرفنظر شود ، مقدار متوسط جریان آرمیچر را حساب‌کنید .

جواب : ۲/۴۹ آمپر

۴ ــ ۱۰ مداری‌شبیه‌مسئله ۴ ــ ۹ را در نظر بگیرید . موتور جریان مستقیم بـه ۱ تغییر یافته است که در آن مقاومت آرمیچر قابل اغماض است ولـی سلف نقشی اساسـی دارد . مشخصات موتور تحریک مستقل طوری است که در بار کامل گشتاوری معادل ۳۱/۴۲ نیوتن متـر و سرعتی معادل ۶۰۰ دور در دقیقه با ممان اینرسی ۰/۰۵ کیلوگرم متر مربع دارد .

موقعی که زاویه آتش تیریستوره $\alpha =$ است ، کاهش سرعت بیـن تناوبهـای هـدایت را در صورتی که تناوب دنده خلاص در حدود π رادیان باشد ، پیدا کنید .

راهنمایی : عملیات را درحالت کار پایدارفرض کنید . هدایت‌بلافاصله پس از اینکه‌ولتاژ اعمال شده از نیروی‌ضدمحرکه بیشترشود شروع می‌شود . در مدت زمان هدایت انرژی‌الکتریکی جهت تولید گشتاور الکترومغناطیسی دارد آرمیچر می‌شود . افزایش شتاب سبب افزایش سرعت می‌شود .

با صفر شدن پیوند شار خالص هدایت خاتمه می‌یابد و انرژی ذخیره شده درسلف‌به‌مدار

بر می‌گردد . بدنبال آن مدت زمان دنده خلاص موتور فرا می‌رسد ، یعنی موقعی که بار انرژی را از انرژی جنبشی موتور می‌کشد سرعت افت می‌کند . در حالت پایدار افزایش سرعت برابر با کاهش سرعت است . در نتیجه برای تعیین سرعت ساده‌تر است که یک مدت‌زمان دنده خلاص فرض شود ، زیرا هیچ متغیر الکتریکی دیگری وجود ندارد . بنابراین مسئله را می‌توان به صورت زیر عمل کرد :

(الف) برای مدت زمان دنده خلاص معادله دینامیکی حرکت را حل کنید .

(ب) ثابت زمانی مکانیکی را تعیین کنید .

(پ) دوره تناوب منبع تغذیه را تعیین کنید .

(ت) نتایج (ب) را با (پ) مقایسه کنید ، و در نتیجه معادله برای سرعت‌به‌دست‌آمده در (الف) را خطی کنید .

(ث) با جایگزینی اعداد تغییر سرعت را پیدا کنید .

جواب : ۵۰ دور در دقیقه

۴ ــ ۱۱ . مدار مشابه‌شکل ۴ــ۱۰ با اطلاعات‌اضافی ، مقاومت‌آرمیچر ۲ اهم ، گشتاور بارخالص ۰/۶ برابر مقدار بار کامل برای زاویه آتش تیریستور $\alpha = ۹۰$ درجه مفروض است . مشاهده شده است که در این شرایط دوره تناوب دنده خلاص ۲۴۰ درجه است و ثابت آرمیچر ۳/۱۴۲ولت بر رادیان بر ثانیه می‌باشد .

سرعت متوسط موتور و تنظیم سرعت را به صورت درصدی از سرعت متوسط پیدا کنید .

جواب : ۱۰۲ دور در دقیقه ، ۱۱/۱%

۴ ــ ۱۲ . پل تیریستوری تمام موج تک‌فازی سرعت موتور جریان مستقیم تحریک ثابت‌ومستقلی را کنترل می‌کند . پل توسط منبع ۱۲۰ ولتی ۶۰ هرتزی تغذیه می‌شود . سرعت‌نرمال‌موتور ۶۰۰ دور در دقیقه در گشتاور بار کامل ۳۱/۴۲ نیوتن متر است . یک بار مکانیکی اضافی که جرمش ۰/۱۵ کیلوگرم مترمربع است در سرعت‌نرمال به گشتاور بار کامل‌موتوراضافه می‌شود .جرم‌موتور ۰/۰۵ کیلوگرم مترمربع است .

موقعی که تیریستور در زاویه ۸۰ درجه آتش می‌شود دوره تناوب دنده خلاص ۹۰ درجه خواهد بود . افت سرعت بین دوره تناوبهای هدایت را پیدا کنید .

جواب : ۶/۳ دور در دقیقه .

۴ ــ ۱۳ . پل سه فاز تیریستوری نیم موجی شامل سه تیریستور تغذیه شده از منبع ۲۲۷ ولتی فازی ۶۰ هرتزی مفروض است . این پل ولتاژ جریان مستقیم قابل تنظیمی برای موتور جریان مستقیم تحریک مستقلی تهیه می‌کند ، مشخصات موتور عبارت‌اند از

در بار کامل $I_a = ۵۰۰$ A و $E_a = ۱/۲$ ω_m و $L_a = ۰/۰۰۱$ H_1 و $R_a = ۰/۰۲$ π_1

زاویه آتش α را طوری حساب کنید که موتور در جریان بار کامل و سرعت نرمال ۲۰۰ رادیان بر ثانیه (ω_m)کار کند .

هدایت را پیوسته فرض و از افت ولتاژ مستقیم تیریستور صرفنظر کنید .

جواب : $\alpha = ۴۰$ درجه که در آن $\alpha = ۰$ مطابق با $\omega t = ۳۰$ درجه است .

POWEREN.IR

فصل پنجم

کنترل موتور سنکرون

۵ ـ ۱ مقدمه

موتور سنکرون درمواقعی که احتیاج به محرک سرعت ثـابت دقیقی بـاشد ، مخصوصا " جاهایی که تعدادی ماشین‌بایستی به طور همزمان کار کنند مورد استفاده قرار می‌گیرد . یک مثال نمونه برای کاربرد موتورسنکرون و مواقعی‌که چندین محرک‌بایستی‌به طور همزمان کارکنند کارخانجات نساجی‌است . معایبی‌ازقبیل نیاز به تحریک دوگانه (سیم‌پیچی آرمیچر جریان متناوب وسیم‌ـ پیچی میدان تحریک جریان مستقیم) و نداشتن مشخصات ذاتی خود راه‌انداز[1] ازعمومی‌شدن کاربرد این موتور مثل موتور القایی جلوگیری می‌کند .

سرعت دورانی این موتور همان سرعت سنکرونی است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$n = \frac{f}{p} \quad \text{دور در ثانیه} \qquad (۵ - ۱)$$

که در آن :

n = سرعت گردانه برحسب دور در ثانیه

f = فرکانس منبع تغذیه برحسب هرتز

p = تعداد زوج قطبها

منبع تغذیه ثابت به این معنی است کـه تغییرات سرعت موتـور سنکرون بـا تغییر تعداد قطبها به طور پله‌ای وقـوع خواهد یافت . الکتـرونیک قدرت تغییرات سرعت پیوسته‌ای را به مشخصات موتور اضافه می‌کند . مدارهای وارونگر نیمه‌هادی در رابطه با کنترل‌سرعت موتورهای القایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند . [در اینجا سؤالی‌مطرح می‌شود که] مزیت موتور سنکـرون

1- Self - starting

در مقابل موتور القایی که از نظر ساخت ارزانتر است چیست؟ [درجواب باید گفت] گر چه سرعت موتور القایی احتیاج به تغییرخیلی زیادی‌ندارد ، ولی برای داشتن سرعت ثابت‌دقیقی، در این موتورها ، احتیاج به سیستم کنترل پسخوردار است . ازهمه مهمتر نیازبه کاربرد تعداد زیادی محرک با سرعت‌های ثابت و دقیق است که در ارتباط درونی[1] با هم ، مثل محرکهای کارخانجات نساجی ، کار می‌کنند . بعلاوه ممکن است سیستمی چندباری[2] وجود داشته باشدکه به تغییرسرعت قابل‌تنظیم ، به طور دقیق وسنکرون نیاز داشته باشد . به این ترتیب موتورهای حلقه‌باز چند همزمانی[3] (سنکرون) محرکها را ، و وارونگر فرکانس متغیر منبع تغذیه را مهیا می‌سازند .

موتور سنکرون عموما " ماشینی است که شامل دو سیم‌پیچ است . یکی از سیم پیچها به منظور تبدیل انرژی از جریان چند فازه متناوب تغذیه می‌شود و سیم‌پیچ دومی ، به خاطرتهیه میدان مغناطیسی اصلی ازمنبع‌جریان مستقیم‌تغذیه می‌شود . درتقسیم‌بندی ماشینهای سنکرون همچنین می‌توان از ماشینهایی‌که به جای سیم‌پیچی‌تحریک از تحریک مغناطیسی دایم استفاده می‌کنند نام برد . ماشین سنکرون دیگری موتور رلوکتانس[4] (موتور با مقاومت مغناطیسی متغیر) است که آرایش قطب برجسته‌ای[5] دارد و فاقد سیم‌پیچی میدان تحریک است و باز یکی دیگر از این ماشینها موتور القایی سنکرون است ، که یک موتور القایی با گردانه سیم‌پیچی شده‌است و اتصالات آن روی حلقه‌های لغزان است . در نتیجه جریان مستقیم را می‌توان توسط آنها به داخل گردانه تزریق کرد تا گشتاور الکترومغناطیسی در سرعت سنکرون ایجاد کند . موتور هیسترزیس[6] (موتور پسماند) نیز موقعی که با سرعت سنکرون می‌چرخد یک ماشین سنکرون با مغناطیس دایم است و درسرعتهای دیگربه انرژی هیسترزیس متکی است تا یک گشتاور محرکی فراهم شود ، بنابراین تنها برای موارد استعمال قدرتهای خیلی کم‌قابل استفاده است (۱) . آخرین مثال از موتور سنکرون ماشین معکوس شده جریان مستقیم است که در آن آرمیچر موتور جریان مستقیم در ایستانه ، و میدان‌تحریک درگردانه قرارمی‌گیرد و به استثنای‌یک‌مورد ، شبیه موتور سنکرون عمل می‌کند . جابه‌جا کننده یا تغییر دهنده فرکانس که اکنون بهتر است آن را وارونگر بنامیم ، دارای فرکانس قابل کنترل توسط سرعت گردانه و وضعیت [محلی آن] است . بنابراین نظیر یک ماشین سنکرون معمولی [افزایش بیش از حد بار] سبب ترمز[7] (درایستادن) ماشین [که منجر به سکون شود] نخواهد شد ، ولی باز بدون کنترل پسخورر امکان‌دسترسی به

1- Inter linked
2- Multiload
3- Mulli - synehronous
4- Reluctance
5- Salient pole
6- Hysteresis
7- Stalling

سرعت دقیق وجود نخواهد داشت .

