





# طراحی و بررسی عملکرد خودروهای الکتریکی

فرستنده: حمید فرهنگمند





کلید واژه ها :

1. وسایل نقلیه الکتریکی ( Electric Vehicle(EV)
  2. موتور سنکرون آهنربای دائم ( PMSM )
  3. موتور DC بدون زغال آهنربای دائم ( PM BL DC M )
  4. وسایل نقلیه هیبریدی ( HEV )
- خودروی برقی ( Electric Car )

## چکیده

در پروژه حاضر ابتدا تاریخچه کوتاهی از خودروهای برقی آورده شده که در آن نقاط عطف و رکود تولید خودروهای برقی به همراه دلایل این پیشرفت یا رکود در رقابت با خودروهای بنزینی بیان شده است. در بخش دوم نیز به بررسی سیستم تغذیه و شارژ پرداختیم که در این بین بررسی عملکرد باطری های مختلف در خودروی الکتریکی قسمت عمده ای از این بخش را در بر گرفته است. سپس به بررسی مقایسه ای خودروها با محرکهای مختلف مثل بنزینی، هیبریدی، برقی و... از نقطه نظر راندمان و ضایعات پرداخته شده است. و در بخش دوم که مهمترین بخش این پروژه است ابتدا مشخصه های مورد نیاز محرک یک خودروی برقی بیان شده سپس در مورد تمام موتورهایی که تا کنون در خودروهای برقی به کار رفته صحبت شده است و در انتهای بخش کاربرد موتور سنکرون آهنربای دائم را که امروزه مطلوب خودروهای برقی است در خودروهای هیبرید توضیح داده شده است. و در بخش آخر نیز آینده ای هر چند رویایی برای خودروهای برقی ترسیم شده است.



## تاریخچه خودرو برقی

### پیش زمینه مختصر:

در سالهای بعد از 1890 نسبت تعداد وسایل نقلیه برقی (EVs) به خودروهای بنزینی 10 به 1 بوده است. EV ها بر جاده‌ها و نمایشگاه‌های اتومبیل غلبه داشتند. بعضی کمپانی‌های اتومبیل‌سازی مثل oldsmobile و Studebaker عملاً کارشان را به عنوان کمپانی‌های موافق سازنده EV شروع کردند. تنها بعد از ارتباط و آشنایی با وسایل نقلیه محرک بنزینی اولین خودروهای حذف شده منحصراً EVها بودند. در گذشته تولید EVها همانند همه خودروهای دیگر به صورت دستی انجام می‌گرفت. در سال 1910، میزان تولید خودروهای محرک بنزینی به اندازه‌ای رسید که خط تولید ماشینی برای آن به وجود آمد. برداشته شدن این مانع از پروسه ساخت خودروی بنزینی تیر خلاصی بود بر همه سازنده‌های دیگر به جز آنهایی که توان مالی خوبی داشتند و سازنده‌های مستقلی که توان خرید این میزان تجهیزات مونتاژ را نداشتند از بین رفتند. این وضعیت برای خودروهای برقی هم وجود داشت و دیگر این خودروها در خارج از شهرها دیده نمی‌شدند و تردد آنها فقط محدود به سفرهای درون شهری شد، فاکتور دیگری که به کاهش خودروهای برقی کمک کرد اضافه شدن یک موتور الکتریکی به نام استارتر به خودروهای محرک بنزینی بود که سرانجام باعث از بین رفتن نیاز به روش مشکل و خطرناک هندل زدن برای روشن کردن موتورهای بنزینی شد. به واسطه این فاکتورها، با پایان جنگ جهانی اول تولید



خودروهای برقی متوقف شد و وسایل نقلیه برقی منحصر به وسایل نقلیه خدماتی مثل تاکسی‌ها، کامیون‌ها، ون‌های حمل و نقل و چرخ دستی‌های حمل و نقل شدند. در سال‌های بعد از 1960 و تا اوایل 1970 تولیدات جدیدی از EVها وجود داشت که دلایلی مثل آلودگی هوا و توقیف نفت OPEC ایجاد این تولیدات را دیکته کرده بودند. در اوایل سال 1990، چند سازنده مهم اتومبیل به اجبار حکم وسیله نقلیه ضایعات صفر (ZEV) از کالیفرنیا تولید EVها را از سر گرفتند. آن EVها به تعداد بسیار کم و طبعاً همچون گذشته به صورت دستی ساخته شدند، به هر حال بعد از چندین سال ZEV ضعیف شد و سازندگان اتومبیل ساخت EVها را متوقف کردند. Toyota آخرین سازنده مهمی بود که تولید EV را در سال 2003 متوقف کرد.

### مرور تاریخ:

1834: Thomas Davenport خودرو برقی با باتری غیرقابل شارژ را اختراع کرد.  
1859: Gaston Plante باتری‌های قابل شارژ lead-acid (اسید سرب) را اختراع کرد.  
1889: Thomas Edison با به کارگیری باتری‌های nickel-alkaline یک EV ساخت.  
ساخت.

1895: در اولین مسابقه اتومبیل رانی در آمریکا، یک EV برنده شد.

1896: اولین فروشنده خودرو یک فروشنده EVها بود.

1897: اولین وسیله نقلیه با هدایت قدرت یک EV بود. استارترهای سرخود الکتریکی 20

سال قبل از نمایان شدن در خودروهای بنزینی.



1898: سرد و کولاک شدن NYC، تنها EVها قادر به حمل و نقل در جاده‌ها بودند. اولین

زنی که خودرو خرید، یک EV خرید.

1900: مشکل آلودگی زیاد اسب‌ها در NYC - 2/5 میلیون پوند فضولات و

60/000 گالن ادرار اسب‌ها در روز در خیابانها رها می‌شد و هر سال 15000 اسب

مرده از خیابانها جمع می‌شد.

1900: از کل خودروهای تولیدی: 33٪ خودروی بخار، 33٪ EV و 33٪

خودروی بنزینی بود.

1903: اولین نشان سرعت توسط یک EV به دست آمد.

1904: فقط 7٪ از 2 میلیون مایل از جاده‌های آمریکا بهتر از خاکی بود تنها

141 مایل یا کمتر از 1 مایل در 10000 مایل فرش شده بود.

1908: Henry Ford یک EV برای همسرش خرید. افراد اجتماعی زیادی در

آن زمان این لقب تحریک کننده را که «آن هرگز مرا پیاده نمی‌گذارد» به EV دادند.

1910: رسیدن تعداد خودروهای محرک بنزینی تولیدی به حد مونتاژ ماشینی و

کاهش قیمت وسیله نقلیه.

1912: EV 38 842 در جاده. تانکرهای اسبی به جایگاه‌ها بنزین حمل

می‌کردند.

1913: استارتر سرخود برای خودروهای بنزینی (10 سال بعد برای مدل - T).



- 1921: کارهای بزرگراهی فدرال. در سال 1922 تقبل (50٪) هزینه ساخت و تعمیر بزرگراه (برای حمل و نقل پستی) را تصویب کرد (پیش از آن جاده‌ها تنها برای تغذیه راه آهن‌ها ساخته می‌شدند) و اختیار قانونی برای ساخت را صادر کرد.
- 1956: علاقه‌مندی و حمایت سیستم بین‌المللی از بزرگراه‌ها، 90٪ توسط ایالت‌ها و 90٪ توسط دولت فدرال تأمین شد.
- 1957: Sputnik پرتاب شد. برنامه فضایی ایالات متحده باطری پیشرفته R&D را معرفی کرد.
- 1966: رأی‌گیری. 36 میلیون نفر واقعاً به EVها علاقه داشتند. در آن زمان EVها سرعت حداکثر 40 m/h و رنج نامی کمتر از 50 مایل داشتند.
- 1967: Water Laski اتحادیه اتومبیل برقی را تأسیس کرد.
- 1967-1978: کنگره تعدیل بیشتر المانهای مثل آلودگی هوا و تصادفات که در ارتباط با خودروها به وجود می‌آمد و خطری برای سلامتی افراد بود را تصویب کرد.
- 1972: اولین رالی EAA EV سالیانه
- 1974: نخستین ارز اندام citicar در کنفرانس وسایل نقلیه الکتریکی در واشنگتن و DC. در سال 1975 و Vanguard Sebring سازنده Citicar ششمین سازنده بزرگ اتومبیل در ایالات متحده بود.
- 1990: GM تولیدات EV خود را در ابتدا با نام Impact به نمایش گذاشت و بعدها نامش را به EV-1 تغییر داد.





1990: دولت ایالات متحده 194 میلیون دلار صرف تحقیق بر روی راندمان همه

انرژی‌ها نمود. مبلغی کمتر از 1 بلیون دلار برای یک روز طوفان شن یا 1 بلیون

دلار برای یک هفته درگیری در عراق در سال 2003.

1993: GM برآورد کرد که در مدت 3 ماه 5000 نفر از مردم به EV-1

علاقه‌مند شوند که تنها در یک هفته محقق شد.

1995: رنوسانس خودروها و شروع تولید Tropica

1996: EAA به ساخت انکوباتور CALSTART (برای تحقیق EV) در

Alameda کمک کرد.

1997: خودروی گازی - برقی هیبرید Toyota prius در نمایشگاه اتومبیل

توکیو پرده‌برداری شد.

2002: خرده فروشی Toyota RAV4-EV و آنها برآورد کرده بودند 2 سال

طول بکشد ولی 8 ماهه فروش رفت.

2003: انجمن ZEV ضعیف شد و اجازه داده شد اعتبارات ZEV به خودروهای

غیر ZEV برود. فقط 250 خودرو سلول سوختی تا سال 2009 موردنیاز بود.

Toyota تولید RAV4-EV را متوقف کرد و Hondo تجدیدات EV-Plus را

اجاره داد و GM کار مشابهی را برای EV-1 انجام داد.

2003: پیشرفت tzero (AC) بالاترین نمره را در Michelinchalleng

Bidendum کسب کرد و ظرفیت: 300 مایل بر شارژ و 0-60 m/h در 3/6 ثانیه و

100 m/h بالاترین سرعت.



2005: خودروهای چند منظوره Tango – پاییز اخیر بارگیری شدند.

### دربارهٔ EAA:

EAA یک سازمان آموزشی بدون سود است که پیشرفت‌ها و توافقاتی معمول وسایل نقلیه الکتریکی را تشویق می‌کند و نمایش‌های عمومی و رویدادهای وسایل نقلیه الکتریکی را به منظور آموزش عمومی بر پیشرفت و فواید تکنولوژی وسایل نقلیه الکتریکی سازماندهی می‌کند.

## بخش اول: بررسی سیستم تغذیه و شارژ

مقدمه:

امروزه خودروهای الکتریکی مطلقاً عمل کننده با باتری ( $BEV_s$ ) که توسط شرکت های اصلی اتومبیل سازی ساخته شده باشد وجود ندارد. هرچند مدل های مختلفی از خودروهای الکتریکی ( $EV_s$ ) در طول دهه 1990 موجود بودند که به دلیل قیمت بالا هر محدوده پیمایش معین به تعداد زیادی فروخته نمی شدند. روی هم رفته در حدود 5000 خودروی الکتریکی مابین سال های 1990 تا 2003 فروخته یا اجاره داده شده است. جدول زیر خودروی الکتریکی و نمونه بنزین سوزهای خودرو را مقایسه می کند. که وقتی آن دو را مقایسه می کنیم معایب خودروی الکتریکی آشکار می شود.

مشخصه ها	سیستم پیشرانه	
	بنزین	الکتریکی
محدوده پیمایش بدون سوختگیری یا شارژ	336 مایل	126 مایل
حداکثر سرعت بر حسب مایل بر ساعت	109 مایل بر ساعت	79 مایل بر ساعت

زمان شتاب گیری از 0 تا 60 مایل بر ساعت	10/5 ثانیه	18 ثانیه
قیمت	24000 دلار	40000 دلار

جدول (1-1)

برخی از مشخصه های خودرو الکتریکی نظیر: آلاینده کمی کمتر هوا و کاهش هزینه سوخت پذیرفته شده و قابل قبول هست اما خودروهای الکتریکی هیبریدی رایج تر هستند. خودروهای الکتریکی هیبریدی ( $HEV_s$ ) محدوده پیمایش طولانی دارند، قابل تهیه هستند و بازده سوخت بالایی دارند.

اما اگر خودروهای الکتریکی هیبریدی عمومیت یافته اند و خودروهای الکتریکی توقف کرده اند چرا ما می خواهیم خودروهای مطلقاً الکتریکی را مطالبه کنیم؟ در اینجا چهار پاسخ می توان به این سؤال داد:

1. خودروهای هیبریدی دهه 1990 تکنولوژی ای را فراهم کردند که هم اکنون در خودروهای هیبریدی امروزی بکار می رود.
2. تکنولوژی های جدید ممکن است توسعه یابند که خودروهای الکتریکی عمل کننده باطری را در آینده کار بررسی سازند.
3. خودروهای پیل سوختی بر پایه خودروهای الکتریکی عمل کننده با باطری بنا شده اند.
4. تعداد زیادی از خودروهای مطلقاً الکتریکی نظیر: ترن و اتوبوس الکتریکی، جرثقیل الکتریکی و ... امروزه به کار می روند.

خودروهای الکتریکی عمل کننده با باتری از انرژی ذخیره شده در باتری ها برای توان دهی به سیستم انتقال توان یا موتور وسیله نقلیه استفاده می کنند و فاقد خروجی آلاینده هستند اما قادر نیستند مسافت زیادی را بین شارژهای باتری طی کنند.

خودروهای الکتریکی عمل کننده با باتری با امکان تغذیه خودرو در منزل و عدم نیاز به رفتن به ایستگاه سوخت گیری آسایش بیشتری فراهم می کنند. همچنین تعدادی ایستگاه شارژ کنترل از راه دور در چند ایالت آمریکا فراهم شده است. هزینه سوخت گیری آنها بسیار پایین است که نوعاً کمتر از 3 دلار است.

به دلیل محدوده پیمایش معین خودروهای الکتریکی عمل کننده با باتری برای جابه جایی یا سفر در داخل قلمروی محدودی مناسب هستند مطالعات نشان می دهد که 80٪ از سفرها کمتر از 40 مایل در روز است این به خوبی داخل محدوده پیمایش این گونه خودروها قرار دارد.

### باتری ها

**مقدمه** تقریباً در همه ماشین های الکتریکی باتری یک عنصر کلیدی است. در ماشین های الکتریکی کلاسیک باتری فقط ذخیره کننده انرژی و عنصری گران قیمت، سنگین و حجیم است. در ماشین های الکتریکی جدید باتری که باید دائماً انرژی الکتریکی را بگیرد و بدهد، همواره یک عنصر کلیدی بسیار مهم است با این که در ابتدا احتمال می رود که بیشتر ماشین های برقی باتری های کاملاً بزرگی داشته باشند برخی ماشین های پیل سوختی ساخته شده باتری هایی دارند که معمولاً اندازه شان از باتری های خودروهای غیر الکتریکی (بنزین و ... بزرگتر نیست).

به طور مختصر آشنایی کامل با فناوری و کارایی باتری مستلزم آن است که با خودروهای الکتریکی درگیر شده و با آنها کار کرد.

یک باتری الکتریکی چیست؟ یک باتری شامل دو یا چند پیل الکتریکی متصل شده به هم است. پیل ها انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. پیل ها شامل الکترودهای مثبت و منفی هستند که توسط الکترولیت با هم در ارتباط هستند. از واکنش شیمیایی بین الکترودها و الکترولیت برق DC تولید می شود. در مورد شارژ شدن باتری، واکنش شیمیایی باتری می تواند با معکوس شدن جریان، برعکس صورت گیرد و باتری به وضعیت شارژ شدن برگردد.

باتری اسید سرب از انواع باتری هاست که به عنوان نوع قابل شارژ به خوبی شناخته شده است، البته انواع دیگر هم وجود دارد. خودروهای الکتریکی اولیه باتری های قابل شارژی را استفاده می کردند که 25 سال قبل از باتری اسید سرب قابل شارژ اختراع شده بودند که آنها ترکیبی از قطعات بسیار زیادی همراه با الکترولیت به شکل یک باتری بودند. البته در ادامه با انواع باتری، پارامترهای مهمی که در رفتار باتری مؤثرند و شارژهای آن آشنا خواهیم شد.

## پارامترهای باتری

### 1. ولتاژ پیل و باتری:

همه پیل های الکتریکی دارای یک ولتاژ نامی هستند. آنها وقتی که پیل توان الکتریکی را تحویل می دهد ولتاژ نامی تقریبی را می دهند. پیل ها می توانند برای تأمین ولتاژ مورد نیاز کل بصورت سری با یکدیگر متصل شوند. ولتاژ باتری ها برای خودروهای الکتریکی معمولاً

6V یا 12V تعیین می شود و این واحدها با اتصال سری مقادیر مختلفی را بوجود می آورند که تأمین کننده ولتاژ مورد نظر می باشد. این ولتاژها در عمل وقتی از باطری جریان کشیده می شود در حال شارژ شدن است ولتاژ آن افزایش خواهد یافت.

بزرگترین دلیل این تغییرات ولتاژ وجود مقاومت داخلی باطری می باشد که در شکل زیر مدار معادل آن نشان داده شده است. باطری در واقع ولتاژ ثابت  $E$  را ارائه می دهد. اما ولتاژ در ترمینال های آن ( $V$ ) به دلیل افت ولتاژ دو سر مقاومت داخلی  $R$ ، تغییر می کند.

فرض کنید که جریان  $I$  مطابق شکل زیر از باطری خارج می شود پس می توان طبق تئوری جریان گفت که:

(مدل مدارهای ساده شده یک باطری- این باطری ترکیبی از 6 پیل می باشد.) (شکل 1.2 ص 25)

در صورتیکه اگر جریان  $I$  برابر صفر باشد ولتاژ ترمینال برابر  $E$  خواهد بود. بنابراین  $E$  اغلب به عنوان ولتاژ مدار باز می باشد. اگر باطری در حال شارژ شدن باشد پس ولتاژ بوسیله  $IR$  افزایش خواهد یافت. در باطری های خودروی الکتریکی مقاومت باید حداقل امکان کوچک باشد تا ولتاژ ترمینال نسبت به ولتاژ مدار باز اختلاف زیادی نداشته باشد.

بطور کلی معادله ذکر شده در بالا، در استفاده از ولتاژ باطری، معادله پیش بینی شده بسیار خوبی است اما ولتاژ مدار باز  $E$  مقدار واقعاً ثابتی نیست. زیرا ولتاژ همچنین تحت تأثیر وضعیت شارژ وسایل عوامل دیگر همچون حرارت می باشد.

2. ظرفیت شارژ ( یا آمپر ساعت)

شارژ باطری یکی از مشکل ترین پارامترهایی است که یک باطری باید آن را تأمین کند. در سیستم SI واحد آن کولن است که یک کولن برابر باطری جاری شدن یک آمپر در یک ثانیه می باشد. اما این واحد به دلیل کوچک بودن مناسب است. به همین دلیل در عوض از آمپر ساعت استفاده می شود که برابر جاری شدن یک آمپر در یک ساعت می باشد. ظرفیت یک باطری به عنوان مثال این گونه بیان می شود: 10 آمپر ساعت، که این بدان معنی است که این باطری 1 آمپر را برای 10 ساعت یا 2 آمپر را برای 5 ساعت یا بطور تئوری 10 آمپر را برای 1 ساعت می تواند فراهم سازد. اما در عمل بطور ایده آل بیشتر باطری ها به آن اندازه که هستند کار نمی کنند.

معمولاً در مواردی که یک باطری بتواند به فراهم کردن 1 آمپر برای 10 ساعت باشد، اگر از آن 10 آمپر کشیده شود آن کمتر از 1 ساعت دوام خواهد آورد. ظرفیت باطری های بزرگ استفاده شده در خودروهای الکتریکی (کشش باطری) معمولاً حداکثر در 5 ساعت دشارژ می شود. شکل زیر چگونگی ظرفیت تحت تأثیر واقع شده را با توجه به سرعت زیاد یا کم کاهش یافتن شارژ را نشان می دهد. این منحنی برای یک باطری دارای ظرفیت اسمی 100 آمپر ساعت می باشد. نکته این که اگر شارژ در یک ساعت تمام شود ظرفیت قابل ملاحظه آن حداکثر به حدود 70 آمپر ساعت نزول می یابد. از طرف دیگر اگر جریان خیلی آهسته کاهش یابد مثلاً در 20 ساعت ظرفیت به حدود 110 آمپر ساعت صعود می کند که این تغییرات در ظرفیت به دلیل واکنش غیرعادی در طرفین داخل باطری، رخ می دهد. (شکل تغییرات در ظرفیت شارژ 1 آمپر ساعت یک باطری با ظرفیت اسمی 42 آمپر ساعت را نشان می دهد.) (شکل 2.2 ص 26)



ظرفیت یک باتری برحسب آمپر ساعت با حرف C نمایش داده می شود. فرض کنید که یک باتری ظرفیت 42 آمپر ساعت را داراست پس گفته می شود که  $C=42$  Amphours است، حال گفته می شود که این باتری دارای جریان دشارژ  $2c$  یا شارژینگ باطری  $0.4c$  است. در این صورت این به معنای آن است که:

$$\text{جریان دشارژ} = 2c = 2 * 42 = 84 \text{ Amps}$$

$$\text{جریان شارژ} = 0.4c = 0.4 * 42 = 16.8 \text{ Amps}$$

### 3. انرژی ذخیره شده

هدف باتری ذخیره سازی انرژی است. انرژی ذخیره شده در باتری وابسته به ولتاژ آن و شارژ ذخیره شده است. در SI واحد آن ژول است اما واحد ژول کوچک است و بر آن بیان انرژی شده در باتری مناسب نیست بنابراین در عوض از وات ساعت استفاده می کنیم. این انرژی معادل کار با توان 1 وات برای 1 ساعت می باشد و وات ساعت معادل 3600 ژول می باشد. وات ساعت با استفاده ما از آمپر ساعت برای شارژ سازگار است. فرمول ساده آن به شرح زیر است:

$$V \times C = \text{آمپر ساعت یا انرژی} \times \text{ولتاژ} = \text{انرژی در وات ساعت}$$

اما این معادله باید با هوشیاری زیادی استفاده شود. در اینجا نکته این است که ولتاژ باتری V و هم ظرفیت آمپر ساعت C بطور قابل ملاحظه ای با توجه به چگونگی استفاده از باتری تغییر می کنند. اگر جریان افزایش پیدا کند هر دو (یعنی V, C) کاهش می یابند و باتری به سرعت خالی می شود.

معمولاً در دسته بندی آمپر ساعت این گونه بیان می شود که اگر ظرفیت شارژ به اندازه پنج ساعت دشارژ وجود داشته باشد پس بطور منطقی به اندازه این مقدار از سرعت دشارژ، باید انرژی وجود داشته باشد.

#### 4. انرژی ویژه

انرژی ویژه مقدار انرژی الکتریکی ذخیره شده برای هر کیلوگرم از جرم باطری می باشد. واحد آن  $mh.hg^{-1}$  است. همچنین یکی از پارامترهای مهم نظیر ظرفیت انرژی باطری (wh) می تواند با تقسیم بندی بر چگالی انرژی  $(3-mh.m)$ ، حجم باطری مورد نیاز را نشان دهد. اگر حجم باطری آگاهی پیدا کنیم می توان متناوباً حجم  $(m^3)$  را در چگالی انرژی باطری ضرب کرد تا با تقریبی نزدیک از مقدار انرژی الکتریکی موجود مطلع شویم. مقدار باطری می تواند تأثیر قابل توجهی در طراحی ماشین داشته باشد. (شکل 2.3 ص 27)

#### 5. توان ویژه

توان ویژه، مقدار توان فراهم شده بر کیلوگرم می باشد. از آنجایی که توانی که از باطری خارج می شود بیشتر به بار متصل شده به آن وابسته است تا به خود باطری، مقدار توان ویژه قابل تغییر و نسبتاً غیرعادی است. اگرچه باطری ها نیازمند توان ماکزیمم هستند ولی توان ماکزیمم آن زیاد قابل مشهود نیستند زیرا توان ماکزیمم آنها معمولاً بیش از چند ثانیه به کار گرفته نمی شود و استفاده از توان ماکزیمم زیاد طولانی نیست به همین خاطر باطری ها در بازده خیلی کمی کار می کنند. معمولاً واحد آن  $w.hg^{-1}$  است. برخی باطری انرژی ویژه خیلی خوبی دارند اما توان ویژه کمی دارند که این به معنی این است که آنها مقدار زیادی انرژی ذخیره می کنند اما آن را به آرامی و به آهستگی در خروجی می دهند. در این

حالت خودرو الکتریکی می تواند یک مسافت طولانی را (به دلیل داشتن انرژی ویژه زیاد) ولی به آرامی (به دلیل توان ویژه کم) طی کند.

و همچنین برای هر نوع از باتری ها توان ویژه بالا معمولاً انرژی ویژه پایینی را منتج می شود. این به آن دلیل است که ما در قسمت ظرفیت شارژ رسیدیم که انرژی خروجی از یک باتری با سرعت و تندی گرفته می شود. برای مثال در توان بالا، انرژی در دسترس کاهش می یابد. این اختلاف در تغییرات توان ویژه با انرژی ویژه، برای انواع مختلف باتری ها خیلی مهم است و برای مقایسه آنها مفید می باشد. بررسی این اختلاف اغلب با استفاده از منحنی توان ویژه انرژی ویژه صورت می گیرد. در کاربردهای متفاوت، توان کشیده شده از یک باتری می تواند خیلی بزرگ باشد به همین خاطر در این نمودار از مقیاس گلازیتی استفاده شده است. در منحنی بالا که منحنی تغییرات توان ویژه- انرژی ویژه می باشد برای رو باتری نشان داده شده است. که در آنها توان ویژه با کاهش انرژی ویژه، افزایش می یابد. در این مرورها به این نتیجه می رسیم که با چشم پوشی از دیگر عوامل همچون قیمت، باتری nicad اگر چگالی توان مورد نیاز کمتر از  $100w.hg^{-1}$  باشد بهتر عمل می کند و در مقادیر بالاتر تا حدود  $20w.hg^{-1}$  یا بیشتر باتری اسید- سربی مناسب تر است.

## 6. دمای باتری، نیازهای خنک سازی و گرم کردن

با این که بیشتر باتری ها در دمای محیط کار می کنند برخی از آنها در دماهای بالا کار می کنند برای استارت نیاز به گرم شدن دارند و سپس وقتی که در حال استفاده هستند نیاز به سرد شدن دارند. به عبارت دیگر باتری ها در دماهای پایین کارایی ندارند که این حالت مطلوب نیست اما این مشکل می تواند با گرم کردن باتری حل شود. وقتی طراح یک باتری

را برحسب لزوم انتخاب می کند که از دمای باطری ، نیازمندی هایی همچون خنک سازی و گرم کردن باطری آگاهی داشته باشد.

دما واکنش شیمیایی داخل باطری را تحت تأثیر قرار می دهد. برای تمام باطری ها یک گروه دمایی ایده آل وجود دارد. تخلیه و شارژ باطری در خارج از محدوده دمایی ایده آل آن عمر باطری را کاهش می دهد و همچنین توانایی آنرا در تأمین توان کاهش می دهد.

باطری ها گروهی از پیل های الکتروشیمیایی هستند که بصورت سری به هم متصل شده اند تا ولتاژ مورد نیاز کاربرد خاصی را تأمین کنند. مقدار ولتاژ تولید شده بوسیله هر پیل وسیله واکنش الکتروشیمیایی آن تعیین می شود. ولتاژ مدار باز یک پیل الکتروشیمیایی می تواند از انرژی واکنش محاسبه شود:

$$\Delta G = -NFE$$

که در این رابطه:

$$\Delta G = \text{انرژی واکنش برحسب ژول بر مدل}$$

$$N = \text{تعداد معادل هر مدل برای واکنش}$$

$$F = \text{فاراده، } 96500 \text{ کولن بر اکوی والنت}$$

$$E_0 = \text{ولتاژ پیل وقتی غلظت الکتروولیت } 1 \text{ اکوی والنت بر لیتر در حرارت و فشار استاندارد}$$

مقدار آن همچنین از حرارت و غلظت الکتروولیت تأثیر می پذیرد. این رابطه می تواند با استفاده از معادله نرنست نیز محاسبه شود:

$$E = E_0 = RT / NF * \ln([a-][b+]/[gh])$$

$$E = \text{ولتاژ پیل در محدوده حرارتی و غلظت الکتروولیت موجود}$$

$$T = \text{دما برحسب } ^{\circ}K$$

$$R = \text{ثابت گاز ایده آل } 8.3145 \text{ ژول / مدل / } ^{\circ}K$$

$$[a-] = \text{غلظت یون منفی الکترولیت}$$

$$[b+] = \text{غلظت یون مثبت الکترولیت}$$

$$[gh] = \text{غلظت مایع حلال الکترولیت}$$

واکنش پیل و انواع ولتاژ مدار باز برای انواع پیل های مختلف در جدول زیر نشان داده شده است. واکنش دشارژ از چپ به راست و واکنش شارژ از راست به چپ خوانده می شود. در باطری ها، جریان و سرعت واکنش (برحسب گرم بر ثانیه) یکسان هستند. در کلیه کاربردهای باطری ما فرض می کنیم جاری شدن جریان در مدار خارجی به سرعت کامل می شود از طرفی کلیه واکنش های دشارژ خودبه خود صورت می گیرد. در هنگام افزایش نیز نیروی محرکه، سرعت واکنش برای جاری شدن جریان مورد نظر باید به اندازه کافی نیز باشد. تغییر ولتاژ تا اندازه ای وابسته به مقاومت داخلی باطری می باشد. بخشی از تغییرات ولتاژ با جریان رابطه غیرخطی دارد که می توان آن را با رابطه زیر نشان داد.

$$\Delta V = IR + a \log I + b + RT / NF \ln(1 - (I / I_{Limit}))$$

در این رابطه:

$$I_{Limit} = \text{جریان محدوده شده پیل در پایان شارژ یا دشارژ}$$

$$V = \text{ولتاژ}$$

$$a = \text{شیب } \Delta V$$

b= عرض منحنی

شکل زیر باطری 25A از نوع اسید- سرب یک خودرو که در دشارژ می شود را نشان می دهد. باطری 11S دقیقه با حداقل 10.S ولت زیر بار کار می کند. شکل ص 3 pdf  $\Delta V$  باطری طبق شکل تا پایان دشارژ در حال تغییرات است اما با این وجود جریان در تمام طول این آزمایش یکسان است.

افزایش  $\Delta V$  به این دلیل است که واکنش باطری بگونه ای است که جریان را می خواهد در 25A نگه دارد. با حرکت قسمت عمده ای از حامل های یون های سولفات از الکترولیت به آن قسمت از واکنش باقیمانده برای ثابت نگه داشتن جریان،  $\Delta V$  بطور پیوسته باید افزایش یابد. در پایان دشارژ پیل به چگالی جریان محدوده شده می رسد. در مقابل، واکنش های شارژ فعالند زیرا ما ماده فعال (اکتیو) را به حالت پرانرژی، نروپی بیشتر، تبدیل می کنیم. قانون انرژی جنبشی شیمیایی بر آن حالت که سرعت واکنش برای هر دو سمت شارژ و دشارژ یکسان باشد وجود ندارد.

البته همه باطری های مورد استفاده دوباره شارژ نمی شوند ((برای مثال: پیل های خشک و منگنز قلیایی) در بیشتر سیستم های باطری، یک باطری دارای عملکرد دشارژ، با سرعت و  $\Delta V$  یکسان دوباره شارژ نخواهند شد. شکل زیر دوباره شارژ شدن یک باطری از نوع اسید-

سرب تحت اصلاح کنترل جریان ثابت را نشان می دهد. شکل ص 4 pdf

شارژ در یک جریان ثابت از قبل تعیین شده آغاز می شود. وقتی ولتاژ به محدوده از قبل تعیین شده رسید متغیر کنترل شونده از جریان باطری به ولتاژ باطری تغییر می کند در این نقطه تغییرات جریان کاهش می یابد و اندکی به مقدار ثابت و پایدار بطور مجانی نزدیک می

شود. توجه داشته باشید که تغییرات در  $\Delta V$  به همان دلایل قبل در پایان شارژ راکد می شود.

در پیل نوع اسید-سربی و نیکل-هیدروکسید فلزی ولتاژ افزایش می یابد تا وقتی که واکنش بعدی یعنی تجزیه آب (گاز زدگی) شروع شود. ولی در پیل یون لیتیوم افزایش یافتن ولتاژ مجاز نیست، زیرا الکترولیت آن تجزیه می شود. بنابراین در این باطری ها کنترل شارژ در سطح باطری صورت نمی گیرد بلکه در سطح پیل ها صورت می گیرد.

### باطری های دارای تنظیم درجه

وقتی برخی از باطری ها بیش از حد شارژ می شوند آنها با تجزیه آب داخل الکترولیت از خودشان گازی را آزاد می کنند طبق استاندارد باطری ها درجه هایی دارند که هنگامی که باطری ها در اثر اضافه شارژ طغیان می کنند، گاز ایجاد شده از این درجه ها خارج می شود. درجه تنظیم باطری ها که برای اضافه فشارها تعبیه شده است در واقع درجه اطمینان است که به این گاز فقط در محدوده فشار معینی اجازه خارج شدن می دهد (معمولاً -1.5 psig) 7.5 تکنولوژی درجه تنظیم در باطری های نوع اسید-سربی، نیکل-کادمیم و نیکل-هیدروکسید فلزی استفاده شده است. در این سه نوع باطری اکسیژن آزاد شده از الکترولیت مثبت در حالت اضافه شارژ دوباره در الکترود منفی ترکیب می شود. این واکنش دوباره ترکیب شدن اکسیژن باعث دشارژ اندکی در باطری آزاد شده مقدراری هیدروژن از الکترود منفی آن می شود. بنابراین با ادامه یافتن این موضوع و شدت اضافه شارژ شارژ، نیروی حاصله از آن درجه را خواهد گشود.

### مانیتورینگ و کنترل شارژ باطری

کاربردهای جدید استارت- استوپ، درایو الکتریکی هیبرید و کلیه درایوهای الکتریکی نیاز به مانیتورینگ باطری و کنترل شارژ دارند. در 10-15 سال گذشته پیشرفت در این زمینه رشد زیادی داشته است با ادراک معمول ما فقط 4 مشخصه منعکس شده وضعیت باطری را می توانیم اندازه گیری کنیم: ولتاژ جریان، حرارت و زمان، مابقی داده ها مانند توان، انرژی وضعیت شارژ و تابعیت توان از نتایج این اندازه گیری و برخی مدل های طراحی باطری می باشد. روش کنترل شارژ توسط توانایی تحمل باطری هنگام اضافه شارژ تعیین می شود.

بطور کلی در آب شیمیایی باطری هایی مانده: اسید- سربی، نیکل- کادمیم و نیکل- هیدروکسید فلزی در هنگام پذیرفتن اضافه شارژ و اکسید شدن گاز زدگی رخ می دهد. البته باطری لیتیوم- یونی شارژ اضافی را هیچ گاه نمی پذیرد. پیل ها باید کنترل شارژ انفرادی داشته باشند که بوسیله مدار سوئیچینگ در مسیر جریان شارژ پیرامون یک پیل پیش از کامل شدن صورت می گیرد. مانیتورینگ باطری با چندین تکنولوژی مختلف انجام می شود. در روش های سنتی ولتاژ مدار باز و به هم پیوستن جریان- زمان نمایش داده می شود. اما اخیراً روش های گوناگون مبتنی بر امپرانس و گنداکتانس (رسانایی: ضریب هدایت) AC استفاده می شوند که بوسیله آن وضعیت شارژ باطری و حالت سلامت باطری نشان داده می شود. وضعیت شارژ باطری معمولاً برحسب درصدی از کل ظرفیت شارژ باطری که باقیمانده

است بیان می شود:  $soc = \frac{(\quad)}{\quad} \times 100$

حالت سلامت باطری بوسیله روابط ریاضی تعریف نمی شود بلکه مقدار آن وابسته به کیفیت طراحی آن بوده و بصورت عمر باقیمانده باطری و یا زمان جایگزینی مناسب آن بیان می شود. این موضوع نیازمند مدلی از ریاضی است که وابسته به طراحی خاص آن باطری باشد.



اگر باطری جایگزین شده در مقایسه با باطری اصلی دارای طراحی یکسانی نباشد دقت این نرم افزار کاهش می یابد.

در جدول زیر گروهی از باطری های شیمیایی آورده شده است که مشخصات کاربردی آنها و تکنولوژی استفاده شده در کنترل شارژ دوباره آنها نشان داده شده است. هنگامی که شارژ به حالت تکمیل شدن نزدیک می شود جریان شارژ ادامه دارد، ولتاژ پیل ها شروع به افزایش

می کند تا وقتی که ولتاژ باطری توسط شارژ به محدوده مقرر برسد. جدول ص 10

از آنجایی که یک باطری گروهی از پیل های متصل شده بصورت سری می باشد در هر پیل جریان یکسانی دیده می شود اما ولتاژهای پیل ها می تواند متفاوت باشد. بنابراین پیل ها می توانند در زمان های متفاوتی به محدوده ولتاژ مقررشان برسند. در سیستم های آبی (باطری های آبی) این پیل ها گازی را بوسیله تجزیه کردن الکترولیت تولید می کنند که البته پیل های لیتیم- یونی اجازه تولید این گازها را نمی دهند.

### شرایط شارژ باطری

شرایط باطری، از حالت شارژ باطری (در باطری شیمیایی) تعداد پیل های سری شده و حرارت بوجود می آید بطور کلی وقتی یک باطری شارژ می شود یک منبع خارجی دارای انرژی الکتریکی به باطری مورد نظر متصل شده است. وقتی جریان شارژ جاری می شود ولتاژ باطری تا مقدار ولتاژ مدار باز بالا می رود، این موضوع واکنش باطری را مجبور به وارونه شدن می کند. این واکنش، عکس العمل دشارژ را به حالت شارژ شدن آن تبدیل می کند. هر باطری شیمیایی رنج منحصر به فردی برای ولتاژ مدار باز خود دارد که به دمای غلظت الکترولیت و وابسته است. بنابراین مهندس سیستم باطری اگر امکان داشته باشد برای باطری

با پیل های 1 تا 4 ولت، توان مورد نیاز بار و شارژینگ را مطابق با محدوده ولتاژ سیستم تعیین می کنند.

### استانداردهای پایانه باطری :

روابط بین باطری و سایر سیستم های الکتریکی ترمینال باطری است ترمینال باطری آینده آل ویژگی های زیر را دارد:

- مقاومت کم
- همگامی که دما تغییر یا نوسان می کند تغییراتی در آن دیده نشود
- هنگامی تعویض کابل مربوطه، بدون آسیب دیدن بتواند اتصالش قطع شود و دوباره وصل شود.
- پلاریته هایش به سادگی شناسایی شود.

### باطری های آتی خودروهای الکتریکی

سیستم های الکتریکی 12V کنونی در مدت 50 سال به سرعت رشد کردند و در 20 سال گذشته بیشتر ترقی را داشته اند امروز به محدودیتهای کاربردی توان ماکزیمم مورد نیاز در ولتاژ 12V نزدیک شده ایم. توان ماکزیمم در 200-250 آمپر در ولتاژ باس حدود 2.5 تا 3.5 کیلو وات تعریف می شود. در شرکت اروپایی و امریکایی قصد دارند با یکدیگر خودرویی ویژه را بسازند و استاندارد پیشنهادی برای سیستم الکتریکی این خودرو، ولتاژی بالاتر از ولتاژ باس (12V) است. هر دو شرکت ولتاژ نامی برای ولتاژ باس را 42 ولت تعیین کرده اند. این مقدار ولتاژ به این دلیل انتخاب شده است که بدن انسان به راحتی می تواند این ولتاژ را

تحميل کند. وقتی ما این رنج را به ولتاژ اضافه کنیم ریپل و نیاز شارژ باطری در دماهای پایین پوشش داده می شود.

