

# پروژه کارشناسی برق



موضوع : شناخت و بررسی هامونیک ها

رشته : برق قدرت

استاد : دکتر بلوچیان

تهیه کننده : امیر هزارکلاته

بهار 88

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **تقدیر و تشکر :**

\*زنده بودن را به بیداری بسپارید زیرا سالها به اجبار خواهیم خفت.(دکتر شریعتی)

\*سپاس بیکران پروردگارا که به انسان قدرت اندیشیدن بخشید تا به یاری این موهبت راه ترقی و تعالی را بیمایید و امید به اینکه عنایات الهی شامل حال ما باشد تا با بضاعت اندک به تلاش خود بتوانیم برای کشور عزیزمان خدمت کنیم.

\*در اینجا از تمامی اساتید دانشگاه آزاد اسلامی گناباد به خصوص دکتر بلوچیان (استاد پروژه) ودکتر صابری که اینجانب را در تهیه

پروژه یاری نمودند سپاسگزاری مینمایم. و برای این عزیزان آرزوی  
مسئلت و توفیق روز افزون را از خداوند سبحان خواستارم.

# فهرست

## فصل اول :

### شناخت و بررسی هارمونیکها

- منابع تولید هارمونیک
- اعوجاج هارونیک
- اعوجاج ولتاژ و جریان
- هارمونیک ها و حالت گذرا
- مقادیر موثر و اعوجاج هارمونیک کلی
- قدرت و ضریب قدرت
- ها رمونیکهای مرتبه سه
- منابع تغذیه تک فاز
- محرکه های DC
- محرکه های AC
- تجهیزات قوس زننده
- اثرات سوء اعوجاجات هارمونیکها
- اثر هارمونیک ها روی خازن ها
- استثنائات
- اثر بر روی موتور ها
- مشخصه پاسخ سیستم
- اثر مقاومت و بار مقاومتی
- مبانی کنترل هارمونیک
- فیلتر کردن
- اصلاح پاسخ فرکانسی سیستم
- درفیدرهای توزیع شرکت های برق

- درفیدرهای توزیع شرکت های برق
- شناسایی محل منابع هارمونیک ها
- تجهیزات مورد نیاز فیلتر کردن اعوجاج هارمونیکی
- ساختن يك فیلتر برشي براي حذف هارمونیک پنجم و تأثیر آن روی پاسخ سیستم

- کاربرد فیلتر فعال در ي بار
- مؤلفه های متقارن
- مدل سازی هارمونیکی
- برای مدل های تک فاز و سه فاز غیرمتقارن
- طراحی فیلترهای هارمونیکی
- تداخلات مخابراتی
- برنامه های کامپیوتری برای محاسبه هارمونیکیها
- مقررات برخی از کشورها در رابطه با پذیرش مشترکین برق که تولید هارمونیک می نمایند.

- روابط ولتاژ و جریان و توان در شرایط هارمونیکی

## **فصل دوم :**

### **چکیده مقالات :**

- روش قدرت برای تجزیه و تحلیل هارمونیک سیستم قدرت شامل راکتورهای کنترل
- مقایسه عملکرد سیستمهای ANC پیشخور و پسخور تک کاناله در تضعیف نویز سینوسی و هارمونیکیهای آن

## شناخت و بررسی هارمونیکها

یکی از مسائل و مشکلات در کیفیت برق در سیستمهای توزیع و فوق توزیع و انتقال مسئله هارمونیکها میباشد. اعوجاجات تولید شده در شبکه قدرت منشا داخلی دارند. برای مثال ژنراتورها و ترانسفورماتورها و تجهیزات تریستوری کنترل شده مانند پستهای تبدیل که در سیستمهای HVDC استفاده میشوند میتوانند باعث ایجاد اعوجاجات هارمونیکی گردند. اعوجاجات هارمونیکی باعث ایجاد مسائل خاصی در شبکه های قدرت میشود. از جمله این مسائل عملکرد نامناسب تجهیزات و نیز کاهش عمر و پایین آمدن راندمان دستگاهها اشلره نمود.

محدود نمودن اعوجاج هارمونیکی هم از نظر شرکت برق و هم از نظر مشترکین لازم است.

### منابع تولید هارمونیک :

#### هارمونیک

پیدایش عناصر نیمه هادی و استفاده فراوان از آنها در شبکه های قدرت عامل جدیدی برای ایجاد هارمونیک در سیستم های قدرت بوجود آورده. کاربرد این عناصر را میتوان در تجهیزات و سیستمهای قدرت زیر دید:

#### - سیستمهای HVDC

- تجهیزات مورد استفاده در کنترل کنندههای سرعت ماشینهای الکتریکی .
- اتصال نیروگاههای خورشیدی و بادی به سیستم های توزیع.
- بعنوان ابزار مهمی در کنترل توان راکتیو SVC کاربرد

استفاده زیاد از یکسوکنده ها برای دشارژ با طریها. از سوی دیگر عوامل زیر را می توان به عنوان تولید کننده هارمونیک نیز در نظر گرفت.

تولید شکل موج غیر سینوسی توسط ماشین های سنکرون از وجودشیارها و عدم توزیع

یکنواخت سیم پیچی های استاتور.

عدم یکنواختی در راکتانس ماشین های سنکرون.

توزیع غیر سینوسی فوران مغناطیسی در ماشین های سنکرون.

جریان مغناطیسی ترانسفورماتور

بارهای غیرخطی شامل دستگاههای جوشکاری.

کوره های الکتریکی والقای.

از نظر صنایع وکارخانجات صنایع زیر را می توان از جمله عوامل تولید هارمونیک در شبکه ای الکتریکی محسوب نمود:

صنایع شامل مجتمع های شیمیایی وپتروشیمی و صنایع ذوب الومینیوم که از یکسو کننده های پر قدرت برای تولید برق DC مورد نیاز انجام فرایندهای شیمیایی و ذوب الومینیوم استفاده می کنند.با توجه به قدرت بالا این یکسو کننده ها هارمونیک قابل ملاحظه در شبکه قدرت به وجود می آورند.از سوی دیگر استفاده از سیستم های به منظور ارتباط بین دو نقطه با فواصل طولانی باعث ایجاد هارمونیک در سیستم می گردد.

استفاده از سیستم های الکترونیک قدرت در سیستم حمل و نقل برقی مانند اتوبوس برق و مترو ها باعث می شود که سطوح بالایی از هارمونیک به سیستم توزیع تزریق شود.

بارهای غیرخطی مانند کوره های قوس الکتریکی که در صنایع ذوب آهن استفاده می شود از عوامل تولید هارمونیک در مقیاس بزرگ می باشند.

استفاده از SVC جهت تنظیم ولتاژ کنترل توان راکتیو باعث ایجاد هارمونیک در شبکه قدرت می گردد.

## اعوجاج هارونیک

اعوجاج هارمونیک درسیستم قدرت ناشی از عناصر غیر خطی میباشد.عنصر غیر خطی عنصری است که جریان آن متناسب با ولتاژ اعمالی نمی باشد. افزایش چند درصدی ولتاژ ممکن است باعث شود که جریان دو برابر شده و نیز موج جریان شکل دیگری به خود بگیرد.این مورد ساده ای از منبع تولید اعوجاج در

سیستم قدرت میباشد. هر شکل موج اعوجاجی پریودیک را میتوان بصورت جمع موجهای سینوسی بیان نمود. یعنی وقتی که شکل موج از یک سیکل به سیکل دیگر تغییر نکنند این امواج را میتوان بصورت جمع امواج سینوسی خالص که در آن فرکانس هر موج سینوسی مضرب صحیحی از فرکانس اصلی موج اعوجاجی است نمایش داد. این موج های سینوسی که فرکانس آنها ضریب صحیحی از فرکانس اصلی می باشند را هارمونیک های مولفه اصلی گویند.

مزیت استفاده از سری فوریه در نمایش شکل موج های اعوجاجی سادگی بدست آوردن پاسخ سیستم به یک ورودی سینوسی است. همچنین در این حالت تکنیک های معمولی حل شبکه در حالت مانا نیز قابل استفاده خواهد بود. در این روش سیستم برای هر هارمونیک جداگانه بررسی شده و سپس خروجی ها در فرکانس ترکیب می گردد تا سری فوریه جدید بدست آید. با استفاده از این سری فوریه شکل موج خروجی را می توان محاسبه نمود. شایان ذکر است که بیشتر مواقع دامنه هر هارمونیک برای ما جالب خواهد بود. وقتی که هر دو نیم سیکل مثبت و منفی یک موج شبیه یکدیگر باشند سری فوریه فقط شامل هارمونیک های فرد است. این مطلب مطالعه روی سیستم های قدرت را ساده تر می کند زیرا اغلب وسایلی که تولید هارمونیک می کنند رفتار یکسانی را در برابر هر دونیم سیکل از خود نشان می دهند. در حقیقت وجود هارمونیک های زوج اغلب نشان دهنده وجود اشکالی در سیستم است. این اشکال می تواند ناشی از بار ویا ترانس دیوسری که برای اندازه گیری استفاده شده است باشد. معمولا هارمونیک های مرحله بالا (بالا تر از 50ام) در سیستم های قدرت ناچیز می باشند. در حالی که این هارمونیک ها سبب تداخل با وسایل الکتریکی قدرت پایین می شوند لیکن معمولا آسیبی به سیستم های قدرت وارد نمی آورند. از سوی دیگر جمع اوری اطلاعات کاملا دقیق در این فرکانس ها بمنظور مدل سازی سیستم های قدرت مشکل می باشد. اگر سیستم قدرت را به عناصر سری و موازی (همچنانکه در عمل هستند) تقسیم کنیم بخش عمده های از عناصر غیر خطی در سیستم قدرت جزء عناصر موازی محسوب می شوند (بارها). امپدانس های سری در سیستم قدرت (امپدانس اتصال منبع و بار) معمولا خطی می باشند. شاخه موازی



(امپدانس مغناطیس کننده) در مدار معادل ترانسفورماتور منبع تولید هارمونیک می باشد. این جمله به آن معنا نیست که تمام مشترکین که اعوجاج هارمونیک بر آنها اعمال می شود خود منبع مهم تولید هارمونیک هستند بلکه باید گفت که اعوجاج هارمونیک بعضی از بارهای مشترکین و یا ترکیبی از آنها معمولا می توانند عامل تولید هارمونیک باشند.

## اعوجاج ولتاژ و جریان

کلمه هارمونیک اغلب به تنهای استفاده می شود. برای مثال یک محرک موتور با قابلیت تنظیم سرعت یا یک کوره القایی بدلیل وجود هارمونیک بصورت

مناسبی نمی تواند کار کند. چرا این مسئله پدید آمده است؟

1- هارمونیک ولتاژ آنقدر زیاد است که سیستم کنترل زاویه اتش بخوبی عمل نمی کند.

2- هارمونیک جریان زیادتر از ظرفیت بعضی از تجهیزات در سیستم

تغذیه (مانند ترانسفورماتور و ماشین) است که باید در زیر قدرت نامی خود کار کنند.

3- هارمونیک ولتاژ زیاد است زیرا هارمونیک جریان ناشی از آن وسیله زیاد می باشد.

همچنانکه این موارد نشان می دهد دلایل و اثرات جداگانه ای برای هارمونیک

های ولتاژ و جریان و همچنین روی بعضی روابط بین این دو وجود دارد. بنابراین

واژه هارمونیک به تنهای مبهم بود و نمی توان بکمک آن بصورت دقیق یک

مسئله را توصیف کرد. بارهای غیر خطی منبع جریان هارمونیک هستند و باعث

تزریق این جریان در سیستم قدرت می شوند. برای بیشتر بررسی ها کافی است

که بارهای تولید کننده هارمونیک در سیستم را بصورت منبع جریان مدل سازی کرد.

## هارمونیک ها و حالت گذرا

اندازه گیری هر چدیده ممکن است که شکل شکل اعوجاجی با فرکانس های

بسیار بالا را نشان دهد. گر چه اغتشاشات گذرا نیز شامل مولفه های فرکانس

بالا می باشند اما حالت گذرا و هارمونیک ها پدیده های متمایزی بوده و به

صورت متفاوتی بررسی و تحلیل می گردند.

فرکانس موج های گذرا بالامی باشند و تنها لحظه ای پس از یک تغییر ناگهانی در سیستم قدرت بوجود می آیند. این فرکانس ها لزوماً پس فرکانس هارمونیک نیستند و فرکانس طبیعی سیستم در لحظه کلید زنی می باشند و ارتباطی با فرکانس مولفه اصلی سیستم ندارند. هارمونیک ها در حالت اتفاق می افتد و مضرب صحیحی از فرکانس مولفه اصلی می باشند. موج های اعوجاج یافته که داری هارمونیک هستند به صورت پیوسته وجود داشته و یا حداقل برای چندین ثانیه باقی می مانند. گذراها معمولاً در طی چندین سیکل از بین می روند. حالت گذرا در ارتباط با یک تغییر در سیستم مانند کلید زنی خازن ها رخ می دهد. در حالی که هارمونیک ها همراه با عملکرد پیوسته بار وجود می آیند. حالتی که این تمایز را از بین می برد برقرار کردن ترانسفورماتور است. این یک پدیده گذرا به شمار می آید. ولی اعوجاجی قابل ملاحظه ای را به مدت چند ثانیه تولید می کند و می توان موجب ایجاد تشدید در سیستم شود.