۵ ـ ۲ راه اندازی موتور سنکرون

در فرکانس اسمی منبع تغذیه و در حالت سکون مقدار متوسط گشتاور محرک در موتور سنکرون صفر است . روتور موتور با دامنه خیلی خیلی کمی ، در فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز ، ممکن است ارتعاش کند ولی گشتاور لختی ماشین بزرگتر از آن است تا پاسخ موتور موجب گردش گردانه شود.

برای راه‌اندازی موتور بایستی فرکانس را به قدر کافی کم کرد تا اینکه تغییرات جریان و میدان هماهنگ[1] باشند . یعنی این که همزمانی ابقا شده باشد . در غیر این صورت بایستی از روشهای راه‌اندازی کمکی استفاده شود . اولین و ساده‌ترین روش، افزودن موتور القایی کوچک دیگری به محور بار است . اکنون توسط این موتور می‌توان ماشین سنکرون را تا نزدیکی سرعت سنکرون به گردش درآورد ، موتور سنکرون بایستی به منبع تغذیه اتصال داشته باشد تا بلافاصله آن را به سرعت سنکرون برساند . سپس موتور القایی را می‌توان قطع کرد .

روشهای خیلی بهتر عبارتند از اجازه دادن به ماشین سنکرون تا به صورت موتورالقایی راه‌اندازی شود و به صورت موتورسنکرون کارکند ، و یا داشتن موتور القایی برای راه‌اندازی و بازبست[2] آن به صورت موتور القایی سنکرون درحال کار .

۵ ـ ۲ ـ ۱ وارونگر برای راه‌اندازی موتور سنکرون

وارونگری که فرکانس خروجی آن قابل‌تنظیم باشد می‌تواند برای راه‌اندازی موتورسنکرون مناسب باشد .

اگر فرکانس منبع تغذیه به حد کافی کم باشد موتور می‌تواند در نصف سیکل دوران کند در حالی که جریان نیز با آن در توافق است . همچنین گشتاور یک جهته خواهدبود . به محض اینکه درفرکانس کم موتور به‌داخل سرعت همزمانی کشیده شد ، فرکانس منبع تغذیه را می‌توان به تدریج افزایش داد تا سرعت موتور نیز افزایش یابد .

کاربرد وارونگر به جای سیم‌پیچی القایی به منظور راه‌اندازی موتور ، اقتصادی نیست ولی جایی که تغییر دهنده فرکانس برای کنترل سرعت به کار رود ، این روش امکان‌پذیر واقتصادی است .

۵ ـ ۳ کنترل سرعت

سرعتهای دقیق را از موتور سنکرون می‌توان به دست آورد و این سرعتها طبق رابطه (۵ ـ ۱)

1- Sympathy 2- Reconnect

حاصل می‌شوند . تغییر تعدادقطبها ، تغییرفرکانس ، و تغییر مکانیکی جعبه دنده تنها روشهای تنظیم سرعت در این موتورها هستند . تغییر سرعت توسط وارونگرها با استفاده از الکترونیک قدرت در طی فصل سوم کنترل سرعت موتورهای القایی بحث شده است . وارونگرهای مشابهی می‌تواند موتور سنکرون را نیز تحریک کنند و دراینجا احتیاجی به حلقه پسخور برای تصحیح خطا نخواهند داشت .

مثال ویژه‌ای از کاربرد کنترل سرعت روی موتـور سنکرون در اینجا داده و دو راه حـل نیز پیشنهاد شده است که یکی ساده ، و دیگری پیچیده است . هر دو روش رامی‌توان به‌صورت وارونگر طبقه‌بندی کرد و با خواننده است که مقایسه‌ای بین آنها به عمل آورد . مثـال اول از منبع تغذیه جریان مستقیم‌استفاده‌می‌کندوماشین سنکرون‌به‌صورت موتور پله‌ای کار خواهدکرد و مثال دوم به زاویه آتش متغیر و منبع تغذیه جریان متناوب فرکانس ثابتی متکی است تا از یک واحد تیریستوری ، جریان متناوب فرکانس پایینی بگیرد . این واحد جریان متناوب به جریان متناوب a.c. to a.c. راکه‌به منبع‌جریان‌مستقیم واسطه احتیاجی‌نداردواگردان[1] سیکلی‌می‌نامند .

۵-۳-۱ مشکـلات کنترل سرعت (آهسته چرخاندن[2] مولد برق توربینی[3])

در نیروگاهها موقعی که مولد برق توربینی را از بار خارج می‌کنند معمولا می‌گذارند برای‌مدتی دستگاه ماشین به طور بی‌بار وبه آهستگی دوران‌کند تا از شکاف یا تغییر شکل[4] جلوگیری‌شود . ترک برداشتن اصطلاحی است‌که برای توصیف واپیچش گردانه‌های توربین‌به هنگام خنک‌شدن آنها ، به کار می‌رود . امکان راه‌اندازی دوباره مولدهای برق توربینی و رساندن آنها به‌حالت بارداری توسط میزان خنک کنندگی تعیین می‌شود . این پدیـده را معمولا با توزیع همه سویه[5] درجه حرارت به حداقل ممکن می‌رسانند .

ساده‌ترین و اکثرا عمومی‌ترین‌شیوه برای‌آهسته چرخاندن‌توربین کوپل‌کردن موتورالقایی به محور اصلی توسط چرخ دنده است . لیکن ، امکان آهسته چرخاندن الکتریکی فقط دربعضی از دستگاهها[6] وجود خواهد داشت . به عنوان مثال در دستگاههای قدیمی‌که فاقد چرخ‌دنده آهسته‌سازی معمولی هستند ، تغییر شکل پس‌از چندین ساعت درحد بیشینه است ، وشایدبعد از ۲۴ ساعت نتواند به قدر کافی کاهش پیدا کند تا ماشین به طور مطمئن دوباره به کارافتد . خارج از قابل استفاده بودن ماشین برای چنین مدت‌زمان زیادی ،و یا کار انداختن بدون بار

1- Cycloconverter
2- Baring
3- Turbo-Alternator
4- Hogging
5- Isotropic
6- Set

ماشین جهت راه‌اندازی دوباره آن در برخی از نواحی که افزایش ناگهانی قدرت محلی در مدت زمانهای کوتاهی با فواصل زمانی کم مورد نیاز است ، زیانهایی را در بر خواهد داشت .

آهسته چرخاندن الکتریکی‌راممکن است با کاربرد آلترناتور به صورت یک موتور سنکرونی که از منبع تغذیه فرکانس پایینی تغذیه می‌شود عملی کرد . فرکانس پایین برای تأمین دوران با سرعت کم است و قدرت ضروری قدرتی است که برای غلبه بر اصطکاک موتور درموقع دوران لازم است که موقع شتاب‌گیری [1] شامل جرم نیز می‌شود . دو راه حل کاملا مختلف تشریح شده در اینجا ، براساس استفاده ازمنبع تغذیه جریان مستقیم و یا منبع تغذیه جریان‌متناوب‌است . استفاده از مولد برق به عنوان موتور پله‌ای ، راه حل اول را به صورت موتور معمولی ، و راه‌حل دوم را همراه با یک واگردان سیکلی به کار خواهد گرفت . لازم به تذکر است که هردوراه‌حل، کنترل تیریستوری هستند .

(الف) موتور پله‌ای تیریستوری

شکل ۵ ــ ۱ مدار وارونگر ساده‌ای را که مناسب برای کلیدزنی فرکانس کم است نشان می‌دهد . قدرت فرکانس کم توسط کلیدزنی پی‌درپی تیریستور در مدارهای خط، موتور را تغذیه می‌کند . تیریستورها تزریق جریان مستقیم پیک به یک فاز یا چند فاز ماشین را در یک زمان ممکن می‌سازند . با تسلسل‌ثابتی ازکلیدزنی ، یک میدان‌مغناطیسی آرمیچر که در اطراف فاصله هوایی به طور پله‌ای می‌چرخد نتیجه خواهد شد . با تحریک میدان اصلی و اگر فرکانس تولید شده به اندازه کافی اندک و گشتاور به قدر کافی زیاد باشد ، گردانه با تغییر وضعیت میدان آرمیچر (۴) به طور پله‌ای خواهد چرخید . به این‌ترتیب‌ماشین بدون احتیاج به راه ــ اندازی کمکی به صورت موتور سنکرون عمل و میزان کلیدزنی هریک از تیریستورها سرعت‌گردانه را معین خواهد کرد .

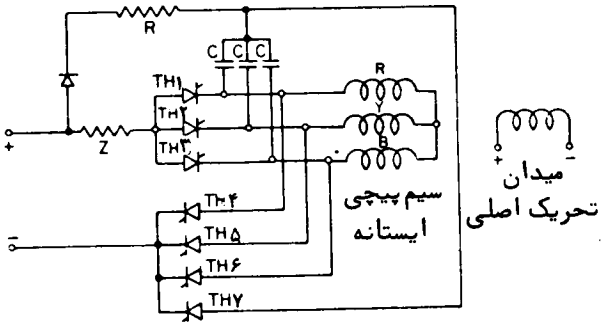
آرایش اصلی مدار شش تیریستور (به استثنای TH_7 ،سه‌خازن ومقاومت‌محدودکننده (R)) را مورد استفاده قرار می‌دهد . عبور جریان در هر زمان از طریق دو فاز مثلا TH_1 و TH_5 ، TH_1 و TH_6 ، TH_2 و TH_6 ، TH_2 و TH_4 ، TH_3 و TH_4 ، TH_3 و TH_5 ، برای‌تشکیل‌یک سیکل کامل امکان‌پذیر خواهدبود . شکل ۵ ــ ۲ الگوی فازبرداری‌نیروی محرکه مغناطیسی را نمایش می‌دهد . این‌تسلسل کلیدزنی ، برای جریان‌خط معینی ، مقداربیشینه نیروی محرکه مغناطیسی را با گام ۶۰ درجه الکتریکی‌به دست‌می‌دهد که عمل راه‌اندازی راساده می‌کند و تموج [2] گشتاور کمتری را از نوع مشابه با گام مثلا ۱۲۰ درجه الکتریکی تولید می‌کند . گام ۳۰ درجه الکتریکی را می‌توان با عبور جریان به طور متناوب در دو و سپس در سه فازتولید کرد لیکن این به‌معنی

1- Accelerating 2- Fluctuation

داشتن جریانهای ضربانی[1] ، و جریانهای بیشتری درصورت عملکرد سه فاز است . اما نیروی محرکه مغناطیسی موثر کمتری ایجاد می‌شود و برای تیریستورها مقادیر اسمی بیشتری مورد نیاز خواهد بود .