وقتی نیاز بالا شامل بیشترین بار خروجی ذاتی باشد سطح توان و به دنبال آن ولتاژ هم افزایش می یابد. شکل زیر توان پیک تقریبی مورد نیاز را در جریان ماکزیمم 200 تا 300 آمپر در ولتاژهای گوناگون نشان می دهد. (شکل (31.3) ص 7)

محدودیت های جریان برای مهندسین باطری مهم است زیرا آنها می توانند آن را به مدت زمان پاس باطری ترکیب کنند و با آن سایز و وزن پیل های باطری را بطور جداگانه تعیین کنند. به عنوان مثال در یک ولتاژ معین وقتی توان و یا زمان افزایش یابد، سایز باطری هم افزایش می یابد. منحنی های زیر تغییرات نسبی در جرم و حجم باطری اسید-سربی NIMSH و Li-ion را نشان می دهد. از آنجایی که منحنی انرژی برحسب توان نشان می دهد شیب هر نقطه روی منحنی مدت زمان دشارژ است. (شکل (31.4 . 31.5) ص 7)

انرژی ویژه و توان ویژه به انرژی و توان بر واحد جرم ارجاع داده می شود و چگالی انرژی و چگالی توان به انرژی و توان بر واحد حجم ارجاع داده می شود. نسبت بین این دو چگالی باطری را مشخص می کند.

برای مثال:  $\text{watts/hg} \times \text{hg/Liter} = \text{watts/Liter}$

در اینجا  $\text{kg/Liter}$  چگالی ظاهری باطری می باشد.

موقعیت سیستم های گوناگون روی این منحنی بدیهی است که به ترمودینامیک شیمیایی و همچنین مهندسی باطری در کاربردهای مورد نیاز وابسته است. در منحنی ها دیده می شود که انرژی ویژه و چگالی انرژی با افزایش توان کاهش می یابند.

در هر پیل وقتی جریان دشارژ افزایش می یابد تلفات ظرفیت وجود دارد. بطور ایده آل ظرفیت آمپر-ساعت هر پیل با صرف نظر از سرعت دشارژ یا دما یکسان می باشد. حاصلضرب زمان دشارژ جریان دشارژ باید یک مقدار ثابتی باشد. متغیر کلیدی در اینجا

مقدار توان  $n$  می باشد که:  $(I^n)t = c$

$C =$  یک مقدار ثابت

$I =$  جریان دشارژ

$t =$  زمان دشارژ

$n =$  مقداری بزرگتر از یک

فرم لگاریتمی معادله برابر است با:  $n(\log(I)) + \log(t) = c$

وقتی لگاریتمی زمان دشارژ برحسب لگاریتم جریان دشارژ رسم شود  $n$  شیب منحنی می باشد و مقداری منفی و کمتر از  $-1$  است. اگر  $n$  برابر با  $-1$  بود پس ظرفیت باطری برای هر جریان دشارژی یکسان می باشد. برای باطری های اسید-سربی خودرو الکتریکی مقدار  $n$  در رنج  $-1.1$  تا  $-3.1$  در دمای اتاق می باشد. مقدار  $n$  با کاهش دما منفی تر می شود. مقدار  $C$  با کاهش دما نیز کاهش می یابد. برای باطری های ترکیب نیکل-فلز و باطری لیتیوم-

یون رنج  $n$  از  $0.5$  تا  $1.2$  می باشد. (شکل 31.6 ص 8)

## انواع باتری ها

علاوه بر استفاده باتری ها در اتومبیل ها، در کاربردهای بسیار دیگری به کار می روند. به همین دلیل انواع و طرح های بسیار مختلفی از باتری ها فراهم شده اند. بیشتر تولیدکنندگان باتری، باتری ها را به دو گروه مجزا تقسیم می کنند. اولیه و ثانویه. باتری های اولیه، قابل شارژ نمی باشند. این باتری به محض آنکه ضعیف شوند دور انداخته می شوند. باتری های ثانویه، قابل شارژ هستند. تعداد دفعاتی که می توان آنها را مجدداً شارژ کرد اصولاً به مواد شیمیایی به کار رفته در ساختمان آنها بستگی دارد.

باتری ها از نظر اندازه متفاوت هستند، از تک پیل های ساده تا بسته های باتری بزرگ که از پیل های زیادی تشکیل شده اند. آنها همچنین درجه بندی ها (همیشه به اندازه بستگی ندارد) و طول عمر متفاوتی دارند تفاوت اصلی باتری ها در مواد شیمیایی به کار رفته در پیل ها (سلول ها) می باشد.

### باتری های الکتروشیمیایی:

باتری های الکتروشیمیایی را که عموماً همان باتری می نامیم وسیله ای الکتروشیمیایی است که انرژی الکتریکی را هنگام شارژ به انرژی پتانسیل شیمیایی تبدیل می کند و انرژی شیمیایی را هنگام دشارژ به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. یک باتری ترکیبی از چندین پیل به هم پیوسته می باشد. اساساً یک پیل باتری شامل سه عنصر اصلی است: دو الکتروود (مثبت و منفی) غوطه ور در الکتrolیت که در شکل زیر نشان داده شده است.

سازندگان باتری معمولاً باتری را بوسیله ظرفیت آن (آمپر-ساعت) مشخص می کنند. وقتی که باتری دشارژ می شود از حالت شارژ کامل تا وقتی که ولتاژ ترمینال به ولتاژ قطع

می رسد بوسیله تعداد آمپر- ساعت مفید تعریف می شود. که در شکل زیر نشان داده شده است. (ولتاژ قطع یک نوع باتری (شکل 2-10 ص 3 modern)

### راندمان انرژی:

تلفات توان یا انرژی در مدتی که باتری دشارژ یا شارژ می شود به فرم تلفات ولتاژ ظاهر می شود. بنابراین راندمان باتری در هنگام دشارژ یا شارژ می تواند در هر جابجایی از نقطه کار بوسیله نسبت ولتاژ به ولتاژ ترمورینامیکی تعیین شود که داریم:

$$\eta = \frac{7}{70} \quad \text{در هنگام دشارژ}$$

$$\eta = \frac{70}{7} \quad \text{در هنگام شارژ}$$

ولتاژ ترمینال به عنوان تابعی از جریان باتری و انرژی ذخیره شده در آن یا SOC نسبت به پتانسیل الکتریکی تولید شده بوسیله واکنش شیمیایی در حالت دشارژ نزول می کند و در حالت شارژ بالا می رود. شکل زیر راندمان باتری اسید- سربی را هنگام دشارژ و شارژ نشان می دهد. باتری ماگزیمم راندمان دشارژ را در SOC ماگزیمم و ماگزیمم راندمان شارژ را در SOC مینیمم دارد.

راندمان سیکل خالص در رنج متوسط SOC ماگزیمم است.

بنابراین و احد کنترل عملیات باتری یک EV (خودرو الکتریکی) باید بوسیله SOC باتری در رنج متوسط کنترل شود تا راندمان کار بالا برود و افزایش دمای حاصل از تلفات انرژی کاهش یابد.

افزایش دما به باتری آسیب می رساند. (شکل 7-10 ص 11 moder)

باتری های HE,HEV مناسب سالم باطری اسید- سربی، باطری با پایه نیکل مانند باطری های نیکل / آهن، نیکل / کادمیم و نیکل- هیدروکسید فلزی و باطری با پایه لیتیوم مانند باطری های پلیمر لیتیوم و یون لیتیوم می باشد.

در نگاه اول به نظر می رسد که باطری های اسید- سربی هنوز به علت مزایای زیادشان پرکاربردترین نوع باطری ها هستند. اگرچه در نگاه دورتر و در آینده، به نظر می رسد که باطری های با پایه لیتیوم و کادمیم کاندیدای اصلی برای استفاده در EV ها و HEV ها هستند. وضعیت سیستم انواع باطری در کاربردهای خودروهای الکتریکی در جدول زیر آمده است. (جدول 10.2 ص 10)

### باتری های اسید- سربی

باتری های اسید- سربی در سده گذشته محصول تجاری موفق بوده اند و هنوز بطور وسیعی به عنوان ذخیره کننده انرژی الکتریکی در عرصه خودروهای الکتریکی و سایر زمینه ها استفاده می شوند از مزایای آن قیمت پایین، تکنولوژی کامل شده، توان نسبی بالا و سیکل مناسب می باشد. این مزایا در کاربردهای EV ها در جایی که توان بالا مورد نظر است جالب توجه هستند.

مواد مورد استفاده (سرب، اکسید سرب، اسید سولفوریک) در این باطری ها وقتی با مدل مشابه پیشرفته خود مقایسه می شوند دارای هزینه های کمتری هستند.

باتری های اسید- سربی معایبی را نیز دارند. چگالی انرژی باطری های اسید- سربی کم است و این بیشتر به دلیل جرم مولکولی زیاد سرب می باشد و دارای مشخصه حرارتی نامناسبی هستند. در دماهای پایین تر از  $10^{\circ}C$  توان معین و انرژی معین آن به شدت

کاهش می یابد. این وضعیت نامناسب کاربرد باطری های اسید- سربی را در خودرو الکتریکی در آب و هوای سرد به شدت محدود می کند. وجود اسید سولفوریک با خوردگی بالا عامل مخاطره آمیزی برای سرنشین خودرو می باشد. هیدروژن آزاد شده بوسیله واکنش دشارژ عامل خطرناک دیگری است، از آن جایی که این گاز حتی در غلظت های کم به شدت قابل اشتغال است همچنین انتشار هیدروژن در باطری های مهروموم شده بدون منفذ مشکل بزرگی است.

باطری های اسید- سربی پیشرفته در جهت جبران این معایب توسعه یافته اند. انرژی معین آن بواسطه کاهش مواد غیرفعال مانند اندود، جریان کلکتور، تفکیک کننده، ... افزایش یافته است. عمر آن حدود 50٪ بیشتر شده است در حالی که هزینه های آن کاهش یافته است. سلامت باطری بهبود یافته و فرایند الکتروشیمیایی در جذب پارازیت های آزاد شده همچون هیدروژن و اکسیژن طراحی شده است. در جدول زیر پارامترهای باطری نامی برای باطری اسید- سربی آمده است. (جدول 1.2 ص 44 other)

البته واکنش های مربوط در هنگام دشارژ باطری اسید- سربی در بولک زیر آمده است. نکته اینکه در هنگام دشارژ الکترولیت، اسید سلفوریک را از دست می دهد و آب آن افزایش می یابد. و در هنگام شارژ الکترولیت غلظت اسید سلفوریک را افزایش می دهد.

(شکل 2.4 ص 44 other : واکنش های باطری اسید- سربی در هنگام دشارژ و شارژ )

در اینجا این نکته نیز وجود دارد که واکنش های دشارژ و شارژ غلظت الکترولیت داخل پیل ها را تغییر می دهند. تغییر غلظت الکترولیت به معنای آن است که تغییرات کوچکی در



ولتاژ تولید شده بوسیله پیل ها بوجود می آید. این کاهش ولتاژ در شکل زیر نشان داده شده است. (شکل 2.6 ص 46 other)

### - باتری های پایه - نیکل

نیکل یک فلز سبک تر از سرب است و دارای مشخصه الکتروشیمیایی خیلی خوبی می باشد. چهار گزینه تکنولوژی برای باتری های پایه - نیکل وجود دارد: نیکل - آهن، نیکل - روی، نیکل - کادمیم و نیکل - هیدروکسید فلزی.

#### • سیستم نیکل - آهن

سیستم نیکل - آهن در سال های اولیه قرن بیستم جنبه تجاری داشتند، کاربردهای آن شامل: جرثقیل، لوکوموتیو معدن، خازنهای شاتل (ترنی که در مسیر معین رفت و آمد می کند)، لوکوموتیوهای وابسته به راه آهن و ... می باشد. این سیستم شامل الکتروود مثبت هیدروکسید نیکل (NIOOH) و الکتروود منفی فلز می باشد. الکتروولیت محصول تغلیظ (متمرکز) هیدروکسید پتاسیم (نوعاً 240g/l) و دارای هیدروکسید لیتیم (50g/l) می باشد. واکنش پیل در جدول زیر آمده است و ولتاژ مدار باز نامی پیل 1.37v می باشد.

(جدول 10-1 ص 8 modern)

باتری های نیکل - آهن مشکلاتی همچون فشار گاز، خوردگی و حالت درشارژ را می تواند تحمل کند این مشکلات تا اندازه ای یا بطور کامل در نمونه اصلی رفع شده اند و در حال رسیدن به بازارهای تجاری هستند. این باتری ها به علت نیاز به نگهداری سطح آب در یک سطح معین و دسترسی هیدروژن و اکسیژن آزاد شده به حالت ایمن هنگام فرایند دشارژ پیچیده هستند. باتری های نیکل - آهن همچنین دماهای پایین را حتی کمتر از دمای

فرایند باطری های اسید- سربی را می توانند تحمل کنند. سرانجام اینکه قیمت نیکل بطور قابل توجهی از هزینه سرب بیشتر است.

بزرگترین مزیت آنها چگالی توان بالا نسبت به باطری های اسید- سربی است.

### • سیستم نیکل - کادمیم

سیستم نیکل - کادمیم از الکتروود مثبت و الکتروولیت مشابه به سیستم نیکل - آهن در ترکیب با الکتروود منفی از جنس فلز کادمیم استفاده می کند. واکنش پیل در جدول بالا شرح داده شده است و التاژ مدار باز نامی پیل 1.3v است. پیشرفت این باطری ها بطور همزمان با باطری های آهن - نیکل اتفاق افتاده است و آنها کارایی مشابهی دارند.

در تکنولوژی نیکل کادمیم پیشرفت فنی عظیمی مشاهده می شود: به دلیل داشتن مزایایی همچون توان ویژه مناسب، عمر چرخه بالا، کلرانس الکتریکی و عمر مکانیکی بالا، افت ولتاژ کم در مقابل رنج وسیعی از جریان دشارژ، توانایی شارژ سریع، دمای کار وسیع، سرعت کم برای حالت دشارژ، ذخیره سازی درازمدت عالی به علت خوردگی ناچیز آن و قابلیت طراحی در سایزهای گوناگون. اما باطری نیکل - کادمیم دارای معایبی نیز می باشد که شامل: قیمت اولیه بالا، ولتاژ پیل نسبتاً کم و مخاطرات محیطی و سرطان زا بودن کادمیم. البته در جدول زیر پارامترهای باطری نامی مربوط به باطری نیکل - کادمیم آمده است. (جدول 2-2 ص 50 other)

واکنش های مربوط در هنگام دشارژ باطری نیکل - کادمیم در بلوک زیر آمده است. البته واکنش مربوط در هنگام شارژ معکوس بلوک دشارژ می باشد. (شکل 7-2 ص 49 other)

در سمت منفی، ولتاژ عمل کننده هر پیل فقط در حدود 1.2 ولت است بنابراین 10 پیل معمولاً برای یک باطری 12v نیاز است در حالی که در باطری اسید-سربی تقریباً 6 پیل برای یک باطری 12 ولت نیاز است. افزایش پیل ها موجب بالا رفتن قیمت این نوع باطری می شود مشکل بعدی این است که قیمت کادمیم هم چندین برابر سرب است.

### • باطری نیکل - هیدروکسید فلزی (Ni-MH)

باطری نیکل-هیدروکسید فلزی از سال 1992 وارد بازارهای تجاری شدند. ویژگی های آنها مشابه باطری های نیکل-کادمیم است. تفاوت عمده میان آنها استفاده از هیدروژن جذب شده در هیدروکسید فلز برای ماده الکتروود منفی فعال در فضای کادمیم می باشد. به دلیل انرژی ویژه بالا و رسم آزاد شده از Ni-cd (یا سرطان زایی آن) وقتی با Ni-cd مقایسه می شود باطری Ni-MH جانشین مناسبی برای باطری های Ni-cd است.

روی هم رفته واکنش مربوط در هنگام دشارژ مربوط به پیل نیکل-هیدروکسید فلزی در شکل زیر آورده شده است. در حالی که واکنش هنگام شارژ معکوس این واکنش است.

(شکل 2.8 ص 52 other)

وقتی باطری دشارژ می شود هیدروکسید فلزی در الکتروود منفی به شکل آلیاژ فلزی، اکسید می شود. در حال حاضر تکنولوژی باطری Ni-MH دارای ولتاژ نامی 1.2v است و به انرژی ویژه 65 mh/ng و توان ویژه 200 w/ng دست یافته است. از آنجایی که باطری های Ni-MH هنوز در حال توسعه یافتن هستند، مزایای تکنولوژی فعلی آنها بطور مختصر در زیر

آمده است:

ماکزیمم انرژی ویژه (95 wh/ng تا 70) و ماکزیمم توان ویژه (300 wh/ng تا 20) را دارا هستند. سازگار با محیط زیست اند (کادمیم آزاد): منحنی دشارژ مسطح (افت ولتاژ کوچکتر) و قابلیت شارژ سریع.

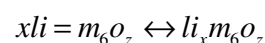
با این وجود این باتری ها دارای قیمت اولیه بالایی هستند. همچنین ممکن است شارژ آنها همراه با حرارت زایی باشد. در جدول زیر پارامترهای باتری نامی مربوط به باتری نیکل-هیدروکسید فلزی آمده است.

(جدول 2.3 ص 52 other)

همانطور که اشاره شد شارژ این نوع باتری همراه با حرارت زایی است که نیاز به یک سیستم خنک کننده دارند به همین دلیل در نوع تجاری این باتری برای سیستم خنک کنندگی از فن هایی که در بالای باتری قرار دارند استفاده شده است. که نمونه ای از آن را در شکل زیر مشاهده می کنید. (شکل 2.9 ص 40 other)

### • باتری های پایه لیتیومی

لیتیوم سبکتر از همه فلزات است و در حال حاضر از نقطه نظر دیدگاه الکتروشیمیایی دارای پربهره ترین مشخصه است. مسلماً آن ولتاژ ترمودینامیکی خیل زیادی را که ناشی از انرژی ویژه و توان ویژه خیلی بالای آن است را بوجود می آورد. دو فن عمده برای باتری های پایه لیتیومی وجود دارد: در آن از الکترولیت پلیمر جامد سبک (SPE) استفاده می شود که پیشرفت در ایمنی و انعطاف پذیری در طراحی را عرضه می کند. بطور کلی واکنش الکتروشیمیایی آن بصورت زیر است:

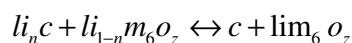


این باطری ها در نوع لیتیوم- پلیمر و لیتیوم- یون ساخته می شوند که در ادامه به توضیح آنها پرداخته شده است.

### • باطری لیتیوم- یون (Li-Ion)

در باطری Li-Ion از جسم کربن شده نرم به جای فلز لیتیوم برای الکتروود منفی و فلز اکسید شده نرم برای الکتروود مثبت و از یک محلول آبی مایع یا یک پلیمر جامد برای الکتروولیت استفاده شده است. یون لیتیوم در میان الکتروولیت بین الکتروود مثبت و منفی در طی شارژ و دشارژ نوسان می کند.

بطور کلی واکنش الکتروولیتی آن بصورت زیر است:



الکتروودها در نمک لیتیوم فرو برده می شوند زیاد گرم شدن این پیل ها ممکن است در پیل ها لیتیوم خالص تولید کند. این فلز بسیار واکنش پذیر بوده و می تواند به هنگام گرم شدن منفجر گردد. برای جلوگیری از زیاد گرم شدن، پیل های لیتیوم- یون، وسایل الکترونیکی حفاظتی و فیوزهایی دارند، تا از معکوس شدن پلاریته و زیاد شارژ شدنشان جلوگیری گردد. باطریهای لیتیوم- یون، نسبت های توان به وزن (توان ویژه) بسیای خوبی دارند. این باطری در ولتاژ نامی، AV حداقل، کار می کنند و دارای انرژی ویژه حداکثر 100wh/hg و چگالی انرژی 180wh/l و توان ویژه 300w/hg می باشند. که در جدول زیر پارامترهای باطری نامی مربوط به باطری لیتیوم- یون آمده است.

(جدول 6-2 ص 58 other)

### • باطری لیتیوم- پلیمر Li-p

باتری لیتیوم- پلیمر تقریباً همانند باتری لیتیوم- یون می باشد. در حقیقت آن از طرح لیتیوم- یون استنباط شده است. شبیه لیتیوم- یون، الکترودها از کربن (گرافیت) و کسید فلز ساخته شده اند. هرچند، الکترولیت نمک لیتیوم، بیشتر از همچون یک مایع، در پلیمری شبیه پلاستیک جامد نازک، نگه داشته می شود. الکترولیت پلیمر جامد قابل اشتغال نیست بنابراین اگر این باتری آسیب ببیند زیان کمتری دارند، این باتری ها می توانند متناسب با کاربردشان شکل گرفته و انرژی بسیار بیشتری را نسبت به باتری اسید- سربی ذخیره کنند. این باتری ها در ولتاژ نامی 3v کار می کنند و دارای انرژی ویژه 155 wh/hg و توان ویژه 345 w/hg می باشند و دارای مزایایی: سرعت دشارژ بسیار کم (در حدود 6.5% در هر ماه)، قابلیت ساخت در شکل ها و اندازه های مختلف و طراحی ایمن (کاهش یافتن کنش روی لیتیوم با الکترولیت جامد)

اما آنها دارای یک ایراد هستند: در دمای پایین به علت وابستگی قابلیت هدایت یونی به دما، دارای کارایی نسبی کمی هستند.

#### • باتری های پایه سدیم:

در سال 1980 باتری هایی که در از الکتروود منفی سدیم مایع استفاده می کردند توسعه یافتند این باتری ها متفاوت با سایر باتری ها در دماهای بالا کار می کنند. همچنین از خصوصیت آنها استفاده از یک یا چند الکتروود مایع به فرم سدیم ذوب شده و استفاده از یک الکترولیت جامد می باشد. به همین دلیل آنها نیازمند عمل کردن در دماهای بالا هستند و فقط در سیستمهای بزرگ همچون اتومبیل الکتریکی کاربرد دارند و برای سیستمهای کوچک مناسب نیستند. این باتری در مقایسه با انواع باتری ها نسبتاً عجیب هستند و هرگز

در موبایل ها و لب تاپ ها استفاده نمی شوند، در حالی سایر باتری های توضیح داده شده در این فصل در موبایل ها و یا لب تاپ ها ممکن است استفاده شوند. این محدودیت در عرضه این باتریها به بازار تا محدودی ممانعت توسعه تجاری ایجاد کرده است. این باتری ها در دو نوع باتری سولفور سدیم و باتری سدیم کلراید فلز ساخته می شوند.

### • باتری سلفور سدیم

توسعه این باتری ها در سال 1970 آغاز شد و آنها در دمایی بین  $300^{\circ}C$  تا  $350^{\circ}C$  کار می کنند. برای نگهداری حرارت این باتری ها، پیل ها در یک جعبه خلاء شده قرار می گیرند. پیل های سلفور سدیم اصلی انرژی ویژه بالایی، شش برابر باتری های اسید- سر بی دارند. مشخصات کلی این باتری در جدول زیر داده شده است. به دلیل نیاز به عایق حرارتی خوب، ساخت باتری های کوچک غیر عملی است. (جدول 2.4 ص 55 other)

گرم کردن و خنک کردن باتری نیازمند دقت زیادی در طراحی و مدیریت می باشد. اگرچه باتری سلفور سدیم نوید قابل توجهی دارد اما در مرور ایمنی دو ماده، واکنش پذیر، که بوسیله تیوب سرامیکی شکننده ای تفکیک شده اند نگرانی وجود دارد زیرا ممکن است این تیوب شکسته شود و دو ماده با یکدیگر واکنش داده و موجب آتش سوزی شود و این نگرانی بی اختیار به دلیل اشتغال خود به خودی تست خودروی الکتریکی آزمایشی بالاتر رفته است و به همین دلیل این باتری ها در بازارهای تجاری ظاهر نشده اند.

### • باتری سدیم کلراید فلز (زبرا)

باتری سدیم کلراید فلز خیلی شبیه به باتری سلفور سدیم است و دارای مزایای زیادی می باشد. هرچند اینکه نگرانی های ایمنی هم پیوند با باتری سلفور سدیم در این باتری بر

طرف شده است. دلیل اصلی برای ایمنی بیشتر پیل های زبرا (سدیم کلراید فلز) استفاده از الکترولیت مثبت جامد است که از فلز سدیم ذوب شده بوسیله الکترولیت جامد و مایع جدا شده است. پیل زبرا از کلراید نیکل جامد برای الکتروود مثبت و از سدیم ذوب شده برای الکتروود منفی استفاده می کند.

واکنش در هر الکتروود هنگام دشارژ پیل در شکل زیر نشان داده شده است. این واکنش یک ولتاژ مدار باز در حدود 2.5 ولت برای هر پیل را فراهم می کند. (شکل 10-2 ص 56 other)

در مرحله آخر دشارژ واکنش پیچیده تر می شود، یون های آلومینیوم بواسطه الکترولیت گیرانداخته می شوند و در نتیجه ولتاژ کاهش می یابد. به واقع خصوصیت بد این نوع باطری این است که ولتاژ پیل هنگام دشارژ از محدوده 2.5 ولت به حدود 1.5 ولت سقوط می کند. مقاومت داخلی پیل همچنین تحت تأثیر ولتاژ خروجی افزایش می یابد. در جدول زیر پارامترهای باطری نامی در رابطه با باطری سدیم کلراید فلز نشان داده شده است.

(جدول 2.5 ص 56 other)

مشکل عمده در باطری زبرا این است که مشابه باطری سلفور سدیم نیازمند کادر دمای حدود  $320^{\circ}C$  است. عایق حرارتی بوسیله استفاده از جعبه فولادی ضد زنگ دو جداره فراهم می شود که یک عایق 2-3 سانتی متری بین دو جداره قرار می گیرد. هوای بین دو جداره وکیوم می شود.

## فراخازن های خودروهای هیبریدی Hybrid Super Capacitors



فراخازن‌ها انرژی مخصوص بالاتری دارند و نوع قویتری از خازن‌های الکترولیتی هستند که انرژی را به عنوان شارژ الکتریسته ساکن ذخیره می‌کنند. فراخازن‌ها سیستم‌های الکتروشیمیایی هستند که انرژی را در لایه‌ای از مایع قطبیده شده در سطح مشترک مابین یک الکترولیت رسانای یونی و یک الکتروود رسانا ذخیره می‌کنند. ظرفیت ذخیره انرژی با افزایش مساحت سطح مشترک افزایش می‌یابد. فراخازن‌ها به عنوان اولین ابزار برای کمک به توان موتور در شتاب‌گیری و سر‌بالایی رفتن هستند که به هملن خوبی بازیافت انرژی ترمزگسترش پیدا کرده‌اند فراخازن‌ها به صورت بالقوه به عنوان دومین شیوه ذخیره انرژی در خودروهایی هیبریدی، برای تامین توان بار گذاری باتری‌های شیمیایی سودمندند. الکتروسیسته اضافی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ در مواقعی که چگالی انرژی پایین است مورد نیاز است.

### شارژینگ و شارژرها:

شارژ کردن: شارژ باطری برگرداندن ماهیت شیمیایی باطری است با انجام این کار واکنش شیمیایی در داخل باطری رخ می‌دهد. شارژ در پیل‌های الکتریکی شیمیایی با جریان کمی بیشتر از جریان الکتریکی حاصله انجام می‌شود. دشارژ امکان خروج جریان الکتریکی پیل را فراهم می‌کند. برای درک پروسه شارژ به خاطر داشته باشید که جریان الکتریکی از یک پتانسیل بالا (ولتاژ) به پتانسیل پایین تر جاری می‌شود. اگر جریان اعمالی به باطری بیشتر از جریان باطری جریان می‌تواند به داخل باطری جای شود. این بدان معناست که برای شارژ باطری ولتاژ باید بیشتر از ولتاژ آن باطری باشد.

هر نوع باتری شرایط شارژ مخصوص به خودش را دارد. بسیار مهم است که فرایند صحیح را برای شارژ کردن باتری دنبال کنیم. همچنین بسیار مهم است که از گرم شدن زیاد باتری در طول شارژ کردن جلوگیری شود و از نوع مناسبی از شارژر استفاده گردد، که این موضوع با توجه به نوع باتری متفاوت می گردد. استفاده از شارژر نامناسب می تواند باعث خرابی باتری ها یا شارژر گردد.

**شارژرها:** شارژرهای باتری طوری طراحی شده اند تا ولتاژ ثابت، جریان ثابت یا ترکیبی از هر دو ولتاژ باتری تغییر می کند. وقتی اختلاف پتانسیل مابین ولتاژ شارژ و ولتاژ باتری زیاد باشد، جریان زیاد است وقتی باتری شارژ شود ولتاژش افزایش می یابد و جریان شارژ افت می کند. یک شارژر جریان ثابت، ولتاژ اعمالی به باتری را تغییر می دهد تا جریان را ثابت نگه دارد.

هر دوی این تکنیک ها تا زمانی که دمای باتری حفظ شود، خوب کار می کنند برخی شارژرها زمانسنجی دارند تا دمای باتری را پایش کند. این شارژرها در پاسخ به افزایش دما، ولتاژ و یا جریان را کاهش می دهند. بسیاری از شارژرهای باتری، هوشمند هستند. این شارژرها طراحی شده اند تا باتری را در سه مرحله اصلی شارژ نمایند: حجم (BULK)، جذب (9/Adsorption) و شناور (Float). در طول شارژ حجمی، تا زمانی که ولتاژ تقریباً به 80٪ از ظرفیتش برسد، جریان با حداکثر میزان ایمنی به باتری ارسال می شود. به محض آنکه باتری به آن سطح از ولتاژ رسید، شارژر مرحله جذب را آغاز می کند. در طول این زمان، ولتاژ شارژ ثابت نگه داشته می شود. در صورتیکه جریان متناسب با ولتاژ باتری تغییر می کند. به محض اینکه باتری کاملاً شارژ شد، شارژر به مرحله شناوری سوئیچ می



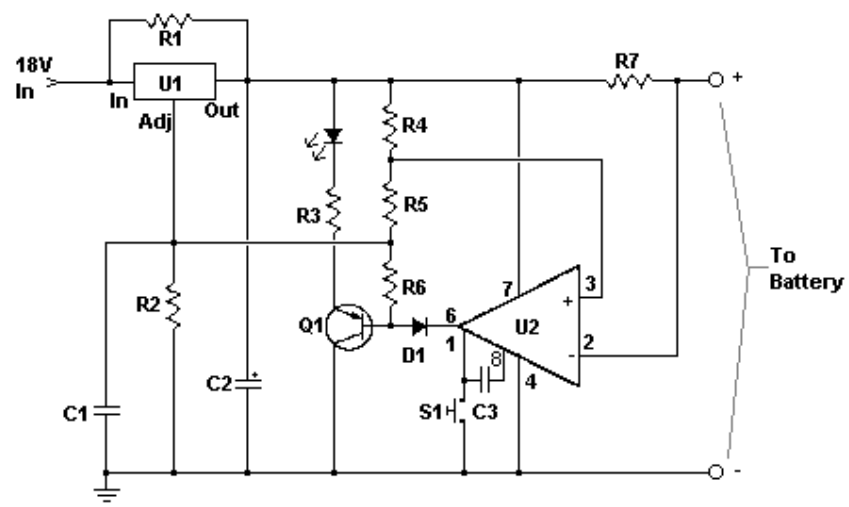
شود. در طول این مرحله شارژر ولتاژ ثابتی، برابر با کمی بیشتر از ولتاژ باطری را اعمال می کند. جریان الکتریکی بسیار پایین است. این مرحله یک شارژ حمایتی است، و مورد انتظار است که باطری را تا زمانی که از آن استفاده نشده است، شارژ نگه دارد.

همچنین شارژرها می توانند طوری طراحی گردند تا ولتاژ و جریان را بر اساس نیاز خودرو و اغلب نیاز مصرف کننده عرضه نمایند. شارژ سریع، به سرعت باطری را شارژ می نماید. این روش شارژ مقدار زیادی از ولتاژ و جریان را عرضه می نمایند. اگرچه این روش باطری را به سرعت شارژ می کند، اما در صورتیکه باطری به دقت پایش نشود ممکن است آن را زیاد گرم کند. این تفکیک زمانی خوب است به کار گرفته شود که باطری شارژ کمی دارد، و برای زمان کمی بر روی خودرو نصب خواهد شد. شارژ کند یا آهسته، جریان کمی را به باطری ار سال می کند و برای شارژ کامل باطری قدری زمان را به خود اختصاص می دهد. هرچند غیر محتمل است که باطری زیاد گرم شود، و امکان خوبی برای شارژ کامل باطری فراهم می شود مواد شیمیایی به کار رفته در ساختمان باطری باید همیشه قبل از شارژ سریع یا کند باطری، بازرسی شوند.

یک مدار عملی جهت شارژ باتری اسیدی:

این شارژر هر باتری اسیدی را به سرعت و آسانی شارژ خواهد کرد. شارژر جریان زیادی را در باتری رها می کند تا زمانیکه جریان باتری به مقدار ۱۵۰ میلی آمپر می رسد. در این موقع ولتاژ کم می شود تا از شارژ زیاد باتری جلوگیری شود. وقتی شارژ باتری کامل می شود مدار خاموش شده و یک LED را روشن می کند و نشان دهنده پایان سیکل است.

شماتیک مدار:



تحقیق در مورد فعالیتهای انجام شده و روشهای آینده انتقال انرژی

## بی سیم از طریق Microwave

### خودرو برقی و آینده

بدون شک در چند دهه آینده با به اوج رسیدن بحران انرژی یکی از کارگشایترین راه حلها در رابطه با مسئله حمل و نقل استفاده از خودروهای برقی است. ولی آیا با وجود همه خصوصیات مفید و منحصر به فرد خودروی برقی این خودروها می توانند با استفاده از باتری و سلولهای خورشیدی و هر وسیله کمکی دیگر با خودروهای بنزینی پیشرفته امروزی رقابت کنند؟ آیا سرعت و قدرت این خودروها با استفاده از باتری می تواند اشتباهی سرعت بشر امروز را ارضاء کند؟

پاسخ دادن به سوالات فوق خارج از حیطه دانش اینجانب می باشد. ولی در صورتیکه پاسخ این سوالات منفی باشد میتوان به تغذیه بی سیم خودروهای برقی در آینده دور فکر کرد. که در اینصورت تاکنون تنها راه عملی البته به قیمتی گزاف "انتقال انرژی بی سیم از طریق Microwave" است. با توجه به اینکه در گذشته یک هلی کوپتر و یک هواپیما از این طریق تغذیه شده اند. از این رودر این فصل مقاله ای با همین عنوان آورده شده است.

تحقیق در مورد فعالیتهای انجام شده و روشهای آینده انتقال انرژی

## بی سیم از طریق Microwave

### چکیده



در قرن بیستم کاربرد رادیو برای ارتباطات یک تکنولوژی کلیدی بود. هر چند رادیو همچنین می‌تواند برای اهداف دیگری مثل رفاه بشر استفاده شود، به منظور نیاز به منبع انرژی در 50 سال آینده، نیروگاه‌های خورشیدی فضایی (SPS) می‌تواند به حل مشکل فوق (فراهم کردن انرژی) کمک کند.

انتقال قدرت بی‌سیم با مایکروویو (MPT) یک تکنیک امیدبخش برای تغذیه انرژی بلندمدت برای جاهایی که کشیدن خطوط انتقال برق به آنها مشکل است، می‌باشد. این تکنولوژی در سال 1960 توسط W.C.Brawn پیشنهاد شده است در سال 1968 ایده اولیه SPS توسط P.E.Ceaser پیشنهاد شده. در این مقاله مروری بر فعالیتهای تحقیق و روند حرکتی آینده تکنولوژی (MPT) و شرح کاربردهای آن می‌باشد.

#### مقدمه

انتقال میزان زیاد انرژی الکتریکی یکی از کاربردهای مهم مایکروویو در آینده است، که تاکنون به صورت خیلی عمومی و مردم پسند به اثبات نرسیده است. در سال 1900 نیکلاتسلا، یک مخترع و دانشمند در هماسیگی ما، استفاده از امواج رادیویی برای انتقال انرژی را به جای استفاده از خطوط انتقال فشار قوی پیشنهاد کرد. نیکلاتسلا در Smiljan، دهکده‌ای در منطقه کوهستانی Balkan Peninsula که زمانی قسمتی از مرز نظامی مشهور به Lika در حاشیه کشور Austro-Hungary بود متولد شده است. در صفحه 193 (کتاب) نابغه و لخرج نوشته J.J.AONEILL داستانی از آزمایش سیستم انتقال انرژی بی‌سیم تسلا با روشن

کردن 200 لامپ رشته‌آی در فاصله 26 مایلی زمین با انرژی الکتریکی ذخیره شده نقل شده است.

با اینکه به نظر می‌رسد چنین کار برجسته‌ای ممکن است. مستندات از نوشته‌های تأیید شده خود تسلا به عنوان مدرک عملی و واقعی موجود نیست. در سال 1899 نیکلاتسلا انتقال قدرت بی‌سیم را در کلرادو پیشنهاد داد اوم گفت انرژی می‌تواند در سراتاسر زمین (در میزان کم بهتر) جمع شود (در رنج 1 تا چند اسب بخار بعدها در سال 1930 مهندسان و دانشمندان نظریه ابتکاری تسلا در انتقال قدرت از طریق امواج رادیویی را به کار بردند. اما به جای استفاده از فرکانس کم به استفاده از Micro-wave beams فکر کردند. افراد علاقه‌مند به انتقال انرژی بی‌سیم انتظار داشتند که یک دستگاه مایکروویو پر قدرت که انرژی مغناطیسی با طول موج کی تا 0 قابل قبول تولید کند اختراع شود. پس از اینکه تمرکز مناسب در جهت دریافت انرژی شدیداً ماکول به استفاده از تکنولوژی Narrow Beam formation به وسیله آنتن‌های سائز کوچک شد. جنگ جهانی دوم توانایی تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مایکروویو را به کارگیری یک Magnetron و یک Klystron را ایجاد کرد. پس از جنگ جهانی دوم فرستنده‌های مایکروویو قدرت بالا به اندازه کافی برای فرستادن انرژی و به فاصله‌های یک مایل یا بیشتر مناسب شدند. تاریخچه پادگان جنگ که به تحقیق درباره انتقال قدرت از فضای آزاد پرداخته توسط Willianc.Brown مستند شده است.