### مقادیر موثر و اعوجاج هارمونیک کلی

چندین معیار عددی برای نشان دادن مقادیر هارمونیک های یک موج وجود دارد. از معروفترین آنها می تواند به اعوجاج هارمونیک کل (THD) که برای ولتاژ و جریان قابل محاسبه است اشاره نمود.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} h^2}}{m_1}$$

که در آن  $m$  مقدار موثر مولفه هارمونیک  $h$  ام کمیت  $m$  می باشد. THD معیار اندازه گیری مقدار موثر مولفه هارمونیک یک موج اعوجاجی است. با توجه به این مقدار موثر کلیک مورج (RMS) برابر با جمع مولفه های آن نمی باشد بلکه مجذور جمع مربعات است. توسط رابطه شماره (2) می توان THD را به مقدار موثر شکل موج ارتباط دارد:

$$RMS = \sqrt{\sum_{H=1}^{\infty} M_H^2} = M_1 \sqrt{1 + C (THD)^2}$$

THD کمیته برای بسیاری از کاربردها می باشد و لیکن محدودیت هایش را نیز باید مورد لحاظ قرار داد. این کمیته می تواند ایده خوبی از حرارت اضافی ایجاد شده در یک بار مقاومتی هنگامی که ولتاژ اعوجاجی به آن اعمال شده است ارائه دهد. همچنین می تواند نشانه ای برای تلفات اضافی ناشی از جریان عبوری از یک هادی نیز باشد. ولی این کمیته نشانه خوبی از تنش ولتاژی بر جازن نمی باشد زیرا این تنش با مقدار پیک شکل موج ولتاژ در ارتباط است. همانطوری که مشاهده شده شاخص THD به مشخص نمودن مقدار هارمونیک بصورت نسبت آنها به مقدار مولفه اصلی نداشته باشیم در نتیجه مقدار THD بی نهایت می شود. برای مثال برای سیگنال  $i(t) = \cos(3\omega t) + \cos(5\omega t)$  مقدار  $THD = \infty$  خواهد بود. این شرایط زمانی پدید می آید که ولتاژ و جریان با فرکانس نامی شبکه بصورت الکتریکی یا توسط کلیدزنی زیرسنکرون و یا توسط اعوجاج ناشی از سیگنال های کنترل کننده که برای بهتر کردن استراتژی کلیدزنی استفاده می شود مدوله شود. اگر یک ولتاژ 50 هرتز با استفاده از سیستم مدوله شده با پهنای پالس (PWM) برای کنترل موتور القایی کنترل شود ولتاژ استاتور موتور القایی دارای مولفه FM  $\pm 50$  خواهد بود که FM فرکانس بسیار پایین به اندازه 0/2 هرتز است. بنابراین فرکانس 50 هرتز در شکل موج ولتاژ دیگری وجود ندارد.

بمنظور جلوگیری از چنین مشکلی از شاخص دیگری استفاده می شود. این شاخص اعوجاج هارمونیک (DIN) می باشد و تعریف آن بصورت:

$$DIN = \frac{\sqrt{\sum_{I=2}^N I_I^2}}{\sqrt{\sum_{I=1}^N I_I^2}}$$

است. این شاخص اعوجاج در کتب قدیمی و نیز استانداردهای IEC آمده است. IEEE و بسیاری از سازمان های بین المللی استفاده از THD را به جای DIN ترجیح می دهند. این دو شاخص با تعریف زیر به یکدیگر مرتبط می شود.

$$DIN = \frac{THD}{\sqrt{1 + (THD)^2}}$$

$$THD = \frac{DIN}{\sqrt{1 - (DIN)^2}}$$

در صورتی که مقدار اعوجاج هارمونیک کم باشد از بسط سری تیلور  
 $\frac{1}{\sqrt{1-CX}}$  میتوان استفاده نمود و روابط تقریبی زیر را بدست آورد.

$$DIN \approx THD \cdot K \cdot \frac{1}{2} (THD)^2$$

$$THD \approx DIN \cdot C \cdot \frac{1}{2} (DIN)^2$$

در صورتی که اعوجاج کم باشد مقادیر THD و DIN با هم برابر هستند.  
 هامونیکهای ولتاژ همیشه در زمان نمونه برداری به مقادیر مولفه اصلی شکل  
 موج ارجاع داده شده میشوند. چون ولتاژ برای چند درصد تغییر می کند مقدار  
 THD ولتاژ دارای مفهوم مهندسی میباشد. ولی در مورد جریان این مورد صادق  
 نیست. یک جریان کم ممکن است که THD بزرگی داشته باشد اما خطر مهمی بر  
 روی سیستم ایجاد نکند. با توجه به اینکه اغلب وسایل مونیتریگ مقدار THD را  
 بر حسب نمونه های موجود محاسبه میکنند در نتیجه ممکن است استفاده  
 کنندگان نسبت به اینکه این جریان برای سیستم خطرناک میباشد یا خیر دچار  
 اشتباه شوند.

### قدرت و ضریب قدرت :

اعوجاج هارمونیک محاسبه توان و ضریب قدرت را مشکل میسازد زیرا بسیاری  
 از ساده سازی های صورت گرفته برای تحلیل فرکانس قدرت در این حالت قابل  
 اعمال نخواهد بود. سه کمیت استاندارد در رابطه با توان استفاده میشوند :  
 توان ظاهری (S): از ضریب مقدار موثر ولتاژ و جریان حاصل میشود.  
 توان اکتیو (P): مقدار متوسط توان تحویلی

توان راکتیو (Q): بخشی از توان ظاهری که 90 درجه با توان اکتیو اختلاف فاز دارد.

در فرکانس مولفه اصلی این مقادیر را براحتی میتوان به یکدیگر به صورت زیر مرتبط نمود:  $P = S \cos \theta$  و

$Q = S \sin \theta$  که در آن  $\theta$  زاویه بین ولتاژ و جریان میباشد. پارامتر  $\cos \theta$  ضریب قدرت نامیده میشود که به صورت زیر تعریف میشود.  $PF = P/S$ . در سیستمهای قدرت روابط زیر برقرار است.

ضریب خارجی مقادیر ولتاژ و جریان در فرکانس های  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  حاصل میشود D

و مقدار متوسطی ندارد.

$$Q = \sum_k V_k I_k \sin \omega_k$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2}$$

### ها رمونیکهای مرتبه سه

این هارمونیکها ضرایب فردی از هارمونیک های سوم هستند (h=3,9,15,21,..). این هارمونیک ها احتیاج به بررسی های ویژه ای دارند زیرا پاسخ سیستم در برابر این هارمونیک ها متفاوت از پاسخ آن در برابر دیگر هارمونیک ها میباشد. هارمونیک های

مرتبه سوم در سیستمهای با ستاره زمین شده که جریان در نوترال آنها وجود دارد دو مشکل عمده اضافه بار نوترال و تداخلات تلفنی دارند. نوع اتصال سیم پیچ ترانسفورماتورها تاثیر بسزای در عبور جریان های هارمونیک مرتبه سه ناشی از بارهای غیر خطی تک فاز دارد. در ترانسفورماتور با اتصال ستاره -

مثلث جریان های هارمونیک مرتبه سه به طرف ستاره وارد می شوند. چون آنها هم فاز هستند در نقطه نوترال با یکدیگر جمع می شوند. به دلیل قانون تعادل امپر دورها در سیم پیچی های طرف مثلث جریان هارمونیک سوم بوجود می آید. ولی جریان ها در داخل مثلث گرفتار شده و در جریان های خطا ظاهر نمی شوند. وقتی جریان ها متعادل باشند جریان های هارمونیک مرتبه صفر رفتار می کنند.

این نوع اتصال در اغلب ترانسفورماتورهای پست های توزیع وجود داشته که در آنها طرف مثلث به فیدر تغذیه اتصال می یابد. با استفاده از سیم پیچی ستاره زمین شده در هر دو طرف ترانسفورماتور هارمونیک مرتبه سه اجازه می یابد که بدون مانعی از طرف فشار ضعیف به فشار قوی منتقل شود. این هارمونیک ها در هر دو طرف با نسبت مساوی وجود دارند.

برخی نکات مهم در مورد کیفیت برق بشرح زیر است:

1- ترانسفورماتورها بخصوص اتصالات نوترال ان ها در صورت تغذیه بارهای تک فاز در طرف ستاره در معرض اضافه حرارت خواهند بود (بدلیل وجود مقدار زیادی هارمونیک سوم)

2- با اندازه گیری جریان در طرف مثلث یک ترانسفورماتور نمی توان مولفه های هارمونیک سوم را بدست آورد. در نتیجه ایده صحیحی از مقدار گرمایی که ترانسفورماتور در معرض ان قرار می گیرد وجود نخواهد داشت.

3- عبور جریان های هارمونیک مرتبه سوم را می توان با انتخاب اتصال مناسب ترانسفورماتور مسدود نمود.

قطع کردن اتصال نوترال در یک یا دو طرف سیم بندی های ستاره عبور جریان هارمونیک مرتبه سوم را سد می نماید .

در نتیجه تعادل امپر دورها ایجاد نمی شود. شبیه به سیم پیچی مثلث که عبور هارمونیک مرتبه سوم به را مسدود می نماید.

باید توجه نمود که ترانسفورماتورهای با هسته سه ستونه در صورتی که داری سیم پیچ سوم با اتصال مثلث باشند رفتار مناسبی را از خود نشان خواهد

داد. بنابراین ترانسفورماتور ستاره - ستاره با یک نقطه نوترال متصل به زمین هارمونیک های مرتبه سوم را هدایت می کند. قواعد مربوط به عبور جریان های هارمونیک سوم در ترانسفورماتورها فقط در مورد شرایط بارگذاری متعادل قابل اعمال هستند. وقتی که فازها متعادل نیستند هارمونیک های مرتبه سوم حتی در هنگامی که انتظار وجود آنها نمی رود ایجاد میشوند. حالت عادی برای مرتبه سوم توالی صفر است. در هنگام عدم تعادل هارمونیک های مرتبه سوم ممکن است که داری مولفه های توالی مثبت و منفی نیز باشند. یک مورد قابل توجه از این حالت وجود کوره قوس الکتریکی سه فاز می باشد. گرچه این کوره ها توسط اتصال مثلث تغذیه می شوند لیکن وقتی که در حال کار کردن نامتعادل هستند هارمونیک سوم زیادی را در جریان خط بوجود می آورند.

## منابع تغذیه تک فاز

بارهای تغذیه شده از طرف مبدل هایی که تولید هارمونیک می کنند مهم ترین بارهای غیرخطی سیستم های قدرت را تشکیل می دهند. در گذشته پیشرفت در تکنولوژی نیه هادیها انقلابی را در مبحث الکترونیک قدرت بوجود آورده است و این روند ادامه خواهد داشت. این تجهیزات شامل محرکه های موتور با قابلیت تنظیم سرعت منابع تغذیه الکترونیک قدرت راه اندازی موتورهای جریان مستقیم شارژکننده های باتری بالانسهای الکترونیک و بسیاری از یکسوکننده ها می باشند. مهمترین نگرانی در یکسوکننده های تجاری وجود تجهیزات الکتریکی تک فازی است که اعوجاج های زیادی را در سیم کشی ایجاد میکنند. توان جریان مستقیم برای تجهیزات مدرن الکتریکی و میکروپروسسوری مورد استفاده در این ساختمان ها از طریق یکسوکننده تمام موج دیودی تک فازتامین می شود. از سوی دیگر درصد بارهای که شامل المان های الکترونیک قدرت هستند بطور افزایندهای بدلیل استفاده از کامپیوترهای شخصی در بخش های تجاری رشد یافته است. دو نوع اصلی منبع تغذیه تک

فاز وجود دارد. تکنولوژی قدیمی تر از کنترل ولتاژ در طرف متناوب استفاده می کند تا ولتاژ را در سطح مورد نیاز طرف مستقیم کاهش دهد.

اندوکتانس ترانسفورماتور داری این حسن که شکل موج جریان ورودی صافتر شده و هارمونیک ها کاهش می یابند. سیستم از تبدیل DC/DC برای ایجاد خروجی مطلوب تر استفاده می شود و در نتیجه تجهیزات مورد استفاده سبکتر خواهند بود. پل دیود بصورت مستقیم به خط ac متصل می شود و در نتیجه نیازی به ترانسفورماتور نخواهد بود این حالت باعث ایجاد یک ولتاژ dc تنظیم شده نه چندان خوب در دو سر خازن می گردد. این ولتاژ dc سپس توسط یک سوئیچ کننده فرکانس بالا به حالت ac برمی گردد و بعد از آن دوباره یکسو میشود. کامپیوتر های شخصی و چاپگرها-دستگاههای کیبوسبیاری از وسایل الکترونیکی تکفاز در حال حاضر از این نوع منابع تغذیه استفاده میکنند.

### **مبدل های قدرت سه فاز**

مبدل های قدرت الکترونیکی سه فاز با مبدل های تکفاز تفاوت دارند چون جریان آنها حاوی هارمونیک سوم نیست. با توجه به اینکه قدرت این دستگاهها زیادتر میباشد لذا نداشتن هارمونیک سوم یک مزیت است. بهر حال این دستگاه ها می توانند همچنان منابع اصلی تولید هارمونیک در فرکانس های مشخصه خود باشند. برای نمونه جریان ورودی به یک محرکه موتور dc در نظر گرفته شود. محرکه اینورتری منبع ولتاژمانند محرکه های که از تکنیک pwm استفاده می کنند سطح اعوجاجی بسیار بزرگتری را می تواند ایجاد کنند.

### **محرکه های DC**

یکسوسازی تنها عمل مورد نیاز برای محرکه های DC است. بنابراین سیستم کنترل انهادر مقایسه با محرکه های AC ساده می باشد محرکه های DC محدوده وسیعتری از سرعت را ایجاد نموده و همچنین گشتاور راه اندازی بالای را بوجود می آورند. قیمت و هزینه نگهداری موتورهای DC زیاد ولی هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت هر ساله کم می شود. بنابراین از نظر اقتصادی کاربرد این محرکه محدود به کاربرد هایی که دران مشخصه گشتاور - سرعت یک موتور DC مرونیاز باشد. اغلب محرکه های از یکسو کننده های 6 پالسی و محرکه های بزرگتر از یکسو کننده های 12 پالسی بهره می گیرند. این کار باعث کاهش



جریان هر تریستور شده و بعضی از هارمونیک ها در طرف AC رانیز کاهش می دهد. دو مولفه 5 و 6 جریان در یوها ی 6 پالسی دارای مقدار قابل ملاحظه ای هستند. این مولفه ها نیز اثرات مشکل زایی را در سیستم قدرت ایجاد می کنند. یکسو کننده های 12 پالسیدر حدود 90 درصد هارمونیک های 5 و 6 را با توجه به میزان عدم تعادل سیستم حذف می کنند یکی از معایب درایوها ی 12 پالسی هزینه بالای تجهیزات الکترونیکی و ترانسفورماتور اضافی دیگری که مورد نیاز خواهد بود.