منبع تغذیه مدار اصلی می‌تواند جریان مستقیم ، با یکسوسازی نیم‌موج یا تمام‌موج[توسط مدارهای یکسوساز] سه فاز و یا تک‌فاز باشد . هیچکدام به طور کامل برای این کاربرد با تیریستورها مناسب نیست . موقعی که آند تیریستوری نسبت به کاتدش مثبت باشد و علامتی بین دریچه وکاتد اعمال‌می‌شود ، تیریستور شروع به هدایت‌می‌کند وجریان را درجهت مستقیم تا زمانی که به زیر جریان نگهدارنده افت نکرده است عبور می‌دهد ، تیریستور درآن نقطه به حالت مسدود عادی خود برخواهد گشت .

با منبع تغذیه تک‌فاز و یا سه‌فاز ، تیریستور به صورت یک یکسوکننده نیم‌موج قابل‌کنترل عمل می‌کند ، در نتیجه موقعی که علامت دریچه حذف می‌شود جریان در محلی در طی ولتاژ نیم سیکل منفی به صفر تقلیل خواهد یافت . در آن صورت و تحت این‌شرایط تیریستور به‌طور طبیعی با جابه‌جایی خط‌خاموش خواهد شد . برای قادر ساختن تیریستور به هدایت در طول چندین دور ، علامت دریچه بایستی به طور پیوسته و یا به صورت یک‌سری پالس در این مدت اعمال شود . در هر حال برای این منبع تغذیه نیم موج بایستی ترانسفورماتور مقادیر اسمی مناسبی داشته باشد تا از اشباع شدگی جلوگیری کند . حتی ترانسفورماتور تک فاز ممکن‌است مقدار نامتعادلی[2] درمنبع تغذیه تولیدکند چون برخلاف ترانسفورماتور سه‌فاز ، سیم‌پیچی‌های آن در طی مدت کار مورد استفاده قرار می‌گیرند .

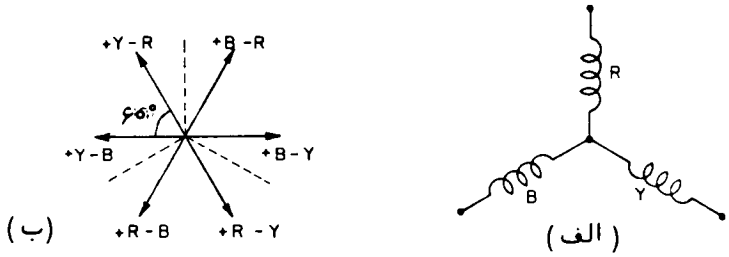


شکل ۵ ــ ۱ وارونگر فرکانس کم

با وجود جریان مستقیم ، یا جریان متناوبی که کاملا یکسوشده باشد ، جریان عبوری از تیریستور هرگز کمتر از جریان نگهدارنده آن نخواهد شد . این به آن معنی است‌که یک‌علامت

1- Pulsating 2-Inbalance

پالسی تیریستور را روشن می‌کند ولـی برای خاموش کردن آن بایستی بـه جا به جایی اجباری متوسل شد . جابه‌جایی اجباری درشش تیریستور را دراین‌کاربرد عملی ،می‌توان‌توسط تیریستور $TH۷$ ، سه خازن و مقاومت محدود کننده انجام داد . برای مثال اگر تیریستورهای $TH۱$ و$TH۵$ درحال‌هدایت‌باشند ، خازن C به اندازه ولتاژ خط باردارمی‌شود . موقعی‌که‌علایم‌تیریستورهای قبلی حذف شوند و تیریستور$TH۷$ راه‌اندازی شود خازن C از طریق$TH۷$ خالی می‌شود و $TH۵$ را گرایش معکوس می‌کند . اگر بار الکتریکی به اندازه کافی زیـاد باشد $TH۵$ و در نتیجه$TH۱$ نیز خاموش خواهند شد . ترتیب کلیدزنی بعدا به همین روال ادامه خواهد یافت .

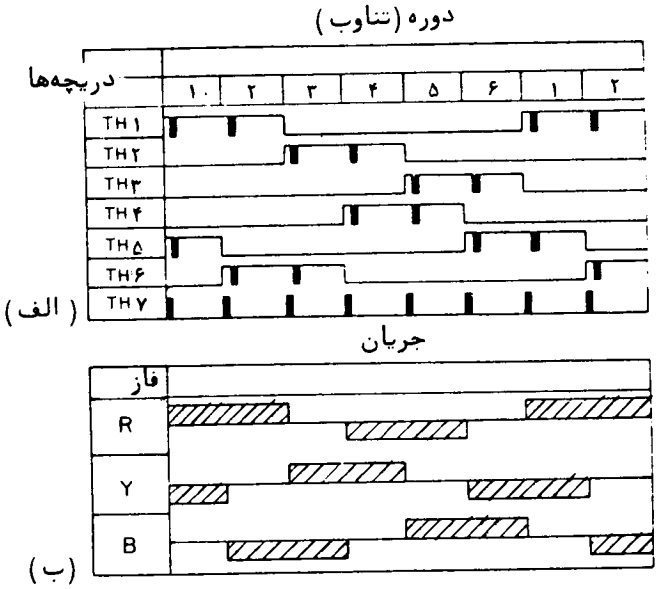


شکل ۵ ــ ۲ الگوی نیروی محرکه مغناطیسی فضایی یک سیکل
(الف) سیم‌پیچی‌ها (ب) چرخش نیروی محرکه مغناطیسی

اگر به خاطر بعضی‌نارساییهای داخلی جابه‌جایی اجباری موفقیت‌آمیز نباشد ، کلیـدزنی مرحله بعدی ، منبع تغذیه را اتصال کوتاه می‌کند . بنابراین پیش بینی‌های لازم را بایستی به عمل آورد . علاوه بر فیوزها ، امپدانسی به طور سری با منبع تغذیه با مقداری بیشتر از مقدار امپدانس سیم‌پیچی ایستانه جهت‌محدودکردن جریان اتصال کوتاه ، به مدار اضافه شده‌است . اکنون هرناکامی‌درعمل جابه‌جایی ،جریان‌خطرناک‌شدیدی تولیدنمی‌کند وامکان موفقیت‌آمیز‌ـ بودن مرحله بعدی‌کلیدزنی وجود خواهد داشت ، درنتیجه چرخش مولد می‌تواندبدون‌انقطاع ادامه یابد . سیم‌پیچی میدان اصلی‌ممکن است جایگزین امپدانس محافظ شودکه باعث افزایش بازده سیستم نیز می‌شود .

سرعت چرخش مولد آبی با ردیف راه‌اندازی تیریستورها معین می‌شود . شکل ۵ ــ ۳ ، ترتیب برنامه ریزی شده علایم اعمال شده به دریچه برای‌دوران با گام ۶۰ درجه الکتریکی را ، توأم با جریانهای‌منتجه ایده‌آل عبوری ازسه فاز مولد نشان می‌دهد . برای یکسوسازی نیم‌موج در طی دوره هدایت علایم دریچه پیوسته ، یا به صورت سلسله‌های پالسی ، هستند و به علت طبیعی بودن جابه‌جایی و یـاری گرفتن از نیـروی محرکه القایی سیم‌پیچی‌های موتور ، پالس خاموشی برای تیریستور مورد نیاز نخواهد بود . در مورد انواع دیگر منبع تغذیه تنها علایمی

با پالسهای منفرد مورد نیاز هستند اما چون در هر گام ۶۰ درجه الکتریکی یکی از تیریستورها کارنمی‌کند ،لذا برای هر تیریستور در طول ۱۲۰ درجـه عملکرد آن در هر سیکل ، دو پـالس بایستی اعمال شود .

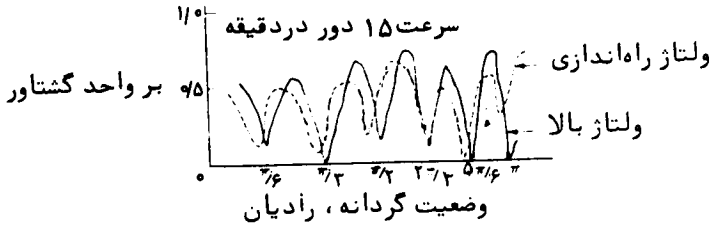


شکل ۵ ــ ۳ ترتیب کلیدزنی برای تولید جریانهای سه‌فاز
(الف) علایم دریچه (۶ دوره برای‌یک سیکل)
(ب) جریانهای سیم‌پیچی

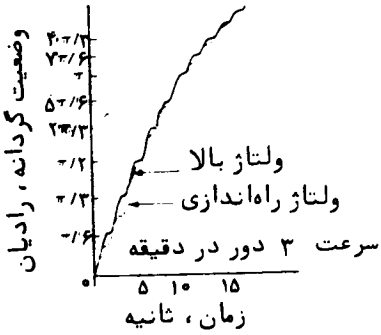
شکلهای ۵ ــ ۴ ، ۵ ــ ۵ ، ۵ ــ ۶ ، و ۵ ــ ۷ نتـایج یک مـدل ۳ کیلو واتی را نشـان می‌دهند .گرچه منبع تغذیه تک‌فاز یکسو شده نیم موج تیریستوری به حداقل تجهیزات احتیاج دارد ، اما این به آن معنی نیست که از نقطه نظر ارزش هزینه‌ای و یـا کاری ، بهترین باشـد . راکتانس سیم‌پیچی در جریان متناوب با تراز جریان مستقیم به مفهوم احتیاج به وسایل ولتاژ بالاتری است ، که درمورد این‌مدل ، ولتاژی که چرخش را تولید می‌کند ، تقریبا حدود ۵ برابر بیشتر از ولتاژ منبع تغذیه جریان مستقیم خواهد بود . افزایش قدرت ورودی به منبـع تغذیه تلفات آهن را به همان نسبت خواهد افزود .