وی یکی از پیشگامان انتقال قدرت مایکروویو به صورت عملی بود. او اولین کسی بود که در سال 1964 با به کارگیری فرکانس 2.45GHZ در رنج فرکانس 2.4-2.5GHZ که مختص کاربردهای صنعتی، علمی و دارویی (ISM) از امواج رادیویی است موفق به شرح ساخت یک هلی-وپتر تغذیه شده با مایکروویو شد. یک دستگاه تبدیل انرژی از مایکروویو به D.C به نام rectenna، اختراع شد و برای هلی کوپتر تغذیه شده با مایکروویو به کار رفت. در سال 1963 اولین rectema با برآورد راندمان 40٪ و خروجی در دانشگاه perdue ساخته و آزمایش شد در سال 1975 راندمان 84٪ تبدیل مایکروویو به D.C در JPL Goed ston Facility در اثباتی از WPT حاصل شد. در سال 1968 peter closer [6] محاسبه کرد که اگر ماهواره‌های بزرگ متعدد انرژی خورشیدی در مدار سنکرون زمین قرار داده شود. انرژی جمع شده می‌تواند به زمین تابانده شود و به وسیله آنتن‌های دریافتی صف‌آرایی شده در چندین مایل مربع برداشت شود. این ماهواره همیشه در فضایی آری از ابر و آفتابی خواهد بود. انرژی دریافت شده از این روش بسیار قابل اعتمادتر از دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی یا بادی خواهد بود.

با تمام این احوال تا زمانیکه انرژی تولید انرژی الکتریکی بسیار پرزحمت‌تر و گرانتر از انتقال با مایکروویو نشود، دریافت انرژی مایکروویو از ماهواره به احتمال قوی تنها یک عقیده خواهد بود.

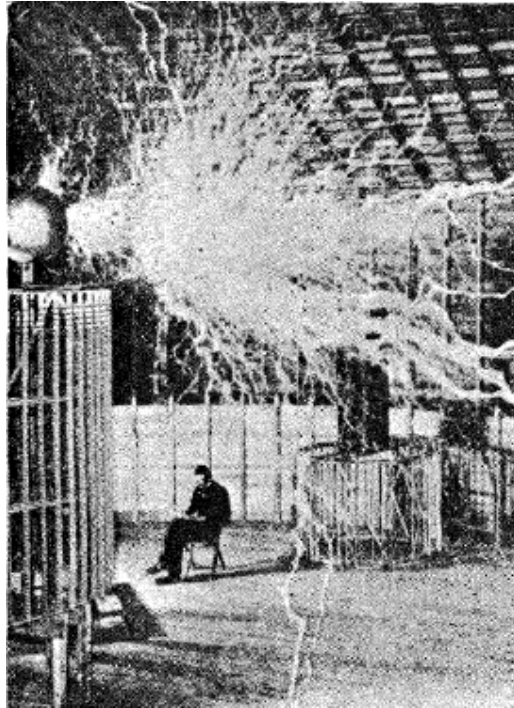
لابراتوار Springs کلرادو





در اواسط سال 1899 کلنل John Jacob Astor صاحب هتل Waldorf-Astoria در شهر نیویورک کمتر از \$30000 بخشید (برای ساخت لابراتوار). سرانجام تسلا تصمیم گرفت و در Colorado Springs ، که فلاتی حدود 2000 متر بالاتر از سطح دریا است یکمحل سرپوشیده که به اندازه کافی برای جا دادن یک ترانسفورمر فوی فرکانس بالا با هسته‌ای به قطر 15 متر بزرگ باشد بنا کرد. این هسته عظیم الجثه در یک محل سرپوشیده مربع شکل بزرگ واقع شده و بالای آن دکلی به بلندی 200-ft (61m) نصب شد که یک توپ مسی به قطر 3-ft (91.4 cm) بر سر آن واقع بود. در مقاله‌ای از وی به نام «انتقال انرژی الکتریکی بی سیم» نوشته شد درسال 1904 در Engineer , Electrical world, تسلا نوشت که او به Colorado springs آمده اهداف زیر را دنبال کند:

- (a) تکمیل کردن یک فرستنده توان بالا
  - (b) کامل کردن وسایلی برای جدا و ایزوله کردن انرژی منتقل شده.
  - (c) محقق کردن قانون انتقال جریانها از میان زمین و آتمسفر.
- یقیناً تسلا در(شکل 1) چیزهای زیادی درباره انتقال انرژی بی سیم می دانست اما چیز زیادی درباره آن در یادداشت‌هایش ننوشته است. او بخشی از انتقال انرژی بی سیم را شرح داد، اما همه آنچه را که می دانست می توان در نکاتی از یادداشت‌هایش در مورد انتقال بیش از حد فواصل کوتاه مشاهده کرد.



شکل (1-1)

خود تسلا به 2 موفقیت در انتقال میزان کمی انرژی بی سیم و ساخت امواج الکتریکی باد شارژ ولتاژ فشار قوی از پیچک تسلا ادعا کرده است. همچنین او این کار را با یک ساختار پیشرفته از یک فرستنده چند حاملی با یک گیرنده ویژه تنظیم شده برای تمام حاملها (شکل 2) آزمایش کرد. ساختار پیشرفته جانشین شده بدین صورت است «این اختراع قادر به تولید دو یا بیشتر نوع یا کلاس پارازیت یا ایمپالس با ماهیت‌های متفاوت و مرتبط با مقدار موثر بالای آنها می‌باشد. و دارای یک مدار گیرنده و عملیاتی در نتیجه یک گیرنده دور برد شامل دو یا بیشتر مدار است. که هر کدام به طور خاص به پارازیت یا ایمالس‌هایی از یک نوع یا کلاس میزان شده‌اند. بنابراین طوری آرایش یافته‌اند که عملکرد گیرنده وابسته به مقدار مثبت مؤثر ایمپالس‌ها و پارازیت‌ها در فعالیت مشترک یا برآیند».

سیستم دو مداره تسلا در ادامه راه پیشگامان سیستم مدرن رادیویی طیف وسیع است.



شکل (1-2)

### فعالیت‌های انجام شده در دنیا در زمینه انتقال قدرت بی سیم مایکروویو

بیش از دو دهه پیش، میزان قابل توجهی کار بر روی انتقال قدرت مایکروویو در تمام دنیا به ویژه در آمریکا، ژاپن، روسیه، کانادا، آلمان و فرانسه انجام شد. در اینجا فقط مهمترین فعالیتها در زمینه انتقال قدرت بی سیم در دنیا ارائه خواهد شد.

امید است که مراجع پیوست این مقاله خوانندگان علاقه‌مند را به منابع اطلاعاتی جزئی‌تر در موضوعات ویژه هدایت کند.

### فعالیت‌های ایالات متحده و کانادا

یکی از مهمترین نقاط عطف در انتقال قدرت مایکروویو در آمریکا برنامه مطالعه سه ساله با نام توسعه مفهوم سیستم قدرت ماهواره‌های NASA/DOE و برنامه ارزیابی یا عدل مرجع NASADOE، بود که در سال 1978 شروع شد. برنامه بعدی سیستم مرجع یک SPS پیشرفته با نام (Fresh-Look-SPS) نگاه نو به مفاهیم SPS همچون مفهوم برج خورشیدی SPS که یکی از مدل‌های جدید آن بود. در سال 1997 منتشر شد. در سال 1998 مفاهیم مطالعه شده آزمایش شد. در سال‌های 2000-1999 یک برنامه جستجو، تحقیق و تکنولوژی SPS (SERT) آزمایش شد. از سال 2001 تا 2002 یک برنامه مفهوم SPS و بلوغ تکنولوژی (SCTM) به وسیله NASA دنبال شد. پرواز اولین هواپیمای بدون سوخت دنیا تغذیه شده با انرژی مایکروویو از زمین در سال 1987 در کانادا گزارش شد. این سیستم سکوی ساکن تنظیم ارتفاع بلند (SHARP) نام گرفت. مفهوم آن بر این اساس است که، هواپیماها باید آهسته مسیر دایره‌ای را طی کنند که ارتفاع عملکرد آنها از 21km است و تنظیم سیگنال‌های رادیویی برای بیشتر ماهها به حدود قطر 600km می‌باشد. یک فرکانس عملکرد این سیستم 2.45GHZ بود. rectenna تشکیل شده است از یک مدار چاپی سفارشی، صفی از آنتن‌های دوقطبی با ارتباط با دیوذهای یکسو ساز که در سمت پایین نقشه قرار دارند و انرژی مایکروویو را به جریان الکتریکی برای موتور الکتریکی قدرت تبدیل می‌کنند.

**فعالیت‌های اروپا**

در سال 2001 یک برج SPS توسط اروپایی‌ها معرفی شد. مشخصات برج SPS اروپایی در جدول داده شده است. در سال 2003 سیستم انتقال قدرت بی‌سیم نقطه به نقطه برای انتقال 10kw انرژی الکتریکی به یک دهکده کوچک ایزوله در جزیره Reunion فرانسه.

Frequency	2.45 GHz
SPS Tx Power	400 MW
SPS Tx Antenna (radius)	510 m
Orbit	GEO
Final number of SPS	1870
Receiving antenna site:	
Final number	103
Antenna size	11 x 14
Site including safety zone	27 x 30 km
Power delivered per SPS	275 MW
SPS tower	
Length:	15 km
Electricity prod.	450 MW

جدول (1-1)

### فعالیت‌های روسیه

در روسیه، کارهای زیادی شامل تکنولوژی مایکروویو مورد نیاز برای SPS و مطالعات سیستم‌های زیادی، روی SPS انجام شده است. یک گروه در دانشگاه ایالت مسکو در مورد طراحی آنتن بسیار پیشرفته گزارشی ارائه کردند و همچنین در مورد طراحی اجزاء مایکروویو و طراحی سیستم. همچنین بعدها با همکاری گروهی از دانشگاه kyoto روی توسعه یک لامپ کنورتور موج سیکلترون (CWC) کار

کردند. در کمپانی لامپ ISTOK، راندمان 83٪ RF به D.C با ولتاژ خروجی 15-20KV و توان 10KW ها حاصل شد.

### فعالیت‌های ژاپنی‌ها:

در اوایل سال 1980، مهندسان و دانشمندان ژاپنی فعالیت‌های دستیابی به SPS را شروع کردند. اینها بعضی از برنامه‌های آنهاست.

1983: اثر غیرخطی طبقه یونیسفر جو زمین بر مایکروویو آزمایش شد (MINIX)

1992: آزمایش هواپیمای به پرواز در آمده با مایکروویو (MILAX).

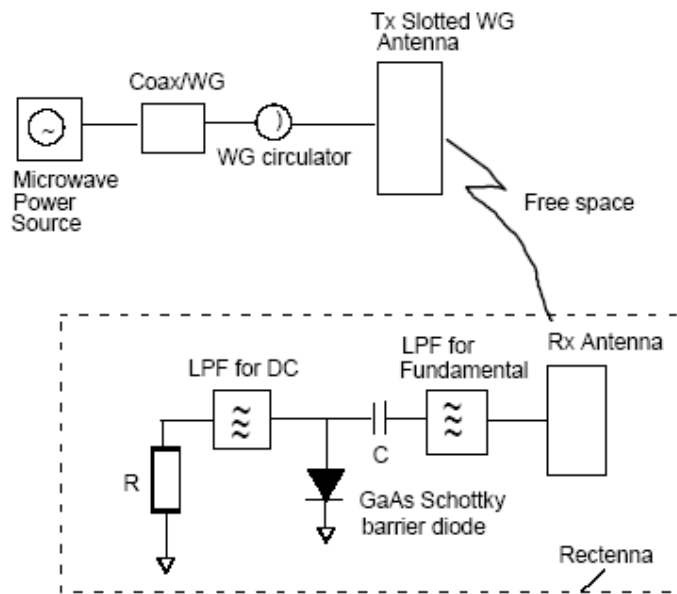
1993: سال بین‌المللی فضا - انتقال انرژی مایکروویو در فضا (ISY-METS).

اخیراً دو سازمان ژاپنی مدل‌هایشان را پیشنهاد کردند. JAXA (آژانس اکتشاف Aero space ژاپن) یک مدل SPS 5.8ghs و 1GW را پیشنهاد کرد. (Institute for unmanned space experiment freefeyer) یک مدل

ساده‌تر پیشنهاد داد.

### انتقال قدرت مایکروویو و کاربردهایش

یک بلوک دیاگرام از شرح اجزاء انتقال قدرت بی‌سیم مایکروویو در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل (3-1)

اجزاء اولیه شامل یک منبع مایکروویو، یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده است. rectenna از ترکیب یک آنتن و مدار یکسو کننده تشکیل شده است. آنتن انرژی الکترومغناطیسی را دریافت می کند، مدار یکسو کننده آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. منبع مایکروویو شکل شده است از لامپهای الکترونی (klystron، TWT آیا اجاق مگنترون مایکروویو) یا تجهیزات حالت جامد (GaAsmes fet، GaNPHEMT، SIEMESFET، EaNHFET، AIGAN و InGaAS) با الکترونیک برای کنترل توان خروجی، یک ADAPTOR، CAAX به WAVEGUIDE به یک سیر کولاتور فریت WAVEGUIDE وصل شده است که منبع مایکروویو را در برابر توان برگشتی حفاظت می کند. به منظور match کردن امپدانس WAVEGUID با امپدانس ورودی آنتن سیر کولاتور به یک بخش WAVEGUID هماهنگ کننده وصل شده است. آنتن هدایت موج

شکافدار، دیش سهموی و قطعه microstrip معمول‌ترین تیب آنتن‌های tx هستند. به منظور دستیابی به راندمان بالا ( $>95\%$ ) و ظرفیت توان انتقالی بالا، آنتن هدایت موج شکافدار یک آنتن ایده‌آل برای انتقال قدرت است. پارامترهای یک آنتن نوعی انتقال برای SPS در جدول II نشان داده شده است. rectenna یک المان پسیو با یک یکسو ساز دیودی است (si یا GaAs schottky barrier، sic و Gan) و فیلتر پایین‌گذر بین آنتن (دوقطبی، Yagiuda، microstrip یا دیش سهموی) و یکسو کننده دیودی برای جلوگیری از باز پراکنی‌ها (مونیک‌های بالا برای جذب کردن انرژی میکروویو منتقل شده از فرستنده و تبدیل آن به انرژی جریان مستقیم (DC) قرار گرفته است. اولین rectenna تشکیل شده بود از 28 دوقطبی نیم موج منتهی شده به یک یکسو ساز پل با استفاده از دیویدهای نیمه هادی Dointecntact بود. بعدها، دیویدهای نیمه هادی point-contact با دیویدهای schottky-barrier سیلیکونی جانشین شدند که راندمان تبدیل میکروویو به DC را از 40٪ به 84٪ رشد دادند، راندمان به صورت نسبت خروجی DC به قدرت میکروویو جذب شده به وسیله rectenna تعریف می‌شود. در یک پیشنهاد انتقال قدرت میکروویو در لابراتوار Jet propulsion (JPL) در Goldenfacility در سال 1975، یک راندمان 84٪ به دست آمد و قدرت 30KW با موفقیت از یک آنتن دیش سهموی به یک سایت rectenna در فاصله بیش از 106KW ارسال شد (در باند فرکانسی 2-5ghz). سیستم‌های انتقال



قدرت مایکروویو از لامپ‌های الکترونی و نیمه هادی‌های نشان داده شده در شکل‌های 4 و 5 استفاده می‌کنند (به ترتیب).

TABLE II  
TYPICAL PARAMETERS OF THE TRANSMITTING ANTENNA FOR  
THE SPS SYSTEM

Model	NASA/ DOE	JAXA1	JAXA2	OLD JAXA
Frequency	2.45 GHz	5.80 GHz	5.80 GHz	5.80 GHz
Efficiency	89%	86%	87%	96.7%
Output power	6.72 GW	1.3 GW	1.3 GW	1.3 GW
Diameter of transmitting antenna	1.0 km	1.0 km	1.93 km	2.6 km
Rectenna diameter	1.0 km	3.4 km	3.4 km	2.0 km

جدول (1\_2)

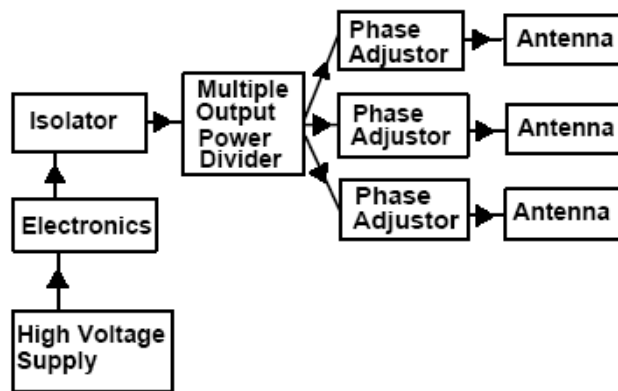


Fig. 4. Microwave power transmission system using electron tubes

شکل (1\_4)

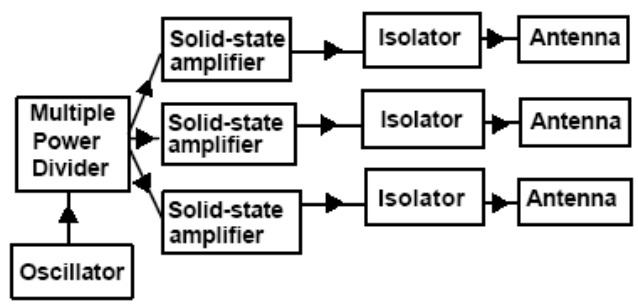


Fig. 5. Microwave power transmission system using semiconductors

شکل (1-5)

TABLE III.  
CHARACTERISTICS OF ELECTRON TUBES

Tubes	Klystron amplifier	TWT amplifier	Magnetron	Microwave Power Module
	4.0 GHz	2.5 GHz	2 GHz	2.5 GHz
Efficiency	76%	60-67%	60-75%	50%
Output power	100 ~ several 10 <sup>7</sup> W	Several 100 W	Several 100 ~1000 W	180 W
Weight	40 ~ 100 g/W	20 g/W	45 g/ W (2.45 GHz) 20~30 g/W (5.8 GHz)	6.4 g/W
Harmonics	Less than -70 dBc	Less than -70 dBc	Second:- 55 dBc Third: -80 dBc Fourth: -70 dBc Fifth: -75 dBc	

جدول (1-3)

TABLE IV.  
CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR RADIO TRANSCEIVERS  
FOR SPSCE APPLICATION

Satellite	INT-7	NSTAR	TDRSS	ETS-6
Frequency	4 GHz	2.5 GHz	2 GHz	2.5 GHz
Efficiency	29%	36%	32%	31%
Output power	30 W	40 W	24 W	14 W
Weight	1.7 kg	2.5 kg	3.4 kg	1.2 kg

#### جدول (1-4)

مشخصات transceiver های رادیویی نیمه هادی برای کاربردهای فضا و زمین به ترتیب در جداول III و IV نشان داده شده است بزرگترین کاربرد WPT از طریق مایکروویو نیروگاه‌های فضایی خورشیدی (SPS) است. کاربردهای دیگر از WPT در جهت رسیدن به این اهداف است. پارامترهای نوعی از RETRE DIRECTIVE SPACE و سیستم زمینی به ترتیب در جدول V و VI نشان داده شده است. انتقال قدرت زمین به زمین، منبع انرژی بی‌سیم و تجهیزات متحرک با مصرف کم انرژی مثل RFID دنج بالا، سنسورهای بی‌سیم (در جدول VI ببینید) و مدارهای یکسوکننده میزان با توان RF (PARC) معمول‌ترین زیرمجموعه MPT سیستم‌های فرستنده رادیویی قدرت فضایی هستند (SPRITZ). پارامترهای فیزیکی نوعی این فرستنده‌ها در جدول VIII نشان داده شده است.

SPS orbit	GEO (36,000 km)
Frequency	5.8 GHz
Antenna diameter	2.580 m
Power transmitted to earth Total/one element	1340 MW/0.175 W

جدول (1-5)

TABLE VI  
TYPICAL PARAMETERS FOR RETRODIRECTIVE GROUND STATION  
SYSTEM

Signal power (Pt)	1 KW (60 dBm)
EIRP	114 dBm
Free space loss (36,000 km)	199 dB
Antenna gain Gt (D=10m, $\eta=0.7$ )	54 dBi
SPS transmitter antenna element received power (Pr)	-80 dBm
SPS transmitter antenna element gain Gr (circular microstrip antenna)	6 dBi
Atmospheric loss	1 dB

جدول (1-6)

TABLE VII  
ELECTROMAGNETIC SPECTRUM FOR RFID AND WIRELESS  
SENSORS

Frequency	Wireless sensors and RFID
30-300KHz	LF RFID: Passive IC tag
300-3000KHz	MF RFID: Passive IC tag
3-30 MHz	HF RFID: Passive IC tag (6.78/13.56/27.125 MHz)
30-300 MHz	Wireless sensor and Active RFID
300-3000 MHz	Wireless sensor and Active RFID: Transceivers (315/433/868/915 (~5m)/2450(~1m) MHz)
3-30 GHz	5.8 GHz Active RFID Beamed microwave power Transmission

جدول (1-7)

TABLE VIII.  
PHYSICAL PARAMETERS OF SPRITZ SPS TRANSMITTER

Frequency	5.770 GHz
Tx Power	25 W
Tx Antenna	Microstrip Array (10 x 10)
Beam width	7.3°
Loss # Feed line	6 dB
Tx Antenna Gain	Maximum 17.6 dBi
Tx EIRP	58 dBm
Size in mm	2000 x 2300 x 2850

جدول (1-8)

## نتیجه گیری

رادیو، تکنولوژی هسته که به ویژه در قرن بیستم برای انتقال بی سیم استفاده شده و می تواند همچنین برای رفاه نوع بشر استفاده شود. مشکلات ممکن در زمینه انرژی در 50 یا 100 سال آینده می تواند بوسیله نیروگاه خورشیدی فضایی (SPS) حل شود، که به طور جدی در سال 1968 توسط P.E. Glaser ارائه شده است.

یک تکنیک امید بخش برای داشتن منبع انرژی بلند مدت در هر مکانی که نصب خطوط انتقال مشکل باشد انتقال قدرت مایکروویو (MPT) است، که در سال 1960 توسط W.C.Brawn پیشنهاد شد. در مقاله فوق مروری بر فعالیتهای و روند آینده تکنولوژی انتقال قدرت بی سیم مایکروویو (MPT) و کاربردهای آن ارائه شده.



بخش دوم

"تحلیل عملکرد و مزایا و معایب خودروهای برقی در مقایسه با خودروهای

رقیب."

## مقدمه

خودرو برقی، سابقاً معروف به «تلفات صفر» محبوب کارشناسان محیط‌زیست، بعضی اوقات به وسیله نقلیه «تلفات در جای دیگر» بدنام می‌شود، زیرا انرژی الکتریکی برای شارژ کردن باتری‌های خودرو باید در نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی تولید شود که آن تولید انرژی مستلزم تلفات است.

این نکته منطقی و قابل قبولی است، اما بعد از آن ما باید بپرسیم در خودرو برقی در هر مایل چه مقدار آلودگی ایجاد می‌شود. در صورت محاسبه تمام ضایعات، شروع از گاز یا نفتی که از منبع سوخت استخراج می‌شود و تمام راه‌هایی که منتهی می‌شود به مصرف انرژی الکتریکی در موتور خودرو و کار کردن روی اعداد به دست آمده، متوجه می‌شویم که خودرو برقی به طور قابل توجهی راندمانش بالاتر است و آلودگی آن در تمام آلترناتیوها کمتر است.

در این بخش ما اتومبیل تسلا (TeslaRodster) را که از باتری‌های lithium ion مناسبی به جای باتری‌های اسیدسرب (lead-acid) یا باتری‌های nickel-metal-hydride را که بهترین خودروهای برقی استفاده کرده‌اند، استفاده می‌کند، بررسی می‌کنیم. خودروهای ساخته شده با

باتری lithium ion علاوه بر اینکه راندمان انرژی انتقالی به چرخهایشان بسیار زیاد است و تلفات آن انتقال بسیار کم است، مزایای حیرت‌انگیز و تسهیلات برتری را نیز دارا هستند.

استفاده از باتری‌های lithium ion بسیار مشکل‌تر از تکنولوژی‌های گذشته است: و آن به این دلیل است که مدت زیادی نیست که این باتری‌ها در خودروهای برقی استفاده می‌شوند Tesla Motors تلاش زیادی را برای ساختن یک سیستم باتری lithium ion ایمن، سبک و با دوام صرف می‌کند. علاوه بر این تسلا شاید ده‌ها میلیون صرف بسته‌بندی، کیفیت و بهینه‌سازی باتری‌ها خواهد کرد. به هر حال مطالب این فصل نشان خواهد داد که انرژی و چگالی قدرت باتری‌های Lithium ion حاصل این تلاش‌های بسیار ارزنده است.

**فصل 1: مقایسه خودروها با محرک‌های مختلف از نقطه نظر راندمان**

## وضایعات

### راندمان انرژی

برای محاسبه راندمان انرژی انتقالی به چرخها در هر خودرویی، ما با انرژی نهفته در سوخت منبع (زغال سنگ، مازوت یا گاز طبیعی) که از زمین به دست می‌آید شروع می‌کنیم. سپس کار را با انرژی نهفته سوخت تبدیل شده



به محصول سوختی نهایی (بنزین یا الکتریسیته) دنبال می‌کنیم. سپس کم کردن انرژی مورد نیاز برای انتقال سوخت به اتومبیل. سرانجام راندمان سوختی خود اتومبیل (موتور احتراقی معرفی شده mpg) را به کار می‌بریم تا معادله کامل شود.

### خودروهای بنزینی

در این قسمت، راندمان انرژی انتقالی به چرخها در خودروی بنزین معمولی را محاسبه می‌کنیم. ابتدا انرژی نهفته بنزین را که  $46.7 \text{ MJ/KG}$  یا  $343.3 \text{ MJ/L}$  است را اعلام می‌کنیم. دوماً، می‌دانیم که تولید و انتقال گاز به ایستگاه گاز راندمان متوسط  $81.7\%$  دارد، به این معنی که  $18.3\%$  انرژی نهفته در مازوت، برای تولید و حمل و نقل تلف می‌شود. سوماً،  $343. \text{ MJ/L} / 81.7\% = 42 \text{ MJ/L}$ ، مگاژول از مازوت برای تولید یک لیتر بنزین در پمپ بنزین مورد نیاز است. خودرو بنزینی معمولی با بیشترین راندمان به نام Hondcivic VX در سال 1993 ساخته شده است که، EPA نامی آن برای حرکت در داخل شهر و اتوبان به صورت مخلوط  $51 \text{ mpg}$  بود. با تبدیل این عدد به طول مشخص می‌شود که این خودرو به صورت نامی فاصله  $21.7$  کیلومتر را با یک لیتر بنزین طی می‌کند. بنابراین راندمان  $21.7 \text{ km/l} / 42 \text{ mj/l} = 52 \text{ km/mj}$  به دست می‌آید. با گرفتن

میانگین بین راندمان خودرو Honda Civic VX با راندمان یک اتومبیل نوعی مثل Toyota camry راندمان  $28\text{km/mj}$  حاصل می‌شود.

### خودروهای هیبرید

هیچ یک از خودروهای هیبرید در دسترس امروزی اجبار به شارژ باتری‌هایشان به جز بوسیله انرژی که در انتها توسط موتور بنزینی تولید می‌شود ندارند. این به این معنی است که احتمالاً در این خودروها مسئله آلودگی و راندمان مدنظر بوده است، یعنی راندمان این خودروها نباید از راندمان خودروی بنزینی با بهترین راندمان کمتر باشد. اگر EPA نامی چنین خودرویی 51MPG باشد باید EPA خودروی هیبرید هم دقیقاً مشابه یک خودروی معمول بنزینی و برابر 51MPG باشد. (اگر یک خودروی هیبرید بتواند باتری‌هایش را زمانی که در پارکینگ است توسط اتصال به شبکه توزیع برق شارژ نماید و اگر باتری‌هایش شارژ کافی برای یک سفر را داشته باشند، جمله فوق صحیح نیست.)

خودروی هیبرید با بیشترین راندمان خودروی Honda Insight ساخته شده در سال 2005 می‌باشد، که دارای 51MPG و 63MPG، برای یک سفر داخل شهر و اتوبان به صورت مخلوط می‌باشد.

در یک کاربرد کاملاً مشابه برای خودروهای Honda Civic VX و Honda Insight مشخص شد که راندمان انرژی انتقالی به چرخها در خودرو Insight 64km/mj است. خودرو مشهور Toyotaprius برای سفر درون شهری و اتوبان به صورت مخلوط دارای EPA 55mpg و در نتیجه راندمان انرژی 56km/mj می باشد.

### خودروهای برقی

با بهینه سازی تایرها و چرخ دنده ها برای دستیابی به عملکردها (بیشتر راندمان خالص)، اتومبیل Tesla Roadster تنها حدود 110 وات ساعت (40mg) از انرژی الکتریکی باتری برای یک کیلومتر سواری مصرف می نماید که معادل 2.53km/mj می باشد.

چرخه انرژی (شارژ و سپس دشارژ) باتری های lithium ion در خودرو Tesla Roadster راندمانی حدود 86٪ دارد. این به این معنی است که از هر 100mj انرژی الکتریکی استفاده شده برای چنین باتری، فقط 86mj آن برای به کار انداختن موتور خودرو در دسترس باتری است. بنابراین راندمان انرژی الکتریکی خروجی به چرخها در اتومبیل -

TeslaRoadster  $2.53\text{km/mj} \times 86\% = 2.18\text{km/mj}$  است.

پراندمان ترین روش برای تولید انرژی الکتریکی با یک «سیکل ترکیبی»

سوخت گاز طبیعی و ژنراتور الکتریکی است. امروزه بهترین این ژنراتورها، ژنراتور «H-System» جنرال الکتریک است که راندمان 60٪ دارد، یعنی 40٪ انرژی نهفته در گاز طبیعی در پروسه تولید تلف می‌شود. راندمان استخراج گاز طبیعی 97.5٪ و راندمان عمل آوردن آن نیز 97.5٪ است. سپس انرژی الکتریکی با خطوط انتقال با راندمان متوسط 92.5٪ منتقل می‌شود. بنابراین راندمان انرژی الکتریکی خروجی برابر است با  $97.5\% \times 97.5\% \times 92\% \times 60\% = 52.5\%$  الکتریکی انتقالی به خروجی تولید انرژی الکتریکی و راندمان انرژی الکتریکی خروجی به چرخ‌ها برای اتومبیل Tesla Roadster، راندمان انرژی انتقالی خودروی فوق  $1.14\text{km/mj} = 2.18\text{km/mj} \times 52.5\%$  به دست می‌آید که دو برابر راندمان اتومبیل Toyota Prius می‌باشد.

### خودروهای سلول سوخت هیدروژن

هیدروژن در طبیعت به صورت خالص یافت نمی‌شود بلکه به صورت مخلوط در ترکیباتی مثل گاز طبیعی ( $\text{CH}_4$ ) یا آب ( $\text{H}_2\text{O}$ )، وجود دارد. امروزه پیراندمان‌ترین روش برای تولید مقادیر زیاد هیدروژن از طریق اصلاح گاز طبیعی می‌باشد. برای نیروگاه‌های جدید، راندمان جاری شدن هیدروژن

تولید شده از گاز طبیعی به مخزن، شامل تولید، حمل و نقل بالا، بردن فشار، بین 52٪ و 61٪ برآورد می‌شود.

حد بالای راندمان برای سلول سوختی (Proton Exchange Membrane) PEM 50٪ است. خروجی سلول سوختی، انرژی الکتریکی برای چرخاندن موتورهای محرک است. و می‌توانیم فرض کنیم که راندمان وسیله نقلیه مشابه راندمان خودروی برقی 2.53KM/MJ است. با داشتن این اعداد ما می‌توانیم راندمان انرژی جاری شده به چرخها را برای خودرو سلول سوختی هیدروژن محاسبه کنیم:

$$2.53 \text{KM/MJ} \times 50\% \times 61\% = 0.77 \text{KM/MJ}$$

انرژی نسبت به خودرو برقی 32٪ بدتر است، ولی در مقایسه با خودرو بنزینی روش موثری است. اما عملکرد خودروهای سلول سوختی واقعی تا این حد که گفته شد به ایده‌آل نزدیک نیست. چند کمپانی خودروسازی به صورت آزمایشی تعداد کمی خودرو سلول سوختی ساخته‌اند، که EPA و راندمان بعضی از آنها در زیر آمده است.

بهترین خودرو آزمایشی سلول سوختی از روی EPA اندازه‌گیری می‌شود که Honda FCX است که 49 مایل بر کیلوگرم معادل 80.5 کیلومتر بر کیلوگرم گاز هیدروژن مصرف می‌نماید.

می‌دانیم که انرژی نهفته هیدروژن  $141.9\text{MJ/KG}$  است، بنابراین می‌توانیم رانندمان وسیله نقلیه را  $80.5\text{KM/KG}/141.9\text{MJ/KG}=.57\text{KM/MJ}$  است محاسبه کنیم. (بدیهی است که رانندمان سلول سوختی HONDA از رانندمان تئوری 50٪ فرض شده در بالا فاصله دارد).

زمانی که رانندمان انرژی جاری شده به چرخهای این خودروی هوندای آزمایشی را محاسبه می‌کنیم، به عدد  $.57\text{km/mj} \times 61\% = .35\text{km/mj}$  می‌رسیم، که با کنار گذاشتن خودروهای Honda Civic VX بنزینی و Honda Insight هیبریدی حتی به خوبی Voekswagen دیزلی معمولی هم نیست.

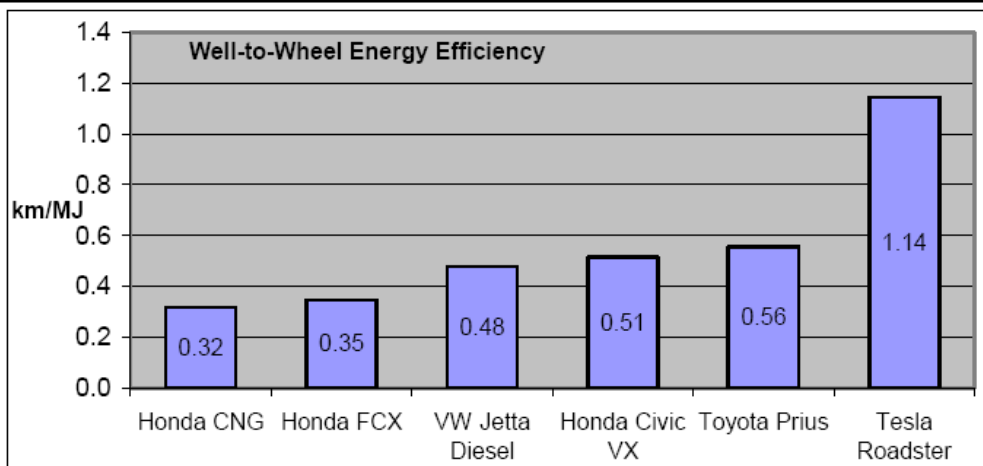
حتی با وجود صرف  $\$ 1.2\text{billion}$  و پیشقدمی دولت ایالات متحده برای گسترش خودروهای سلول سوختی هیدروژنی برای کاهش وابستگی به نفت خارجی، گزارش اخیر منتشر شده توسط یکی از اعضای آکادمی بین‌المللی علوم نشان داد که آمریکایی‌ها نباید نفسشان را حبس کرده و منتظر ورود این خودروها به نمایشگاهها باشند. در بهترین قسمت سناریو آمده است که گذر به اقتصاد هیدروژنی چندین دهه طول خواهد کشید. و به نظر می‌رسد هرگونه تحول در مسئله نفت و دی‌اکسیدکربن در طول 25 سال آینده جزئی خواهد بود.



## مقایسه

پی گیری جدول نشان می دهد که راندمان انرژی جاری شده به چرخهای چندین نوع از خودروهای پرناندمان شامل یک برآورد از خودرو TeslaRoadster بر پایه اندازه گیری عملکرد نمونه های ساخته شده می باشد.

Technology	Example Car	Source Fuel	Well-to-Station Efficiency	Vehicle Mileage	Vehicle Efficiency	Well-to-Wheel Efficiency
Natural Gas Engine	Honda CNG	Natural Gas	86.0%	35 mpg	0.37 km/MJ	0.318 km/MJ
Hydrogen Fuel Cell	Honda FCX	Natural Gas	61.0%	64 m/kg	0.57 km/MJ	0.348 km/MJ
Diesel Engine	VW Jetta Diesel	Crude Oil	90.1%	50 mpg	0.53 km/MJ	0.478 km/MJ
Gasoline Engine	Honda Civic VX	Crude Oil	81.7%	51 mpg	0.63 km/MJ	0.515 km/MJ
Hybrid (Gas/Electric)	Toyota Prius	Crude Oil	81.7%	55 mpg	0.68 km/MJ	0.556 km/MJ
Electric	Tesla Roadster	Natural Gas	52.5%	110 Wh/km	2.18 km/MJ	1.145 km/MJ



## ضایعات

سوختن سوخت انواع اضافات شامل، سولفور، سرب، هیدروکربن‌های سوخته نشده، دی‌اکسیدکربن و آب را تولید می‌کند. ما در طول سال‌ها، هم از طریق اتومبیل‌ها و هم نیروگاه‌های برق با ری فرموله کردن سوختها به المانهایی مثل سولفور، فلزات و ضایعات را گسترش داده‌ایم. در یک موتور احتراقی یا نیروگاه برق ایده‌آل فقط ضایعات دی‌اکسیدکربن و آب خواهیم داشت. آب موردی ندارد، اما دی‌اکسیدکربن گاز گلخانه‌ای است و به وجود آمدن آن اجتناب‌ناپذیر است. ما می‌توانیم به روش مشابه روش محاسبه راندمان، دی‌اکسیدکربن خروجی وسیله نقلیه فرضی را محاسبه کنیم. با این فرض که میزان کربن موجود در سوخت منبع را می‌دانیم.

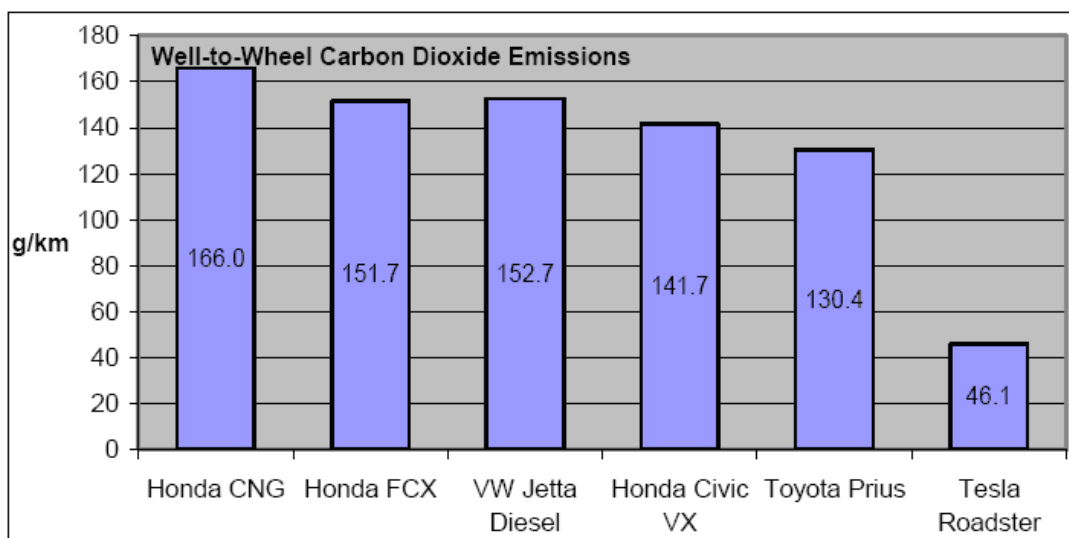
با انجام احتراق کامل، همه کربن موجود در سوخت منبع سرانجام به دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود. برای برآورد احتراق کامل ما می‌توانیم میزان  $\text{CO}_2$  را برای هر سوختی محاسبه کنیم. مازوت شالم 19.9 گرم بر مگاژول کربن، و گاز طبیعی شامل 14.4 گرم بر مگاژول کربن است. یک گرم کربن تشکیل 3.67 گرم  $\text{CO}_2$  می‌دهد چون وزن اتمی کربن 12 و اکسیژن 16 است. بنابراین  $\text{CO}_2$  موجود در مازوت 73.0 گرم  $\text{CO}_2$  بر مگاژول و گاز طبیعی 52.8 گرم بر مگاژول است. با این اعداد ما می‌توانیم ضایعات خروجی



وسایل نقلیه مختلف را براساس کربن موجود در سوخت منبع و راندمان انرژی وسیله نقلیه حساب کنیم.