## محركه های AC

در محركه های جران متناوب ( ASD ) از یکسو کننده برای تولید ولتاژ AC استفاده شده که این ولتاژ با فرکانس قابل تنظیم برای تغذیه موتورها بکار می رود. اینورترها به دو دسته تقسیم می شود:

- اینورترهای ولتاژ (VSI)
- اینورترهای جریان (CSI)

برای ورود یک VSI احتیاج به یک منبع ولتاژ DC ثابت است. این را می توان با استفاده از یک خازن یا فیلتر LC در طرف DC فراهم نمود. ورودی یک CSI احتیاج به یک منبع جریان ثابت دارد. بنابراین در بخش DC یک اندوکتور سری قرار داده می شود. محركه های AC معمولا برای موتورهای القایی قفس سنجابی استفاده می شوند. قیمت این موتور ها نسبتا کم و هزینه تعمیرات کمی دارد. موتور های سنکرون زمانی استفاده می شوند که نیاز به کنترل دقیق سرعت باشد عمومی ترین نوع محركه های AC از یک VSI از یک همراه با تکنیک PVM استفاده می کند. در اینورترهای از یکسو کننده های سیلیکونی (SCR) و تریستورهای از نوع GTO ویا از ترانزیستورهای قدرت استفاده می شود. این محركه بیشترین بازدهی انرژی را روی محدوده وسیعی از سرعت برای قدرت های تا 500 اسب بخار بوجود می آورند.

## اثرات چك های AC روی هارمونیک ها

قرار دادن راکتانس اضافی بین محرکه و منبع مقدار هارمونیک جریان در طرف AC را کاهش میدهد. این روش برای محرکهای استفاده کننده از تکنیک PWM موثر است. مقدار چک براساس توان پایه محرکه جریان متناوب محاسبه میشود. اضافه کردن چک، کاهش THD جریان را از محدوده 90 تا 100 درصد به محدوده 30 تا 40 درصد به دنبال خواهد داشت. اندوکتانس، سرعت شارژخازن در طرف DC را کاهش میدهد و باعث میشود که محرکه، جریان لازم را در مدت زمان طولانی تری بکشد. اثرنهایی کاهش دامنه جریان و محتوای هارمونیک بوده، در حالیکه انرژی تحویلی در همان مقدار سابق باقی می ماند. چک ها همچنین اثرات حالت گذرای مربوط به کلید زنی خازن ها را کاهش می دهند.

### تجهیزات قوس زننده

این دسته شامل کوره های قوس الکتریکی، دستگاه های جوشکاری با قوس، لامپ های روشنایی نوع تخلیه مانند فلورسنت، بخار سدیم و بخار جیوه با بالاست های مغناطیسی باشند.

مشخصه ولتاژ-جریان قوس های الکتریکی غیر خطی می باشد. به دنبال جرقه زدن جریان قوس افزایش و در نتیجه ولتاژ آن کاهش می یابد. مقدار جریان قوس فقط توسط امپدانس سیستم محدود می شود. در چنین چنین حالتی قوس بصورت یک مقاومت منفی برای بخشی از سیکل کاری خود ظاهر می شود. در لامپ های فلورسنت، امپدانس بالاست برای روشنایی دارای یک امپدانس خارجی خواهد بود که بالاست نامیده می شود.

بالاست های مغناطیسی معمولا هارمونیک های کمی تولید می کنند، ولی اعوجاج هارمونیک از رفتار قوس بوجود می آید. بعضی از بالانست های الکتریکی که برای اصلاح بازدهی انرژی در منابع تغذیه سوئیچینگ استفاده می شوند ممکن است هارمونیک ها را دو تا سه برابر نمایند. انواع دیگر بالاست ها به نحوی طراحی می کردند که هارمونیک ها را کاهش داده و در واقع هارمونیک های کمتری از بالاست های مغناطیسی ایجاد نماید. در کوره های قوس الکتریکی، امپدانس محدودکننده شامل کابل و سرسیم های کوره، امپدانس سیستم و ترانسفورماتور کوره می باشد. مقدار بیش از 60 کیلوامپر در

این کوره ها عادی می باشد. این کوره بهتر است بصورت منبع هارمونیک ولتاژنمایش داده می شوند. اگر ولتاژ دو سر قوس بررسی گردد شکل موج بصورت دوزنقه بوده و مقدار آن تابعی از طول قوس است. به هر حال امیدانس بالاست به صورت یک بافر عمل نموده به نحوی که ولتاژ منبع دارای اعوجاج کمی می گردد. بنابراین بارها قوس های زننده بصورت هارمونیک جریان نسبتا پایداری ظاهر شده که برای اغلب بررسی ها لازم است. حالت استثنا زمانی اتفاق می افتد که سیستم نزدیک به حالت تشدید قرار بگیرد در این حالت مدل معادل تونن با استفاده از شکل موج ولتاژ قوس پاسخ های واقع بینانه تری را ارائه می دهد.

### **اثرات سوء اعوجاجات هارمونیکها**

برخی از آثار سوئی هارمونیک ها بر سیستم قدرت و تجهیزات آن به قرار زیر است:

- شکست عایقی بانک های خازنی و افزایش جریان و توان راکتیو بانک های خازنی
- تداخل با سیستم های ریپل کنترل و تداخل در وظیفه کنترل از راه دور سیستم های کلیدزنی و اندازه گیری.
- تلفات اضافی اهمی و نیز تلفات اضافی در هسته و ایجاد حرارت زیاد در ماشین های الکتریکی.
- شکست عایقی کابل ها
- تداخل خطا در دستگاه های اندازه گیری.
- ایجاد نوسانات مکانیکی.
- کاهش ظرفیت فیوزها به دلیل حرارت و عملکرد نامناسب فیوزها.
- عدم عملکرد مناسب سیستم های کنترل.
- عملکرد نامناسب و پاسخ اشتباه رله ها.
- عملکرد نامناسب مدارات اتش سیستم های الکتریک قدرت بخصوص مدارات اتشی که بر اساس تشخیص نقطه صفر ولتاژ عمل می کنند.

### **اثر هارمونیک ها روی خازن ها**

در استاندارد خازن های مورد استفاده در شبکه های توزیع مقادیر نامی حالت دائم خازن را چنین مشخص می کند.

- 135 درصد کیلو نامی
- 110 درصد ولتاژ موثر نامی
- 130 درصد جریان نامی
- 120 درصد ولتاژ پیک

اثر روی ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها به نحوی طراحی می شوند که توان لازم را با کمترین تلفات در فرکانس اصلی به بار منتقل نمایند. اعوجاج هارمونیک جریان ، علاوه بر هارمونیک ولتاژ باعث ایجاد حرارت اضافی قابل ملاحظه ای می گردد. طراحی ترانسفورماتور به نحوی که بتواند هارمونیک های بالاتر را تحمل کند شامل استفاده از کابل بصورت پیوسته ترانسپوز شده بجای هادی توپر و نیز قراردادن کانال های خنک کننده بیشتر می باشد. ترانسفورماتوری که در آن اعوجاج جریان از 5 درصد بیشتر باشد مقدار توان نامی آن کاهش می یابد.

موارد مختلف از مولفه های هارمونیک جریان بار که باعث افزایش دمای ترانسفورماتور می گردد به ترتیب عبارتند از:

-جریان موثر: اگر ظرفیت ترانسفورماتور برای مقدار KVA بار انتخاب شده باشد هارمونیک جریان باعث می شود که جریان موثر آن بیشتر از ظرفیت مجاز باشد . این افزایش سبب افزایش تلفات هادی ها می شود.

-تلفات جریان گردابی : این جریان های القایی در اثر فوران های مغناطیسی در ترانسفورماتور پدید آمده در سیم پیچی ها ، هسته و دیگر بخش های هادی که در معرض فوران میدان هستند موجود می باشند و در نتیجه تلفات حرارتی اضافی بوجود می آید. این مولفه از تلفات ترانسفورماتور با مربع فرکانس جریان گردابی افزایش می یابد و سهمی مهم از تلفات ترانسفورماتوری باشد. افزایش تلفات هسته ناشی از هارمونیک ها بستگی به اثر هارمونیک ها بر ولتاژ اعمالی و طراحی هسته ترانسفورماتور دارد. افزایش اعوجاج ولتاژ می تواند سبب افزایش جریان

گردابی لایه های هسته شود. اثر کلی بستگی به ضخامت لایه های هسته و کیفیت آهن هسته دارد. بالا رفتن تلفات هسته بدلیل هارمونیک ها به اندازه دو مورد قبلی نیست. میزان کم شدن توان نامی ترانسفورماتور در اثر وجود هارمونیک ها در IEEC آمده است.

### استثنائات:

حالاتی وجود دارد که ترانسفورماتور به دلایلیکه ظاهرا اضافه بار است گرم و یا حتی از کار می افتد. در ترانسفورماتورهای ستاره زمین جریان خط دارای 8 درصد هارمونیک سوم می باشد ولی ترانسفورماتور حتی در بارهای کمتر از بار نامی نیز دچار پدیده گرم شدن بیش از حد مجاز می گردد. با توجه به اینکه ترانسفورماتور از مون افزایش دما در نتیجه اضافه بار را در کارخانه گذرانده است سه عامل ارائه شده در ادامه می توان علت این معضل دانست.

1. فوران های توالی صفر از هسته ترانس سه فاز سه ستونه خارج می شود. اگر اتصال سیم پیچی های برای عبور جریان توالی صفر مناسب باشند این فوران های هارمونیک باعث ایجاد حرارت اضافی در تانک ، کلمپ هسته و غیره می گردد. پدیده فوق در ازمون های سه فاز متعادل یا ازمون های تک فاز مشاهده نخواهد شد.

2. وجود مقدار DC در جریان متناوب می تواند باعث فرار فوران از هسته شود. تعدادی از مبدل های الکترونیک قدرت، جریان غیر متقارن می کشند این جریان غیر متقارن یا بصورت اتفاقی ایجاد می شود و یا بدلیل طراحی موجود نخواهد بود که در این حالت مقدار DC برای ایجاد مسائل مشکل زا در ترانسفورماتور قدرت لازم است.

3. اتصال انتهای بوشینگ ، کامب ها و دیگر المان های هادی ممکن است در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرند. در فرکانس مولفه اصلی اثر قابل توجهی بر روی تلفات سرگردان در این حالت ایجاد نمی شود. لیکن امکان ایجاد نقاط داغ در این قسمت ها

هنگامیکه در معرض فوران های هارمونیک قرار می گیرند وجود خواهد داشت.

## اثر بر روی موتور ها

موتورها در مقابل اعوجاج هارمونیک ولتاژ ضربه پذیر می باشند. اعوجاج هارمونیک ولتاژ در ترمینال های موتور به هارمونیک فوران در داخل موتور منجر می شود. فوران های هارمونیک در ایجاد گشتاور مشارکتی نمی کنند ولی چون با سرعتی متفاوت با فرکانس اصلی به گردش در می آیند در نتیجه جریانهای با فرکانس بالا در موتور ایجاد می کنند. اثر هارمونیک ها روی موتورها شبیه به اثر جریان توالی منفی در فرکانس اصلی می باشد. بنابراین فوران های اضافی علاوه بر افزایش تلفات مشکلات دیگری را بوجود می آورند. کاهش راندمان همراه با گرم شدن، لرزش و نویز از عوارض اعوجاج هارمونیک ولتاژ در موتور ها می باشند. در فرکانس های هارمونیک، موتورها را با راکتانس رتور قفل شده که به خط متصل است نمایش می دهند. مولفه های مرتبه پایین هارمونیک ولتاژ که دامنه بزرگی داشته و امپدانس آن کوچک می باشد برای موتور ها دارای اهمیت بیشتری است. اگر اعوجاج ولتاژ در محدوده تعریف شده توسط استاندارد هارمونیک های مجاز در شبکه برق ایران قرار بگیرد نیازی به تغییر ظرفیت موتورها نخواهد بود.

$THD=0/05$  و نیز دامنه هر مولفه هارمونیک فرد باید کمتر از  $3/0/0$  باشد. هنگامیکه اعوجاج ولتاژ 5 درصد یا بشیر شود تلفات حرارتی اضافی ایجاد مشکل می کند. برای افزایش طول عمر موتور چنین اعوجاجی را باید تصحیح نمود و کاهش داد. موتورها در برابر جریان هارمونیک بصورت موازی با امپدانس سیستم قدرت قرار می گیرند. در نتیجه باعث بالا رفتن فرکانس تشدید بدلیل کاهش اندوکتانس سیستم می گردند. این مسئله مشکلی برای شبکه خواهد بود. وبستگی به فرکانس تشدید سیستم قبل از برقرار کردن موتور دارد. موتور ها در میرایی مولفه های هارمونیک نیز نقش بازی می کنند. و مقدار آن بستگی به نسبت  $X/R$  مدار رتور قفل شده موثر خواهد داشت. سیستم هایی که در آن تعدادی موتورهای با قدرت پایینی که دارای نسبت

X/R کوچکی هستند وجود دارد باعث تضعیف تشدید هارمونیک می شوند. موثر های بزرگ چنین خصوصیتی ندارند.

### مشخصه پاسخ سیستم

در سیستم های قدرت، پاسخ سیستم به منابع هارمونیک داری اهمیت است. سیستم های قدرت در مقابل جریان هارمونیک بوجود آمده توسط بارهای تولیدکننده هارمونیک، مقاوم می باشند مگر اینکه فرکانس این جریان هارمونیک با فرکانس رزونانس موازی امپدانس از آن باس هم اندازه شود. پاسخ سیستمقدرت در هر فرکانس هارمونیک اثر واقعی بارهای غیر خطی را بر اعوجاج هارمونیک ولتاژ تعیین می کند.