به منظور فایق آمدن به جرم (اینرسی) و اصطکاک[1] دستگاه در موقع راه‌اندازی احتیـاج به ولتاژی‌بیشتر ازموقع کار است . همراه با آن ، اگر سرعت‌خیلی کم‌باشد که نگهدار همترازی[2]

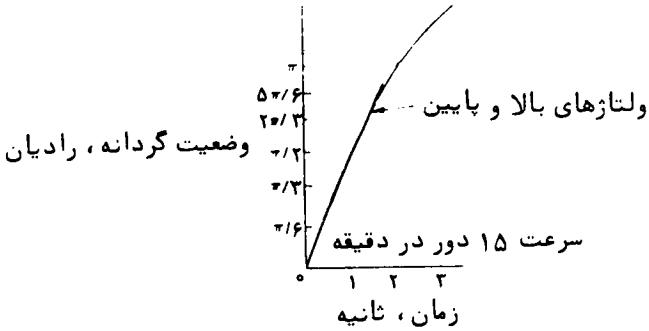
1- Stiction 2- Alignment



شکل ۵ ــ ۴ تغییرات گشتاور



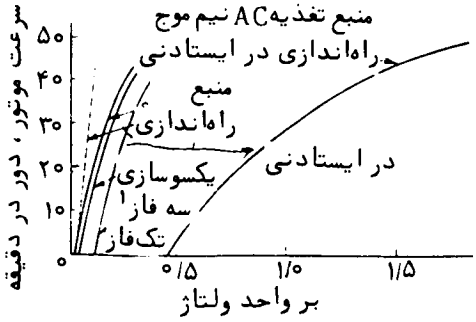
شکل ۵ ــ ۵ وضعیت نگهدار[1] در سرعتهای کم



شکل ۵ ــ ۶ تغییرات وضعیت (بدون وجود نگهدار)

میدان تحریک واردعمل شود ، و اثرات ولتاژ قابل تنظیم اعمال شده طبق شکل ۵ ــ ۵ قابل توجه باشد ، جریانهای زیادی مورد نیاز خواهد بود . برای این مدل ، با میزان کلیدزنی $\frac{1}{2}$ هرتز (۱۵ دور در دقیقه) تغییرات ولتاژ اعمال شده ، تموج سرعت محسوسی را در یک سیکل ایجاد نمی‌کند . البته ، گشتاور ضربان خواهد داشت . شکل ۵ ــ ۴ تغییرات گشتاور را برای

1- Detent



شکل ۵ ــ ۷ ولتاژ راه‌اندازی و درایستادنی

هر عمل کلیدزنی نشان می‌دهد ، اما جرم (اینرسی) ماشین از انعکاس آن درچرخش ، که‌توسط شکل ۵ ــ ۶ واضح می‌شود ، جلوگیری می‌کند .

گشتاور زیادتری برای شتاب دادن موتور به طور پله‌ای ، برای سرعتهای زیاد ، ضروری است . و این در شکل ۵ ــ ۷ نشان داده شده است ، که مبتنی بر ولتاژ پیک مطابق با مقادیر اسمی تیریستور ومیدان‌تحریک‌ثابت است . درشرایط یکسوسازی نیم‌موج این مدل درفرکانسهای بیشتر از ۱/۳ هرتز به داخل‌پله‌کشیده می‌شود اما کمترین‌سرعتها برای کارملایم ونیازمندیهای قدرت کمینه در فرکانسهای خیلی پایین‌تری امکان‌پذیر است .

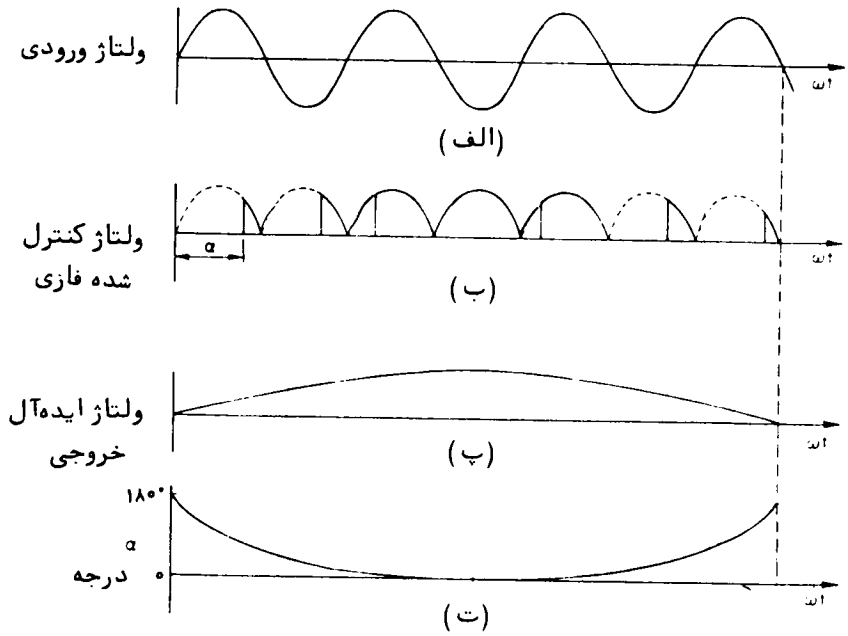
(ب) واگردان سیکلی برای سرعتهای کمتر

روش دیگری برای آهسته‌سازی مولد توربینی[1] (توربو آلترناتور) استفاده از این مولد به صورت موتور سنکرونی که وسیله قدرت فرکانس کمی ازیک واگردان سیکلی‌تغذیه می‌شود ،است . واگردان سیکلی ، منبع تغذیه فرکانس بالایی را به منبع‌تغذیه فرکانس کم‌بدون احتیاج به‌منبع تغذیه جریان مستقیم واسطه[2] که در سیستمهای موردبحث‌تاکنون وجود داشت تبدیل می‌کند . واگردانهای سیکلی را می‌توان برای کاربردهای فرکانس کم‌متغیر و یا ثابت مورد استفاده قرار داد . آنها اولین بار در سال ۱۹۳۰ در محرکهای کششی مورد استفاده قرار گرفتند .موتورهای سری جریان‌متناوب درفرکانسهای بالا نظیر ۵۰ هرتز دارای مشکلات جابه‌جایی‌مکانیکی‌هستند ، لذا کاربرد واگردان سیکلی به منظور کاهش فرکانس به مقدار $\frac{۲}{۳}$ ۱۶ هرتز بدون از دست دادن مزایای زیاد مشخصات گشتاور موتورهای سری فوق مشکل مذکور را حل و از بین برد .

در اصل‌در ورودی واگردان‌سیکلی‌شکل موج جریان‌متناوب طبق‌شکل ۵ ــ ۸ (الف) موجود است . این شکل موج نه تنها یکسو می‌شود بلکه کنترل شده فازی و جابه‌جا شده خطی[3] است .

1- Turboalternator 2- Inlermediary 3- Line commutated

زاویه فاز α به طور دوره‌ای طبق شکل ۵ ــ ۸ (ب) و (ت) تغییر می‌یابد به طوری که شکل‌موج خروجی ایده‌آل (صاف شده) واگردان سیکلی به صورت شکل ۵ ــ ۸ (پ) است. در این شکل مقدار فرکانس خروجی معادل یک‌هفتم فرکانس منبع تغذیه خواهد بود، که آن مستقیما با تغییر دوره‌ای زاویه α متناسب است.

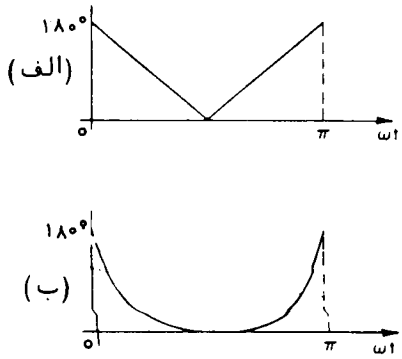


شکل ۵ ــ ۸ تقسیم فرکانس با استفاده از واگردان سیکلی
(الف) شکل موج ورودی (ب) شکل موج خروجی (پ) خروجی ایده‌آل شده
(ت) شکل موج زوایای راه‌اندازی

برای فرکانس خروجی کم ثابت شده‌ای مقدار ولتاژ، مشکلی ایجاد نمی‌کند ولی اگر کاربرد محرک سرعت متغیری موردنظر باشد که در آنجا فرکانس و ولتاژ متناسب هستند، کنترل مقدار ولتاژ نیز از طریق α بایستی به خوبی انجام گیرد. سیکل α تعیین کننده فرکانس است، اما آن تابعی است از α با زمان، که تعیین کننده سطح کلی منحنی ولتاژ روی سیکل خروجی و بنابراین مقادیر متوسط و مؤثر است. به عنوان مثال در شکل ۵ ــ ۹ تابع α در (الف) ولتاژ کمتری از تابع α در (ب) را به دست می‌دهد. به هرحال در کنترل فازی هدایت تیریستوری، منبع تغذیه موقعی که α زیاد می‌شود، به باری با ضریب توان $\cos\theta$ کمتر رسیدگی می‌کند، (به شکل ۳ ــ ۱۱ (ت) مراجعه شود). به نظر می‌رسد که اگر به جای تأخیر در زاویه فاز طبق

شکل ۵ ــ ۹ (الف) ، ازفن‌مدوله کردن‌پالس طبق شکل ۵ ــ ۱۰ استفاده شود ، دارای‌مزایایی از نقطه نظر ضریب قدرت خواهد بود .

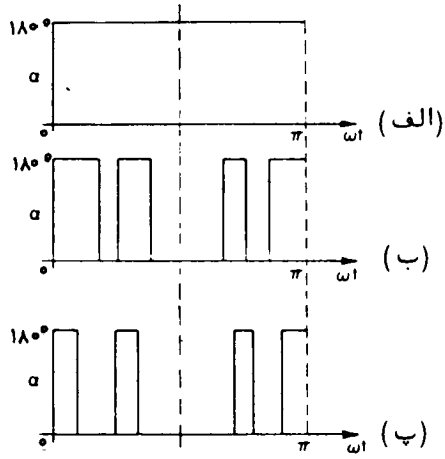
همچنین بایستی هارمونیکهای همراه با مولفه اصلی فرکانس کم را در خروجی به حساب آورد . اصول این روش به روشنی نشان می‌دهد که فرکانس خروجی را می‌توان از صفرتافرکانس منبع تغذیه تنظیم کرد . در عمل هارمونیکها ، دامنــه بالاترین فرکانس خروجی را بــه مراتب پایین‌تر از دامنه فرکانس ورودی نگاه می‌دارند . برای کمک به کمتر شدن‌محتوای هارمونیکها از منبع تغذیه چند فازه استفاده می‌شود . منبع‌تغذیه سه‌فاز و آرایش بار سه‌فاز درشکل ۵ ــ ۱۱ نشان داده شده است . در این شکل فقط یک فاز واگردان به طور کامل نشان داده شده است و دو فاز دیگر به صورت نمودار بندالی مشاهده می‌شوند .موضوع قابل توجه تعداد تیریستورهای زیادی است که بایستی مورد استفاده قرار گیرند ، یعنی ۶ تیریستور بر فــاز خروجی برای یک ورودی سه فاز[یا ۱۸ تیریستور در کل مدار] .