باز هم خودرو برقی از لحاظ ضایعات CO<sub>2</sub> سه برابر بهتر از خودروی هیبرید و نزدیک 4 برابر بهتر از خودروی سلول سوختی هیدروژن است.

Technology	Example Car	Source Fuel	Well-to-Wheel		
			CO <sub>2</sub> Content	Efficiency	CO <sub>2</sub> Emissions
Natural Gas Engine	Honda CNG	Natural Gas	52.8 g/MJ	0.32 km/MJ	166.0 g/km
Hydrogen Fuel Cell	Honda FCX	Natural Gas	52.8 g/MJ	0.35 km/MJ	151.7 g/km
Diesel Engine	VW Jetta Diesel	Crude Oil	73.0 g/MJ	0.48 km/MJ	152.7 g/km
Gasoline Engine	Honda Civic VX	Crude Oil	73.0 g/MJ	0.52 km/MJ	141.7 g/km
Hybrid (Gas/Electric)	Toyota Prius	Crude Oil	73.0 g/MJ	0.56 km/MJ	130.4 g/km
Electric	Tesla Roadster	Natural Gas	52.8 g/MJ	1.15 km/MJ	46.1 g/km



بخش سوم

" تحلیل و بررسی انواع موتورهای الکتریکی که تاکنون در خودروهای برقی

به کار رفته است."



## مقدمه

از ابتدای تولید خودروهای برقی تاکنون خودروهای برقی متفاوتی با موتورهای محرک مختلف طراحی و ساخته شده است. بنابراین در این بخش پس از بر شمردن ملزومات اصلی موتورهای EV موتورهای فوق را به ترتیب قدمت استفاده آنها در خودروی برقی نام برده و به توضیح اجمالی علل کاربرد آنها در خودروی برقی بسنده می نمایم سپس به طور تک تک و به تفصیل به شرح عملکرد و کنترل و تا حدودی ساختار این موتورها خواهیم پرداخت. امید است در انتهای این فصل به نتیجه گیری درست و منطقی در مورد استفاده از موتورهای الکتریکی مختلف در خودروی برقی دست یابیم.

## ملزومات اصلی موتورهای EV عبارتند از:

- 1- نسبت گشتاور به اینرسی و نسبت قدرت به وزن زیاد.
- 2- گشتاور شکست زیاد (تا 400 درصد).
- 3- سرعت زیاد.
- 4- میزان نویز (سروصدای) کم.
- 5- عدم احتیاج به نگهداری.
- 6- اندازه کوچک و وزن کم.
- 7- کنترل ساده.
- 8- قیمت مناسب.

9- بازده زیاد به ازای سرعت‌های مختلف (کم و زیاد).

10- قابلیت برگشت انرژی در مواقع ترمز و یا حرکت در سرازیری.

از بین موتورهای الکتریکی، موتورهای DC به خاطر سیستم کنترل ساده و موتورهای SR به خاطر ساخت و مونتاژ ساده و کنترل آسان مورد توجه قرار گرفتند. مشکلات ناشی از سیستم کموتاتور و جاروبک موتورهای DC و نیز سروصدای زیاد موتورهای SR باعث توجه بیشتر به موتورهای AC شد. در سالهای اخیر موتورهای القایی به خاطر ساختمان و مونتاژ ساده، قیمت نازل و چگالی انرژی زیاد مورد علاقه است. ولی مقالات جدید و خودروسازها به روز امروزی همگی به خاطر راندمان بالا و خصوصیت‌های منحصر به فرد به استفاده از موتورهای سنکرون آهنربای دائم اتفاق نظر دارند.

## فصل 2 - موتورهای DC سری

### معرفی موتور DC سری

موتور سری قابلیت راه اندازی بارهای فوق العاده سنگین را دارد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد گشتاور راه اندازی موتورهای سری بسیار بزرگ است و این گشتاور در موتورهای سری متناسب با مجذور جریان موتور خواهد بود. اندازه این گشتاور در موتورهای سری از رابطه زیر به دست می آید.

$$T = K.I.^2$$

T : گشتاور موتور

I : جریان آرمیچر

K : ثابتی که مقدار آن توسط مشخصات ماشین تعیین میگردد

### موتورهای DC traction

استفاده از موتور dc سری در محرکه‌های کشنده متداول است. این موتور دارای مشخصه گشتاور سرعت ایده‌آلی می‌باشد، زیرا در سرعت کم، گشتاور بالای آن، شتاب زیادی را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود در حالت موتوری سریعاً به سرعت بهینه‌اش برسد.

به جز تعداد کمی سیستم‌های ac فرکانس پایین، بیشتر سیستم‌های راه‌آهن الکتریکی قدیمی از طریق شبکه‌های هوایی و یا از طریق یک ریل سوم به وسیله ولتاژ مستقیم تغذیه می‌شوند. در سیستم‌های راه‌آهن شهری که مسیرها کوتاه و ترافیک زیاد است نیز از تغذیه dc استفاده می‌شود. البته در سال‌های اخیر برخی از راه‌آهن‌های برقی بین شهری که دارای مسیر طولانی هستند از ولتاژ متناوب تکفاز با فرکانس 50 Hz یا 60 Hz و ولتاژ 25 kV تغذیه می‌شوند.

لوکوموتیوهای قدیمی و بعضی لوکوموتیوهای امروزی قطارهای برقی ac با ولتاژ بالا دارای موتورهای کشنده dc سری هستند که از طریق یک مدار دیودی متصل به یک ترانسفورمر کاهنده تغذیه می‌شوند. اولیه این ترانسفورماتور کاهنده به شبکه فشار قوی وصل می‌باشد. کنترل در سرعت‌های کم با تغییر نسبت دور این ترانسفورمر انجام می‌شود که در نتیجه ولتاژ داده شده به موتور کنترل خواهد شد. در سرعت‌های بالا، ولتاژ نامی به موتور اعمال می‌شود، اما کنترل با تضعیف میدان موتور انجام می‌گیرد.

نکته مهم قابل توجه در سیستم‌های راه‌آهن برقی، هارمونیک‌های جریان است که در شبکه هوایی ایجاد می‌شود. نزدیک بودن کابل‌های موازی شبکه تغذیه راه‌آهن به ریلها و نیز به یکدیگر مستلزم آن است که به گونه‌ای آرایش پیدا کنند که از تداخل جلوگیری شود. تکفاز بودن تغذیه موجب بروز همه هارمونیک‌ها از جمله همه مؤلفه‌های هارمونیک سوم می‌گردد.

با استفاده از تریستورها برای کنترل موتورهای کشنده لوکوموتیوهای راه‌آهن، نیاز به تغییر تعداد دور ترانسفورمر برطرف می‌شود و کنترل دقیق‌تر موتورها، امکان حداکثر تماس چرخ‌ها به ریل بدون داشتن لغزش را فراهم می‌آورد. اما با وجود این، دو نکته قابل توجه مهم در کار با تریستورها عبارت است از: جلوگیری از کوچک بودن ضریب توان که باعث می‌شود جریان شبکه حداقل گردد و همچنین جلوگیری از هارمونیک‌های اضافی.

کنترل دقیق و زمان‌های پاسخ سریع سیستم‌های ترپستور باعث شده است که بتوان از موتورهای تحریک جداگانه به جای موتورهای سری با سیستم دیودی استفاده نمود. شکل (1-3) طرح ابتدایی برای تغذیه یک نمونه لوکوموتیو را نشان می‌دهد. چهار موتور محرک نشان داده شده هر کدام روی یک محور خاص قرار گرفته‌اند و آرمیچر آنها با آرایش‌های سری - موازی از یک یکسوساز یک طرفه تغذیه می‌شود به گونه‌ای که می‌توان ولتاژ را از صفر تا مقدار کامل کنترل نمود. سیم‌پیچ میدان از طریق یک مدار تمام کنترلی تغذیه می‌شود به گونه‌ای که می‌توان برای به دست آوردن سرعت‌های بالا میدان را تضعیف کرد و همچنین بار را به‌طور مساوی بین گروه‌های موازی تقسیم نمود. مبدل‌های میدان موازی معکوس امکان معکوس کردن جهت چرخش را آسان‌تر می‌سازد.

آرمیچر موتورهای شکل (1-3) از سه یکسوساز پل تکفاز نیمه کنترلی که به صورت سری به هم وصل شده‌اند، تغذیه می‌شوند. در هنگام راه‌اندازی، ابتدا تنها پل A آتش می‌شود، سپس همچنان که موتور سرعت می‌گیرد، زاویه آتش کوچکتر می‌شود تا در نتیجه ولتاژ آرمیچر افزایش یابد. وقتی که پل A کاملاً به حالت هدایت درآمد (زاویه آتش  $a = 0^\circ$ )، پل B شروع به هدایت می‌کند و سرانجام پل C آتش می‌شود. سپس زاویه آتش پل C آنقدر کوچک می‌شود تا ولتاژ آرمیچر به حداکثر مقدار ممکن برسد. در طی دوره راه‌اندازی، جریان‌های میدان در حداکثر مقدار تنظیم می‌شوند. هدف از کاربرد سه پل یکسوساز به جای یک پل، داشتن ضریب توان بهتر می‌باشد.

به جای سه پل نیمه کنترلی شکل (1-3) می توان از دو پل دیودی بی کنترل که به وسیله کنتاکتورهای خطوط ثانویه وارد مدار می شوند، استفاده کرد. چنانچه ترمز در حالت ژنراتوری مورد نیاز باشد، پل ها باید از نوع تمام کنترلی باشند، اما معمولاً برای کاهش سرعت ترن از ترمز پویا (دینامیک) استفاده می شود. محرک اولیه در لکوموتیوهای دیزل-الکتریک یک موتور دیزل است که یک ژنراتور الکتریکی را میچرخاند و خروجی ژنراتور الکتریکی موتورهای کشنده را تنظیم می کند. اگر از یک ژنراتور DC استفاده شود، روشن است که نیاز به قطعات یکسوساز نمی باشد. اما اگر از یک مولد جریان متناوب (آلترناتور) استفاده شود، خروجی را باید یکسو نمود.

کنترل ولتاژ موتورها به وسیله کنترل میدان ژنراتور انجام می گیرد و اساس مدار دارای آرایش ساده ای از آلترناتور به یکسوساز دیودی و از آنجا به موتورهای dc می باشد.

در هر دو سیستم قطار برقی ac و dc، با استفاده از متناوب سازها یا مبدل های فرکانس، می توان یک ولتاژ متناوب چند فاز با فرکانس متغیر در لکوموتیوها تولید کرد. امروزه موتورهای کشنده ممکن است از نوع القایی قفسی باشند که طرز کار آنها در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سیستم هایی را که از موتورهای خطی القایی استفاده می کنند، می توان به وسیله متناوب سازها تغذیه نمود. این موتورها فشار مستقیم محموله بار به یک ریل ثابت را بهبود می بخشند.



قطارهای برقی DC که از طریق ریل سوم تغذیه می‌شوند دارای ولتاژ تغذیه 600 V

\_\_\_\_\_

700 V و در حالتی که از شبکه هوایی تغذیه می‌شوند دارای ولتاژ 1500 V

می‌باشند. در هر دو حالت، جریان مستقیم با یکسو کردن برق ac سراسری که معمولاً

به وسیله یکسوسازهای بی‌کنترل 12 پالسه انجام می‌گیرد، به دست می‌آید. اگر ترمز

ژنراتوری در یک لوکوموتیو رخ دهد، انرژی تولیدی به وسیله لوکوموتیوهای دیگر

سیستم که در حالت موتوری کار می‌کنند، جذب خواهد شد.

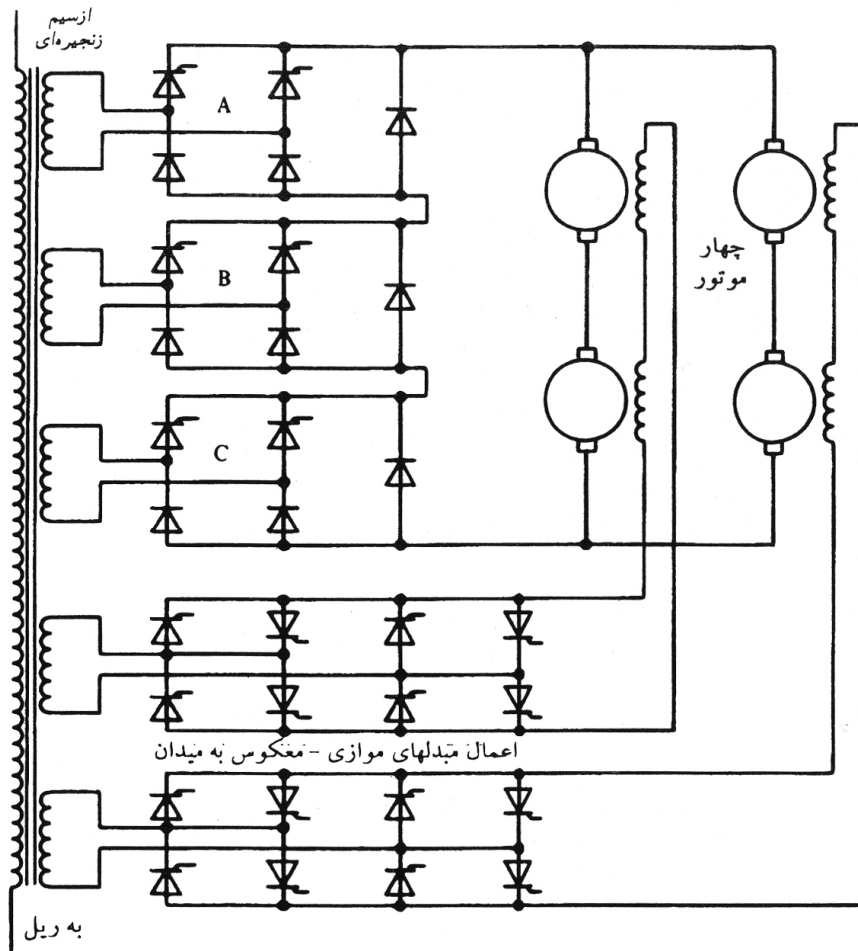
وسایل نقلیه جاده‌ای نیز یک حالت خاص از موتور dc تغذیه شده با یک مدار برشگر

تریستوری است که انرژی آن از یک منبع dc (باتری) تأمین می‌شود. اصل اساسی

در کنترل برشگرها همانند سیستم‌های ریلی و جاده‌ای می‌باشد و دو مدار نمونه در

شکل (2-3)



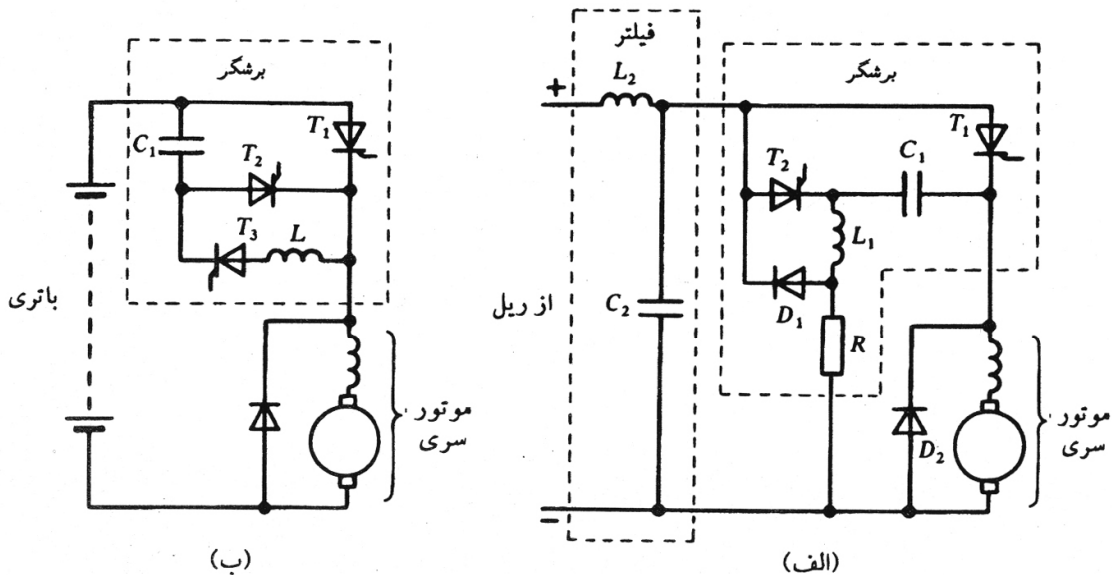


طرح اصلی یک آرایش تریستوری برای لوکوموتیو

نشان داده شده است.

طرز کار برشگرها در شکل (2-3) را مرور میکنیم. در هر دو مدار، تریستور  $T_2$  آتش می‌شود تا خازن برشگر  $C_1$  به اندازه ولتاژ ورودی شارژ شود. آتش کردن تریستور  $T_1$  موتور را به تغذیه ورودی وصل می‌کند و همزمان باعث می‌شود بار روی خازن از طریق پیچ معکوس شود. در شکل (ب 2-3)، تریستور  $T_3$  باید در دوره هدایت  $T_1$  آتش شود. در این جا برای جلوگیری از تخلیه ناخواسته خازن از طریق باتری (ناشی

از حالت‌های گذرای بار)، کاربرد تریستور به جای دیود مناسب‌تر است. در شکل (الف-2-3)، آتش کردن پی‌اچی  $T_1$  و  $T_2$  ولتاژ متوسط موتور را کنترل می‌کند. مقاومت بزرگ  $R$  هرگونه جریان نشتی از طریق  $T_2$  و  $D_1$  را از بین می‌برد و در نتیجه مانع تخلیه خازن می‌شود. در سیستم‌های راه‌آهن حداکثر فرکانس کار برشگر به وسیله محدودیت‌ها و تلفات خود برشگر تعیین می‌شود. برای جلوگیری از موجک‌های (ریپل‌ها) زاید در جریان موتور و در نتیجه گشتاورهای تکان‌دهنده، فرکانس برشگر باید از مقداری خاص بزرگتر باشد. در کاربرد راه‌آهن، فرکانس برشگر باید به گونه‌ای باشد که با کانال‌های رادیو و تلویزیونی و مخابراتی تداخل نداشته باشد. معمولاً از فرکانس 1 KHz استفاده می‌شود.



سیستم‌های برشگر. (الف) نمونه‌ای برای کاربرد ریلی. (ب) نمونه‌ای برای کاربرد جاده‌ای

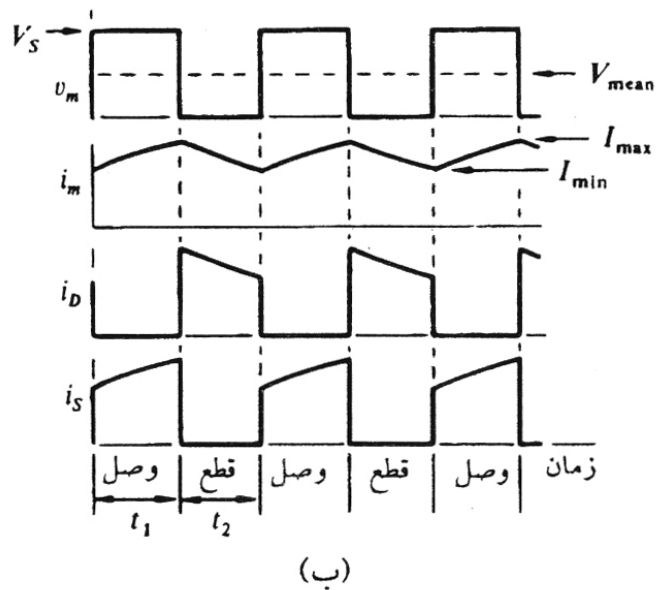
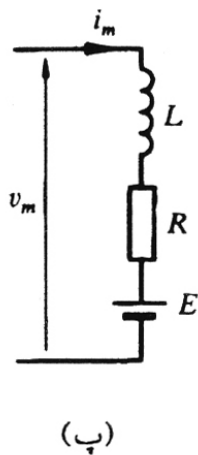
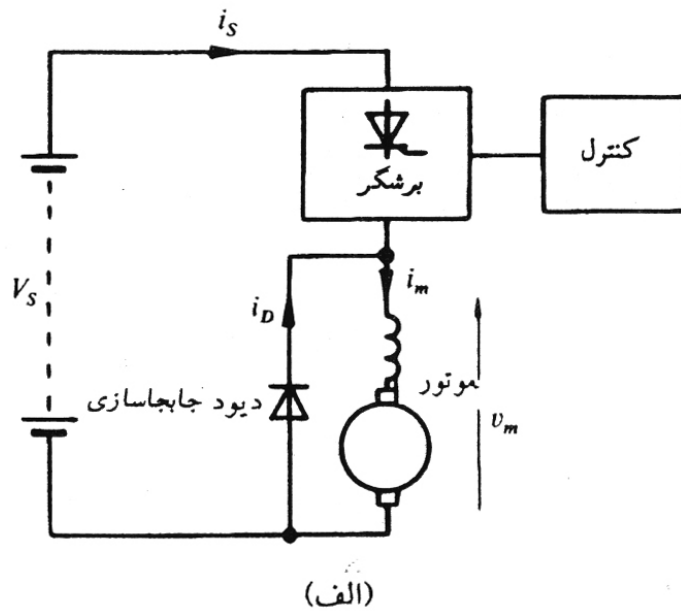
### شکل (2-3)

با توجه به برشگر ایده‌آل شکل (3-3)، ولتاژ موتور شامل یک سری دوره‌های قطع و وصل خواهد بود. چنانچه دوره زمانی وصل را  $t_1$  و دوره زمانی قطع را  $t_2$  در نظر بگیریم، ولتاژ میانگین بار برابر خواهد بود با:

$$(3-1) \quad V_{mean} = V_s \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

جریان موتور به صورت نمایی کم و زیاد می‌شود و جریان گرفته شده از منبع تغذیه پالسی شکل است. در طی دوره‌های قطع برشگر، جریان ناشی از خاصیت سلفی موتور در دیود جابه‌جاسازی می‌چرخد. مدار معادل موتور همانند شکل (پ 3-3) است که دارای القایدگی  $L$ ، مقاومت  $R$  و نیروی ضد محرکه  $E$  می‌باشد. در موتور

سری،  $E$  به جریان موتور بستگی دارد اما می‌توان آن را به ازای تغییرات کوچک جریان تقریباً ثابت فرض نمود.



موتور تغذیه شده با برشگر. (الف) مدار، (ب) شکل موجها، (ب) مدار معادل تقریبی،

## شکل (3-3)

معادله جریان در طی دوره وصل را می توان از روابط پاسخ گذرا نوشت. جریان در

$t = 0$  از  $I_{\min}$  شروع می شود و در بی نهایت می خواهد به  $\frac{(V_s - E)}{R}$  برسد. بنابراین

جریان دارای یک جمله نمایی خواهد بود که از  $\{(V_s - E) \div R\} - I_{\min}$  شروع

می شود. با چشم پوشی از هرگونه تلفات برشگر، رابطه جریان موتور در دوره وصل

برابر خواهد شد با:

$$(3-2) \quad i_m = \frac{V_s - E}{R} - \left( \frac{V_s - E}{R} - I_{\min} \right) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

که در  $t = t_1$ ، جریان  $i_m = I_{\max}$  خواهد شد. به روشی مشابه، طی دوره قطع با

چشم پوشی از تلفات دیود داریم:

$$(3-3) \quad i_m = -\frac{E}{R} + \left( \frac{E}{R} + I_{\max} \right) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

که در  $t = t_2$ ، جریان  $i_m = I_{\min}$  می گردد. جریان میانگین موتور برابر است با:

$$I_{mean} = \frac{V_{mean} - E}{R}$$

بخش کنترل برشگر، باید دارای پس خورد جریان باشد تا به هنگام اضافه بار، برشگر را

خاموش نماید. در شرایط حالت پایدار عادی، زمان وصل با توجه به سرعت مورد نیاز

تعیین می گردد. راه اندازی موتور با دوره وصل شروع می شود و طول دوره وصل به

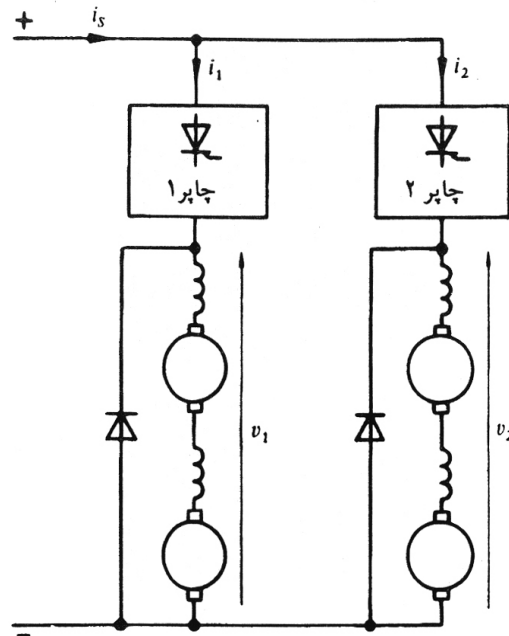
گونه‌ای تعیین می‌گردد که جریان از حد مجاز بیشتر نشود. بنابراین نسبت دوره وصل به قطع (نسبت on/off) به هنگام راه‌اندازی موتور کوچک است و به‌طور خودکار با سرعت گرفتن موتور و افزایش ولتاژ داخلی آن، بزرگتر خواهد شد.

برای مثال در سیستم راه‌آهن با چهار موتور کشنده، می‌توان با به کارگیری دو برشگر به عنوان یک سیستم دو فاز به مزایایی دست یافت. چنین سیستمی در شکل (الف 3-4) نشان داده شده است که طول زمانی دوره وصل دو برشگر همانند شکل موج‌های (ب) و (پ) تنظیم می‌گردد. دیده می‌شود که فرکانس هماهنگ اصلی جریان تغذیه دو برابر فرکانس هر یک از برشگرها می‌باشد و در ولتاژهای خروجی بیشتر (سرعت‌های بالاتر)، جریان تغذیه پیوسته می‌شود.

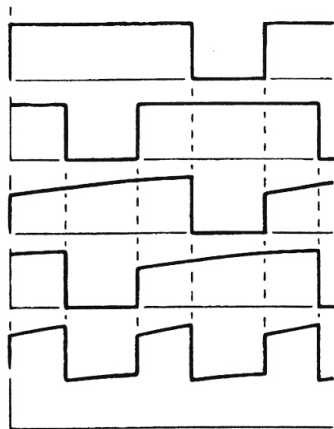
در سیستم‌های دارای برشگر، عمل ترمز کردن پویا را می‌توان با اتصال سرهای آرمیچر به یک مقاومت و ثابت نگه داشتن جریان میدان انجام داد. اما نیاز به حفظ کردن انرژی به ویژه در وسایل نقلیه جاده‌ای باتری‌دار، روش ترمز ژنراتوری را پیشنهاد می‌کند تا انرژی الکتریکی حاصل به باتری برگردد و آن را شارژ نماید. هر یک از سیستم‌های برشگر شکل (2-3) را می‌توان به صورت شکل (5-3) در آورد. به دلیل ثابت بودن فوران، جهت جریان میدان چه در حالت موتوری و چه در حالت ژنراتوری باید ثابت بماند تا توانایی ماشین در تحریک خودی از دست نرود. بنابراین در حالت ژنراتوری، یکی از اتصالات آرمیچر یا میدان باید معکوس گردد. در مدار شکل (الف 5-3) با آتش شدن تریستور  $T_1$ ، همچنان که توان مکانیکی روی محور

به انرژی مغناطیسی ذخیره شده تبدیل می‌شود، جریان سیم‌پیچ میدان و آرمیچر از طریق مدار اتصال کوتاه ایجاد شده، افزایش می‌یابد. پس‌خورد جریان در حلقه آرمیچر، سطح جریانی را تعیین می‌کند که در آن تریستور  $T_2$  باید برای خاموش کردن تریستور  $T_1$  آتش گردد. مقدار  $E$  تولید شده کمتر از  $V_s$  است، تنها مسیر جریان در این حالت، از طریق دیود  $D_2$  و باتری می‌باشد و جریان میراشونده انرژی مغناطیسی را از القایدگی موتور به منبع تغذیه برمی‌گرداند. هنگامی که جریان از یک حد پایین کمتر شود، تریستور  $T_1$  دوباره آتش می‌شود و چرخه همچنان تکرار می‌شود. در سرعت‌های بالا،  $E$  از  $V_s$  بزرگتر می‌شود، در نتیجه دیود  $D_3$  روشن خواهد شد و اتصال کوتاه حاصل در دو سر سیم‌پیچ میدان، جریان  $i_f$  و در نتیجه ولتاژ  $E$  را کاهش می‌دهد. پس‌خورد جریان هر دو سیم‌پیچ میدان و آرمیچر آتش شدن بهینه تریستورهای  $T_1$  و  $T_2$  را تضمین می‌کند.

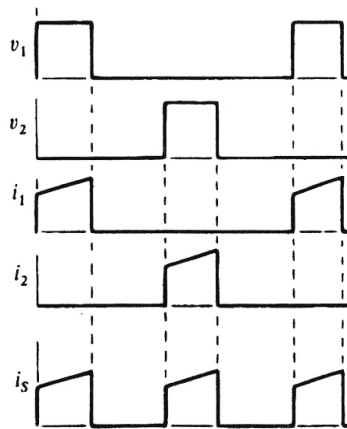




(الف)



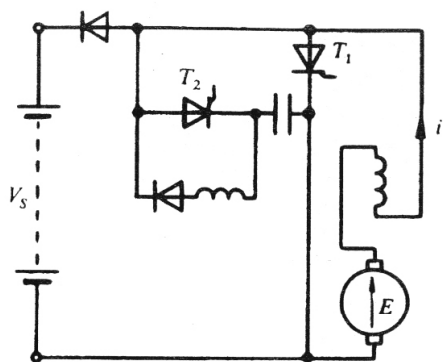
(ب)



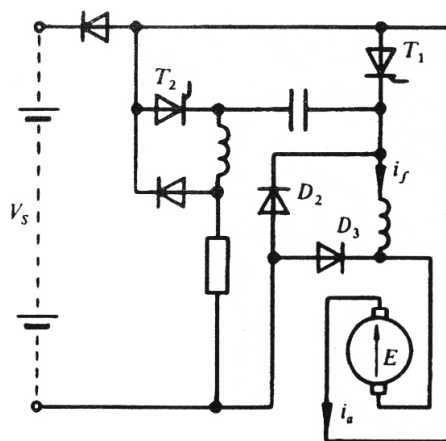
(ب)

برشگر دو فاز (الف) مدار اصلی، (ب) سرعت کم، (پ) سرعت زیاد

شکل (3\_4)



(ب)



(الف)

ترمز در حالت ژنراتوری (الف) مدار شکل الف ۸-۸، (ب) مدار شکل ب ۸-۸

### شکل (3-5)

عملکرد ترمز ژنراتوری شکل (ب 3-5) مانند حالت بالا می‌باشد. ترستور  $T_1$  آتش شده جریان مدار افزایش می‌یابد و انرژی مکانیکی از محور به میدان مغناطیسی منتقل می‌شود. با خاموش شدن ترستور  $T_1$ ، انرژی مغناطیسی ذخیره شده به باتری برمی‌گردد.

در وسایل نقلیه باتری‌دار با ولتاژ تغذیه پایین مانند لودر یا جرثقیل چنگ‌دار، کاربرد ترانزیستورهای قدرت به عنوان وسایل کلیدزنی اقتصادی‌تر از ترستورها می‌باشد،

زیرا نیاز به خازن‌های بزرگ و گران قیمت را برطرف می‌سازد. در این حالت ترانزیستورهای قدرت به عنوان کلید استفاده می‌شود، بنابراین شکل موج‌های دو سر بار همانند برشگرهای تریستوری می‌باشد.

### فصل 3- موتورهای رلوکتانس سوئیچ‌دار (SRM):

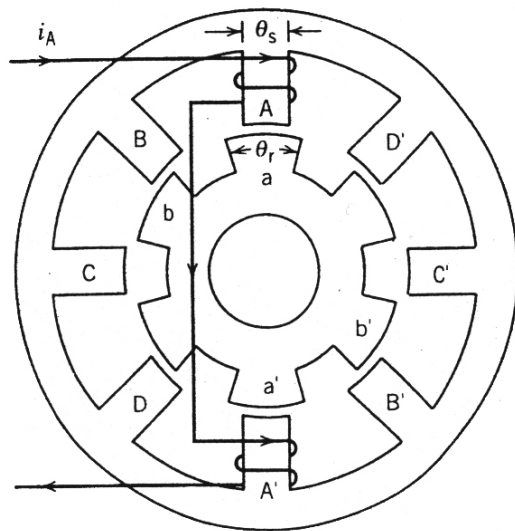
#### معرفی موتور (SRM)

موتورهای رلوکتانس سوئیچ‌دار در زمینه استاتور و رتور برجسته بوده و شاید ساده‌ترین موتورهای الکتریکی از لحاظ ساختار باشند. استاتور از قطب‌های برجسته با سیم‌پیچ‌های تحریک و رتور از قطب‌هایی بدون سیم‌پیچی تشکیل شده است. گشتاور به وسیله تمایل قطب رتور به اتحاد با قطب استاتور برای به حداکثر رساندن پیوند شار استاتور وقتی سیم‌پیچ قطب استاتور به وسیله یک جریان تحریک می‌شود تولید می‌گردد.

#### عملکرد اساسی (SRM):

شکل (3-6) سطح مقطع یک موتور رلوکتانس سوئیچ‌دار را با هشت قطب استاتور و شش قطب رتور نمایش می‌دهد. این موتورها یک جفت قطب رتور کمتر از استاتور دارند. به‌طور کلی قطب‌های متضاد استاتور به‌طور همزمان آنچنان که در شکل (6-6)

3) نمایش داده شده است تحریک می‌شوند. در شکل (3-6) چهار فاز استاتور دارد. اگر فاز A تحریک شود، قطب‌های رتور با نشانه  $a$  و  $a'$  با قطب‌های A و  $A'$  استاتور متحد می‌شوند. اگر سیم‌پیچ فاز B تحریک شود قطب‌های  $b$  و  $b'$  با قطب‌های B و  $B'$  فاز استاتور متحد می‌شوند، و بنابراین رتور در جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کند. از این‌رو، اگر این فازها در توالی  $A, B, C, D, A$  تحریک شوند، رتور در جهت عقربه‌های ساعت حرکت خواهد کرد. رتور تا حدی در همزمانی با میدان استاتور حرکت می‌کند، اما حرکت میدان استاتور و قطب‌های رتور در جهات متضاد است. زمان صحیح تحریک یک سیم‌پیچ فاز به موقعیت رتور بستگی دارد. بنابراین، برای عملکرد مناسب موتور یک سنسور موقعیت رتور موردنیاز است. این تحریک باید به توالی از یک فاز به فاز دیگر هنگامی که رتور حرکت می‌کند باید سوئیچ شود، از این‌روست که این موتور، موتور رلوکتانس سوئیچ‌دار نام گرفته است.



سطح مقطع یک موتور رلوکتانس سوئیچ‌دار (SRM)

## شکل (3-6)

## مدل سازی و تولید گشتاور:

یک مدل ساده شده SRM بر مبنای فرضیات زیر حاصل می شود.

1- هیچ پیوند شار دو جانبه ای میان سیم پیچ های فاز وجود ندارد، یعنی یک فاز در

یک وهله تحریک می شود.

2- مواد مغناطیسی موجود در ماشین خصوصیات خطی B-H دارند.

با این فرضیات، پیوند شار یک سیم پیچ می تواند به وسیله یک اندوکتانس نشان داده

شود. زمانی که رتود تغییر وضعیت می دهد، اندوکتانس یک سیم پیچ فاز تغییر

می کند. موقعیت های مختلف رتور در شکل (3-7) نمایش داده شده است. شکل 1)

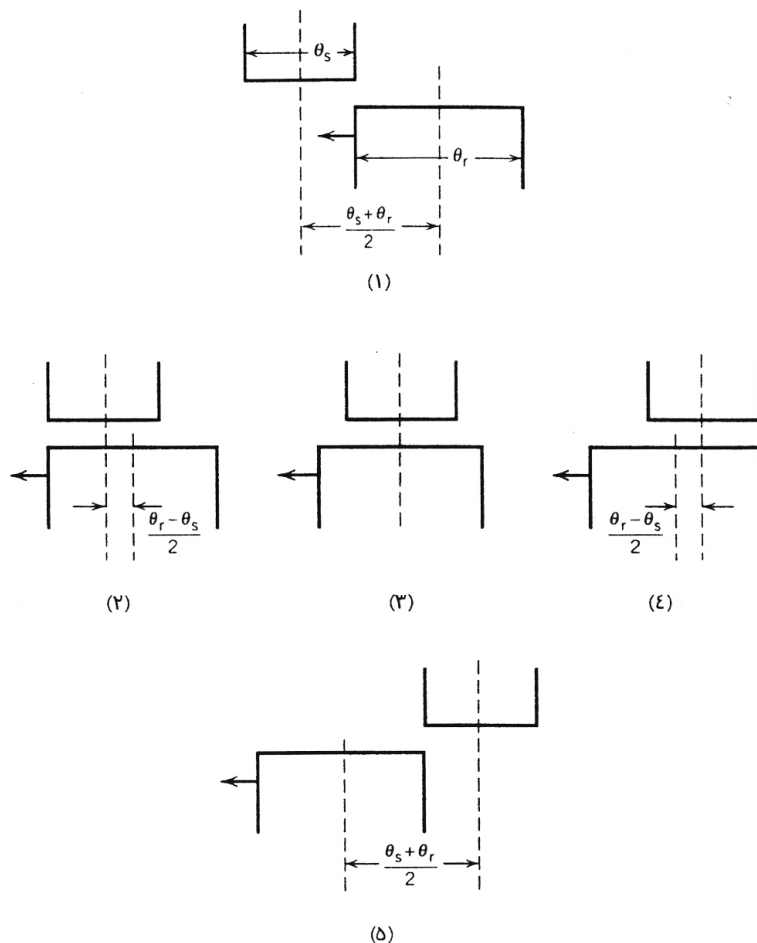
و (3-8) نمودار اندوکتانس فاز A را نشان می دهد. گشتاور تولید شده توسط تحریک

فاز  $k$  به قرار زیر است:

$$T_k = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2} L_k(\theta_k) i_k^2 \right) | i_k \quad (3-4)$$

$$= \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta_k)}{\partial \theta} \quad (3-5)$$

از آنجا که گشتاور با مربع جریان متناسب است، مستقل از جهت جریان می باشد.