### تشدید موازی :

مدارهای شامل خازن و اندوکتانس دارای یک یا تعداد بیشتری فرکانس طبیعی می باشند. وقتی که یکی از این فرکانس ها برابر با فرکانس سیستم قدرت گردد پدیده تشدید بوجود می آید و جریان و ولتاژ در آن فرکانس مقدار بالایی را به خود می گیرد. این پدیده در حقیقت ریشه ی تمامی مسائل و مشکلات ناشی از اعوجاج هارمونیک در سیستم های قدرت می باشد.

در فرکانس های هارمونیک، از دیدگاه منابع هارمونیک، خازن های موازی با اندوکتانس معادل شبکه به شکل موازی قرار می گیرند ( رجوع شود به شکل 22a و 22b). در فرکانس های غیر از فرکانس اصلی، شبکه قدرت بصورت اتصال کوتاه دیده می شود. به عبارت دیگر فرض می شود که فقط منبع ولتاژ با فرکانس قدرت وجود دارد. در فرکانسی که  $X_c$  و راکتانس کلی سیستم برابر می شوند، امپدانس ظاهری ( ترکیب موازی اندوکتانس سیستم و خازن ) که از طرف منبع تولید هارمونیک جریان دیده می شود بسیار بز پاسخ سیستم بزرگ شده و شرایط تشدید موازی بوجود می آید.

### اثر مقاومت و بار مقاومتی

شرایطی که هارمونیک تشدید برابر با هارمونیک منبع می شود همیشه مایه نگرانی نیست. میرایی ایجاد شده توسط مقاومت اغلب باعث کاهش ولتاژ و جریان در حالت تشدید در سیستم می گردد.

مقاومت خط و بارها دلیل خوبی برای این نکته است که مشکل تشدید هارمونیک نامطلوب روی فیدرهای توزیع بندرت پدید می آید . این بدان معنا نیست که بدلیل تشدید مشکل زیادی بوجود نمی آید ، بلکه این مسائل و مشکلات با توجه به شرایط موجب خسارت فیزیکی به تجهیزات شبکه قدرت نمی شوند . بدترین شرایط تشدید وقتی پدید می آید که خازن ها بر روی شینه های پست نصب گردند . نمونه ای از این پست ها ، پست توزیع اصلی و یا پست های فرعی در واحدهای صنعتی باشد . در این حالات ، وقتی که امپدانس ترانسفورماتور وجه غالب را دارد و نسبت  $X/R$  بالا است ، مقاومت نسبی کم شده و پیک امپدانس تشدید موازی بسیار بالا و تیز خواهد بود . این پدیده عامل اصلی خرابی خازن ها ، ترانسفورماتور و تجهیزات می باشد . در حالی که ، مهندسین سیستم های توزیع قادرند که بدون نگرانی از تشدید ، بانک های خازنی را روی فیدرها نصب کنند ولی نصب خازن در پست های مراکز صنعتی و پست های اصلی باید بدقت بررسی شود . آمارها نشان می دهند که حدود 20 درصد تاسیسات صنعتی که بر روی آن ها مطالعات دقیقی صورت نگرفته ، در شرایط تشدید ، خرابی و صدمه زیادی بر تجهیزات آن متحمل شده است .

درحقیقت ، انتخاب ظرفیت خازن براساس صورتحساب های ماهانه ممکن است باعث شود که سیستم در فرکانس مرتبه ی پنجم به تشدید بیفتد . این هارمونیک بیشترین مقدار هارمونیک ها را در یک سیستم سه فاز بوجود می آورد . شایان ذکر است که بارهای مقاومتی باعث میرایی هارمونیک ها در غیاب تشدید نمی گردند . بارها از هر نوعی که باشند ، اثر کمی بر روی مقدار جریان های هارمونیک و در نتیجه اعوجاج ولتاژ دراند . بهر حال ، بارهای مقاومتی تشدید را میرا نموده و به کاهش شدید اعوجاج هارمونیک منجر می شوند .

بارهای موتوری اساسا اندوکتیو هستند و میرایی کمی را ایجاد می کنند . در حقیقت ، این امکان وجود دارد که با جابجایی فرکانس تشدید به نزدیکی یک فرکانس هارمونیک ، باعث افزایش اعوجاج نیز شوند . موتورهای کم قدرت



بدلیل پایین تر بودن نسبت X/R آن ها نسبت به X/R موتورهای سه فاز بزرگ اثر قابل ملاحظه ای بر روی میرایی سیستم خواهند داشت .

### **مبانی کنترل هارمونیک :**

در این بخش بعضی از روش های اساسی کنترل هارمونیک ها توضیح داده خواهد شد .

هارمونیک ها هنگامی مشکل زا می شوند که :

-منبع تولید هارمونیک جریان بسیار بزرگ باشد

- مسیری که در آن این جریان ها عبور می کنند بسیار طولانی باشد . در نتیجه باعث ایجاد اعوجاج ولتاژ بیشتر یا اختلالات تلفنی می شود .

- پاسخ سیستم به یک یا چند هارمونیک اهمیت بیشتری بدهد .

وقتی که یک مشکل هارمونیکی اتفاق می افتد ، روش های اصلی کنترل هارمونیک به قرار است :

- کاهش مقدار جریان های هارمونیک تولید شده توسط بار
- اضافه کردن فیلتر به منظور ایجاد مسیری برای هارمونیک ها و یا جلوگیری از وارد شدن هارمونیک ها به سیستم و یا تغذیه کردن هارمونیک های جریان بصورت محلی .
- تغییر پاسخ فرکانسی سیستم با اسفاده از فیلتر ها ، اندوکتانس و خازن .

کاهش جریان های هارمونیکی در بارها

همانطور که گفته شد در ارتباط با تجهیزات موجود برای کاهش مقدارهارمونیک کار کمی می توان انجام داد ، زیرا امکان عملکرد نامناسب نیز در این حالت بوجود می آید . در حالیکه یک ترانسفورماتور را با کاهش ولتاژ اعمالی به آن می توان از حالت اشباع و در نتیجه تولید هارمونیک خارج نموده ، ولی تجهیزات قوس زننده و یا اغلب مبدل های الکترونیک قدرت در مشخصه ای که برای آن طراحی شده کار نموده و نمی توان بر روی آن ها مانور خاصی انجام داد .

محركه های استفاده کننده از تکنیک PWM که خازن شینه DC را بصورت مستقیم از خط و بدون هیچ امیدانس شارژ می کنند یک استثنا بشمار می روند. اضافه نمودن راکتور سری در خط، هارمونیک ها را کاهش داده و حفاظت بهتری را در شرایط گذرا بوجود می آورد. از نوع اتصال ترانسفور می توان استفاده نمود و هارمونیک ها را در یک سیستم سه فاز کاهش داد. جابجایی فاز 30 درجه ای نیمی از مبدل های 6 پالسی در یک مجموعه می تواند مزایای یک مبدل 12 پالسی را که در آن هارمونیک های پنجم و هفتم شدیداً کاهش می یابند بوجود آورد. ترانسفورماتورهای اتصال یافته بصورت مثلث، می توانند ورود هارمونیک توالی صفر به خط جلوگیری نمایند. استفاده از اتصال زیگزاگ و زمین کردن ترانسفورماتور نیز اجازه ظهور هارمونیک های مرتبه سوم به خط را نخواهند داد. خرید یک تجهیز از فروشنده با این اصل که تولید هارمونیک توسط آن دستگاه می تواند برای سازنده جریمه به همراه داشته باشد نیز می تواند مفید باشد.

## فیلتر کردن

فیلتر های موازی توسط اتصال کوتاه کردن جریان هارمونیکی ، تا حد امکان اعوجاج را کاهش می دهند. این روش معمولی ترین نوع فیلتر سازی عملی بوده و بدلیل مسائل اقتصادی و نیز تمایل به بهبود ولتاژ اعمال به بار با حذف هارمونیک های جریان مورد استفاده قرار می گیرد. روش دیگر استفاده از فیلتر سری است که باعث سد کردن هارمونیک های جریان می گردد. این نوع فیلتر ، مدار موازی قابل تنظیمی است که امیدانس بالایی را در برابر جریان هارمونیکی ایجاد می کند. البته این نوع فیلتر کمتر مورد استفاده قرار می گیرد زیرا در صورت استفاده از آن ولتاژ بار اعوجاجی می گردد . یک نوع کاربرد عملی این فیلترها ، قرار گرفتن آن ها در مسیر نقطه ی نوترال یک بانک خازنی با اتصال ستاره تا نقطه ی زمین می باشد . با این عمل مسیر هارمونیک های مرتبه ی سوم سد شده ، در حالی که مسیر خوبی را برابر فرکانس قدرت از خود نشان می دهد .

فیلترهای فعال نیز با وارد کردن مولفه هارمونیک جریان به یک بار غیر خطی عمل حذف هارمونیک ها را انجام می دهند .

### **اصلاح پاسخ فرکانسی سیستم**

با روش های زیر می توان پاسخ سیستم به هارمونیک ها را بهبود بخشید :

1- اضافه کردن فیلتر موازی نه تنها باعث می گردد که جریان هارمونیک از سیستم خارج شود ، بلکه با اضافه کردن آنها پاسخ فرکانسی سیستم به طور کامل تغییر می کند و اغلب اوقات و نه همیشه با این روش پاسخ فرکانسی سیستم را می توان بهبود بخشید .

2- اضافه کردن راکتور برای تنظیم مجدد سیستم . تشدیدهای مضر برای سیستم ، معمولاً بین اندوکتانس سیستم و خازن های تصحیح ضریب قدرت بوجود می آید . راکتور را می توان بین سیستم و خازن متصل نمود . یک روش ساده سری نمودن یک راکتور با خازن بوده که این کار شرایط تشدید سیستم را بدون تنظیم خازن برای ایجاد شرایط فیلتری تغییر می دهد .

3- تغییر اندازه ی خازن . این روش شاید ارزان ترین مورد هم برای مشترکین صنعتی و هم برای شرکت های برق باشد .

4- جابجا کردن محل نصب خازن به نقاطی با امپدانس اتصال کوتاه متفاوت . این روش هنگامی استفاده می شود که نصب بانک خازنی در یک محل باعث تداخلات تلفنی گردد . جابجایی بانک خازنی به محل دیگر این مشکل را به خوبی رفع می کند . البته این مسئله برای مشترکین صنعتی چندان امکان پذیر نیست زیرا محل قرار گیری خازن را نمی توان چندان تغییر داد .

5- برداشتن خازن و پذیرش تلفات بیشتر ، ولتاژ پایین تر و پرداخت جریمه ضریب قدرت که اگر از نظر فنی قابل قبول باشد ، گاهی اوقات بهترزین انتخاب از دیدگاه اقتصادی است .

### **درفیدرهای توزیع شرکت های برق**

نسبت X/R در فیدرهای توزیع معمولاً کم است. بنابراین در فیدرها مسئله تقویت اعوجاج ناشی از تشدید دارای اهمیت نخواهد بود. بهر حال در زمان کلید زنی خازن ها، اعوجاج ها می توانند قابل توجه بوده و باعث عملکرد نامطلوب تجهیزات گردند. مهندسين توزیع، بانک های خازنی را در فیدرهای مورد نیاز قرار می دهند بدون آن که هیچگونه نگرانی در مورد ایجاد هارمونیک داشته باشند. وقت که مسئله ای رخ می دهد، راه حل معمول، جابجایی محل بانک خازنی و یا تغییر اندازه ی خازن خواهد بود.

بسیاری از مسائل هارمونیکی مربوط به اضافه کردن بانک خازنی در فیدرها، ناشی از افزایش هارمونیک های مرتبه سوم در مدار نوترال فیدراست. بمانظور تغییر مسیر عبور جریان هارمونیکی توالی صفر، باید تغییراتی در اتصال نوترال بانک های خازنی با اتصال ستاره ایجاد نمود. بمانظور بلوکه کردن جریان، می توان نقطه نوترال را باز نمود.

گاهی اوقات قرار دادن راکتور در نقطه ی نوترال بانک خازنی، بانک را به عامل نوسان کننده ی تنظیم شده ای برای هارمونیک توالی صفر تبدیل می کند.

بسیاری اوقات، در فیدرهای توزیع مسائل هارمونیکی در هنگام بار کم بوجود می آید. در این حالت ولتاژ افزایش یافته و در نتیجه ترانسفورماتورها تولید هارمونیک بیشتری می کنند. علاوه بر آن چون بار کمی برای میرا کردن تشدید وجود دارد، خارج کردن خازن در این مواقع می تواند به حل مسئله کمک کند.

اگر جریان هارمونیکی ناشی از منابع هارمونیکی که بصورت پراکنده در سیستم وجود دارند احتیاج به فیلتر کردن داشته باشند، راه حل عمومی استفاده از چند فیلتر روی فیدر ها خواهد بود. با اینکار مسیر متوسط جریان های هارمونیکی کوتاه شده و در نتیجه تداخلات رادیویی کاهش و افت ولتاژ هارمونیکی در سیستم کم خواهد شد. در نتیجه اعوجاج ولتاژ بر روی ولتاژ در نقاط دیگر نیز در محدوده مناسبی قرار بگیرد. مطالعات هارمونیکی باید بر روی هر بانک خازنی بزرگ که در پست های توزیع نصب می شود انجام گیرد زیرا نمی توان بر روی میرایی ناشی از تلفات در این نقطه از سیستم تکیه نمود.

## امکانات در فیدرهای توزیع

اولین مرحله ، مشخص نمودن امکان تغییر اندازه خازن است . گاهی اوقات همراه با بارها تعداد زیادی خازن وارد شبکه توزیع می شوند بنحویکه نمی توان مقدار ظرفیت خازن را کنترل نمود . به هر حال ، با خازن های سوئیچ شده و کنترل کننده های ضریب قدرت اتوماتیک می توان روش کنترلی را انتخاب نمود که از ایجاد شرایط نامناسب و بوجود آمدن مشکل جلوگیری کند . از نظر علمی و اقتصادی نصب فیلتر برای مشترکین جذاب تر از نصب فیلتر در سیستم های توزیع است . مشترکین صنعتی باید روش های کاهش هارمونیک با استفاده از اتصالات مختلف در ترانسفورماتورها را نیز بررسی نمایند . استفاده از ترانسفورماتورهای زیگزاگ برای حذف هارمونیک های مرتبه ی سوم در مدارات سه فاز نیز امکان پذیر است .