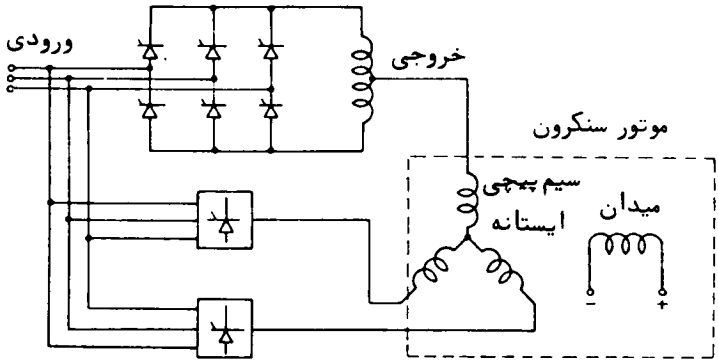
شکل ۵ ــ ۹ کنترل ولتاژ توسط تنظیم زاویه فاز α

(الف) تغییرات خطی زاویه فرمان (ب) تغییرات پیوسته زاویه فرمان

شکل۵ ــ ۱۲ شکل‌موجهای‌متعارف رابا‌تموج خیلی‌کمتر ازمثلا حالت تک‌فاز شکل ۵ ــ ۸ نشان می‌دهد . سیکل واگردان بــا شروع در نقطه صفــر واگردان سیکلی مثل یک یکسوسازقابل کنترل باهدایت کامل عمل‌می‌کند . جریان به داخل سیم‌پیچیهای فاز موتور جاری خواهدشد . زاویه فاز ، و درنتیجه هدایت ، درانتهای هرسیکل ورودی متوالی‌مقداری تأخیر می‌کند تاولتاژ خالص خروجی صفر شود و سپس قطبیت عوض می‌شود و واگردان سیکلی در جهت معکوس برای یک نیم سیکل شروع به وارونگری[1] می‌کند . جریان با اتکا به ضریب قــدرت $\cos\theta$ و بــار در



شکل ۵ ــ ۱۰ کنترل قطع و وصل برای بهبود ضریب قدرت
(الف) ولتاژ صفر (ب) ولتاژ پایین (پ) ولتاژ بالا

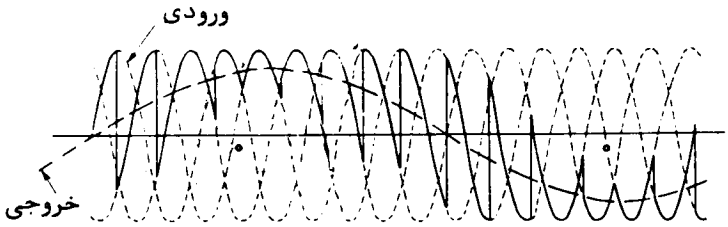


شکل ۵ ــ ۱۱ واگردان سیکلی سه فاز

این نیم سیکل، از سیم‌پیچی فازهای موتوربه واگردان سیکلی وارونگر و سپس به منبع تغذیه روان خواهد شد. در طی نیم سیکل منفی ولتاژ، زاویه فاز خودش یک سیکل کاملی را با دادن دوره هدایت کوتاهی طی می‌کند، یعنی آنکه α از نزدیکی‌های ۱۸۰، متوالیا شروع به‌افزایش هدایت برای هر سیکل ورودی متوالی، تا مقدار بیشینه در 0′، می‌کند و سپس دوباره شروع به کاهش تا آخر نیم‌سیکل منفی‌خواهد کرد. گرچه قرارگرفتن تموج ولتاژ روی مولفه اصلی فرکانس پایین، خالی از اشکال به نظر نمی‌رسد ولی سلف‌بار و خط، شکل موج جریان را صاف می‌کند. موقعی که تعداد فازهای ورودی بیشتر است می‌توان شکل موج بهتری را به دست آورد، اما در این حالت‌بایستی افزایش تعداد[خیلی‌زیاد] تیریستورها و فزونی‌مدارهای‌کنترل راتحمل‌کرد.

داشتن شکل موج بهتر در این جا ، نسبت به وارونگری که در قسمت (۳ ــ ۳ ــ ۱) تشریح شد مزیتی بشمار می‌آید . سعی براین است که از واگردان سیکلی موج خروجی سینوسی فرکانس پایینی تهیه کنند درصورتی که مدارهای دیگر تنها موج مربعی تولید می‌کنند که البته قابل مدوله کردن هستند .

فرکانسهای بالاتر از فرکانس ورودی را می‌توان با استفاده از جابه‌جایی اجباری به‌دست آورد .



شکل ۵ ــ ۱۲ خروجی تک‌فازه‌واگردان سیکلی از ورودی سه فاز

۵ ــ ۴ تحریک موتور سنکرون

معمولا تحریک را نمی‌توان به مثابه عاملی[1] برای کنترل موتور سنکرون مورد ملاحظه قرار داد . یقینا آن در کنترل سرعت موتور ، به علت اینکه سرعت تنها تابعی از فرکانس و تعدادقطبها است ، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد .

تحریک به عنوان یک عامل قابل تنظیم مفید است . تنظیم تحریک جریان مستقیم در موتور سنکرون تفاوتی با تنظیم در ماشین جریان مستقیم نخواهد داشت . در فصل ۴ به طور مفصل در این مورد که شامل مقاومت ، یکسوساز ، و یکسوسازهای قابل کنترل برای منابع تغذیه جریان متناوب و برشگرهای تیریستوری برای منابع جریان مستقیم هستند بحث شد ، جزئیات کاربرد تنظیم‌میدان تحریک‌موتور و مسائل مربوط به آن در این قسمت مورد بحث قرارمی‌گیرد .

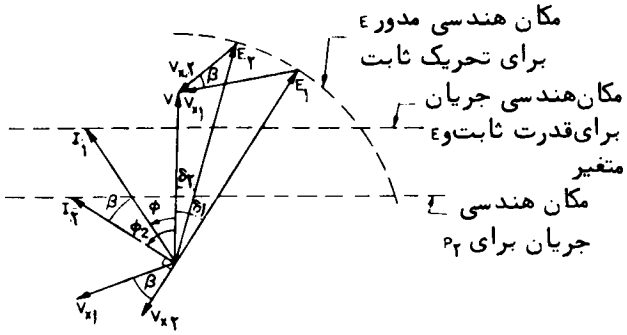
تصحیح ضریب قدرت یکی از موارد استفاده کنترل میدان تحریک است .قابلیت جذب یا تغذیه قدرت ظاهری توسط ماشین سنکرون دلیل استفاده آن در تصحیح ضریب قدرت است . مقدار آن بستگی به تراز یا سطح تحریک ماشین خواهد داشت . دومین‌استفاده ازکنترل میدان تحریک در بهینه‌سازی طراحی ماشین است ، زیرا لزوم تحریک پایین در بار اندک وتحریک‌بالا در بارهای سنگین سبب صرفه‌جویی‌هایی نسبت به تحریک ثابت بالا برای تمام بارها می‌شود .

۵ ــ ۴ ــ ۱ کنترل خودکار تیریستوری تحریک

معمولا در شرایط بار ثابت تحریک موتور سنکرون در مقدار ثابتی تنظیم می‌شود . در چنین

1- Parameter

حالتی ، کاهشی در بار یا تنزلی در ولتاژ اعمال شده به آرمیچر ،ضریب قدرت موتور را پیشفازتر[1] می‌کند . شکل ۵ ــ ۱۳ این حالت کاهش بار را نشان می‌دهد که در آن اندیسهای[2] مشخص کننده مقادیر بار عادی و اندیسهای[2] معرف مقادیر بار کمتر هستند .



شکل ۵ ــ ۱۳ تغییر ضریب قدرت با بار

بار کاهش یافته به معنی تنزل زاویه بار از δ_1 به δ_2 است که توسط رابطه (۵ ــ ۲) برای V ، X_s و E ثابت نشان داده می‌شود . رابطه قدرت عبارت است از :

$$P = \frac{VE}{X_s} \sin \delta$$ برای هر فاز

که در آن

V ولتاژ اعمال شده به آرمیچر هر فاز

E نیروی محرکه الکتریکی القایی آرمیچر هر فاز

X_s راکتانس سنکرون هر فاز ، و

δ زاویه بار مصرفی

بنابراین ، بردار V_x از طریق زاویه β در نمودار فازبرداری دوران می‌کندواگر ازمقاومت آرمیچر صرفنظرشود ،جریان هم مشابه دوران می‌کند و ضریب قدرت نیز پیشفازتر خواهد شد . برای متعادل کردن بارهای پسفاز در هر جای سیستم از این پیشفازشدن استفاده می‌شود ولی برای انجام منظور فوق کنترلی وجود ندارد .

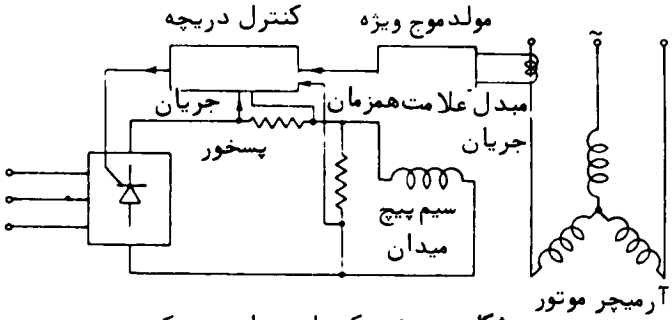
برای بعضی از کاربردهای موتور سنکرون نظیر کمپرسورهای دوسورو[3] بارهای پیک اتفاقی وجود دارد . طراحی موتور برای کار مداوم با بیشینه تراز تحریک ، برای ارائه گشتاور با ثبات به منظور تأمین بارهای پیک ، غیر اقتصادی خواهد بود . در آن صورت چاره‌اندیشی بر اتلاف حرارتی موتوری با اندازه بزرگ ضروری خواهد بود . به عوض آن ، بهتراست موتور برای بارهای

1- Leading 2- Subscript

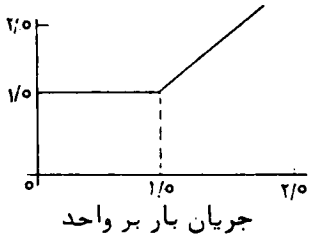
3- Reciprocating compressors

عادی باتحریک‌کمتری کار کند و سپس تحریک به طور خودکار برای بارهای زیاد لحظه‌ای تقویت شود . گام بعدی اقدام به آماده کردن تحریک قابل تنظیم به طور پیوسته و مناسب برای کلیهٔ بارهای مصرفی است . مقدار جریان میدان تحریک مناسب برای قدرت ، تابعی از جریان بار مصرفی جذب‌شده توسط آرمیچر است . این‌تابع به پایداری ومقدار ضریب قدرت بستگی دارد ؛ یعنی ، مقدار کیلووات آمپر ظاهری پیشفاز مطلوب است . بازده موتور قابل کنترل‌است‌وانتخاب اینکه موتور باحداکثر بازده کار کند ،یا ضریب قدرت سیستم‌را اصلاح کند وجود خواهد داشت .