موقعیت‌های رتور ۱- اندوکتانس به‌طور خطی از این موقعیت افزایش می‌یابد. ۲-۳- موقعیت‌های اندوکتانس

حداکثر ۴- وقتی رتور از این موقعیت حرکت می‌کند اندوکتانس به‌طور خطی کاهش می‌یابد ۵- در مقابل  $\theta$

شکل (3-7)

گشتاور تولید شده برای یک جریان ثابت از طریق سیم‌پیچ فاز شکل (2 و 3-8) در

شکل (3 و 3-8) نشان داده شده است. میانگین گشتاور تولید شده صفر است. اگر

جریان تنها وقتی به کار گرفته شود که اندوکتانس در حال افزایش است، شکل

(4 و 3-8) گشتاور منفی از میان می‌رود، شکل

(5 و 3-8) و موتور یک میانگین گشتاور مثبت تولید خواهد کرد. بنابراین برای تولید

میانگین گشتاور مثبت مهم است که جریان در یک سیم‌پیچ فاز به کار گرفته شود

زمانی که رتور در یک وضعیت خاص است و در وضعیت از پیش تعیین شده دیگری

خاموش می‌شود.

در یک مدار عملی جریان واقع در سیم‌پیچ فاز شکل موجی مربعی نخواهد داشت.

وقتی یک ولتاژ به یک سیم‌پیچ فاز در موقعیت رتور  $\theta_1$  اعمال می‌شود، جریان با یک

تأخیر زمانی معین مستقر می‌شود. جریان به سرعت برقرار می‌شود زیرا اندوکتانس

پایین است. وقتی ولتاژ در موقعیت رتور  $\theta_2$  برداشته می‌شود، جریان به میزان

آهسته‌تری از میان می‌رود زیرا اندوکتانس بالاست. شکل امواج جریان و امواج

گشتاور متناسب با آن نیز در شکل (1 و 3-9) به نمایش درآمده است. اگر گشتاور

منفی حذف شود، ولتاژ حاصله از سیم‌پیچ فاز زودتر از میان رفته است، چنانکه در

شکل (2 و 3-9) به نمایش درآمده است.

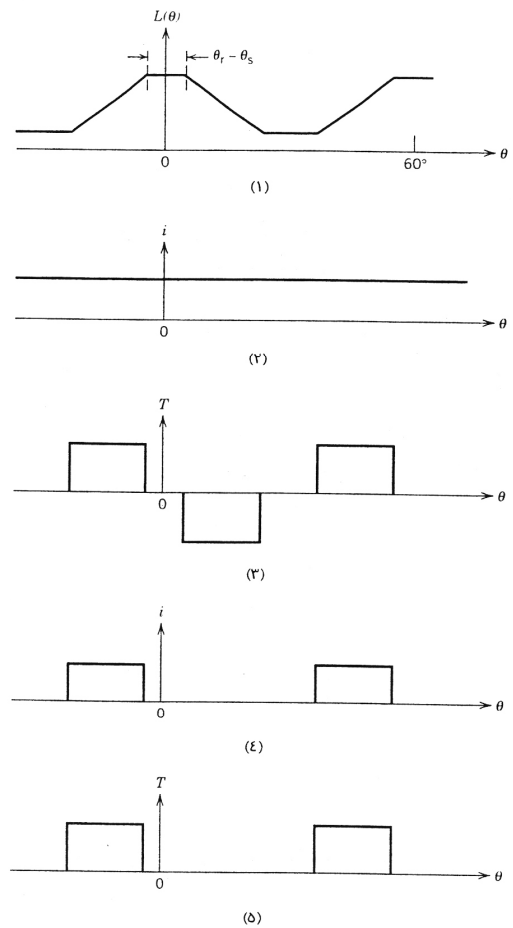
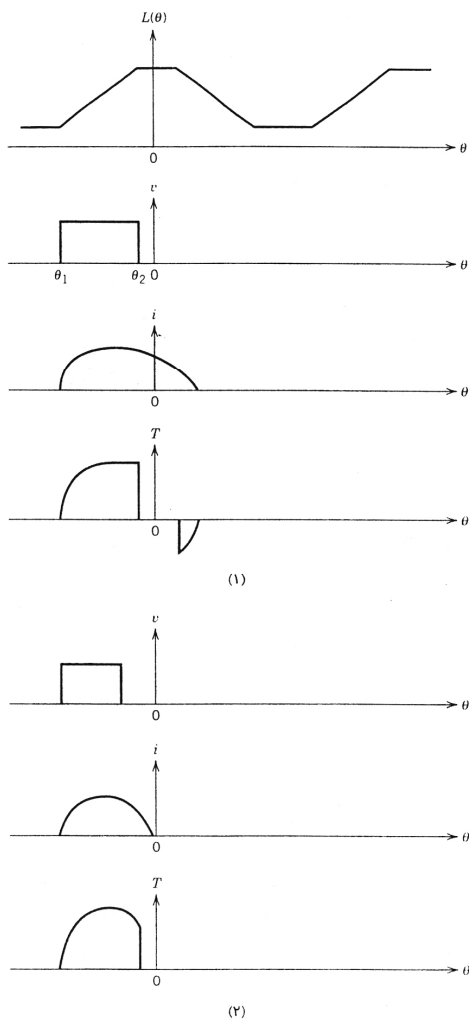
رابطه ولتاژ - جریان یک سیم‌پیچ فاز می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$V_k = Ri_k + \frac{d}{dt} \lambda_k \quad (3-6)$$

$$= Ri_k + \frac{d}{dt} (L_k(\theta_k) i_k) \quad (3-7)$$

$$= Ri_k + i_k \frac{dL_k(\theta_k)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + L_k(\theta_k) \frac{di_k}{dt} \quad (3-8)$$

$$= (R + \frac{dL(\theta_k)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}) i_k + L_k(\theta_k) \frac{di_k}{dt} \quad (3-9)$$



1- تغییر اندوکتانس یا توجه به موقعیت رتور 2- تحریک جریان ثابت 3-  $T$  در مقابل  $\theta$  4- تحریک جریان پال 5-  $T$  در مقابل  $\theta$

1- مشخصات وقتی که ولتاژ در طول افزایش اندوکتانس اعمال می شود 2- مشخصات زمانی که ولتاژ زودتر از موقعیت 1 حرکت می کند

شکل ( 2-8 )



## فصل 4- موتورهای القایی - قفس سنجابی

### کاربردهای مختلف موتورهای قفس سنجابی

در یک موتور قفس سنجابی ، در مرحله طراحی پارامترهای مختلفی بایستی انتخاب شوند. یک موتور با مقاومت رتور کوچک ترجیح داده می شود چونکه مشخصه های کاری ماشین بهبود می یابد . مقاومت کوچک منجر به لغزش اسمی کوچک می کند که این امر موجب بازدهی بالا و رگولاسیون سرعت خوب می شود . با اینحال ، جریان راه اندازی را بزرگ و گشتاور راه اندازی کوچک می شود . هر افزایشی در مقاومت رتور مشخصه راه اندازی را بهبود می دهد زیرا جریان راه اندازی کاهش و گشتاور راه اندازی افزایش می یابد اما مشخصه های کار عادی ماشین را خراب می کند. گشتاور شکست معیاری برای سنجش توانایی موتور در مقابل اضافه بارهای کوتاه مدت است. رتوری با راکتانس کوچک یک گشتاور شکست بزرگ را ایجاد می کند

ولی در مقابل افزایش جریان راه‌اندازی را بدنبال دارد. پس ملزومات طراحی برای کار عادی و دائمی موتور، و در مرحله راه‌اندازی متضاد هستند.

در یک موتور القایی قفس سنجایی، یک راه‌اندازی خوب همراه با عملکرد دائمی عادی هنگامی بدست می‌آید که مقاومت رتور بطور اتوماتیک با سرعت تغییر کند، بطوریکه در حالت توقف مقاومت بزرگ و با افزایش سرعت کاهش یابد و در سرعت‌های نزدیک سرعت نامی مقدار آن کاملاً کوچک شود. چنین تغییراتی با وابسته کردن مقدار مقاومت رتور به فرکانس رتور تحقق می‌یابد. در حالت توقف، فرکانس رتور بزرگ و برابر با فرکانس استاتور است. با افزایش سرعت فرکانس رتور کاهش می‌یابد و در سرعت نامی به محدوده 2 تا 10 درصد فرکانس استاتور می‌رسد. رتور بگونه‌ای طراحی می‌شود که مقاومت آن در فرکانس استاتور بزرگ باشد و با کاهش فرکانس رتور، مقاومت کم می‌شود و در فرکانسی برابر 2 تا 10 درصد فرکانس استاتور کوچک می‌شود. این نوع تغییرات مقاومت رتور با استفاده از رتور با میله‌های عمیق یا رتور قفس سنجایی دابل بدست می‌آید. رتور قفس سنجایی با شیار عمیق، دارای شیارهای عمیق باریک است.

می‌توان تصور نمود که هادی داخل شیار توسط چند هادی داخل شیار توسط چند هادی نازک که بصورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند جایگزین بشوند. در سرعت‌های کم وقتی که فرکانس رتور بالاست تفاوت راکتانس‌های هادی‌ها باعث

می‌شود که توزیع جریان در هادی بالا و پایین متفاوت گردد. بطوریکه هادی بالا بیشترین جریان و هادی پایین کمترین جریان را از خود عبور می‌دهند.

به علت عدم توزیع یکنواخت جریان، مقاومت موثر هادی‌ها افزایش و راکتانس‌های آنها کاهش می‌یابد. زمانیکه سرعت به نزدیکی سرعت نامی می‌رسد بدلیل کاهش فرکانس رتور، راکتانس لایه‌های پائینی تقلیل می‌یابد. لذا توزیع جریان داخل شیار عمدتاً ناشی از مقاومت معادل رتور کاهش می‌یابد.

رتور قفس سنجابی دوبل شامل 2 هادی اتصال کوتاه شده در هر شیار است.

### طبقه بندی موتورهای قفس سنجابی

موتورهای قفس سنجابی القائی سه فاز بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. متناسب با هر کار برد، مشخصه‌های خاصی از سرعت-گشتاور و سرعت جریان لازم است. با انتخاب مناسب رتور از نظر مقاومت و راکتانس و میزان عمق شیار و یا دوبل بودن آن می‌توان موتوری طراحی نمود که مشخصه‌های مورد نیاز را داشته باشد. موتورهای با ظرفیت بالا برای کار بردهای خاص طراحی می‌شوند. در موتورهای متوسط و کوچک (در حدود کمتر از 150 کیلو وات) طراحی بر اساس طبقه بندی‌های استاندارد انجام می‌شود. استانداردهای فوق با توجه به مشخصه‌های سرعت-گشتاور و سرعت-جریان در طول زمان و برای برآورده شدن نیازهای اکثر موتورهای القائی تعیین شده‌اند. در کار بردهای مهندسی، انتخاب بگونه‌ای انجام

می شود که مشخصه موتور به مشخصه مورد نیاز نزدیکترین حالت باشد. برخی از کشورها استانداردهای خاصی برای خود وضع نموده اند.

یک موتور کلاس A، دارای رتوری با مقاومت و راکتانس کم است و لغزش کوچک، بازدهی و ضریب قدرت بالا در بار نامی، گشتاور شکست بالا، گشتاور راه انداز معمولی، و جریان راه اندازی بالایی دارد. موتور کلاس A، رفتار مناسبی در حالت کار دائم از خود نشان میدهد. ولی رفتار راه اندازی مطلوبی ندارد. لغزش با ر کامل از 2٪ در موتورهای با ظرفیت بالا تا 4٪ در موتورهای با ظرفیت پائین تغییر می کند. گشتاور شکست دو برابر گشتاور نامی است. محدوده گشتاور راه اندازی از گشتاور نامی برای موتورهای بزرگ تا دو برابر گشتاور نامی برای موتورهای کوچک می باشد در موتورهای بزرگ جریان راه اندازی 8 برابر جریان نامی و در موتورهای کوچک 5 برابر جریان نامی است.

یک موتور کلاس B، نیز دارای لغزش نامی کوچک و گشتاور راه اندازی معمولی است. جریان راه انداز موتور کلاس B، 70 تا 80 درصد جریان راه اندازی موتور کلاس A مشابه است. زیرا راکتانس رتور یک موتور کلاس B بزرگتر از راکتانس موتور مشابه کلاس A است. گشتاور راه اندازی با استفاده از یک رتور شیار عمیق یا دوپل فراهم می شود. بعلا افزایش راکتانس پراکندگی رتور، گشتاور شکست از 2

برابر گشتاور نامی کمی کمتر است. همچنین ضریب قدرت در بار نامی کمی تقلیل می یابد.

در موتور کلاس C از رتور دوپل استفاده می شود. مقاومت رتور در لحظه راه اندازی از مقاومت موتور مشابه کلاس B بیشتر می باشد. همچنین جریان راه اندازی کوچکی دارد. در موتور کلاس C در مقایسه با کلاس B مشابه گشتاور شکست کوچکتر، راندمان بار نامی کمتر و لغزش بار نامی بزرگتر (لغزش کمتر از 5%) است.

موتور قفس سنجابی کلاس D به صورت تک شیار با مقاومت بزرگ و راکتانس کم طراحی می شود. گشتاور راه اندازی بالا (در حدود 3 تا 4 برابر گشتاور نامی) و جریان راه اندازی آن کوچک است.

ولی علیرغم اصلاح مشخصه در حالت راه اندازی مشخصه حالت کار دائم نامناسبی را از خود نشان می دهد. از جمله می توان به لغزش بار نامی بالا (5 الی 50 درصد) و راندمان کاری کم اشاره نمود.

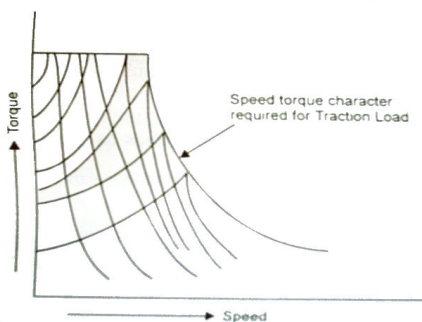
کلاس F ترکیبی از مشخصه های مناسب در کار دائم (لغزش 2 الی 4 درصد) و جریان راه اندازی کوچک را دارد. ولی در مقابل گشتاور راه انداز و شکست کمی را ایجاد می کند. به همین دلیل، بر خلاف موتورهای قفس سنجابی کار برد وسیعی ندارد.

## کنترل موتورهای القائی

یک موتور القائی در رنجهای بزرگ گشتاور- سرعت به صورت اقتصادی عمل می کند

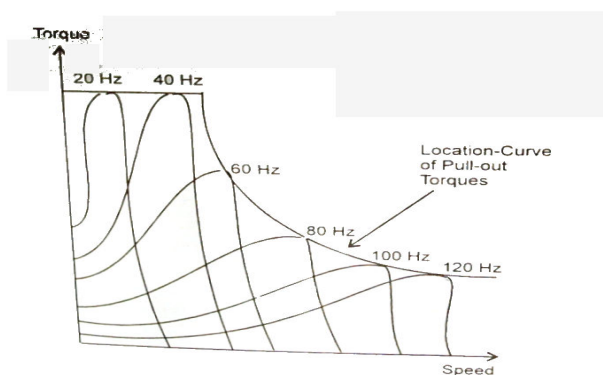
همانطور که از شکل مشخص است گشتاور راه اندازی لازم نباید بیشتر از حداکثر گشتاور تولیدی موتور باشد.

هر مشخصه گشتاور سرعتی قادر به برآورده سازی نیازهای بار نیست . مشخصه گشتاور- سرعت بار در شکل (3-10) نشان داده شده است . همانطور که از مشخصه گشتاور- سرعت دیده می شود برای حفظ گشتاور راه اندازی در حد ماکزیمم قابل دسترسی ولتاژ و فرکانس را همزمان تغییر می دهند تا این که شکل (3-10) تغییر مشخصه گشتاور- سرعت بار همراه مشخصه موتور با کنترل PWM نسبت ولتاژ به فرکانس ثابت بماند به عبارت دیگر فوران ثابت بماند .



شکل (3-10)

با انجام چنین عملی لغزشی که در آن گشتاور حداکثر خواهد شد تغییر می کند و EV با چنین موتوری به راحتی قادر خواهد بود گشتاور بزرگ راه اندازی، تولید کند، حال اگر لازم باشد مدت زمان بیشتری این گشتاور زیاد تامین شود نسبت ولتاژ به فرکانس در بازه زمانی بیشتری ثابت نگه داشته می شود. بعد از طی شدن زمان راه اندازی و با دور گیری موتورهای و لکوموتیوها لازم است برای تطابق مشخصه بار و موتور، گشتاور کاهش پیدا کند در موتورهای القایی برای دستیابی به چنین هدفی کافی است ولتاژ را ثابت نگه داریم و فرکانس را افزایش دهیم که این اعمال به طور واضح در شکل (3-11) نشان داده شده است.



شکل (3-11) مشخصه گشتاور سرعت موتورهای القایی با کنترل ولتاژ و فرکانس

کنترل چهار ربعی (ناحیه ای)

بنابر توضیحات گذشته، نیاز است که سیستم کنترل ولتاژ و فرکانس متغییری را برای تغذیه موتورهای کشنده ایجاد کند برای برآورده سازی این نیاز از منبع ولتاژ

اینورتوری (VSI) که تغذیه آن از ولتاژ 25KV که توسط یکسوسازها و فیلترهای خازنی به ولتاژ DC تبدیل شده، تامین می گردد.

چنین حالتی برای حالتی استفاده می شود که در ناحیه موتوری هستیم اما با ایجاد شرایط ترمز مولدی نیاز است که اینورتور و یکسوسازها در جهت مخالف عمل کنند تا توان به سیستم انرژی بازگشت داده شود پس سیستم کنترل باید قادر باشد در چند ناحیه کار کند.

از آنجا که به خاطر سلفی بودن موتور بعد از صادر شدن فرمان قطع به تریستور GTO جریان تمایل دارد موقعیت خود را حفظ کند به همین خاطر یک ولتاژ معکوس در دو سر موتور ظاهر می شود که مشکل زا خواهد بود به همین خاطر یک دیود در دو سر موتور طوری بسته می شود که در حالت کار عادی به صورت معکوس بایاس شده و قطع باشد اما در همان لحظه که قرار است یک ولتاژ معکوس پدید آید وارد مدار شده و دو سر موتور را اتصال کوتاه می کند. البته این سیستم در موتورهای عادی استفاده می شود. کنار GTO یک مدار کنترلی و (اسنابر) نیاز است تا اینکه اتصال پیوند تریستور را در مقابل تغییرات ناگهانی جریان و ولتاژ حفاظت کند. تغییرات زیاد می تواند علاوه بر صدمه زدن به تریستور موجب روشن شدن خود به خودی تریستور شود.

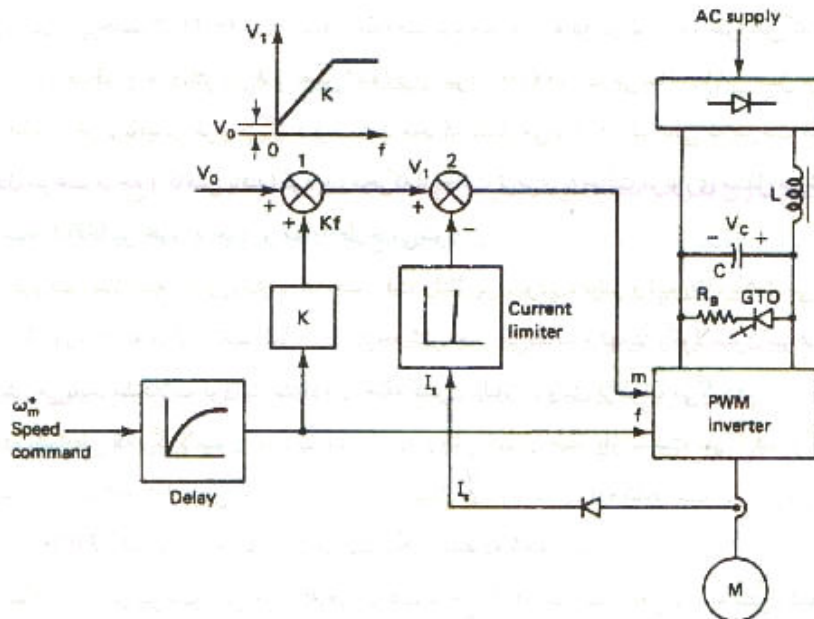
**کنترل PWM**



برای رسیدن به شکل موج کاملا سینوسی در خروجی لازم است که سطح هارمونیک اصلی در محدوده مجازی نگهداری شود از تکنیک (PWM) برای کنترل GTO استفاده می گردد .

کنترل پالسها که چندین بار در خلال نیم سیکل GTO را روشن یا خاموش می کند توسط مقایسه یک موج حامل مثلثی با یک موج سینوسی مدوله شده انجام می گیرد. به منظور اطمینان از اینکه موتور در نقطه ای که بیشترین بازده را دارد کار می کند ، سرعت رتور به صورت پیوسته توسط سنسوری که به موتور وصل است مشاهده می گردد .

این اطلاعات به مقایسه کننده کنترل کشش برگشت ( فیدبک ) داده می شود . خروجی مقایسه کننده وارد قسمت پردازش شده و فرکانس منبع سه فاز لازم برای تامین گشتاور- سرعت خروجی لازم مشخص می گردد.



شکل ( 3-12 )

### طراحی بهینه موتور القایی برای خودروی برقی

روشهای بهینه‌سازی مختلفی برای طراحی بهینه موتورهای القایی به کار رفته‌اند. این روشها عبارتند از: جستجوی بی‌قاعده (RS)، جستجوی مستقیم (DS) یا هوک-جیوز (HJ)، ساده (S)، پاول (P)، روش دیویدن-فلیچر-پاول (DFP)، روش تندترین شیب فروشو (SD)، جستجوی مستقیم براساس محور چرخان-روزنبرگ

(Rosenbrock)، گرادیان مرتبه اول (FOG)، مونیکا (M)، حداقل سازی غیرمقید ترتیبی (SUMT)، برنامه ریزی درجه دوم ترتیبی (SQP)، برنامه ریزی غیرخطی (NP)، استراتژی تکامل (ES)، الگوریتم ژنتیک Niching (NG) و بهینه سازی براساس شبکه عصبی (NNB).

جدول 1 نتایج حاصل از پنج روش بهینه سازی مختلف با تابع هدف قیمت مواد مصرفی، در مورد یک موتور القائی 7/5 کیلوواتی و چهار قطب را مقایسه می کند.

جدول 1: مقایسه نتایج طراحی بهینه پنج روش مختلف.

مقادیر	قید	اولیه	روش SD	روش DFP	روش P	روش HJ	روش RS
گشتاور شکست (pu)	2/2	2/59	2/01	2/7	2/05	2/12	2/22
گشتاور راه اندازی (pu)	1/5	2/28	1/85	1/51	1/91	1/95	2/23
جریان راه اندازی (A)	64	56/7	51/7	48/5	50/9	52	52/2
ضریب قدرت	-0/845	-0/851	-0/85	-0/88	-0/85	-0/85	-0/855
لغزش (%)	4	2/52	2/45	2/22	2/61	2/5	2/82
افزایش درجه حرارت (°C)	75	57/25	64/3	72/5	74/96	74/05	62/3
قیمت	-	362/19	331/05	292/53	265/58	263/8	325/97
زمان همگرایی (%)	-	-	100	50	50	15	25
تعداد تکرار	-	-	11	30	4	3	9

مقایسه نتایج جدول 1 نشان می دهد که روش جستجوی مستقیم (HJ) عملکرد بهتری را دارد. بر این اساس و نیز توصیه های مؤلفان مختلف روش HJ جهت طراحی بهینه موتور القائی خودروی برقی انتخاب شده است.

علاوه بر پارامترهای ابعادی، کارایی EV وابسته به مقادیر اسمی و پارامترهای ثابت آن نیز می باشد. این موارد شامل توان، ولتاژ، سرعت و گشتاور اسمی، حداکثر سرعت

و گشتاور، تعداد قطبها و شکل و تعداد شیارهاست. توان اسمی، حداکثر سرعت، گشتاورهای اسمی و حداکثر براساس کارایی موردنظر از EV تعیین می‌شوند. ولتاژ سیستم براساس امکانات موجود انتخاب می‌شود. انتخاب ولتاژ زیادتر امکان کارایی بهتر را فراهم می‌سازد، با این وجود بعضی از مشکلات مثل محدودیت ولتاژ باتریها این امکان را محدود می‌کنند. تعداد شیارها براساس استانداردهای طراحی قابل محاسبه است. سرعت اسمی، تعداد قطبها و شکل شیارها باید دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرند. براین اساس بهترین طرح قابل حصول است.

در این مقاله تأثیر تعداد قطب، سرعت اسمی و شکل شیارها بر روی کارایی موتور القائی سه فاز EV مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. موتور القائی سه فاز 15 hp برای EV با مقادیر مختلفی از این پارامترها به صورت بهینه طراحی شده و سرانجام طرح بهینه نهایی معرفی می‌شود. مطالب شامل شش بخش است. در بخش دوم تأثیر تعداد قطب، سرعت اسمی و شکل شیارها بر روی کارایی موتور مطالعه می‌شود. در بخش سوم طریقه محاسبه کارایی موتور ارائه می‌گردد. در بخش چهارم طراحی بهینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش پنجم یک موتور نمونه 15 hp طراحی شده و تأثیر پارامترهای فوق‌الذکر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. بالاخره در بخش آخر نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

**تأثیر تعداد قطب، نوع شیار و سرعت اسمی بر روی کارایی موتور:**

موتور القائی EV باید در محدوده وسیعی از سرعت (صفر تا چندین هزار دو در دقیقه) کار کند. ضمناً سایر ملزومات EV مثل گشتاور کافی در حالت شتاب‌گیری یا کار با سرعت ثابت، ثابت زمانی مکانیکی کوچک (دینامیک سریع)، سر و صدای کم و غیره را باید برآورد. با توجه به محدودیت انرژی باطری باید از انرژی موجود بهترین استفاده به عمل آید، لذا باید بازده زیاد داشته و طرح آن به گونه‌ای باشد که نوسان گشتاور (ناشی از هارمونیک‌های اعمالی از منبع تغذیه اینورتری) حداقل شده و در نهایت سر و صدای کمی داشته باشد. جهت داشتن دینامیک سریع، سیستم باید تا حد امکان کم وزن باشد. البته می‌توان هدف حجم بهینه را برای اشغال کمترین فضا در نظر گرفت. لذا طرح آن متفاوت با طرح موتورهای القائی استاندارد صنعتی است. برای محدود کردن هارمونیک‌های جریان در تغذیه با VSI باید اندوکتانس نشت زیاد باشد، اما نه تا آن حد که در سرعت‌های مختلف موتور به ناحیه کار ناپایدار وارد شود. برای کاهش فرکانس کلیدزنی، باید تعداد قطبها کم انتخاب شود. برای کاهش اثر پوستی و تلفات مربوطه نباید از شیارهای عمیق استفاده کرد، چرا که اصولاً موتور با تغذیه اینورتری مسئله گشتاور راه‌اندازی نخواهد داشت، پس لزومی به استفاده از شیارهای عمیق روتور نیست. به منظور افزایش شتاب در سرعت‌گیری و همچنین شتاب منفی در حالت ترمزگیری و نیز کاهش مقادیر اسمی عناصر مبدل قدرت (اینورتر)، شعاع روتور تا حد امکان باید کوچک بوده و در عوض طول آن بزرگ انتخاب شود. چون دامنه ولتاژ تغذیه به علت استفاده از باطری

محدود است، لذا برای قدرت مشخصی جریان زیاد و هادیها قطور بوده و فضای شیاری بزرگی لازم است. با توجه به سرعت زیاد موتور باید قطر روتور کوچک باشد، لذا تعداد شیار بر قطب بر فاز کوچک است. بدین ترتیب تعداد قطبهای موتور بین 2 و 4 انتخاب می‌شود.

با توجه به فرکانس زیاد در موتور می‌توان با انتخاب مناسب شکل شیار روتور اثر پوستی و تلفات ناشی از آن را کاهش داد. به این جهت معمولاً در موتورهای القائی سرعت زیاد (مثل EV) شکل شیار روتور مستطیلی است که طول و عرض آن خیلی به هم نزدیک هستند. ضمناً جهت توزیع بهتر فلو در قسمت‌های مختلف شیار و کاهش تلفات هارمونیک، می‌توان به طراحی دقیقتر شکل شیار پرداخت.

حداکثر سرعت موتور وابسته به سیستم انتقال قدرت انتخابی و حداکثر سرعت خودرو است، ولی سرعت اسمی و مبنا (سرعت مبنا با سرعت اسمی مساوی انتخاب می‌شود) قطب، نوع شیار، تلفات و سایر شرایط کارآیی موتور و نیز عملکرد موتور در حالات گذرا انتخاب می‌شود. انتخاب سرعت اسمی با توجه به فرکانس کار ماشین در این سرعت مستقیماً بر تلفات کلیدزنی و هارمونیکها تأثیر دارد. از طرفی بر روی ممان اینرسی موتور نیز مؤثر خواهد بود، لذا انتخاب بهینه سرعت اسمی می‌تواند شرایط کار بهینه هم در حالت دائم و هم در حالات گذرا را برای موتور و در نهایت برای EV فراهم آورد.

## محاسبه مشخصات کارآیی:

در تغذیه اینورتری موتور القائی علاوه بر هارمونیک اول (اصلی) هارمونیک‌های فرد نیز ظاهر می‌شوند و از این رو مشخصات کارآیی این موتور با موتورهای با تغذیه سینوسی متفاوت است. از جمله مشخصات کارآیی بازده موتور است. مهمترین تلفات در موتور القائی با تغذیه اینورتری را می‌توان به شکل زیر طبقه‌بندی و محاسبه نمود (البته تلفات دیگری نیز هست که در نرم‌افزار طراحی مدنظر قرار گرفته‌اند ولی در اینجا جهت سادگی از ذکر آنها خودداری می‌شود):

## تلفات هسته:

کل تلفات هسته در یک موتور القائی اینورتری را می‌توان به کمک رابطه (3-10)

محاسبه کرد:

$$P_c = \sum_m P_{cm} = \sum_m (P_{hm} + P_{em}) \quad (3-10)$$

هرکدام از تلفات فوکو و

هیستریزیس هارمونیک‌ها ابتدا در واحد وزن قسمتهای مختلف مدار مغناطیسی موتور (هسته) مطابق روابط زیر محاسبه شده و سپس با ضرب در وزن قسمت مربوطه تلفات هارمونیکی هرکدام از این قسمتها به تفکیک برای هرکدام از هارمونیکها

محاسبه می‌شود:

$$P_{hm} = \sum_i P_{hmi} = \sum_i G_i P_{hmi} = \sum_i G_i K_h \sigma_h f_m B_{mni}^k \quad (3-11)$$

$$P_{em} = \sum_i P_{emi} = \sum_i G_i P_{emi} = \sum_i G_i K_e I_m^x f_m B_{mni}^x K_{EM} / \rho_i \quad (3-12)$$

### تلفات اهمی استاتور و روتور:

کل تلفات اهمی استاتور و روتور، از مجموع تلفات اهمی مربوط به هارمونیک‌های مختلف جریان به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{\Omega} = \sum_m 3(R_{sm} I_{sm}^2 + R_{rm} I_{rm}^2) \quad (3-13)$$

### تلفات مکانیکی (اصطکاک، تهویه و مقاومت هوا):

به کمک رابطه زیر می‌توان این تلفات را در سرعت‌های مختلف محاسبه کرد:

$$P_{fv} = \lambda D_r (L + \cdot / \lambda \omega) v_a^2 \quad (3-14)$$

سرانجام کل تلفات و بازده عبارتند از:

$$P_{loss} = P_{\Omega} + P_c + P_{fv} + (P_p + P_k + P_z + P_{bl}) \quad (3-15)$$

$$P_{in} = \sum_m 3 V_{sm} I_{sm} \cos \phi_m$$

$$\eta = (P_{in} - P_{loss}) / P_{in}$$



$$(3-16)$$

$$(3-17)$$

گشتاور اسمی و گشتاورهای شکست در سرعتهای اسمی و حداکثر:

روابط زیر مقادیر این گشتاورها را بدست می دهند:

$$T_n = \sum_m \sqrt{\Delta P R_{rm} I_{rm}^2} / (m f_m s_m)$$

$$T_{pb} = \sqrt{\Delta E_{\sigma} / (X_r \omega_{\sigma})} = T_n R_r / X_r \quad (3-18)$$

$$T_{pm} = (f_b / f_{max})^2 T_{pb} \quad (3-19)$$

$$(3-20)$$

ثابت اینرسی:

این ثابت که تعیین کننده شتابهای مثبت و منفی موتور است، به صورت زیر محاسبه

می شود:

$$H = \omega J \omega_r^2 / Q \quad (3-21)$$

طراحی بهینه موتور:

روشهای متعددی جهت طراحی بهینه موتورهای القایی ارائه شده اند. که کمابیش در

مورد طراحی بهینه موتورهای القایی EV نیز بکار می روند. در مقاله حاضر روش

MHJ جهت این کار استفاده شده است. در این قسمت فقط به ذکر توابع هدف، قیود و متغیرهای بهینه‌سازی موتور القائی EV پرداخته می‌شود.

دیدگاه‌های متفاوتی در طراحی بهینه موتور وجود دارند، که عبارتند از: حداقل هزینه، حداکثر بازده، حداقل حجم یا وزن، کارایی خود (مثل لغزش کم، ضریب قدرت زیاد و...) و دیدگاه چندوجهی (ترکیب دیدگاه‌های مختلف). در خودروی برقی با توجه به محدودیت انرژی و توان باطری باید حداکثر استفاده از آن صورت گیرد، لذا دیدگاه بازده حتماً مدنظر قرار دارد. ضمناً جهت کاهش وزن کل خودرو و به عبارتی کاهش مصرف انرژی باید موتور کم وزن باشد، لذا به نظر می‌رسد که در مورد طراحی بهینه خودروی برقی دیدگاه چندوجهی با ترکیب بازده و وزن باید به عنوان تابع هدف برگزیده شود. البته می‌توان طراحی را با ترکیبهای مختلفی از این دیدگاهها انجام داده و بهترین آنها را که منتهی به مناسبترین نتیجه مورد انتظار می‌شود به عنوان طرح بهینه برگزید. در مقاله حاضر با توجه به اینکه هدف بیشتر مقایسه تأثیر انتخاب تعداد قطب، نوع شیار و سرعت اسمی در عملکرد پایدار و گذرای موتور است، فقط به تابع بازده بسنده شده است.

در بهینه‌سازی طراحی هدفهای دیگری نیز دنبال می‌شوند که آن بهتر کردن یا حداقل حفظ کارایی مطلوب برای موتور است، که به عنوان اهداف ثانویه می‌توان از آنها نام برد. از آنجا که بزرگ کردن تابع هدف (تابع چندوجهی با اجزاء متنوع و زیاد) باعث کندی عمل بهینه‌سازی و محدودیت گستره جستجوی نرم‌افزار بهینه‌ساز شده

و احتمالاً نتایج چندان مطلوبی حاصل نمی‌شود، لذا این اهداف ثانویه مستقیماً در تابع هدف گنجانده نشده، بلکه به صورت قیودی به فرآیند بهینه‌سازی اعمال می‌شوند. مهمترین این قیود که در فصل حاضر مدنظر قرار گرفته: حداقل ضریب قدرت (0/85)، حداکثر افزایش درجه حرارت ( $75^{\circ}C$ )، حداقل گشتاور تولیدی، حداقل نسبت گشتاور شکست به اسمی در سرعت اسمی (1/5)، حداقل گشتاور شکست در حداکثر سرعت ( $3/5Nm$ )، حداکثر سرعت محیطی روتور ( $120 / s$ )، حداکثر ثابت زمانی روتور (4 s)، حداکثر چگالی فلوی دندانۀ استاتور (1/2 T)، حداکثر قیمت تمام شده (در صورت لزوم) و حداکثر وزن یا حجم (در صورتی که جزء تابع هدف نباشد).

تعداد متغیرهای طراحی موتور القائی زیادند. غالباً هرچه تعداد متغیرهای بهینه‌سازی بیشتر باشد نتیجه بهینه‌سازی بهتر است، ولی در عوض سرعت همگرایی بسیار کم شده و نیز کنترل عمل بهینه‌سازی مشکل خواهد بود. لذا سعی می‌شود تا حد امکان از افزایش بیش از حد تعداد متغیرها جلوگیری شده و ضمناً متغیرهایی به عنوان متغیرهای اصلی بهینه‌سازی استفاده شوند که تأثیر بیشتری بر روی طرح بهینه دارند. براین اساس در مقاله حاضر این متغیرها عبارتند از: قطر داخلی استاتور، طول هسته، پهنا و عمق شیار استاتور، پهنا و عمق شیار روتور، عمق طوقه‌های استاتور و روتور، طول فاصله هوایی، سطح مقطع حلقه‌های انتهایی روتور و متوسط چگالی فلوی فاصله هوایی.

علاوه بر آن متغیرها، متغیرهای دیگری از جمله ولتاژ کار، سرعت‌های اسمی و حداکثر، تعداد شیارهای استاتور و روتور، نوع شیارهای استاتور و روتور، و تعداد قطبها را نیز می‌توان ملحوظ کرد. در فصل حاضر ولتاژ کار موتور با توجه به محدودیت ولتاژ باتریها و سایر قيود برابر  $96\text{ V}$  انتخاب شده است. حداکثر سرعت موتور با توجه به حداکثر سرعت درخواستی خودرو  $9000\text{ rpm}$  اختیار شده است. تعداد شیارهای استاتور و روتور با تغییر و تکرار بهینه‌سازی به ترتیب 18 و 13 برای موتور 2 قطب، و 24 و 18 برای موتور 4 قطب انتخاب شده‌اند. سرعت اسمی، نوع شیارها و تعداد قطبها از جمله مواردی است که در فصل بیشتر به اثر آنها پرداخته می‌شود و طرحهای مختلف بهینه با مقادیر مختلف سرعت اسمی، نوع شیار و تعداد قطب مورد بررسی قرار گرفته و کارآیی آنها مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرد و در نهایت براساس مقایسه‌های به عمل آمده بهترین طرح ارائه می‌شود.

جدول ۲: نتایج طراحی بهینه برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی.