مطالعات باید بر روی تمامی خازن های نصب شده در سیستم های صنعتی انجام پذیرد . این سیستم ها عموماً کوچک هستند بنحوی که تلفات خط در آن ها کم و در نتیجه امکان میراسازی در شرایط تشدید بوجود نمی آید . در بعضی کارخانه ها و مراکز صنعتی استثنائاتی وجود دارد زیرا خازن ها نزدیک بارها نصب می شوند و در این حالت مقاومت کافی برای جلوگیری و کاهش تشدید وجود دارد . همچنین ، بعضی بارها در میرایی سیستم نقش بسزایی دارند . اگر قرار است برای اولین بار خازن ها نصب گردند ، استفاده از خازن ها در نزدیکی موتورها و یا مراکز کنترل موتورها و مشکلات ناشی از مسئله تشدید را کاهش خواهد داد . این مورد همچنین دارای این مزیت است که تلفات سیستم را بسادگی با قرار دادن خازن در شینه اصلی کاهش داد .

## شناسایی محل منابع هارمونیک ها

در فیدر های توزیع شعاعی و در کارخانجات صنعتی ، تمایل اصلی هارمونیک های تولید شده ، جریان یافتن از محل تولید خود ( بارهای هارمونیک زا ) به طرف منبع تغذیه ی سیستم قدرت می باشد . این مسئله در شکل 24 نشان داده شده است . امپدانس سیستم معمولاً کمتر ازین امپدانس است که جریان های هارمونیک در مقابل خود می بینند . بنابراین ، قسمت اعظم جریان به

طرف منبع تغذیه سیستم جاری می شود . از این مطلب می توان بهره جست تا محل تولید منابع هارمونیک را شناسایی نمود .

با استفاده از یک مونیاتور کیفیت برق که قادر به نشان دادن مؤلفه های هارمونیک جریان باشد ، بسادگی می توان هارمونیک های جریان در هر شاخه را اندازه گیری کرد . این کار را باید از ابتدای هر مدار آغاز نمود تا منابع تولید هارمونیک را پیدا کرد . خازن های تصحیح ضریب قدرت می توانند الگوی مسیر حرکت جریان را حداقل برای یک هارمونیک تغییر دهند . برای مثال ، اضافه کردن یک خازن به مدار قبلی همانطوریکه در شکل 25 نشان داده شده است می تواند باعث کشانده شدن بخش بزرگی از جریان هارمونیک به این قسمت از مدار شود .

اگر از این حال مدت استفاده شده در بالا استفاده شود ممکن است بجای ردیابی مسیر اصلی که نهایتاً به مابع تولید هارمونیک می رسد ، اشتباهها مسیر منتهی شده به بانک خازنی دنبال گردد . بنابراین لازم است که به صورت موقت تمامی خازن ها را از مدار خارج کرده تا محل منابع تولید هارمونیک را بتوان بطور دقیق و مشخص نمود .

جریان هارمونیک تولید شده توسط منابع هارمونیک واقعی و جریان هارمونیک ناشی از تشدید با بانک خازنی به راحتی قابل تمایز هستند . جریان های حاصل از تشدید دارای یک هارمونیک غالب هستند که بر روی موج سینوسی اصلی سوار می گردد . همانطور که می دانیم شکل موج های جریان هارمونیک تنها دارای یک مؤلفه ( علاوه بر مؤلفه اصلی ) نخواهد بود . این شکل موج ها بسته به پدیده ی اعوجاج زا دارای شکل موج های متفاوتی می باشند ولی بهرحال دارای چندین هارمونیک بادامنه های متفاوت خواهند بود . یک هارمونیک تنها با دامنه بالا تقریباً شرایط تشدید را نشان می دهد.

حقیقت زیر را می توان برای تعیین شرایط تشدید و وجود آن در سیستم بکار برد .. برای این کار ابتدا جریان ورودی به خازن ها اندازه گیری می شود . اگر جریان دارای مقدار بزرگی از یک هارمونیک علاوه بر مولفه ی اصلی است می توان نتیجه گرفت که خازن در حال تشدید با بقیه ی سیستم است . همواره در اولین مرحله جریان خازن ها را بازبینی و اندازه گیری نمائید.

## تجهيزات مورد نیاز فیلتر کردن اعوجاج هارمونیکي

دو دسته اصلي فیلتر مورد استفاده قرار مي گیرد :

1 - فیلترهاي غيرفعال

2 - فیلترهاي فعال

در اینجا قابلیت هاي برجسته هر دسته توضیح داده مي شود .

### فیلترهاي غير فعال

فیلترهاي غير فعال از مقاومت ، اندوکتانس و خازن ساخته مي شوند . این گونه فیلترها در مقایسه با دیگر وسایل حذف اعوجاج هارمونیک ها ارزاتر مي باشند ولي در عوض تداخل معکوس آن با بقیه ي سیستم مي تواند سبب ایجاد مشکل گردد . دو نوع فیلتر غير فعال مورد استفاده قرار مي گیرند . نوع اول جریان هارمونیکي را به سوي خود جذب و از خط و سیستم خارج مي کند و نوع دوم با تنظیم کردن عناصرش به منظور ایجاد تشدید در يك فرکانس هارمونیکي مشخص ، از عبور جریان هارمونیکي به بخش هاي دیگر جلوگیری مي کند . شکل 26 چندین نوع از فیلترهاي معمولي را نشان مي دهد .

معمولي ترین نوع فیلتر غير فعال ، فیلتر تك تنظیم برشي مي باشد . این نوع ، اقتصادي ترین نوع فیلتر غير فعال بوده و غالبا براي کاربرد مورد نظر کافي خواهد بود . مثالي از طراحی يك فیلتر 400 ولت در شکل 27 به تصویر کشیده شده است . فیلتر برشي ، يك فیلتر سري قابل تنظیم است که امپدانس کمی را در برابر يك هارمونیک خاص از خود نشان مي دهد و به صورت موازي به شبکه قدرت متصل مي گردد . بنابراین ، جریان هاي هارمونیکي از مسیر عادي خود در خطوط به سمت فیلتر منحرف مي گردند . فیلترهاي برشي ، علاوه بر حذف هارمونیک ها مي تواند جهت تصحیح ضریب قدرت نیز بکار روند . شکل 27 يك بانک خازني با اتصال مثلث که با استفاده از يك اندوکتانس سري شده با آن به يك فیلتر تبدیل شده است را نشان مي دهد . در این

حالت هارمونیک حذف شده  $h_{notch}$  ، توسط رابطه ی زیر به راکتانس فرکانس اصلی مرتبط می گردد .

$$h_{notch} = \sqrt{\frac{X_c}{3X_f}} \quad (34)$$

توجه کنید که  $x_c$  راکتانس یک شاخه از اتصال مثلث ( به جای راکتانس خازنی معادل خط به زمین ) است . اگر قرار بود که از ولتاژ فاز به فاز و کیلووار سه فاز برای محاسبات استفاده گردد استفاده از ضریب 3 لازم نخواهد بود . یکی از مهمترین اثرات جانبی اضافه کردن یک فیلتر این است که نقطه تشدید موازی تیزی در یک فرکانس که در زیر فرکانس حذف شده قرار گرفته ایجاد می کند ( رجوع شود به شکل 27 ) . این فرکانس باید به دور از هر فرکانس هارمونیک مهم در سیستم باشد . فیلترها معمولا کمی پایین تر از هارمونیک که قرار است فیلتر نماید تنظیم می شوند تا در صورت تغییر پارامترهای سیستم حاشیه امنیتی را ایجاد نمایند . اگر فیلتر دقیقا در فرکانس هارمونیک تنظیم گردد تغییر خازن و یا اندوکتانس سیستم ناشی از حرارت یا خرابی ، فرکانس تشدید موازی را به مقدار هارمونیک بالاتر جابجا میکند . در این حالت شرایط فراهم می آید که بدتر از نداشتن فیلتر است زیرا در این حالت شرایط تشدید بسیار تیزی پدید می آید .

به دلایل فوق ، فیلترها باید ابتدا برای کمترین هارمونیک که در سیستم ایجاد می شود تنظیم گردند . برای مثال نصب فیلتر هارمونیک هفتم معمولا نیاز به نصب فیلتر هارمونیک پنجم را نیز دارد .

طریقه ی اتصال فیلتر در شکل 27a بدلیل نوع اتصال مثلث اجازه ی جذب جریان توالی صفر را نخواهد داد . در نتیجه برای فیلتر کردن هارمونیک های مرتبه ی سوم غیر موثر است . راه حل های دیگری را نیز باید به کار برد تا جریان های هارمونیک مرتبه ی سوم ( توالی صفر ) را کنترل نمود ، زیرا در سیستم 380 ولت عموما خازن ها را بصورت مثلث می بندند . در عوض در سیستم های توزیع خازن ها بصورت اتصال ستاره متصل می گردند . در این حالت می توان با تغییر اتصال نوترال مسیری برای هارمونیک های توالی صفر



( مرتبه سوم ) ایجاد نمود . راه عملي براي فيلتر کردن هارمونيك هاي توالي صفر قرار دادن راکتور در نقطه ي نوترال خازن است . از اين روش براي حذف تداخلات تلفني نیز استفاده مي گردد . راکتورهايي با چندین تپ خروجي ، در نقطه ي نوترال اتصال مي يابند و نهايتا از تپي استفاده مي شود که تداخلات تلفني را حداقل نمايد .

فیلترهاي غير فعال همواره بر روي شينه هايي قرار مي گيرند که انتظار مي رود  $X_{sc}$  آنها ثابت بماند . در حالیکه فرکانس حذف شده ثابت است ، تشديد موازي با امپدانس سيستم تغيير خواهد نمود . براي مثال ، فرکانس تشديد يك سيستم که از طريق يك ژنراتور اضطراري تغذيه مي شود بسيار کمتر از حالي است که همان سيستم به شبکه متصل شود . بنابراین ، فیلترها مي توان در شرايطي که از ژنراتور اضطراري استفاده مي شود از مدار خارج نمود .

## ساختن يك فيلتر برشي براي حذف هارمونيك پنجم و تأثير آن روي

### پاسخ سيستم

### فیلترهاي فعال

فیلترهاي فعال تجهيزات نسبتا جديدي براي حذف هارمونيك ها مي باشند . عملکرد آن ها براساس مدارات الكترونيك قدرت پيچيده بوده و در نتيجه هزينه ي بسيار زياد تري نسبت فیلترهاي غير فعال دارند . بهر حال ، اين دسته فیلترها داراي مزايای متمایزي مانند تشديد نکردن با سيستم مي باشند. اين گونه تجهيزات را در شرايط بسيار مشکل ، جائيکه فیلترهاي غيرفعال بصورت موفق عمل نمي کنند ( بدليل بروز تشديد موازي ) مي توان بکار برد . اينگونه تجهيزات در يك زمان مي توانند بيش از يك هارمونيك را نیز کنترل نمايند و همچنين بعضي ديگر از مسائل كيفيت برق مانند فليکر ولتاژ را کنترل نمايند . اين نوع فیلترها بصورت خاص براي بارهاي بزرگ و اعوجاج ساز که در يك نقطه ي نسبتا ضعيف در سيستم قدرت متصل مي شوند مفيد خواهند بود . ایده

اصلي در اين گونه تجهيزات وارد نمودن بخشي از موج سيتوسي است كه در جريان بار غير خطي وجود ندارد . شكل 28 اين مفهوم را به تصوير كشيده است . يك كنترل الكترونيكي ، ولتاژ و يا جريان خط را مونيتور نموده و بنحوي عمل مي نمايد كه ولتاژ يا جريان را بصورت سينوسي درآورد . همچنانكه نشان داده شده دو روش اصلي بكار برده مي شود . در روش اول از يك ركتور استفاده خواهد شد كه انرژي در آن ذخيره شده سپس در لحظات مناسب اين انرژي بصورت جريان به سيستم تزريق مي گردد . در روش دوم به جاي استفاده از ركتور از يك خازن استفاده مي شود . بنابر اين ، در حاليكه جريان بار توسط بارهاي غير خطي اعوجاجي شده است ، جريان ديده شده توسط سيستم شبیه سينوسي مي گردد . فیلترهاي فعال علاوه بر هارمونيك ها ، ضريب قدرت را نيز تصحيح مي كنند .

### كاربرد فيلتر فعال در يك بار

الف - 17 مراحل انجام مطالعه هارمونيك ها

روش ايده آل براي انجام مطالعه هارمونيك هاي سيستم در زير توضيح داده مي شود .

- ابتدا هدف مطالعه بايد مشخص شود . بسيار مهم است كه بررسي را بتوان در مسير مناسب قرار داد . براي مثال ممكن است هدف تشخيص عوامل و مسائل موجود و راه حل ها باشد . هدف دسگر مي تواند معين نمودن اين نكته باشد كه آيا تجهيزات مدرن مانند محرکه هاي موتور با قابليت تنظيم سرعت و خازن ها مشكلي ايجاد مي كنند يا نه ؟
- انجام دادن يك شبیه سازي كامپيوتري بر اساس اطلاعات موجود .
- اندازه گيري ها مي توانند از نظر مدت زمان ، استفاده از تجهيزات و ايجاد قطعي سيستم باعث هزينه هاي اضافي شوند . به عبارت ديگر اگر ايده ي خوبي از آنچه كه در جستجوي آن هستيم و محلي كه بايد آن را جستجو كرد وجود داشته باشد ، بسيار اقتصادي خواهد بود .