تغییر در بار می‌تواند سریع باشد به طوری که کنترل تحریک اجبارا پاسخ تندی بدهد . این عمل توسط تقویت کننده تیریستوری که به شکل نمودار بندالی ، نظیر پل یکسوساز کنترل فاز با جابه‌جایی خط‌جریان متناوب شکل ۵ ــ ۱۴ ، نشان داده شده است ، می‌تواند انجام گیرد . علایم فرمان تیریستور از جریان بار ، توسط یک مولد موج ویژه که مشخصه ایده‌آل آن ممکن است طبق شکل ۵ ــ ۱۵ باشد ، گرفته می‌شود . تحریک‌برای‌داشتن ضریب قدرت‌خوبی ، تا زمانی که بار به حد معینی برسد ، ثابت نگاه داشته می‌شود و سپس متناسب با بار افزایش می‌یابد . با به حساب آوردن منحنی غیرخطی مغناطیس کنندگی موتور و رابطه غیر خطی بین زاویه فاز آتش α و خروجی یکسوساز ، مقداری انحراف وجود خواهد داشت گرچه حلقه پسخور جریان میدان تحریک متعادل کننده این انحراف را جبران خواهد کرد .



شکل ۵ ــ ۱۴ کنترل میدان تحریک



شکل ۵ ــ ۱۵ مشخصه یک مولد موج ویژه ایده‌آل

در طول راه‌اندازی نظیر یک موتور القایی ، لازم است که از منبع تغذیه جریان مستقیم میدان تحریک جلوگیری شود و یکسوساز تیریستوری را در مقابل نیروی محرکه الکتریکی القایی در فرکانس لغزش در داخل سیم‌پیچی میدان تحریک ، محافظت کرد . مقاومت اضافه شده بین دو سر سیم‌پیچی هر دو را عملی می‌سازد . ولتاژ دو سر پل نیروی محرکه الکتریکی القایی‌مدار باز که مقادیر اسمی ولتاژ بالایی را برای تیریستورها ایجاب می‌کند ، نیست بلکه افت ولتاژ ناشی از جریان منتجه عبوری از طریق مقاومت شنت خواهد بود . به محض اینکه ماشین به صورت موتورالقایی کار کند و به سرعت‌عادی خود برسد لغزش کوچک‌می‌شود ، لذا ولتاژجریان متناوب در سیم‌پیچی میدان تحریک اندک خواهد بود . در مقدار کمینه ویژه‌ای که در دو سر مقاومت موازی حس می‌شود علایم دریچه اعمال می‌شود و می‌تواند جریان مستقیم را به میدان تحریک تغذیه کند . اکنون موتور هماهنگ شده ومولد موج ویژه عمل کنترل رابه‌عهده‌می‌گیرد .

(الف) حفاظت تحریک بدون جاروبک طی راه‌اندازی

در ماشینهای سنکرون بزرگ، سیم‌پیچی‌های میدان تحریک ، به علت اینکه قدرت اندکی را از طریق حلقه‌های لغزان انتقال می‌دهند ، روی گردانه قرار دارند . اگر لازم باشد که موتور سنکرون بدون جاروبک باشد بایستی حلقه‌های لغزان حذف شوند . یک سیستم متعارف درشکل ۵ ــ ۱۶ نشان داده شده است . یک تحریک‌کننده جریان‌متناوب‌جایگزین مولدجریان مستقیم معمولی یا منبع تغذیه جریان مستقیم می‌شود ، به طوری که سیمها را می‌توان از طریق محور توخالی‌عبورداد و به مدار یکسوساز متصل کرد . خروجی یکسوساز مستقیما به میدان تحریک اتصال می‌یابد .

درست مثل پل تیریستوری ، طی عمل راه‌اندازی برای جلوگیری از خرابی پل دیود در مقابل ولتاژهای زیاد القایی در سیم‌پیچی میدان ، بایستی وسیله محافظی به مدار اضافه‌شود . در عمل ثابت شده است که مدار روزن بری[1] شکل ۵ ــ ۱۷ رضایت بخش است . این مدار تیریستوری بین پل دیود و سیم‌پیچی تحریک شکل ۵ ــ ۱۶ قرار می‌گیرد .

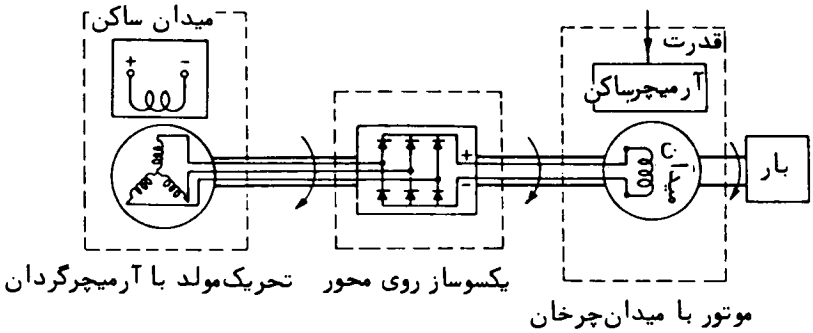
در موقع راه‌اندازی خروجی تحریک کننده جریان متناوب صفر است ، اما نیروی محرکه القایی زیادی در سیم‌پیچی میدان اصلی موتور وجود دارد . اگر ولتاژ خط[2] A به طورمثبت افزایش یابد دیودهای زنر Z_1 و Z_2 هدایت ، و تیریستورهای TH_1 و TH_2 را راه‌اندازی می‌کند . پل یکسوساز دیود اکنون‌اتصال‌کوتاه است و ازخرابی ولتاژ جلوگیری می‌کند . مقاومت R جریان اتصال کوتاه را محدود می‌کند . موقعی که خط B مثبت شود پل یکسوساز خودش اتصال کوتاه را مهیا می‌کند و تیریستورها خاموش می‌شوند . تیریستور TH_3 همواره درموقع راه‌اندازی خاموش

1- Rosenbury 2- Rail

است . زیرا زمانی که خط A مثبت است آند TH_3 نسبت به کاتد منفی است و موقعی که خط B مثبت است دریچه TH_3 نسبت به کاتد منفی است .

تحریک کننده جریان متناوب با افزایش سرعت موتور شروع به تحویل جریـان می‌کند . تیریستورهای TH_1 و TH_2 این جریان را تا زمانی که سرعت به سنکرون نـزدیک شود ، موقعی که نیروی محرکه القایی‌کمتر ازآن است که به شکست‌دیودهای زنر و هادی کردن تیریستورها منجر می‌شود ، حمل می‌کنند . در این سرعت جریان تحریک کننده توسط پل سه فـاز یکسو شده و از طریق سیم‌پیچی میدان تحریک موتور عبور می‌کند و موتور را به همزمانی سوق می‌دهد .

اگر تنها یک‌تیریستور برای‌اتصال‌کوتاه کردن پل‌مورد استفاده قرارمی‌گرفت ،آن‌تیریستور به هدایت خود در سرعت سنکرون ادامه می‌داد ، زیرا جریان تحریک کننـده آن را از خاموش شدن بازمی‌داشت . با دو تیریستور ، طی نیم سیکل موقعی که D هدایت می‌کند ، افت ولتاژی حدود ۱ ولت در دوسر D وجود دارد . این ولتاژ برای خاموش کردن TH_2 توسط‌گرایش معکوس کافی است . به محض مسدود شدن TH_2 ، TH_1 نیز هدایت را قطع می‌کند و به حالت‌مسدودباز می‌گردد . دو تیریستور ، طی کار همزمانی‌موتور به‌علت اینکه ولتـاژ شکست دیودهای زنر برای بیشتر از ولتاژ تحریک جریان مستقیم طرح شده است درحالت خاموش باقی می‌ماند .



شکل ۵ ــ ۱۶ میدان تحریک ایستانه روی گردانه

درسرعت‌همزمانی‌موتور ، بودن R درمدار به علت تلفات قدرت درآن کاملا غیرضروری است . مقاومت R در موقع همزمانی به علت اینکه دریچه و آند TH_3 هر دو نسبت به‌کاتد مثبت هستند و هدایت می‌کنند ، اتصال کوتاه است .

این موتور بدون جاروبک ، دارای محـافظ است ولی کنتـرل قابل تنظیـم ندارد .شکل ۵ ــ ۱۴ کنتـرل میدان قابل تنظیمی را نشان داد کـه بدون جاروبک بـود . به نظـر می‌رسد کنترل میدان تحریک قابل تنظیم بدون جاروبک ، با تلفیق این دو سیستم امکان‌پذیر است .

۵ ـ ۵ موتور جریان مستقیم یا موتور سنکرون

موتور جریان مستقیم متنوع‌ترین موتورهاست . اگر برای بعضی از کاربردها جا به جاکن‌مکانیکی موتور جریان مستقیم قابل تحمل نباشد ، امکان تبدیل ماشینی [1] وجود دارد . گذاشتن آرمیچر در ایستانه و قطبهای میدان در گردانه به این معنی است کـه کلیدهای نیمه هادی می‌تواننـد جایگزین جابه‌جاکن مکانیکی شوند . برای رهایی کامل از جاروبکها و اتصالات لغزنده ،قطبهای میدان بایستی‌به صورت‌یک مغناطیس دایم و یا تحریک‌شده توسط ماشین جریان مستقیم دیگری روی همان محورباشند وجهت‌تغذیه جریان مستقیم‌به سیم پیچی قطبها بایستی دارای‌یکسوساز غیرقابل کنترل مونتاژ شده‌ای روی همان محور باشند . این سیستـم در شکل ۵ ـ ۱۶ مشاهـده می‌شود . این تحریک جریان مستقیم بـدون جاروبک تجربـه جدیدی برای موتورهای سنکرون بزرگ با میدان تحریک چرخان است لیکن دلیل قانع کننده‌ای که چرا این سیستم را نمی‌توان در مورد موتورهای جریان مستقیم تبدیل شده انجام داد وجود ندارد .