P	۲			۴		
	۱۶۰۰	۱۸۰۰	۲۰۰۰	۱۶۰۰	۱۸۰۰	۲۰۰۰
سرعت اسمی (rpm)						
$L$ (m)	-/۰.۸۴۹	-/۰.۸۵۴	-/۰.۷۸۱	-/۱.۳۹۸	-/۱.۳۲۶	-/۱.۳۰۱
$D_o$ (m)	-/۲.۲۳۴	-/۲.۲۰۳	-/۲.۲۴۱	-/۲.۱۵۹	-/۲.۰۷۶	-/۲.۰۵۰
$D$ (m)	-/۱.۲۸۸	-/۱.۲۶۴	-/۱.۲۹۳	-/۱.۳۹۸	-/۱.۳۲۶	-/۱.۳۰۳
$W$ (kg)	۴۰/۶۸	۳۹/۶۹	۳۸/۶۷	۳۷/۷۸	۳۳/۷۵	۳۲/۴۵
$V$ (m <sup>3</sup> )	-/۰.۰۳۳	-/۰.۰۳۳	-/۰.۰۳۱	-/۰.۰۵۱	-/۰.۰۴۵	-/۰.۰۴۳
$C_t$ (\$)	۱۲۵/۰	۱۲۲/۲	۱۱۹/۳	۱۱۲/۹	۱۰۲/۳	۹۸/۷
$J$ (kgm <sup>2</sup> )	-/۰.۲۸۷	-/۰.۲۶۵	-/۰.۲۷۲	-/۰.۴۷۷	-/۰.۳۶۹	-/۰.۳۳۸
$\eta$ (%)	۸۶/۰۰	۸۵/۸۵	۸۵/۵۰	۸۵/۴۷	۸۴/۹۹	۸۴/۴۳
pf	-/۰.۸۶۵	-/۰.۸۶۰	-/۰.۸۵۷	-/۰.۷۴۱	-/۰.۷۳۵	-/۰.۷۲۹
$T$ (°C)	۷۳/۹۷	۷۱/۸۳	۶۷/۲۲	۷۱/۸۳	۷۷/۰.۸	۷۷/۸۶
$T_{pm}$ (Nm)	۳/۴۹۵	۳/۷۵۹	۴/۰۴۲	۳/۳۳۵	۳/۶۷۷	۳/۹۶۲
$T_{pb}$ (Nm)	۱۱۰/۵۷	۹۳/۹۷	۸۱/۸۵	۱۰۵/۵۲	۹۱/۹۳	۸۰/۲۴
$W_z$ (m)	-/۰.۱۱۱	-/۰.۱۱۱	-/۰.۱۱۱	-/۰.۱۱۱	-/۰.۱۱۱	-/۰.۱۱۱
$d_z$ (m)	-/۰.۲۶۷	-/۰.۲۶۷	-/۰.۲۶۷	-/۰.۲۶۱	-/۰.۲۶۱	-/۰.۲۶۱
$W_r$ (m)	-/۰.۱۴۹	-/۰.۱۴۶	-/۰.۱۴۴	-/۰.۱۲۷	-/۰.۱۲۴	-/۰.۱۲۲
$d_r$ (m)	-/۰.۲۳۸	-/۰.۲۳۴	-/۰.۲۴۶	-/۰.۱۸۱	-/۰.۱۵۳	-/۰.۱۴۹

جدول ۳: نتایج طراحی بهینه برای شیارهای استاتور مستطیلی و روتور گرد و با سرعت اسمی ۱۸۰۰ rpm.

P	۲	۴	P	۲	۴	P	۲	۴
$L$ (m)	-/۱.۰۰۰	-/۰.۸۴۴	$D_o$ (m)	-/۳.۶۲۱	-/۲.۲۸۳	$D$ (m)	-/۱.۲۶۴	-/۱.۳۹۸
$W$ (kg)	۴۳/۰.۶	۲۹/۴۹	$V$ (m <sup>3</sup> )	-/۰.۰۳۸	-/۰.۰۳۵	$C_t$ (\$)	۱۳۱/۵	۸۹/۲
$J$ (kgm <sup>2</sup> )	-/۰.۲۹۴	-/۰.۳۰۸	$\eta$ (%)	۸۵/۰.۷	۸۵/۲.۴	pf	-/۰.۸۵۳	-/۰.۷۴۱
$T$ (°C)	۷۳/۸۱	۷۹/۵۳	$T_{pm}$ (Nm)	۴/۱۴۹	۳/۶۱۲	$T_{pb}$ (Nm)	۱۰۳/۷۲	۹۰/۳۰
$W_z$ (m)	-/۰.۱۱۱	-/۰.۰۹۰	$d_z$ (m)	-/۰.۲۶۷	-/۰.۳۳۱	$W_r = d_r$ (m)	-/۰.۱۷۵	-/۰.۱۴۹

طراحی بهینه موتور نمونه:

در این قسمت یک موتور القائی قفس سنجابی نمونه جهت خودروی برقی طراحی و تأثیر انتخاب تعداد قطب، نوع شیارهای استاتور و روتور و سرعت اسمی بر روی مشخصات کارآیی موتور مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در طراحی پنج هارمونیک اول ولتاژ تغذیه (هارمونیک‌های 5، 7، 11، 13 و 17) به ترتیب با مقادیر 0/972، 0/088، 0/019، 0/015 و 0/050 در نظر گرفته شده‌اند. قدرت اسمی موتور 15 hp و حداکثر سرعت موتور برابر 9000 rpm انتخاب می‌شوند. با توجه به مقایسه‌های بخش 2 انتخاب تعداد قطب عملاً روی 2 و 4 محدود خواهد شد. برای مقایسه اثر شیارها، در حالت حدی دو نوع شیار مستطیلی و گرد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه افزایش سرعت اسمی کاهش بازده سیستم را به همراه دارد، محدوده سرعت اسمی 1600 rpm تا 2000 rpm انتخاب می‌شود. تعداد شیارهای استاتور و روتور در مورد طرح 2 قطب به ترتیب 18 و 13، و در مورد طرح 4 قطب به ترتیب 24 و 18 انتخاب شده‌اند. در جداول 2 و 3 نتایج طراحی‌های بهینه مختلف به ترتیب برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی، شیارهای استاتور مستطیلی و روتور گرد آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی:

حجم موتور 2 قطب برای سه سرعت اسمی به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از آن برای موتور 4 قطب است (بطور متوسط 43٪).

قطر داخلی استاتور موتور 2 قطب کوچکتر و برعکس قطر خارجی استاتور آن بزرگتر از موتور 4 قطب است.

برخلاف حجم بزرگتر موتور چهار قطب، وزن آن کمتر است (بطور متوسط 14 درصد).

ممان اینرسی روتور موتور 2 قطب بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از آن در مورد موتور 4 قطب است (بطور متوسط 49٪).

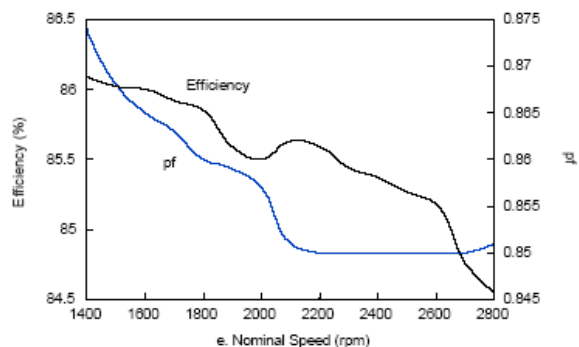
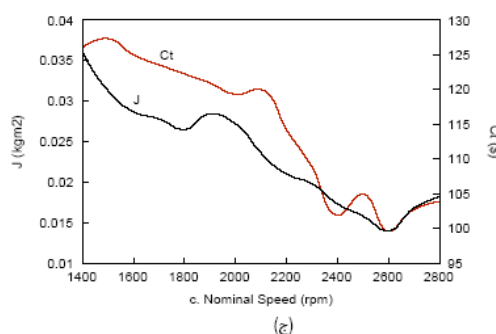
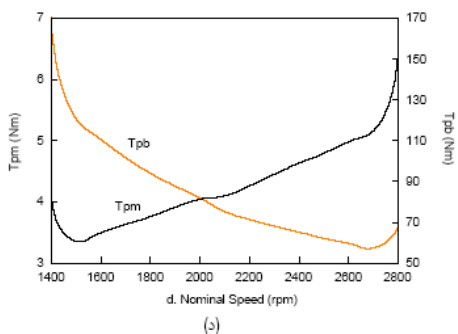
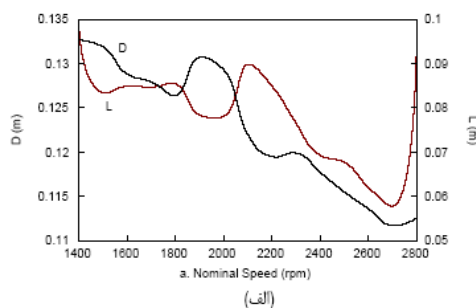
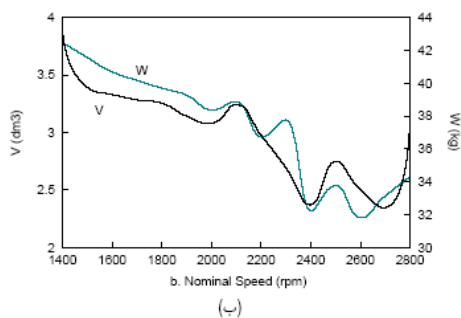
بازده موتور دو قطب بطور متوسط 0/96 درصد بیشتر از موتور 4 قطب است. ضریب قدرت موتور 2 قطب بطور متوسط 17 درصد بیشتر از آن در موتور 4 قطب است، همچنین قید ضریب قدرت در موتور 4 قطب برآورده نشده ولی در موتور 2 قطب برآورده شده است.

گشتاور شکست در حداکثر سرعت موتور 2 قطب بیشتر است (بطور متوسط 2/85 درصد)، پس موتور 2 قطب می‌تواند اضافه بار بیشتری در حداکثر سرعت داشته باشد.

گشتاور شکست در سرعت اسمی موتور 2 قطب بطور متوسط 3/04 درصد بیشتر است، پس موتور 2 قطب می‌تواند اضافه بار بیشتری در سرعت اسمی و نیز شتاب دینامیک بیشتری داشته باشد.

قید افزایش درجه حرارت در تمامی طرح‌های 2 قطب برآورده شده، اما در مورد طرح‌های 4 قطب فقط برای سرعت اسمی 1600 rpm برآورده شده است.

قیمت طرحهای 2 قطب بیشتر است (بطور متوسط 14/35 درصد).



شکل ( 13-3): تغییرات مشخصات و پارامترهای اصلی موتور

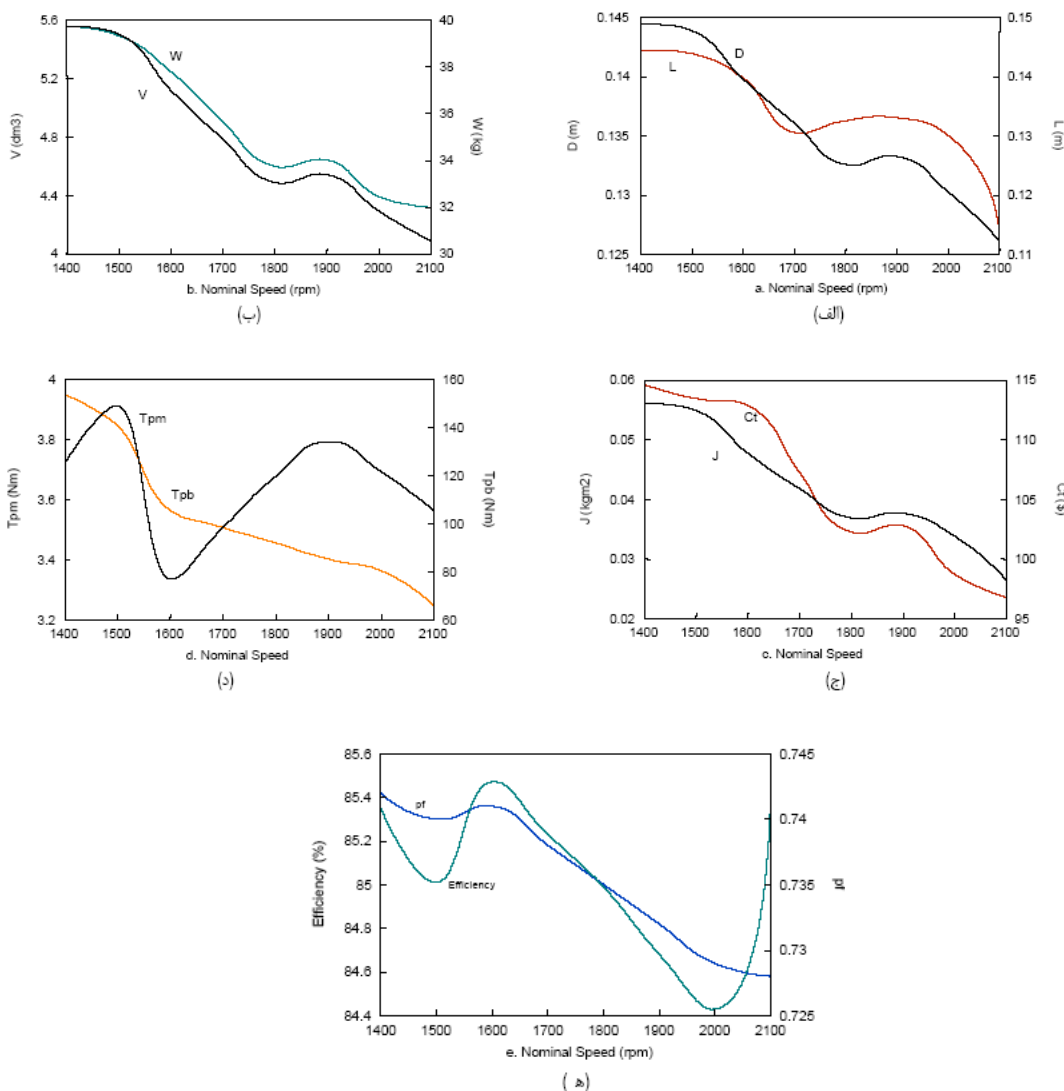
برای طرحهای 2 قطب با افزایش سرعت اسمی

تقریباً نتایج مشابهی در مورد طرحهای با شیارهای مستطیلی برای استاتور و گرد

برای روتور (جدول 3) قابل حصول است.



در کل می توان نتیجه گرفت که طرح های با شیارهای استاتور و روتور مستطیلی از شرایط کارآیی بهتری نسبت به طرح های با شیار استاتور مستطیلی و شیار روتور گرد برخوردارند.



شکل ( 14 ) : تغییرات مشخصات و پارامترهای اصلی موتور

برای طرح های 4قطب با افزایش سرعت اسمی

جهت مقایسه بیشتر و بهتر تأثیر سرعت اسمی بر روی عملکرد موتورها، تعدادی از پارامترهای جدول 2 به صورت منحنی برحسب سرعت اسمی رسم شده‌اند. شکل‌های (الف-13) تا (ه-13) به ترتیب منحنی تغییرات قطر داخلی استاتور، طول هسته، حجم هسته، وزن هسته و سیم‌پیچی‌ها، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت‌های حداکثر و اسمی، بازده و ضریب قدرت را با تغییر سرعت اسمی از 1400 rpm تا 2800 rpm برای طرح‌های 2 قطب، نشان می‌دهند. شکل‌های 2-الف تا 2-ه همین منحنی‌ها را برای طرح‌های 4 قطب در محدوده سرعت اسمی 1400 rpm تا 2100 rpm نشان می‌دهند.

در مورد هر دو طرح 2 و 4 قطب افزایش سرعت اسمی بطور متوسط باعث کاهش طول هسته، قطر داخلی استاتور، حجم و وزن، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت اسمی، بازده و ضریب قدرت شده و برعکس گشتاور شکست در سرعت حداکثر تقریباً افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه تابع هدف بهینه‌سازی بازده است، لذا می‌توان گفت که افزایش سرعت اسمی باعث کاهش کیفیت طرح شده و یا به عبارتی کاهش سرعت اسمی باعث بهینه‌تر شدن طرح می‌شود. از طرفی افزایش سرعت اسمی از دید حجم، وزن، ممان اینرسی و قیمت مطلوبست، خود این موارد در انتخاب موتورهای محرکه خودروهای برقی شایان اهمیت هستند. پس باید یک گزینه با توجه به مطالب فوق و اولویت‌بندی موردنظر در مورد موتور محرکه انتخاب

شود، به گونه‌ای که تا حد امکان تمامی اهداف اصلی و اهداف ثانویه در حد مطلوب و موردنظر برآورده شوند.

در طراحی بهینه موتور فقط تلفات خود موتور در نظر گرفته شده و تلفات کلیدزنی در نظر گرفته نشده‌اند. هرگاه تلفات کلیدزنی نیز در نظر گرفته شود با توجه به آنکه افزایش سرعت اسمی باعث افزایش تلفات کلیدزنی و افزایش حجم و مقادیر اسمی عناصر قدرتی مبدل خواهد شد، لذا افزایش سرعت اسمی از این لحاظ نیز مردود است.

### نتیجه‌گیری:

بررسی و تحلیل طرحهای مختلف با ترکیبهای متفاوت نتایجی به شرح زیر بدست می‌دهد:

- با وجود انتخاب ولتاژ تغذیه کم (به جهت محدودیت ولتاژ باطریها) و ملحوظ کردن پنج هارمونیک در شکل موج ولتاژ، نتایج طراحی بهینه مطلوب است.

- مزایای موتور 2 قطب در مقایسه با موتور 4 قطب عبارتند از: حجم و ممان اینرسی کم، بازده زیاد، ضریب قدرت بهتر، گشتاور شکست زیاد در سرعتهای حداکثر و اسمی

- معایب موتور 2 قطب در مقایسه با موتور 4 قطب عبارتند از: وزن و قیمت زیاد

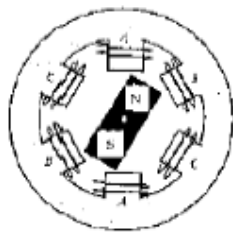
- شیارهای مستطیلی برای استاتور و روتور در طرح‌های 2 قطب منجر به کارایی بهتر موتور در مقایسه با شیارهای مستطیلی برای استاتور و شیارهای گرد برای روتور می‌شود. برای طرح‌های 4 قطب تقریباً عکس موارد فوق صادق است.
- برای طرح‌های 2 و 4 قطب، افزایش سرعت اسمی در مرحله طراحی منتهی به حجم، وزن، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت اسمی، بازده و ضریب قدرت کم شده و برعکس گشتاور شکست در حداکثر سرعت افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن تابع هدف (بازده) این نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت اسمی به طرح نامطلوب منتهی می‌شود. در حالی که اهداف ثانویه (حجم، وزن و ممان اینرسی) لازم می‌دارند که سرعت اسمی زیاد شود. قابل توجه آنکه تلفات کلیدزنی نیز عاملی دیگر برای محدود شدن سرعت اسمی است.
- جمع‌بندی نتایج بررسی حالت کار دائم، موتور 2 قطب با سرعت اسمی 1800 دور بر در دقیقه را مناسبترین طرح برای خودروی برقی نشان می‌دهد.

## فصل 4- موتورهای DC بدون زغال آهنربای دائم

### مدل موتور PMBLDC

موتور DC بدون زغال آهنربای دائم یک موتور سنکرون با آهنربای دائمی نصب شده روی رتور و سیمپیچهای استاتور است. کنترل آن در مقایسه با موتورهای ac عادی

ساده تر است. آهنربای دائم شار رتور را ایجاد مینماید و سیمپیچهای استاتور قطبهای الکترومغناطیسی را ایجاد می کنند. رتور به وسیله یک چرخش شارفاز استاتور انرژی دار شده جذب می شود. با به کارگیری یک مولفه مناسب برای تغذیه فازهای استاتور ، میدان دوار در استاتور شکل میگیرد و رتور میچرخد. به واسطه ساخت موتور بدون زغال، تلفات توان موتور تقریباً به طور کل منحصر می شود به استاتور ساکن، از این رو گرما به راحتی می تواند به فضا منتقل شود. شکل (3-14) تصویر مقطع رور تور استاتور را نشان می دهد.



. 3-phase motor with permanent magnet rotor.

شکل (3-14)

مدل ریاضی این موتور در معادله (3-27) با این فرض که هر دوی آهنربا و فولاد زد زنگ مهره های نگهدارنده دارای مقاومت کم و جریان القاء شده در رتور صرفه نظر شود شرح داده شده است.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

(3.22)

$$E = 2 NlrB \omega \quad (3.23)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\theta} + (2NBrl i) \quad (3.24)$$

در حالت کاری پایدار سیم پیچی موتور PMBLDC تنها مدار فرمان ما است. با این ملاحظه که سرعت کار موتور خیلی بالا نیست، پروسه گذرای کموتاسیون جریان تقریباً شبیه حالت استاتیک است. اگر هر یک از فازهای سیم پیچی استاتور انرژی دار شود نیروی ضد محرکه الکتریکی موتور و گشتاور توسعه یافته به ترتیب در معادلات دینامیکی (3-28) و (3-29) شرح داده شده است.

در اینجا

N تعداد دور سیم پیچی بر فاز است.

L طول رتور است

N شعاع داخلی رتور است.

B چگالی شار مغناطیسی رتور است

W سرعت زاویه‌ای رتور است

I جریان فاز است

L اندوکتانس فاز است

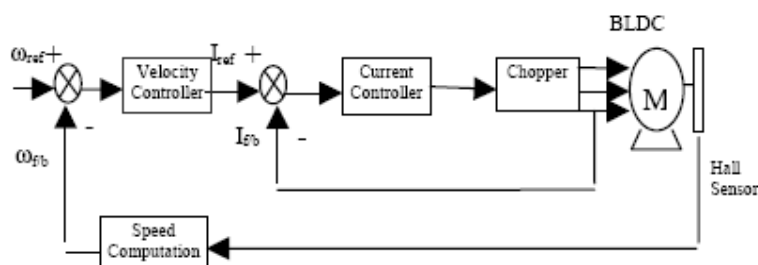
 $\theta$  موقعیت رتور است

R مقاومت فاز است

## کنترل موتور PMBL DC

A. کنترل موتور PMBL DC

با مرجع قرار دادن معادلات (3-28) و (3-29) نیروی ضد محرکه الکتریکی مستقیماً با سرعت موتور رابطه دارد، و گشتاور توزیع شده تقریباً رابطه مستقیمی با جریان فاز دارد. این به این معنی است که گشتاور می‌تواند به وسیله یک جریان تغذیه پایدار ثابت باقی بماند. به منظور تحقق بخشیدن به این حالت، یک متد ثابت نگه داشتن نسب ولتاژ به فرکانس است. که اگر تنها با کنترل فرکانس انجام شود نیاز است که از اشباع مدار مغناطیسی اجتناب شود. رسیدن به کنترل فوق با به کارگیری کنترل حلقه بسته هر دوی سرعت و جریان به صورت شکل (3-15) قابل دسترس است.



شکل (3-15)

ساختار کنترل Cascade یک حلقه بسته داخلی جریان و یک حلقه بسته خارجی سرعت به منظور نظارت بر حلقه جریان دارد. این الگوریتم کنترل با یک Dsp card که واسطی بین کاربر و تابع جریان موتور است تکمیل می‌شود.

کنترلر سرعت رتور را به وسیله تغییر دادن فرکانس پالس که بر مبنای سیگنال فیدبک از سنسورهای اثر هال کار می‌کند رگوله می‌کند. این پالس به کلیدهای قدرت چاپر تزریق می‌شود تا سیم پیچ‌های استاتور را تغذیه کند متد کنترل به وسیله الگوریتم کنترل PWM در زبان اسمبلی DSP دست یافتنی است.

اگر سرعت تندتر از سرعت مطلوب باشد فرکانس پالس تزریقی به چاپر کاهش می‌یابد. در مقابل اگر سرعت آهسته‌تر باشد فرکانس افزایش خواهد یافت. برای ارتعاشات گشتاور بار شرایط سختی فراهم می‌شود و در شرایط پایدار خطای سرعت به مینیمم مقدار خود کاهش می‌یابد. این نوع مدولاسیون پهنای پالس باید به منظور ثابت نگه داشتن گشتاور چرخشی، همراه با کنترل جریان تکمیل شود. زیرا در صورتی که فرکانس پالس اعمالی به چاپر کاهش یابد. اگر جریان تغذیه نسبتاً بزرگ باشد زمانی طول خواهد کشید تا رتور از حرکت باز بایستد. رتور به فاز انرژی‌دار می‌رسد و در آن موقعیت (ایستاده) می‌ماند تا زمانی که فاز دیگری انرژی‌دار شود. از این رو ضروری است که جریان تغذیه سیم‌پیچ‌های استاتور در فرکانس‌های پایین کاهش و در فرکانس‌های بالا افزایش یابد.



جریان فاز به وسیله ولتاژ در حالت شبه استاتیک تولید می‌شود. به منظور داشتن چرخش یکنواخت و گشتاور توزیع شده ثابت، شرط ثابت  $V/F=$  همیشه مورد نیاز است. این شرط با کنترل DSP محقق می‌شود.

کنترل جریان از طریق الگوریتم کنترل ولتاژ بدست می‌آید. که به DSP دستور می‌دهد که توان تغذیه dc به chopper را تغییر دهد. شکل (3-16) کنورتور جریان تمام موج نیم کنترل برای یک فاز را نشان می‌دهد که به منظور ایجاد موج مربعی جریان استاتور و back emf دوزنقه‌ای میباشد. با کنترل سیگنال آتش در گیت تریستورها، میانگین جریان در مدار فوق می‌تواند کنترل شود. موج دندانه اره‌ای که سنکرون با تغذیه ac می‌باشد ابتدا بوجود می‌آید و سپس با سیگنال کنترل مقایسه می‌شود. سپس به DSP دستور می‌دهد که هر زمان که خطا مثبت می‌باشد سیگنال را خارج کند.

شکل (3-17) نمودار بلوک لوپ جریان و ژنراتور دندانه اره‌ای سنکرون را نشان می‌دهد. رابطه بین میانگین ولتاژ خروجی و زاویه آتش، ( $\alpha$ ) در معادله (3-30) شرح داده شده است:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (3-25)$$

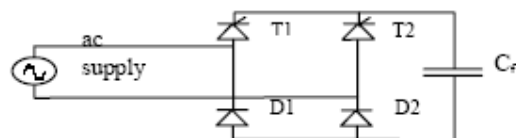


Fig. 3 Full-Wave Half Controlled Rectifier

شکل ( 3-16 )

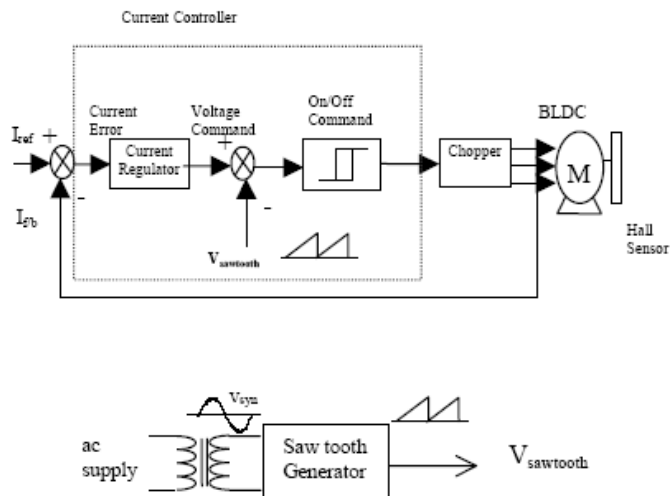


Fig. 4. Current Loop Block Diagram

شکل (3-17)

کنترل تغذیه ولتاژ نه تنها برای جبران تنظیم ولتاژ chopper می باشد بلکه برای تغییر ولتاژ و تنظیم منبع dc نیز مورد نیاز است. این کنورتور جریان برای emf دوزنقه‌ای و ترمینالوژی جریان موج مربعی قابل استفاده می باشد.

2. EMF دوزنقه‌ای و جریان موج مربعی

شکل موجهای مختلفی می توانند از طریق طراحی مناسب سیم پیچی استاتور و از طریق شکل گیری میدان مغناطیسی - با شکل گیری و

مغناطیسی کردن شار مغناطیسی به روش‌های خاص بوجود آیند. این شکل به صورت شکل موجی دوزنقه‌ای می‌باشد. در این فصل تکنیک PWM موج دوزنقه‌ای به کار رفته است و جریان‌های فازی استاتور شکل مستطیلی بوجود می‌آیند تا گشتاور ثابت را نشان دهند. شکل (3-18) شکل موج  $emf$ ‌های القاء شده و پاسخ جریان استاتور در تمام فازهای سیم پیچ‌های استاتور و توان فاصله هوایی برای عملکرد موتوری را نشان می‌دهد. بایستی توجه داشت که توان فاصله هوایی و گشتاور الکترومغناطیسی، هر دو مداوم و پیوسته می‌باشند.

شکل (3-19) تولید گشتاور بین موتور کنترل شده سینوسی و دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد.

بایست توجه داشت که میانگین گشتاور بوجود آمده، برای موتور کنترل شده دوزنقه‌ای بیشتر با ریپل کمتر می‌باشد. این مزیت مخصوصاً در کاربردهای کنترل حرکت با عملکرد بالا مفید می‌باشد.

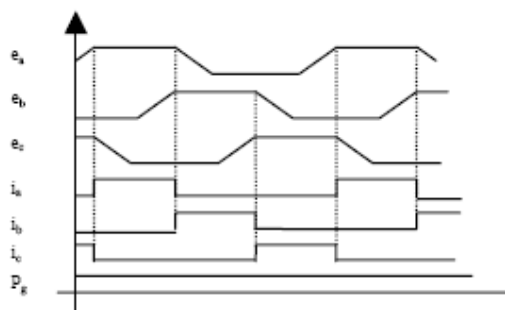


Fig. 5. Trapezoidal EMF and Square wave Current

شکل (3-18)

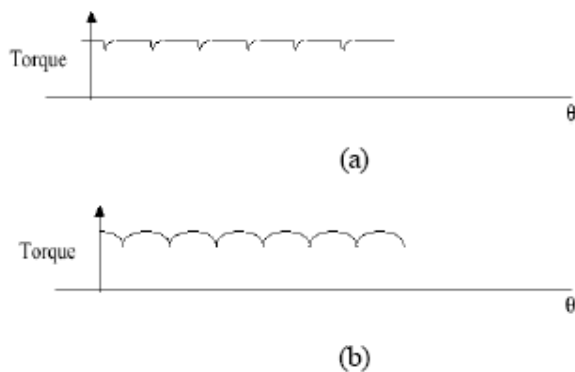


Fig. 6. Torque ripple in (a) rectangular and (b) sinusoidal controlled BLDC motor.

شکل (3-19)

### اساس عملکرد مبدل C-DUMP

CHOPPER پیشنهاد شده یک توپولوژی مبدل توان جدید است که با عنوان مبدل C-DUMP معروف است در شکل (3-25) نشان داده شده است. این توپولوژی دارای هزینه موثر می باشد چون از  $n+1$  کلید قدرت به

جای  $2n$  کلید در ماشینهای  $n$  فاز استفاده می‌کند. و واقعاً یک مبدل dc-to-dc نیم موج با مشخصه عملکرد چهار ربعی است.

این فصل فقط عملکرد موتوری مبدل c-dump را مطالعه می‌کند. سیگنال سوئیچینگ از کارت DSP،  $S1$  را on می‌کند و متعاقب آن  $s2$  و سپس  $s3$  و دوباره خود  $s1$  و این سیکل همچنان تکرار می‌شود. وقتی که  $s1$  روشن می‌شود  $s2$  و  $s3$  در حالت off می‌باشند. جریان از طریق کلید  $s1$  در فاز A سیم پیچ استاتور جاری می‌شود. وقتی که  $S2$  روشن می‌شود  $S1$  مجبور می‌شود که off (خاموش) شود و جریان در فاز B سیم پیچ جاری می‌شود. شبیه این فرایند برای فاز C می‌باشد وقتی که  $S3$  روشن (on) می‌شود اتفاق می‌افتد و  $S2$  مجبور می‌شود که off (خاموش) شود. شکل (21-3) مدار معادل فاز A مبدل را نشان می‌دهد وقتی که  $S1$  روشن (on) و خاموش (off) می‌شود.

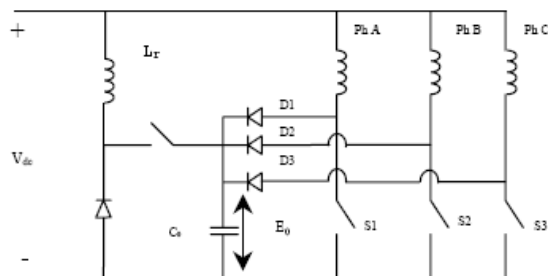
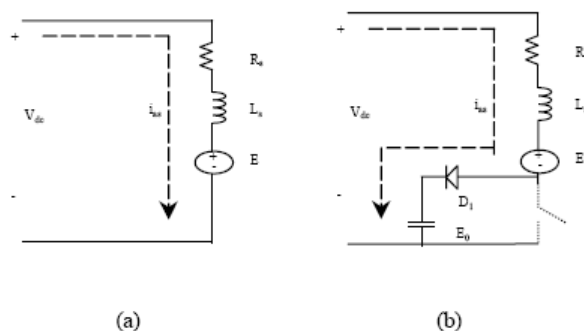


Fig. 7. C-dump Converter

شکل (20-3)

Fig. 8. Equivalent Circuit of Phase A with  $S_1$  (a) *On* and (b) *Off*

## شکل (3-21)

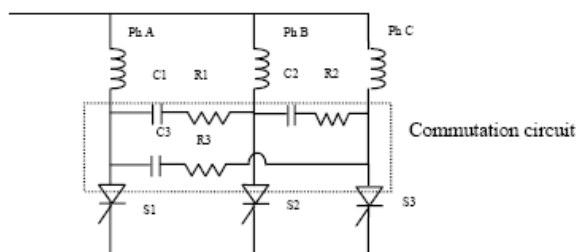
فرض کنید که مقاومت درونی سیم پیچ بسیار کم و نامحسوس است پس می‌توان بنابر شکل (3-21) مشاهده کرد که وقتی که فاز A سیم پیچ، در حالت on یا off می‌باشد ولتاژ ذخیره dc و ولتاژ دوسرخازن C0 به ترتیب در معادله‌های (3-31) و (3-32) آورده می‌شوند.

$$V_{dc} = E + L_s \frac{di_{as}}{dt} \quad (3-26)$$

$$E_0 = V_{dc} - E + L_s \frac{di_{as}}{dt} \quad (3-27)$$

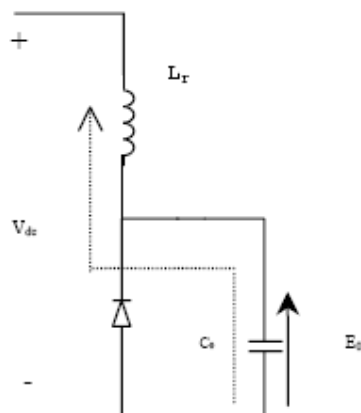
در جایی که E, back emf موتور باشد و E0 ولتاژ دو سر خازن. این سوئیچ‌های فازی که در این مبدل اجرا شده‌اند باید بتوانند در برابر ولتاژهای بالا مقاومت کنند و جریان بالا را سوئیچ کنند و رسانایی و تلفات کلید زنی کم از خود نشان دهند. نمونه مثال‌هایی از متداول‌ترین سوئیچ‌ها شامل ترانزیستور دوقطبی - MOSFET قدرت - ترانزیستور دوقطبی با

گیت ایزوله شده (igbt) و thyri storها می باشند. thyri storها در این تحلیل انتخاب شده اند چون تلفات درونی کم و درصدهای ولتاژ و جریان موجی بالا دارند. و نقطه ضعف اصلی این سوئیچها این می باشد که به مدار خارجی نیاز دارند تا off شوند وقتی که در حالت on می باشند. ما دقیقاً این مدار کموتاسیون گردشی را برای کموتاسیون جریان thyri storها طراحی کردیم. و این در شکل (3-22) نشان داده شده است که تبدیل C-dump را انجام می دهد.



شکل ( 3\_22 )

Fig. 9. Circulating commutation circuit

Fig. 10. Energy return paths for  $C_0$  when  $S_4$  is  $On$ 

شکل (3-23)

$C_1$  زمانی شارژ می‌شود که  $S_1$  در حالت  $on$  باشد. و زمانی تخلیه می‌شود که  $S_2$  در حالت  $on$  باشد و جریان مدار را از آن‌د به کاتد thyristor ( $S_1$ ) کاهش دهد. به محض اینکه جریان تا زیر سطح نگهدارنده کاهش می‌یابد  $S_1$  به طور موفقیت‌آمیز  $off$  می‌شود. این موضوع همچنین برای  $S_2$  و  $S_3$  نیز صحت دارد وقتی که خازن‌های مربوطه دو سر  $C_2$  و  $C_3$  شارژ و سپس تخلیه می‌شوند.

سوئیچ چهارم  $S_4$  برای تخلیه انرژی بیش از حد ذخیره شده در خازن  $C_0$  - از طریق القاء کننده  $L_r$  به کار رفته است. بسته به فرکانس به کار رفته در



چندین سیکل آتش میشود. مدار مربوطه در شکل (3-23) نشان داده شده است.

این انرژی از سیم پیچ استاتور، از طریق  $D1 - D2$  یا  $D3$  به  $C0$  منتقل می شود زمانی که سوئیچ های مربوطه  $off$  می شوند. بدین ترتیب به گرما اجازه داده می شود که از طریق القاء گر توان بالا اتلاف شود. وقتی که ولتاژ در  $C0$  تا زیر ولتاژ ذخیره  $V_{dc}$  کاهش می یابد،  $S4$   $off$  می شود

$$W = \frac{1}{2} \frac{LI^2}{t} \text{ Joules} \quad (3-28)$$

انرژی ذخیره شده در سیم پیچی می تواند منجر به ولتاژ بیشینه بسیار بالا شود که در دوسر سوئیچ های فازی به کار رفته شود. بنابراین لازم است که از  $Snubber$  مناسب  $RC$  در دوسر هر سوئیچ استفاده شود تا  $dv/dt$  کنترل شوند. این مدارهای  $Snubber$  برای (3-24) سوئیچ  $thyristor$  در شکل 11 نشان داده شده اند.

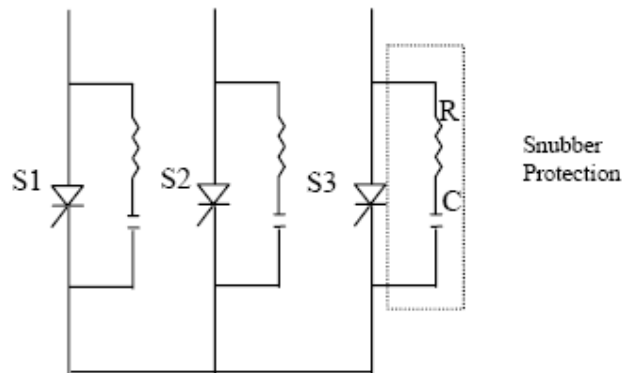


Fig. 11. Snubber Circuits for Thyristors

شکل ( 3\_24 )

توالی فازی انرژی سازی سیم پیچها می تواند در جهت عقربه های ساعت a-b-  
 c و در جهت خلاف عقربه های ساعت a-c-b در چرخش رتور باشد. Duty  
 cycle هر فازی، فقط یک سوم دوره تناوب می باشد. ولی توان فاصله هوایی و  
 گشتاور الکترومغناطیسی به طور پیوسته حفظ می شوند.

### بررسی های طراحی مبدل

#### A سوئیچ های فازی و دیودها

می بینیم مینیمم پیک ولتاژ معکوس برای هر دو سوئیچها و دیودها به صورت  
 زیر می باشد:

$$V_{piv} = E_0 \quad (3_29)$$

که در اینجا  $E_0$  ولتاژ دو سر خازن بازیافت انرژی  $C_0$  می باشد و مقدار جریان آن باید به اندازه ای باشد که در برابر جریان گذرای موتور استقامت کند.

### B انتخاب $C_0$

برای برآورد مقدار مناسب  $C_0$ ، لازم است که مدار معادل *chopper* را در زمان های *on* و *off* سوئیچها مطالعه کنیم و این در شکل (21-3) نشان داده شده است. با این فرض که هیچ انرژیایی اتلاف نشده است، انرژی ذخیره شده در سیم پیچ استاتور، در خازن  $C_0$  بازیابی می شود. در شرایط بدترین حالت، استاتور -  $i_{acmax}$  - به عنوان ماکزیمم جریان جاری شده در سیم پیچهای استاتور انتخاب می شود و ولتاژ خازن از  $E_0$  تا  $(E_0 + \Delta E_0)$  شارژ می شود.