- انجام اندازه گیری روی تجهیزات موجود و مشخص نمودن منابع هارمونیک و اعوجاج روی شینه ها .
  - کالیبره کردن مدل کامپیوتری با استفاده از اندازه گیری ها
  - مطالعه شرایط در مدارات جدید و یا مسأله موجود صرفنظر از نوع عامل ایجاد کننده ی مشکل
  - پیدا نمودن راه حل ها ( فیلتر و غیره ) و بررسی امکان تداخل آنها با سیستم . همچنین ، بازبینی حساسیت نتایج نسبت به متغیرهای مهم .
  - بعد از پیاده نمودن روش های پیشنهادی ، باید از مونیتورینگ سیستم بمنظور تصدیق عملکرد صحیح سیستم استفاده کرد .
- شایان ذکر است که این روند مطالعه بر این فرض استوار است که به ابزارهای آنالیز کامپیوتری و تجهیزات مونیتورینگ دسترسی کافی وجود دارد . باید پذیرفته همیشه نمی توان تمام مراحل اشاره شده قبل را با دقت مطلوب انجام داد . بیشترین مراحل که احتمال حذف آن می شود یک یا دو مرحله از اندازه گیری ها بدلیل مختلف از جمله هزینه است . یک تحلیلگر با تجربه می تواند بدون انجام آزمون ها مسأله را حل نماید ولی بشدت توصیه می شود که اندازه گیری های اولیه ای در صورت امکان انجام شود زیرا این امکان وجود دارد که بعضی مسائل در مطالعه ی هارمونیک ها از دید تحلیل گر سیستم دور بماند .

### مؤلفه های متقارن

مهندسين قدرت بصورت سنتي از مؤلفه های متقارن بمنظور درك بهتر رفتار سیستم سه فاز استفاده می کنند . با استفاده از این مؤلفه ها سیستم سه فاز به سه سیستم تک فاز تبدیل شده که در این حالت تحلیل آن بسیار ساده تر خواهد بود . روش مؤلفه های متقارن را می توان برای بررسی پاسخ سیستم به جریان های هارمونیک نیز بکار برد . با این روش می توان هر مجموعه از جریان ها یا ولتاژ های نامتعادل را به سه مجموعه متعادل تبدیل نمود . مجموعه توالی مثبت شامل سه موج سینوسی با 120 درجه اختلاف نسبت به یکدیگر می باشند (A-B-C) . امواج سینوسی توالی منفي نیز با یکدیگر 120 درجه اختلاف دارند

اما جهت گردش آن مخالف توالی مثبت است یعنی (A-B-C) . امواج سینوسی توالی صفر یا یکدیگر هم فاز می باشند .

در یک سیستم کاملاً متعادل :

هارمونیک های مرتبه ی 0000 و 13 و 7 و  $h=1$  توالی مثبت می باشند .

هارمونیک های مرتبه ی 0000 و 17 و 11 و  $h=5$  توالی منفی می باشند .

هارمونیک های مرتبه ی 0000 و 15 و 9 و  $h=3$  توالی صفر می باشند . در صورتی که سیستم متعادل باشد واژه های هارمونیک مرتبه سوم و توالی صفر با یکدیگر مترادف هستند . ولی دقت نمائید که حتماً سیستم باید متعادل باشد . وقتی که این شرایط موجود نباشد ، هر یک از هارمونیک ها جزئی از هر یک از توالی ها خواهند بود .

پاسخ سیستم به هارمونیک های توالی مثبت کاملاً واضح است . در صورتی که فقط به بررسی توالی مثبت نیاز باشد مسئله بسیار ساده خواهد بود . مهندسين قدرت در محاسبات پخش بار و افت ولتاژ از مؤلفه های توالی مثبت استفاده میکنند . خوشبختانه ، برای بسیاری از بارهای صنعتی سه فاز می توان این گونه مطالعات را انجام داد . بصورت ساده می توان گفت که :

وقتی که یک سیم پیچ مثلثی در ترانسفورماتور به طور ری با منابع هارمونیکی و شبکه قرار گرفته باشد ، تنها مدار توالی مثبت برای تعیین پاسخ سیستم کافی است . در چنین سیستمی هارمونیک های توالی صفر وجود ندارند و از مسیر حرکت آن ها جلوگیری شده است. شکل 29 این اصل را به تصویر کشیده است . در این شکل نشان داده شده است که چه مدلی را می توان برای کاربردهای مختلف به کار رگفت.

شکل 29- تاثیر ترانسفورماتور روی نیازهای مدل سازی جهت تحلیل هارمونیکی شبکه

هر دو شبکه توالی مثبت و منفی معمولاً دارای پاسخ یکسانی در برابر هارمونیک ها هستند و از یک مدل مداری یکسان می توان برای هر دو

استفاده نمود. اگر در هنگام اندازه گیری هارمونیک های مرتبه سوم خود را نشان دهند ، در صورت وجود منابع هارمونیک نامتعادل اینگونه هارمونیک ها توالی صفر نیستند و می توان آن ها را با همان مدل بررسی نمود.

روش مولفه های متقارن برای بررسی سیستم های توزیع چهار سیمه که دارای تعداد زیادی بارهای تک فاز می باشند مفید نخواهد بود ، زیرا باید هر دو شبکه توالی مثبت و صفر در محاسبات وارد شوند. معمولاً غیرعملی است که سیستم را به صورت دستی حل نمود و اغلب با برنامه ای کامپیوتری که قادر به مدل سازی دقیق این سیستم ها و حل آنها می باشند ، می توان این کار را انجام داد . استفاده از مؤلفه های متقارن امکان ایجاد خطا را بیشتر می کند زیرا امکان خطای تحلیل گر سیستم نیز وجود دارد. بنابراین توصیه می شود که استفاده از روش های مؤلفه های متقارن توسط افرادی که با رفتار غیرمتعادل سیستم نا آشنا هستند انجام نگیرد.

به طور خلاصه ، بسیاری از مطالعات هارمونیک را می توان با تکنیک های مدل سازی مؤلفه های متقارن انجام داد. در صورت مطالعه بارهای صنعتی ، در اکثر حالات ، اینگونه بارها را می توان با استفاده از مدل امپدانس توالی مثبت حل نمود. یک استثناء مشخص ، مطالعه هارمونیک ناشی از بارهای تک فاز در فیدرهای توزیع 220/380 ولت در ساختمان های تجاری یا صنعتی است.

## مدل سازی هارمونیک

اغلب بررسی های هارمونیک با استفاده از تکنیک های حل مدارات خطی در حالت مانا انجام می گیرد. منابع هارمونیک ها ، که عناصر غیرخطی می باشند به صورت منابع تزریقی به شبکه خطی مدل سازی می شوند. برای اغلب مطالعات پخش بار هارمونیک ، منابع هارمونیک را می توان به صورت منابع ساده جریان هارمونیک مدل سازی نمود. این مدل ، زمانی که اعوجاج ولتاژ در شینه اصلی کمتر از 5 درصد باشد قابل اعمال خواهد بود. شکل 20 جایگزینی یک مبدل الکترونیک قدرت یا یک منبع جریان در مدار معادل را نشان می دهد. مقدار جریان تزریقی را می توان توسط اندازه گیری مشخص نمود. در

صورت نبود آن و نیز اطلاعات دیگر معمولاً فرض می شود که مقدار هارمونیک هابه طور معکوس با مرتبه هارمونیک متناسب است. یعنی ، جریان هارمونیک پنجم یا 20 درصد مؤلفه اصلی است و غیره . این نتیجه از سری فوریه موج مربعی حاصل می شود. بسیاری از بارهای غیرخطی ممکن است جریان مربعی بکشند ، ولی بهر حال این اصل را نمی توان در مورد محرکه های استفاده کننده از تکنیک PWM پیشرفته و منابع تغذیه سوئیچینگ که دارای مؤلفه های هارمونیکی بزرگتری هستند اعمال نمود. جدول 4 مقادیر نمونه ای را که می توان برای تحلیل چندنوع از تجهیزات بکار برد ارائه داده است. شکل 30- نمایش یک بار غرخطی یک منبع جریان هارمونیکی جهت تحلیل سیستم . جدول 4- درصد اعوجاج هارمونیکی نمونه تولید شده توسط منابع هارمونیکی مرسوم (هارمونیک های فرد مرتبه 1 تا 13)

منابع تغذیه سوئیچینگ	روشنایی از نوع قوسی	محرکه با تکنیک PWM	محرکه موتور 6 پالسه	مرتبه هارمونیک
100	100	100	100	1
70	20	-	-	3
40	7	90	18	5
15	3	80	12	7
7	2/4	-	-	9
5	1/8	75	6	11
3	0/8	70	4	13

### برای مدل های تک فاز و سه فاز غیرمتقارن

وقتی که سیستم در حول و حوش تشدید است ، استفاده از یک منبع جریان ساده ، تخمین خوبی از ولتاژ اعوجاجی را نخواهد داد . در این حالت مدل منبع جریان ساده ، به مفهوم تزریق جریان ثابتی به یک امپدانس بزرگ خواهد بود که شرایط کار واقعی سیستم را نشان نمی دهد . اغلب مهمترین مسئله ، تغییر فرکانس تشدید است که این موضوع را می توان به راحتی از مدل ساده

بدست آورد. وقتی که شرایط تشدید به کمک اضافه کردن فیلتر حذف شد پاسخ بدست آمده از مدل ساده واقعی تر خواهد شد. جهت حالاتی که در شرایط تشدید پاسخ دقیق تری لازم است باید از مدل های پیچیده تری استفاده نمود. برای بسیاری از تجهیزات شبکه قدرت مدار معادل تونن یا نورتن کافی خواهد بود (رجوع شود به شکل 31).

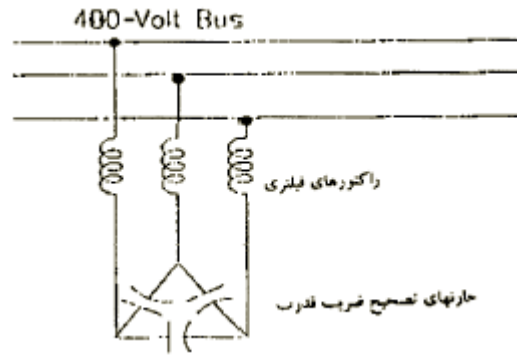
شکل 31- جایگزینی مدل ساده منبع جریان با یک مدار تونن یا نورتن برای بهبود و مدل سازی سیستم در شرایط تشدید.

در این حالت امیدانس اصفی پاسخ مدار تشدید موازی را تصحیح می کند. مدار معادل تونن را می توان به راحتی برای بسیاری از بارهای غیرخطی بدست آورد. برای مثال، یک کوره قوس الکتریک را می توان با یک ولتاژ موج مربعی با مقدار پیک تقریبی 50 درصد ولتاژ AC نامی سیستم نمایش داد. امیدانس سری آن نیز امیدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور کوره و سیم های ارتباطی می باشد.

متأسفانه، بدست پاوردن یک امیدانس معادل مشخص برای بسیاری از بارهای غیرخطی، مشکل است. در این حالات، شبیه سازی دقیق بارهای تولید کننده هارمونیک لازم خواهد بود. این کار را می توان با برنامه های کامپیوتری که از روش تکراری استفاده می کنند و یا برنامه هایی که از روش تحلیل دقیق در حوزه زمان بهره می گیرند انجام داد. خوشبختانه، به ندرت نیاز به چنین مطالعات دقیقی در شرایط تشدید خواهد بود و معمولاً می توان تجهیزات قوس زننده را با مدل تونن مدل سازی نمود.

### **طراحی فیلترهای هارمونیک**

طراحی فیلتر با یک مثال ساده ولی مرسوم توضیح داده می شود. یک فیلتر برشی قابل تنظیم 400 ولت در شکل 3 نشان داده شده است. فیلتر برای هارمونیک پنجم طراحی شده و کمی پایین تر از فرکانس هارمونیک مورد نظر تنظیم می گردد.



شکل 3- مثالی از یک آرایش فیلتری ولتاژ پایین اینروش ، تولرانس اندازه عناصر را تا حدودی خنثی نموده و همچنین از عمل کردن فیلتر در فرکانس هارمونیک مورد نظر به صورت اتصال کوتاه مستقیم جلوگیری می کند.

روش عمومی کاربرد فیلتر به صورت زیر است :

- اعمال یک فیلتر موازی تک تنظیم و طراحی آن برای پایین ترین هارمونیک تولید شده
- تعیین سطح اعوجاج ولتاژ در شینه ولتاژ پایین
- تغییر عناصر فیلتر با در نظر گرفتن خطاها و بازبینی تاثیر فیلتر
- بررسی مشخصه پاسخ فرکانسی سیستم به منظور تایید این نکته که تشدید موازی ایجاد شده در نزدیکی فرکانس هارمونیکی نباشد.
- در صورت لزوم ، نیاز به چندیم فیلتر بررسی شود. مانند فیلترهای مورد نیاز برای هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم و نیز سوم ، پنجم و هفتم.
- جدول شماره (5) نتایج طراحی فیلترها را نشان می دهد. روش استفاده شده در زیر توضیح داده می شود.

$$K \text{ var} = K \text{ var} \left( \frac{KV}{KV} \right)^2$$

(35) فرمول

در این حالت ، ولتاژ واقعی و ولتاژ نامی برابر هستند . بنابراین واقعی خازن همان نامی یعنی می باشد. جریان فرکانس مؤلفه اصلی بانک خازنی به صورت زیر است :

$$I_{FLcap} = \frac{K_{var}}{\sqrt{3}KV} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 0.4} = 721/69A$$

(36) فرمول



امپدانس تک فاز معادل بانک خازنی برابر است با :

$$X_{CY} = \frac{(KV)^2}{M \text{ var}} = \frac{(0/04)^2}{0/5} = 0/32\Omega \quad (37) \text{ فرمول}$$

امپدانس راکتور فیلتر با استفاده از رابطه زیر بدست می آید :

$$X_R = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0/32\Omega}{(7/4)^2} = 0/01449\Omega \quad (38)$$

اضافه کردن راکتور در فیلتر جریان مولفه اصلی را به مقدار

$$I_{FL} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}(X_C + X_R)} = \frac{400}{\sqrt{3}(-0/32 + 0/01449)} = 756/14A \quad (39) \text{ فرمول}$$

تغییر می دهد.