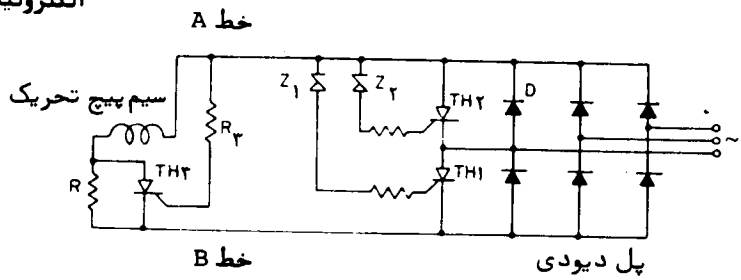
جریان در ماشینهای جریان مستقیم همواره بایستی در امتدادمحورهای‌عرضی [2] (تقارن) به‌آرمیچر وارد شود . شکل ۵ ـ ۱۸ موتـور جریان مستقیم‌توسعه یافته و تبدیل‌شده‌ای را نشان می‌دهد . آرایش کلیدزنی تیریستوری جایگزین جابه‌جاکن مکانیکی‌شده‌است و در وضعیت نشان داده شده در شکل تیریستورهای ۱ و ۲ بایستی تنها تیریستورهایی باشند که هدایت می‌کنند . توزیع جریان ، گشتاوری روی آرمیچر و گشتاور عکس‌العملی بر روی گردانه تولید خواهد کرد به طوری که حرکت دورانی حاصل خواهد شد . محور طولی همراه با گـردانه دوران می‌کند ، لـذا برای اینکه گشتاور ثابت باقی بماند بایستی آرمیچر همان توزیع جریان را نسبت به قطبها القا کند . بنابراین جریان آرمیچر بایستی پیوسته توسط کلیدزنی پی‌درپی زوج تیریستورها به محور طولی معرفی شود . بعد از یک ششم دوران درماشیـن شکل ۵ ـ ۱۸ بایستـی تیریستورهای ۱و ۲ خاموش، و تیریستورهای ۳ و ۴ روشن شوند و به همین ترتیب تیریستورهای ۵ و ۶ به دنبال آنها نیم سیکل را کامل کنند .

تعداد زیادی تیریستور لازم‌است‌تا جایگزین تمام‌تیغه‌های [3] واقعی‌جابه‌جاکن‌شوند ، لیکن نیازی به‌آن همه وجود ندارد . شش تیریستور برای هر سیم پیچی کاملا" مناسب و کافی‌است . شکل ۵ ـ ۱۸ را می‌توان به شکل ۵ ـ ۱۹ (الف) کاهش داد و آنرا نیـز می‌توان طبـق شکل ۵ ـ ۱۹ (ب) رسم کرد ، که اصلا" به موتور جریان مستقیم شباهتی نخواهد داشت . به‌هرحال کلیدزنی پی‌درپی معمولی ، به طوری که هادی‌ها به منظور ایجاد گشتاور یک‌طرفه‌ای جریانی را در یک جهت ویژه حمل کنند ، هنوز به قوت خود باقی است .

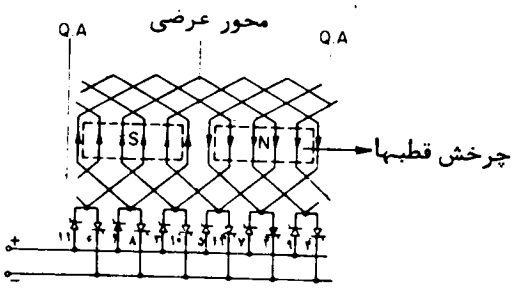
1- Invert the machine

2- Quadrature axes

3- Segment



شکل ۵ ــ ۱۷ محافظت راه‌اندازی موتور



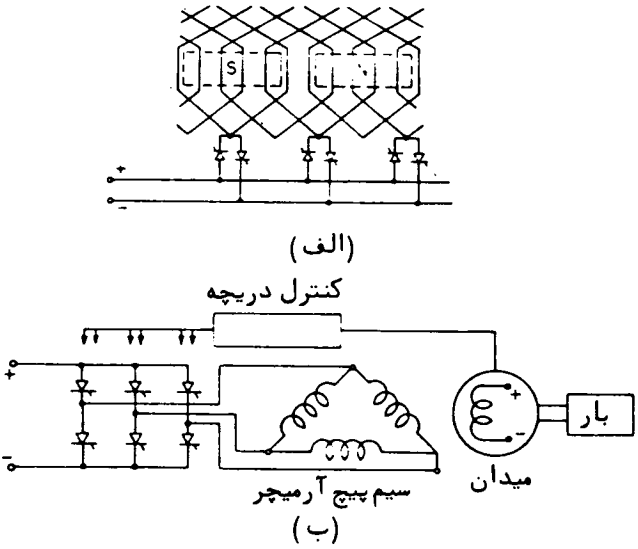
شکل ۵ ــ ۱۸ موتور جریان مستقیم تبدیل شده با جابه‌جاکن تیریستوری

برای ایجاد جریان در محور طولی یا حوالی آن ، موقعیت قطبها بایستی آشکار باشند . خروجی مبدلهای[1] آشکارسازی بایستی مدارهای دریچه تیریستوری مورد نظر را تغذیه کنند . این مبدلها می‌توانندمکانیکی ،مغناطیسی ، خازنی ، رادیواکتیو (پرتوافزا) یا نوری‌باشند . آنها میزان کلیدزنی و نیز تسلسل آن را طوری می‌سازند تا همان باشند که برای ایستادن مبدان آرمیچر همگام با گردانه لازم است . عامل مهم این است که اگر موتور خود راه‌انداز باشد . در این صورت‌مبدل حس‌کننده[2] بایستی بدون منبع قدرت‌خارجی ، در موقع سکون قادربه‌تشخیص وضعیت قطب باشد . شکل ۵ ــ ۱۹ (ب) را می‌توان به صورت ماشین سنکرون بررسی کرد و تا حدودی هم این بررسی ، به استثنای آنکه به علت طبیعت منبع تغذیه به آن ماشین جریان مستقیم اطلاق شده است ، درست است . جابه‌جاکن مکانیکی تعویض‌کننده فرکانس خود ماشین است . وارونگر تیریستوری نیز همان خاصیت را داراست . بنابراین مثل موتور جریان‌مستقیم‌در اینجا نیز گردانه ، میدان چرخشی آرمیچر را به منظور پله‌ای شدن کنترل می‌کند . درنتیجه‌اگر بار از حد مجاز تجاوز کند سرعت موتور ، تا زمانی که گشتاورهای مکانیکی و الکترومغناطیسی یکدیگر را متعادل نساخته‌اند ، کاهش خواهد یافت . در طی راه‌اندازی مثل ماشینهای معمولی

1- Transducer

2- Sensing

نیاز مشابهی برای محدود کردن جریان آرمیچر برای کار با ولتاژ ثابت وجود خواهد داشت .



شکل ۵ ــ ۱۹ ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک
(الف) کاهش تعداد تیریستورها (ب) بازآرایی سیم‌پیچی‌ها

این کلیدزنی پی‌درپی جریانها ، از یک منبع جریان مستقیم ، در سیم پیچی ایستانه ، الگوی میدان چرخانی را تولید می‌کند . درحقیقت نوعی ادغام[1] وجود دارد و الگوی میدان دور فاصله هوایی با پله‌های مجزایی حرکت می‌کند . افزایش تعداد عناصر کلاف و افزایش سرعت کلیدزنی باعث چرخش یکنواخت[2] الگوی میدان می‌شود . معمولا و در شکل ۵ ــ ۱۹ (ب) نیز پله‌ها ۶۰ درجه الکتریکی هستند .

در این روش سیم پیچی ایستانه شکل ۵ ــ ۱۹ (ب) را می‌توان به صورت عمومی[3] در نظر گرفت . یعنی ، آن را می‌توان برای هرنوع ماشینی مثل سنکرون ، جریان مستقیم ، یا موتور القایی مورد استفاده قرار داد . موتورهای جریان مستقیم و سنکرون دارای گردانه‌های مشابهی هستند . در حالت جریان مستقیم ، گردانه میزان کلیدزنی آرمیچر را کنترل و از تزریق جریان درمحور طولی اطمینان حاصل می‌کند . در موتور سنکرون ، آرمیچر گردانه را کنترل می‌کند به طوری که گردانه قفل[4] می‌شود و میدان آرمیچر را دنبال می‌کند ، و برخلاف موتور جریان مستقیم اگربار

1- Resolution
2- Uniform
3- Universal
4- Lock-in

از حد مجاز تجاوز کند موتـــور سنکرون از کار وامی‌ماند[1] . با گردانه قفس سنجابی ، ماشین به موتور القایی‌تبدیل‌می‌شود و باسرعتی‌تقریبا متناسب بامیزان کلیدزنی کار خواهدکرد . وارونگر تیریستوری تمایل به یکسان‌کردن محرکهای الکتریکی دارد . حتی‌با اینکه وارونگر دارای‌ترکیب بنیادی معینی‌است اکنون مدولهای کلیدزنی تیریستوری است که با مشخصه‌های‌بار ماشین‌خود را وفق می‌دهند و نه برعکس. نکته مهم دیگر اینکه وارونگرها برای ماشینها این امکان را ایجاد کرده‌اند که گرچه کاملا بدون جابه‌جاکن نباشند ولی‌حداقل از اتصالات‌کلیدزنی مکانیکی لغزان مبرا باشند .

1- Stall

مراجع

1. Roters, H. C. (1947), 'The hysteresis motor', *A.I.E.E. Trans.* **66** 1419.

کتابنامه

Power applications of controllable semiconductor devices (1965), I.E.E. Publication, No. 17.

Griffin, A. W. J. and Ramshaw, R. S. (1965), *Thyristors and their applications*, Chapman and Hall, London.

Rosenberry, G. M. (1960), 'A new brushless d.c. excited rotating field synchronous motor', *Proc. A.I.E.E. Applications and Industry*, 136.

Edwards, J. D., Harrison, E. H. and Stephen, D. D. (1966). 'Thysyn motors', *A.E.I. Engineering*, **6**, 36-39.

Ramshaw, R. S., Griffin, A. W. J. and Lloyd, K. (1965, 1966). 'A brushless adjustable speed motor for extreme environments', *Control pt. I*, **9**, (90) 669-672; *pt. II*, **10** (91) 40-44.

Wilson, T. G. and Trickey, P. H. (1962), 'D.C. machine with solid state commutation', *Electrical Engineering*, **81** (11) 879.

Nishimura, M., Murakami, Y., Sakuma, N. and Kuroyama, T. (1969), 'A pulsewidth-controlled cycloinverter', *Electrical Engineering in Japan*, **89** (10).

St. J. Lamb, C. (1963), 'Commutatorless alternating – voltage fed variable speed motor', *Proc. I.E.E.*, **110** (12) 2221.

Gallagher, P. J., Barrett, A. and Shepherd, W. (1970), 'Analysis of single-phase rectifier thyristor-controlled load with integral-cycle triggering', *Proc. I.E.E.*, **117**, (2).

واژه‌نامهٔ فارسی - انگلیسی

آ

آشکار سازی (بازیابی) جریان بار	Load current Detection
آشکار سازی خطا	Error detection
آغارش	Dopping
آغاریده	Dopped
آهسته چرخاندن	Baring

الف

اتصال ، پیوندگاه	Junction
اتصال ده جریان متناوب	A.C. contactor
اتلاف انرژی	Energy loss
اتلاف قدرت	Power dissipation
اجبار میدان	Field forcing
احیا سازی	Regeneration
ادغام	Resolution
ارتباط درونی	Interlinked
از کارواماندن	Stall
اشاعه یافتن	Diffuse
اشباع	Staturation

اصطکاک	stiction
افسار گسیختگی حرارتی	Thermal runaway
اعوجاج هارمونیک	Harmonic distortion
القا	Induction
الکترونیک قدرت	Power electronics
انبارش، ذخیره	Storage
انشعاب	Tap
انشعاب تعویض کن مکانیکی	Mechanical tap changer
ایستا، ساکن	Static
ایستانه، استاتور	Stator

ب

باتری معمولی	Conventional supply
باز بست	Reconnect
باز ترکیبی	Recombination
باز نشانی	Reset
باند مجاز	Permissible band
برش دادن	Chop
برشگر	Chopper
برشگر جونز	Jones chopper
برگردان	Version
برهم نهی	Superposition
به جلو راندن	Dislodge
به صورت کپسول	Encapsulated
بهنجار سازی ، بهنجار	Normalization
بهینه سازی	Optimization
بهینه وار	Quasi optimized
بیشینه	Maximum

پ

پایانه	Terminal
پسخور	Feedback
پس زنی الکتریکی	Electric-backlash
پسماند ، هیسترزیس	Hystersis
پولک	Wafer
پویش سانتیمتری	Inching
پیش ساخته ، مدول	Module
پیل سوختی	Fuel cell
پیوند هم ظرفیتی	Covalent bond

ت

تابع تک پله‌ای	Unit step function
تابع توصیفی	Describing function
تأخیر	Delay
تبدیل لاپلاس	Laplace transform
تحریک کننده جریان متناوب	A.C. exciter
تحلیل	Analysis
تحلیل هارمونیک	Harmonic analysis
تترود	Tetrode
تراز	Level
ترانزیستور تک پیوندی	Uni-junction transistor
ترک برداشتن ، تغییر شکل	Hogging
ترکیب	Synthesis
ترمز احیا سازی	Regenarative braking
تریاک	Triac
تریود	Triode
تشعشعات اتمی	Nuclear radiation
تضعیف	Attenuate
تعویض کننده فرکانس چرخان	Rotary frequency changer

تقویب کننده	Amplifier
تک حالتی	Monostable
تلفات قدرت دریچه	Gate power loss
تلفات نشتی قدرت	Leakage power loss
تموج	Fluctuation
تندکار	Fast turn-on
تنظیم	Regulation
توقف ساز نمونه دار	Prototype interuptor
تیراترون	Thyratron
تیریستور	Thyristor
تیریستور تطبیق شده	Matched thyristor

ث

ثابت زمانی	Time constant

ج

جابه جا سازی	Displacement
جابه جاکن	Commutatore
جابه جایی اجباری	Forced commutation
جابه جایی خط	Line commutation
جابه جایی خط جریان متناوب	A.C. line commutation
جابه جایی ضربه	Impulse commutation
جابه جایی طبیعی	Natural commutation
جابه جایی فاز	Phase commutation
جبربول	Boolean algebra
جدول حقیقت	Truth table
جریان تداخل	Pick-up current
جریان تهاجمی	Inrush current
جریان قفلی	Latching current

جریان نگهدارنده	Holding current
جفت شدگی ، کوپلاژ	Coupling

چ

چند ضربانی (نوسانساز) آزاد هیچ حالتی	Astable(free running) multivibrator
چند ضربانی تک ضربه‌ای	One shot multivibrator
چند ضربانی چرخش‌آزاد	Free running multivibrator
چند ضربانی دو حالته	Bistable multivibrator

ح

حاملهای اکثریت بار	Majority charge carriers
حذف هارمونیک	Harmonic elimination
حفره	Hole
حلقه	Mesh

خ

خازن ضربه گیر	Buffer capacitor
خاموشی تشدیدی	Resonant turn-off
خاموشی دریچه	Gate turn-off
خنثی‌سازی هارمونیک	Harmonic neutralization
خود جابه جایی	Self-commutation
خود کنترل	Servo
خیز ولتاژ	Voltage surge

د

درجه حرارت اتصال	Junction temperature

دریچه	Gate
دودویی	Binary
دوره	Period
دوره‌کار	Duty cycle
دوگانه	Dual
دیاک	Diac
دیودچرخش‌آزاد	Free wheeling diode
دیودزنر	Zener diode

ر

راه انداختن	Trigger
رسانندگی	Conductivity
رواداشت ، تلرانس	Tolerance
روشنی دریچه	Gate turn-on
روی هم افتادگی	Overlap

ز

زمان باز یافت	Recovery time
زمان برگشتی	Clearing time
زمان صعود	Rise time
زنجیره‌ای	Cascade
زیر لایه	Subshell
زیر میرا	Under-damped

س

ساعتگرد	Clockwise
ساییدگی	Wear
سراشیبی	Ramp
سرعت	Velocity

سری پالسها	Train of pulses
سطح برونی	Periphery
سلف صافی	Smoothing choke
سیستم کرامر	Kramer system

ش

شبه چرخان	Quasi rotating
شبیه ساز	Simulator
شبیه سازی ، تجسم	Simulate
شتاب گیری	Accelaration
شکافی	Backlash
شکست بهمنی	Avalanch breakdown
شکل دادن موج	Wave shaping
شکل موج	Waveform
شکل موج سینوسی	Sinusoidal waveform
شمارنده حلقه‌ای	Ring counter
شین	Bus

ص

صنایع نساجی	Textile mill

ض

ضربه	Impulse
ضربه سیم پیچی	Winding factor

ط

طنینی	Ringing

ظ

ظرفیت	Valence

ع

عایق ، جداشدگی	Isolation
عکس ساعتگرد	Counter-clockwise
علامت	Signal
علایم فرمان	Firing signals
عملگر	Operator

غ

غیر همگن	Inhomogenety

ف

فاز شکسته	Split phase
فازوری	Phasor
فلیپ ـ فلاپ (فراز ـ فرود)	flip-flop
فلیپ ـ فلاپ (فراز ـ فرود) J.K	J-K flip-flop
فوق میرا	Over damped

ق

قابلیت ایستادگی	Withstand capability
قطب برجسته ، قطب آشکار	Salient pole
قطب کمکی	Interpole
قطبیت	Polarity
قطع	Cut-off
قیچی کردن	Clip

ک

کامپیوتر قیاسی	Analogue computer
کاهش هارمونیک	Harmonic reduction
کشش	Traction
کلید زبانه‌ای	Reed switch
کلید زنی پی در پی	Sequential switching
کمپرسورهای دوسورو	Reciprocating compressor
کمینه	Minimum
کنارگذر	By pass
کنترل سیکلی انتگرالی	Integral cycle control
کنترل نسبت زمان	Time ratio control
کنترل وضعیت	Position control

گ

گردانه ، روتور	Rotor
گرمازدا	Heat sink
گرمازدگی	Overheating
گسترش یابنده	Extensive
گستره	Range
گسستگی	Discontinuity
گشتاور	Torque
گشتاور لختی ، ممان اینرسی	Moment of inertia

ل

لغزش	Slip
لغزنده	Wipper

م

ماشین آلات	Machinary
مبدل	Transformer
متغیر	Variable
محدود کردن	Clamp
محرک جریان مستقیم	Direct current drive
محور طولی	Quadrature axis
مدار اتصال کوتاه	Short circuit
مدار بر	Circuit breaker
مدار تصحیح فاز	Phase advance network
مدار فرمان اشمیت	Schmidt trigger
مدار کنترل منطقی	logic control circuit(IC)
مدار مجتمع	Integrated circuit (IC)
مدارمحدود کننده	Clamping circuit
مدوله کردن دامنه قطب	Pole-amplitude modulation
مسیر چرخشی	Orbital path
مسیر درروبی	Bleeding Path
مشدد	Intensive
مقاومت سالم ساز	Bleeding resistor
مقاومت غیر خطی	Non-Linear resistance
مقاومت متعادل‌کننده	Balancing resistor
مقاومت مخصوص تنه	Bulk resistivity
مقدار اسمی	Rating
منبع تغذیه جابه جایی کمکی	Auxilary commutative supply
منبع تغذیه شبه سه فاز	Quasi three phase supply
منجر شدن	Yield
منطق	Logic
منطق مقاومت ـ ترانزیستور	Resistor-transistor logic(RTL)
منطقه تهی	Depletion layer
موازی معکوس	Back to back
موتور بدون جاروبک	Brushless motor

مولد سنجش	Tacho-generator
مؤلفه اصلی	Fundamental component
مونتاژ	Assembly
میدان پراکنده	Stray field
میرا	Damped
میرای بحرانی	Critical damped
میزان کردن	Calibrate

ن

ناخالصی پذیرا	Acceptor impurity
نامتعادل	Inbalance
نسبت فضا ـ علامت	Mark-space ratio
نقشه کارنو	Karnauch's map
نماد	Symbol
نمایش نموداری	Diagrammatic
نمودار بندالی	Block diagram
نوبتی	Intermittent
نورد فولاد	Steel mill
نوسانات گشتاور	Torque ripple
نوسانساز دیر جنبی	Relaxation oscilator
نوع	Variation
نیمه هادی	semiconductor
نیمه هادی طبیعی	Intrinsic semiconductor

و

وارونسازی	Inversion
وارونگر	Inverter
وارونگر پل تک فاز	Single phase bridge inverter
وارونگر جابه جایی ضربه	Impulse-commutated inverter

وارونگر مک ماری ــ بدفورد اصلاح شده	Improve Mc Murray-bedford inverter
واسطه	Intermidiary
واکنشگر ، رآکتور	Reactor
واکنشی ، رآکتیو	Reactive
واگردان	Converter
واگردان دو طرفه	Bidirectional converter
وسیله	Device
ولتاژ الکترواستاتیکی داخلی	Built-in voltage
ولتاژ بایاس اتصال	Junction bias voltage
ولتاژ شکست	Breakdown voltage
ولتاژ قوسی	ARC voltage
ولتاژ گذرا	Transient voltage
ولتاژ مسیر بازکنی	Punch through voltage

ه

هسته	Nucleus
هماهنگ	Sympathy
همترازی	Allignment
همزمان	Synchronize
همشکل	Uniform
همه سویه	Isotropic

ی

یکپارچه	Non-laminated
یکسوساز	Mercury arc rectifier

برق ۹

درسنامه‌ها ۳۴

POWEREN.IR

۵۰۰ ریال