و به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{2} L_s i_{as max}^2 = \frac{1}{2} C_0 [(E_0 + \Delta E_0)^2 - E_0^2] \quad (3-30)$$

بنابراین، خازن  $C_0$  می تواند از طریق زیر بدست آید.

$$C_0 = \frac{L_s i_{as max}^2}{(E_0 + \Delta E_0)^2 - E_0^2} \quad (3-31)$$

### c. انتخاب S4

وقتی که S4 در حالت *on* می باشد انرژی ذخیره شده در خازن بازیافت انرژی  $C_0$  به سیم پیچ القایی  $L_r$  منتقل می شود. بنابراین مقدار ولتاژ  $L_r$

باید بیشتر - یا برابر با  $E_0$  باشد. به محض on شدن S4 ولتاژ  $C_0$  برابر با  $E_0$  می‌باشد و جریان اصلی در  $L_r$  برابر با صفر است. و همچنان که خازن تخلیه می‌شود ولتاژ به طور تصاعدی کاهش می‌یابد ولی جریان در  $L_r$  تا  $I_{Lr \max}$  افزایش می‌یابد.

بنابراین:

$$\frac{1}{2} C_0 [(E_0 + \Delta E_0)^2 - E_0^2] = \frac{1}{2} L_r (i_{Lr \max})^2 \quad (3-32)$$

بنابر معادله (3-37) ساده است که مقدار سیم‌پیچ القایی  $L_r$  را تعیین کنیم. و با دادن مقدار انتخابی به خازن بازیافت انرژی  $C_0$ ، سیم‌پیچ القایی  $L_r$  می‌تواند به سادگی مشخص شود که برابر با زیر می‌باشد:

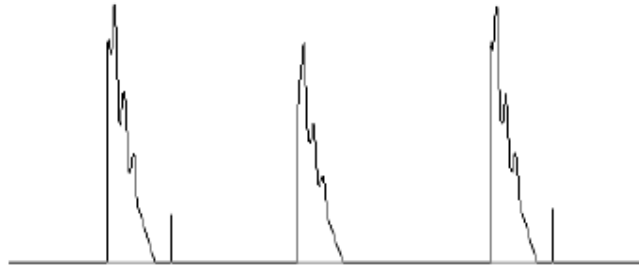
$$L_r = \frac{C_0 [(E_0 + \Delta E_0)^2 - E_0^2]}{i_{Lr \max}^2} \quad (3-33)$$

### نتایج شبیه‌سازی

این قسمت، نتایج شبیه‌سازی مبدل c-dump را شرح می‌دهد. مقادیر اجزای محاسبه شده در بخش 4، برای عملکرد بهتر شبیه‌سازی و بررسی شده‌اند. پاسخ‌های حالت پایدار و گذرای مبدل، به منظور طراحی حافظت مدار تحلیل شده‌اند.

انرژی آزاد شده از سیم‌پیچی فاز به خازن  $C_0$  وقتی که یکی از فازها off شود و این در شکل (3-25) نشان داده شده است. بزرگی جریان تا صفر کاهش می‌یابد همچنان که انرژی ذخیره شده کاملاً آزاد می‌شود. این انرژی در محیط اتلاف می‌شود همچنان که در قسمت زیر توضیح داده شده است.

شکل (3-26) شکل موج‌های ولتاژ شبیه‌سازی شده را در دو سر خازن  $C_0$  و جریان در سلف  $L_r$  را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود به خازن اجازه داده می‌شود که به طور تصاعدی شارژ شود وقتی که  $S_4$  در حالت off می‌باشد و سپس انرژی‌اش در  $L_r$  تخلیه می‌شود وقتی که  $S_4$  در حالت on می‌باشد. در حالتی که  $S_4$  on می‌شود، جریان در  $L_r$  شروع به افزایش می‌کند. وقتی که خازن، تخلیه را متوقف می‌سازد (یعنی ولتاژ در دو سر  $C_0$  - تا زیر مقدار ولتاژ ذخیره  $V_{dc}$  کاهش می‌یابد و  $S_4$  طبیعتاً کموتاسیون می‌شود) جریان در سیم‌پیچ القایی نیز شروع به کاهش می‌کند. این انتقال انرژی می‌تواند با استفاده از معادله (3-37) محاسبه شود. توالی on سوئیچینگ  $S_4$  طوری طراحی شده است که 6 برابر کمتر از سوئیچینگ فازی می‌باشد. و این به خازن امکان می‌دهد که قبل از تخلیه تا بیش از  $V_{dc}$  شارژ شود.

Fig. 12. Current flow from Phase A Winding to  $C_0$  through D1

شکل ( 3\_25 )

### نتایج آزمایش

نتایج آزمایش براساس نمونه به کار رفته بدست آمده است. تغذیه توان dc مبدل c-dump، از طریق رکتیفایر تمام موج نیمه کنترل با سیگنال‌های گیت 180 درجه که در شکل ((3-27(a)) نشان داده شده است، می باشد. سوئیچ‌های به کار رفته در مبدل c-dump نیز thyristor هستند. پالس‌های گیت برای هر thyristor هر 120 درجه جایگزین می‌شود تا سیم‌پیچ‌های استاتور برای یک مرتبه انرژی‌دار شود.

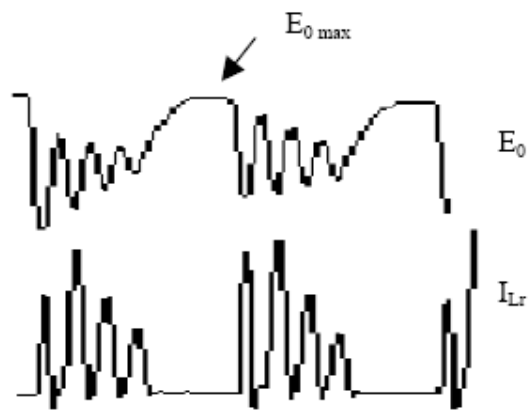
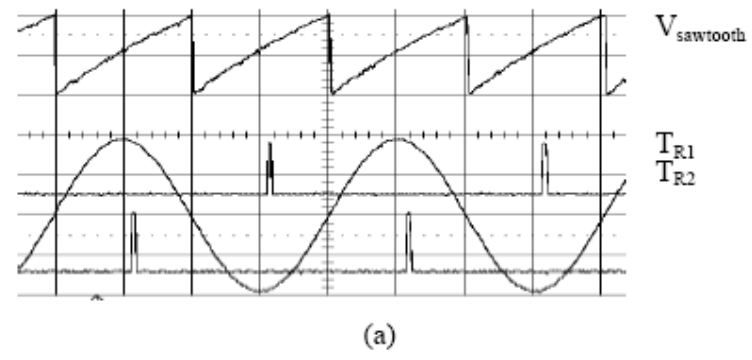
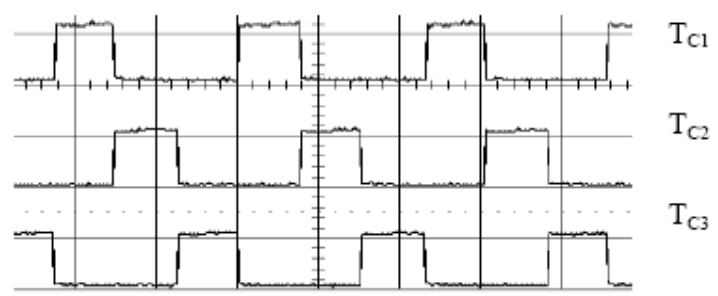


Fig. 13. Voltage across  $C_0$  and Current in  $L_r$

شکل ( 3\_26 )



(a)



(b)

Fig. 14. Gating Signals for (a) Rectifier and (b) Chopper

## شکل (3-27)

به موتور اجازه داده می‌شود که در 300rpm و 600rpm بچرخد. جریان استاتور و شکل موج های ولتاژ نیز بدست می‌آیند. شکل‌های (3-28) و (3-29) به ترتیب این را نشان داده‌اند. ثابت شده است که شکل موج‌های جریان، به شکل مستطیل می‌باشد و به هر فاز تا 120 درجه انرژی داده می‌شود و این براساس سیگنال‌های گیتی می‌باشد که در شکل (3-27 b) نشان داده شده است. ریپل جریان نسبتاً کوچک است و پالس یا ضربه‌ای شدن گشتاور نیز بسیار کوچک است و ولتاژ استاتور، ولتاژ نقطه صفر موتور با ولتاژ یکی از فازها قراردادده شود.

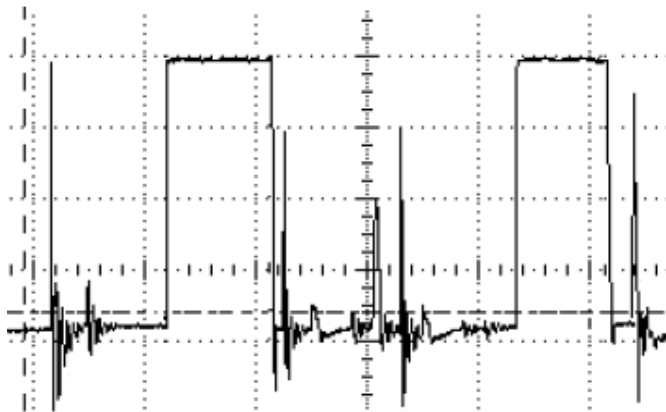
و این مجموع  $B_{emp}$  - مقاومت درونی و کاهش ولتاژ سیم‌پیچ القایی می‌باشد. شباهت امواج دوزنقه‌ای مربوط به اینست که  $B_{emp}$  نیز شکل مشابهی دارد.

شکل (3-30)، شارژ آزمایشی و شکل موج‌های تخلیه خازن  $C_0$  را نشان می‌دهد. در نقطه  $A$ ، انرژی ذخیره شده در  $C_0$  تخلیه می‌شود (یا مستهلک می‌شود). پس بایستی ذکر کرد که وقتی ولتاژ در  $C_0$  تا زیر ولتاژ ذخیره در نقطه  $B$  کاهش می‌یابد،  $S_4$  مجبور می‌شود که  $off$  شود و انرژی در سیم‌پیچ

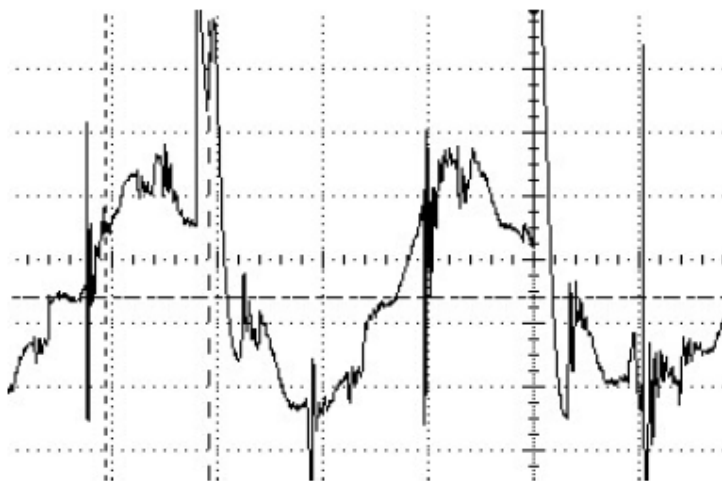


مجدداً شروع به شارژ C0 کند. و این بحث مربوط در قسمت 3 را ثابت می کند.

جدول I پارامترهای موتور را برای تحقیق ما نشان می دهد. Feather های تکنیکی، مزیت های موتور PM BLDC را نشان می دهند. جدول II نتایج آزمایشی 300rpm را نشان می دهد.



(a)



(b)

Fig. 15 Waveforms of: (a) Stator Current (vertical: 0.4A/div, time: 20ms/div) and (b) Motor Terminal Voltage (vertical: 5v/div, time: 20ms/div) at 300 rpm

شکل ( 3\_28 )

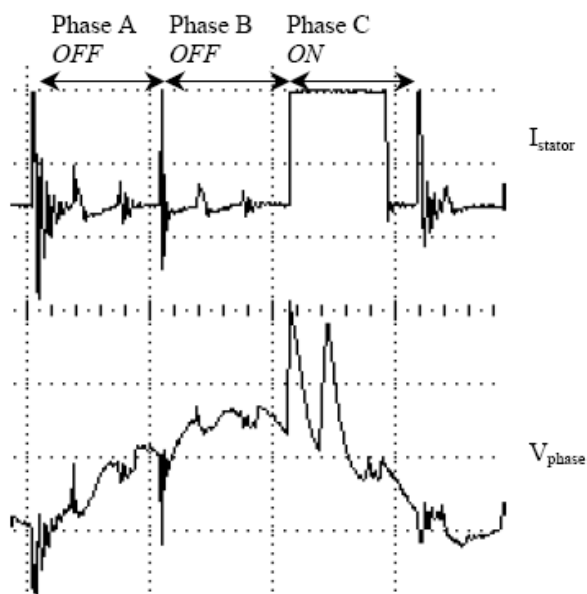


Fig. 16. Waveforms of: Stator Current and Motor Terminal Voltage (vertical: 0.4A/div and 5v/div respectively, time: 10ms/div) at 600 rpm

شکل (3\_29)



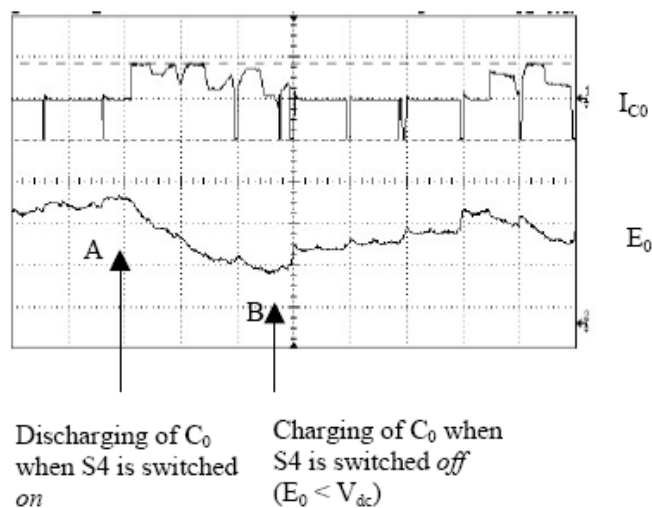


Fig. 17. Current and Voltage Waveforms of Capacitor,  $C_0$   
(vertical: 0.1A/div and 20V/div respectively, time: 20ms/div)

### شکل (3-30)

کارایی سیستم محرک موتور می‌تواند با استفاده از معادله‌های (3-39) و (3-40) محاسبه شود. بایستی ذکر کرد که این سیستم محرک در صورتی موثر است که تلافات توان سوئیچ‌ها کم باشد و اینها بواسطه 2 فاکتور بوجود می‌آیند: فاکتور اول. یک فاکتور استفاه از تنها 3 سوئیچ در واحد قدرت می‌باشد. (معکوس کننده PWM قدیمی دارای 6 سوئیچ بود). و فاکتور دیگر مدار C-dump است که برای ایجاد بازیافت انرژی منبع به کار برده می‌شود. و به همین دلیل است که تلافات کلیدهای قدرت را نسبت به توپولوژی مبدل تمام موج معمول کمتر است.

TABLE I

MOTOR PARAMETERS

S/no.	Parameters	Values	Units
1	Winding resistance	0.445	$\Omega$
2	Winding inductance	1.65	mH
3	No. of poles	6	-
4	Voltage constant, $K_E$	66	V/KRPM
5	Square wave torque constant, $K_T$	0.6	Nm/A

TABLE II

OUTPUT DATA OF PM BLDC MOTOR AT 300 RPM

S/no.	Parameters	Values	Units
1	Average output voltage of rectifier, $V_{dc}$	30	V
2	Average output current of rectifier, $I_{dc}$	1.9	A
3	Measured rotational torque, T	0.96	Nm
4	Rotation speed, n	300	RPM

$$\text{Power output of rectifier, } P_r = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (3.34)$$

$$\text{Motor output power, } P_m = T\omega \quad (3.35)$$

### نتیجه گیری

به منظور افزایش کنترل حرکتی در وسایل نقلیه الکتریکی، ما واحد ذخیره توان جدیدی را برای سیستم حرکت موتوری PM BLDC طراحی کردیم.

این فصل، یک روش PWM Chopper کنترل شده با dsp رابه منظور رسیدن به کارایی بالاتر با ساختار مشابه و دامنه سرعت وسیعتر آن نسبت به سیستم کنترل موتور معمول پیشنهاد می کند. تحلیل جامع و کاملی در مورد اصول عملکرد - بررسی های طراحی و الگوریتم های کنترل انجام شده و در اینجا بحث شده است. مبدل C-dump با یک سوئیچ در هر فاز، برای استفاده در کنترل موتور PM BLDC نشان داده شده است. این توپولوژی به طور آزمایشی ثابت کرده است که بسیار ساده می باشد و دارای هزینه مؤثر است. داده های جمع آوری شده، به نمونه آزمایشی کمک کرده اند و نتایج ثابت کرده اند که طرح محرک، برای کاربردهای سرعت متغیر، بسیار مؤثر می باشد.

## فصل 5- تحقیقی در زمینه مغناطیسی شدن مکمل موتور DC بدون

زغال که برای HEV به کار برده می‌شود.

### چکیده

متد مغناطیسی کردن پس از مونتاژ، که یک فاز سیم‌پیچی استاتور به عنوان کوئل مغناطیس کننده به کار می‌رود تا آهن‌رباهای دائمی را که به طور محسوسی مغناطیسی شده در موتور بدون زغال DC که برای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEV) به کار برده می‌شود مغناطیسی سازد و در این بخش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. 2 بار مغناطیسی کردن پس از مونتاژ، با متد المان محدود دوبعدی (FEM) تحلیل شدند. همچنین اشاره شده است که اگر جریان مغناطیسی به اندازه کافی بزرگ باشد، آهن‌رباهای دائمی می‌توانند با یک مرتبه مغناطیسی کردن پس از مونتاژ کاملاً مغناطیسی شوند، و اگر جریان مغناطیسی به اندازه کافی بزرگ نباشد مغناطیس کردن پس از مونتاژ می‌تواند 2 بار به کار برده شود (یا چند بار) و این مغناطیسی مکمل نامیده می‌شود، تا مغناطیسی شدن کامل را اطمینان دهد. چگالی شار سطح رتور موتور نمونه مغناطیسی مداری و مغناطیسی پس از مونتاژ اندازه‌گیری شدند و اینها با یکدیگر هماهنگ می‌باشند. مقادیر اندازه‌گیری شده شامل منحنی محاسبه شده FEM. منحنی‌های نیروی ضد محرکه

تست شده (BEMF) و منحنی‌های گشتاور، برحسب جریان موتور نمونه مغناطیسی مداری و مغناطیسی پس از مونتاژ، با یکدیگر منطبق می‌باشند. تأثیر این مغناطیس‌کنندگی مکمل در مغناطیسی شدن پس از مونتاژ، از طریق محاسبات FEM و آزمایش‌ها تأیید شدند.

### مقدمه

موتورهای DC بدون زغال و موتورهای سنکرون آهن‌ربای دائمی (PM) برای کاربردهای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی بسیار امیدوار کننده شده‌اند. معمولاً آهن‌رباهای دائمی کمیاب در اینها استفاده می‌شوند و مغناطیسی کردن، مرحله مهمی در فرآیند ساخت و تولید می‌باشد و این به دلیل تولید انرژی مغناطیسی بالای آنهاست برای موتورهای DC بدون زغال، مغناطیسی، آهن‌رباهای دائمی می‌توانند به 3 طریق مغناطیسی شوند: مغناطیسی شدن مداری - مغناطیسی شدن قسمت فرعی و مغناطیسی شدن پس از مونتاژ.

در 2 روش اول به دلیل وجود نیروهای مغناطیسی و باقیمانده‌های آهن در زمان فرایند مونتاژ برخی مشکلات وجود خواهد داشت استاتور برای مغناطیسی کردن بعد از مونتاژ، یا منکیسیچر مغناطیس کننده و یا سیم‌پیچی می‌توانند به کار برده شوند تا آهن‌ربای دائمی را مغناطیسی

سازند. در این بخش متد استفاده از سیم‌پیچی استاتور - که به عنوان کویل مغناطیس کننده به کار می‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود محدودیت‌هایی در شکست عایقی و جریان بیشینه که از طریق تجهیزات مغناطیسی فراهم می‌شود، آهن‌رباهای دائمی گاهی اوقات می‌توانند با یک مرتبه مغناطیسی شدن پس از مونتاژ - کاملاً مغناطیسی شوند و بنابراین مغناطیسی شدن مکمل - یا مغناطیسی کردن آهن‌ربای دائمی برای دومین بار یا چندمین بار بایستی مورد بررسی قرار گیرد. مغناطیسی مکمل برای آهن‌رباهای دائمی موتور DC بدون زغال - که برای HEV به کار می‌رود - در این بخش بررسی شده است.

### مدل تحلیل و مغناطیسی شدن پس از مونتاژ برای اولین بار

موتور DC بدون زغال مغناطیسی با 24 شیار - 4 قطب و 3 فاز در اینجا بررسی شده است.



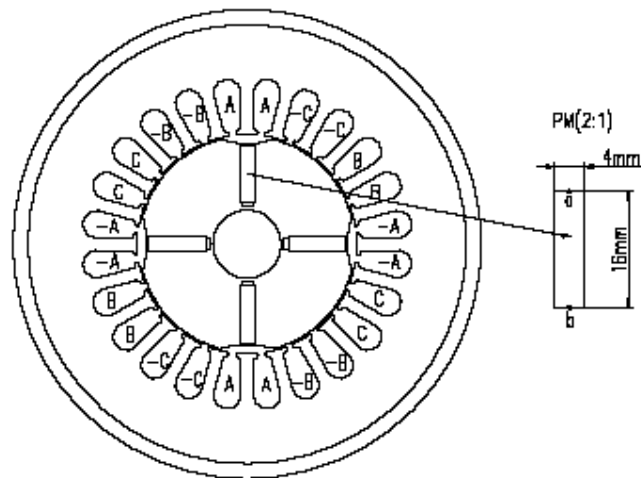


Fig. 1. Cross section diagram of the prototype motor.

### شکل ( 3-31 )

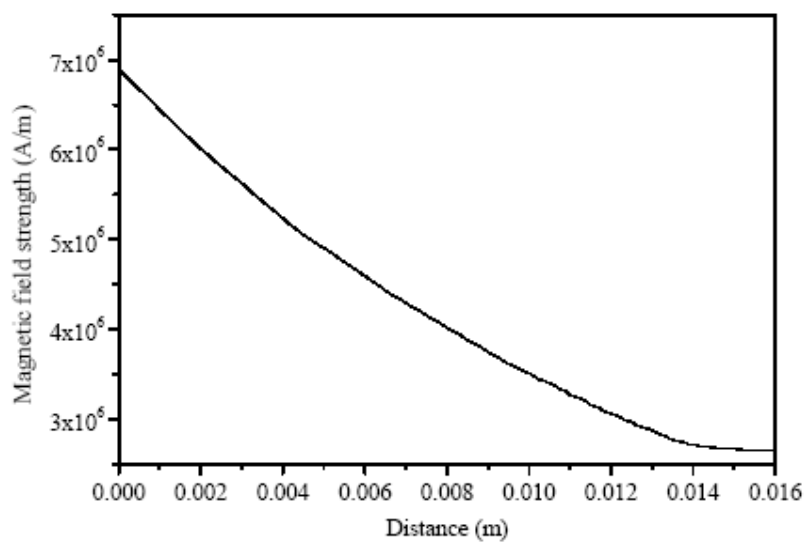
نمودار برش مقطعی آن در شکل (3-31) نشان داده شده است. ترتیب سیم‌پیچی و سائز آهن‌رباهای دایمی آن نیز در این شکل داده شده‌اند. وقتی که آهن‌رباهای دایمی مغناطیسی می‌شوند سیم‌پیچ یک فاز (یا فاز A) به عنوان کویل مغناطیسی به کار می‌رود و محورهای سیم‌پیچی مغناطیس کننده استاتور و قطب مغناطیسی رتور در یک میدان، بوسیلهٔ tooling قرار می‌گیرند.

بسته به مقدار پیک جریان مغناطیس کنندگی، حالت مغناطیسی آهن‌رباهای دایمی متفاوت می‌باشد. به فرض که کل جریان مغناطیسی بیشینه در یک شیار، به  $3 \times 10^5 A$  می‌رسد و 4 آهن‌ربای دایمی مغناطیسی می‌شوند

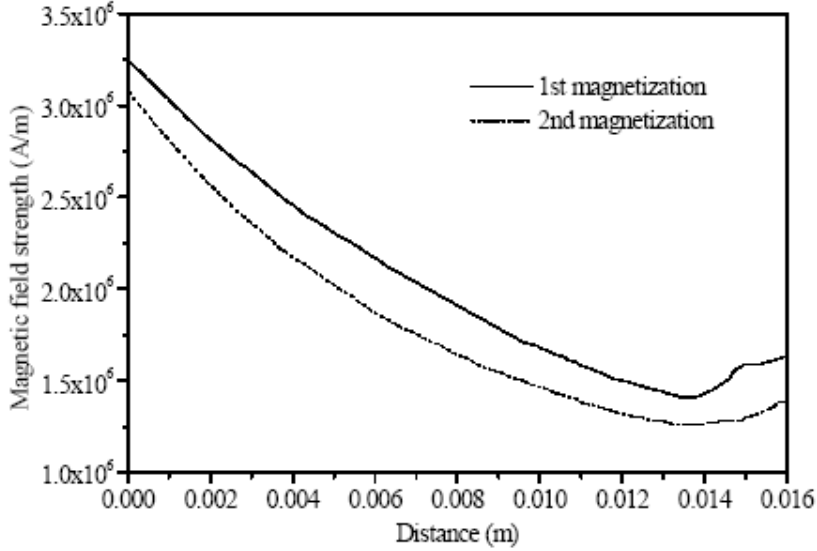
(مغناطیسی بار اول). توزیع میدان مغناطیسی در این موتور بوسیله متد المان محدود گذرای دوبعدی (FEM) محاسبه می‌شود که در نرم‌افزار تبلیغاتی Ansys فراهم شده و تأثیر جریان‌های فوکو هیستریزیس آهن‌رباهای مغناطیسی نیز بررسی شده است. توزیع FEM محاسبه شده استقامت میدان مغناطیسی در راستای خط  $ab$  در شکل (3-32) نشان داده شده است (پیوندهای اصلی به نقطه  $a$ ). در مورد مواد آهن‌ربای دایمی که در اینجا به کار رفته (Ndfeb30sh)، پسماند برابر با  $1/115T$  می‌باشد. ضد پسماند  $884 \text{ KA/m}$  می‌باشد و استقامت میدان مغناطیسی  $2500 \text{ ka/m}$  است. وقتی که استقامت میدان مغناطیسی بیشتر از  $2500 \text{ KA/m}$  می‌شود می‌تواند کاملاً مغناطیسه شود طوری که می‌توان بنابر شکل (3-32) مشاهده کرد که 4 آهن‌ربای دایمی می‌توانند کاملاً مغناطیسی شوند.

در هر حال در برخی موارد، جریان مغناطیس‌کنندگی از طریق مغناطیس‌کننده تخلیه خازنی فراهم می‌شود در فرآیند مغناطیس کردن واقعی به اندازه کافی بزرگ نمی‌باشد مثلاً کل جریان بیشینه در یک شیار برابر با  $1/5 * 10^5 \text{ A}$  می‌باشد پس مشکلی برای مغناطیس کردن برای اولین بار وجود خواهد داشت. FEM محاسبه شده از توزیع‌های استقامت و میزان مغناطیسی و چگالی جریان در راستای خط  $ab$  در شکل (3-33) و (3-34) - (3) - با خطوط پیوسته نشان داده شده‌اند. همچنین بابر شکل (3-33)

می‌توان مشاهده کرد که فقط بخشی از آهن‌ربای دائمی کاملاً مغناطیسی می‌شود و بخش دیگر نمی‌تواند مغناطیسی شود. در اینجا مغناطیسی کردن مکمل استفاده شده است یعنی مغناطیس کردن پس از مونتاژ - برای بار دوم به کار رفته است تا مغناطیس کردن کامل را اطمینان دهد.



شکل (3-32)



شکل (3.33)

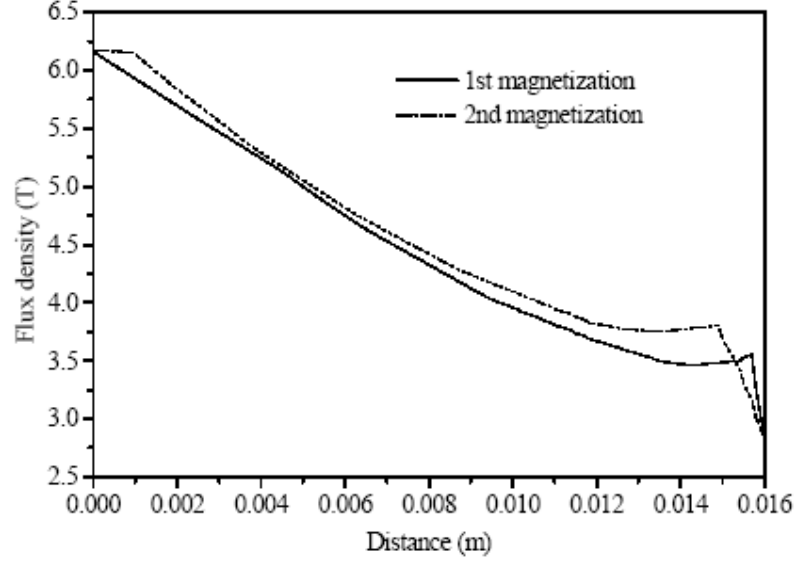


Fig. 4. Flux density vs. distance when slot current is  $1.5 \times 10^5$  A.

## شکل (3-34)

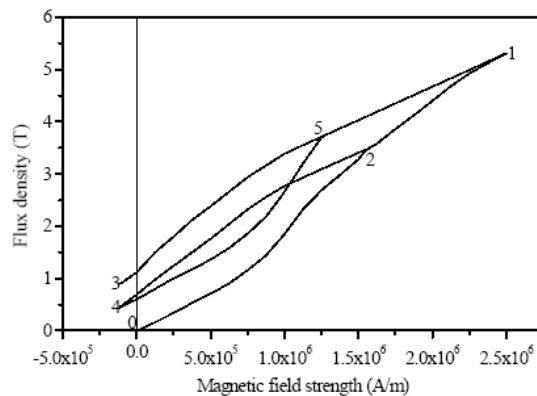
## مغناطیسی کردن پس از مونتاژ مکمل برای بار دوم:

استاتور و رتور را وضعیت نسبتاً مشابه مثل مغناطیسی کردن برای بار اول حفظ کنید و سپس مغناطیسی کردن پس از مونتاژ را برای بار دوم به کار برید. آهنرباهای دائمی برای 2 مرتبه مغناطیسی کردن، متفاوت می‌باشند. در مغناطیسی کردن بار اول، آهنرباهای دائمی غیرمغناطیسی می‌شوند ولی برای بار دوم، آهنرباهای دائمی پیش مغناطیسی می‌شوند.

وقتی که محاسبه FEM انجام می‌شود، هر آهنربای دائمی به 6 بخش در جهت شعاعی تقسیم می‌شود. تنها بخش مغناطیس شده، یکی از آنهاست و بخش پسماند (باقی مانده) سرانجام به 5 بخش تقسیم می‌شود. در اینجا فرض می‌کنیم که هر بخش مغناطیسی شده است و هر بخش ویژگی مشابهی همچون نقطه مرکزی دارد. همانطور که می‌توانید از حالت مغناطیسی آهنرباهای دائمی نشان داده شده در شکل 5 ببینید، پس از اولین بار مغناطیسی کرد، هر بخش در جهت منحنی مغناطیسی‌زدایی خودش تا ربع دوم حرکت می‌کند. بخش کاملاً مغناطیسی شده از نقطه 1 به نقطه 3 می‌رود و بدترین بخش مغناطیسی شده (یا بخش دارای نقطه ط در شکل (3-31)) از نقطه 2 به نقطه 4 می‌رود.

حال آهن‌رباهای دائمی برای دومین بار مغناطیسی می‌شوند و جریان‌های مغناطیس‌کنندگی شیارهای استاتور شبیه به مغناطیسی کردن بار اول می‌باشد ( $1/5 \times 10^5 \text{ A}$  بر شیار). پس هر بخش در جهت منحنی مغناطیس‌کنندگی محلی خودش حرکت می‌کند و توزیعات محاسبه شده FEM استقامت میدان مغناطیسی و چگالی شار امتداد خط  $ab$  در شکل (3-33) و (3-34) نشان داده شده‌اند (از طریق خطوط dash). در شکل (3-35) بدترین بخش مغناطیسی از نقطه 4 به نقطه 5 رفته و این در ماکزیمم لوپ هیستریزیس می‌باشد. بنابراین بدترین بخش می‌تواند کاملاً مغناطیسی شود بعد از اینکه مغناطیسی کردن برای بار دوم صورت گرفت البته هر آهن‌ربای دائمی - کاملاً مغناطیسی می‌شود.

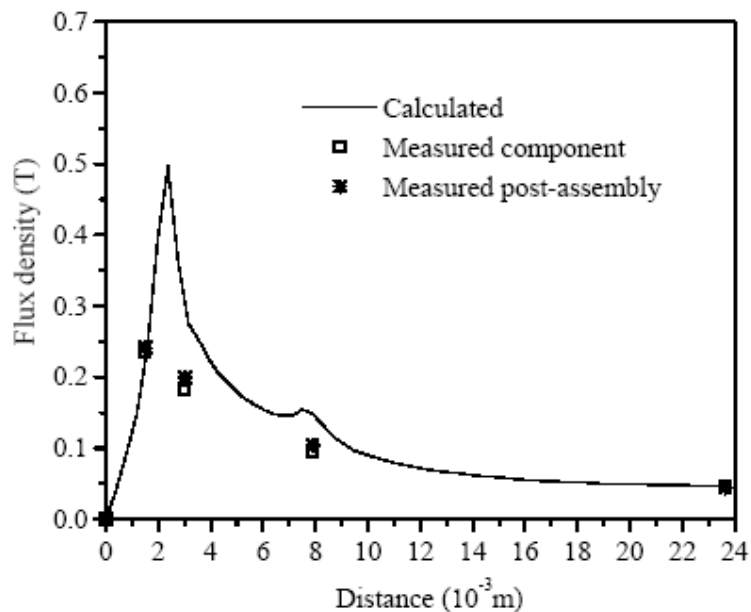
اگر جریان مغناطیس‌کنندگی کمتر باشد، پس مغناطیسی کردن پس از مونتاژ ممکن است چندین مرتبه به کار برده شود تا سطح مغناطیسی کردن را بهبود بخشد.



## شکل (3-35)

## مقایسه آزمایشی مغناطیسی کردن پس از مونتاژ و مداری

2 موتور نمونه، ساخته شدند. یکی از آنها دارای مغناطیس کنندگی مداری می باشد و دیگری مغناطیس کنندگی پس از مونتاژ است (2 مرتبه مغناطیسی کردن پس از مونتاژ) برای بهبود توانایی جهت اطمینان از ولتاژ مغناطیس کنندگی در حالت پس از مونتاژ، سیم پیچ و مواد عایق مخصوص، انتخاب شدند. تست های شکست عایقی را بعد از مغناطیس سازی پس از مونتاژ با به کارگیری ولتاژ 2kv مغناطیس کنندگی نشان ندادند (و این برای مغناطیس کننده تخلیه خازنی کاملاً نرمال است).



شکل (3-36)

چگالی شار سطح رتور در 2 موتور، با Tesla Meter اندازه‌گیری شدند و این در شکل (3-36) نشان داده شده است (رابطه‌های اصلی با نقطه میانی در بین 2 قطب مغناطیسی - یعنی نقطه نزدیک؛ نقطه a در شکل (3-31)). در مورد موتور مغناطیس شده پس از مونتاژ، اندازه‌گیری شد. آهن‌رباهای دائمی موتور مغناطیسی مداری نیز بررسی شدند تا کاملاً بنابر تجارب قبلی مغناطیسی شوند. می‌تواند بنابر شکل (3-36) مشاهده کرد که چگالی شار اندازه‌گیری شده سطح رتور - در 2 موتور - در حالت‌های هماهنگی خوبی می‌باشند.



چگالی شار سطح رتور، همچنین بوسیله FEM مغناطیس ساکن دوبعدی محاسبه شدند و منحنی محاسبه شده در شکل (3-36) نشان داده شده است. همچنین می توان مشاهده کرد که نتایج محاسبه شده و اندازه گیری شده با هم مشابه می باشند. پس می توان از توافق بین داده های اندازه گیری شده و پیوستگی بین نتایج محاسبه شده و اندازه گیری شده، محاسبه کرد که آهن رباهای دائمی آنها با 2 مرتبه مغناطیسی کردن پس از مونتاژ کاملاً، مغناطیسی شده اند.

منحنی های مربوط به نیروی ضدمحرک الکتریکی (BEMF) فاز تست شده در 2 موتور به ترتیب در شکل های (3-37) و (3-38) نشان داده شده اند. در اینجا، منحنی های BEMF دو فاز در 1200 rpm داده شده اند. می توان مشاهده کرد که منحنی های BEMF این دو موتور با هم یکی می باشند با این استثنا که منحنی موتور مغناطیسی شده پس از مونتاژ، به اندازه موتور مغناطیسی شده مداری در این سرعت، واضح نیست (آزمایش ها هیچ تأثیری از این پدیده را در عملکرد موتور - تاکنون نشان نداده اند).

منحنی های گشتاور تست شده برحسب جریان (که در 3000 rpm تست شدند) در این 2 موتور در شکل (3-39) نشان داده شده اند. می توان مشاهده کرد که منحنی های گشتاور برحسب جریان و بار هم برابر و یکی می باشند.

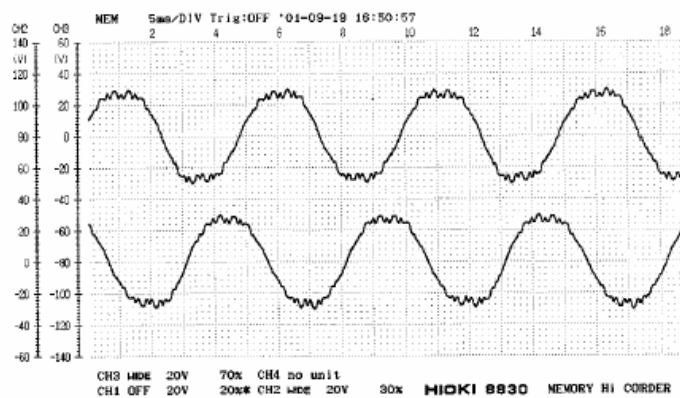


Fig. 7. Measured BEMF curve of component-magnetization motor.