به دلیل اینکه فیلتر جریان مولفه اصلی بیشتری را نسبت به وقتی که خازن در مدار باشد می کشد ، جبران ساز بیشتر از مقدار نامی خازن می شود و با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$K \text{ var} = \sqrt{3} \times V_{bus} \times I_{FL} = \sqrt{3} \times 400 \times 756/14 = 524K \text{ var} \quad (40) \text{ فرمول}$$

مقادیر نامی خازن را باید با محدودیت های استاندارد که در انتهای جدول 5 آمده است ، مقایسه نمود. مشخصه راکتور فیلتر باید مقادیر جریان مولفه های اصلی و هارمونیک را شامل شود. جریان هارمونیک را باید با سطح فرضی قابل قبولی از اعوجاج ناشی از منابع دیگر تعیین نمود. در این حالت ، فرض می شود که اعوجاج ولتاژ یک درصد باشد.

مشخصه تنظیم فیلتر را می توان با ضریب کیفیت (Q) توضیح داد. در حقیق وسیله اندازه گیری تیزی تنظیم بوده و برای فیلتر سری مقاومتی بدین صورت تعریف می شود .

$$Q = \frac{nX_L}{R} \quad (41) \text{ فرمول}$$

که در آن :

: مقاومت سری در فیلتر

: مرتبه هارمونیک

: راکتانس راکتور فیلتر در فرکانس اصلی می باشد.

مثالی در رابطه با طراحی فیلتر		محاسبات مربوط به فیلتر ولتاژ پایین	
		اطلاعات مربوط به شبکه	
فرکانس سیستم : ۵۰ هرتز	ولتاژ نامی خازن : ۴۰۰ ولت	هارمونیک پنجم	مشخصات فیلتر:
فرکانس نامی خازن : ۵۰ هرتز	توان تغییر یافته بانک خازنی: ۵۰۰ کیلووار	۷/۲۲۱ آمپر	توان نامی بانک خازنی :
کل بار هارمونیکی : ۵۰۰ کیلوولت آمپر	فرکانس تنظیم فیلتر : ۲۳۵ هرتز	۷/۲۲۱ آمپر	جریان نامی بانک خازنی :
مقدار خازن (معادل ستاره) : ۹۹۴۷/۲ میکروفاراد	مقدار نامی راکتور : ۴۶/۱۲ میکروهانری	۴/۷ هارمونیک	ولتاژ نامی شینه :
مقدار جبران سازی : ۵۲۴ کیلووار	میزان THD مجاز شرکت برق : ۱ درصد	۳۲/۰ اهم	جریان خازن (واقعی) :
حداکثر جریان هارمونیکی بار : ۱۸۰/۴ آمپر	حداکثر جریان هارمونیکی کل : ۲۲۸/۱ آمپر	۱۴۴۹/۰ اهم	امپدانس خازن (معادل ستاره) :
		۱۴/۷۵۶ آمپر	امپدانس راکتور :
		۱۴/۷۵۶ آمپر	جریان بار کامل فیلتر (واقعی) :
		۳۰ درصد مؤلفه اصلی	جریان بار کامل فیلتر (نامی) :
		۷/۴۷ آمپر	جریان هارمونیکی بار :
			جریان هارمونیکی شرکت برق:
		محاسبات مربوط به خازن	
ولتاژ مؤلفه اصلی خازن ۴۱۹ ولت	ولتاژ مؤلفه اصلی خازن ۴۱۹ ولت	۷۵۶/۱۴ آمپر	جریان مؤثر فیلتر
حداکثر پیک ولتاژ ۴۴۸ ولت	حداکثر پیک ولتاژ ۴۴۸ ولت	۳۳۷/۴ ولت	هارمونیک ولتاژ خازن
حداکثر پیک جریان ۱۰۳۰ آمپر	حداکثر پیک جریان ۱۰۳۰ آمپر	۴۲۰ ولت	ولتاژ مؤثر خازن
		حدود خازن	
		(%) حد مجاز	(%) واقعی
		۱۲۰	۱۱۲
		۱۳۰	۱۱۱
		۱۳۵	۱۱۷
		۱۱۰	۱۰۵
		مشخصات طراحی راکتور فیلتر	
مقدار نامی راکتور : ۴۶/۱۲ میکروهانری	جریان هارمونیکی : ۲۲۸/۱ آمپر	۱۴۴۹/۰ اهم	امپدانس راکتور
		۱۴/۷۵۶ آمپر	جریان نامی مؤلفه اصلی

معمولاً مقدار همان مقاومت راکتور است. در این حالت مقدار ضریب کیفیت بسیار بزرگ می باشد و عمل فیلتر کردن برای باند باریکی از فرکانس انجام می گیرد و در این حالت فیلتر بسیار اقتصادی خواهد بود (تلفات انرژی پایین). به هر حال ، اهی اوقات لازم است که مقداری تلفات به صورت عمدی وارد سیستم شود تا به میرا شدن پاسخ کمک کند. یک مقاومت معمولاً به صورت موازی با راکتور بسته می شود و در این شرایط فیلتر بالاگذار بوجود می آید. در این حالت ضریب کیفیت به صورت عس معادله 36 تعریف می شود ف به نحوی که ضریب کیفیت های بزرگ ، باریک بودن باند فرکانس را نشان

خواهند داد . از فیلترهای بالاگذر معمولاً برای حذف هارمونیک یازدهم و سیزدهم به بالا استفاده می شود. معمولاً استفاده از این فیلترها در هارمونیک پنجم و هفتم به دلیل مقدار تلفات و اندازه مقاومت اقتصادی نتخواهد بود. راکتورهای مورد استفاده در فیلترهای بزرگ معمولاً به هسته هوایی ساخته می شوند . در چنین حالتی ، مشخصه آن در برابر جریان و فرکانس خطی خواهد بود. راکتورهای مورد استفاده در فیلترهای کوچک و یا فیلترهایی که در یک فضای محدود و کوچک بایداستفاده شوند از نوع هسته فولادی ساخته شوند. خطای درصد در راکتانس راکتورها مورد استفاده در کاربردهای صنعتی معمولاً قابل قبول می باشد. نسبت نیز بین 50 تا 150 است. در صورت نیاز به میرایی بیشتر می توان از یک مقاومت سری شده با فیلتر استفاده نمود. راکتور باید به نحوی طراحی شود تا اتصال کوتاه بین خازن و راکتور را بتواند تحمل کند . مقدار ضریب کیفیت در حالت بالاگذر معمولاً بین 1 تا 2 انتخاب می گردد تا فیلتر پاسخ تختی را در بالای فرکانس تنظیم شده ارائه دهد.

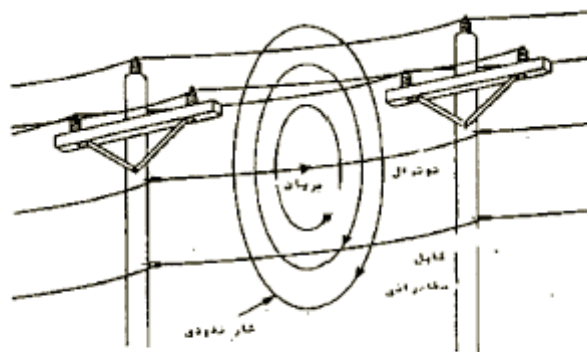
فیلترهای مورد استفاده در کاربردهای ه فاز قدرت بالا مانند سیستم های کنترل توان راکتیو استاتیک اغلب شامل فیلترهای هارمونیک پنجم و هفتم می باشند زیرا اینگونه هارمونیک ها بزرگترین هارمونیک های تولید شده توسط پل های 6 پالسی خواهند بود. گاهی اوقات این حالت باعث می شود که سیستم هارمونیک مرتبه سوم نزدیک شرایط تشدید قرار بگیرد که در نتیجه به فیلتر هارمونیک سوم نیاز می باشد. عموماً ، ممکن است که این تصور وجود داشته باشد که هارمونیک سوم در یک پل سه فاز مشکلی نخواهد داشت لیکن باید توجه نمود که عدم تعادل در عملکرد پل و نیز در پارامترهای سیستم مقدار کمی هارمونیک غیرمشخصه تولید می کند. اگر سیستم به این هارمونیک ها پاسخ بدهد باید به هر حال از فیلتر استفاده نمود.

### **تداخلات مخابراتی**

جریان هارمونیکی در سیستم توزیع یا در مسیر آن « به مشترکین می تواند باعث ایجاد تداخل در مدارات مخابراتی که دارای مسیر مشترکی با آن هستند گردد. ولتاژ القایی در هادی های موازی با مسیر جریان هارمونیکی اغلب در محدوده عرض باند مکالمات صوتی ایجاد می شود.

هارمونیک های بین 450 هرتز (هارمونیک نهم) و 1200 هرتز معمولاً آثار زیان بارتری دارند . ولتاژ القایی به ازای هر آمپر جریان با بالا رفتن فرکانس زیاد می شود. هارمونیک مرتبه سوم معمولاً سیستم های چهارسیمه به دلیل اینکه در تمام هاد ها هم فاز می باشند مشکل زا هستند و در این حالت این جریان ها در هادی نوترال با یکدیگر جمع شده و اثر نامناسبی را در سیستم های مخابراتی ایجاد می کنند.

مؤلفه های هارمونیکی به روش القایی با هدایت مستقیم به سیستم های تلفنی منتقل می شوند. شکل 33 کاپلینگ بوجود آمده در اثر القاء و ناشی از سیم نوترال یک خط توزیع هوایی چهارسیمه را نشان می دهد. اگر از سیم های تلفنی معمولی استفاده شود این مسئله بسیار مشکل زا خواهد بود . در صورتیکه از سیم های تلفنی شیلددار با هادی های به هم پیچیده در سیستم تلفنی استفاده شود ، اثر القاء دارای اهمیت کمتری خواهد بود . در این نوع سیم های تلفنی ، کاپلینگ القاء مستقیم در هر دو هادی ، ولتاژ مساوی تولید کرده که این عامل باعث ایجاد ولتاژ منتهجه صفر در حلقه متشکل از هادی ها می گردد.



شکل ۳۳- کاپلینگ القایی ناشی از جریان صفر یک سیستم قدرت و مدار تلفنی

در صورتی که جریان بالایی در شیلد اطراف هادی تلفن بوجود بیاید کاپلینگ القایی هنوز هم می تواند مسئله ساز باشد جریان عبوری از شیلد باعث ایجاد افت مقاومتی شده و در نتیجه اختلاف پتانسیلی در مراجع زمین دو سر کابل تلفن بوجود می آید.

از سوی دیگر جریان شیلد می تواند توسط پدیده هدایت مستقیم بوجود آید. در شکل شیلد به صورت موازی با مسیر زمین سیستم قدرت می باشد. اگر

شرایط زمین ملی به نحوی باشد که مقدار نسبتاً بزرگی در شیلد بوجود آید مقدار افت مقاومتی بزرگی بوجود می آید و باعث ایجاد اختلاف پتانسیل بین مراجع زمین دو سر کابل تلفن می گردد.

### برنامه های کامپیوتری برای محاسبه هارمونیکها :

از مباحث گذشته مشخص شد که برای هر سیستم حتی ساده ترین آن ها ، یک برنامه پیچیده کامپیوتری لازم است . مشخصه یک چنین برنامه ای در زیر آمده است :

ابتدا باید توجه نمود که یک مدار ساده مدل مناسبی برای تحلیل در یستم های صنعتی کوچک است و تحلیل آن بر اساس محاسبات دستی دشوار شده است . این سیستم اساساً یک مدار تک شینه همراه با یک خازن است . در این حالت دو مورد را به سادگی می توان انجام داد :

(1) تعیین فرکانس تشدید در صورتیکه تشدید نزدیک به یک هارمونیک مضر برای سیستم باشد باید مقدار خازن تغییر یابد و یا فیلتر برای آن در نظر گرفته شود.

(2) تخمینی از اعوجاج ولتاژ به دلیل جریان ولتاژ توسط رابطه زیر بدست می آید :

$$V_h = \left[ \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \right] I_h \quad h = 2, 3, \dots \quad (42) \text{ فرمول}$$

اگر فرکانس تشدید نزدیک به یک هارمونیک مهم نبوده اعوجاج ولتاژ نیز کم باشد می توان گفت که سیستم احتمالاً موفقیت آمیز عمل می کند.

متأسفانه ، تمام حالات عملی را با چنین سیستم ساده ای نمی توان نمایش داد. در حقیقت ، اضافه نمودن حتی یک شینه بیشتر به مدار ساده شکل 36 موجب می شود که تحلیل آن حتی برای افراد خبره نیز مشکل گردد. به هر حال ، یک برنامه کامپیوتری این کار را در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام می دهد.

برای استفاده از برنامه کامپیوتری باید شبکه مورد مطالعه ، بارها و منابع را برای برنامه مشخص نمود. اطلاعات باید شامل موارد زیر باشد :

- امیدانس ترانسفورماتور و خطوط
- نوع اتصال ترانسفورماتورها
- مقادیر خازن و محل آن ها
- طیف هارمونیک ناشی از بارهای غیرخطی
- ولتاژهای منابع قدرت

این مقادیر به عنوان ورودی به برنامه داده می شود و برنامه باید به صورت اتوماتیک در هارمونیک مورد نظر امیدانس را مشخص نموده و سپس برنامه را حل نماید.

### قابلیت برنامه های تحلیل هارمونیک :

برنامه های کامپیوتری مورد پذیرش در تحلیل هارمونیک در سیستم های قدرت باید دارای مشخصه های زیر باشند:

- این برنامه ها باید توانایی حل شبکه های بزرگ با حداقل چند صد گره را داشته باشد.
- این برنامه ها باید قابلیت حل سیستم های چند فاز با هر ترکیب دلخواهی را داشته باشد شبکه های توزیع را می توان با استفاده از مؤلفه های توالی مثبت در شبکه متعادل حل نمود ولی به هر حال این حالتعمومیت ندارد.
- برنامه باید قادر به مدل سازی سیستم ها با مدل های توالی مثبت باشد. وقتی که هارمونیک های توالی صفر وجود ندارد لازم نیست که از مدل های سه فاز استفاده شود.
- برنامه باید قادر به بدست آوردن امیدانس در فرکانس های مختلف ( با تغییرات مثلاً 10 هرتز) باشد در این صورت می توان مشخصه پاسخ فرکانسی را برای تعیین شرایط تشدید بدست آورد.
- برنامه باید قادر باشد که به طور همزمان چندین منبع هارمونیک را حل نماید تا بتوان مقدار واقعی اعوجاج ولتاژ و جریان را بدست آورد.
- این برنامه باید مدل های معمول منابع هارمونیک را به صورت از پیش ساخته داشته باشد .

- این برنامه ها باید منبع ولتاژ هارمونیک و منبع جریان هارمونیک را مدل کنند.

این برنامه ها باید به صورت اتوماتیک زاویه فاز منابع را بر اساس زوایای فاز مؤلفه فرکانس اصلی تنظیم کنند.

- این برنامه ها باید هر گونه اتصال ترانسفورماتور را مدل نمایند.

- این برنامه ها باید نتایج را به یک طریق معنی دار نمایش داده و هر کاربری بتواند به راحتی کار کند.

پیوست ب

**مقررات برخی از کشورها در رابطه با پذیرش مشترکین برق که تولید هارمونیک می نمایند.**

(اطلاعاتی)

جهت آشنایی با چگونگی محدود کردن هارمونیک و مقررات مربوط به پذیرش مشترکین تولید کننده هارمونیک ها ، در یک شبکه الکتریکی روش های موجود در کشورهای آلمان ، استرالیا ، انگلستان ، بلژیک و فرانسه ، لهستان ، دانمارک و آمریکا به صورت خلاصه در این قسمت ارائه می گردد.

کشور آلمان

مراحل اول مقررات این کشور اجازه می دهد که کلیه تجهیزاتی که نسبت به قدرت نامی آن ها به سطح اتصال کوتاه شینه محل تغذیه کمتر از 0/1 درصد باشد به شبکه متصل گردند. به عبارت دیگر چنانکه رابطه زیر برای هر وسیله برقرار باشد احتیاج به بررسی هارمونیک و مطالعات دقیق نبوده و پذیرش اتوماتیک صورت می گیرد .

$$P / Ssc < 0.1 / 100$$

(1) فرمول

رابطه فوق برای اکثر دستگاه هایی که دارای یکسو کننده همراه با خازن صاف کننده می باشند مانند تلویزیون ها و اینورترها موتورهای محرکه صادق می باشد.

در مرحله دوم مقررات این کشور به جا تعیین مقدار حد مجاز هارمونیک ها ، نسبت ظرفیت بار غیرخطی به کل بار مشترک مشخص می گردد. این نسبت با توجه به شرایط کار مشترکین بین 3 تا 30 درصدی تواند تغییر نماید. در مرحله سوم مقررات این کشور مقدار مجاز هارمونیک های ولتاژ در شینه مشترک اعمال می گردد که برای هارمونیک های پنجم و هفتم بایستی کمتر از 5 درصد و برای هارمونیک های یازدهم و سیزدهم بایستی کمتر از 3 درصد باشد.

### کشور استرالیا

در این کشور ماکزیمم یک مبدل سه فاز که می تواند به شبکه توزیع وصل گردد و نیازی به مطالعه بخصوصی در مورد آن نیست (مرحله اول مقررات) برابر با 0/3 درصد قدرت اتصال کوتاه شینه محل اتصال می باشد ، یعنی :

$$P / Ssc < 0.3/100$$

(2) فرمول

در ضمن چنانکه شرایط مانند موارد مطرح شده در الف و ب و ج باشد مقررات مرحله (2) و یا (3) که در ادامه به آن اشاره می گردد بایستی به کار گرفته شود :

الف - حداقل سطح اتصال کوتاه سیستم توزیع (ولتاژ پایین ) کمتر از 5 مگاوات آمپر و یا حداقل سطح اتصال کوتاه سیستم توزیع (ولتاژ متوسط) کمتر از 50 مگاوات آمپر باشد.

ب- ظرفیت دستگاه بزرگتر از 75 کیلووات آمپر در سیستم توزیع (ولتاژ پایین) و یا بزرگتر از 500 کیلووات آمپر در سیستم توزیع (ولتاژ متوسط) باشد.

ج - مجموعه چند مشترک که با هم کنترل می شوند و مقدار هارمونیک تولیدی آن ها بیشتر از مقدار هارمونیک ولیدی بند ب باشد.

در مراحل دوم و سوم استاندارد این کشور حدمجاز مشخصی را برای هر مشترک تولید کننده هارمونیک تعیین نمی شود و پذیرش مشترک بر اساس مقدار حد مجاز هارمونیک شبکه محل اتصال تعیین می گردد یعنی اولین



مشترک می تواند تقریباً به اندازه مقدار مجاز هارمونیک های شبکه ، تولید هارمونیک کند و تمام ظرفیت را بگیرد و جایی برای مشترک دوم نگذارد.

### کشور انگلستان

در این کشور برای مقررات مرحله یک ، تجهیزات به دو دسته تجهیزات سه فاز و تجهیزات یک فاز تقسیم شده اند در مورد تجهیزات سه فاز مقررات مرحله (1) به شرح زیر است :

ماکزیم ظرفیت ( به کیلوولت آمپر) یک مبدل یا یک رگولاتور که می تواند به سیستم ولتاژ پایین و یا ولتاژ متوسط بدون جزئیات وصل گردد.

در مورد تجهیزات یک فاز مقررات مرحله یک به شرح زیر است :

در مورد وسایل خانگی و شبیه آن استاندارد شماره 60555 مورد استفاده قرار می گیرد ولی ماکزیم ظرفیت یکسو کننده ها و رگولاتورهای یک فاز که از نظر تئوری هارمونیک زوج تولید نمی کنند و در تجهیزات صنعتی یا شارژرها بکار می روند می تواند برای ولتاژ 240 ولت برابر 5 کیلوولت آمپر و برای ولتاژ 415 یا 480 ولت برابر 7/5 کیلوولت آمپر باشد.

در ضمن تجهیزاتی که هر دو هارمونیک فرد و زوج را تولید می کنند برای اتصال به شبکه مناسب تشخیص دانسته نمی شود. چنانکه قرار باشد چند دستگاه تک فاز تولید کننده هارمونیک از یک محل به سیستم وصل گردند سعی می گردد اتصال آنها به فازهای مختلف باشد که یک حالت تعادل در مورد بارهای غیرخطی وجود داشته باشد . مقررات این مرحله اجازه اتصال دویکسو کننده یا رگولاتور را به یک فاز در یکمحل نمی دهد و چنانکه این شرایط بوجود آید بایستی طبق مقررات مرحله دوم عمل نمود.

در مقررات مرحله یک کشور انگلستان اجازه اتصال تجهیزاتی که در سیستم متناوب جریان تزریق می کنند داده نمی شود.

### کشور فرانسه

مقررت مرحله یک این کشور اجازه وصل بدون بررسی و مطالعه دقیق بارهای تولید کننده هارمونیک به سیستم ولتاژ متوسط را به شرطی می دهد که ظرفیت نامی ( ) مشترک کمتر از 500 کیلوولت آمپر و یا کمتر از یک درصد سطح اتصال کوتاه محل اتصال بار باشد یعنی :

$$P < 500KVA \quad (4)$$

$$P < 0.01Ssc \quad (5)$$

در مقررات مرحله دومو سوم این کشور ، حد مجاز هارمونیک های ولتاژ تولیدی هر مشترک و همچنین حد مجاز هارمونیک های ولتاژ در شبکه تعیین شده است ، مقدار مجاز هارمونیک های ولتاژ یک مشترک بایستی کمتر از 1/6 درصد و مقدار هر یک از هارمونیک های زوج مشترک نبایستی بیشتر از 0/6 درصد باشد ، در حالی که مقدار مجاز جمع هارمونیک ها در شبکه ولتاژ متوسط 3 درصد تعیین گردیده است.

### کشور آمریکا

در این کشور استاندارد ساده و مشخصی برای تعیین مقدار مجاز تولیدهارمونیک برای هر یک از مشترکین وجود ندارد ولی کمیته های مختلف در حال مطالعه و بررسی جهت تعیین استانداردهای لازم در این زمینه می باشند.

در تجدید نظر این استاندارد مقررات ساده ای برای پذیرش مشترکین تولید کننده هارمونیک در سطح ولتاژ 2/4 تا 138 کیلوولت اضافه شده است و جدول 6 ماکزیمم مقدار هر نوع هارمونیک جریان را که یک مشترک مجاز است به شبکه تزریق کند مشخص می نماید که چنانکه مشترکی کمتر از مقادیرمشخص در جدول تولید نماید بدون بررسیهای مفصل ودقیق معمولا اجازه اتصال به شبکه داده میشود.

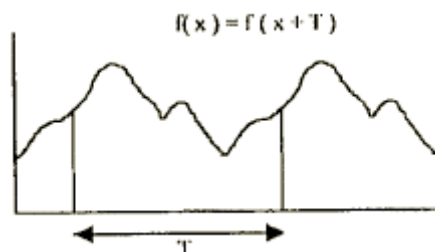
ماکزیمم مقدار هارمونیک جریان مجاز برای بارهای غیرخطی در شبکه های ۲/۴ کیلوولت به درصد (نسبت به جریان نامی یا فرکانس پایه)						
اعوجاج کلی	مرتبۀ هارمونیک های فرد					نسبت جریان اتصال کوتاه محل تغذیه به جریان نامی مشترک
	THD	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	
کوچکتر از ۲۰	۴	۲	۱/۵	۰/۶	۰/۳	۵
۲۰ تا ۵۰	۷	۳/۵	۲/۵	۱/۰	۰/۵	۸
۵۰ تا ۱۰۰	۱۰	۴/۵	۴/۰	۱/۵	۰/۷	۱۲
۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۲	۵/۵	۵/۰	۲/۰	۱	۱۵
بزرگتر از ۱۰۰۰	۱۵	۷	۶/۰	۲/۵	۱/۴	۲۰

۱) مقدار هارمونیک های زوج بایستی کمتر از ۲۵ درصد مقدار هارمونیک های فرد باشد.  
 ۲) در مورد شبکه های ۶۹ الی ۱۳۸ کیلوولت نصف مقادیر فوق بایستی بکار رود.  
 ۳) در مورد شبکه های ۱۳۸ کیلوولت به بالا در مورد هر مشترک بایستی مطالعات و بررسی های مخصوص به خود انجام گیرد.

## روابط ولتاژ و جریان در شرایط هارمونیک

با استفاده از سری فوری می توان فرکانس و اندازه چندین موج سینوسی را که با یک دیگر ترکیب شده و یک شکل موج دلخواه را ایجاد می کنند مشخص ساخت.

از دیدگاه ریاضی بسط سری فوری یک سیگنال بهترین پردازش، از نظر خطای متوسط مربعات، به کمک استفاده از هارمونیک مرتبه اول و مرتبه های بالاتر (مضارب صحیح از هارمونیک مرتبه اول) می باشد. اگر یک سیگنال متناوب با دوره تناوب  $T$  ثانیه شکل ۱ در اختیار باشد می توان با استفاده از بسط سری فوری به صورت دقیق این سیگنال را به صورت جمع مولفه اول و مولفه های دیگر نمایش داد.



چون هر سیکل در پرورد زمانی  $T$  ثانیه کامل می شود بنابراین فرکانس آن به صورت  $f = \frac{1}{T}$  هرتز قابل بیان می باشد. اگر داشته باشیم  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  آن گاه سری فوری را به صورت زیر می توان نوشت:

$$F(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t\}$$

$$F(t) = \frac{1}{2}c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad n=1,2,\dots,\infty$$

$$C_0 = a_0 \quad C_n \sin \phi_n = a_n \quad C_n \cos \phi_n = b_n$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

که در آن :

هارمونیک اول یا اصلی :  $C_1 \sin(\omega t + \phi_1)$

هارمونیک n ام :  $C_n \sin(\omega t + \phi_n)$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin n\omega t dt$$

اعتبار سری فوریه بمنظور نمایش یک تابع ریاضی توسط ریاضیدانی بنام دریکله اولین بار مورد توجه قرار گرفت. از نظر تئوری، برای داشتن یک سری فوریه،  $f(t)$  باید شرایط خاصی را ارضا نماید که شامل :

(۱)  $f(t)$  باید تک مقداره باشد یعنی برای هر  $t$  فقط یک مقدار  $f(t)$  داشته باشیم.

(۲)  $f(t)$  باید تابع پیوسته بوده و یا تعداد مشخص ناپیوستگی در دوره زمانی تناوب خود داشته باشد.

(۳)  $f(t)$  و مشتق آن باید پیوسته خطی در دوره زمانی تناوب باشند.

با توجه به اینکه شکل موجهای جریان و ولتاژ در سیستمهای قدرت دارای شرایط بالا می باشند لذا می توان از سری فوریه برای نمایش آنها استفاده نمود.

معادلات سری فوریه که تا کنون مورد توجه قرار گرفت برای محاسبات توابع آناتحلیلی مناسب بودند لذا لازم است که به شکل جدیدی از آن دست یافت تا بتوان در برنامه های کامپیوتری مورد استفاده قرار گیرند. در این خصوص روشهای ریاضی متفاوتی را می توان استفاده نمود که از بین آنها می توان به تبدیل فوریه گسسته که ابزار محاسباتی قوی برای این منظور است اشاره نمود. با استفاده از این تبدیل می توان طیف فرکانسی یک تابع متناوب گسسته را توسط رابطه زیر بدست آورد. که در آن  $N$  نرخ نمونه برداری از تابع است.

$$A_K = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{n-1} x(n) \cos\left(K \frac{2\pi n}{N}\right)$$
$$B_K = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{n-1} x(n) \sin\left(K \frac{2\pi n}{N}\right)$$

$$n=0,1,\dots,N-1$$

$$K=0,1,2,\dots,\frac{N}{2}$$

که در آن  $K$  شاخص فرکانس است که از ۱ تا  $\frac{N}{2}-1$  تغییر می کند.  
در این حالت، ضرایب فوریه را می توان توسط روابط زیر بدست آورد.