شکل (3\_37)

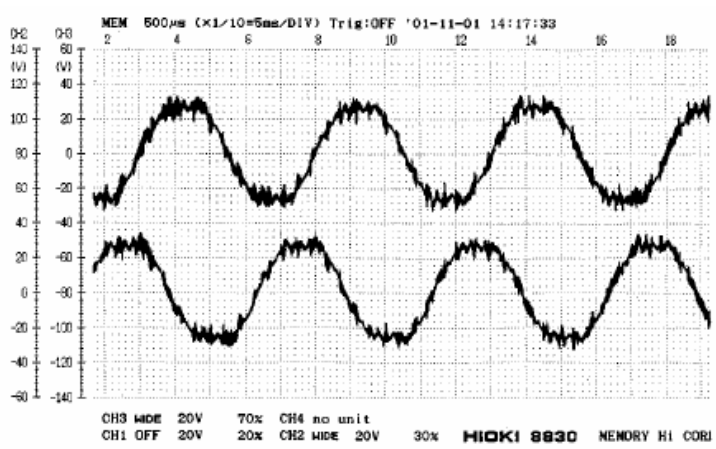


Fig. 8. Measured BEMF curve of post-assembly-magnetization motor.

شکل (3\_38)

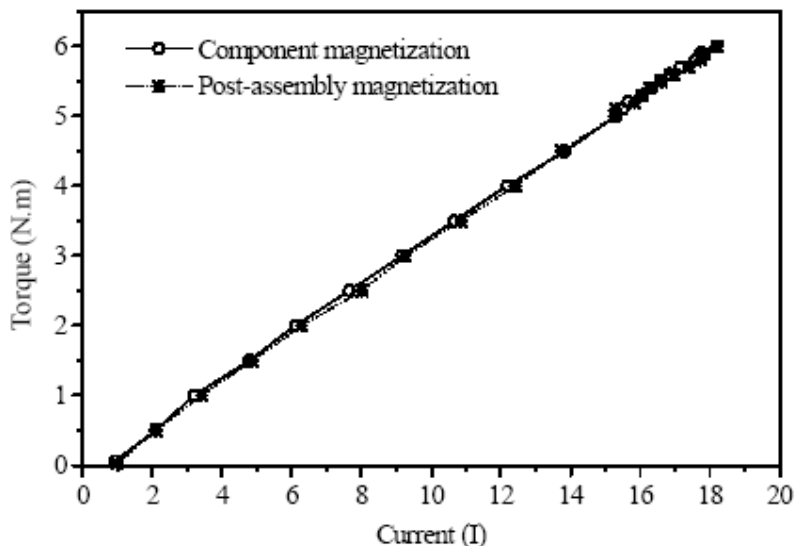


Fig. 9. Measured torque vs. current curves.

شکل (3-39)

### نتیجه‌گیری

متد مغناطیسی کردن پس از مونتاژ - که یک فاز از سیم‌پیچی استاتور به عنوان کویل مغناطیس کننده به کار رفت تا آهن‌رباهای دائمی را مغناطیسی کند و اینها می‌توانند در موتور dc بدون زغال مغناطیسی - برای HEV - به کار برده شوند. اگر جریان مغناطیسی در سیم‌پیچی قسمت ساکن به اندازه کافی بزرگ باشد پس آهن‌رباهای دائمی می‌توانند کاملاً با یک مرتبه مغناطیسی کردن پس از مونتاژ - مغناطیسی شوند. و اگر جریان مغناطیس به اندازه کافی بزرگ نباشد پس مغناطیس‌سازی مکمل (2 مرتبه یا چند

مرتب) نیاز است تا مغناطیس‌سازی کامل را اطمینان دهد. چگالی شار سطح دوران اندازه‌گیری شده در موتور نمونه مغناطیسی شده مدار و نمونه مغناطیسی شده پس از مونتاژ (با 2 مرتبه مغناطیسی کردن پس از مونتاژ) شبیه بهم می‌باشند و با منحنی محاسبه شده FEM یکی هستند. منحنی‌های تست شده BEMF و منحنی‌های گشتاور برحسب جریان 2 موتور منطبق با یکدیگر می‌باشند. به توافق آزمایشی این 2 موتور نمونه، اثر مغناطیسی پس از مونتاژ و مغناطیسی مکمل را ثابت می‌کنند.

بخش سوم

"معرفی خودروهای هیبرید و بررسی عملکرد آنها"

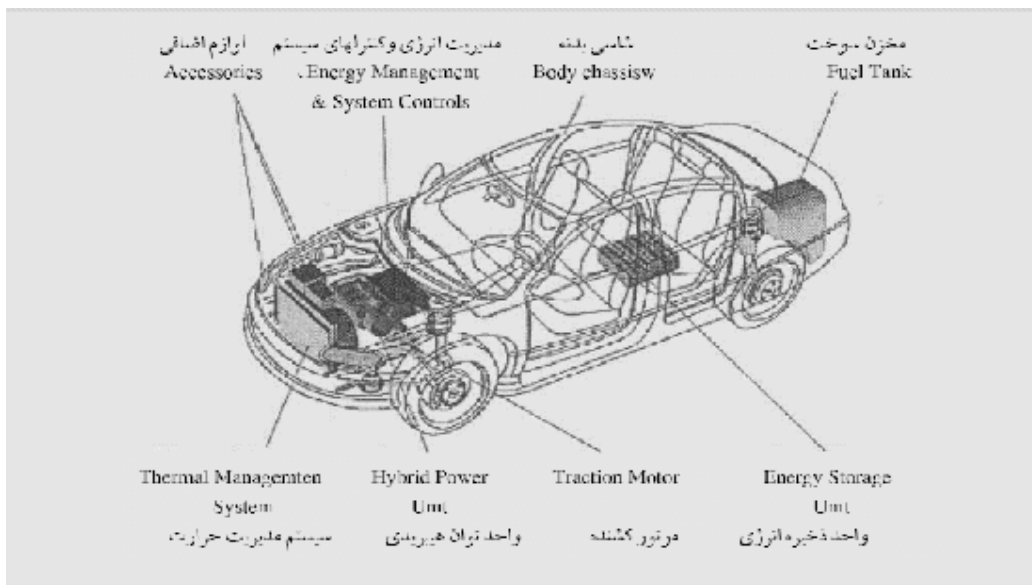
## خودروهای هیبریدی (Hybrid Vehicles)

خودروهای هیبریدی معمولاً تلفیقی از موتور احتراق داخلی خودروهای متداول با باتری و موتور الکتریکی یک خودرو الکتریکی هستند. این تلفیق انتشارات (گازهای خروجی) اندک همراه با توان، برد عملیاتی و سوخت مصرفی مناسب خودروهای معمول (گازوئسل و بنزین) را عرضه می‌کند و این خودروها هرگز نیاز به اتصال به برق ندارند. این انعطاف پذیری ذاتی خودروهای هیبریدی آنها را برای ناوگان حمل و نقل و مصرف شخصی مناسب کرده است. خودروهای هیبریدی می‌توانند سرعت و مسافت بیشتری نسبت به انواعی که موتورهای درون‌ساز دارند داشته باشند، با این حسن بزرگ که شارژباتری‌های هرگز تمام نمی‌شود. بازدهی این خودروها بسیار بالا بوده و میزان تولید آلودگی‌شان کاهش یافته است. به همین دلیل بسیاری از کارخانه‌ها از سال 1999 تولید خودروهای هیبریدی را به صورت انبوه آغاز کرده‌اند.

امروزه خودروهای هیبریدی مورد توجه کمپانیهای بزرگ جهان قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به شرکتهایی مانند: تویوتا، هنداء، میتسوبیشی، فورد، فیات، جنرال موتورز، دایملر کرایسلر، نیسان و پژو و ... اشاره نمود. توفیق این محصولات به حدی چشمگیر بوده که از دسامبر سال 1997 تا ابتدای سال 2000 بیش از چهل هزار محصول پریوس کمپانی تویوتا به فروش رسیده است.

خودروهای هیبریدی به وسیله دو منبع انرژی - یک واحد تبدیل انرژی (همچون یک موتور احتراق یا پیل سوختی) و یک وسیله ذخیره انرژی (هم چون باتری هل یا فرا خازن ها) - توان می گیرند . واحد تبدیل انرژی امکان قدرت گرفتن از بنزین ، متانول ، گاز طبیعی فشرده ، هیدروژن یا سوخت های جانشین دیگر را دارد. خودروهای هیبریدی این پتانسیل را دارنئ که 2 تا 3 برابر راندمان بالاتری نسبت به خودروهای متداول داشته باشند. خودروهای هیبریدی می توانند دارای طراحی موازی طراحی سری یا ترکیبی از هر دو باشند. در یک طراحی موازی ، واحد تبدیل انرژی و سیستم محرکه الکتریکی مستقیما به چرخ های خودرو مرتبط شده اند. موتور اصلی برای رانندگی در بزرگراه ها استفاده می شود ، موتور الکتریکی توان اضافی را هنگام پیمودن سر بالایی ها ، شتاب گرفتن و مواقع دیگر که توان بالای خودرو نیاز باشد فراهم می آورد. در یک طراحی سری ، موتور اصلی به یک ژنراتور تولید کننده الکتریسیته مرتبط است . الکتریسیته باتری هایی را شارژ می کند که

موتور الکتریکی را که به چرخ ها توان می دهد به کار می اندازد. بر خلاف خودروهای الکتریکی ، خودروهای هیبریدی نیازی به اتصال به برق شهر ندارند. در عوض آنها با ترمز واکنشی یا ژنراتور شارژ می شوند.



### اجزاء خودروهای هیبریدی

خودروهای هیبریدی یک ترکیب بهینه از اجزای مختلف هستند. یک نمونه خودرو هیبریدی را دیاگرام بالا می بینید.

- کنترل کننده ها / موتور کشنده الکتریکی
- سیستم های ذخیره کننده انرژی الکتریکی ، همچون باتری ها و فراخازن ها



• واحد توان هیبریدی همچون موتور احتراق جرقه ای ، موتورهای  
انژکتور مستقیم احتراق تراکمی (دیزل) توربین های گازی و پیل های  
سوختی

- سیستم های سوخت رسانی برای واحد توان هیبریدی
- جعبه دنده (گیربکس)

برای کمک به گازهای خروجی و بهبود کارایی های خودرو ، اجزاء و سیستم های زیر  
بواسطه تحقیق و توسعه اصلاح شدند :

- سیستم های کنترل گازهای خارجی
- مدیریت انرژی و کنترل سیستم ها
- مدیریت حرارتی اجزاء
- وزن پایین وایرو دینامیک بدنه / شاسی
- مقاومت غلطشی پایین (شامل طراحی بدنه و تاپرها )
- کاهش بار لوازم اضافی

### کنترل کننده ها / موتورهای هیبریدی

موتورهای کارگران پر کار سیستمهای راننده خودروهای هیبریدی هستند ، یک  
موتور کشنده الکتریکی ، انرژی الکتریکی واحد ذخیره انرژی را به انرژی مکانیکی که

چرخ های خودرو را به حرکت در می آورد. بر خلاف خودروهای معمول که برای بدست آوردن گشتاور کامل ، موتور باید سرعت بگیرد موتور الکتریکی گشتاور کامل را در سرعت های پایین نیز فراهم می کند. همین مشخصه شتاب غیر خطی عالی به خودرو می دهد . مشخصه های مهم موتور خودروی هیبریدی شامل کنترل خوب رانندگی با خطای مجاز صدای کم و رانندمان بالا می باشد. مشخصه های دیگر شامل انعطاف پذیری مربوط به نوسان ولتاژ و البته قابل قبول بودن قیمت تولید انبوه می شود. تکنولوژی موتور جلو برنده برای کاربردهای خودروی هیبریدی شامل آهنربای دائمی ، القای جریان متناوب و موتورهای مقاومت مغناطیسی متغییر می باشد.

### باتری خودرو هیبریدی

باتری ها یک از اجزای ضروری خودروهای هیبریدی هستند . گر چه تعداد کمی از تولیدات خودروهای هیبریدی با باتریهای پیشرفته در بازار عرضه شده اند اما هیچ کدام از باتری های رایج یک ترکیب قابل قبول اقتصادی از توان ، رانندمان انرژی و طول عمر را برای حجم بالای تولید خودرو ارائه نداده اند. ویژگیهای مطلوب باتریهای با توان بالا برای کاربردهای خودروهای هیبریدی شامل این موارد است : پیک و توان مخصوص تکانه بالا ، انرژی مخصوص بالای توان تکانه ، پذیرش شارژ بالا برای بیشینه کردن بهره بری ترمز واکنشی و طول عمر طولانی . روش ها و طراحی های در حال توسعه برای هماهنگی مجموعه به صورت الکتریکی و حرارتی ، روشهای

دقیق در حال پیشرفت برای تعیین وضع شارژ باتری ، باتریهای بادوام در حال پیشرفت و قابلیت بازاریابی ، چالش های تکنیکی دیگر هستند.

## فصل 6 - خودروهای هیبرید با موتور PM BLDC

### مقدمه

یکی از موضوعات مورد تمرکز محققان وسایل نقلیه الکتریکی، خودروهای هیبرید است. بسیاری از تولیدکنندگان این خودروها، HEV ها را به طور موفقیت آمیزی تولید می کنند. طرح های مونتاژ در این خودروها بسیار قوی است. و انتظارات متفاوتی از ماشین های الکتریکی این خودروها وجود دارد که برخی از آنها به قرار ذیل می باشند:

گشتاور بزرگ - سرعت بالا - چگالی، قدرت بالا، پاسخ سریع، قابلیت اطمینان خوب و EMC در این بخش کاربرد موتور سنکرون آهن ربای دائم در این خودروها نشان داده شده است. در این خودروها دو ماشین الکتریکی وجود دارد که یکی از آنها به وسیله یک تسمه با موتور احتراق داخلی و starter به صورت مجمع کوپل شده است و دیگری با یک گیربکس کند کننده به محور

چرخها کوپل شده است و به عنوان موتور کمکی کار می‌کند. هر دوی این ماشین‌های الکتریکی موتور سنکرون آهن‌ربای دائم هستند برای این طرح هیبرید، منحنی‌های گشتاور سرعت الکتریکی از طریق شبیه‌سازی به دست می‌آید. نوع موتور و کنورتور پیشرفت کرده است. ماشین‌های الکتریکی با ICE جمع شده‌اند و قدرت انتقالی، تلفیقی از قدرت دو موتور الکتریکی و ICE است و فضای اشغال شده کاهش می‌یابد. کنورتور توسط CANBUS به واحد کنترل وسیله نقلیه ارتباط می‌یابد. کنترل گشتاور و کنترل ضعیف جریان انتظارات کنترلی وسیله را فراهم می‌کند. ماکزیمم کنترل راندمان، موجب بهینه‌سازی سیستم محرک می‌شود. تحقیقات آزمایشی انجام شده است. منحنی‌های گشتاور - سرعت و نقشه راندمان سیستم آورده شده است. آزمایشها نشان می‌دهد که سیستم محرک موتور سنکرون آهن‌ربای دائم در خودروهای برقی هیبرید کاربرد بهتری دارد.

مصرف بالای سوخت ضایعات کم و عملکرد بالا همگی از ویژگی‌های وسایل نقلیه الکتریکی هیبرید (HEV) می‌باشند. HEV ها به خاطر ایجاد پیشرفت در ساختار وسایل نقلیه توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده‌اند. سیستم‌های محرک هیبرید می‌توانند در ادوات جنگی نیز به کار روند. در سیستم محرک هیبریدی قدرت بالا با استفاده از موتور کوچکتر و مصرف کمتر سوخت نسبت به موتور احتراقی تنها به دست می‌آید. محرک پذیری

بهتر و دامنه مبارزه وسیع‌تری می‌تواند حاصل شود. تنها با حالت چرخش موتور نزدیک شدن کامل به دشمن می‌تواند به دست آید.

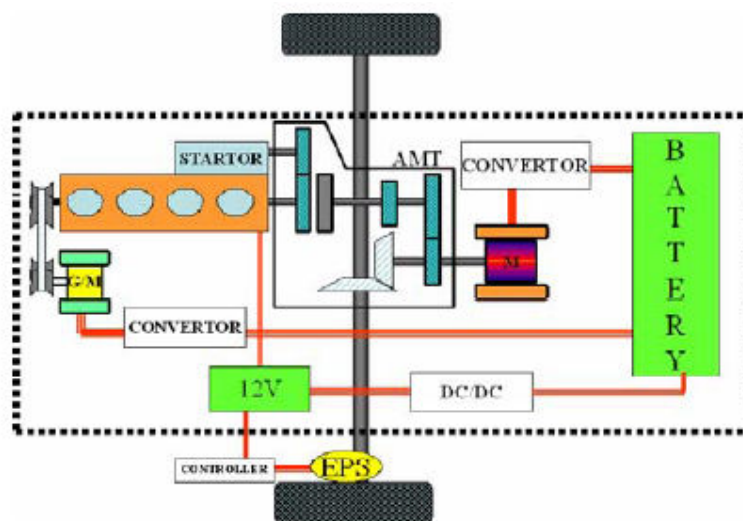
علاوه بر استفاده از ماشین‌های الکتریکی و باتری‌ها برای مونتاژ محرک و استراتژی کنترل پیشرفته و HEV ها عملکرد وسایل نقلیه را نیز بهبود بخشیده‌اند. خصوصیات ماشین‌های الکتریکی بر عملکرد وسیله نقلیه به خصوص بر مصرف سوخت تأثیر می‌گذارد.

متدهای طراحی ماشین‌های الکتریکی نرمال برای HEV کارساز نیستند، به این علت که ماشین‌های الکتریکی به کار رفته در این وسایل نقلیه به تناوب از مُد موتوری به مد ژنراتوری و بالعکس می‌روند و رنج سرعت و گشتاور آنها در سطح وسیعی است و تناسب طراحی برای تمام نقاط کار در ماشین‌های الکتریکی کلاسیک وجود ندارد.

در این فصل نقاط کاری معمول ماشین‌های الکتریکی از طریق شبیه‌سازی نشان داده شده و طراحی ویژه گشتاور و سرعت بر همین مبنا می‌باشد. موتور سنکرون آهن‌ربای دائم (PM SM) به خاطر راندمان بالا و قدرت ویژه بر حجم بالایش در HEV به کار رفته است. به منظور دستیابی به رنج وسیعی از قدرت‌های ثابت، کنترل تضعیف جریان پذیرفته می‌شود.

**مونتاژ محرک خودروی برقی هیبرید**

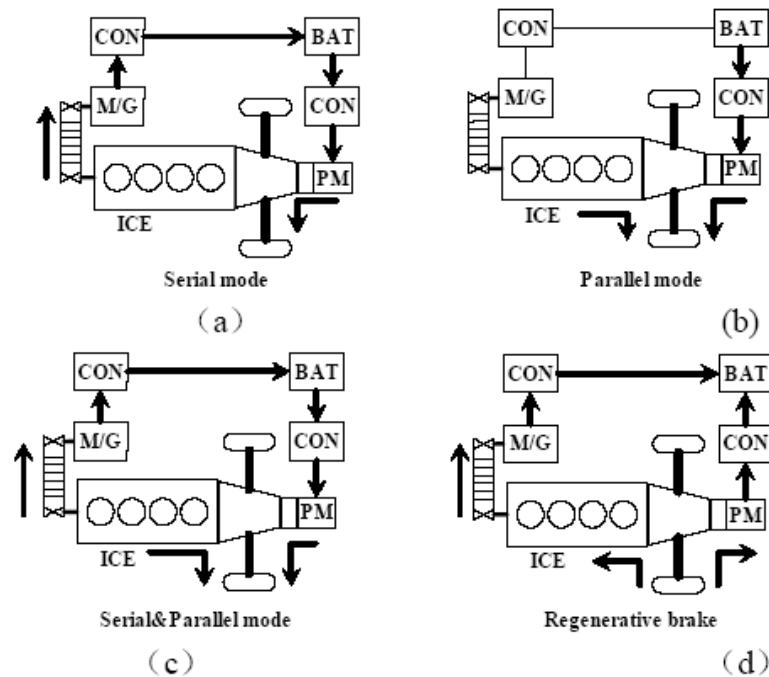
شکل (4-1) ساختار مونتاژ محرک یک خودرو برقی هیبرید را نشان می‌دهد. سه ماشین الکتریکی، ژنراتور و استارت (M/G)، استارت و موتور اصلی (M)، در شکل وجود دارند. G/M تلفیقی است از استارت و ژنراتور (ISO) که با یک تسمه به موتور احتراق داخلی متصل شده. استارت یک پشتیبان است. M که موضوع این بخش است موتور اصلی (Main Motor) نام دارد که از طریق چرخ دنده انتهای شفت به محور چرخها متصل می‌شود موتور اصلی یک موتور سنکرون آهنربای دائم است و یک باتری 288v، loah و از نوع nih است.



شکل (4-1)

خودرو برقی هیبرید 8 مدکاری دارد: مد توقف خلاص ، حرکت ICE حرکت موتور، مد سری، مد موازی، مد سری موازی، محرک ICE و مد شارژ باتری و ترمز بازیافتی شکل (3-4) چهار تا از مدها را نشان می‌دهد. ICE زمانی از حرکت می‌ایستد که خودرو در وضعیت خلاصی باشد و می‌تواند در کمتر از 100ms به وسیله restart M/G شود. مد توقف خلاص مصرف سوخت و ایجاد تلفات و ضایعات را در حالت چرخش هرز کم خواهد کرد.

مد حرکت، ICE شبیه خودروهای قدیمی است و در زمان انجام مؤثرترین کار توسط بخشی از ICE رخ خواهد داد. مد حرکت موتور شبیه خودروهای برقی با باتری است و در سرعت‌های بسیار پایین رخ خواهد داد. مد سری که در شکل (a) (2-4) نشان داده شده ICE M/G را به منظور شارژ باتری می‌چرخاند و موتور اصلی چرخها را می‌راند.



شکل (4-2)

در مد موازی که در شکل (4-2 (b)) نشان داده شده است و هر دوی ICE و موتور چرخها را می‌رانند. مد موازی زمانی اتفاق می‌افتد که قدرت خروجی زیادی مورد نیاز باشد مد سری موازی در شکل (4-2 (c)) نشان داده شده است. زمانی که وضعیت شارژ باتری کم است ICE M/G را می‌چرخاند، باطری شارژ می‌کند و هم زمان چرخها را نیز به حرکت در می‌آورد. در مد ترمز بازیافتی نشان داده شده در شکل (4-2 (d))، M/G و موتور اصلی در مد ژنراتوری کار می‌کنند تا باطری را شارژ کنند. این حالتها باعث کاهش مصرف سوخت می‌شوند.



### شبیه‌سازی بر مبنای استراتژی کنترل وسیله نقلیه

به منظور طراحی رنج سرعت و گشتار ماشین الکتریکی، مخصوصاً سرعت پایه، شبیه‌سازی مبتنی بر مدهای حرکت وسیله و استراتژی کنترل در Simulink ADVISOR که یک نرم‌افزار شبیه‌سازی وسایل نقلیه الکتریکی است انجام شده است.

تحت چرخه حرکتی ECE-EUDC، نقاط کاری ماشین الکتریکی شبیه‌سازی می‌شود سرعت پایه ماشین الکتریکی بر مبنای شبیه‌سازی می‌باشد. سیستم محرک ماشین الکتریکی از طریق بهینه‌سازی نقاط کار معمول طراحی می‌شود. پرسه طراحی M/G ساده‌تر از طراحی ماشین الکتریکی اصلی است.

در خودروهای هیبرید، قدرت موتور اصلی 20kw است؛ و حداکثر سرعت چرخش 5000rpm است. با توجه به شبیه‌سازی، بیشترین گشتاور و سرعت پایه کم ماشین الکتریکی برای خودرو مناسب است. نتایج شبیه‌سازی دو ماشین الکتریکی با قدرتهای نامی مشابه در اینجا آمده است. یکی با سرعت پایه 1280rpm به نام ماشین الکتریکی با سرعت پایه پایین و دیگری با سرعت پایه 4000rpm به نام ماشین الکتریکی با سرعت پایه بالا پارامترهای پایه‌ای وسیله نقلیه در جدول (1-4) نشان داده شده است.

Mass/ kg	Coefficient of rolling resistance	Coefficient of aerodynamic drag $C_d$	Vehicle frontal area/ $m^2$	Wheel radius/m	Transmission efficiency
1655	0.00917	0.31	2.15	0.301	0.92
1 <sup>st</sup> gear ratio	2 <sup>nd</sup> gear ratio	3 <sup>rd</sup> gear ratio	4 <sup>th</sup> gear ratio	Final gear ratio	
3.6	2.125	1.32	0.857	3.889	

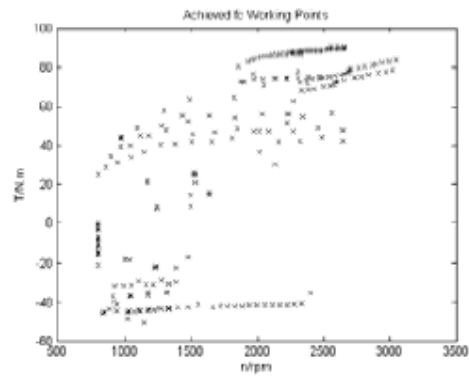
جدول (4-1)

قدرت ICE 1.5 لیتری 43kw، انتقال اتوماتیک و M/G PMSM 8KW است.

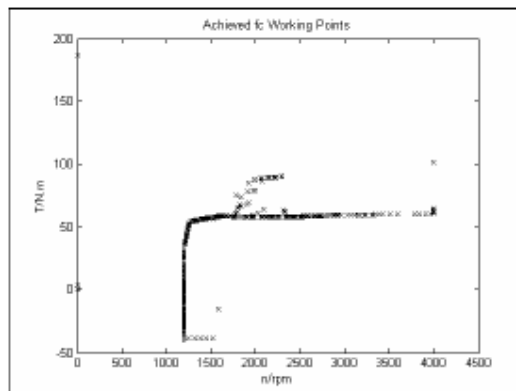
جدول (4-2) نتایج شبیه‌سازی برای حرکت ICE تنها با ماشین الکتریکی سرعت پایه بالا و پایین نشان می‌دهد.

	Fuel consuming per 100km (l)	0-96.6km/h acceleration rate (s)	64.4-96.6km/h acceleration rate (s)	Grade with speed of 88.5km/h
Only ICE drive	6.7	84	53.9	3.5%
With high base speed motor	6.1	33	10.9	5.7%
With low base speed motor	5.2	21.5	9.5	6.3%

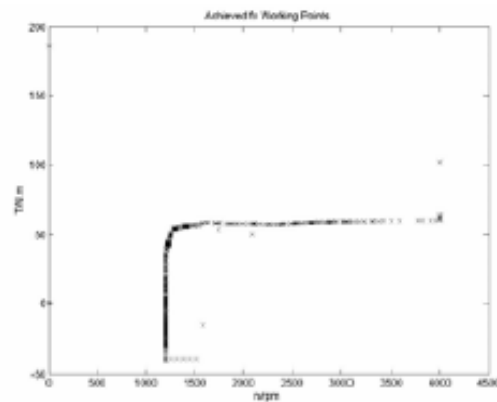
جدول (4-2)



شکل (4.2)



شکل (4.3)



## شکل (4-4)

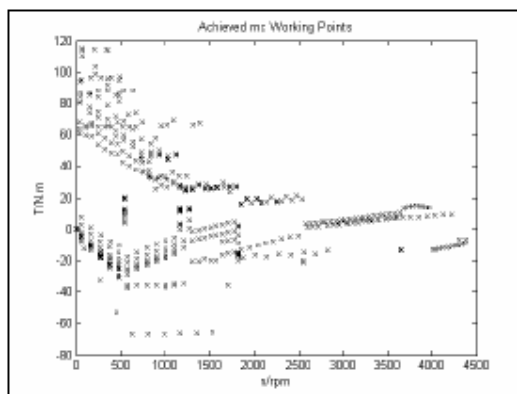
شرایط شبیه‌سازی مشابه هم است. با بیشترین گشتاور و مونتاژ محرک با ماشین الکتریکی سرعت پایه کم ICE بهترین عملکرد دینامیکی را از خود نشان می‌دهد. مصرف سوخت کمترین است چون ICE در حالتی که بیشترین راندمان را دارد کار می‌کند. نتایج فوق می‌تواند در نقاط کاری شبیه‌سازی شده تحت چرخه ECE-EUDC مشاهده شوند.

براساس تطبیق شبیه‌سازی و بررسی دیگر فاکتورهای مربوطه، پارامترهای ماشین الکتریکی اصلی به دست می‌آید که در جدول (3-4) نشان داده شده‌اند.

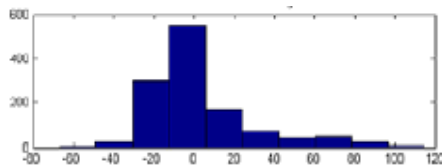
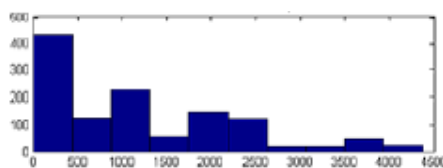
Power/kW	Max torque/ N.m	Rate torque/ N.m	Base speed/rpm
20	150	63	1280

جدول ( 3-4)

نقاط کاری ماشین الکتریکی اصلی در طی چرخه 1 تحت ECE-EUDC در جدول (4-4) نشان داده شده است. طراحی سیستم محرک، بر مبنای حالت‌های کاری معمول می‌باشد.



شکل (4-5)



شکل (4-6)

طراحی محرک‌های ماشین الکتریکی

به علت گستره وسیع قدرت ثابت (1500-5000rpm)، کنترل تضعیف شارژ در ماشین الکتریکی محرک به کار رفته است. انتخاب نهایی موتور سنکرون آهنربای دائم است و پارامترهای ماشین الکتریکی در جدول (4-4) نشان داده شده است.

Rate voltage/V	Rate current/A	Pole number	d-axis reactance/ $\Omega$	q-axis reactance/ $\Omega$	Coil resistance/ $\Omega$	Encoder pulse number
AC200	77	4	0.35	1.12	0.04	600

جدول (4-4)

به منظور کنترل گشتاور ماشین الکتریکی بر طبق مرجع کنترل برداری پذیرفته می‌شود. کنترل تضعیف شارژ نیز به منظور داشتن گستره خروجی توان ثابت استفاده می‌شود.

بر طبق اصول کنترل برداری داریم:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

که در اینجا

$i_d$  جریان محور  $d$  است

$i_q$  جریان محور  $q$  است

زاویه وضعیت رتور است

$i_u$  و  $i_v$  و  $i_w$  جریان فازهای  $u$  و  $v$  و  $w$  هستند.

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q + R_1 i_d \\ u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d + R_1 i_q \\ \Psi_d &= L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (4.2)$$

در اینجا

$u_d$  ولتاژ محور  $d$  است

$u_q$  ولتاژ محور  $q$  است

$u_d$  رابطه شارژ محور  $d$  است

$u_q$  رابطه شارژ محور  $q$  است

$\omega$  سرعت زاویه‌ای است

$R$  مقاومت پیچک است

$L_d$  اندوکتانس محور  $d$  است

$L_q$  اندوکتانس محور  $q$  است و

$f$  رابطه شارژ آهنربای دائم است.

حد مجاز جریان سیم پیچ Is و ولتاژ ماشین Us به صورت‌های زیر است.

$$I_s \leq I_{s \max} \quad (4-3)$$

$$U_s \leq U_{s \max} \quad (4-4)$$

ولتاژ ماشین الکتریکی به دست می‌آید به وسیله

$$u = \sqrt{u_d + u_q} \quad (4-5)$$

مقاومت پیچک معمولاً کوچکتر از راکتانس است پس از مقاومت پیچک در رابطه (4-2) و (4-5) صرف‌نظر می‌کنیم.

$$u = p\Omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} = \omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (4-6)$$

سرعت چرخش موتور است و p تعداد قطب‌های موتوراز معادله (4-6)

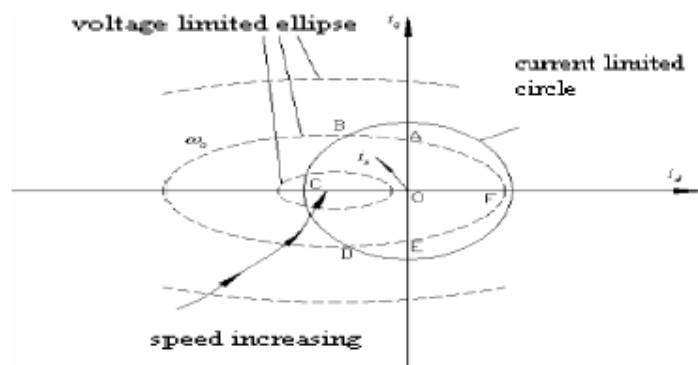
داریم:

$$\left(\frac{u_{\lim}}{\omega}\right)^2 = (L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 \quad (4-7)$$

معادله (4-7) یک معادله بیضی است، بردار ولتاژ ناحیه داخل بیضی نشان

داده شده در شکل (4-5) است





شکل ( 4-7 )

$$i_d^2 + i_q^2 = i_{lim}^2 \quad (4-8)$$

رابطه دایره‌ای حد جریان به صورت زیر است.

بردار جریان در داخل بخشی از این دایره است.

وقتی که  $U = u_e i_m$  باشد. سرعت چرخشی می‌تواند با افزایش  $i_d$  یا کاهش

$i_d$  افزایش یابد. و  $i_d$  توسط دایره جریان محدود می‌شوند. کنترل کردن بردار

جریان بر طبق مرکز دایره حد جریان، به این معنی است که ماکزیمم گشتاور

در طول کنترل تضعیف شارژ بتواند به دست آید.

$\Omega$  سرعت چرخشی هست

$$\Omega = \frac{u_{lim}}{p \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2}} \quad (4-9)$$

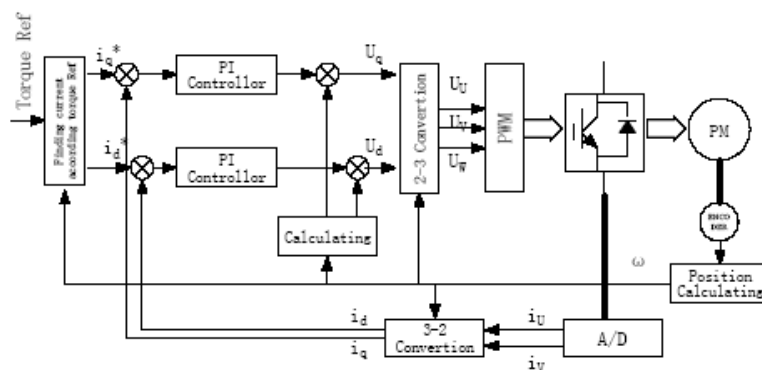
$$(4-10)$$

$$i_q = \sqrt{i_{lim}^2 - i_d^2}$$

گشتاور الکترومغناطیسی هست.

$$T_{em} = p[\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \sqrt{i_{lim}^2 - i_d^2} \quad (4-11)$$

دیگرام کنترل گشتاور در شکل (4-6) نشان داده شده است.



شکل (4-6)

### اعتباربخشی و تأیید آزمایشات

سیستم محرک و موتور نمونه به کار رفت که موتور نمونه در شکل (4-7)

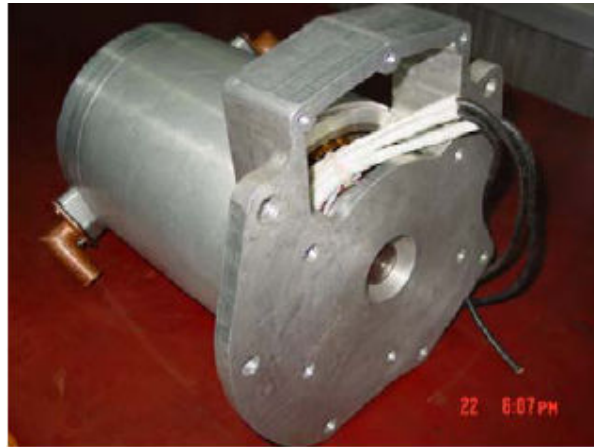
نشان داده شده است شکل (4-8) جریان سیم پیچ اندازه‌گیری شده و شکل

موج‌های سیگنال موقعیت رتور را نشان می‌دهد.

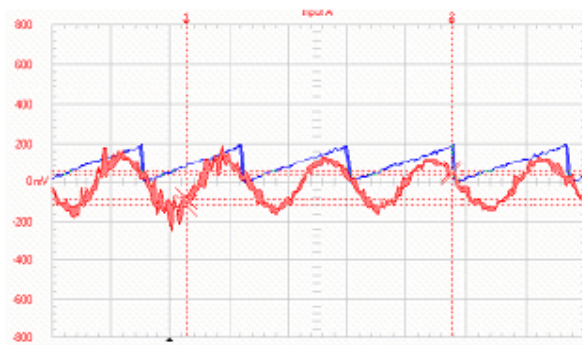
شکل (4-9) منحنی گشتاور - سرعت ماشیه الکتریکی تست شده و نقشه

راندمان سیستم محرکه را نشان می‌دهد. تاثیر کنترل تضعیف شارژ واضح و

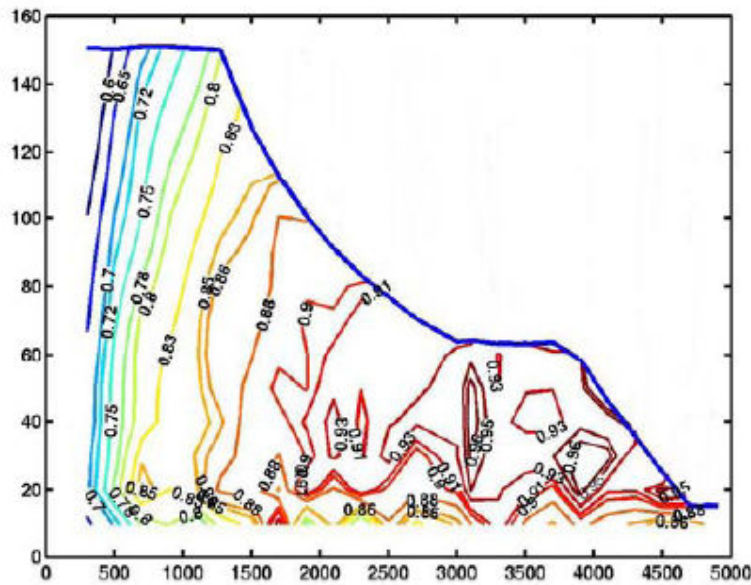
آشکار است. و راندمان سیستم بالاست.



شکل ( 4-7 )



شکل (4-8)



شکل (4-9)

### نتیجه گیری

- برای خودروی الکتریکی هیبرید خاص، پارامترهای ماشین الکتریکی از طریق شبیه سازی تعیین می شوند. این تحلیل نشان می دهد که گشتاور بزرگ، گستره وسیع قدرت ثابت ماشین الکتریکی برای دستیابی به عملکرد دینامیکی بالا و مصرف سوخت کم وسیله نقلیه مناسب است.
- بر طبق نتایج شبیه سازی، استفاده از کنترل تضعیف شارژ در سیستم محرک ماشین الکتریکی باعث ثابت بودن قدرت خروجی در گستره وسیع 1500 تا 5000 rpm شده است.

- و با کنترل برداری، گشتاور خروجی بر طبق مرجع، کنترل می‌شود و برای کنترل وسیله نقلیه مناسب است.
- تکنیک به کار رفته در این بخش می‌تواند برای ادوات جنگی نیز به کار برده شود.
- شبیه‌سازی تحت شرایط محرک خاص برای طراحی سیستم‌های محرک مفید است.
- همچنین نشان داده شده که موتورها با گستره وسیع قدرت ثابت برای افزایش قدرت خروجی در طول گستره وسیع سرعت مفید هستند.

# منبع:

