I.P.I.S

13

1 St . edition
April . 2002

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic Of Iran

وزارت نیرو
Ministry Of Energy

سازمان مدیریت تولید و انتقال نیروی برق ایران (توانیر)
Iran Power Generation & Transmission Management Organization - Head Office (Tavanir)

۱۳

چاپ اول
اردیبهشت ۱۳۸۱

استاندارد صنعت برق ایـــران – مشـــخصات و خصوصیـــات
انرژی الکتریکی (کیفیت برق)
قسمت دوم ــ حدود مجاز هارمونیک ها

Iran Power Industry Standards - Power Quality
Part Two : Permissible Ranges of Harmonics

کمیسیون استاندارد « مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق)- قسمت دوم - حدود مجاز هارمونیک ها »

رئیس	سمت یا نمایندگی
نمازی صالح ، ابراهیم (فوق لیسانس مدیریت)	وزارت نیرو_ سازمان توانیر _ معاونت تحقیقات و فن آوری _ دفتر استانداردها
اعضاء	
آبسالان ، یوسف (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق کهکیلویه و بویراحمد
ابویی ، امیر (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق یزد
احمدی یزد ، محمد (فوق لیسانس مهندسی صنایع)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای تهران
اسدی ، ابوالفضل (فوق لیسانس مهندسی برق رشته قدرت)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای یزد
اسدی ، فرزاد (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو _ شرکت توزیع نیروی برق ایلام
اصغری فرد ، محمود (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو -شرکت توزیع نیروی برق تبریز

امیدواری نیا ، اسدا... (لیسانس مهندسی برق - قدرت)	وزارت نیرو ـ شرکت توزیع نیروی برق خوزستان
امیریان ، حسین (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق زنجان
بخشنده ، مهرداد (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای مازندران
بهاری وند چگینی ، (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق قزوین
بهشتی ، محمد حسن (لیسانس مهندسی برق رشته قدرت)	دفتر استانداردهای معاونت تحقیقات وفناوری سازمان توانیر
ثقفی اصفهانی، مهدی (فوق لیسانس مهندسی برق رشته قدرت)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق اصفهان
ثقه الاسلام ، سید احمد (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای فارس
جلالی ، مرتضی (فوق لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای تهران
جوادی ، عبدا... (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق زنجان

جواهری ، احسان (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق مشهد
حسن پور ، رضا (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق مازندران
حسینیان ، سید حسین (دکتری برق)	شرکت مهندسین مشاور نیرو
خاتمی ، عبدا... (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای خراسان
خلجی ، علی (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای زنجان
خلیل پور ، آرام (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق گیلان
درودی ، عارف (دکتری برق)	شرکت مهندسین مشاور نیرو
رحمانپوری ، محمد (لیسانس مهندسی برق رشته قدرت)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق لرستان
رستم میری ، فریدون (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق غرب مازندران

سعادت نیا ، خانم (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو- شرکت برق منطقه ای کرمان
سیروس پور ، علی (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق همدان
صباوند منفرد ، حسن (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای آذربایجان
عربی ، عبدالرضا (لیسانس مهندسی برق)	وزرات نیرو- شرکت توزیع نیروی برق کهکیلویه و بویراحمد
غلامعلی پور ، علی اکبر (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای تهران
کرمی ، خانم (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای زنجان
لطفی ، شاپور (فوق لیسانس مدیریت صنعتی)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای آذربایجان
محمدیان ، حسین (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای مازندران
نجفی نیا ، مرتضی (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق مشهد

نظری ، محمود (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای غرب
نظریان ، پیمان (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای زنجان
هاشمیان ، مجید (فوق لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت برق منطقه ای خراسان
همایونمهر ، عقیل (فوق لیسانس مهندسی برق)	دفتر استانداردهای معاونت تحقیقات وفناوری سازمان توانیر
یاری ، مجید (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق ایلام
یاری ، محمد مهدی (لیسانس مهندسی برق)	وزارت نیرو - شرکت توزیع نیروی برق همدان .

دبیر

اعرابیان - آقای مهندس یزدان لیسانس مهندس برق	شرکت مهندسین مشاور نیرو

یادآوری : با توجه به تعداد ۱۱ جلسه برگزار شده برای استاندارد کیفیت برق افراد فوق الذکر در تمامی و یا در تعداد بیش از ۳ جلسه حضور داشته اند.

فهرست مندرجات ..... صفحه

پیش گفتار ..... ب

مقدمه ..... پ

۱ هدف ۱

۲ دامنه کاربرد ۱

۳ مراجع الزامی ۱

٤ اصلاحات و تعاریف ۲

٥ نمادها و یکاها ۳

٦ ویژگی ها ٤

پیوست الف – شناخت و بررسی هارمونیک ها (اطلاعاتی) ۲۸

پیوست ب – مقررات برخی از کشورها در رابطه با پذیرش مشترکین برق که تولید هارمونیک می نمایند (اطلاعاتی ۹۹

پیوست ج – مقررات برخی از کشورها در رابطه با مقدار مجاز هارمونیک ها در شبکه های برق با ولتاژ مختلف (اطلاعاتی) ۱۰۷

پیوست د – مقادیر اندازه گیری شده هارمونیک ها در شبکه های برق برخی کشورها ۱۱۰

پیوست هـ – روابط ولتاژ جریان و توان در شرایط هارمونیکی (اطلاعاتی) ۱۱٤

پیوست و – واژگان ۱۲۲

پیش گفتار :

استاندارد مشخصات وخصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) قسمت دوم - حدود مجاز هارمونیک ها که پیش نویس آن به وسیله وزارت نیرو - شرکت توانیر - معاونت پژوهشی - دفتر استانداردها و در کمیسیون مربوط تهیه و تدوین شده و مورد تصویب مقام محترم وزارت طی بخشنامه شماره ۷۰۱۰/۳۰/۱۰۰ مورخ ۸۱/۲/۱۰ قرار گرفته است ، اینک به استناد بند «ز» ماده یک قانون تاسیس وزارت نیرو مصوب ۵۳/۱۱/۲۸ و ماده ۷ قانون سازمان برق ایران مصوبه ۱۹/٤/۱۳٤٦ و ماده ۳ آئین نامه اجرائی بند «ج» ماده ۱۲۲ قانون برنامه سوم توصعه اقتصادی و اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران به عنوان استاندارد صنعت برق ایران منتشر می شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت های ملی و جهانی در زمینه صنایع ، علوم و خدمات ، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هرگونه پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود در هنگام تجدیدنظر درکمیسیون فنی مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین برای مراجعه به استانداردهای ایران باید همواره از آخرین تجدیدنظر آنها استفاده کرد.

در تهیه وتدوین این استاندارد سعی شده است که ضمن توجه به شرایط موجود و نیازهای جامعه، در حد امکان بین این استاندارد و استاندارد ملی کشورهای صنعتی و پیشرفته هماهنگی ایجاد شود.

منابع و مآخذی که برای تهیه این استاندارد به کار رفته به شرح زیر است :

1- IEC 61000-3-2 , Electromagnetic compatability (EMC) , Part 3 , Section 2. Limits for _ harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A Per Phase).

2- IEC61000-2-4 , Electromagnetic Compatibility (EMC) , part 2. Environment – section 4: Compatibility levels in industrial plants for low – frequency conducted disturbances.

3- IEC 61000-2-2 , Electormagnetic Compatability levels for low – frequency conducted disturbances and signalling inpublic low- voltage power supply systems.

4- IEEE 519 , Recommended practices and requirements harmonic control in electric power systems.

5- ANSI/IEEE C57,110,IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents.

6- IEEE IS , Shunt power capacitors.

7-D.E.Rice,"Adjustable–speed driver and power rectifier harmonics, Their effects on power system components," in proceedings of the IEEE, PCIC conference,NO PCIC- 84 – 52.

8- J. Arrillage, D.A.Bardley, " Power system harmonics " , John wiley and sons , Interscience 1985 .

9- R.C. Dugan, M, MaGrangham " Electrical power systems quality " MCGraw – Hill, Newyork, 1996.

10- A. Robert and J. Marquet, " Asesing voltage quality with relation to harmonics , flicker and unbalance ,

Cigre, 36-203 , 1992 .

11- R.D. Henderson and P.J Rose , " Harmonics : The effects on power quality and transformers " .

IEEE Trans. on Industary Application , Vol , 30 , NO . 3, 1994 .

12-Harmonics ,characteristic parameters, method of study , estimates of existing values in the network , By

working Group 36-05 , Electra NO. 77, 1989.

13- D.Xia and G.T. Heydt, " Harmonic power flow studies , part I – Formulation and solution, IEEE Trans,

on power appatatus and systems, June 1982, PP 1257 – 1265.

١٤- استاندارد ملی ایران ٥ : سال ١٢٧٨ (تجدید نظر دوم) استاندارد ملی ایـران - مقـررات مربـوط بـه ساختار و شیوه کارش

مقدمه :

استاندارد مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) از قسمت های مختلفی به شرح زیر تشکیل شده است که می بایستی همراه مراجع الزامی آنها مورد استفاده قرار گیرند.

قسمت اول - کلیات

قسمت دوم - حدود مجاز هارمونیک ها

قسمت سوم - فلش و قطعی ولتاژ

قسمت چهارم - تغییرات ولتاژ و فرکانس

قسمت پنجم - پایداری و پدیده های گذرا

قسمت ششم - زمین کردن

قسمت هفتم - کیفیت برق تحویلی به انواع مشترکین

قسمت هشتم - مشخصات فنی وسایل اندازه گیری و معیار انتخاب آن ها

قسمت نهم - دستورالعمل اندازه گیری کیفیت برق ، بازرسی و اطمینان از کیفیت آن

برای آشنایی بیشتر کاربران این استاندارد علاوه بر قسمتهای فوق گزارش های فنی مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) در قسمتهای دیگری که جنبه اطلاعاتی وآموزشی دارد با عناوین زیر تهیه شده است.

قسمت اول - مفاهیم و تعاریف کیفیت برق

قسمت دوم - منابع و مراجع استانداردهای کیفیت برق

قسمت سوم - تجزیه و تحلیل نتایج وضعیت موجود کیفیت برق

در این استاندارد اصول اساسی مورد نیاز جهت اتصال بارهای بزرگ اعوجاجی به شبکه و همچنین میزان مجاز هارمونیک ها در شبکه های قدرت آمده است . به عبارت دیگر هدف اصلی این استاندارد تهیه دستورالعملی جهت اتصال بارها و نیز تعیین مقادیر مجاز هارمونیک ها بوده که بتوان با استفاده از آن با ایجاد بستری مناسب، کیفیت برق کلیه مشترکین را از نظر هارمونیک ها بررسی نمود. از سوی دیگر با توجه به اینکه هارمونیک جریان تزریق شده به شبکه ناشی از بارهای غیرخطی و دیگر منابع تولید هارمونیک در بخش های مختلف یک شبکه قدرت می توانند با یکدیگر جمع شوند، لذا تهیهٔ محدودهٔ مقادیر واقعی هارمونیک ولتاژ(سطوح سازگاری هارمونیک ها) در یک شبکه نیز از اهداف این استاندارد خواهد بود. محدودهٔ مجاز بنحوی است که این هارمونیک ها تأثیرات نامطلوبی بر تجهیزات مورد استفاده در شبکه ایجاد ننمایند. چون هارمونیک ولتاژ، ناشی از هارمونیک جریان و امپدانس سیستم در آن فرکانس می باشد لذا محدودیت هایی نیز بر مقدار جریان هارمونیکی اعمال می گردد.

برخی تجهیزات الکتریکی که بخصوص از فن آوری مدرن در ساخت آن ها استفاده شده است باعث اختلال در سیستم قدرت شده و کیفیت برق رسانی را پائین می آورند، بصورتی که باعث تغییر شرایط کار دیگر تجهیزات برقی می گردند. بنابراین ضروری است که شرایط چگونگی اتصال اینگونه تجهیزات که تولید و استفاده از آن ها در حال گسترش است تدوین و مشخص گردد تا شبکه الکتریکی بتواند بطور مناسب و مطمئن برای تجهیزاتی که نسبت به اختلالات حساسیت دارند مورد استفاده قرار گیرد.

در مورد پدیده اختلالات یا اثرات هارمونیک ها بایستی بیان نمود که بیشترین تأثیر ناشی از هارمونیک در ولتاژ بوده ولی هارمونیک جریان نیز ممکن است باعث ایجاد اثرات مستقیمی مانند تداخلات تلفنی گردد. اثر هارمونیک های ولتاژ و جریان را ممکن است در فاصله دوری از منبع تولید هارمونیک نیز مشاهد نمود.

دررابطه با حل مسائل هارمونیکی بایستی مسائل فنی واقتصادی ناشی از عوامل زیر را در نظر گرفت:

- شبکه های قدرت بدون استثنا دارای هارمونیک های ولتاژ چه با فرکانس مشخص و یا بصورت طیف پیوسته ای از فرکانس می باشند که فرکانس ، دامنه و زاویه فازشان بدون داشتن روند مشخص تغییر می کند.

- کلیه تجهیزات بایستی تحمل هارمونیک های ولتاژ تاحد مشخص را که بصورت منطقی تعیین می گردند داشته باشند و در این شرایط بتوانند کار معمولی خود را انجام دهند.
- امکان اتصال تجهیزاتی که تولید هارمونیک می کنند با قبول شرایطی وجود داشته باشد.

البته این شرایط تنها مربوط به استفاده کنندگان از تجهیزات نمی باشد و بایستی سازندگان تجهیزات را نیز در بر گیرد بصورتی که سازنده ، تجهیزاتی را که تولید هارمونیک بیش از حد مجاز کرده و باعث اختلال در سیستم می گردند تولید ننماید.

باتوجه به شرایط پیچیده بالا، مسئله محدود کردن هارمونیک ها وقتی امکان پذیر است که شرایط و مقررات بسیار ساده و هماهنگی وجود داشته باشد که بتوان به صورت مطلوب از آن استفاده نمود.

برای تعیین حد مصونیت با مقدار مجاز هارمونیک ها در سیستم بایستی احتمالی بودن پدیده های تعریف شده در بالا را مدنظر داشت . در یک دستگاه ، حد اختلال و همچنین حد مصونیت نسبت به زمان و نسبت به یکدیگر تغییر می کند و معمولاً شرایط واقعی عملکرد مانند شرایط زمان آزمون نخواهد بود.

حد سازگاری یا مقدار قابل پذیرش هارمونیک ها که بصورت تقریباً قراردادی تعیین می گردد و از آن بمنظور ایجاد امکان کار مشترک تجهیزات تولید کننده هارمونیک ها با تجهیزات آسیب پذیر در مقابل هارمونیک ها در سیستم استفاده می گردد باید شناخته شود.

منظور از حد قابل پذیرش برای هر هارمونیک مقداری از هارمونیک است که احتمال تولید مقدار بیشتراز آن بسیار کم است و تنها در حدود ۵ درصد مواقع احتمال دارد که مقدار هارمونیک تولید شده بیشتر از مقدار تعیین شده توسط حد قابل پذیرش باشد. در ضمن حد قابل پذیرش بایستی طوری تعیین گردد که قسمت اعظم یا تقریباً کلیه تجهیزات با احتمال زیاد بتوانند آن را تحمل کرده و کارعادی خود را انجام دهند.

براساس حد قابل پذیرش مشخص شده می توان آزمون حد مصونیت رابرای تجهیزات مختلف انجام داد.

حد مصونیت با در نظر گرفتن ضریب اطمینان لازم تعیین می شود و مقدار آن عموماً بیشتر از حد قابل پذیرش یا در موارد کم اهمیت حداقل معادل حد قابل پذیرش است.

برای تعیین حد مجاز تولید هارمونیک های یک تجهیز بایستی حد قابل پذیرش سیستم و اینکه تجهیزات دیگری هم بصورت همزمان کار می کنند در نظر گرفته شود.

" مشخصات وخصوصیات انرژی الکتریکی «کیفیت برق»
حدود مجاز هارمونیک ها "

۱ هدف

هدف از تدوین استاندارد، ارائه حدود مجاز هارمونیک در سطوح مختلف ولتاژ می باشد .

۲ دامنه کاربرد

این استاندارد بررسی مقادیر مجاز هارمونیک ها، سطوح سازگاری، مصونیت تجهیزات و روش های محاسبه و انتقال هارمونیک در یک شبکهٔ الکتریکی را در بر می گیرد و به کمک آن می توان کیفیت برق دریک شبکهٔ الکتریکی را از دیدگاه هارمونیک ها استاندارد نمود.

۳ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد به آنها ارجاع داده شده است . بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد محسوب می شود. در مورد مراجع دارای تاریخ چاپ و/ یا تجدید نظر ، اصلاحیه ها و تجدید نظرهای بعدی این مدارک مورد نظر نیست. معهذا بهتر است کاربران ذینفع این استاندارد، امکان کاربرد آخرین اصلاحیه ها و تجدیدنظرهای مدارک الزامی زیر را مورد بررسی قرار دهند. در مورد مراجع بدون تاریخ چاپ و/ یا تجدیدنظر ، آخرین چاپ و / یا تجدیدنظر آن مدارک الزامی ارجاع داده شده مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

1- IEC 61000-3-2 , Electromagnetic compatability (EMC) , Part 3 , Section 2. Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A Per Phase).

2- IEC61000-2-4 ,Electromagnetic Compatibility (EMC) , part 2. Environment – section 4: Compatibility levels in industrial plants for low – frequency conducted disturbances.

3- IEC 61000-2-2 , Electormagnetic Compatability levels for low – frequency conducted disturbances and signalling inpublic low- voltage power supply systems.

٤ اصطلاحات وتعاریف

دراین استاندارد اصطلاحات و/ یا واژه ها با تعاریف زیر به کار می روند:

- **سیستم ولتاژ کم (LV)**[1]: شبکه فشار ضعیف توزیع مصارف عمومی (٤٠٠ ولت)
- **سیستم ولتاژ متوسط(MV)**[2]: شبکه فشار متوسط (٢٠ و ٣٣ کیلوولت)
- **سیستم ولتاژ زیاد (HV)**[3]: شبکه فشار قوی فوق توزیع وشبکه فشار قوی انتقال (٦٣و١٣٢و ٢٣٠ کیلوولت)
- **سیستم ولتاژ بسیار زیاد (EHV)**[4]: شبکه فوق فشار قوی انتقال (٤٠٠ کیلوولت)
- **هارمونیک** : مؤلفهٔ فرکانسی با مرتبه بزرگتر از یک در سری فوریه یک کمیت دوره ای
- **انواع تجهیزات در سیستم قدرت** : این تجهیزات شامل دو رده می باشند:
  - وسائلی که تولید هارمونیک های ولتاژ و یا جریان می نمایند.
  - وسائلی که دراثر وجود هارمونیک ها عملکرد و یا کارآئی آنها تغییر می کند.

البته برخی وسایل وجود دارند که می توانند همزمان در هر دوگروه باشند.

- **سازگاری هارمونیکی**: به توانائی تجهیزات یا سیستم با عملکرد مطلوب بدون تولید هارمونیک های غیر قابل تحمل برای بقیه تجهیزات و سیستم اطلاق می گردد.
- **حد سازگاری یا قابل پذیرش هارمونیکی**: میزان مشخص شده ای از هارمونیک ها در سیستم بنحوی که تنها در مواقع بسیار کمی، مقدار هارمونیک ها در سیستم می تواند از آن بیشتر گردد. چنانچه هارمونیک ها دراین حد باشند برای اکثر تجهیزات سازگاری هارمونیکی وجود خواهد داشت.
- **هارمونیک غیر مشخصه**: هارمونیک هایی هستند که تجهیزات تولید کننده هارمونیک بخصوص یکسو کننده ها در طول کار عادی خود تولید نمی نمایند ولی ممکن است در اثر عدم تقارن یا تعادل سیستم برق ویا بعلت اشکالات یکسو کننده ها ایجاد گردند.

1- Low Voltage
2- Medium Voltage
3- High Voltage
4- Extra High Voltage

- **مصونیت هارمونیکی:** توانائی عملکرد مناسب ، تجهیزات یا سیستم در صورت وجود هارمونیکها.
- **حد مصونیت:** حداکثر مقدار هارمونیک مشخص شده ای که تجهیزات یا سیستم با وجود آن می تواند کار عادی خود را انجام دهد.
- **حساسیت ویا آسیب پذیری هارمونیکی:** عملکرد نامطلوب تجهیزات یا سیستم در صورت وجود هارمونیک ها.
- **حد اختلال یا مقدار تولید هارمونیک ها:** مقدار هارمونیک های تولید شده تجهیزات یا سیستم که از طریقی مشخص اندازه گیری می گردد.
- **حد قابل قبول یا حد مجاز تولید هارمونیک ها:** حداکثر مقدار تعیین شده برای هر یک از انواع هارمونیک ها برای یک دستگاه یا تجهیزی که تولید هارمونیک می نماید.
- **نقطه اتصال مشترک (PCC)**[1]: نقطه اتصال مشترک با سایر مصرف کنندگان نقطه ای است که مصرف کنندگان جدید درخواست انشعاب بکنند.
- **هارمونیک میانی** : مؤلفه فرکانسی یک کمیت دوره ای که فرکانس آن ضریب صحیحی از فرکانس مؤلفه اصلی موج نمی باشد.

۵ نمادها و یکاها

U_{ho} = ولتاژ هارمونیکی شینه بدون حضور کلیه بارها.

K_{hj} = ضریب وابسته

S_{rj} = توان نامی تجهیز مورد نظر

S_{sc} = سطح اتصال کوتاه در نقطهٔ اتصال مشترک

U_{hr} = ولتاژ هارمونیک مرتبهٔ h اُم در نقطهٔ r

a = ضریب ثابت

U_{hi} = ولتاژ هارمونیک مرتبهٔ h اُم حاصل از منبع iاُم

1- Point of Common Coupling

G_{hs} = مقدار ماکزیمم هارمونیک h اُم که توسط بارهای غیر خطی تغذیه شده از شینه تولید می گردد.

C_{hs} = حد قابل پذیرش هارمونیک h اُم شینه مورد نظر.

G_{hu} = مقدار ماکزیمم کل هارمونیک h اُم در شینه بالادست و تغذیه کنندهٔ شینه مورد نظر.

C_{hu} = حد قابل پذیرش هارمونیک h اُم شینه بالادست .

T_{hus}= ضریب انتقال هارمونیک h اُم از شینه بالادست به شینه مورد نظر.

T_{huu}= ضریب انتقال هارمونیک h اُم از شینه مورد نظر به شینه بالادست .

S_i = قدرت مصرفی مشترک.

S_t = قدرت کل خروجی ممکن شینه یا مجموعه قدرتهای مشترکین مختلف که از شینه تغذیه می شوند.

E_{hi} = حد قابل قبول تولید هارمونیک ولتاژ h اُم مشترک i اُم.

Z_n = امپدانس ورودی در شبکه در فرکانسهای مختلف و در محل اتصال مشترک.

T_{us}= بازده زمانی بسیار کوتاه مدت .

T_{sh}= بازده زمانی کوتاه مدت .

T_L= بازده زمانی بلند مدت .

T_D= بازده زمانی یک روزه .

T_{Wk}= بازده زمانی یک هفته ای .

N = تعداد دفعاتی که در یک بازده زمانی ۳ ثانیه ای ، FPT از یک موج گرفته می شود.

$U_{h,k}$= ولتاژ هارمونیک مرتبهٔ h در اندازه گیری k اُم

U_{hvs}= مقدار ماکزیمم ولتاژ هارمونیک در بازده زمانی بسیار کوتاه مدت

λ = ضریب قدرت مدار

٦ ویژگیها

٦-١ مفاهیم اساسی، اصول وشرایط عمومی محدود کردن هارمونیک ها

٦-١-١ *حدود قابل پذیرش*

حدود قابل پذیرش مقادیر پایه ای هستند که قبل از تعیین حدود مصونیت و همچنین مقادیر مجاز تولید هارمونیک ها بایستی مشخص گردند. لازم به ذکراست که حد قابل پذیرش برای سیستم های ولتاژ کم (LV) [1] وولتاژ زیاد (LV)[2] دارای معانی یکسانی نیستند . درسیتم ولتاژ متوسط (MV)[3] و ولتاژ زیاد حدود قابل پذیرش بصورت مستقیم با حدود مصونیت مرتبط نبوده و معمولاً برای هماهنگی بین قسمتهای مختلف سیستم مشخص می گردند.

هدف نهایی در سیستم با ولتاژ کم نگهداشتن مقدار هارمونیک ها درحدی پائین تراز حد قابل پذیرش است. حد قابل پذیرش در سیستم ولتاژ متوسط وزیاد بسته به شرایط سیستم قدرت و نحوه آن می تواند تغییر نماید. جهت مشخص کردن این تمایز بجای حد قابل پذیرش از عبارت " حدقابل پذیرش مناسب" استفاده می گردد. حدود قابل پذیرش در سیستم ولتاژ کم و حدود قابل پذیرش مناسب در سیستم ولتاژ متوسط توسط کمیته کاری استاندارد بین المللی IEC شماره ٢-٢-٦١٠٠٠ تعیین شده است که این مقادیر برای هر دو سیستم LV و MV یکسان می باشد و درجدول ١ ارائه شده است. برای سیستم ولتاژ زیاد مقادیرحد قابل پذیرش مناسب از سوی کمیته کاری استاندارد IEC مشخص نشده است.

مقادیر مربوطه به سطوح سازگاری هارمونیک ها، برای هماهنگی بین میزان انتشار و آسیب پذیری یک دستگاه الکتریکی که بخشی از یک شبکه الکتریکی به شمار می رود تهیه شده است. سطوح سازگاری معمولاً براساس سطح احتمال ٩٥ درصد هارمونیک در کل سیستم و با درنظر گرفتن تغییرات زمانی ومکانی آن انتخاب می گردد. درحقیقت با توجه به اینکه شرکت های برق قادر به

1- Low Voltage
2- HighVoltage
3- Medium Voltage
4- Total Harmonical Distrosion

کنترل کلیه نقاط شبکه در تمامی مواقع نمی باشند ارزیابی سطوح سازگاری انجام گرفته و نیـازی بـه ارزیابی هارمونیک در کلیهٔ مکان ها نمی باشد.

درضمن حدود قابل پذیرش برای اعوجاج هارمونیکی کل (THD) [1] در سیستم ولتاژ کـم و متوسـط را هشت درصد و در سیستم ولتاژ زیاد سه درصد تعیین کرده اند

مقادیر حد قابل پذیرش در هرکشوری ممکن است با مقادیر فوق تفاوت نماید. این تفاوت بستگی به سیستم قدرت، طرح سیستم ونوع تجهیزات ، اندازه وحد مصونیت تجهیزات در مقابل هارمونیک هـا و ارزیابی و بررسی های احتمال تداخل ومزاحمت هارمونیک ها خواهـد داشـت. بـه همیـن دلیـل و باتوجه به نیازها وخواسته های مورد نظر صنعت برق ایران از دیدگاه کیفیت برق استانداردی تدویـن گردید تا معیارهای موردنظر صنعت برق ووزارت نیرو در آن گنجانده شود. دراین اسـتاندارد مقـادیر مجاز هارمونیک های ولتاژ و جریان در سطوح مختلف ولتاژ ارائه شده است کـه مبنـای اصلـی ایـن استاندارد نیز می باشد.

جدول ۱- حدسازگاری (قابل پذیرش) هارمونیک های ولتاژ در سیستم ولتاژ کم، متوسط (به درص نسبت ولتاژ نامی در فرکانس اصلی)

هارمونیک های فرد که مضرب ۳ نمی باشند		هارمونیک های فرد که مضرب ۳ می باشند		هارمونیک های زوج	
مرتبه(h)	ولتاژ کم ومتوسط	مرتبه	ولتاژ کم ومتوسط	مرتبه(h)	ولتاژ کم ومتوسط
۵	٦	۳	۵	۲	۲
۷	۵	۹	۱/۵	٤	۱
۱۱	۳/۵	۱۵	۰/۳	٦	۰/۵
۱۳	۳	۲۱	۰/۲	۸	۰/۵
۱۷	۲	>۲۱	۰/۲	۱۰	۰/۵
۱۹	۱/۵			۱۲	۰/۲
۲۳	۱/۵			>۱۲	۰/۲
۲۵	۱/۵				
>۲۵	۰/۲+۱/۳۲۵ / h				
		اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ برای سیستم ولتاژ کم و متوسط :۸ درصد			

٦-١-٢ سطوح طراحی

این مقادیر را می توان درمرحلهٔ طراحی سیستم و نیز ارزیابی تأثیر بارهای هارمونیکی مورد استفاده قرار داد. سطوح طراحی معمولاً توسط شرکت های برق وبرای تمامی سطوح ولتاژ در آن سیستم مشخص می گردد وازآن می توان بعنوان هدف داخلی شرکت برق یاد کرد. سطوح طراحی برابر یا کمتراز سطوح سازگاری می باشند. این مقادیر بستگی به شرایط و ساختار شبکه دارد. درجدول ٢ مقادیر نمونه ای آن برای سطوح ولتاژ EHV,HV,MV آورده داده شده است.

جدول ٢- مقادیر سطوح طراحی هارمونیک های ولتاژ در سیستم ولتاژ کم، متوسط و زیاد (به درصد نسبت ولتاژ نامی درفرکانس اصلی)

هارمونیک های فردکه مضرب ٣ نمی باشند			هارمونیک های فرد که مضرب ٣ می باشند			هارمونیک های زوج		
مرتبه (h)	ولتاژکم ومتوسط	ولتاژ زیاد	مرتبه	ولتاژکم ومتوسط	ولتاژ زیا	مرتبه (h)	ولتاژکم ومتوسط	ولتاژ زیا
٥	٥	٢	٣	٤	٢	٢	١/٦	١/٥
٧	٤	٢	٩	١/٢	١	٤	١	١
١١	٣	١/٥	١٥	٠/٣	٠/٣	٦	٠/٥	٠/٥
١٣	٢/٥	١/٥	٢١	٠/٢	٠/٢	٨	٠/٤	٠/٤
١٧	١/٦	١	>٢١	٠/٢	٠/٢	١٠	٠/٤	٠/٤
١٩	١/٢	١				١٢	٠/٢	٠/٢
٢٣	١/٢	٠/٧				>١٢	٠/٢	٠/٢
٢٥	١/٢	٠/٧	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ برای سیستم ولتاژ کم ومتوسط: ٦/٥ درصد					
>٢٥	٠/٢+٠/٥٢٥/h	٠/٢+٠/٥٢٥/h	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ برای سیستم ولتاژ زیاد:٣ درصد					

٦-١-٣ تأثیر تجمعی هارمونیک ها

هنگام مطالعه هارمونیک ها لازم است که مقدار واقعی هارمونیک جریان وولتاژ در هرنقطه از شبکه ناشی از بارهای مختلف محاسبه گردد. معمولاً دو روش در این محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد.

٦-١-٣-١ روش اول

این روش ساده می باشد و از رابطهٔ زیر برای محاسبه هارمونیک ولتاژ استفاده می شود:

$$U_h = U_{ho} + \sum_j K_{hj} U_{hj} \qquad (۱)$$

که درآن U_{ho} ولتاژ هارمونیکی شینه بدون حضور کلیه بارها می باشد. مقدار ضریب K_{hj} بستگی به عوامل زیر دارد:

- نوع تجهیز مورد نظر
- مرتبه هارمونیک
- نسبت بین توان نامی تجهیز موردنظر (S_{rj}) وسطح اتصال کوتاه در نقطه اتصال مشترک S_{sc}.

مقادیر K_{hj} برای تمامی تجهیزات بصورت عمومی درجدول ۳ و برای یکسوکنندهٔ غیرکنترل شده همراه با خازن درجدول ٤ آمده است.

جدول ۳- ضریب K_{hj} برای کلیه تجهیزات

S_{rj} / S_{sc}	مرتبهٔ هارمونیک (h)						
	۳	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹
≤ ۰/۰۰۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	—	—
۰/۰۰۲	۰/٤	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	—
۰/۰۰۵	۰/٦	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۰۱۰	۰/۷	۰/۷	۰/۵	۰/٤	۰/٤	۰/۳	۰/۱
۰/۰۲۰	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/٦	۰/٦	۰/۵	۰/۵
≥ ۰/۰۵۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۳- ضریب K_{hj} برای یکسوکننده غیرکنترل شده همراه با خازن

S_{rj} / S_{sc}	مرتبهٔ هارمونیک (h)						
	۳	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹
<۰/۰۰۱	۱	۰/۹	۰/٦	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۰۰۲	۱	۰/۹	۰/٦	۰/٤	۰/۳	۰/۲	۰/۲
۰/۰۰۵	۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/٤	۰/۳	۰/۳
۰/۰۱۰	۱	۱	۰/۸	۰/۷	۰/٦	۰/٤	۰/٤
۰/۰۲۰	۱	۱	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/٦	۰/٦
>۰/۰۵۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

۶-۱-۳-۲ روش دوم

هارمونیک ولتاژ در هرنقطه از سیستم ، حاصل از جمع برداری هارمونیک های ولتاژ ناشی از منابع مختلف آن نوع هارمونیک خواهد بود . بررسی ومطالعه با جمع آثار هارمونیک ها رابطه زیر را بدست داده است:

$$U_{hr} = \left[(U_{h1})^a + (U_{h2})^a + (U_{h3})^a + ...\right]^{1/a} = (\sum U_{hi}^a)^{\frac{1}{a}} \qquad (۲)$$

که U_{hr} ولتاژ هارمونیک مربته h ام در نقطه a , r ضریب ثابت و Uh_i ولتاژ هارمونیک hام که از منبع I ام حاصل می گردد می باشد.

مقدار ضریب ثابت a بستگی به سه عامل زیر دارد:

- حد احتمال کمتربودن هارمونیک های ولتاژ شبکه از یک مقدار مشخص .
- محدوده تغییرات احتمالی وتصادفی دامنه هارمونیک های ولتاژ هر منبع.
- محدوده تغییرات احتمالی وتصادفی زاویه (فاز) هارمونیک های ولتاژ هر منبع .

بدیهی است که هارمونیک های فرد با مرتبه کم دارای مشخصه های زیر هستند.

- این هارمونیک ها دراغلب نقاط شبکه وجود داشته ومقدار آن ها قابل ملاحظه است.
- زاویه (فاز) هارمونیک های ولتاژ، محدوده تغییرات نسبتاً کوچکی داشته واین موضوع درمورد هارمونیک های با مرتبه بزرگتر حالت عکس دارد.

با درنظر گرفتن عدد۹۵ درصد برای حد احتمال کمتربودن هارمونیک های ولتاژ سیستم از یک مقدار مشخص، مقادیر زیر برای ضریب ثابت a حاصل می گردد:

- برای هارمونیک های کوچکتراز پنجم: a =۱ (این مقادیر برای هارمونیک های ولتاژ با دامنهٔ ثابت که ممکن است زاویه فازشان بصورت احتمالی وتصادفی بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر کند معتبراست).
- برای هارمونیک های مرتبه پنجم تا دهم:a =۱/٤ (این مقادیر برای هارمونیک های ولتاژی که ممکن است دامنه آنها بطور احتمالی وتصادفی بین نصف مقدار ماکزیمم و مقدار ماکزیمم تغییر نماید وزاویه فازشان بطوراحتمالی و تصادفی بین صفرو۲۷۰ درجه تغییر نماید معتبراست).

- برای هارمونیک های با مرتبه بیشتراز ده : a =۲ (این مقادیر برای هارمونیک های ولتاژی که ممکن است دامنه ولتاژ آنها بطور احتمالی وتصادفی بین مقدار صفر وماکزیمم تغییر نماید وزاویه فازشان بطور تصادفی بین صفرو ۳٦۰ درجه تغییر نماید، قابل قبول است).

توجه :وقتی که هارمونیک ها هم فاز هستند برای هارمونیک های مرتبه پنجم به بالا نیز باید از a=۱ استفاده نمود.

٦-۱-٤ حدقابل قبول تولید هارمونیک ها دریک شینه

یکی از کاربردهای اولیه رابطه تعیین مقدار منتجه هارمونیک های ولتاژ یک شینه مشخص است که به آن بارهای هارمونیک زا متصل می گردند. هارمونیک ولتاژ واقعی روی هر شینه از جمع برداری هارمونیک های ولتاژی که از طریق شینه بالادست به این شینه واردشده واز هارمونیک های ولتاژ بارهای غیرخطی متصل به آن بدست می آید. این هارمونیک ولتاژ نباید با احتمال ۹۵ درصد بیش از حد قابل پذیرش شینه باشد.

بنابراین می توان نوشت:

$$\left[G_{hu}{}^{a} + (T_{hsu}G_{hs})^{a}\right]^{1/a} = C_{hu} \qquad (۳)$$

$$\left[G_{hs}{}^{a} + (T_{hus}G_{hu})^{a}\right]^{1/a} = C_{hs}$$

که مقادیر a برای هارمونیک های مرتبه سوم، پنجم و هفتم برابر یک و برای هارمونیک های مرتبه ۱۱ و۱۳ برابر ۱/٤ و برای هارمونیک های بزرگتر از ۱۳ برابر ۲ می باشد.

حدقابل قبول تولید هارمونیک ها برای تجهیزات متصل به شینه مورد نظر می تواند با داشتن ضریب انتقال تعیین گردد. این ضریب بستگی به عوامل زیادی مخصوصا آرایش شبکه، نوع بارها، وجود خازن ها وغیره دارد. خوشبختانه روش های مناسبی جهت محاسبه ضریب انتقال برای سیستم های پیچیده نیز وجود دارد. یک روش ساده اینست که از نقش بارهای تغذیه شده توسط شینه، در ایجاد تداخل در شینه بالادست صرفنظر گردد، یعنی Thsu=o . با این فرض قسمت اول معادله بصورت زیر در می آید:

$$\left[G_{hu}{}^{a}\right]^{1/a} = C_{hu} \quad \text{و} \quad G_{hu} = C_{hu} \qquad (٤)$$

ودرنتیجه:

$$G_{hs} = \left[C_{hs}{}^{a} - (T_{hus} C_{hu})^{a}\right]^{1/a} \qquad (٥)$$

با داشتن حدقابل پذیرش شینه بالادست و شینه موردنظر و ضریب انتقال T_{hus} می توان با استفاده از رابطه حدقابل قبول تولید هارمونیک ها در بارهای متصل به شینه را بدست آورد.

بعنوان اولین تقریب ، ضریب انتقال از شینه بالادست به شینه مورنظر، اغلب برابر ۱ درنظر گرفته می شود. این ضریب درعمل بخاطر وجود عواملی در شبکه قدرت ممکن است کمتراز ۱ بوده(حدود ۰/٦٦) یا ممکن است بخاطر تشدید بیشتراز ۱ باشد(بین ۱ تا۳) . شرکت های برق بایستی مقادیر ضرایب انتقال را مشخص نمایند.

٦-۱-۵ حدقابل قبول تولید هارمونیک ها برای هرمشترک

به هر مشترک تنها بخشی از حدقابل قبول تولید هارمونیک در شینه می تواند اختصاص داده شود. یک پیشنهاد منطقی می تواند این باشد که با توجه به S_i و S_t حدقابل قبول تولید هارمونیک هر مشترک تعیین گردد.

با استفاده از رابطه ۲ خواهیم داشت:

$$(E_{h1}{}^{a} + E_{h2}{}^{a} + E_{h3}{}^{a} + \ldots)^{1/a} = G_{hs} \qquad (٦)$$

یا:

$$E_{h1}{}^{a} + E_{h2}{}^{a} + \ldots = G_{hs}{}^{a} \qquad (٧)$$

اگر حدقابل قبول تولید هارمونیک هرمشترک متناسب با قدرت مصرفی آن باشد، رابطه زیر برای حد قابل قبول تولید ولتاژ هارمونیک h ام هرمشترک iحاصل می گردد:

$$E_{hi}{}^{a} + G_{hs}{}^{a} \times (Si/St) \quad \text{ویا} \quad E_{hi} = G_{hs}(Si/St)^{1/a} \qquad (٨)$$

رابطه فوق براین فرض استوار است که حداقل مقدار S_t برابر مجموع مقادیر S_i ها باشد وهمچنین مقدار a مانند گذشته برای هارمونیک های ۳و۵و۷ برابر یک و برای هارمونیک های ۱۱و۱۳ برابر ۱/٤ و برای هارمونیک های بزرگتر از ۱۳ برابر ۲ می باشد.

مقدار حد قابل قبول هارمونیک های جریان هر مشترک از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_{hi} = E_{hi} / Z_i \qquad (۹)$$

روابط فوق برای مشترکین با بارکم ممکن است محدودیت های زیادی را ایجاد کند. جهت احتراز از مسئله فوق، پیشنهاد شده است که چنانکه حد قابل قبول تولید هارمونیک ها از روابط فوق کمتر از ۰/۱ درصد بدست آید مقدار ۰/۱ درصد بعنوان حد قابل قبول تولید هارمونیک ها برای مشترک انتخاب شود.

٦-۱-٦ حقوق مشترکین

از عوامل مهمی که درتعیین استاندارد کیفیت برق نقش اساسی دارد، حقوق مشترکین تحت پوشش این استاندارد است. اصولاً با توجه به تعاریف کیفیت برق ونیز تعاریف بکار گرفته شده درخصوص هارمونیک ها، مشترکین برق در هر رده ای از نقطه نظر مصرف به حقوق مشخص و اولیه ای آشنا می شوند که می تواند به هر تقدیر بر تعیین استاندارد تأثیر بسزایی را داشته باشد. به عنوان مثال اعمال محدودیت هارمونیکی بصورت مقدار جریان های هارمونیکی برای تمامی مشترکین نمی تواند چندان عادلانه باشد زیرا در آن، سهم هر مشترک از میزان کل بار درنظر گرفته نمی شودو برای مشترکین کم مصرف این امکان را بوجود می آورد که درصد بالایی از هارمونیک ها(نسبت به کل مصرف آن مشترک) را به سیستم اعمال نمایند، درحالی که یک مشترک پر مصرف نمی تواند از این امکان بهره مند شود. بنابراین از دیدگاه مشترکین مختلف این نوع اعمال محدودیت ناعادلانه می باشد. از سوی دیگر این امکان وجود دارد که محدودیت ها به صورت مقدار هارمونیک ولتاژ بیان شود دراین حالت نیز معیار وضع شده می تواند غیر منصفانه باشد، زیرا مشترکینی که به شینه قوی (امپدانس کم) متصل هستند می توانند جریان هارمونیکی بیشتری را نسبت به مشترکینی که به یک شینه ضعیف (امپدانس بالا) وصل هستند تولید نمایند. درنتیجه بعضی از مشترکین از حقوق بیشتری

برخوردار خواهند شد. از سوی دیگر استفاده از محدودیت هارمونیک ولتاژ یک عامل محدود کننده غیرمنصفانه برای مشترکین جدید می باشد، چرا که متصل شدن این مشترکین موجب افزایش هارمونیک ولتاژ و در نتیجه تجاوز از حدود تعیین شده می گردد، درحالیکه ممکن است هارمونیک جریانی که این مشترک ایجاد می کند نسبت به مصرف آن زیاد نباشد. این امر موجب استفاده از تجهیزات اضافی جهت کاهش هارمونیک ها می گردد که بالطبع برعهدهٔ مشترک جدید قرار می گیرد که امری ناعادلانه خواهدبود. بنابراین در اعمال استاندارد مناسب لازم است مطالب عنوان شده درقبل ملحوظ شود.

٦-١-٧ عوامل تأثیرگذار بر تعیین محدودیت های هارمونیک

همچنانکه اشاره گردید عوامل متنوعی بر تعیین محدودیت های هارمونیکی تأثیر گذار هستند. به هر حال طبیعت هر مشترک باید کاملاً مدنظر قرار گیرد. بطور کلی در تعیین محدودیت هارمونیکی طبقه بندی مشترکین می تواند عامل مهمی در تعیین محدودیت های هارمونیکی به صورت عادلانه باشد. برای این امر، با توجه به شرایط اشاره شده دو مسئله عمده باید مدنظر قرار بگیرند.

- اطمینان از اینکه تجهیزات مورد استفاده تحت تأثیر هارمونیک ها قرار نمی گیرند.
- مقدار تجمعی هارمونیک ها ناشی از بارهای مختلف در حد قابل قبولی قرار بگیرد.

تحقیقات نشان می دهد که تدوین استاندارد هارمونیک های ناشی از بارهای کوچک مانند لوازم خانگی ، به سهولت امکان پذیر نیست. چرا که بدلیل طبیعت تصادفی استفاده از لوازم خانگی تعیین محدودیت هارمونیکی بسیار مشکل می گردد. در مورد بارهای صنعتی به دلیل مشخص تر بودن ماهیت مشترک و نیز معین بودن ضریب همزمانی مصارف مختلف آن واحد صنعتی، اعمال محدودیت های هارمونیکی راحت تر امکان پذیر است.

٦-١-٨ فلسفهٔ تعیین محدودیت ها

فلسفهٔ تعیین استاندارد محدودیت هارمونیک ها در دو مقولهٔ مختلف قرار می گیرد . این استاندارد باید حدود هارمونیک های جریان هر مشترک و همچنین حداکثر هارمونیک های ولتاژ در هر شینه را

تعیین و توصیه نماید. بااین فلسفه می توان اثرات بارهای تکی و نیز تجمعی بارهای هـارمونیک زا را مدنظر قرار داد.

از سوی دیگر استاندارد باید منافع همگانی ، چه از نقطه نظر مشترک و چه از نقطه نظر شرکت هـای برق را مدنظر قرار دهد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه حـذف کـامل هـارمونیک هـا امکـان پذیـر نیست، لذا در واقع بایستی بین عوامل اقتصادی و نیز کاهش هارمونیک هـا تعـادلی برقـرار نمـود. در استاندارد تهیه شده سعی شده است که با تعیین حدود مشخص برای شاخص های هارمونیکی در هر شینه، اثرات هارمونیک ها در بقیه شینه ها در محدودهٔ قابل قبولی قرار بگیرد. این شاخص ها بنحـوی تعیین شده اند که متناسب با تأثیر هارمونیک ها باشند. از سوی دیگر اندازه گیری شـاخص هـا بـاید براحتی امکان پذیر باشد.

دراین استاندارد پیشنهاد شده است که با توجه به پیچیدگی تولید هارمونیک و اثرات تجمعی بارهـای مختلف، مطالعات کامپیوتری هارمونیکی و نیز اندازه گیری هارمونیک ها در پریودهای زمانی مختلف صورت پذیرد.

از سوی دیگر مطالعات لازم توسط مشترکین بزرگ که عامل تولیـد هـارمونیک مـی باشـند بصـورت تعیین وضعیت داخلی سیستم ونیزتأثیر بر شبکهٔ توزیع انجام پذیرد. این مطالعات بطور کلـی بـاید در رابطه با میزان تولید هارمونیک تجهیزات مختلف و امکان ایجاد تشدید در سیستم انجام شود.

در تعیین حدود مجاز اعوجاج ولتاژ وجریان باید عدم همزمانی بین عوامل ایجاد جریـان هـارمونیکی در نظر گرفته شود. این عدم همزمانی از دو دیدگاه مختلف یکـی اختـلاف زمـانی در تولیـد مقـادیر هارمونیکی هر مشترک و دیگری اختلاف فاز بیـن هـارمونیک هـای هـم مرتبـهٔ تولیـد شـده توسـط تجهیزات مختلف ارائه می گردد.

پیشنهاد دیگر این استاندارد بدین صورت است که اگر میزان جریان هارمونیکی هـر مشـترک در زیـر حدود تعیین شده توسط استاندارد قرار بگیرد، لیکن مقادیر حـدود مجـاز هـارمونیک ولتـاژ رعـایت نگردد، لازم است که با هماهنگی لازم بین مشترکین و شرکتهای برق تمهیدات لازم مـانند اسـتفاده از فیلتر یا جابجایی خازن در شینه های مختلف، شرایط مناسب فراهم آید.

۶-۲ استاندارد مجاز هارمونیک ها در شبکه برق ایران

استاندارد هارمونیک ها در ایران حدود هارمونیک های جریان مجاز هر مشترک و همچنین حداکثر هارمونیک های ولتاژ که در شبکه با ولتاژهای مختلف در نقطه تحویل برق به مشترک می تواند وجود داشته باشد را تعیین و توصیه می نماید. به طور کلی شاخص های هارمونیکی زیر جهت این استاندارد تعیین گردیده اند:

- اعوجاج تکی و کلی ولتاژ
- اعوجاج تکی وکلی جریان

اتکای تنها به حدهای مجاز شاخص های هارمونیکی همواره باعث جلوگیری از مسائل و مشکلات نمی گردد که در نتیجه لازم است در زمان تغییرات شکل سیستم قدرت، بررسی های هارمونیکی تکرار گردد. بطور کلی مشترک بایستی مطالعات لازم در مورد سیستم داخلی برق خود را انجام داده و موارد زیر را تأیید نماید:

- خازن های اصلاح ضریب قدرت و یا فیلترهای هارمونیکی بیش از حد تحمل خود تحت فشارهای ناشی از هارمونیک ها نمی باشند.
- رزونانس یا تشدید سری یا موازی وجود ندارد.
- مقادیر هارمونیک ها یعنی اعوجاجهای تکی و کلی جریان و ولتاژ در محل اتصال به شبکه از حدود مشخص شده در این استاندارد پایین تر می باشند.

دراین استاندارد سقف بار یا سقف دیماند که به علت کمی مصرف نیاز به بررسی هارمونیک های آنها نمی باشد به طور مشخص تعیین نگردیده است. این سقف بار که می تواند حدود ۰/۱ تا ۱ درصد قدرت اتصال کوتاه نقطه محل اتصال مشترک به شبکه باشد یا توجه به امکانات و وضعیت شرکت های برق رأسا توسط خود شرکت های برق تعیین می گردد.

فلسفه تعیین حدود مجاز برای هارمونیک ها در این استاندارد به شرح زیر است:

- محدود کردن تزریق هارمونیک توسط هر مشترک به صورتی که باعث اعوجاج ولتاژ غیر قابل قبول در شرایط عادی کار سیستم برق نگردد.

- محدود کردن اعوجاج کلی ولتاژ در سیستم برق بخصوص در محل تغذیه مشترکین.

اعوجاج ولتاژ در سیستم تابعی از کل جریان هـای هـارمونیکی تزریقـی و امپدانـس سیسـتم در هـر فرکانس هارمونیک ها می باشد. کل جریان های هارمونیکی تزریق شده بسـتگی بـه تعـداد و انـدازه مشترکین دارد که تولید هارمونیک جریان می نمایند.

در نتیجه روش منطقی برای محدود کردن جریان های هارمونیکی برای هـر مشـترک، تعییـن حـدود مجاز جریان های هارمونیکی براساس اندازه و یا مقدار بار هر مشترک می باشـد. مشـترکین بـزرگـتر بخاطر اینکه قسمت بیشتری از بار را مصرف مـی کننـد امکـان بیشـتری بـرای تزریـق جریـان هـای هارمونیکی به سیستم خواهند داشت.

٦-٢-١ حدود مجاز اعوجاج جریان برای هر مشترک

اتکای تنها به حدهای مجاز شاخص های هارمونیکی ولتـاژ همـواره بـاعث جلـوگـیری از مسـائل و مشکلات نمی گردد در نتیجـه لازم اسـت در زمـان تغیـیرات شـکل سیسـتم قـدرت، بررسـی هـای هارمونیکی تکرار گردد. به طور کلی مشترک بایستی مطالعات لازم در مورد سیستم داخلی برق خـود را انجام داده و موارد زیر را تأیید نماید:

- خازن های اصلاح ضریب قدرت و یا فیلترهـای هـارمونیکی بیـش از حـد تحمـل خـود تحـت فشارهای ناشی از هارمونیک ها قرار نگیرند.
- رزونانس یا تشدید سری یا موازی وجود نداشته باشد.

- مقادیر هارمونیک ها یعنی اعوجاج های تکی وکلی جریان و ولتاژدر محل اتصال به شکبه از حدود مشخص شده دراین استاندارد به شرح زیر است:

- محدود کردن تزریق هارمونیک توسط هر مشترک به صورتی که باعث اعوجاج ولتـاژ غـیر قـابل قبول در شرایط عادی کار سیستم برق نگردد.
- محدود کردن اعوجاج کلی ولتاژ در سیستم برق بخصوص در محل تغذیه مشترکین.

اعوجاج ولتاژ در سیستم تابعی از کل جریان هـــای هـارمونیکی تزریقـی و امپدانـس سیسـتم در هـر فرکانس هارمونیک ها می باشد. کل جریان های هارمونیکی تزریق شده وابستگی بـه تعـداد و انـدازه مشترکین دارد که تولید هارمونیک جریان می نمایند.

در نتیجه روش منطقی برای محدود کردن جریان های هارمونیکی برای هـر مشـترک، تعییـن حـدود مجاز جریان های هارمونیکی براساس اندازه و یا مقدار بار هر مشترک می باشـد. مشـترکین بـزرگـتر بخاطر اینکه قسمت بیشتری از بار را مصرف مـی کننـد امکـان بیشـتری بـرای تزریـق جریـان هـای هارمونیکی به سیستم خواهند داشت. این موارد در محاسبهٔ تعیین مقادیر مجاز انتشار هارمونیک ها که در بخش های قبل توضیح داده شدبطور کامل مورد استفاده قرار گرفته است.

حدود اعوجاج هارمونیکی مشخص شده دراین استاندارد ماکزیمم مقدار مجاز اعوجـاج جریـان هـر مشترک می باشد. مقدار مجاز اعوجاج جریان با توجه به مقدار ماکزیمم جراین مصرفی هر مشترک و بصورت درصدی از آن تعیین می گردد.

جداول ٦،٥و ٧ حدود مجاز جریان های هارمونیکی را براساس اندازه بار مصرفی مشترکین نسبت بـه اندازه و قدرت شبکه برق در نقطه محل تغذیه یا اتصال مشترک در سیستم های با ولتـاژ مختلـف را ارائه می دهـد. حدود ارائه شده در جداول فوق برای مشترکین عمومـی و آنـهایی کـه دارای یکسـو کننده های شش ضربه ای هستند صادق می باشند. اگر یکسو کننده ها به نحوی باشـد کـه نتیجـه آن برای سیستم تغذیه بصورت یکسو کننده های بیش از شش ضربه ای به حساب آیـد حدهـای مجـاز برای انواع هارمونیک های مشخصه آن ها متناسب با ضریب $\sqrt{\frac{q}{6}}$ که q مشخص کننده تعـداد ضربـه آنها می باشد افزایش می یابد و اندازهٔ مجاز انواع هارمونیک های غیر مشـخصه آن هـا بـه مقـدار۲۵ درصد مقادیر تعیین شده در جداول ٥ تا٧ کاهش می یابد.

در رابطه با استفاده از حدود مجاز اعوجاج جریان هارمونیکی مشخص شده در جـداول ٥ تـا ٧ بـاید ظرفیت ترانسفورماتورهای ارتباطی بین مشترک و شرکت برق نیز مورد بررسی قرار گیرد بـه نحـوی که از ترانسفورماتوری که مصرف کننده را به شرکت برق ارتباط می دهـد بیـش از معـادل ٥ درصـد ظرفیت ترانسفورماتور جریان هارمونیکی عبور نکند.

٦-٢-٢ حدود مجاز اعوجاج ولتاژ در شبکه

جدول ٨ حدود مجازاعوجاج ولتاژ در شینه های محل تغذیه مشترکین در ولتاژهای مختلف را نشان می دهد دراین جدول حد اعوجاج هارمونیک ولتاژ، همچنین حد اعوجاج کلی ولتاژ به درصد داده شده است.

هرگاه در قسمتی از شبکه برق رسانی اعوجاج ولتاژ از مقادیر حدی جدول ٨ تجاوز کند لازم است شرکت های برق اقدام به اندازه گیری هارمونیک ها در نقاط مختلف شبکه خود نمایند تا مشترک یا مشترکینی که دارای سیستم های هارمونیک بوده و بیش از حد مجاز تولید جریان هارمونیکی می نمایند مشخص گردند. بایستی از اینگونه مشترکین خواسته شود که با تمهیداتی از جمله نصب فیلتر مقدار جریان هارمونیکی تزریقی خود را تا حدود مجاز کاهش دهد.

جدول٥- حدود مجاز اعوجاج جریان برای مشترکین درشبکه های توزیع ٣٨٠ولت ، ٢٠و کیلوولت

ماکزیمم اعوجاج جریان مجاز هر مشترک به درصد نسبت به ماکزیمم جریان مصرف یا دیماند بدون هارمونیک مشترک										
بزرگی مشترک یا درصد ماکزیمم جریان مصرفی (دیماند) بدون هارمونیک به جریان اتصال کوتاه محل تغذیه (R)	اعوجاج تکی جریان هر هارمونیک مرتبه n									اعوجاج کلی جریان
	n <١١		١١ ≤ n <١٧		١٧ ≤ n < ٢٣		٢٣ ≤ n < ٣٥		n ≥ ٣٥	
	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج
$R > 5$	٤	١/٠	٣/٠	٠/٥	١/٥	٠/٤	٠/٦	٠/١	٠/٣	٠/١	٥
$5 \geq R > 2$	٧	١/٧	٣/٥	٠/٩	٢/٥	٠/٦	١/٠	٠/٣	٠/٥	٠/١	٨
$2 \geq R > 1$	١٠	٢/٥	٤/٥	١/١	٤/٠	١/٠	١/٥	٠/٤	٠/٧	٠/٢	١٢
$1 \geq R > 0/1$	١٢	٣/٠	٥/٥	١/٤	٥/٠	١/٢	٢/٠	٠/٥	١/٠	٠/٢	١٥
$R \leq 0/1$	١٥	٣/٨	٧/٠	١/٧	٦/٠	١/٥	٢/٥	٠/٦	١/٤	٠/٣	٢٠

جدول ٦–حدود مجاز اعوجاج جریان برای مشترکین فوق توزیع ٦٣ و١٣٢ کیلوولت

ماکزیمم اعوجاج جریان مجاز هر مشترک به درصد نسبت به ماکزیمم جریان مصرف یا دیماند بدون هارمونیک مشترک											
بزرگی مشترک یا درصد ماکزیمم جریان مصرفی (دیماند) بدون هارمونیک به جریان اتصال کوتاه محل تغذیه (R)	اعوجاج تکی جریان هر هارمونیک مرتبه n										اعوجاج کلی جریان
	n <١١		١١ ≤ n <١٧		١٧ ≤ n <٢٣		٢٣ ≤ n <٣٥		n ≥ ٣٥		
	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	
$R > 5$	٢/٠	٠/٥	١/٠	٠/٢	٠/٧	٠/٢	٠/٣	٠/١	٠/١	٠/٠	٢/٥
$5 \geq R > 2$	٣/٥	٠/٩	١/٧	٠/٤	١/٢	٠/٣	٠/٥	٠/١	٠/٢	٠/٠	٤
$2 \geq R > 1$	٥/٠	١/٢	٢/٢	٠/٦	٢/٠	٠/٥	٠/٧	٠/٢	٠/٣	٠/١	٦/٠
$1 \geq R > 0/1$	٦/٠	١/٥	٢/٧	٠/٧	٢/٥	٠/٦	١/٠	٠/٢	٠/٥	٠/١	٧/٥
$R \leq 0/1$	٧/٥	١/٩	٣/٥	٠/٩	٣/٠	٠/٧	١/٢	٠/٣	٠/٧	٠/٢	١٠/٠

جدول ٧–حدودمجاز اعوجاج جریان برای شبکه های انتقال فشارقوی ٢٣٠ و ٤٠٠ کیلوولت ایران

ماکزیمم اعوجاج جریان مجاز هر مشترک به درصد نسبت به ماکزیمم جریان مصرف یا دیماند بدون هارمونیک مشترک											
بزرگی مشترک یا درصد ماکزیمم جریان مصرفی (دیماند) بدون هارمونیک به جریان اتصال کوتاه محل تغذیه (R)	اعوجاج تکی جریان هر هارمونیک مرتبه n										اعوجاج کلی جریان
	n <١١		١١ ≤ n <١٧		١٧ ≤ n <٢٣		٢٣ ≤ n <٣٥		n ≥ ٣٥		
	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	
$R > 5$	٢/٠	٠/٥	١/٠	٠/٢	٠/٧	٠/٢	٠/٣	٠/١	٠/١	٠/٠٤	٢/٥
$R \leq 0/1$	٣/٠	٠/٧	١/٥	٠/٤	١/١	٠/٣	٠/٤	٠/١	٠/٢	٠/٠٥	٤/٠

جدول ۸- حدود مجاز اعوجاج ولتاژ درشبکه

ماکزیمم اعوجاج ولتاژ مجاز در شینه های با ولتاژهای مختلف به درصد نسبت به ولتاژ نامی با فرکانس ۵۰ هرتز			
ولتاژ شینه	اعوجاج تکی ولتاژ هارمونیک		اعوجاج کلی ولتاژ
	فرد	زوج	
۳۸۰ ولت و ۲۰کیلوولت	۳/۰	۱/۵	۵/۰
۶۳و۱۳۲ کیلوولت	۱/۵	۰/۷	۲/۵
۲۳۰و۴۰۰کیلوولت	۱/۰	۰/۵	۱/۵

۶-۲-۳ *اعوجاج هارمونیکی در شرایط گذرا*

همانطورکه می دانیم هارمونیک های گذرا یا کوتاه مدت احتمالا اثر کمتری را نسبت به هارمونیک های پایدار وثابت روی تجهیزات شبکه دارند. هر چند تأثیر آنها در مورد سیستم های کنترل و مخابراتی مشابه هارمونیک های پایدار می باشد. در نتیجه چنانچه اعوجاج جریان ناشی از هارمونیکهای مشترکین برای مدت کوتاهی ، (کمتراز یک ساعت درروز) از مقادیر حدود معین شده دراین استاندارد بیشتر گردد این افزایش ممکن است با نظر شرکت های برق تا مقدار ۵۰ درصد افزایش نسبت به مقادیر جداول ۵ تا۷ به صورت مجاز شناخته شود.

۶-۲-۴ *روش ارزیابی مشترکین جدید تولید کننده هارمونیک*

اگر بررسی و مطالعات اولیهٔ اضافه شدن مشترک جدیدبه شبکه مشخص نماید که مقدار هارمونیک های جریان و یا اعوجاج تکی وکلی جریان کمتراز حدود تعیین شده دراین استاندارد می باشند بررسی ومطالعات بیشتری مورد نیاز نبوده و مشترک جدید می تواند مورد پذیرش قرار گیرد.

اگر مقدار اعوجاج تکی وکلی جریان بیش از مقادیر تعیین شده دراین استاندارد باشد لازم است محاسبات لازم جهت تعیین اعوجاج های ولتاژ تکی وکلی در شینه محل تغذیه انجام گیرد.

درصورتی که نتایج بدست آمده از حدود مجاز اعوجاج تکی وکلی ولتاژ تعیین شده دراین استاندارد کمترباشد و آزمون های محلی جهت تعیین مقادیر زمینه ای اعوجاج ولتاژ وهمچنین میزان تولید هارمونیک های دیگر مشترکین اجازه دهد، مشترک جدید می تواند با تعیین شرایطی که توسط شرکت برق تعیین می گردد پذیرفته شود.

۶-۲-۵ مقادیر مجاز هارمونیک های میانی

تابه حال مقادیر هارمونیک های میانی ولتاژ به طور کامل بررسی نشده است. به هرحال مطالب زیر به اثبات رسیده است:

- سیکلوکانورترها فرکانس هایی در محدوده صفر تا ۱۰۰۰ هرتز تولید نموده که دامنه حداکثر آنها تقریبا برابر ۰/۵ درصد ولتاژ نامی می باشد. درصورت بروز پدیده تشدید مقادیر بالاتر نیز امکان ظهور خواهند یافت. تاکنون مقادیر مشاهده شده هارمونیک های میانی در سیستم حدود ۰/۰۲ درصد ولتاژ نامی وپهنای باند آنها در حدود ۱۰ هرتز بوده است.
- تنها مورد گزارش شده در رابطه با تأثیر نامطلوب این نوع هارمونیک ها در رابطه با گیرنده های ریپل کنترل بوده و ملاحظات زیر در رابطه با عملکرد بدون اشکال این گونه وسایل آمده است:
- درحال حاضر سطح پاسخ گیرنده ها روی ولتاژی برابر یا بالاتر از ۰/۳ درصد ولتاژ نامی منبع تغذیه تنظیم می شود. براساس این عدد، سطح سازگاری هارمونیکی برای هر هارمونیک میانی حدود ۰/۲ درصد ولتاژ نامی تغذیه انتخاب می گردد. این نکته نیز باید به خاط سپرده شود که امکان عبور مقداری هارمونیک میانی از فیلتر ورودی به گیرنده همواره وجود خواهد داشت.
- برای جلوگیری از آسیب دیدگی گیرنده های ریپل کنترل می توان از یک مدار جذب (مدار تشدید سری) که روی فرکانس کنترل تنظیم شده است استفاده نمود. درجایی که استفاده از اینگونه مدارها عمل نیست، تجهیزاتی که در معرض سطوح بالای هارمونیک های میانی قرار می گیرند را باید به نحو مناسب طراحی نمود.

٦-٣ حدود مجاز هارمونیک در وسایل مورد استفاده در مصارف خانگی

این بخش از استاندارد برای وسایل الکتریکی و یا الکترونیکی که جریان آن زیر ١٦ آمپر درهرفاز بوده وبه شبکه ولتاژ پایین توزیع وصل می شوند قابل استفاده است. بعضی از وسایل خاص که بـــه وفـور مورد استفاده قرار نمی گیرند و یا قادر به پذیرفتن محدودیت های این استاندارد نیستند بـاید از نظـر تعداد ویا محل نصب دارای محدودیت هایی شوند. از سوی دیگر برای اجازهٔ اتصال اینگونه وســایل خاص به شبکه باید به کارشناسان شرکت های برق اطلاع داده شود.

٦-٣-١ *دسته بندی تجهیزات*

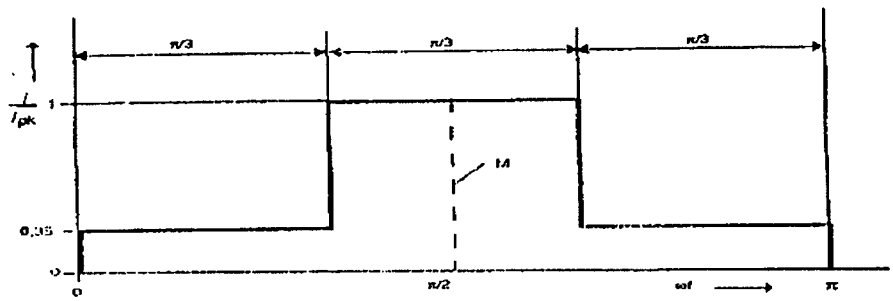
بمنظور اعمال محدودیت جریان هارمونیکی تجهیزات بصورت زیر طبقه بندی می شوند:

ردهٔ A : تجهیزات سه فاز متعادل و بقیهٔ تجهیزات، بجز تجهیزاتی که در دسته بنـدی هـای زیـر آمـده است.

ردهٔ B : تجهیزات قابل حمل (به تجهیزاتی گفته می شود که درهنگام استفاده قابل گرفتــن بـا دسـت باشند و برای مدت کوتاهی استفاده شوند).

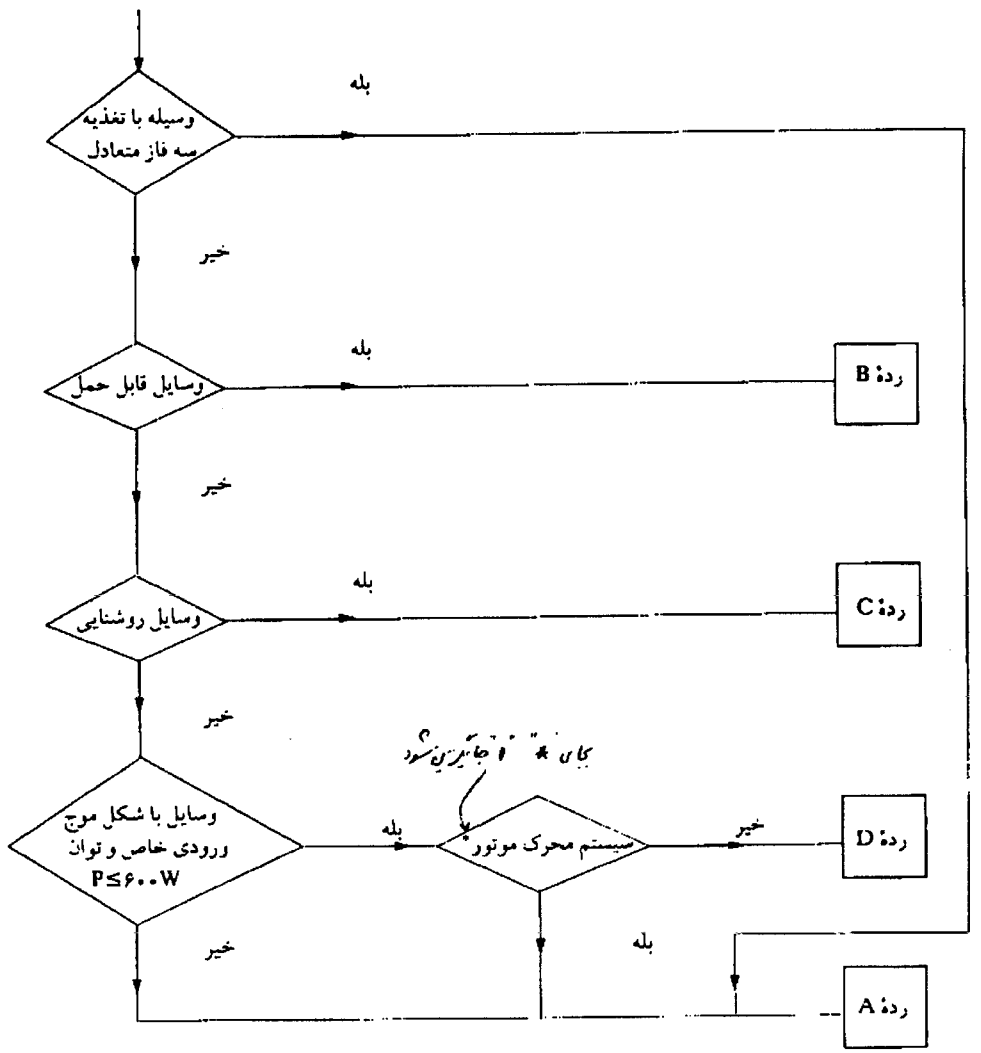
ردهٔ C : وسایل روشنایی، شامل وسایلی که میزان نور آن ها قابل کنترل است.

ردهٔ D : تجهیزاتی که جریان ورودی آن ها دارای شکل موج خاصی می باشند(رجوع شود به شــکل ١) توان حقیقی ورودی به این تجهیزات زیر ٦٠٠ وات درنظر گرفته می شود.



شکل ١- شکل موج خاص مربوط به رده D دستگاه ها

بمنظور تعیین رده یک دستگاه مشخص می توان از فلوچارت شکل ۲ استفاده نمود.



۱: ازنوع زاویه فاز کنترل شده

شکل ۲- فلوچارت رده بندی تجهیزات

محدودیت های هارمونیکی برای رده های مختلف تجهیزات طبق جداول شماره ۹ تا۱۱ خواهد بود.

جدول۹- محدودیت های جریان در تجهیزات ردهٔA

حداکثر جریان هارمونیکی مجاز (آمپر)	مرتبهٔ هارمونیک h
هارمونیک های فرد	
۲/۳	۳
۱/۱٤	۵
۰/۷۷	۷
۰/٤	۹
۰/۳۳	۱۱
۰/۲۱	۱۳
$۰/۱۵\frac{15}{h}$	$15 \le h \le ۳۹$
هارمونیک های زوج	
۱/۰۸	۲
۰/٤۳	٤
۰/۳	٦
$۰/۲۳\ \frac{8}{h}$	$8 \le h \le 40$

جدول ۱۰- محدودیت های جریان در تجهیزات ردهٔ C

حداکثر جریان مجاز برحسب درصدی از جریان ورودی در فرکانس اصلی (٪)	مرتبهٔ هارمونیک h
۲	۲
$۳۰\ \lambda$	۳
۱۰	۵
۷	۷
۵	۹
۳	$۱۱ \le h <۳۹$ (تنها هارمونیک های فرد)

جدول۱۱- محدودیتهای جریان در تجهیزات ردهٔ D

حداکثر جریان هارمونیک مجاز	ماکزیمم جریان هارمونیکی مجاز بر هر وات	مرتبه هارمونیک
A	mA/W	H
۲/۳	۳/٤	۳
۱/۱٤	۱/۹	٥
۰/۷۷	۱/۰	۷
۰/٤	۰/٥	۹
۰/۳۳	۰/۳٥	۱۱
رجوع شود به جدول ۹	$\frac{۳/۸٥}{h}$	$۱۳ \le h < ۳۹$ (فقط هارمونیکهای فرد)

یادآوری ۱: برای تجهیزات رده B مقادیر مجاز از حاصل ضرب عدد ۱/٥ در حداکثر مقادیر مجاز داده شده در جدول ۹ بدست می آید.

یادآوری ۲:مقادیر داده شده در جدول ۱۱ برای تجهیزاتی که توان ورودی آن بیش از ۷٥ وات است معتبر می باشد . برای تجهیزات با توان ورودی ۷٥ وات و کمتر هیچگونه محدودیتی اعمال نخواهد شد.

٦-٤ بازه های زمانی برای انجام مطالعات آماری برروی مقادیر اندازه گیری شده هارمونیک ها

برای مقایسهٔ اطلاعات اندازه گیری شده ،بازه های زمانی زیر پیشنهاد می گردد:

بازه زمانی بسیار کوتاه مدت : ۳ ثانیه

بازه زمانی کوتاه مدت : ۱۰ دقیقه

بازه زمانی بلند مدت : ۱ ساعت

بازه زمانی یک روزه: ۲٤ ساعت

بازه زمانی یک هفته ای : ۷ روز

٦-٤-۱ *بازه زمانی بسیار کوتاه مدت*

مقدار جذر مربعات یک هارمونیک در این حالت بصورت زیر تعریف می شود:

$$U_{hvs} = \sqrt{(\sum_{K=1}^{N} U_{h,k}^2)/N} \qquad (۱۰)$$

بمنظور بررسی مسائل خاص مرتبط با پالس های هارمونیکی کوتاه، مجموع پنجرهٔ زمانی ۸۰ تـا ۱۶۰ میلی ثانیه برای هر اندازه گیری مناسب به نظر می رسد.

٦-٤-٢ بازه زمانی کوتاه مدت

بازه T_{sh} به مدت ۱۰ دقیقه پیشنهاد می گردد. مقدار مؤثر U_{hsh} در هربازه زمانی ۱۰ دقیقه ای را باید از کلیه مقادیر U_{hvs} هایی که در بازه زمانی ۱۰ دقیقه ای به وقوع پیوسته است بدست آورد. تعیین U_{hsh} بسیار مفید است ، زیرا تخمین خوبی از اثرات گرمایی هر هـارمونیک خـاص را دریـک دورهٔ بلند مدت نشان می دهد.

٦-٤-٣ بازه زمانی بلند مدت

انتخاب بازه زمانی بلند مدت از طرف استاندارد IEC بصورت اختیاری تعیین شده است. پیشنهاد مـی گردد که این زمان ۱ ساعت انتخاب شود.

٦-٤-٤ بازه زمانی یک روزه

درمطالعه هارمونیک های شبکه بازه زمانی یک روزه برای نمایش آماری اطلاعـات بـه فـرم مناسـب بکار می رود . هنگام بررسی اثرات کوتاه مدت، مقدار U_{hvs} را باید برای بررسی در بازه زمانی یـک روزه نگهداری نمود. علاوه بر آن ، احتمال تجمعی مقادیر مؤثر مربوط به بـازه زمـانی بسـیار کوتـاه مدت را باید محاسبه نمود. به کمک این اطلاعات می توان مقادیر مؤثر ولتاژ در هر مرتبهٔ هارمونیکی و نیز کل اعوجاج هارمونیکی را برای یک بـازه زمـانی یـک روزه محاسـبه نمـود. شـکل ۳ نمـایش تغییرات زمانی روزانه THD یک شینه را نشان می دهد.

شکل ۳- تغییرات زمانی روزانه THD یک شینه نمونه

٦-٤-٥ بازه زمانی طولانی مدت

برای این بازه مدت یک هفته پیشنهاد می شود. اطلاعات مربوط به این بازه زمانی براساس اطلاعات خلاصه شده روزانه آماده می گردد. باید بخاطر داشت که اختلافات فاحشی بین مقادیر بدست آمده برای روزهای کاری و تعطیلی وجود خواهد داشت.

٦-٥ روش بررسی کیفیت ولتاژ در ارتباط با هارمونیک ها

درانتهای یک دوره زمانی مشاهده اطلاعات ، هدف اصلی پیداکردن یک مقدار برای هر هارمونیک یا هارمونیک میانی می باشد. این مقادیر می توانند برای نمایش کیفیت ولتاژ ومقایسه با سطح هارمونیکی مجاز استفاده شوند.

مشخص است که $U_{hvs.\max}$ را نمی توان برای مقایسه با سطوح مجاز بکار برد. دراین استاندارد احتمال تجمعی ۹۵ درصد هارمونیک ولتاژ $U_{hvs.95\%}$ رابابد برای مقایسهٔ با سطوح مجاز بکاربرد.

به دلیل اثرات بلندمدت هارمونیک ها، $U_{hsh.\max}$ را نیز نباید از نظر دور داشت. مطالعات و بررسی ها نشان می دهند که $U_{hsh.\max}$ نزدیک به مقدار $U_{hvs.95\%}$ می باشد . ماکزیمم این دو مقدار را می توان برای مقایسه با سطوح مجاز نیز بکار برد.

اندازه گیری ها در شبکه نشان می دهند که $U_{hvs.\max}$ حدودا ۱/۵ تا ۲ برابر بزرگتراز $U_{hvs.95\%}$ است. در نتیجه اگر قراراست از پارامتر $U_{hvs.\max}$ برای بررسی کیفیت ولتاژ استفاده شود باید این پارامتر با ۱/۵ تا ۲ برابر سطح مجاز مقایسه گردد.

پیوست الف
شناخت وبررسی هارمونیک ها
(اطلاعاتی)

یکی از مسائل ومشکلات کیفیت برق در سیستمهای توزیع، فوق توزیع وانتقال ، مسئله هارمونیک ها می باشدکه توجه زیادی را به خود جلب نموده است و مطالب بسیاری را دراین خصوص مـی تـوان در استانداردها ومقالات مختلف جستجونمود.

اعوجاجات هارمونیکی تولیدشـــده در شـبکهٔ قـدرت منشـاء داخلـی دارنـد. بـرای مثـال ژنراتورهـا، ترانسفورماتورها و تجهیزات تریستوری کنترل شده مانند پست های تبدیل که در سیستم های HVDC استفاده می شوند می توانند باعث ایجاد اعوجاجات هارمونیکی گردند.

اعوجاجات هارمونیکی باعث ایجاد مسائل خاصی در شبکه هـای قـدرت مـی شـوند. از جملـه ایـن مسائل می توان به عدم عملکرد نامناسب تجهیزات ونیز کاهش عمرو پایین آمدن راندمـان دسـتگاهها اشاره نمود که این مسئله دراین شرایط مقوله کیفیت برق است. درچنین حالتی مطالعهٔ هارمونیک ها و ارائه یک سری قواعد ومقررات اجتناب ناپذیرخواهدبود. محـدود نمـودن اعوجـاج هـارمونیکی هـم ازنظر شرکت های برق و هم ازنظر مشترکین لازم می باشد.

شرکت های برق باید تمهیداتی را ارائه نمـایند تـا از آسـیب دیـدگـی تجـهیزات مشـترکین، اعـم از مشترکین خانگی وصنعتی جلوگیری شود. از طرف دیگر با توجه بـه اینکـه ایجـاد یـک مـوج کـاملاً سینوسی از طرف شرکت های برق نمی تواند تضمین شود، لذا مشترکین باید اعوجاجات تولید شـده توسط تجهیزات خودرا محدود نمایند.

در ایـن خصـوص استانداردهای مختلفی تهیـه شـده اسـت کـه از جملـه مـی تـوان بـه اسـتاندارد هارمونیک های مجاز وزارت نیروتهیه شده توسط مهندسین مشاورنیرو و نیز استانداردهای بین المللی IEC وIEEE اشاره نمود. باتوجه به ارائه مقررات هارمونیکی برای شبکه ایران وبا درنظر گرفتن اهمیت هارمونیک ها در مقولهٔ کیفیت برق، بخش های جدیدی که از دیدگـاه کیفیـت بـرق اهمیـت خـاصی داشته اند نیز دراین ضمیمه آمده شده است.

شرکت های برق فرض می کنند که موج ولتاژ سینوسی تولید شده در مراکز تولید انـرژی الکـتریکی، بدون هارمونیک است. دراغلب مواقع، اعوجاج ولتاژ در سیستم های انتقال کمـتراز ۱ درصـد اسـت. بهرحال هرچه به سمت مصرف کننده نزدیکتر می شویم، میزان اعوجاج بیشـتر مـی گـردد. از سـوی دیگردربعضی بارها موج جریان، کاملاً ازحالت سینوسی خارج شده ودارای اعوجاج زیادی می گردد. مبدل های الکترونیک قدرت شکل موج جریان را به شکل دلخواه در می آورند. درحالی که حالتـهای مختلفی وجود دارد که اعوجاج در سیستم به صورت تصادفی می باشد لیکن اغلـب اعوجاجـات بـه صورت پریودیک می باشند. بدین معنی که سیکل های متوالی تقریباً شبیه به هم بوده وممکن است به آرامی تغییر کنند. این مفهوم دراصل همان واژه هارمونیک را توصیف می کند. دراین ضمیمه کوشش خواهد شد که بعضی از مفاهیم مبهم هارمونیک ها در سیستم های قدرت مشخص گـردد. وقتـی کـه استفاده از مبدل های الکـترونیک قـدرت در اواخـر دهـه ۱۹۷۰ معمـول گردیـد، توجـه بسـیاری از مهندسین شرکت های برق درمورد توانایی پذیرش اعوجاج هارمونیکی توسط سیستم های قـدرت را برانگیخت . پیش بینی های مأیوس کننده ای از سرنوشـت سیسـتم هـای قـدرت در صـورت اجـازه استفاده ازاین تجهیزات انجام گرفت.درحالی که بعضی ازاین نگرانی ها احتمالاً بیش از آنچه می باشد قلمداد گردید، لیکن بررسی مفهوم کیفیت برق مدیون این افراد بدلیل پیگیری آنـها روی ایـن مسـئله جدید می باشد. بررسی مسائل هارمونیک ها منجربه تحقیقاتی گردید که نتایج آن بدست آوردن نقطه نظرات بسیاری درخصوص کیفیت برق بود. به نظر برخـی از محققیـن ،اعوجـاج هـارمونیکی هنـوز مهمترین مسئلـه کیفیت بـرق می باشد. مسائل هـارمونیکی بـا بسـیاری از قوانیـن معمولـی طراحـی سیستم های قدرت وعملکرد آن تحت فرکانس اصلی مغایراست. بنـابراین مـهندس بـا پدیـده هـای ناآشنایی روبرو می شود که نیاز به ابزارهای پیچیده و تجهیزات پیشرفته برای حل مشکلات و تجزیـه و تحلیل آن ها دارد. گرچه تحلیل مسائل هارمونیکی می تواند دشوار باشـد، ولـی خوشـبختانه همـهٔ سیستم قدرت دارای مشکل هارمونیکی نیست و فقط درصد کمی از فیدرهای مربوط به سیستم هـای توزیع تحت تأثیرعوامل ناشی از هارمونیک ها قرار می گیرند. درعوض ، وقوع فلش ولتاژ و قطعی ها تقریباً در هر فیدر امری عادی بوده و مسائل زیادی را درکیفیت برق ایجاد می کند. مشترکین بـرق در صورت وجود هارمونیک ها مشکلات زیادتری از شرکت های بـرق را تحمـل مـی کننـد. مشـترکین صنعتی که از محرکه های موتور با قابلیت تنظیم سرعت، کوره های قوس الکتریکی، کوره های القایی

و نظایر آن استفاده می کنند، نسبت به مسائل ناشی از اعوجاج هارمونیکی ضربه پذیرتر از بقیهٔ مشترکین می باشند.

اعوجاج هارمونیکی یک پدیده جدید در سیستم های قدرت به شمار نمی رود. نگرانی ناشی از عواجاج در بسیاری از دوره ها درسیستم های قدرت الکتریکی جریان متناوب وجود داشته و دنبال شده است. جستجوی منابع و مطالب تکنیکی دهه های قبل نشان می دهد که مقالات مختلفی دررابطه با این موضوع انتشار یافته است. اولین منابع هارمونیکی شناخته شده، ترانسفورماتوها بودند و اولین مشکل نیز در سیستم های تلفن پدید آمد. استفاده گروهی از لامپ های قوس الکتریک بدلیل مؤلفه های هارمونیکی خود توجهات بخصوصی را برانگیخت ولی این توجهات خاص به اندازه اهمیت مسئله مبدل های الکترونیک قدرت در سال های اخیر نبوده است.

خوشبختانه در طی این سال ها پژوهشگران متوجه شده اند که اگر سیستم انتقال به نحو مناسبی طراحی گردد، به نحوی که بتواند مقدار توان مورد نیاز بارها را به راحتی تأمین نماید، احتمال ایجاد مشکل ناشی از هارمونیک ها برای سیستم قدرت بسیار کم خواهدبود، گرچه این هارمونیک ها می توانند موجب مسائلی در سیستم های مخابراتی شوند. اغلب در سیستم های قدرت مشکلات زمانی بروز می کنند که خازن های موجود در سیستم باعث ایجاد تشدید دریک فرکانس هارمونیکی گردند. دراین شرایط اعتشاشات واعوجاجات، بسیار بیش از مقادیر معمول می گردند. امکان ایجاد این مشکلات در مورد مراکز کوچک مصرف وجود دارد ولی شرایط بدتر در سیستم های صنعتی بدلیل درجه بالایی از تشدید رخ می دهد.

الف - ۱ منابع تولید هارمونیک

الف-۱-۱ هارمونیک

پیدایش عناصر نیمه هادی و استفادهٔ فراوان از آن ها در شبکه های قدرت عامل جدیدی برای ایجاد هارمونیک در سیستم های قدرت بوجود آورد.کاربرداین عناصررا می توان درتجهیزات و سیستم های قدرت زیر دید:

- سیستم های HVDC
- تجهیزات مورد استفاده در کنترل کننده های سرعت ماشین های الکتریکی.
- اتصال نیروگاههای خورشیدی و بادی به سیستم های توزیع.

- کاربردSVC بعنوان ابزار مهمی درکنترل توان راکتیو.
- استفاده زیاد از یکسوکننده ها برای دشارژ باطریها.

از سوی دیگر عوامل زیر را می توان به عنوان تولید کنندهٔ هارمونیک نیز در نظر گرفت.

- تولید شکل موج غیر سینوسی توسط ماشین های سنکرون ناشی از وجود شیارها 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 والقایی.

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

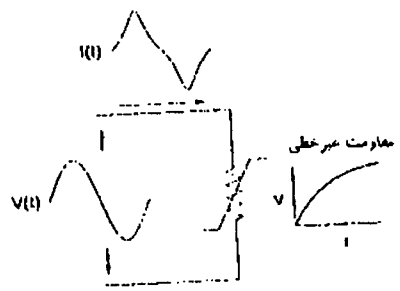
- صنایع شامل مجتمع های شیمیایی و پتروشیمی و نیزصنایع ذوب آلومینیم که از یکسو کننده های پرقدرت برای تولید برق DC مورد نیاز انجام فرآیندهای شیمیائی و ذوب آلومینیم استفاده می کنند. با توجه به قدرت بالا، این یکسوکننده ها هارمونیک قابل ملاحظه ای در شبکهٔ قدرت به وجود می آورند.

ازسوی دیگر استفاده از سیستم های HVDC 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 ونقل برقی مانند اتوبوس برق ومتروها باعث می شودکه سطوح بالایی از هارمونیک به سیستم توزیع تزریق شود.
- بارهای غیرخطی مانند کوره های قوس الکتریکی که در صنایع أوب 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.

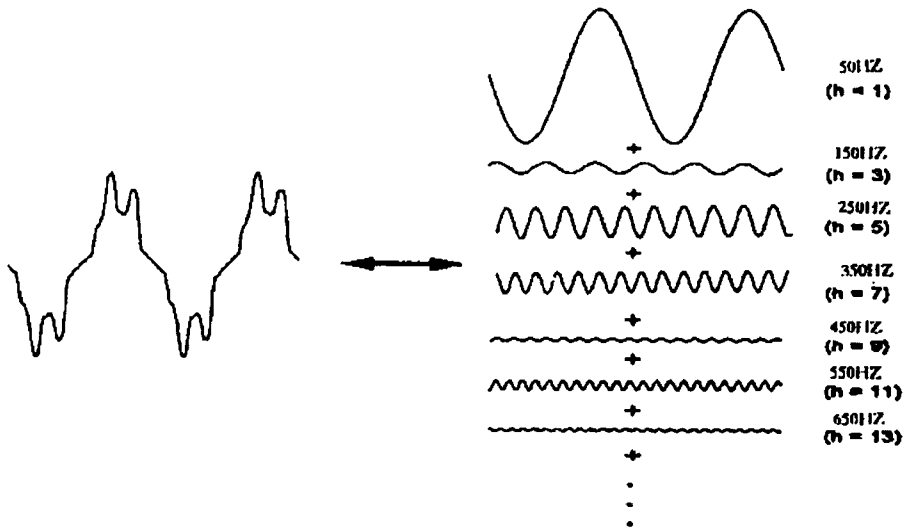
الف-۲ اعوجاج هارمونیکی

اعوجاج هارمونیکی در سیستم های قدرت ناشی از عناصر غیرخطی می باشد. عنصر غیرخطی عنصری است که جریان آن متناسب با ولتاژ اعمالی نمی باشد. شکل ۱ جریان غیرسینوسی یک مقاومت غیر خطی در حالی که ولتاژ اعمالی به آن سینوسی است را نشان می دهد. افزایش چند درصدی ولتاژ ممکن است باعث شود که جریان دوبرابر شده و نیز موج جریان شکل دیگری به خود بگیرد. این مورد ساده ای از منبع تولید اعوجاج در سیستم قدرت می باشد.



شکل ۱- اعوجاج جریان که به علت یک مقاومت غیرخطی ایجادشده است

همانطورکه درشکل ۲ مشاهده می شود هر شکل موج اعوجاجی پریودیک را می توان به صورت جمع موج های سینوسی بیان نمود. یعنی وقتی که شکل موج ازیک سیکل به سیکل دیگر تغییر نکند، این موج را می توان به صورت جمع امواج سینوسی خالص که درآن فرکانس هر موج سینوسی، مضرب صحیحی از فرکانس اصلی موج اعوجاجی است نمایش داد. این موج های سینوسی که فرکانس آن ها ضریب صحیحی از فرکانس اصلی می باشند را هارمونیک های مؤلفه اصلی گویند. جمع این موج های سینوسی به سری فوریه معروف است این مفهوم ریاضی اولین بار توسط فوریه ریاضیدان فرانسوی مورد توجه قرار گرفت.



شکل۲- نمایش سری فوریه شکل موج اعوجاج یافته

مزیت استفاده از سری فوریه در نمایش شکل موج های اعوجاجی، سادگی بدست آوردن پاسخ سیستم به یک ورودی سینوسی است. همچنین دراین حالت تکنیک های معمولی حل شبکه درحالت مانا نیز قابل استفاده خواهدبود. دراین روش سیستم برای هر هارمونیک جداگانه بررسی شده و سپس خروجی ها درهر فرکانس ترکیب می گردد تا سری فوریه جدید بدست آید. با استفاده ازاین سری فوریه شکل موج خروجی را می توان محاسبه نمود. شایان ذکراست که بیشتر مواقع دامنه هرهارمونیک برای ما جالب خواهدبود.

وقتی که هر دو نیم سیکل مثبت ومنفی یک موج شبیه یکدیگر باشند، سری فوریه فقط شامل هارمونیک های فرداست. 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 هردونیم سیکل مثبت ومنفی ازخود نشان می دهند. درحقیقت وجود هارمونیک های زوج اغلب نشان دهندهٔ وجود اشکالی در سیستم است. این اشکال می تواند ناشی از بار ویا ترانسدیوسری که برای اندازه گیری استفاده شده است

باشد. استثنائاتی دراین مورد مانند یکسو کننده های نمی موج و کوره های قوس الکتریک که در آن قوس بصورت اتفاقی زده می شود نیز وجوددارد.

معمولا ، هارمونیک های مرتبه بالا(بالاتراز ۵۰ ام) در سیستم های قدرت ناچیز می باشند. درحالیکه آین هارمونیک ها سبب تداخل با وسایل الکتریکی قدرت پایین می شوند، لیکن معمولا آسیبی به سیستم های قدرت وارد نمی آورند. ازسوی دیگر جمع آوری اطلاعات کاملا دقیق دراین فرکانس ها بمنظور مدل سازی سیستم های قدرت مشکل می باشد. اگر سیستم قدرت را به عناصر سری و موازی (همچنانکه درعمل هستند) تقسیم کنیم، بخش عمده ای از عناصر غیرخطی در سیستم قدرت جزء عناصر موازی محسوب می شوند(بارها). امپدانس های سری درسیستم قدرت (امپدنس اتصال کوتاه بین 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 هارمونیکی بر آن ها اعمال می شود خود منبع مهم تولید هارمونیک هستند بلکه باید گفت که اعوجاج هارمونیکی بعضی از بارهای مشترکین ویا ترکیبی از آن ها معمولا می توانند عامل تولید هارمونیک باشند.

الف-۳ اعوجاج ولتاژ و جریان

کلمهٔ هارمونیک اغلب بدون هیچگونه کلمه توضیحی دیگر و به تنهایی استفاده می شود. برای مثال ، بسیار شنیده می شود که یک محرکه موتور با قابلیت تنظیم سرعت یا یک کورهٔ القایی بدلیل وجود هارمونیک ها بصورت مناسبی نمی تواند کارکند. چرا این مسئله پدید آمده است؟ جواب می تواند یکی از سه موردزیر باشد:

۱- هارمونیک ولتاژ آنقدر زیاد است که سیستم کنترل زاویهٔ آتش بخوبی عمل نمی کند.

۲- هارمونیک جریان زیادتراز ظرفیت بعضی از تجهیزات در سیستم تغذیه (مانند ترانسفورماتور و ماشین) است که باید در زیر قدرت نامی خود کار کنند.

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

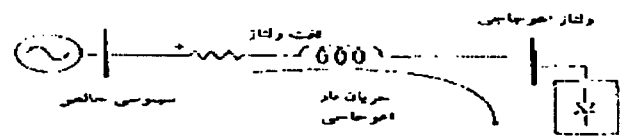
همچنانکه این موارد نشان می دهد دلایل واثرات جداگانه ای برای هارمونیک های ولتاژ و جریان و همچنین روی بعضی روابط بین این دو وجود دارد. بنابراین، واژهٔ هارمونیک به تنهایی مبهم بوده و نمی توان بکمک آن بصورت دقیق یک مسئله را توصیف کرد.

بارهای غیرخطی منبع جریان هارمونیکی هستند وباعث تزریق این جریان درسیستم قدرت می شوند. برای بیشتر بررسی ها، کافی است که بارهای تولید کنندهٔ هارمونیک ها در سیستم را بصورت منبع جریان مدل سازی کرد. البته استثناتاتی دراین خصوص وجود دارد که در ادامه توضیح داده می شود. همانطوریکه شکل ۳ نشان می دهد، اعوجاج ولتاژ دراثر عبور جریان اعوجاجی از امپدانس خطی وسری سیستم انتقال قدرت ایجاد می گردد. گرچه دراین جا فرض شده است که منبع فقط شامل ولتاژ با فرکانس اصلی است ، لیکن جریان های هارمونیکی عبور کننده از امپدانس سیستم باعث ایجاد افت ولتاژ برای هر هارمونیک خواهد شد و درنتیجه باعث ایجاد ولتاژ هارمونیکی دردو سر بار می گردد. مقدار اعوجاج ولتاژ بستگی به امپدانس وجریان دارد. با فرض اینکه اعوجاج شینه در حد قابل قبولی باقی بماند(مثلا کمتراز ۵ درصد) ، مقدار جریان هارمونیکی تولید شده توسط بار تقریبا برای هر سطح باری ثابت است.

درحالی که هارمونیک های جریان بار درنهایت باعث اعوجاج ولتاژ می گردند، لیکن باید اشاره نمود که بار هیچگونه کنترلی روی اعوجاج ولتاژ ندارد. یک بار یکسان دردو محل مختلف یک سیستم قدرت دو مقدار متفاوت اعوجاج ولتاژ ایجاد می کند. درک این حقیقت پایه ای برای تقسیم مسئولیتها در کنترل هارمونیک ها است که مثلا دربخش استاندارد هارمونیک ها به آن اشاره شده است.

۱- کنترل برروی مقدار هارمونیک جریان تزریق شده به سیستم در نقطهٔ ورودی به مشترک انجام می شود.

۲- با فرض اینکه هارمونیک جریان تزریقی درحد قابل قبولی قرار گرفته باشد، کنترل بر روی اعوجاج ولتاژ با کنترل بر روی امپدانس سیستم صورت می گیرد.



شکل۳-جریان های هارمونیکی که از امپدانس سیستم عبورکرده وروی بار ولتاژ هارمونیکی ایجاد می کنند

الف-٤ هارمونیک ها وحالت های گذرا

به جای بسیاری از اغتشاشات که درواقع گذرا هستند هارمونیک ها مورد مؤاخـذه قـرار مـی گـیرند. اندازه گیری هرپدیده ممکن است که شکل موج اعوجاجی با فرکانس های بسیار بالا را نشـان دهـد. گرچه اغتشاشات گذرا نیز شامل مؤلفه های فرکانس بالا می باشند، اما حالت گـذرا وهـارمونیک هـا پدیده های متمایزی بوده و به صورت متفاوتی بررسی و تحلیل می گردند. فرکانس موج های گـذرا، بالا می باشندو تنها لحظه ای پس از یک تغییر نـاگـهانی در سیسـتم قـدرت بوجـود مـی آینـد. ایـن فرکانسها لزوما فرکانس هارمونیکی نیستندو فرکانس طبیعی سیستم در لحظهٔ کلیدزنـی مـی باشـند و ارتباطی با فرکانس مؤلفه اصلی سیستم ندارند.

طبق تعریف، هارمونیک ها در حالت مانا اتفاق می افتند و مضرب صحیحی ازفرکانس مؤلفـهٔ اصلـی می باشند. موج های اعوجاج یافته که دارای هارمونیک هستند، به صورت پیوسته وجود داشـته و یـا حداقل برای چندین ثانیه باقی می مانند. گذراها معمولا درطی چندین سیکل از بین می روند. حـالت گذرا در ارتباط با یک تغییر در سیستم مانند کلیدزنی خازن ها رخ می دهد. درحالی که هارمونیک ها همراه با عملکرد پیوسته بار بوجود می آیند.

حالتی که این تمایز را از بین می برد برقدار کردن ترانسفورماتوراست. این یک پدیدهٔ گذرا بـه شـمار می آید ولی موج اعوجاجی قابل ملاحظه ای را به مدت چند ثانیه تولید می کند و می تـوان موجـب ایجاد تشدید در سیستم شود.

الف-٥ مقادیر مؤثر واعوجاج هارمونیکی کلی

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

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h}}}{M_1} \qquad (1)$$

که در آن M_h مقدار مؤثر مؤلفهٔ هارمونیک h ام کمیت M می باشد. THD معیار انـدازه گـیری مقـدار مؤثر مؤلفه هارمونیکی یک موج اعوجاجی است.

باتوجه به اینکه مقدرا مؤثر کلیک مورج (RMS) برابر با جمع مؤلفه های آن نمی باشد بلکـه مجـذور جمع مربعات است. توسط رابطه شماره (٢) می توان THD را به مقدار مؤثر شکل موج ارتباط داد:

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1\sqrt{1+(THD)^2} \qquad (۲)$$

THD کمیتی مفید برای بسیاری از کاربردها می باشد ولیکن محدودیت هایش را نیز باید مورد لحاظ قرارداد.این کمیت می تواند ایدهٔ خوبی از حرارت اضافی ایجاد شده دریک 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 کمیت نشانه خوبی از تنش ولتاژی برخازن نمی باشد زیرا این تنش با مقدار پیک شکل موج ولتاژ در ارتباط است.

همانطوری که مشاهده شده شاخص THD به منظور مشخص نمودن مقدار هارمونیک ها بصورت نسبت آن ها به مقدار مؤلفهٔ اصلی تعریف گردید. اگر مؤلفهٔ اصلی نداشته باشیم در نتیجه مقدار THD بی نهایت می شود. برای مثال برای سیگنال$I(t) = \cos(3wt) + \cos(5wt)$ مقدار $THD = \infty$ خواهدبود.

این شرایط زمانی پدید خواهدآمد که ولتاژ و جریان با فرکانس نامی شبکه بصورت الکترونیکی یا توسط کلیدزنی زیر سنکرون و یا توسط اعوجاج ناشی از سیگنال های کنترل کننده که برای بهتر کردن استراتژی کلیدزنی استفاده می شود مدوله شود. اگر یک ولتاژ ۵۰ هرتز با استفاده از سیستم مدوله شده با پهنای پالس (PWM) برای کنترل موتورالقایی کنترل شود ، ولتاژ استاتور موتور القایی دارای مؤلفهٔ $50 \pm fm$ خواهدبود که fm فرکانس بسیار پایین به اندازهٔ ۰/۲ هرتز است. بنابراین فرکانس ۵۰ هرتز در شکل موج ولتاژ دیگر وجود ندارد.

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

$$DIN = \left[\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}\right] \qquad (۳)$$

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 بجای DIN ترجیح می دهند. این دوشاخص با تعاریف زیر به یکدیگر مرتبط می شوند.

$$DIN = \frac{THD}{\sqrt{1+(THD)^2}} \qquad (٤)$$

$$THD = \frac{DIN}{\sqrt{1-(DIN)^2}} \qquad (٥)$$

درصورتی که مقدار اعوجاج هارمونیکی کم باشد از بسط سری تیلور $\sqrt{1+x}, \frac{1}{x+1}$ می توان استفاده نمود و روابط تقریبی زیر را بدست آورد.

$$DIN \approx THD(1-\frac{1}{2}(THD)^2) \qquad (٦)$$

$$THD \approx DIN(1+\frac{1}{2}(DIN)^2) \qquad (٧)$$

درصورتی که اعوجاج کم باشد مقادیر THD وDIN باهم برابر هستند.

هارمونیک های ولتاژ همیشه درزمان نمونه بـــرداری به مقادیر مؤلفـه اصلی شـکل مـوج ارجـاع داده می شوند.چون ولتاژفقط برای چنددرصدتغییرمی کند مقدارTHD ولتاژدارای مفهوم مهندسی می باشد. ولی درمورد جریان این مورد صادق نیست. یک جریان کم ممکن است که THD بزرگی داشـته باشـد اما خطر مهمی بر روی سیستم ایجاد نکند. باتوجه به اینکه اغلب وسایل مونیتورینـگ، مقـدارTHD را برحسب نمونه های موجود محاسبه می کنند، درنتیجه ممکن است استفاده کنندگان نسبت بـــه اینکـه این جریان برای سیستم خطرناک می باشد یا خیر دچار اشتباه شوند.

برخی از تحلیل گران سیستم، با استفاده از ارجاع به مقدار حداکثر جریان مورد تقاضا بجای ارجاع به مؤلفهٔ اصلی نمونه های موجود، از این مشکل پرهیز می کنند. این کمیت به اعوجاج مصرفی کلـی یـا TDD معروف بوده و در استاندارد IEEE شماره ۵۱۹ به آن اشاره شده است.

الف-٦ قدرت وضریب قدرت

اعوجاج هارمونیکی محاسبه توان وضریب قدرت را مشکل می سازد، زیرابسیاری از ساده سازی های صورت گرفته برای تحلیل فرکانس قدرت دراین حالت قابل اعمال نخواهند بود.

سه کمیت استاندارد در رابطه با توان استفاده می شوند:

توان ظاهری(S) : ازضریب مقدار مؤثر ولتاژ و جریان حاصل می شود.

توان اکتیو(P) : مقدار متوسط توان تحویلی

توان راکتیو(Q) : بخشی از توان ظاهری که ۹۰ درجه با توان اکتیو اختلاف فاز دارد.

در فرکانس مؤلفهٔ اصلی، این مقادیر را براحتی می توان به یکدیگر به صورت زیر مرتبط نمود:

$$P = SCos\theta \qquad (٨)$$

$$Q = SSin\theta \qquad (٩)$$

که در آن θ زوایه فاز بین ولتاژ وجریان می باشد.

پارامتر $\cos\theta$ ضریب قدرت نامیده می شود. بهرحال، تعریف دقیق تر آن بصورت رابطهٔ زیراست:

$$PF = \frac{P}{S} \qquad (۱۰)$$

مقادیر P وS را می توان بدون ابهام حتی در صورت وجـود اعوجـاج ولتـاژ وجریـان تعریـف نمـود. درحالیکه هیچ مفهوم روشنی از زاویه فاز در شرایطی که چن)دین فرکانس داشته باشیم وجود ندارد.

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \qquad (۱۱)$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt \qquad (۱۲)$$

وقتی که ولتاژفقط دارای فرکانس مؤلفه اصلی باشد،توان حقیقی بصورت شکل آشنای زیر در می آید:

$$P = \frac{V_1 I_1}{2}\cos\theta = V_{1rms} I_{1rms}\cos\theta_1$$

این معادله نشان می دهد که توان اکتیو متوسط فقط تابعی از کمیت هـای بـا فرکـانس مؤلفـه اصلـی است. بدلیل اینکه اعوجاج ولتاژ در سیستم های قدرت بسیار کم است (معمولا کمتراز ۵ درصد)، این معادله تخمین خوبی صرفنظر از مقدار اعوجاج جریان می باشد.

از سوی دیگر، واژه های توان ظاهری وتوان راکتیو تحت تأثیر اعوجاج قرار می گیرند. توان ظـاهری (S) متناسب با مقدار مؤثر جریان اعوجاج یافته است و درنتیجه محاسبهٔ آن به آسانی امکان پذیراست گرچه این محاسبه کمی پیچیده تراز حالت موج سینوسی می باشد. همچنین درحال حاضر بسیاری از وسایل اندازه گیری می توانند بصورت مستقیم مقدار واقعی مؤثـر شـکل مـوج اعوجـاجی را انـدازه بگیرند. افراد خبره در خصوص تعریف Q ، هنگام وجود هارمونیک ها اختلاف عقیـده دارنـد. چـون بسیاری از شـرکت های برق مقدار Q را اندازه گیـری و ضریـب قـدرت را بااسـتفاده از آن محاسـبه می نمایند، این موضوع قابل بحث است . تعیین مقدار P وS بسـیار مـهم اسـت زیـرا P مقـدرا تـوان مصرف شده را مشخص نموده و S ظرفیت لازم سیستم قـدرت بمنظـور انتقـال تـوان P را تعریـف می کند. در نتیجه Q به نوبهٔ خود واقعا مفید نیست. درنظر مهندسـین مـیزان تـوان راکتیـو وقتـی کـه اعوجاج وجود دارد مسئله جالبی است .

مفهوم پخش توان راکتیو در سیستم های قدرت عمیقا در ذهن بسیاری از مهندسین برق نقـش بسـته است. وقتی اعوجاج وجود دارد، مؤلفه ای از S که بعداز کم کردن P حـاصل مـی شـود یـک کمیـت کنسرواتیو نیست یعنی مجموع آن دریک گره صفر نمی شود. دریک سیستم قدرت فرض می شود که کلیه کمیت های قدرت جاری در آن به صورت کنسرواتیو باشند.

برخی از محققین پیشنهاد داده اند که Q به مؤلفه های راکتیو کنسرواتیو اشاره کند و کمیت جدیدی برای مؤلفه هایی که کنسرواتیو نیستند معرفی شود.

بسیاری این مؤلفه جدید (D) را توان اعوجاجی می نامند یا به شکل ساده ولت آمپر اعوجاجی گفته می شود. واحد آن ولت آمپراست ولی به راحتی نمی توان به آن کمیت توان اطلاق کرد زیرا در سیستم همچنانکه توان حقیقی پخش می شود، جریان نمی یابد. با این مفهوم ،Q شامل جمع مقدار توان راکتیو در هر فرکانس است و D از ضریب خارجی مقادیر ولتاژ و جریان در فرکانس های مختلف حاصل می شود. و مقدار متوسطی ندارد. پارامترهای S,D,Q,P با رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می شوند:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \qquad (١٤)$$

$$Q = \sum_K V_K I_K \sin\theta_K \qquad (١٥)$$

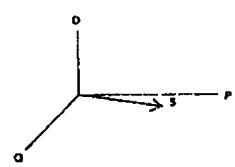
بنابراین D را می توان بعداز تعیین Q , P , S چنین محاسبه نمود:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \qquad (١٦)$$

برخی از یک بردار سه بعدی، برای نشان دادن روابط بین این کمیات استفاده می کنند(رجوع شود به شکل ٤).

مؤلفه فرکانس اصلی توان راکتیو (Q_1) برای تعیین اندازهٔ خازن لازم برای تصحیح ضریب قدرت مفید می باشد. خازن ها فقط Q_1 را تصحیح می کنند.

شکل ٤- ارتباط مؤلفه های مختلف توان ظاهری



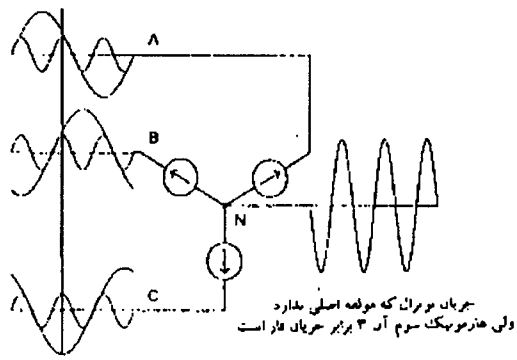
واژه ضریب قدرت جابجایی برای توصیف ضریب قدرتی بکار می رود که تنها از مؤلفه های فرکانس اصلی بدست می آید. وسایل مونیتورینگ کیفیت برق این مقدار را می توانند اندازه گیری کنند. علاوه بر آن ضریب قدرت واقعی که بصورت PF قبلا معرفی شده است (رابطـه ۱۰) را انـدازه مـی گـیرند. بسیاری از تجهیزات مانند محرکه های موتور با قابلیت تنظیم سرعت دارای ضریب قدرت جابجـایی برابر یک می باشند در حالیکه ضریب قدرت واقعی آن ها ۰/۵ تا ۰/٦ می باشد. خازن نصب شـده در طرف AC دراین حالت اثر کمی در جهت اصلاح ضریب قدرت واقعی خواهدداشت. در حقیقت، اگر در شرایط تشدید قرار گیرد، اعوجاج بیشتر شده و نتیجه ضریب قدرت بدتر می شود. ضریب قدرت واقعی، اندازهٔ سیستم انتقال قدرت را که باید بمنظور تغذیه بار ساخته شود مشخص می کنـد. دراین مثال، استفاده از ضریب قدرت جابجایی استنباط نادرستی را دررابطه با ایمنی سیستم بوجود می آورد. بسیاری از وسایل اندازه گیری دیماند فقط Q_1 را محاسبه مـی کننـد. خوشـبختانه، در اکـثر حـالات، جریان هارمونیکی درمحل اندازه گیری به اندازهٔ جریـان هـای دیگـر بارهـا نبـوده و در نتیجـه خطـا کوچک می باشد(به نفع مشترکین) . دراین خصوص چندین استثناء مانند ایستگاه های پمپـاژ کـه در آن محرکه های موتور تنها بار موجود درمحل می باشند وجود دارد. درحالیکه اندازه گیرهـای انـرژی به دلیل اعوجاج کم ولتاژ به اندازه کافی دقیق هستند ولی دستگاههای اندازه گیری دیماند می تواننـد خطاهای زیادی را در بر داشته باشند.

درانتها می توان گفت که اعوجاج باعث ایجاد مؤلفه های اضافی جریان در سیستم می شود که خـود سبب تلفات انرژی در عناصری از سیستم قدرت می گردد که این جریان ها از آن عبور مـی کنـد. در نتیجه لازم است سیستم ظرفیت بزرگتری برای انتقال توان به بار داشته باشد. به منظور آشنایی بیشـتر با کمیت های توان، ولتاژ و جریان در یک محیط هارمونیکی به ضمیمهٔ ب مراجعه شود.

الف-۷ هارمونیک های مرتبه سه

هارمونیک های مرتبه سـه ضرایـب فـردی از هـارمونیک سـوم هسـتند(...، ۲۱،۱۵، ۹، ۳= h) . ایـن هارمونیک ها احتیاج به بررسی های ویژه ای دارند زیرا پاسخ سیسـتم در برابـر ایـن هـارمونیک هـا متفاوت از پاسخ آن در برابر دیگر هارمونیک ها می باشد.

هارمونیک های مرتبه سه یکی از مهمترین موضوعات در سیستم های با ستارهٔ زمین شـده اسـت کـه جریان در نوترال آن ها وجود دارد. در مشکل عمده، اضافه بار نوترال و تداخلات تلفنـی مـی باشـد. همچنین بعضی از دستگاهها بدلیل اینکه عمل نمی نمایند، برای یک سیستم کاملا متعـادل متشـکل از بارهای تک فاز در شکل ٥ فرض کنید که مؤلفه های هارمونیک سوم و اصلـی هـردو وجـود داشـته باشند. با جمع جریان ها در گرهٔ نوترال (گره N) ، جریان مؤلفهٔ اصلـی صفـر مـی شـود. ولـی بدلیـل همفاز بودن مؤلفه های فاز هارمونیک سوم، مقدار این مؤلفه ها سه برابر جریان فاز هـارمونیک سـوم خواهد بود.

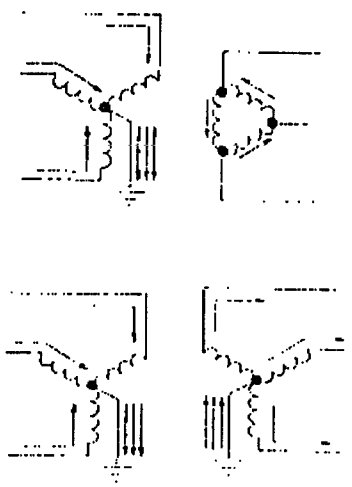


شکل٥- جریان زیاد نول در مدارهای تغذیه کننده بارهای غیرخطی تکفاز

نوع اتصال سیم پیچ ترانسفورماتورها تأثیر بسزایی درعبور جریان های هارمونیک مرتبه سـه ناشـی از بارهای غیرخطی تک فاز دارد. دوحالت درشکل ٦ نشان داده شده است.

در ترانسفورماتور با اتصال ستاره - مثلث جریـان های هارمونیک مـرتبه سه بـه طـرف سـتاره وارد می شوند.چون آن ها هم فاز هستند در نقطهٔ نوترال با یکدیگر جمع می شوند. به دلیل قـانون تعـادل آمپر دورها در سیم پیچی های طرف مثلث جریان هارمونیک سوم بوجود می آید. ولی این جریان هـا

در داخل مثلث گرفتار شده و در جریان های خط ظاهر نمی شوند. وقتی که جریان ها متعادل باشند، جریان های هارمونیک مرتبهٔ صفر رفتار کنند.



شکل ٦- مسیر عبور جریان هارمونیک سوم در ترانسفورماتور سه فاز

این نوع اتصال در اغلب ترانسفورماتورهای پست های توزیع وجود داشته که در آن ها طرف مثلث

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

قطع کردن اتصال نوترال دریک یا دو طر سیم بندی های ستاره عبور جریان هارمونیک مرتبهٔ سوم را سد می نماید. درنتیجه تعادل آمپر دورها ایجاد نمی شود. شبیه به سیم پیچی مثلث که عبور هارمونیک مرتبه سوم به خط را مسدود می نماید.

باید توجه نمود که ترانسفورماتورهای با هسته سه ستونه درصورتی که دارای سیم پیچ سوم با اتصال مثلث باشند رفتار مناسبی را ازخود نشان خواهند داد. بنابراین، ترانسفورماتورستاره - ستاره با یک نقطهٔ نوترال متصل شده 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 آن ها نمی رود ایجاد می شوند. حالت عادی برای هارمونیک های مرتبهٔ سوم توالی صفراست . درهنگام عدم تعادل، هارمونیک های مرتبهٔ سوم ممکن است که دارای مؤلفه های توالی مثبت ومنفی نیز باشند. یک مورد قابل توجه ازاین حالت وجودکورهٔ قوس الکتریکی سه فاز می باشد. گرچه این کوره ها توسط اتصال مثلث تغذیه می شوند، لیکن وقتی که درحال کارکردن در حالت نامتعادل هستند هارمونیک سوم زیادی را درجریان خط بوجود می آورند.

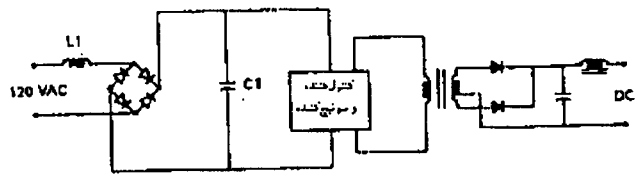
الف-۸ منابع تغذیه تک فاز

بارهای تغذیه شده از طرف مبدلهایی که تولید هارمونیک می کنند درحال حاضر مهمترین بارهای غیرخطی سیستم های قدرت را تشکیل می دهند. در دهه گذشته، پیشرفت در تکنولوژی نیمه هادیها، انقلابی را در مبحث الکترونیک قدرت بوجود آورده است و نشانه های زیادی وجود دارد که این روند ادامه خواهدداشت. این تجهیزات شامل محرکه های موتور با قابلیت تنظیم سرعت، منابع تغذیه الکترونیک قدرت، راه اندازی های موتورهای جریان مستقیم، شارژ کننده های باطری، بالاستهای الکترونیک وبسیاری از یکسوکننده ها می باشند. مهمترین نگرانی در ساختمان های تجاری وجود تجهیزات الکترونیکی تک فازی است که اعوجاج های زیادی را در سیستم سیم کشی ایجاد می کنند. توان جریان مستقیم برای تجهیزات مدرن الکترونیکی و میکروپروسسوری مورد استفاده دراین ساختمان ها از طریق یکسوکنندهٔ تمام موج دیودی تک فاز، تأمین می شود. از سوی دیگر درصد

بارهایی که شامل المان های الکترونیک قدرت هستند بطور افزاینده ای بدلیل استفاده از کامپیوترهـای شخصی در بخش های تجاری رشد یافته است.

دو نوع اصلی منبع تغذیه تک فاز وجود دارد. تکنولوژی قدیمی تر از کنترل ولتاژ در طـرف متنـاوب (مانند ترانسفورماتور) استفاده می کند تا ولتاژ را در سطح مـورد نیـاز طـرف مسـتقیم کـاهش دهـد. اندوکتانس ترانسفورماتور دارای این حسن جانبی است که شکل موج جریان ورودی صاف تر شده و هارمونیک ها کاهش می یابند.

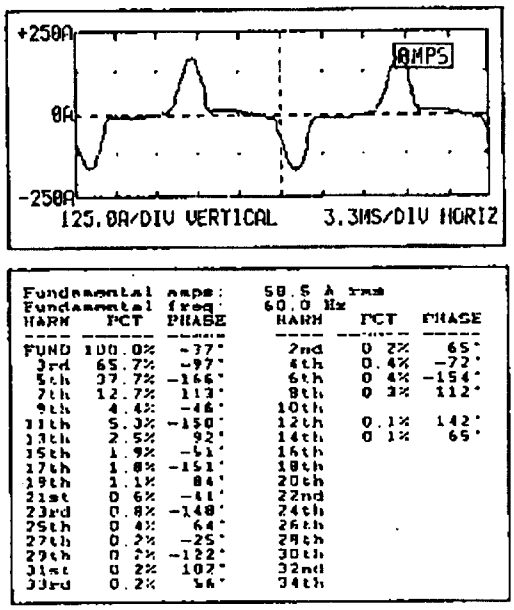
درتکنولوژی جدیدتر، ازمنابع تغذیه سوئیچینگ (رجوع شود به شـکل ۷) اسـتفاده مـی کننـد. دراین سیستم از تبدیل DC/DC برای ایجاد خروجی مطلوب تر استفاده می شود ودرنتیجـه تجـهیزات مـورد استفاده سبک تر خواهندبود. پل دیود ورودی بصورت مستقیم به خط AC متصل مـی شود در نتیجـه نیازی به ترانسفورماتور نخواهدبود. این حالت باعث ایجاد یک ولتاژ AC متصل مـی شـود در نتیجـه نیازی به ترانسفورماتورنخواهدبود. این حالت باعث ایجاد یک ولتاژ DC تنظیم شده نه چندان خـوب در دو سر خازن می گردد. این ولتاژ DC سپس توسط یک سوئیچ کننده فرکـانس بـالا بـه حـالت AC برمی گردد و بعداز آن دوباره یکسو می شود. کامپیوترهای شخصی،چـاپگرهـا، دسـتگاههای کپـی و بسیاری از وسایل الکترونیکی تک فاز درحال حاضر ازاین نوع منابع تغذیه استفاده می کنند.



شکل۷- منابع تغذیه سوئیچینگ

مزیت اصلی این سیستم وزن کم، اندازهٔ کوچک ، راندمان بالا و عدم نیاز به ترانسفورماتور می باشـد. این سیستم تغییرات شدید در ولتاژ ورودی را نیز تحمل می کند.

بدلیل اینکه اندوکتانس بزرگی در طرف AC آن نیست، جریان ورودی به منبع تغذیه درهنگام شارژ خازن C_1 بصورت پالس های کوتاهی درهر نیم سیکل درخواهد آمد. شکل ۸ موج جریان و نیز طیف هارمونیکی آن را برای یک مدار تغذیه کننده وسایل الکترونیک با روش تغذیه سوئیچینگ نشان می دهد.



شکل ۸–جریان منبع تغذیه سوئیچینگ و طیف هارمونیک آن

مشخصهٔ متمایز منابع تغذیه سوئیچینگ وجود مؤلفه هارمونیک سوم بسیار بالا درجریان آن ها است. چون مؤلفه های هارمونیک سوم جریان در نقطهٔ نوترال با یکدیگر جمع می گردند لذا افزایش کاربرد منابع تغذیه سوئیچینگ باعث اضافه بار در هادی های نوترال می گردد. این نگرانی در مورد ساختمان های قدیمی که نوترال آن ها کوچک انتخاب شده اند نگرانی بیشتری را به دنبال دارد. درصورتی که بار شامل مقدار زیادی منابع تغذیه سوئیچینگ باشد گرم شدن ترانسفورماتورها نیز باید مدنظر قرار گیرد.

ازاین روش تغذیه در سیستم های روشنایی فلورسنت با بالاست الکترونیک نیز استفاده می شود. ایجاد ولتاژ خروجی کنترل شده با فرکانس بالا که توسط اینورترهای ترانزیستوری امکان پذیرشده

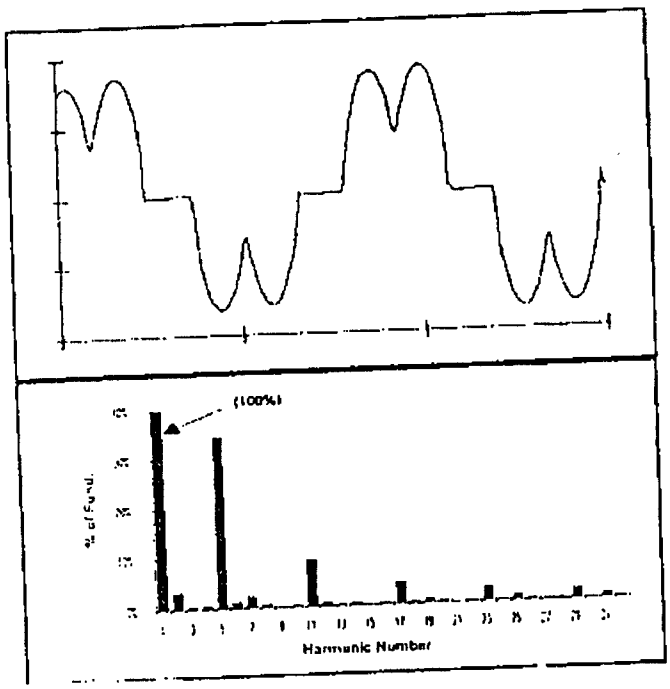
است باعث افزایش راندمان فلورسنت ها شده و اجازه کنترل های پیچیده تری مانند کم وزیاد کـردن نوررا نیز خواهد داد. جریان های هارمونیکی توسط بسیاری از بالاست های الکترونیک مورد اسـتفاده در منابع تغذیه کامپیوترها ودیگر تجهیزات الکترونیکی تولید می شوند. افزایش تولید هارمونیک ناشی از استفاده فراوان از روشنایی فلورسنت ها بسیار مهم می باشد، زیرا این نوع روشنایی برای ٤٠ تـا ٦٠ درصد ساختمان های اداری - تجاری استفاده می شود. بعضی تولیدکنندگان طراحی های خـود را بـه نحوی انجام می دهند که شکل موج جریان را به حالت سینوسی نزدیک نمایند.

الف -۹ مبدل های قدرت سه فاز

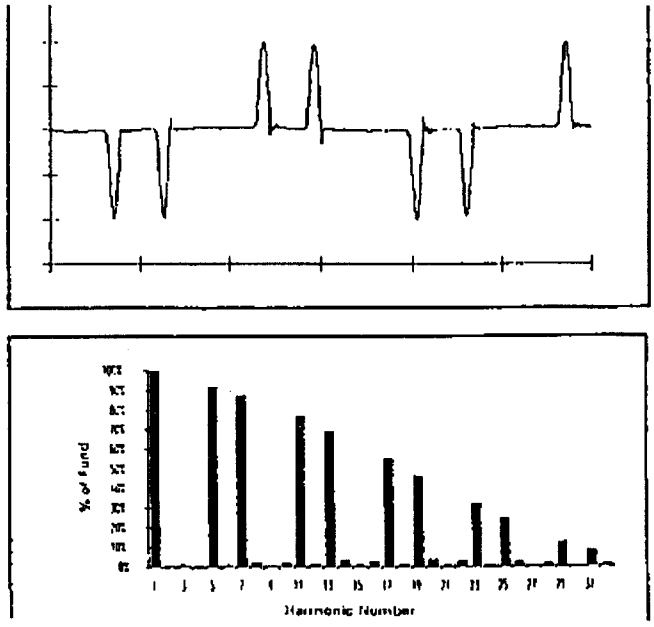
مبدل های الکترونیکی قدرت سه فاز با مبدل های تک فاز تفاوت دارند، چون جریـان آن هـا حـاوی هارمونیک سوم نیست . باتوجه به اینکه قدرت این دستگاهها زیادتر می باشد لذا نداشتن هـارمونیک سوم یک مزیت به شمار می رود. به هرحال ، این دستگاهها می توانند همچنـان منـابع اصلـی تولیـد هارمونیک درفرکانس های مشخصه خودباشند. طیف هارمونیکی نشان داده شده در شکل ۹ می تواند به عنوان نمونه، جریان ورودی به یک محرکه موتور DC درنظر گرفته شود. محرکـه هـای اینورتـری منبع ولتاژی ، مانند محرکه هایی که از تکنیک PWM [1] اسـتفاده مـی کننـد، سـطح اعوجـاجی بسـیار بزرگتری را می توانند ایجاد کنند(رجوع شود به شکل ۱۰).

منابع تغذیه سوئیچینگ برای قدرت های کم استفاده شده درحالی کـه محرکـه هـایی کـه از تکنیـک PWM استفاده می کنند برای بارهای تا ۵۰۰ اسب بخار مورد استفاده قرار می گیرند.

1-



شکل ۹- طیف هارمونیکی یک محرکه AC ازنوع اینورترهای جریان (CSI)

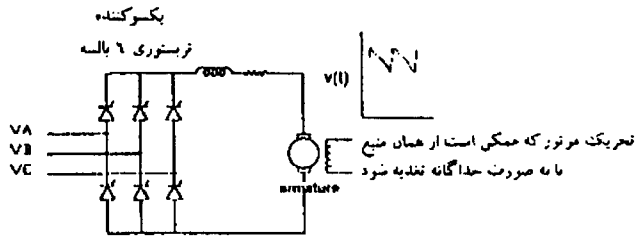


شکل ۱۰- طیف هارمونیکی برای یک راه اندازAC ازنوعPWM

الف-۹-۱ محرکه های DC

یکسوسازی تنها عمل مورد نیاز برای محرکه های DC است. بنابراین، سیستم کنترل آنها نسبتا ساده می باشد.در مقایسه با سیستم های با محرکه های AC ، محرکه های DC محدودهٔ وسیعتری از کنترل سرعت ایجاد نموده و همچنین گشتاور راه اندازی بالایی را بوجود می آورند. بهرحال، قیمت و هزینه نگهداری موتورهای DC زیاد می باشدولی درعوض هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت هر ساله کم می شود. بنابراین از نقطه نظر اقتصادی کاربرد محرکه های DC محدود به کاربردهایی می شود که در آن ها مشخصه گشتاور- سرعت یک موتر DC مورد نیاز باشد.

اغلب محرکه های DC از یکسوکننده های شش پالسی(رجوع شودبه شکل ۱۱) استفاده می کنند. محرکه های بزرگتراز یکسوکننده های ۱۲ پالسی بهره می گیرند. این کار باعث کاهش جریان هر تریستور شده و بعضی از هارمونیک ها درطرف AC را نیز کاهش می دهد. دو مؤلفهٔ پنجم وهفتم جریان درایوهای شش پالسی دارای مقدار قابل ملاحظه ای هستند. این مؤلفه ها نیز اثرات مشکل زایی را درسیستم قدرت ایجاد می کنند. یکسوکننده های ۱۲ پالسی درحدود۹۰ درصد هارمونیک های پنجم وهفتم را باتوجه به میزان عدم تعادل سیستم حذف می کنند. یکی از معایب درایوهای ۱۲ پالسی هزینهٔ بالای تجهیزات الکترونیکی وترانسفورماتور اضافی دیگری است که مورد نیاز خواهد بود.



شکل۱۱- محرکه با قابلیت تنظیم سرعت یک موتورDC شش پالسی

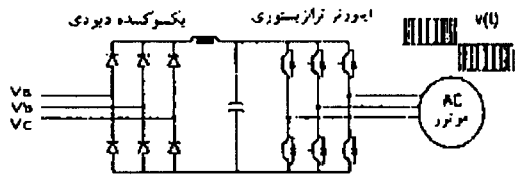
الف-۹-۲ محرکه های AC

درمحرکه های جریان متناوب (ASD)[1] ، ازخروجی یکسو کننده برای تولید ولتاژ AC استفاده شده که این ولتاژ با فرکانس قابل تنظیم برای تغذیهٔ موتورها بکار می رود. اینورترها به دو دسته تقسیم می شوند:

- اینورترهای ولتاژ (VSI) [1]
- اینورترهای جریان (CSI)[2]

برای ورودی یک VSI احتیاج به یک منبع ولتاژ DC ثابت (باریپل کم) است. این امر را می توان با استفاده از یک خازن یا فیلتر LC درطرف DC فراهم نمود. ورودی یک CSI احتیاج به یک منبع جریان ثابت دارد. بنابراین دربخش DC یک اندوکتور سری قرار داده می شود.

محرکه های AC معمولا برای موتورهای القایی قفس سنجابی استفاده می شوند. قیمت این موتورها نسبتا کم وهزینه تعمیرات کمی دارند. موتورهای سنکرون زمانی استفاده می شوند که نیاز به کنترل دقیق سرعت باشد. عمومی ترین نوع محرکه های AC از یک VSI همراه با تکنیک PWM استفاده می کند(رجوع شودبه شکل ۱۲).



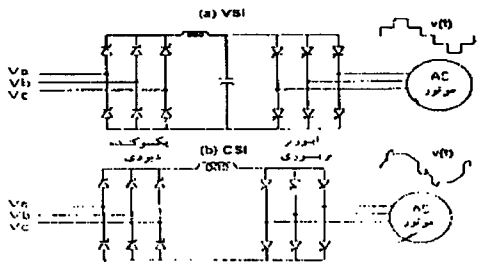
شکل ۱۲- شمای یک محرکه با قابلیت تنظیم سرعت که از تکنیک PWM استفاده می کند

دراینورترهای از یکسوکننده های سیلیکونی(SCR) [3] ، تریستورهای از نوع GTO [4] ویا از ترانزیستورهای قدرت استفاده می شود. درحال حاضر ، محرکه های ازاین نوع بیشترین بازدهی انرژی راروی محدودهٔ وسیعی از سرعت برای قدرتهای تا ۵۰۰ اسب بخار بوجود می آورند.

1- Automatic Speed Drive
2- Voltage Source Inverter
3- Current Source Inverter

مزیت دیگر محرکه های فوق این است که به تغییر ولتاژ خروجی یکسوکننده برای کنترل دور موتر نیازی نیست. این مزیت موجب می شود که بتوان از دیود بجای تریستور در یکسوکننده استفاده نمودودر نتیجه مدار کنترل تریستورها نیز حذف می شود.

محرکه های با قدرت بالا از یکسو کننده های SCR و اینورتر استفاده می کنند. این محرکه ها می توانند بصورت ٦ پالسی (رجوع شود به شکل ١٣) و یا برای قدرت های بالا ١٢ پالسی باشند. درایوهای VSI (رجوع شود به شکل ١٣a) درشرایطی استفاده می گردند که به تغییرات مربع سرعت احتیاج نیست . درایوهای CSI (رجوع شود به شکل ١٣b) دارای مشخصه خوب شتاب گیری یا کاهش سرعت هستند ولی نیاز به موتورهایی با ضریب قدرت پیش فاز(سنکرون یا القایی همراه با خازن) یا مدار کنترل که عمل کموتاسیون تریستورهای اینورتر را انجام دهند دارد. درهر دو حالت ، محرکه های CSI باید برای یک موتور با قدرت خاص مشخص طراحی گردند.

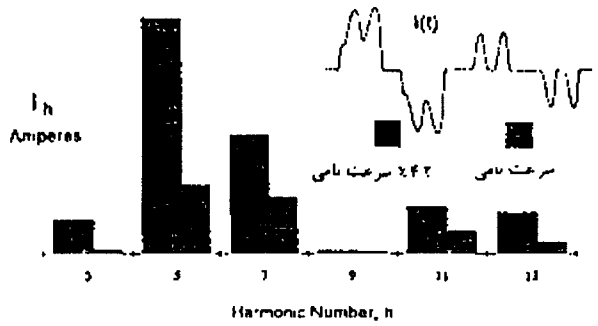


شکل ١٣- محرکه های با قدرت بالا

الف-٩-٣ اثر شرایط کاری

اعوجاج هارمونیکی جریان در محرکه های با قابلیت تنظیم سرعت مقداری ثابت نمی باشد. شکل موج جریان برای گشتاورها و سرعت های مختلف به مقدار قابل ملاحظه ای تغییر می کند. شکل ١٤ دو شرایط کاری یک محرکه با قابلیت تنظیم سرعت را نشان می دهدکه ازتکنیک PWM استفاده می کند.

4-



شکل ١٤- تأثیر سرعت یک محرکه با قابلیت تنظیم سرعت روی هارمونیک های جریان

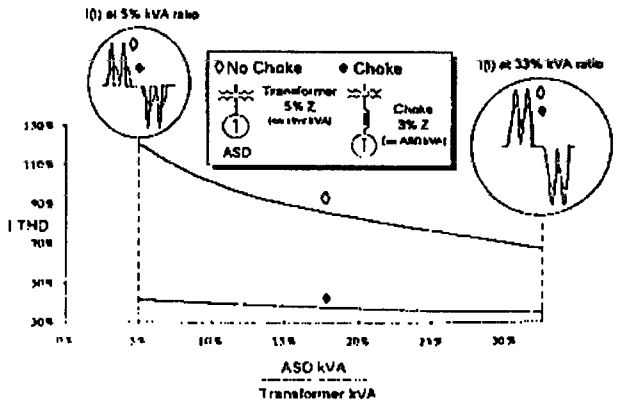
درحالی که شکل موج در٤٢ درصد سرعت نامی دارای اعوجاج بیشتری بوده، ولـی در مقـام مقایسـه مقدار هارمونیک جریان در سرعت نامی بیشتراست. نمودار ستونی، مقدار جریان را نشـان مـی دهـد. درنتیجه ، این مطلب یک محدودیت اصلی در طراحی است و نه بیشترین مقدار THD . مهندسین باید ابتدا مفاهیم پایه داده ها و مقادیراندازه گیری ها در ارتباط با این نوع محرکه ها را کاملا درک نموده و سپس تصمیمات مقتضی درزمینه طراحی گرفته شود.

الف-٩-٤ اثرات چک های AC روی هارمونیک ها

قراردادن راکتانس اضافی بین محرکه ومنبع ، مقدار هارمونیک جریان در طرف AC را کاهش می دهد. این روش برای محرکه های استفاده کننده از تکنیک PWM مؤثراست.

شکل ١٥ اعوجاج جریان را برحسب نسبت کیلوولت آمپر محرکه به کیلوولـت آمپـر ترانسـفورماتور برای دوحالت مختلف، یکی بدون و دیگری با چک ٣ درصدی نشان می دهد. مقدار چـک براسـاس توان پایه محرکه جریان متناوب محاسبه شده است. همچنین شکل مـوج هـای جریـان بـرای هـر دو حالت در ابتدا و انتهای منحنی نشان داده شده است. منحنی بالایی برای حالت بدون چک می باشد. اضافه کردن چک ، کاهش THD جریان را از محدوده ٩٠ تا١٠٠ درصد به محدوده ٣٠ تا٤٠ درصد به دنبال خواهد داشت. اندوکتانس، سرعت شارژ خازن در طرف DC را کاهش مـی دهـد و بـاعث مـی شود که محرکه ، جریان لازم را در مدت زمان طولانی تری بکشد. اثر نهایی کـاهش دامنـه جریـان و

محتوای هارمونیکی بوده، درحالیکه انرژی تحویلی در همان مقدار سابق باقی می ماند. چک ها همچنین اثرات حالت گذرای مربوط به کلیدزنی خازن ها را کاهش می دهند.

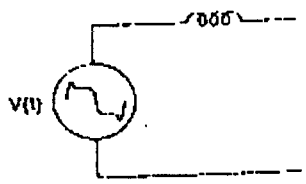


شکل ۱۵- تأثیر چک ها روی هارمونیک های جریان محرکه های AC

الف-۱۰ 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 (بجای بالاست های الکترونیکی) می باشند. همانطورکه در شکل ۱٦ نشان داده شده است قوس را می توان با یک منبع ولتاژ سری شده با راکتانس که جریان را به مقدار معقولی محدود می کند نشان داد.

مشخصهٔ ولتاژ - جریان قوس های الکتریکی غیرخطی می باشد. به دنبال جرقه زدن ، جریان قوس افزایش و درنتیجه ولتاژ آن کاهش می یابد. مقدار جریان قوس فقط توسط امپدانس سیستم محدود می شود. در چنین حالتی قوس بصورت یک مقاومت منفی برای بخشی از سیکل کاری خود ظاهر می شود. در لامپ های فلورسنت، امپدانس بالاست برای محدود کردن جریان در مقدار قابل قبول و پایداری قوس لازم می باشد. بنابراین این نوع سیستم روشنایی دارای یک امپدانس خارجی خواهد بود که بالاست نامیده می شود.



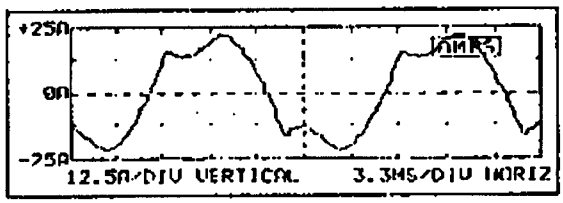
شکل۱٦- مدار معادل برای یک تجهیز قوس زننده

بالاست های مغناطیسی معمولا هارمونیک های کمی تولید می کنند، ولی اعوجاج هارمونیکی از رفتار قوس بوجود می آید. بهرحال ، بعضی بالاست های الکترونیکی 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 های الکترونیکی به نحوی طراحی می گردند که هارمونیک ها را کاهش داده و در واقع هارمونیک های کمتری از بالاست های مغناطیسی ایجاد نمایند.

در کوره های قوس های الکتریکی، امپدانس محدودکننده شامل کابل و سرسیم های کوره، امپدانس سیستم وترانسفورماتورکوره می باشد. مقدارجریان بیش از٦٠ کیلوآمپر دراین کوره ها عادی می باشد. کوره های قوس الکتریکی بهتر است به صورت منبع هارمونیک ولتاژ نمایش داده شوند. اگر ولتاژ دو سر قوس بررسی گردد، شکل موج آن تقریبا به صورت ذوزنقه بوده و مقدار آن تابعی از طول قوس است. به هرحال امپدانس بالاست به صورت یک بافرعمل نموه به نحوی که ولتاژ منبع دارای اعوجاج کمی می گردد. بنابراین بارهای قوس زننده به صورت منابع 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.

شکل ۱۷ جریان لامپ فلورسنت و طیف هارمونیکی آن را نشان می دهد. این لامپ دارای بالاست مغناطیسی است. محتوای هارمونیکی این شکل موج شبیه به کوره قوس الکتریکی ودیگر وسایل

قوس زننده می باشد. وسایل قوس زننده سه فاز به نحوی قرار می گیرند که بتوان هارمونیک های مرتبه ۳ را از طریق اتصال ترانسفورماتور حذف نمود. بهرحال نمی توان به این روش حذف هارمونیک تکیه نمود زیرا درهنگام مرحلهٔ ذوب فلز شرایط نامتعادل پدید می آید. در مرحلهٔ تصفیه وقتی که قوس ثابت تراست حذف هارمونیک های مرتبهٔ سوم بهتر صورت می گیرد. روشنایی فلورسنت ها در ساختمان های تجاری را می توان بین فازهای مختلف توزیع نمود بنحوی که مقدار هارمونیک مرتبهٔ سومی را که وارد سیستم می شود کاهش داد. باید توجه نمود که ترانسفورماتورهای ستاره - ستاره هرقدرهم که بارها بین فازها به خوبی توزیع شده باشد نمی تواند جلوی عبور هارمونیک مرتبهٔ سوم را بگیرد.



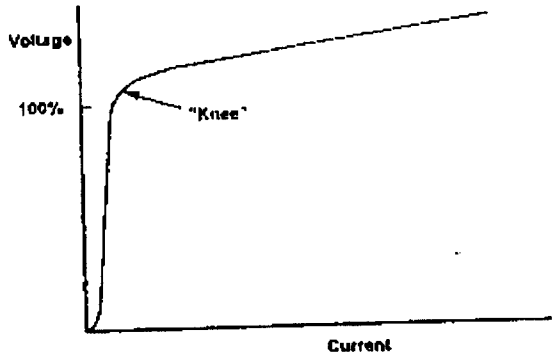
Harmonic Num	Percent (%)	Phase (deg)
1	100.0	124
2	0.2	136
3	19.9	-141
5	7.1	62
7	3.2	-39
9	2.4	-171
11	1.3	111
13	0.8	87
15	0.4	-93
17	0.8	-164
19	0.2	-77
21	0.1	160

شکل۱۷ - جریان لامپ فلورسنت و طیف هارمونیکی آن

الف-۱۱ عناصر قابل اشباع

تجهیزات قرار گرفته دراین دسته شامل ترانسفورماتورها و دیگر وسایل الکترومکانیکی با هستهٔ فولادی شامل موتورها نیز می باشند. هارمونیک ها بدلیل مشخصهٔ مغناطیس کنندگی غیرخطی آهن تولید می شوند (رجوع شود به شکل ۱۸) . ترانسفورماتورهای قدرت به نحوی طراحی می گردند که درناحیه خطی، مشخصهٔ مغناطیس کنندگی کار نمایند.

حداکثرچگالی فوران یک ترانسفورماتور براساس بهینه کردن قیمت آهن، تلفات بی باری، نویز و دیگر فاکتورها انتخاب می گردد. بسیاری از شرکت های برق تولید کنندگان و فروشندگان ترانسفورماتور را برای تلفات بی باری و بارداری ترانسفورماتور جریمه می نمایند. در نتیجه تلاش سازندگان براین پایه خواهد بود که ترانسفورماتور را به نحوی طراحی نموده که کمترین هزینه را داشته باشد. جریمه بالا بر روی تلفات بی باری و نویز سبب می شود که ازآهن بیشتری در هسته استفاده شود و همچنین از جنسی استفاده می گردد که منحنی اشباع بالاتری داشته تا هارمونیک کمتری ایجاد کند.



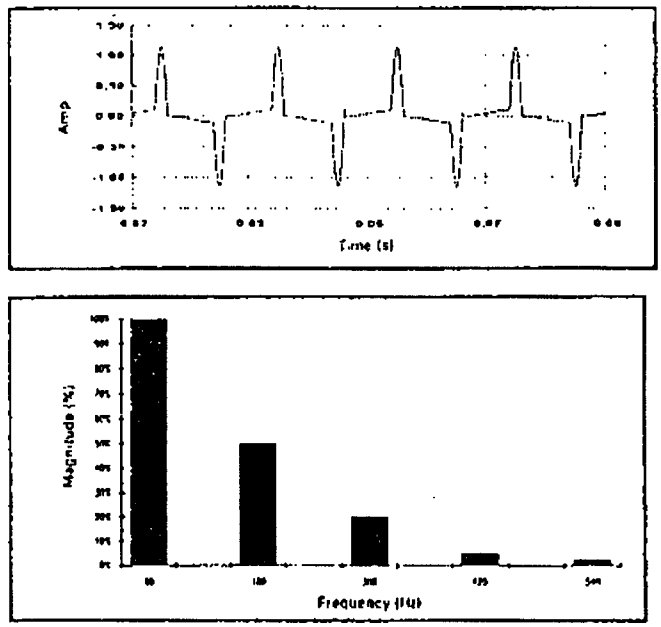
شکل ۱۸- مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور

گرچه جریان تحریک ترانسفورماتور دارای هارمونیک زیادی در سطوح ولتاژ کاری خود می باشد (رجوع شود به شکل ۱۹) ولی درعین حال مقدار این جریان حدود ۱ درصد جریان بار کامل است و در نتیجه تأثیر ترانسفورماتورها مانند مبدل های الکترونیک قدرت و وسایل قوس زننده که تولید هارمونیک جریان حدود ۲۰ درصد مقدار نامی می کنند نخواهد بود. ولی به هرحال، بخصوص در سیستم های توزیع که دارای صدها ترانسفورماتور است اثر آن قابل توجه می باشد. باید توجه نمود که هارمونیک های مرتبه سوم در هنگام کم بودن بار بدلیل بالارفتن ولتاژ به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابند. دراین حالت جریان تحریک ترانسفورماتور در مقابل جریان بار ترانسفورماتور فایل

مقایسه می گردد. اعوجاج هارمونیکی ولتاژ ناشی از جریان تحریک فقط در شرایط بار کم در سیستم بوجود می آید.

بعضی ترانسفورماتورها عمدا در ناحیهٔ اشباع کار می کنند. نمونه ای از این ترانسفورماتورها، ترانسفورماتورهایی هستند که برای تولید فرکانس ۱۵۰ هرتز در کوره های القایی استفاده می شوند. در صورتی که ولتاژ اعمالی به یک موتور از ولتاژ نامی آن بالا رود جریان آن دچار اعوجاج می شود. گرچه ، این امر عواقب کمی را به دنبال دارد. به هرحال شکل موج جریان بعضی موتورهای تک فاز با قدرت پایین بصورت مثلثی بوده و دارای هارمونیک های مرتبه سوم بالایی می باشند.

شکل موج نشان داده شده در شکل ۱۹ جریان ترانسفورماتور تک فاز یا سه فاز ستاره زمین شده را نشان می دهد. به وضوح دیده می شود که جریان دارای هارمونیک سوم بالایی است. اتصال مثلث یا ستارهٔ زمین نشده از عبور مؤلفهٔ صفر(هارمونیک های مرتبهٔ سوم) جلوگیری می کند. بنابراین جریان خط شامل این دسته هارمونیک ها نمی باشد.مگراینکه بنحوی شرایط عدم متعادل درسیستم پدید آید.



شکل ۱۹- جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور ومحتوای هارمونیکی آن

الف-۱۲ اثرات اعوجاج هارمونیکی

الف ۱۲-۱ اثرات سوء اعوجاجات هارمونیک ها

برخی از آثار سوء 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 وظیفهٔ کنترل از راه دور سیستم هـای کلیدزنـی 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 با سیستم های مخابراتی و PLC [1]
- ایجاد 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 آتش سیستم های الکـترونیک قـدرت بخصـوص مـدارات آتشـی کـه براساس تشخیص نقطهٔ صفر ولتاژ عمل می کنند.

الف-۱۲-۲ اثر هارمونیک ها روی خازن ها

در استاندارد خازن های مورد استفاده در شبکه های توزیع مقادیر نامی حـالت دائـم خـازن را چنیـن مشخص می کند.

- ۱۳۵ درصد کیلووار نامی
- ۱۱۰ درصد ولتاژ مؤثر نامی (شامل هارمونیک ها به استثنای حالت گذرا)
- ۱۳۰ درصد جریان نامی (شامل هارمونیک ها و مؤلفه اصلی)
- ۱۲۰ درصد ولتاژ پیک (شامل هارمونیک ها)

1- Programable Logic Control

جدول ۱ مثالی از ارزیابی یک خازن را نشان می دهد. در این مثال خازن تحت یک ولتاژ هـارمونیکی قرار می گیرد هدف از این مثال این است که مقادیر محاسبه شده برای این خازن را بـا حـدود مجـاز ارائه شده در بالا مقایسه نمود.

مؤلفهٔ اصلی جریان بار کامل برای یـک خـازن ۱۲۰۰ کیلـوواری در یـک سیسـتم بـا ولتـاژ خـط ۲۰ کیلوولت از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_c = \frac{Q_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{\phi\phi}} = \frac{1200\times10}{\sqrt{3}\times20000} = 34.6A \qquad (۷)$$

اصولا خازن ها در معرض دونوع هارمونیک پنجم و هفتم قرار می گیرند. اغتشاش ولتاژ ٤ درصـدی هارمونیک پنجم و ۳ درصدی هارمونیک هفتم باعث می گردد ۲۰ درصد هارمونیک پنجـم جریـان و ۲۱ درصد هارمونیک هفتم جریان داشته باشیم. مقادیر بدست آمـده در ایـن حـالت همـانطور کـه در جدول ۱ آمده است همگی زیر مقدار استاندارد قرار گرفته اند. بـه طـور کلـی هـارمونیک هـا مـیزان تلفات عایقی در خازن ها را افزایش می دهند.

جدول ۱- ارزیابی خازن ها

محاسبات مربوط به خازن ها هنگامی که توسط ولتاژهای غیر سینوسی تغذیه می شوند

اطلاعات مربوط به بانک خازنی

توان نامی	۱۲۰۰ کیلووار	فرکانس مؤلفه اصلی	۵۰ هرتز
ولتاژ نامی	۲۰۰۰۰ ولت	جریان نامی مؤلفه اصلی	۳٤/٦٤ آمپر
ولتاژ کاری	۲۰۰۰۰ ولت	راکتانس خازنی	۳۳۳/۳ اهم

مرتبه هارمونیک	فرکانس (هرتز)	دامنه ولتاژ (درصدنسبت به مؤلفه اصلی)	دامنه ولتاژ (ولت)	جریان خط (درصد نسبت به مؤلفه اصلی)
۱	۵۰	۱۰۰	۱۱۵٤۷	۱۰۰
۳	۱۵۰	۰	۰	۰
۵	۲۵۰	٤	٤٦۱/۸	۲۰
۷	۳۵۰	۳	۳٤٦/٤	۲۱
۱۱	۵۵۰	۰	۰	۰
۱۳	٦۵۰	۰	۰	۰
۱۷	۸۵۰	۰	۰	۰
۱۹	۹۵۰	۰	۰	۰
۲۱	۱۰۵۰	۰	۰	۰
۲۳	۱۱۵۰	۰	۰	۰
۲۵	۱۲۵۰	۰	۰	۰

اعوجاج کلی هارمونیک ولتاژ (THD) : ۵ درصد — اعوجاج جریان خازن : ۲۹ درصد

ولتاژ مؤثر خازن : ۱۱۵٦۱/٤۸ ولت — مقدار مؤثر جریان خازن : ۳٦/۰۵ آمپر

حدود بانک خازنی :

	محاسباتی (درصد)	حدود مجاز(درصد)
پیک ولتاژ	۱۰۷	۱۲۰
ولتاژ مؤثر	۱۰۰/۱	۱۱۰
مقدارمؤثرجریان	۱۰٤/۱	۱۳۰
توان نامی	۱۰٤/۳	۱۳۵

الف-۱۲-۳ اثر روی ترانسفورماتورهای

ترانسفورماتورها به نحوی طراحی می شوند که توان لازم را با کمترین تلفات در فرکانس اصلی به بار منتقل نمایند. اعوجاج هارمونیکی 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. به عنوان یک قاعده عمومی، ترانسفورماتوری که در آن اعوجاج جریان از ۵ درصد بیشتر باشد مقدار توان نامی آن کاهش می یابد.

موارد مختلف ناشی از مؤلفه های هارمونیکی جریان بار که باعث افزایش دمای ترانسفورماتور می گردد به ترتیب عبارتنداز:

- جریان مؤثر: اگر ظرفیت ترانسفورماتور برای مقدار KVA[1] بار انتخاب شده باشد هارمونیک جریان باعث می شود که جریان مؤثر آن بیشتر از ظرفیت مجاز شود. این افزایش جریان سبب افزایش تلفات هادی ها می شود.
- تلفات جریان گردابی: این جریان های القایی در اثر فوران های مغناطیسی در ترانسفورماتور پدید آمده و در سیم پیچی ها ، هسته و دیگر بخش های هادی که در معرض فورات میدان هستند موجو می باشند و درنتیجه تلفات حرارتی اضافی بوجود می آید. این مؤلفه از تلفات ترانسفورماتور با مربع فرکانس جریان گردابی افزایش می یابد و سهمی مهم از تلفات ترانسفورماتور می باشد. افزایش تلفات هسته ناشی از هارمونیک ها بستگی به اثر هارمونیک ها بر ولتاژ اعمالی و طراحی هستهٔ 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 . جدول ۲ روش ساده ای را به تصویر کشیده است. ضریب K که در بحث کیفیت برق و در زمینه کم شدن توان نامی ترانسفورماتور بکار برده می شود درجدول ۲ داده شده است.

1-

جدول ۲- محاسبه ضریب K برای ترانسفورماتور

توزیع هارمونیکی جریان بار ترانسفورماتور					
مرتبه هارمونیک	جریان (درصد)	فرکانس (هرتز)	جریان (پریونیت)	I^2	$I^2 \times h^2$
۱	۱۰۰	۵۰	۱	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۳	۱/۶	۱۵۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲
۵	۲۶/۱	۲۵۰	۰/۲۶۱	۰/۰۶۸	۰/۷۰۳
۷	۵/۰	۳۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۳	۰/۱۲۳
۹	۰/۳	۴۵۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱
۱۱	۸/۹	۵۵۰	۰/۰۸۹	۰/۰۰۸	۰/۹۵۸
۱۳	۳/۱	۶۵۰	۰/۰۳۱	۰/۰۰۱	۰/۱۶۲
۱۵	۰/۲	۷۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱
۱۷	۴/۸	۸۵۰	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	۰/۶۶۶
۱۹	۲/۶	۹۵۰	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱	۰/۲۴۴
۲۱	۰/۱	۱۰۵۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۲۳	۳/۳	۱۱۵۰	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱	۰/۵۷۶
۲۵	½	۱۲۵۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰	۰/۲۷۶
		جمع		۱/۰۸۴	۵/۷۱۲

فاکتور K : ۵/۳

کم شدن توان نامی نسبت به استاندارد: ۰/۸۷ پریونیت

ضریب تلفات جریان گردابی مفروض (P_{EC-R}) : ۸ درصد

روش بررسی نشان داده شده دراین جدول بصورت زیر خلاصه می شود.

تلفات بارداری P_{LL} را می توان شامل دو بخش تلفات I^2R و تلفات جریان گردابی P_{EC} فرض نمود.

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} \qquad \text{(W)} \qquad (۱۸)$$

مؤلفه I^2R مستقیما متناسب با مقدار مؤثر جریان است و جریان گردابی متناسب با مربع جریان و فرکانس می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

$$P_{EC} = K_{EC} \times I^2 \times h^2 \qquad (۱۹)$$

K_{EC} : ثابت تناسب

تلفات بار کامل بصورت پریونیت تحت شرایط هارمونیک جریان توسط رابطهٔ

$$P_{LL} = \sum I_h^{\,2} \times (\sum I_h^{\,2} \times h^2) P_{EC-R} \qquad (۲۰)$$

داده می شود.

که درآن P_{EC-R} ضریب تلفات جریان گردابی تحت شرایط نامی است .

ضریب K که در مراجع کیفیت برق درخصوص کاهش ظرفیت ترانسفورماتور بکار می رود برحسب هارمونیک جریان بدینصورت تعریف می شود:

$$K = \frac{\sum (I_h \times h)}{\sum I_h^2} \qquad (۲)$$

بنابراین مقدارمؤثر جریان اعوجاجی را می توان بدینصورت نوشت:

$$\sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \times P_{EC-R}}} \quad \text{(PU)} \qquad (۲۲)$$

P_{EC-R} : ضریب تلفات جریان گردابی

h : مرتبهٔ هارمونیک

I_h : هارمونیک جریان

بنابراین ، کاهش ظرفیت ترانسفورماتور برحسب پریونیت را می توان با داشتن ضریب تلفات جریان گردابی تخمین زد. این فاکتور را می توان چنین محاسبه کرد.

۱- گرفتن این ضریب از طراح ترانسفورماتور (سازنده)

۲- با استفاده از اطلاعات آزمون ها وروش اشاره شده در IEEC

۳-مقادیر نمونه براساس نوع واندازهٔ ترانسفورماتور (رجوع شود به جدول ۳) که از مرجع شماره [۷] گرفته شده است

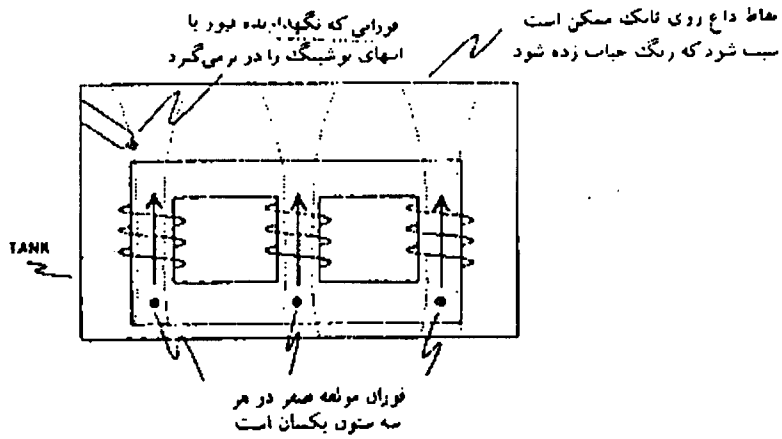
جدول ۳- مقادیر نمونه ای P_{EC-R}

نوع	توان نامی(MVA)	ولتاژ	$\%P_{EC}$
خشک	۱ ≤	٤۰۰ولت درفشارضعیف	۳-۸
روغنی	۲/۵ ≤	٤۰۰ولت درفشارضعیف	۱
	۲/۵-۵	٤۰۰ولت درفشارضعیف	۱-۵
	>۵	٤۰۰ولت درفشارضعیف	۹-۱۵

الف-۱۲-۱۳-۱ استثنائات:

حالاتی وجود دارد که ترانسفورماتور دارای مشکل هارمونیکی با توجه به مطالب ارائـه شـده درقبـل نمی باشد ولی به دلایلی که ظاهرا اضافه بار است گرم و یا حتی از کار می افتد. به عنوان مثـال یـک حالت معمول که در ترانسفورماتورهای ستارهٔ زمین شده مشاهده شده است بدین صورت اسـت کـه مثلا جریان خط دارای حدود ۸ درصد هارمونیک سوم (که مقدارنسبتا کوچکی است) می باشد ولـی ترانسفورماتور حتی دربارهای کمتراز بار نامی نیز دچار پدیده گرم شدن بیش از حد مجاز می گـردد. با توجه به اینکه ترانسفورماتور آزمون افزایش دما و درنتیجه اضافه بار را درکارخانـه گذرانـده اسـت سه عامل ارائه شده در ادامه را می توان علت این معضل دانست.

۱- فوران های توالی صفر از هسته ترانس سه فاز سه ستونه (که بیشترین استفاده را در سیستم هـای توزیع دارند) خارج می شود. شکل ۲۰ این پدیده را به تصویـر کشـیده اسـت. هـارمونیک هـای مرتبه ۳و۹و۱۵ هارمونیک های توالی صفر می باشند. بنابراین ، اگر اتصال سـیم پیچـی هـا بـرای عبور جریان توالی صفر مناسب باشند، این فوران های هارمونیکی باعث ایجاد حرارت اضافی در تانک، کلمپ هسته وغیره می گردد. پدیده فوق در آزمون های سه فاز متعادل یا آزمون های تک فاز مشاهده نخواهد شد. جریان خط ۸ درصدی کـه قبـلا بـه آن اشـاره شـد، منجـر بـه جریـان هارمونیک سومی برابر با ۲٤ درصد جریان فاز در نقطهٔ نوترال می گردد. این مسئله باعث اضافـه شدن فلوی نشتی در تانک و هوا وروغن می شود. این مسئله نیز بـاعث دو عارضـه حبـاب زدن رنگ تانک و ظهور گرما در یک سر تیوپ فیوز کاردی (بدون سوختن فیوز) می شود.



شکل ۲۰ - فوران توالی صفر در ترانسفورماتورهای سه ستونه

۲- وجود مقدار DC درجریان متناوب می تواند باعث فرار فوران از هسته شود. برای مثال ، هسته در نیم سیکل مثبت کمی به اشباع رفته درحالی که در نیم سیکل منفی درحالت عادی باقی می ماند. تعدادی از مبدل های الکترونیک قدرت ، جریان غیر متقارن می کشند.این جریان غیرمتقارن یا بصورت اتفاقی ایجاد می شود و یا بدلایل طراحی موجودخواهدبود که دراین حالت مقدارDC برای ایجاد مسائل مشکل زا در ترانسفورماتور قدرت لازم است.

۳- اتصال انتهای بوشینگ، کلمپ ها و دیگر المان های هادی ممکن است در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرند. درفرکانس مؤلفه اصلی اثر قابل توجهی بر روی تلفات سرگردان دراین حالت ایجاد نمی شود. لیکن امکان ایجاد نقاط داغ دراین قسمت ها هنگامیکه در معرض فوران های هارمونیکی قرار می گیرند وجود خواهدداشت.

الف -۱۲-٤ اثر برروی موتورها

موتورها درمقابل اعوجاج هارمونیکی ولتاژ ضربه پذیر می باشند. اعوجاج هارمونیکی ولتاژ در ترمینال های ورودی موتور به هارمونیک فوران در داخل موتور منجر می شود. فوران های هارمونیکی درایجاد گشتاور مشارکتی نمی کنند ولی چون با سرعتی متفاوت با فرکانس اصلی به گردش در می آیند در نتیجه جریان های با فرکانس بالا در رتور 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 نیز بوجود می آورند. کاهش راندمان همراه با گرم شدن ، لرزش و نویز از عوارض اعوجاج هارمونیک ولتاژ در موتورها می باشند.

در فرکانس های هارمونیکی، موتورها را با راکتانس رتور قفل شده که به خط متصل است نمایش می دهند. مؤلفه های مرتبهٔ پایین هارمونیکی ولتاژ که دامنه بزرگی داشته و امپدانس ظاهر شده آن کوچک می باشد برای موتورها دارای اهمیت بیشتری است.

اگر اعوجاج ولتاژ در محدودهٔ تعریف شده توسط استاندارد هارمونیک های مجاز در شبکه برق ایران قرار بگیرد نیازی به تغییر ظرفیت موتورها نخواهد بود. مقادیر داده شده دراین استاندارد به قرار زیر است:

THD = ٥٪ و نیز دامنه هرمؤلفه هارمونیکی فرد باید کمتراز ٣٪ باشد.

هنگامیکه اعوجاج ولتاژ ٥ تا١٠ درصد ویابیشتر شود تلفات حرارتی اضافی ایجاد مشکل می کند. برای افزایش طول عمر موتور چنین اعوجاجی را باید تصحیح نمود و کاهش داد.

موتورها دربرابر عبور جریان هارمونیکی بصورت موازی با امپدانس سیستم قدرت قرار می گیرند. در نتیجه باعث بالارفتن فرکانس تشدید بدلیل کاهش اندوکتانس سیستم می گردند. این مسئله مشکلی برای شبکه خواهد بود و بستگی به فرکانس تشدید سیستم قبل از برقدار کردن موتور دارد. موتورها در میرایی مؤلفه های هارمونیکی نیز نقش بازی می کنند و مقدار آن بستگی به نسبت X / R مدار رتور قفل شده موتر خواهدداشت. سیستم هایی که در آن تعدادزیادی موتور های با قدرت پایین که دارای نسبت X/R کوچکی هستند وجود دارد، باعث تضعیف تشدید هارمونیکی می شوند. شایان ذکراست که نمی توان از موتورهای بزرگ چنین انتظاری داشت.

الف - ١٣ مشخصه پاسخ سیستم

درسیستم های قدرت، پاسخ سیستم به منابع هارمونیکی دارای اهمیت است. در حقیقت ، سیستم های قدرت در مقابل جریان هارمونیکی بوجود آمده توسط بارهای تولید کنندهٔ هارمونیک ، مقاوم می باشند مگر آنکه فرکانس این جریان هارمونیکی با فرکانس رزونانس موازی امپدانس از آن باس هم اندازه شود. پاسخ سیستم قدرت در هر فرکانس هارمونیکی اثر واقعی بارهای غیرخطی را بر اعوجاج هارمونیکی ولتاژ تعیین می کند.

الف -۱۳-۱ امپدانس سیستم

درفرکانس مؤلفه اصلی، سیستم های قدرت اصولا به صورت اندوکتیو هستند و امپدانس معادل آن را گاهی اوقات راکتانس اتصال کوتاه می نامند. عموما در سیستم های توزیع و سیستم هـای صنعتـی از اثرات خازنی صرف نظر می گردد. یکی از کمیت هایی که در آنالیز هارمونیکی سیستم هـای قـدرت کرارا استفاده می شود امپدانس اتصال کوتاه تا نقطه ای از شبکه کـه در آن خـازن نصب شـده اسـت می باشد. اگر مقدار امپدانس اتصال کوتاه در دسترس نباشد می توان آن را از مطالعات اتصـال کوتـاه شبکه بدست آورد. مقدار این امپدانس را می توان از مگاولت آمپر اتصال کوتاه یا جریان اتصال کوتاه بصورت زیر بدست آورد:

$$Z_{sc} = R_{sc} + JX_{sc}$$

$$\frac{KV^2}{MVA_{SC}} = \frac{1000 \times KV}{\sqrt{3} I_{sc}} \qquad (۲۳)$$

که درآن:

Z_{sc} : امپدانس اتصال کوتاه

R_{sc} : مقاومت اتصال کوتاه

X_{sc} : راکتانس اتصال کوتاه

KV : ولتاژ فاز به فاز برحسب کیلوولتا

MVA_{SC}: مگاولت آمپر اتصال کوتاه سه فاز

I_{sc} : جریان اتصال کوتاه، آمپر

Z_{sc} یک کمیت فیزوری بوده و شامل مقاومت وراکتانس است. بهر حال اگر اطلاعات اتصـال کوتـاه شامل داده های مربوط به مقاومت نباشد فرض می شود که امپدانس کاملا راکتیواست. این فـرض در سیستم های صنعتی برای شینه های نزدیک به منبع فرض خوبـی اسـت. در صورتـی کـه نتـوان ایـن فرض را پذیرفت اطلاعات مربوط به مقاومت واقعی سیستم را باید بدست آورد. این مسئله وقتی کـه خازن ها نیز مدل سازی می شوند بسیار مهم خواهدبود.

راکتانس بصورت خطی با فرکانس تغییر می کند. راکتانس هـارمونیک hام را مـی تـوان از راکتـانس مؤلفه اصلی یعنی X_1 به صورت زیر بدست آورد:

$$X_h = hX_1 \qquad (۲٤)$$

در سیستم های قدرت و درمطالعات هارمونیک ها این فرض که مقاومت سیستم تا فرکانس کمتراز مرتبهٔ نه ام تغییر زیادی نمی کند قابل قبول خواهدبود . برای خطوط وکابل ها در صورت درنظر گرفتن اثر پوستی مقاومت بصورت تقریبی با مربع فرکانس تغییر می کند. استثنائا در این مورد، ترانسفورماتورهای بزرگ می باشند که بدلیل تلفات جریان گردابی سرگردان، مقاومت آن ها متناسب با فرکانس افزایش می یابد.این موضوع در شرایط تشدید اثر مثبتی در میرایی سیستم بوجود می آورد. در ترانسفورماتورهای کوچک کمتراز ۱۰۰ کیلوولت آمپر، مقاومت و بالطبع مقاومت ظاهری کل تا فرکانس ۵۰۰ هرتز تغییر چندانی نمی کند. البته ترانسفورماتورهای کوچکتر در فرکانس اصلی دارای نسبت X/R بین ۱ تا۲ هستند. درصورتیکه برای ترانسفورماتورهای استفاده شده در پست ها این مقدار ۲۰ تا ۳۰ می باشد. بنابراین، اگر امپدانس شینه موردنظر بیشتر ناشی از امپدانس ترانسفورماتور باشد تا امپدانس خط انتقال، آنگاه مدل امپدانس را باید دقیق تر مورد مطالعه قرارداد. با صرفنظر کردن از مقاومت سیستم ، اعوجاج هارمونیکی بیشتری حاصل خواهد شد.

در ولتاژهای پایین مانند سیستم های صنعتی وجه غالب راکتانس معادل سیستم ناشی از امپدانس ترانسفورماتورها است. یک تخمین خوب برای X_{sc} را می توان براساس امپدانس ترانسفورماتور بصورت زیر بدست آورد:

$$X_{sc} \approx X_{tx} \qquad (۲۵)$$

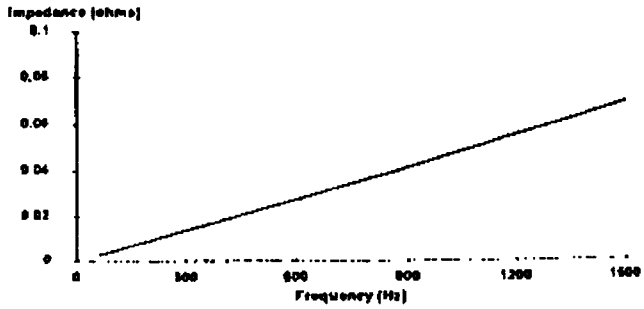
هنگامی که لزومی به دقت بالایی نباشد این امپدانس نزدیک به ۹۰ درصد امپدانس کلی را شامل می شود. معمولا برای ارزیابی امکان ایجاد تشدید هارمونیکی این تخمین مناسب خواهد بود. امپدانس ترانسفورماتور برحسب اهم را می توان برحسب امپدانس درصدی، Z_{tx} ، که بر روی پلاک ترانسفورماتور نوشته شده است به شکل زیر بدست آورد:

$$X_{tx} = (\frac{KV_{\phi\phi}}{MVA_{3\phi}}) \times Z_{tx}(\%) \qquad (۲۶)$$

دراین رابطه فرض می شود که وجه غالب امپدانس راکتیو باشد. برای مثال دریک ترانسفورماتور ۱۵۰۰ کیلوولت آمپری ، ٦ درصدی ، امپدانس معادل در طرف ٤۰۰ ولت آن برابراست با:

$$X_{tx} = \frac{(0/4)^2}{1/5} \times 0/06 = 0/0064\Omega \qquad (۲۷)$$

مقدار امپدانس برحسب فرکانس برای یک سیستم اندوکتیو (که درآن خازن وجود ندارد) در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



«شکل شماره ۲۱»

شکل ۲۱- امپدانس برحسب فرکانس برای یک سیستم اندوکتیو

دراین مدل ساده از خازن صرفنظر شده است که در مطالعهٔ هارمونیک ها امکان پذیر نخواهدبود.

الف -۱۳-۲ امپدانس خازن

خازن های موازی که برای تصحیح ضریب قدرت مورد استفاده قرار می گیرند در فرکانس های مختلف امپدانس سیستم را شدیدا تحت تأثیر قرار می دهند. خازن ها خود عامل تولید هارمونیک نیستند ولی اعوجاج هارمونیکی شدید گاهی اوقات بدلیل حضور خازن تشدید می گردد. در حالیکه راکتانس اندوکتیو با افزایش فرکانس ومتناسب با آن افزایش می یابد، راکتانس خازن X_c متناسب با فرکانس کاهش می یابد.

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times f \times c} \qquad (۲۸)$$

که درآن :

c : ظرفیت خازن به فاراد و f فرکانس است.

درخازن های مورد استفاده در صنعت ظرفیت خازن داده نمی شود بلکه مقدار خازن برحسب Kvar یا Mvar بیان می شود. راکتانس خازنی خط به زمین در فرکانس قدرت برای یک بانک خازنی را می توان چنین بیان نمود.

$$X_c = \frac{KV^2}{M\,\mathrm{var}} = \frac{KV^2(1000)}{K\,\mathrm{var}} \qquad (۲۹)$$

برای بانک های خازنی سه فاز باید از ولتاژ خط وتوان راکتیو نامی سه فاز استفاده نمود. برای واحدهای تک فاز ، از ولتاژ نامی فاز و توان راکتیو نامی استفاده می شود.

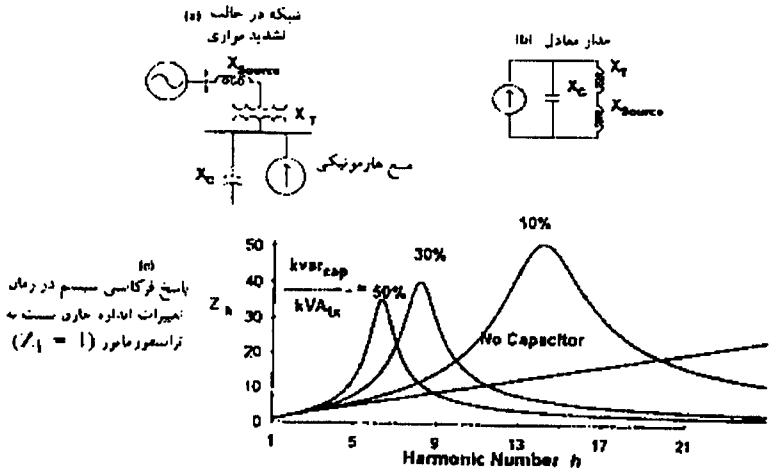
برای مثال، برای یک بانک خازنی ۱۲۰۰ کیلووار و سطح ولتاژ ۲۰۰۰۰ ولت، راکتانس توالی مثبت برحسب اهم برابر خواهد بود با:

$$X_c = \frac{KV^2}{M\,\text{var}} = \frac{(20)^2}{1/2} = 333/3\Omega \qquad (۳۰)$$

الف -۱۳-۳ تشدید موازی

مدارهای شامل خازن واندوکتانس 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 ریشهٔ تمامی مسائل ومشکلات ناشی از اعوجاج هارمونیکی در سیستم های قدرت می باشد.

درفرکانس های هارمونیکی، از دیدگاه منابع هارمونیک، خازن های موازی با اندوکتانس معادل شبکه به شکل موازی قرار می گیرند(رجوع شود به شکل ۲۲a و۲۲b). 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. درفرکانسی که X_c و راکتانس کلی سیستم برابر می شوند، امپدانس ظاهری (ترکیب موازی اندوکتانس سیستم وخازن) که از طرف منبع تولید هارمونیک جریان دیده می شود بسیار بزرگ شده وشرایط تشدید موازی بوجود می آید. اثر تغییر اندازهٔ خازن در امپدانس دیده شده از محل منبع هارمونیک ها در شکل ۲۲c نشان داده شده است.



شکل ۲۲- تأثیر اندازه خازن روی فرکانس تشدید موازی

همانطورکه دراین شکل مشاهده می شود، اگـر یکـی از مقـادیر پیـک امپدانـس در فرکـانس جریـان هارمونیکی تولید شده توسط بار بوجود آید، افت ولتاژ شـدیدی روی امپدانـس ظـاهری سیسـتم در مقایسه با حالت بدون خازن اتفاق می افتد. فرکانس تشدید در ترکیب خاصی از خازن و اندوکتـانس را می توان از روش های مختلف وبا توجه به نوع اطلاعات موجود محاسبه نمود. معادلهٔ اصلی تعیین فرکانس بدین صورت است:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۳۱)$$

تحلیل گران سیستم های قدرت معمولا مقادیر L وC سیستم را در اختیار ندارند و بنابراین ترجیح می دهند که از شکل دیگری از روابط استفاده نمایند. باتوجه به اینکه در سیسـتم هـای توزیـع راکتـانس اتصال کوتاه معمولا برابر با امپدانس ترانسفورماتور می باشد یعنی:

$$X_{sc} = X_{tn}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$X_{t\alpha} = (\frac{KV^2\phi - \phi}{MVA_3\phi}) \times Z_{t\alpha}(\%)$$

که در آن $Z_{t\alpha}(\%)$ امپدانس درصدی ترانسفورماتور می باشـد. معمـولا مرتبـه هـارمونیکی فرکـانس تشدید براساس امپدانس فرکانس اصلی با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود:

$$h_2 = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{M\ \mathrm{var}_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{KVA_{tx}}{K\ \mathrm{var}_{cap} \times Z_{tx}(\%)}} \qquad (۳۲)$$

که درآن:

h_r : مرتبهٔ هارمونیک فرکانس تشدید

X_c : راکتانس خازن (Ω)

X_{sc} : راکتانس اتصال کوتاه سیستم (Ω)

MVA_{sc} : سطح اتصال کوتاه سیستم برحسب مگاولت آمپر

$Mvar_{cap}$: ظرفیت نامی بانک خازنی برحسب مگاوار

KVA_{tx} : ظرفیت نامی ترانسفورماتور برحسب کیلوولت آمپر

Z_{tx} : امپدانس درصدی ترانسفورماتور

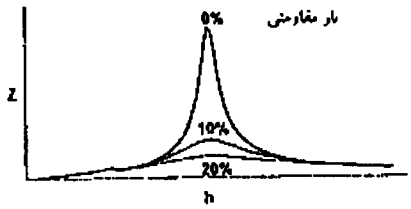
$Kvar_{cap}$: ظرفیت نامی بانک خازنی برحسب کیلووار

برای مثال ، دریک شینه مربوط به یک مشترک صنعتی، وقتی که امپدانس ترانسفورماتور وجه غالب را دارد، هارمونیک تشدید برای یک ترانسفورماتور ۱۵۰۰ کیلوولت آمپر با امپدانس ٦ درصدی و بانک خازنی ۵۰۰ کیلوواری تقریبا برابر است با:

$$h_2 = \sqrt{\frac{1500 \times 100}{500 \times 6}} = 7/07 \qquad (۳۳)$$

الف -۱۳-٤ اثر مقاومت وبار 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. شکل ۲۳ مشخصهٔ امپدانس مدارتشدید موازی را برای مقادیر مختلف بار مقاومتی که به صورت موازی با خازن قرار گرفته است نشان می دهد.



شکل ۲۳- تأثیر بارهای مقاومتی روی پدیدهٔ تشدید موازی

همچنانکه مشاهده می شود تنها مقدار ۱۰ درصد بار مقاومتی تأثیر بسزایی بر روی پیک امپدانس سیستم بوجود آورده است. مطابق آن، اگر طول خط یا کابل های بین شینه خازنی و نزدیکترین ترانسفورماتور زیاد باشد ، پدیدهٔ تشدید اثر نامطلوب کمی را ایجاد می کند زیرا خطوط و کابل ها مقدار زیادی مقاومت به مدار معادل سیستم اضافه می کنند.

مقاومت خط وبارها دلیل خوبی برای این نکته است که مشکل تشدید هارمونیکی نامطلوب روی فیدرهای توزیع بندرت پدید می آید. این بدان معنا نیست که بدلیل تشدیدمشکل زیادی بوجود نمی آید، بلکه این مسائل و مشکلات باتوج به شرایط موجب خسارت فیزیکی به تجهیزات شبکه قدرت نمی شوند.بدترین شرایط تشدید وقتی پدید می آید که خازن ها برروی شینه های پست نصب گردند. نمونه ای ازاین پست ها، پست توزیع اصلی ویا پست های فرعی در واحدهای صنعتی باشد. دراین 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.

درحالی 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 ۲۰ درصد تأسیسات صنعتی که بر روی آن ها مطالعات دقیقی صورت نگرفته، در شرایط تشدید، خرابی و صدمه زیادی بر تجهیزات آن متحمل شده است. در حقیقت ، انتخاب ظرفیت خازن براساس صورتحساب های ماهانه ممکن است باعث شود که

سیستم در فرکانس مرتبهٔ پنجم به تشدید بیفتد. این هارمونیک بیشترین مقدار هارمونیک ها را در یک سیستم سه فاز بوجود می آورد. شایان ذکراست 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 هارمونیکی و در نتیجه اعوجاج ولتاژ دارند. بهرحال، بارهای مقاومتی تشدید را میرا نموده و به کاهش شدید اعوجاج هارمونیکی 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 هارمونیکی، 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 اثرقابل ملاحظه ای بر روی میرایی سیستم خواهند داشت.

الف -١٤ مبانی کنترل هارمونیک ها

دراین بخش بعضی از روش های اساسی کنترل هارمونیک ها توضیح داده خواهدشد.

هارمونیک ها هنگامی مشکل زا می شوند که:

- منبع تولید هارمونیک جریان بسیار بزرگ باشد.
- مسیری که درآن 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 زیر 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 استفاده از فیلترها، اندوکتانس و خازن.

الف- ١٤-١ 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 دراین حالت بوجود می آید. درحالیکه یک ترانسفورماتور را با کاهش ولتاژ اعمالی به آن می توان از حالت اشباع و درنتیجه تولید هارمونیک خارج نمود، ولی

تجهیزات قوس زننده و یا اغلب مبدل های الکترونیک قدرت در مشخصه ای کـه بـرای آن طراحـی شده کار نموده و نمی توان بر روی آن ها مانور خاصی انجام داد.

محرکه های استفاده کننده از تکنیک PWM که خازن شینه DC را بصورت مستقیم از خط و بدون هیچ امپدانسی 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.

ازنوع اتصال ترانسفورماتور می توان استفاده نمود و هارمونیک ها را دریک سیستم سه فاز کاهش داد. جابجایی فاز ۳۰ درجه ای نیمی از مبدل های ٦ پالسی دریک مجموعه می تواند مزایای یک مبدل ۱۲ پالسی راکه درآن هارمونیک های پنجم و هفتم شدیدا کاهش می یابند بوجود آورد.ترانسفورماتورهای اتصال یافته بصورت مثلث، می توانند از ورود هارمونیک توالی صفر(مرتبهٔ سه) به خط جلـوگـیری نمایند. استفاده از اتصال زیگزاگ و زمین کردن ترانسفورماتور نیز اجازه ظهور هارمونیک های مرتبـهٔ 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 (کاهش قیمت خرید) به همراه داشته باشد نیزمی تواند مفید باشد. این مسئله بخصوص بـرای بارهای روشنایی می تواند بکار رود.

الف - ١٤-٢ فیلتر کردن

فیلترهای موازی توسط اتصال کوتاه کـردن جریـان هـارمونیکـی، تا حد امکـان اعوجـاج را کـاهش می دهند. این روش معمول ترین نوع فیلترسازی عملی بوده و بدلیل مسائل اقتصادی و نیز تمایل بـه بهبود ولتاژ اعمالی 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 نـوع فیلتر، مدار موازی قابل تنظیمی است که امپدانس بالایی را در برابر جریان هارمونیکی ایجاد می کنـد. البته این نوع فیلتر کمتر مورد استفاده قرار می گیرد زیرا در صورت استفاده از آن ولتاژ بار اعوجـاجی می گردد . یک نوع کاربرد عملی این فیلترها، قرارگرفتن آن ها در مسیر نقطهٔ نوترال یک بانک خازنی با اتصال ستاره تا نقطهٔ زمین می باشد. با این عمل مسیرهارمونیک های مرتبهٔ سوم سد شده، درحـالی که مسیر خوبی را در برابر فرکانس قدرت از خود نشان می دهد.

فیلترهای فعال نیز باوارد کردن مؤلفه هارمونیکی جریان به یک بار غیرخطی عمل حـذف هـارمونیک ها را انجام می دهند.

الف-١٤-٣ اصلاح پاسخ فرکانسی سیستم

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

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

٢- اضافه کردن راکتور برای تنظیم مجدد سیسـتم . تشـدیدهای مضـر بـرای سیسـتم ، معمـولا بیـن اندوکتانس سیستم و خازن های تصحیح ضریب قدرت بوجود می آید. راکتور را مـی تـوان بیـن سیستم و خازن متصل نمود. یک روش ساده سری نمودن یک راکتور با خازن بوده که ایـن کـار شرایط تشدید سیستم را بدون تنظیم خازن برای ایجاد شرایط فیلتری تغییر می دهد.

٣- تغییر اندازهٔ خازن . این روش شاید ارزان ترین مورد هم بـرای مشـترکین صنعتـی و هـم بـرای شرکت های برق باشد.

٤- جابجا کردن محل نصب خازن به نقاطی با امپدانس اتصال کوتـاه متفـاوت . ایـن روش هنگـامی 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 صنعتـی چندان امکان پذیر نیست زیرا محل قرار گیری خازن را نمی توان چندان تغییرداد.

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

الف-١٤-٤ درفیدرهای توزیع شرکت های برق

نسبت X/R درفیدرهای توزیع معمولا کم است . بنابراین در فیدرها مسئله تقویت اعوجـاج ناشـی از تشدید دارای اهمیت نخواهدبود. بهرحال درزمان کلیدزنی خازن ها، اعوجاج ها می توانند قابل توجه بوده و باعث عملکرد نامطلوب تجهیزات گردند. مهندسین توزیع، بانک های خـازنی را درفیدرهـای مورد نیاز قرار می دهند بدون آن که هیچگونه نگرانی درمورد ایجاد هارمونیک داشته باشند. وقتی کـه

مسئله ای رخ می دهد، راه حل معمول، جابجایی محل بانک خازنی و یا تغییر اندازهٔ خازن خواهدبود.

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

گاهی اوقات قراردادن راکتور در نقطهٔ نوترال بانک خازنی ، بانک را به عامل نوسان کنندهٔ تنظیم شده ای برای هارمونیک توالی صفر تبدیل می کند.

بسیاری اوقات، در فیدرهای توزیع مسائل هارمونیکی در هنگام بارکم بوجود می آید. دراین حالت ولتاژ افزایش یافته و در نتیجه ترانسفورماتورها تولید هارمونیک بیشتری می کنند. علاوه برآن چون بار کمی برای میراکردن تشدید وجود دارد ، خارج کردن خازن دراین 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 فیدرها خواهدبود. با اینکار مسیر متوسط جریان های هارمونیکی کوتاه شده ودرنتیجه تداخلات رادیویی کاهش و افت ولتاژ هارمونیکی در سیستم کم خواهدشد. در نتیجه اعوجاج ولتاژ بر روی فیدرکاهش می یابد. کم کردن هارمونیک های ولتاژ به کمک فیلتر در فیدرها باعث می شود که اعوجاج ولتاژ در نقاط دیگر نیز در محدودهٔ مناسبی قرار بگیرد. مطالعات هارمونیکی باید برروی 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.

الف - ١٤-٥ امکانات در فیدرهای توزیع

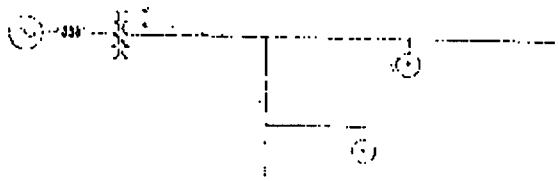
اولین مرحله، مشخص نمودن امکان تغییر اندازه خازن است. گاهی اوقات همراه با بارها تعداد زیادی خازن وارد شبکه توزیع می شوند بنحویکه نمی توان مقدار ظرفیت خازن را کنترل نمود. به هرحال، با خازن های سوئیچ شده و کنترل کننده های ضریب قدرت اتوماتیک می توان روش کنترلی را انتخاب نمود که از ایجاد شرایط نامناسب و بوجودآمدن مشکل جلوگیری کند. از نظر عملی

واقتصادی 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 مرتبهٔ سوم در مدارات سه فاز نیز امکان پذیراست.

مطالعات باید برروی تمامی خازن های نصب شده در سیستم های صنعتی انجام پذیرد. این سیستم ها عموما کوچک هستند بنحوی که تلفات خط در آن ها کم ودرنتیجه 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 دراین حالت مقاومت کافی برای جلوگیری وکاهش تشدید وجود دارد . همچنین ، بعضی بارها در میرایی سیستم نقش بسزایی دارند. اگرقراراست برای اولین بار خازن ها نصب گردند، استفاده از خازن ها در نزدیکی موتورها و یا مراکز کنترل موتورها مشکلات ناشی از مسئله تشدید را کاهش خواهد داد . این موردهمچنین دارای این مزیت است که تلفات سیستم را می توان بسادگی با قراردادن خازن در شینه اصلی کاهش داد.

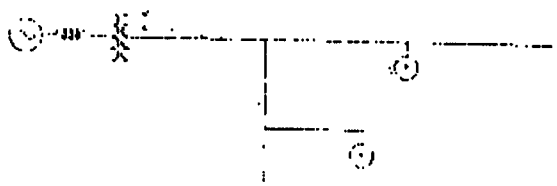
الف -۱۵ شناسایی محل منابع هارمونیک ها

درفیدرهای توزیع شعاعی و درکارخانجات صنعتی، تمایل اصلی هارمونیک های تولیدشده، جریان یافتن از محل تولید خود(بارهای هارمونیک زا) به طرف منبع تغذیه سیستم قدرت می باشد. این مسئله در شکل ۲٤ نشان داده شده است. امپدانس سیستم معمولا کمترین امپدانسی است که جریان های هارمونیکی در مقابل خود می بینند. بنابراین ، قسمت اعظم جریان به طرف منبع تغذیه سیستم جاری می شود. ازاین مطلب می توان بهره جست تا محل منابع تولید هارمونیک را شناسایی نمود.



شکل ۲٤- مسیرعمومی جریان های هارمونیکی در شبکه های شعاعی

با استفاده از یک مونیتور کیفیت برق که قادر به نشـان دادن مؤلفـه هـای هـارمونیکی جریـان باشـد، بسادگی می توان هارمونیک های جریان درهرشاخه را اندازه گیری کرد. این کار را باید از ابتدای هـر مدار آغاز نمود تا منابع تولید هارمونیک را پیدا کرد. خازن های تصحیح ضریـب قـدرت مـی تواننـد الگوی مسیر حرکت جریان را حداقل برای یک هارمونیک تغییر دهند. برای مثال، اضافـه کـردن یـک خازن به مدار قبلی همانطوریکه در شکل ۲۵ نشان داده شده است مـی توانـد بـاعث کشـانده شـدن بخش بزرگی از جریان هارمونیکی به این قسمت از مدار شود.



شکل ۲۵- خازن های تصحیح ضریب قدرت قادر به تغییر مسیر جریان یکی از مؤلفه های هارمونیکی جریان هستند

اگر دراین حالت از متد اشاره شده در بالا استفاده شود ممکن است بجای ردیـابی مسـیر اصلـی کـه نهایتا به منابع تولید هارمونیک می رسد، اشتباها مسـیر منتـهی شـده بـه بـانک خـازنی دنبـال گـردد. بنابراین، لازم است که بصورت موقت تمامی خازن ها را از مدار خـارج کـرده تـامحل منـابع تولیـد هارمونیک را بتوان بطور دقیق ومشخص نمود.

جریان هارمونیکی تولید شده توسط منابع هارمونیکی واقعی و جریان هارمونیکی ناشی از تشـدید بـا بانک خازنی به راحتی قابل تمایزهستند. جریان های حاصل از تشدید دارای یـک هـارمونیک غـالب هستند که برروی موج سینوسی اصلی سوار می گردد. همانطورکه می دانیم شکل موج هـای جریـان هارمونیکی تنها دارای یک مؤلفه (علاوه بر مؤلفهٔ اصلی) نخواهدبود. این شکل موج ها بسته به پدیدهٔ اعوجاج زا دارای شکل مـوج های متفاوتی می باشند ولی بـهرحال دارای چندیـن هـارمونیک بـا

دامنه های متفاوت خواهندبود. یک هارمونیک تنها با دامنه بالا تقریبا همیشه شرایط تشـدید را نشـان می دهد.

حقیقت زیر را می توان برای تعیین شرایط تشدید ووجود آن درسیستم بکار برد. برای این کـار ابتـدا جریان ورودی به خازن ها اندازه گیری می شود. اگر جریان دارای مقدار بزرگـی از یـک هـارمونیک علاوه بر مؤلفهٔ اصلی است می توان نتیجه گرفت که خـازن درحـال تشـدید بـا بقیـهٔ سیسـتم اسـت. همواره در اولین مرحله جریان خازن ها را بازبینی و اندازه گیری نمائید.

الف -١٦ تجهیزات موردنیاز فیلترکردن اعوجاج هارمونیکی

دودسته اصلی فیلتر مورد استفاده قرار می گیرد:

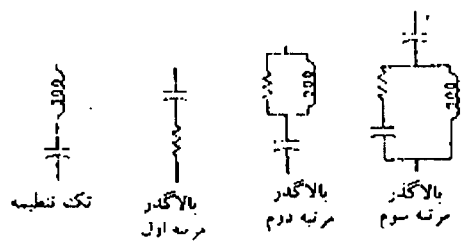
١- فیلترهای غیرفعال

٢- فیلترهای فعال

دراینجا قابلیت های برجسته هردسته توضیح داده می شود.

الف -١٦-١ فیلترهای غیرفعال

فیلترهای غیرفعال از مقاومت، اندوکتانس وخازن ساخته می شوند. این گونـه فیلترهـا در مقایسـه بـا دیگر وسایل حذف اعوجاج هارمونیک ها ارزانتر می باشند ولی در عوض تداخل معکوس آن با بقیـهٔ سیستم می تواندسبب ایجاد مشکل گردد. دو نوع فیلتر غیرفعال مورد استفاده قرار می گیرند. نوع اول جریان هارمونیکی را به سوی خود جذب و ازخط وسیستم خارج می کند و نوع دوم با تنظیم کـردن عناصرش بمنظور ایجاد تشدید در یک فرکانس هارمونیکی مشخص، از عبور جریان هـارمونیکی بـه بخش های دیگر جلوگیری می کند. شکل ٢٦ چندین نوع از فیلترهای معمولی را نشان می دهد.



شکل ٢٦-آرایش های معمول برای فیلترهای غیرفعال

معمولی ترین نوع فیلتر غیرفعال، فیلتر تک تنظیم برشی می باشد. این نوع، اقتصادی ترین نوع فیلتر غیرفعال بوده و غالبا برای کاربرد موردنظر نیزکافی خواهدبود. مثالی از طراحی یک فیلتر ٤٠٠ ولت در شکل ۲۷ به تصویر کشیده شده است. فیلتر برشی، یک فیلتر سری قابل تنظیم است که امپدانس کمی را در برابر یک هارمونیک خاص از خودنشان می دهد و به صورت موازی به شبکه قدرت متصل می گردد. بنابراین، جریان های هارمونیکی از مسیرعادی خود در خطوط به سمت فیلتر منحرف می گردند. فیلترهای برشی، علاوه بر حذف هارمونیک ها می تواند جهت تصحیح ضریب قدرت نیز بکار روند. شکل ۲۷ یک بانک خازنی با اتصال مثلث که بااستفاده از یک اندوکتانس سری شده با آن به یک فیلتر تبدیل شده است را نشان می دهد. دراین حالت، هارمونیک حذف شده h_{notch}، توسط رابطهٔ زیر به راکتانس فرکانس اصلی مرتبط می گردد.

$$h_{notch} = \sqrt{\frac{X_c}{3X_f}} \qquad (٣٤)$$

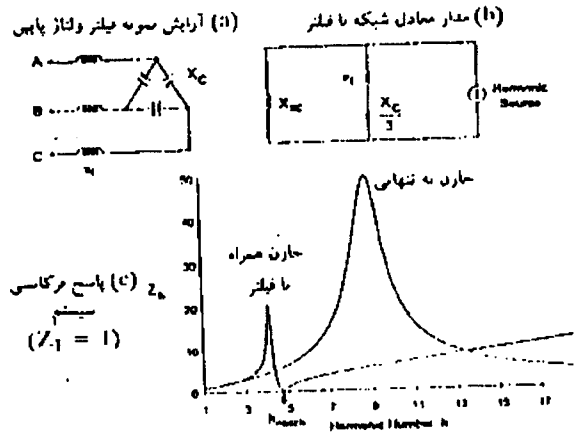
توجه کنید که X_c راکتانس یک شاخه از اتصال مثلث (به جای راکتانس خازنی معادل خط به زمین) است. اگرقرار بود که ازولتاژ فاز به فاز و کیلووار سه فاز برای محاسبات استفاده گردد استفاده از ضریب ۳ لازم نخواهدبود. یکی از مهمترین اثرات جانبی اضافه کردن یک فیلتر این است که نقطه تشدید موازی تیزی در یک فرکانس که درزیر فرکانس حذف شده قرار گرفته ایجاد می کند(رجوع شود به شکل ۲۷) . این فرکانس باید بدوراز هر فرکانس هارمونیکی مهم در سیستم باشد. فیلترها معمولا کمی پایین تراز هارمونیکی که قراراست فیلتر نمایند تنظیم می شوند تا درصورت تغییر پارامترهای سیستم حاشیه امنیتی را ایجاد نمایند. اگر فیلتردقیقا در فرکانس هارمونیکی تنظیم گردد تغییر خازن و یا اندوکتانس سیستم ناشی از حرارت یا خرابی، فرکانس تشدید موازی را به مقدار هارمونیک بالاتر جابجا می کند . دراین حالت شرایطی فراهم می آید که بدتر از نداشتن فیلتراست زیرا دراین حالت شرایط تشدید بسیار تیزی پدید می آید.

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

طریقهٔ اتصال فیلتر درشکل ۲۷a بدلیل نوع اتصال مثلث اجازهٔ جذب جریان توالی صفر را نخواهدداد. در نتیجه برای فیلتر کردن هارمونیک های مرتبهٔ سوم غیر مؤثر است. راه حل های دیگری را نیز باید به کار برد تا جریان های هارمونیک مرتبهٔ سوم (توالی صفر) را کنترل نمود، زیرا در سیستم ۳۸۰ ولت

عموما خازن ها را بصورت مثلث می بندند. درعوض در سیستم های توزیع خازن ها بصورت اتصال ستاره متصل می گردند. دراین حالت می توان با تغییر اتصال نوترال مسیری برای هارمونیک های توالی صفر(مرتبهٔ سوم) ایجاد نمود. راه عملی برای فیلتر کردن هارمونیک های توالی صفر قرار دادن راکتور در نقطهٔ نوترال خازن است. از این روش برای حذف تداخلات تلفنی نیز استفاده می گردد. راکتورهایی با چندین تپ خروجی، در نقطهٔ نوترال اتصال می یابند و نهایتا از تپی استفاده می شود که تداخلات تلفنی را حداقل نماید.

فیلترهای غیرفعال همواره بر روی شینه هایی قرار می گیرند که انتظار می رود X_{sc} آنها ثابت بماند. درحالیکه فرکانس حذف شده ثابت است، تشدید موازی با امپدانس سیستم تغییر خواهدنمود. برای مثال، فرکانس تشدید یک سیستم که از طریق یک ژنراتور اضطراری تغذیه می شود بسیار کمتراز حالتی است که همان سیستم به شبکه متصل شود. بنابراین، فیلترها را می توان درشرایطی که از ژنراتور اضطراری استفاده می شود از مدارخارج نمود.



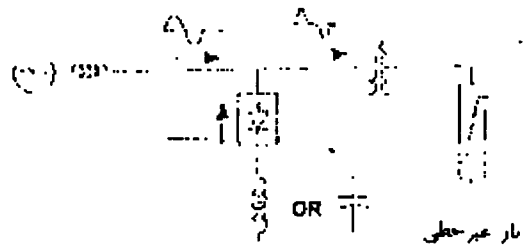
شکل ۲۷-ساختن یک فیلتر برشی برای حذف هارمونیک پنجم و تأثیر آن روی پاسخ سیستم

الف-۱۶-۲ فیلترهای فعال

فیلترهای فعال تجهیزات نسبتا جدیدی برای حذف هارمونیک ها می باشند. عملکرد آن ها براساس مدارات الکترونیک قدرت پیچیده بوده و در نتیجه هزینهٔ بسیار زیادتری نسبت فیلترهای غیرفعال دارند. بهر حال، این دسته فیلترها دارای مزایای متمایزی مانند تشدید نکردن با سیستم می باشند. این

گونه تجهیزات را در شرایط بسیار مشکل،جائیکه فیلترهای غیرفعال بصورت موفق عمـل نمـی کننـد (بدلیل بروز تشدید موازی) می توان بکار برد. اینگونه تجهیزات دریک زمان می توانند بیـش از یـک هارمونیک را نیز کنترل نمایند وهمچنین بعضی دیگر از مسائل کیفیت برق مانند فلیکر ولتاژ را کنـترل نمایند. این نوع فیلترها بصورت خاص برای بارهای بزرگ و اعوجـاج سـاز کـه دریـک نقطـهٔ نسـبتا ضعیف در سیستم قدرت متصل می شوند مفید خواهند بود. ایده اصلی در این گونـه تجـهیزات وارد نمودن بخشی از موج سینوسی است که درجریان بار غیرخطی وجود ندارد. شکل ۲۸ این مفهوم را به تصویر کشیده است. یک کنترل الکترونیکی، ولتاژ و یا جریان خط را مونیتور نموده و بنحـوی عمـل می نماید که ولتاژ یا جریان را بصورت سینوسی درآورد.

همچنانکه نشان داده شده دو روش اصلی بکاربرده می شـود. در روش اول از یـک راکتـور اسـتفاده خواهدشد که انرژی در آن ذخیره شده سپس در لحظات مناسب این انرژی بصورت جریان به سیستم تزریق می گردد. در روش دوم به جای استفاده از راکتور از یک خازن استفاده می شـود. بنـابراین، در حالیکه جریان بار توسط بارهای غیرخطی اعوجاجی شده است، جریان دیده شده توسط سیستم شبیه سینوسی می گردد. فیلترهای فعال علاوه بر هارمونیک ها، ضریب قدرت را نیز تصحیح می کنند.



شکل ۲۸- کاربرد فیلتر فعال در یک بار

الف-۱۷ مراحل انجام مطالعه هارمونیک ها

روش ایده آل برای انجام مطالعه هارمونیک های سیستم در زیر توضیح داده می شود.

- ابتدا هدف مطالعه باید مشخص شود. بسیار مهم اسـت کـه بررسـی را بتـوان در مسـیر مناسـب قرارداد. برای مثال ممکن است هدف تشخیص عوامل ومسائل موجود و راه حل ها باشد. هـدف

دیگر می تواند معین نمودن این نکته باشد که آیا تجهیزات مدرن مانند محرکـــه هـــای موتـــور بـــا قابلیت تنظیم سرعت و خازن ها مشکلی ایجاد می کنندیا نه؟

- انجام دادن یک شبیه سازی کامپیوتری براساس اطلاعات موجود. اندازه گیری هـــا مـــی تواننـــد از نظر مدت زمان، استفاده از تجهیزات و ایجاد قطعی سیستم باعث هزینه هـــای اضـــافی شـــوند. بـــه عبارت دیگر اگر ایدهٔ خوبی از آنچه که در جستجوی آن هستیم و محلی که بـــاید آن را جســـتجو کرد وجود داشته باشد، بسیار اقتصادی خواهدبود.
- انجام اندازه گیری روی تجهیزات موجود و مشخص نمودن منـــابع هـــارمونیکی و اعوجـــاج روی شینه ها.
- کالیبره کردن مدل کامپیوتری با استفاده از اندازه گیری ها
- مطالعه شرایط در مدارات جدید ویا مسائل موجود صرفنظر از نوع عامل ایجاد کنندهٔ مشکل
- پیدا نمودن راه حل ها(فیلتر وغیره) و بررسی امکان تداخل آن ها با سیســـتم . همچنیـــن، بـــازبینی حساسیت نتایج نسبت به متغیرهای مهم.
- بعداز پیاده نمودن روش های پیشنهادی، باید از مونیتورینـــگ سیســـتم بمنظـــور تصدیـــق عملکـــرد صحیح سیستم استفاده کرد.

شایان ذکراست که این روند مطالعه براین فرض استوار اســـت کـــه بـــه ابزارهـــای آنـــالیز کـــامپیوتری و تجهیزات مونیتورینگ دسترسی کافی وجود دارد. باید پذیرفت که همیشه نمی توان تمام مراحل اشاره شده قبل را با دقت مطلوب انجام داد. بیشترین مراحلی کـــه احتمـــال حـــذف آن مـــی رود یـــک یـــا دو مرحله از اندازه گیری ها بدلایل مختلف از جمله هزینه است. یک تحلیل گر با تجربه می تواند بدون انجام آزمون ها مسئله را حل نماید ولی بشدت توصیه می شود که انـــدازه گـــیری هـــای اولیـــه ای در صورت امکان انجام شود زیرا این امکان وجود دارد که بعضی مسائل در مطالعهٔ هارمونیک ها از دیـــد تحلیل گر سیستم دور بماند.

الف-۱۸ مؤلفه های متقارن

مهندسین قدرت بصورت سنتی از مؤلفه های متقارن بمنظور درک بهتر رفتار سیستم سه فـــاز اســـتفاده می کنند. با استفاده ازاین مؤلفه ها سیستم سه فاز به سه سیستم تک فاز تبدیل شده که درایـــن حـــالت تحلیل آن بسیار ساده تر خواهدبود. روش مؤلفه های متقارن را می توان برای بررسی پاسخ سیستم به

جریان های هارمونیکی نیز بکار برد. با این روش می توان هر مجموعه از جریـان هـا یـا ولتـاژهـای نامتعادل را به سه مجموعه متعادل تبدیل نمود. مجموعه توالی مثبت شامل سه موج سینوسی بـا ۱۲۰ درجه اختلاف نسبت به یکدیگر می باشند(A-B-C) . امواج سینوسی توالی منفی نیز بـا یکدیگـر ۱۲۰ درجه اختلاف دارند اما جهت گردش آن مخالف توالی مثبت است یعنی (A-C-B) . امـواج سینوسـی توالی صفر با یکدیگر هم فاز می باشند.

دریک سیستم کاملا متعادل:

هارمونیک های مرتبهٔ .....و۱۳ و ۷و۱= h توالی مثبت می باشند.

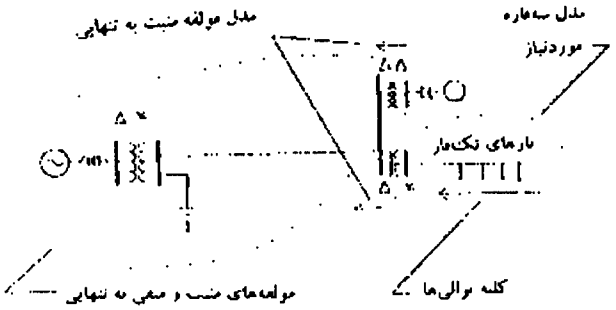
هارمونیک های مرتبهٔ .....و۱۷ و ۱۱و۵= h توالی منفی می باشند.

هارمونیک های مرتبهٔ .....و۱۵ و ۹و۳= h توالی صفر می باشند.

درصورتی که سیستم متعادل باشد واژه های هارمونیک مرتبه سوم و توالی صفر با یکدیگـر مـترادف هستند . ولی دقت نمائید که حتما سیستم باید متعادل باشد. وقتی که این شرایط موجـود نباشـد، هـر یک از هارمونیک ها جزیی از هریک از توالی ها خواهند بود.

پاسخ سیستم به هارمونیک های توالی مثبت کاملا واضح است. در صورتی که فقط به بررسـی توالـی مثبت نیاز باشد مسئله بسیار ساده خواهدبود. مهندسین قدرت در محاسبات پخش بار و افت ولتـاژ از مؤلفه های توالی مثبت استفاده می کنند. 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 بطور سری با منابع هـارمونیکی و شـبکه قـرار گرفتـه باشد، تنها مدار توالی مثبت برای تعیین پاسخ سیستم کافی است . در چنین سیستمی هارمونیک هـای توالی صفر وجود ندارند و از مسیر حرکت آن ها جلوگیری شده اسـت. شـکل ۲۹ ایـن اصـل را بـه تصویر کشیده است. دراین شکل نشان داده شده است که چه مدلـی را مـی تـوان بـرای کاربردهـای مختلف بکار گرفت.



شکل ۲۹- تأثیر ترانسفورماتور روی نیازهای مدل سازی جهت تحلیل هارمونیکی شبکه

هردو شبکه توالی مثبت ومنفی معمولا 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 هارمونیکی نامتعادل اینگونه هارمونیک ها توالی صفر نیستند و می توان آن ها را با همان مدل بررسی نمود.

روش مؤلفه های متقارن برای بررسی سیستم های توزیع چهار سیمه که دارای تعداد زیادی بارهای تک فاز می باشند مفید نخواهدبو، زیرا باید هر دو شبکه توالی مثبت وصفر در محاسبات وارد شوند. معمولا غیرعملی است که سیستم را بصورت دستی حل نمود واغلب با برنامه های کامپیوتری که قادر به مدل سازی دقیق این سیستم ها و حل آن ها 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 شودکه استفاده از روش های مؤلفه های متقارن توسط افرادیکه با رفتار غیرمتعادل سیستم نا آشنا هستند انجام نگیرد.

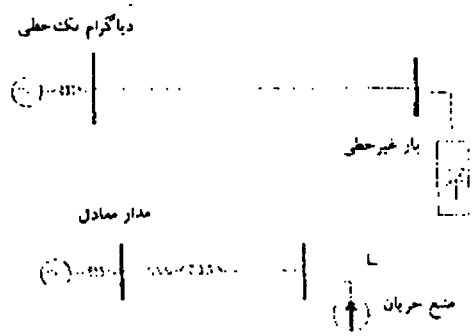
بطور خلاصه، بسیاری از مطالعات هارمونیکی را می توان با تکنیک های مدل سازی مؤلفه های متقارن انجام داد. درصورت مطالعه بارهای صنعتی، در اکثر حالات، اینگونه بارها را می توان با استفاده از مدل امپدانس توالی مثبت حل نمود. یک استثنا مشخص ، مطالعه هارمونیک های ناشی از بارهای تک فاز در فیدرهای توزیع ۲۲۰/۳۸۰ ولت در ساختمان های تجاری یا صنعتی است.

الف -۱۹ مدل سازی منابع هارمونیکی

اغلب بررسی های هارمونیکی با استفاده از تکنیک های حل مدارات خطی در حالت مانا انجام می گیرد. منابع هارمونیک ها، که عناصر غیرخطی می باشند بصورت منابع تزریقی به شبکهٔ خطی مدل سازی می شوند. برای اغلب مطالعات پخش بار هارمونیکی ، منابع هارمونیکی را می توان بصورت منابع سادهٔ جریان هارمونیکی مدل سازی نمود. این مدل، زمانی که اعوجاج ولتاژ در شینه اصلی کمتر از ۵ درصد باشد، قابل اعمال خواهد بود. شکل ۲۰ جایگزینی یک مبدل الکترونیک قدرت با 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 معمولا فرض می شود که مقدار هارمونیک ها بطور معکوس با مرتبهٔ هارمونیک متناسب است. یعنی ، جریان هارمونیک پنجم یک پنجم یا ۲۰ درصد مؤلفهٔ اصلی است و غیره . این نتیجه از سری فوریه موج مربعی حاصل می شود.

بسیاری از بارهای غیرخطی ممکن است جریان مربعی بکشند، ولی بهرحال این اصل را نمی توان در مورد محرکه های استفاده کننده از تکنیک PWM پیشرفته ومنابع تغذیه سوئیچینگ که دارای مؤلفه های هارمونیکی بزرگتری هستند اعمال نمود. جدول ٤ مقادیر نمونه ای را که می توان برای تحلیل چند نوع از تجهیزات بکار برد ارائه داده است.



شکل ۳۰- نمایش یک بار غیرخطی توسط یک منبع جریان هارمونیکی جهت تحلیل سیستم

جدول٤- درصد اعوجاج هارمونیکی نمونه تولیدشده توسط منابع هارمونیکی مرسوم

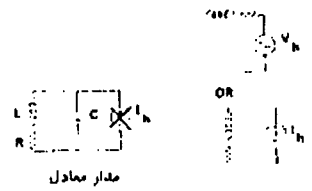
(هارمونیک های فرد مرتبه ۱ تا ۱۳)

مرتبه هارمونیک	محرکه موتور٦ پالسه	محرکه باتکنیک PWM	روشنایی ازنوع قوسی	منابع تغذیه سوئیچینگ
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳	—	—	۲۰ *	۷۰
۵	۱۸	۹۰	۷	٤۰
۷	۱۲	۸۰	۳	۱۵
۹	—	—	۲/٤*	۷
۱۱	٦	۷۵	۱/۸	۵
۱۳	٤	۷۰	۰/۸	۳

* برای مدل های تک فاز و سه فاز غیر متقارن

وقتی که سیستم درحول وحوش تشدید است، استفاده از یک منبع جریان ساده ، تخمین خوبی از ولتاژ اعوجاجی را نحواهد داد. دراین 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، تعیین فرکانس تشدید است که این موضوع را می توان براحتی از مدل ساده بدست آورد. وقتی که شرایط تشدید بکمک اضافه کردن فیلتر حذف شد پاسخ بدست آمده از مدل ساده واقعی تر خواهد شد.

جهت حالاتی که درشرایط تشدید پاسخ دقیق تری لازم است باید از مدل های پیچیده تری استفاده نمود. برای بسیاری از تجهیزات شبکه قدرت مدارمعادل تونن یا نورتن کافی خواهد بود (رجوع شود به شکل ۳۱).



شکل ۳۱- جایگزینی مدل ساده منبع جریان با یک مدار معادل تونن یا نورتن برای بهبود و مدلسازی سیستم در شرایط تشدید

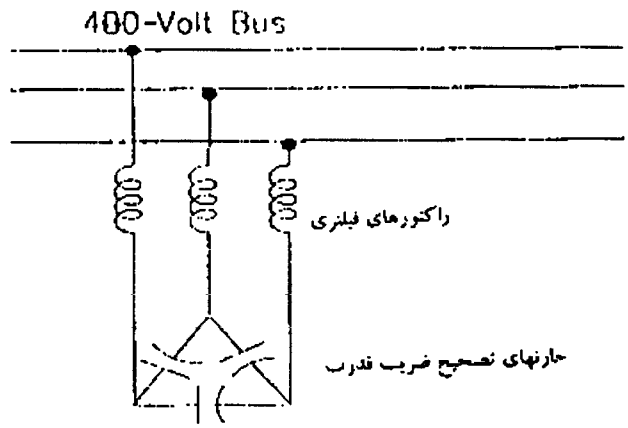
دراین حالت امپدانس اضافی پاسخ مدار تشدید موازی را تصحیح می کند.

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 ۵۰ درصد ولتاژ AC نامی سیستم نمایش داد. امپدانس سری آن نیزامپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور کوره و سیم های ارتباطی می باشد.

متأسفانه ، بدست آوردن یک امپدانس معادل مشخص برای بسیاری از بارهای غیرخطی، مشکل است. دراین حالات، شبیه سازی دقیق بارهای تولید کنندهٔ هارمونیک ها 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 حوزهٔ زمان بهره می گیرند انجام داد.خوشبختانیه ، بندرت نیاز به چنین مطالعات دقیقی در شرایط تشدید خواهد بود و معمولا می توان تجهیزات قوس زننده را با مدل تونن مدل سازی نمود.

الف -۲۰ طراحی فیلترهای هارمونیکی

طراحی فیلتر با یک مثال ساده ولی مرسوم توضیح داده می شود. یک فیلتر برشی قابل تنظیم ٤۰۰ ولت در شکل ۳۲نشان داده شده است. فیلتر برای هارمونیک پنجم طراحی شده و کمی پایین تر از فرکانس هارمونیک مورد نظر تنظیم می گردد.



شکل ۳۲- مثالی از یک آرایش فیلتری ولتاژ پایین

این روش، تولرانس اندازه عناصر فیلتر را تاحدودی خنثی نموده و همچنین از عمل کردن فیلتر در فرکانس هارمونیک مورد نظر بصورت اتصال کوتاه مستقیم جلوگیری می کند.

روش عمومی کاربرد فیلتر بصورت زیر است:

- اعمال یک فیلتر موازی تک تنظیم وطراحی آن برای پایین ترین هارمونیک تولید شده
- تعیین سطح اعوجاج ولتاژ در شینه ولتاژ پایین
- تغییر عناصر فیلتر با درنظر گرفتن خطاها و بازبینی تأثیر فیلتر
- بررسی مشخصه پاسخ فرکانسی سیستم بمنظور تأیید این نکته که تشدید موازی ایجاد شده در نزدیکی فرکانس هارمونیکی نباشد.
- درصورت لزوم، نیاز به چندین فیلتر بررسی شود. مانند فیلترهای مورد نیاز برای هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم و نیز سوم، پنجم و هفتم.

جدول شماره (۵) نتایج طراحی فیلترها نشان می دهد. روش استفاده شده در زیر توضیح داده می شود.

$$K\,\mathrm{var} = K\,\mathrm{var}(\frac{KV}{KV})^2 \qquad (۳۵)$$

دراین حالت ، ولتاژ واقعی و ولتاژ نامی برابر هستند . بنابراین K_{var} واقعی خازن همان K_{var} نامی یعنی K_{var} ۵۰۰ می باشد . جریان فرکانس مؤلفهٔ اصلی بانک خازنی بصورت زیر است:

$$I_{FLcap} = \frac{K_{\mathrm{var}}}{\sqrt{3}KV} = \frac{500}{\sqrt{3}\times 0/4} = 721/69A \qquad (۳۶)$$

امپدانس تک فاز معادل بانک خازنی برابراست با:

$$X_{CY} = \frac{(KV)^2}{M\,\mathrm{var}} = \frac{(0/04)^2}{0/5} = 0/32\Omega \qquad (۳۷)$$

امپدانس راکتور فیلتر با استفاده از رابطهٔ زیر بدست می آید.

$$X_R = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0/32\Omega}{(7/4)^2} = 0/01449\Omega \qquad (۳۸)$$

اضافه کردن راکتور در فیلتر جریان مؤلفه اصلی را به مقدار

$$I_{FL} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}(X_c + X_R)} = \frac{400}{\sqrt{3}(-0/32 + 0/01449)} = 756/14A \qquad (۳۹)$$

تغییر می دهد.

بدلیل اینکه فیلتر جریان مؤلفه اصلی بیشتری را نسبت به وقتی که فقط خازن در مدار باشد می کشد، $K\,\mathrm{var}$ جبران ساز بیشتر از مقدار نامی خازن می شود و با استفاده از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$K\,\mathrm{var} = \sqrt{3} \times V_{bus} \times I_{FL} = \sqrt{3} \times 400 \times 756/14 = 524K\,\mathrm{var} \qquad (٤٠)$$

مقادیر نامی خازن را باید با محدودیت های استاندارد که در انتهای جدول ٥ آمده است مقایسه نمود. مشخصهٔ راکتور فیلتر باید مقادیر جریان مؤلفه های اصلی وهارمونیکی را شامل شود. جریان هارمونیکی را باید با سطح فرضی قابل قبولی از اعوجاج ناشی از منابع دیگر تعیین نمود. دراین حالت ، فرض می شود که اعوجاج ولتاژ یک درصد باشد.

مشخصهٔ تنظیم فیلتر را می توان با ضریب کیفیت (Q) توضیح داد. ضریب کیفیت در حقیقت وسیلهٔ اندازه گیری تیزی تنظیم بوده و برای فیلتر سری مقاومتی بدینصورت تعریف می شود.

$$Q = \frac{nX_L}{R} \qquad (٤١)$$

که درآن:

R : مقاومت سری در فیلتر

n : مرتبه هارمونیک

X_L : راکتانس راکتور فیلتر در فرکانس اصلی می باشد.

جدول ۵- مثالی ازطراحی فیلتر هارمونیکی

محاسبات مربوط به فیلتر ولتاژ پایین		مثالی در رابطه با طراحی فیلتر	
اطلاعات مربوط به شبکه			
مشخصات فیلتر:	هارمونیک پنجم	فرکانس سیستم :	۵۰ هرتز
توان نامی بانک خازنی :	۵۰۰ کیلووار	ولتاژ نامی خازن :	٤۰۰ ولت
جریان نامی بانک خازنی :	۷۲۱/۷ آمپر	فرکانس نامی خازن :	۵۰ هرتز
ولتاژ نامی شینه :	٤۰۰ ولت	توان تغییر یافته بانک خازنی:	۵۰۰ کیلووار
جریان خازن (واقعی) :	۷۲۱/۷ آمپر	کل بار هارمونیکی :	۵۰۰ کیلوولت آمپر
هارمونیک تنظیم فیلتر :	هارمونیک ٤/۷	فرکانس تنظیم فیلتر :	۲۳۵ هرتز
امپدانس خازن (معادل ستاره) :	۰/۳۲ اهم	مقدار خازن (معادل ستاره) :	۹۹٤۷/۲ میکروفاراد
امپدانس راکتور :	۰/۰۱٤٤۹ اهم	مقدار نامی راکتور :	٤٦/۱۲ میکروهانری
جریان بار کامل فیلتر (واقعی) :	۷۵٦/۱٤ آمپر	مقدار جبران سازی :	۵۲٤ کیلووار
جریان بار کامل فیلتر (نامی) :	۷۵٦/۱٤ آمپر	میزان THD مجاز شرکت برق :	۱ درصد
جریان هارمونیکی بار :	۳۰ درصد مؤلفه اصلی	حداکثر جریان هارمونیکی بار :	۱۸۰/٤ آمپر
جریان هارمونیکی شرکت برق:	٤۷/۷ آمپر	حداکثر جریان هارمونیکی کل :	۲۲۸/۱ آمپر
محاسبات مربوط به خازن			
جریان مؤثر فیلتر	۷۵٦/۱٤ آمپر	ولتاژ مؤلفهٔ اصلی خازن	٤۱۹ ولت
هارمونیک ولتاژخازن	۳٦/٤ ولت	حداکثر پیک ولتاژ	٤٤۸ ولت
ولتاژ مؤثر خازن	٤۲۰ ولت	حداکثر پیک جریان	۱۰۳۰ آمپر
حدود خازن		**آرایش فیلتر**	
	(٪) حد مجاز	(٪) واقعی	
پیک ولتاژ	۱۲۰	۱۱۲	
جریان	۱۳۰	۱۱۱	
توان نامی	۱۳۵	۱۱۷	
ولتاژ مؤثر	۱۱۰	۱۰۵	
مشخصات طراحی راکتورفیلتر			
امپدانس راکتور	۰/۰۱٤٤۹ اهم	مقدار نامی راکتور :	٤٦/۱۲ میکروهانری
جریان نامی مؤلفهٔ اصلی	۷۵٦/۱٤ آمپر	جریان هارمونیکی :	۲۲۸/۱ آمپر

معمولا ، مقدار R همان مقاومت راکتوراست. دراین حالت مقدار ضریب کیفیت بسیار بزرگ می باشد و عمل فیلترکردن برای باند باریکی از فرکانس انجام می گیرد. در عملکرد فیلترهای تک تنظیم این حالت بسیار رضایت بخش است ودراین حالت فیلتر بسیار اقتصادی خواهد بود(تلفات انرژی پایین). به هر حال ، گاهی اوقات لازم است که مقداری تلفات بصورت عمدی وارد سیستم شود تا به میرا

شدن پاسخ سیستم کمک کند. یک مقاومت معمولا به صورت موازی با راکتور بسته می شودو دراین شرایط فیلتر بالاگذر بوجود می آید. دراین حالت ضریب کیفیت به صورت عکس معادله ۳۶ تعریف می شود، بنحویکه ضریب کیفیت های بزرگ ، باریک بودن باند فرکانس را نشان خواهند داد. از فیلترهای بالاگذر معمولا برای حذف هارمونیک ها یازدهم و سیزدهم به بالا استفاده می شود. معمولا استفاده از این فیلترها در هارمونیک های پنجم و هفتم بدلیل مقدار تلفات واندازه مقاومت اقتصادی نخواهد بود. راکتورهای مورد استفاده در فیلترهای بزرگ معمولا با هستهٔ هوایی ساخته می شوند. در چنین حالتی، مشخصهٔ آن در برابر جریان وفرکانس خطی خواهدبود. راکتورهای مورد استفاده در فیلترهای کوچک و یا فیلترهایی که در یک فضای محدود و کوچک باید استفاده شوند باید ازنوع هستهٔ فولادی ساخته شوند.

خطای۵ ± درصد در راکتانس راکتورها مورد استفاده در کاربردهای صنعتی معمولا قابل قبول می باشد. نسبت $\frac{X}{R}$ نیز بین ۵۰ تا ۱۵۰ است. درصورت 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 وراکتور را بتواند تحمل کند. مقدار ضریب کیفیت در حالت بالاگذر معمولا بین ۱ تا۲ انتخاب می گردد تا فیلتر پاسخ تختی را در بالای فرکانس تنظیم شده ارائه دهد.

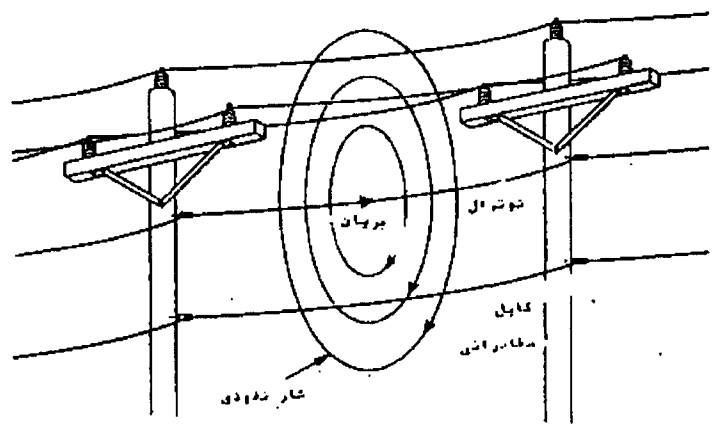
فیلترهای مورد استفاده در کاربردهای سه فاز قدرت بالا مانند سیستم های کنترل توان راکتیو استاتیک اغلب شامل فیلترهای هارمونیک پنجم وهفتم می باشند زیرا اینگونه هارمونیک ها بزرگترین هارمونیک های تولید شده توسط پل های۶ پالسی خواهند بود. گاهی اوقات این حالت باعث می شود که سیستم هارمونیک مرتبهٔ سوم نزدیک شرایط تشدید قرار بگیرد که در نتیجه به فیلتر هارمونیک سوم نیاز می باشد. عموما، 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 ونیز در پارامترهای سیستم مقدار کمی هارمونیک غیر مشخصه تولید می کند. اگر سیستم به این هارمونیک ها پاسخ بدهد باید به هر حال از فیلتر استفاده نمود.

الف - ۲۱ 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 محدودهٔ عرض باند مکالمات صوتی ایجاد می شود.

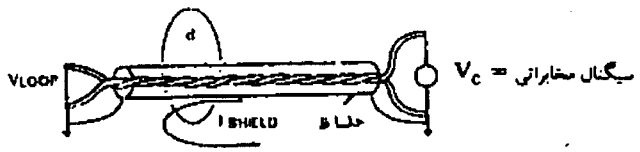
هارمونیک های بین ٤٥٠ هرتز(هارمونیک نهم) و ۱۲۰۰ هرتز معمولا آثار زیان بارتری دارند. ولتاژ القایی به ازای هرآمپر جریان با بالارفتن فرکانس زیاد می شود. هارمونیک مرتبه سوم معمولا در سیستم های چهار سیمه بدلیل اینکه در تمام هادی ها هم فاز می باشند مشکل زا هستند و دراین حالت این جریان ها در هادی نوترال با یکدیگر جمع شده و اثر نامناسبی را در سیستم های مخابراتی ایجاد می کنند.

مؤلفه های هارمونیکی به روش القایی یا هدایت مستقیم به سیستم های تلفنی منتقل می شوند. شکل ۳۳ کوپلینگ بوجود آمده در اثر القاء و ناشی از سیم نوترال یک خط توزیع هوایی چهار سیمه را نشان می دهد. اگر ازسیم های تلفنی معمولی استفاده شود این مسئله بسیار مشکل زا خواهد بود. در صورتیکه از سیم های تلفنی شیلددارباهادی های به هم پیچیده شده در سیستم تلفنی استفاده شود، اثر القا دارای اهمیت کمتری خواهد بود. دراین نوع سیم های تلفنی، کوپلینگ القاء مستقیم در هر دو هادی ، ولتاژ مساوی تولید کرده که این عامل باعث ایجاد ولتاژ منتجه صفر در حلقه متشکل از هادی ها می گردد.



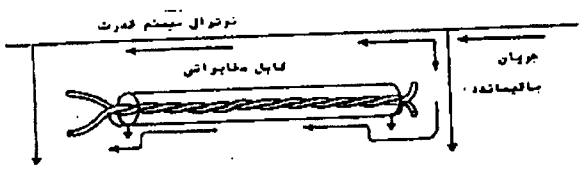
شکل ۳۳- کوپلینگ القایی ناشی ازجریان صفر یک سیستم قدرت و مدار تلفنی

درصورتی که جریان بالایی در شیلد اطراف هادی تلفن بوجود بیاید کوپلینگ القـایی هنـوز هـم مـی تواند مسئله ساز باشد. جریان عبوری از شیلد باعث ایجاد افت مقاومتی (رجوع شود بـه شـکل ۳٤) شده و درنتیجه اختلاف پتانسیلی در مراجع زمین دو سر کابل تلفن بوجود می آید.



شکل ۳٤-افت مقاومتی درکابل شیلددار در اثر اختلاف پتانسیل در مراجع زمین دو سرکابل تلفن

از سوی دیگر جریان شیلد می تواند توسط پدیده هدایت مستقیم بوجود آید(رجوع شـود بـه شـکل ۳۵) . دراین شکل شیلد بصورت موازی با مسیر زمین سیستم قدرت مـی باشـد. اگـر شـرایط زمیـن محلی به نحوی باشد که مقدار نسبتا بزرگی جریان در شیلد بوجود آید مقدار افت مقـاومتی بـزرگـی بوجود می آید وباعث ایجاد اختلاف پتانسیل بین مراجع زمین دو سر کابل تلفن می گردد.

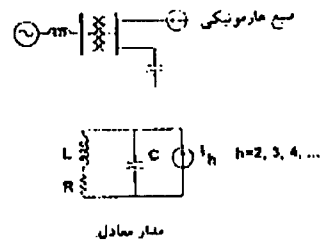


شکل ۳۵- کوپلینگ توسط هدایت مستقیم دریک مسیر زمنی مشترک

الف-۲۲ برنامه های کامپیوتری برای محاسبهٔ هارمونیک ها

از مباحث گذشته مشخص شد که برای هر سیستم حتی ساده ترین آن ها، یک برنامهٔ 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 سیستم های صنعتی کوچک است و تحلیل آن براساس محاسبات دستی استوار شده است(رجوع شود به شکل ۳٦). این سیستم اساسا یک مدار تک شینه همراه با یک خازن است. دراین حالت دو مورد را بسادگی می توان انجام داد:



شکل ۳٦- یک مدارساده که به صورت دستی حل می شود

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

۲) تخمینی از اعوجاج ولتاژ بدلیل جریان I_h .

ولتاژ V_h توسط رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$V_h = \left[\frac{R + J\omega L}{1 - \omega^2 LC + J\omega RC}\right] I_h \qquad h= ۲،۳ ،.. ... \qquad (٤۲)$$

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

متأسفانه ، تمام حالات عملی را با چنین سیستم ساده ای نمی توان نمایش داد. درحقیقت، اضافه نمودن حتی یک شینه بیشتر به مدار ساده شکل ۳٦ موجب می گردد که تحلیل آن حتی برای افراد خبره نیز مشکل شود. بهرحال، یک برنامهٔ کامپیوتری این کار را در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام می دهد.

برای استفاده از برنامه های کامپیوتری باید شبکهٔ مورد مطالعه، بارها ومنابع را برای برنامه مشخص نمود. اطلاعات باید شامل موارد زیر باشد:

- امپدانس ترانسفورماتور و خطوط
- نوع اتصال ترانسفورماتورها
- مقادیر خارن و محل آن ها
- طیف هارمونیکی ناشی از بارهای غیرخطی
- ولتاژهای منابع قدرت

این مقادیر به عنوان ورودی به برنامه داده می شود وبرنامه باید بصورت اتوماتیک در هارمونیک مورد نظر امپدانس ها را مشخص نموده و سپس برنامه را حل نماید.

الف - ۲۳ قابلیت های برنامه های تحلیل هارمونیکی

برنامه های کامپیوتری مورد پذیرش در تحلیل هارمونیک ها در سیستم های قدرت باید دارای مشخصه های زیرباشند.

- 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 هرحال این حالت عمومیت 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 سازی سه فاز استفاده شود.
- برنامه باید قادر به بدست آوردن امپدانس سیستم در فرکانس های مختلف (با تغییرات مثلا ۱۰ هرتز) باشد دراین صورت می توان مشخصهٔ پاسخ فرکانسی را برای تعیین شرایط تشدید بدست آورد.
- برنامه باید قادر باشد که بطور همزمان چندین منبع هارمونیکی را حل نماید تا بتوان مقدار واقعی اعوجاج ولتاژ و جریان را بدست آورد.
- این برنامه باید مدل های معمول منابع هارمونیکی را به صورت از پیش ساخته داشته باشند.
- این برنامه ها باید هم منبع ولتاژ هارمونیکی و هم منبع جریان هارمونیکی را مدل کنند.

- این برنامه ها باید به صورت اتوماتیک زاویه فاز منابع را براساس زوایای فازمولفه 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 براحتی کارکند.

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 ها 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 ، فنلاند ، لهستان ، دانمارک و آمریکا بصورت خلاصه در این قسمت ارائه می گردد.

ب -۱ کشور آلمان

مرحله اول مقررات این کشور اجازه می دهد که کلیه تجهیزاتی که نسبت قدرت نامی آن ها به سطح اتصال کوتاه شینه محل تغذیه کمتراز ۰/۱ درصد باشد به شبکه متصل گردند. بعبارت دیگر چنانکه رابطه زیر برای هر وسیله برقرارباشد احتیاج به بررسی هارمونیکی و مطالعات دقیق نبوده و پذیرش اتوماتیک صورت می گیرد.

$$P/Ssc < 0.1/100 \qquad (۱)$$

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

درمرحله دوم مقررات این کشور بجای 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 ۳ تا ۳۰ درصد می تواند تغییر نماید.

درمرحله سوم مقررات این کشور مقدار مجاز هارمونیک های ولتاژ در شینه مشترک اعمال می گردد که برای هارمونیک های پنجم و هفتم بایستی کمتراز ۵ درصد وبرای هارمونیک های یازدهم و سیزدهم بایستی کمتراز ۳ درصدباشد.

ب -۲ کشور استرالیا

دراین کشور ماکزیمم ظرفیت یک مبدل سه فاز که می تواند به شبکه توزیع وصل گردد و نیـازی بـه مطالعه بخصوصی در مورد آن نیست(مرحله اول مقررات) برابر ۰/۳ درصد قدرت اتصال کوتاه شینه محل اتصال می باشد ، یعنی:

$$P/Ssc < 0.3/100 \qquad (۲)$$

درضمن چنانکه شرایط مانند موارد مطرح شده در الف –ب و ج باشد مقررات مرحلـه (۲) و یـا (۳) که در ادامه به آن اشاره می گردد بایستی بکار گرفته شود:

الف – حداقل سطح اتصال کوتاه سیستم توزیع (ولتاژ پایین) کمتراز ۵ مگاولت آمپر ویا حداقل سطح اتصال کوتاه سیستم توزیع (ولتاژ متوسط) کمتراز ۵۰ مگاولت آمپ ر باشد.

ب – ظرفیت دستگاه بزرگتر از ۷۵ کیلوولت آمپر در سیستم توزیع (ولتاژ پایین) و یا بزرگـتراز ۵۰۰ کیلوولت آمپر درسیستم توزیع (ولتاژ متوسط) باشد.

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

درمراحل دوم وسوم استاندارد این کشور حـد مجـاز مشـخصی را بـرای هـر مشـترک تولیـد کننـده هارمونیک تعیین نمی شود و پذیرش مشترک براساس مقدار حد مجاز هارمونیک شبکه محل اتصـال تعیین می گردد یعنی اولین مشترک می تواند تقریبا باندازه مقدار مجاز هارمونیک های شبکه ، تولیـد هارمونیک کند و تمام ظرفیت را بگیرد و جایی برای مشترک دوم نگذارد.

ب –۳ کشور انگلستان

دراین کشور برای مقررات مرحله یک ، تجهیزات به دو دسته تجهیزات سه فاز و تجهیزات یـک فـاز تقسیم شده اند درمورد تجهیزات سه فاز مقررات مرحله (۱) بشرح زیر است:

ماکزیمم ظرفیت (به کیلوولت آمپر) یک مبدل یا یک رگولاتور که می تواند به سیستم ولتاژ پـایین و یا ولتاژ متوسط بدون بررسی جزئیات وصل گردد مطابق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱- ماکزیمم ظرفیت مبدل ها برای پذیرش اتوماتیک در کشور انگلستان

ولتاژ سیستم توزیع	ماکزیمم ظرفیت مبدل های سه فاز به KVA			ماکزیمم ظرفیت رگولاتورهای سه فاز به KVA	
	۳ ضربه ای	٦ ضربه ای	۱۲ ضربه ای	٦ تریستوری	۳ تریستوری/۳دیود
ولتاژ پایین	۸	۱۲	—	۱٤	۱۰
ولتاژ متوسط	۸۵	۱۳۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۰۰

درمورد تجهیزات یک فاز مقررات مرحله یک بشرح زیر است:

درمورد وسایل خانگی و شبیه آن استاندارد IEC شماره ٦۰۵۵۵ مورد استفاده قرار می گیرد ولی ماکزیمم 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 توانند برای ولتاژ ۲٤۰ ولت برابر ۵ کیلوولت آمپر وبرای ولتاژ ٤۱۵ یا ٤۸۰ ولت برابر ۷/۵ کیلوولت آمپر باشد.

درضمن تجهیزاتی که هردو 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 آن ها به فازهای مختلف باشد که یک حالت تعادل در مورد بارهای غیرخطی وجود داشته باشد. مقررات این مرحله اجازه اتصال دو یکسو کننده یا رگولاتور را به یک فاز در یک محل 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 AC جریان DC تزریق می کنند داده نمی شود.

مقررات مرحله دوم وسوم مقررات کشور انگلستان که تقریبا شبیه مقررات کشور استرالیاست.

ب-٤ کشور بلژیک

مقررات مرحله یک این کشور اجازه می دهد که تجهیزات دارای یکسو کننده ویا رگولاتور که حداکثر ظرفیت آن مطابق جدول ۲ باشد بدون بررسی دقیق به شبکه ولتاژ متوسط وصل گردد.

جدول ۲- ماکزیمم ظرفیت مبدل ها برای پذیرش اتوماتیک در کشوربلژیک

ماکزیمم ظرفیت مبدل های سه فاز به KVA			ماکزیمم ظرفیت رگولاتورهای سه فاز به KVA	
۳ ضربه ای	٦ ضربه ای	۱۲ ضربه ای	٦ تریستوری	۳ تریستوری/۳دیود
۸۵	۱۳۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۰۰

درمقررات مرحله اول این کشور در مورد وصل مجموعه بارهای غیرخطی یک مشترک سه فاز به شبکه ولتاژ متوسط از عبارت توان هم تراز شده PW [1] استفاده می گردد مقدار توان هم تراز شده یک مجموعه بارهای غیرخطی از رابطه زیر بدست می آید:

$$Pw = 3Pc3 + 2Pc6 + Pc12 + 2\Pr 6 + 2.5\Pr 3 \qquad (۳)$$

که در آن Pc3 جمع ظرفیت نامی مبدل های سه ضربه ای، Pc6 جمع ظرفیت نامی مبدل های شش ضربه ای، Pc12 جمع ظرفیت نامی مبدل های دوازده ضریه ای ، Pr6 جمع ظرفیت نامی رگولاتورهای کنترل کامل (٦ تریستوری)، Pr3 جمع ظرفیت نامی رگولاتورهای نمی کنترلی (۳ تریستور/۳ دیود) می باشد.

دراین مقررات چنانکه توان هم تراز شده یک مشترک که مطابق رابطه فوق محاسبه می شود کمتراز ۲۵۰ کیلوولت آمپر گرددداحتیاج به بررسی و مطالعات دقیق نبوده و شرکت های برق کشور بلژیک اجازه اتصال مشترک به شبکه را می دهند.

ب-۵ کشور فرانسه

مقررات 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 (p) مشترک کمتراز ۵۰۰ کیلوولت آمپر ویا کمتر از یک درصدسطح اتصال کوتاه Scc محل اتصال بار باشد، یعنی:

$$P < 500KVA \qquad (٤)$$

ویا

$$P < 0.01Ssc \qquad (۵)$$

1-

درمقررات مرحله دوم و سوم این کشور، حدمجـاز هـارمونیک هـای ولتـاژ تولیـدی هـر مشـترک و همچنین حد مجاز هارمونیک های ولتاژ در شبکه تعیین شده است، مقدار مجاز جمع هارمونیک های ولتاژ یک مشترک بایستی کمتراز ۱/٦ درصد ومقدار هریک از هارمونیک های زوج مشـترک نبایسـتی بیشتراز ۰/٦ درصد باشد، در حالی که مقدار مجاز جمع هارمونیک ها در شبکه ولتاژ متوسط ۳ درصد تعیین گردیده است.

ب-٦ کشور فنلاند

درکشور فنلاند ظاهرا مقررات بصورت مشخص مرحلـه (۱)، (۲) و (۳) وجـود نـدارد در عـوض در مقررات آن ها محدوده های مجاز هارمونیک های ولتـاژ و جریـان مشـخص شـده اسـت و چنانکـه مشترکی این محدوده ها را رعایت نماید اجازه اتصال به شبکه داده می شود در مـورد مقـادیر مجـاز هارمونیک های ولتاژ(برای متوسط یک دقیقه) جدول ۳ مورد استفاده قرار می گیرد:

جدول۳-حداکثرمقدارمجازجمع هارمونیک ها ومقدارهرنوع هارمونیک ولتاژدرکشورفنلاند

ولتاژ شبکه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ به درصد نسبت به ولتاژ فرکانس پایه	اعوجاج تکی ولتاژبه درصد نسبت به ولتاژ فرکانس پایه
کمتراز ۱۰۰۰ولت	٥	٤
۳ تا۲۰ کیلوولت	٤	۳
۳۰تا٤٥ کیلوولت	۳	۲
٦۰تا۱۱۰کیلوولت	۱/٥	۱

درمورد مقادیرمجاز هارمونیک های جریان (متوسط یک دقیقه) که هر مشـترک مـی توانـد بـه شـبکه تزریق کند جدول ٤در مقررات این کشور وجود دارد.

جدول٤-حداکثرمقدارمجاز هارمونیک ها جریان هر مشترک درکشورفنلاند

ولتاژ شبکه	جمع هارمونیک های جریان به درصد نسبت به بارنامی مشترک	مقدارهرهارمونیک جریان به درصد نسبت به بار نامی مشترک
۳ تا۲۰ کیلوولت	۱۰	۸
۳۰تا٤٥ کیلوولت	۷	٦
٦۰تا۱۱۰کیلوولت	٥	٤

درمقررات کشور فنلاند برای سیستم ولتاژ بیشتراز ۱۱۰ کیلوولت، جمع هارمونیک های جریان مجـاز برحسب آمپر چنانکه مقدار جریان نامی مشترک کمتراز ۱۰۰ آمپر باشد از رابطه زیر بدست می آید:

$$Ih = .005In \qquad (٦)$$

واگر جریان نامی مشترک بیشتراز ۱۰۰ آمپر باشد مقدار مجاز جمع هارمونیک های جریان تولیدی این مشترک نبایستی از یک آمپر بیشتر گردد.

البته چنانکه مقدار هارمونیک های جریان تولیدی یک مشـترک بیشـتراز مقـادیر جـدول فـوق گـردد شرکت برق می تواند با بررسی های لازم و درشرایط خاص اجازه اتصال به شبکه را به مشترک بدهد بشرطی که مقادیر مجاز هارمونیک های ولتاژ رعایت گردد و درمحل اتصـال ، مشـترک دیگـری کـه تولید هارمونیک می کند وجود نداشته باشد.

مقررات کشور فنلاند اجازه اتصال مشترک هایی که جریان DC به شبکه تزریق می کننـد را بصـورت مستقیم نمی دهد. در شرایط خاص اینگونه بارها می توانند از طریق یک ترانسفورماتور مخصوص به خود به شبکه وصل گردند.

ب -۷ کشورلهستان

درمقررات مرحله اول این کشور چنانکه ظرفیت مبدل ٦ ضربه ای کمـتراز ۲ درصـد قـدرت اتصـال کوتاه محل تغذیه باشد اجازه وصل مشترک بصورت اتوماتیک وبدون بررسی های تفصیلـی داده مـی شود. در مورد مبدل های ۱۲ ضربه ای مقدار مجاز ظرفیت برای مقررات مرحله یک می تواند تـا ۳/۵ درصد قدرت اتصال کوتاه باشد.

برای مقررات مرحله دوم وسوم چنانکه مشترک در ۹۰ درصد ساعات مقادیر هارمونیک های ولتـاژی بیش از آنچه در جدول زیر آمده است ایجاد نکند اجازه کار داده می شود دراین مقـررات ۱۰ درصـد ساعات دیگر روز مشترک مجاز است تا دوبرابر اعداد داده شده در جدول ۵ تولید هارمونیک نمایند.

جدول۵- ماکزیمم مقدار مجاز جمع هارمونیک های ولتاژ در کشورلهستان

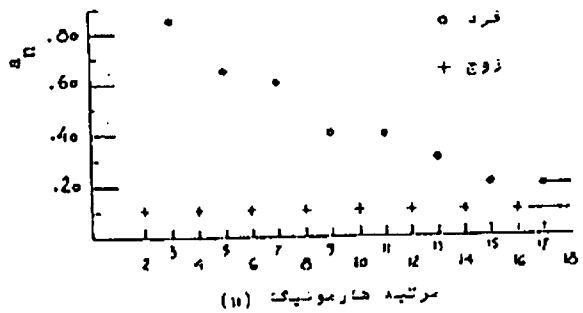
ولتاژ شبکه	جمع هارمونیک های ولتاژ مجاز به درصد (نسبت به ولتاژ فرکانس پایه)
کمتراز ۱۰۰۰ ولت	۷
۱ تا ۳۰ کیلوولت	۵
۱۱۰ کیلوولتا	۱/۵

ب -۸ کشور دانمارک

درمقررات این کشور چنانکه مقدار هارمونیک جریان تزریقی مشترک از مقدار رابطه زیر کمترباشد، اجازه اتصال به شبکه داده می شود.

$$In < (a_n / 100_n) \times (S_{sc} / \sqrt{3}U) \qquad (۷)$$

دررابطه فوق In جریان هارمونیک n ام تزریقی مشترک، Ssc قدرت اتصال کوتاه شینه محل اتصال مشترک به ولت آمپر، U ولتاژ فاز به فاز شینه به ولت و a_n ضریبی است که بستگی به نوع هارمونیک دارد ومقدار آن از شکل ۱ بدست می آید.



ب-۹

شکل ۱- ضریب a_n برحسب نوع هارمونیک در استاندارد کشور دانمارک

ب-۹ کشور آمریکا

دراین کشور استاندارد ساده و مشخصی برای تعیین مقدار مجاز تولید هارمونیک برای هر یک از مشترکین وجود ندارد ولی کمیته های مختلف IEEE درحال مطالعه و بررسی جهت تعیین استانداردهای لازم دراین مورد می باشند.

درتجدیدنظر این استاندارد مقررات ساده ای برای پذیرش مشترکین تولید کننده هارمونیک در سطح ولتاژ ۲/٤ تا۱۳۸ کیلوولت اضافه شده است و جدول ٦ ماکزیمم مقدار هر نوع هارمونیک جریان را که یک مشترک مجاز است به شبکه تزریق کند مشخص می نماید که چنانکه مشترکی کمتراز مقادیر

مشخص شده دراین جدول تولید هارمونیک نماید بدون بررسی های مفصل ودقیق معمولا اجازه اتصال به شبکه داده می شود.

جدول٦- ماکزیمم مقدار مجاز جمع هارمونیک های جریان مشترکین در کشورآمریکا

ماکزیمم مقدارهارمونیک جریان مجاز برای بارهای غیرخطی در شبکه های ۲/٤ کیلوولت به درصد (نسبت به جریان نامی با فرکانس پایه)						
نسبت جریان اتصال کوتاه محل تغذیه به جریان نامی مشترک	مرتبه هارمونیک های فرد					اعوجاج کلی
	h < ۱۱	۱۱< h < ۱۷	۱۷< h < ۲۳	۲۳< h < ۳۵	۳۵>h	THD
کوچکتراز۲۰	٤	۲	۱/٥	۰/٦	۰/۳	٥
۲۰ تا ٥۰	۷	۳/٥	۲/٥	۱/۰	۰/٥	۸
٥۰ تا٥۰۰	۱۰	٤/٥	٤/۰	۱/٥	۰/۷	۱۲
۱۰۰ تا۱۰۰۰	۱۲	٥/٥	٥/۰	۲/۰	۱	۱٥
بزرگتراز۱۰۰۰	۱٥	۷	٦/۰	۲/٥	۱/٤	۲۰

۱) مقدارهارمونیک های زوج بایستی کمتراز۲٥ درصد مقدار هارمونیک های فردباشد.

۲) درمورد شبکه های ٦۹ الی ۱۳۸ کیلوولت نصف مقادیر فوق بایستی بکار رود.

۳) درمورد شبکه های ۱۳۸ کیلوولت به بالا در مورد هرمشترک بایستی مطالعات و بررسی های مخصوص به خود انجام گیرد.

پیوست ج

مقررات برخی ازکشورهادررابطه با مقدارمجازهارمونیک ها درشبکه های برق با ولتاژ مختلف

(اطلاعاتی)

دراین بخش با مراجعه به مقررات استانداردکشورهای مختلف و یا مقالاتی که در نشـریات در مـورد این مقررات منتشرشده است ماکزیمم حد قابل قبول هارمونیک های ولتاژ و یا جریان در شبکه هـای برق با ولتاژهای مختلف بصورت خلاصه گزارش می گردد.

ج-۱ کشور آلمان

مقررات این کشور مقدار مجاز هارمونیک هـای ولتـاژ در شـبکه را تعییـن مـی نمـاید. مقـدار مجـاز هارمونیک ولتاژ پنجم و هفتم برابر ۵ درصد و مقدار مجاز هارمونیک ولتاژ یازدهم و سیزدهم برابـر ۳ درصد می باشد.

ج -۲ کشوراسترالیا

مقررات این کشور نیز مقدار هارمونیک های ولتاژ در شبکه را مشخص می نماید و تمایزی بین شبکه های توزیع تا ولتاژ ۳۳ کیلوولت و شبکه های انتقال تا ۱۱۰ کیلوولت می گذارد. همچنین درمقـررات این کشور حدمجاز اعوجاج کلی ولتاژ و مقدار مجاز اعوجاج کلی ولتاژ تعیین مـی گـردد. جـدول ۱ حدود مجاز هارمونیک های ولتاژ در شبکه با ولتاژهای مختلف کشور استرالیا را نشان می دهد.

جدول۱- حدمجاز هارمونیک های ولتاژ درشبکه های برق کشور استرالیا

نوع شبکه	ولتاژ سیستم تغذیه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ(THD) به درصد ، نسبت به ولتاژفرکانس پایه	اعوجاج تکی ولتاژبه درصد	
			هارمونیک فرد	هارمونیکزوج
شبکه توزیع	تا۳۳ کیلوولت	۵	٤	۲
شبکه انتقال	۲۲و۳۳و٦٦ کیلوولت	۳	۲	۱
	۱۱۰کیلوولت وبالاتر	۱/۵	۱	۰/۵

ج-۳ کشورانگلستان

درمقررات کشور انگلستان درمورد هارمونیک ها ماکزیمم حد اعوجاج کلی ولتـاژ و همچنیـن مقـدار مجاز اعوجاج تکی هر هارمونیک ولتاژ در شبکه برق برای سـطوح ولتـاژ مختلـف مطـابق جـدول ۲ تعیین گردیده است.

جدول۲- حدمجاز هارمونیک های ولتاژ درشبکه های برق کشور انگلستان

ولتاژ شبکه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ(THD) به درصد ، نسبت به ولتاژفرکانس پایه	اعوجاج تکی ولتاژبه درصد	
		هارمونیک فرد	هارمونیک زوج
٤١٥ولت	٥	٤	٢
٦/٦و١١ کیلوولت	٤	٣	١/٧٥
٣٣و٦٦کیلوولت	٣	٢	١
١٣٢ کیلوولت	١/٥	١	٠/٥

ج-٤ کشورفنلاند

درمقررات کشور فنلاند مربوط به هارمونیک ها، ماکزیمم حد مجاز اعوجاج کلی ولتاژ و همچنین مقدار مجاز اعوجاج تکی هر هارمونیک ولتاژ در شبکه برق باسطوح ولتاژ مختلف، مطابق جدول ٣ تعیین گردیده است.

جدول ٣- حدمجاز هارمونیک های ولتاژ درشبکه های برق کشور فنلاند

ولتاژ شبکه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (THD) به درصد، نسبت به ولتاژ فرکانس پایه	اعوجاج تکی ولتاژ به درصد، نسبت به ولتاژ فرکانس پایه
کمتراز١٠٠٠ولت	٥	٤
٣ تا٢٠ کیلوولت	٤	٣
٣٠ تا٤٥ کیلوولت	٣	٢
٦٠تا١١٠کیلوولت	١/٥	١

ج-٥ کشور آمریکا

دراین کشور معمولا استاندارد شماره ٥١٩ انجمن مهندسین برق والکترونیک IEEE بکار می رود، این استاندارد که درسال ١٩٨١ منتشر شده است مقدار ماکزیمم اعوجاج تکی هرهارمونیک ولتاژ و اعوجاج کلی هارمونیک های ولتاژ (THD) را بعنوان محدودیت مشخص می نماید.

جدول ٤ حدمجاز اعوجاج کلی ولتاژ در شبکه های با ولتاژ و کاربرد مختلف دراین استاندارد رانشان می دهد.

جدول ٤- حدمجاز هارمونیکی کل ولتاژ درشبکه های برق کشور آمریکا

ولتاژ شبکه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژبرای شبکه های عمومی به درصد	اعوجاج کلی ولتاژ برای شبکه های اختصاصی به درصد
٢/٤تا٦٩ کیلوولت	٥	٨
٦٩تا٣٨ کیلوولت	٢/٥	٢/٥
١٣٨ کیلوولت به بالا	١/٥	١/٥

منظوراز شبکه های اختصاصی در جدول٤ فیدرهایی است که مخصوص اتصال مشترکین با تولید هارمونیک می باشد.

جدول ٥ حدمجاز هارمونیک ولتاژ را دراستاندارد ٥١٩- IEEE مشخص می کند.

جدول٥- حدمجاز هرنوع هارمونیک ولتاژ در شبکه های برق کشور آمریکا

ولتاژ شبکه	مقدارماکزیمم اعوجاج تکی ولتاژ هر هارمونیک به درصد
٢/٤ تا٦٩ کیلوولت	٣
٦٩ تا ١٣٨ کیلوولت	١/٥
١٣٨ کیلوولت به بالا	١

ج- ٦ کشور لهستان

درمقررات کشور لهستان در رابطه با هارمونیک ها، ماکزیمم حدمجاز اعوجاج کلی ولتاژ در شبکه برق با سطوح مختلف ولتاژ مطابق جدول ٦ تعیین شده است.

جدول٦- حدمجاز اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ در شبکه های برق کشور لهستان

ولتاژ شبکه	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ(THD) ، به درصدنسبت به ولتاژفرکانس پایه
کمتراز١٠٠٠ ولت	٧
١تا٣٠ کیلوولت	٥
١١٠کیلوولت	١/٥

پیوست د

مقادیراندازه گیری شده هارمونیک ها درشبکه های برق برخی کشورها

برخی کشورها درطول سالهای گذشته مقدارهارمونیک های نقاط مختلف شبکه خـــود بخصـوص در نقاط نزدیک منابع تولید هارمونیک ها را اندازه گیری و گزارش کـرده انـد. کمیتـه کـاری شـماره ۳۶ سیگره با بررسی نتایج این اندازه گیری ها گزارشی درمورد محدوده تغییرات مقدار هارمونیک هـا در شبکه های ولتاژ کم ، متوسط و زیاد تهیه و منتشر کرده است که دراین قسمت نتایج این گزارش ارائه می گردد.

قبل از ارائه نتایج لازم است این موضوع روشن شود که دریک شبکه مقدار هارمونیک ها ثابت نبـوده و در طول زمان و همچنین با تغییر شکل شبکه تغییـر مـی کننـد. دراین رابطـه دوحـد بـرای مقـدار هارمونیک ها در شبکه تعریف می گردد.

- حد پایین که در بیشتر نقاط شبکه که نزدیک منابع تولید هارمونیک می باشند در اکـثر اوقـات مقدار هارمونیک ها برابر این حداست واین حد احتمال اثرات مخرب کمتری دارد.
- حد بالا که درنقاط کمی از شبکه ودر مواقع نادری مقدار هارمونیک ها برابر این حد می باشد واین حد احتمال اثرات مخرب بیشتری دارد.

همچنین برای جدا کردن حالات گذرای هارمونیک های جریان ویا ولتاژ در حالت مانا معمولا مقـدار هارمونیک ها را حداقل بصورت مقدار مؤثردرطول سه ثانیه اندازه گیری می نمایند.

نتایج اندازه گیری های انجام شده درمورد هارمونیک ها در شبکه های توزیع، باولتـــاژ کمـتراز ۱۰۰۰ ولت که توسط کمیته کاری سیگره گزارش شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱-نتایج جمع بندی شده اندازه گیری هارمونیک های ولتاژ درشبکه های توزیع(ولتاژپایین) درکشورهای مختلف

هارمونیک های فردکه مضرب ۳ نمی باشند		هارمونیک های فردکه مضرب۳ می باشند		هارمونیک های زوج	
مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد	مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد	مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد
	حدپائین / حدبالا		حدپائین / حدبالا		حدپائین / حدبالا
پنجم	٤ / ٦	سوم	٤ / ٥	دوم	١ / ٢
هفتم	٤ / ٥	نهم	٠/٨ / ١/٥	چهارم	٠/٥ / ١
یازدهم	٢/٥ / ٣/٥	پانزدهم	<٠/٣ / ٠/٣	ششم	<٠/٥ / ٠/٥
سیزدهم	٢ / ٢/٥	بیست ویکم	<٠/٢ / ٠/٢	هشتم	<٠/٥ / ٠/٥
هفدهم	١ / ١/٥			دهم	<٠/٥ / ٠/٥
نوزدهم	٨ / ١/٥			دوازدهم	<٠/٢ / ٢
وبالاتر				وبالاتر	

درمورد شبکه های توزیع (ولتاژ پایین) در نزدیکی منابع تولید هارمونیک حد پائین اعوجاج کلی ولتاژ حدود ٥ درصد و حدبالا حدود ٨ درصد می باشد.

جدول ٢ نتیجه اندازه گیری های انجام شده درمورد هارمونیک ها درشبکه های توزیع (ولتاژ متوسط) و فوق توزیع با ولتاژ ١ تا١٠٠ کیلوولت را که کمیته کاری سیگره گزارش کرده است نشان می دهد.

جدول۲-نتایج جمع بندی شده اندازه گیری هارمونیک های ولتاژ درشبکه های با ولتاژ متوسط توزیعو فوق توزیع

هارمونیک های فردکه مضرب ۳ نمی باشند			هارمونیک های فردکه مضرب۳ می باشند			هارمونیک های زوج		
مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد		مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد		مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد	
	حدپائین	حدبالا		حدپائین	حدبالا		حدپائین	حدبالا
پنجم	۵	٦	سوم	۱/۵	۲/۵	دوم	۱	۱/۵
هفتم	٤	۵	نهم	۰/۸	۱/۵	چهارم	۰/۵	۱
یازدهم	۲/۵	۳/۵	پانزدهم	<۰/۳	۰/۳	ششم	۰/۲	۰/۳
سیزدهم	۲	۳	بیست ویکم	<۰/۲	۰/۲	هشتم	<۰/۲	۰/۲
هفدهم	۱	۲	وبه بالا			وبالاتر		
نوزدهم	۰/۸	۱/۵						
بیست وسوم وبالاتر	۰/۵	۱						

درمورد شبکه های ولتاژ متوسط توزیع (۱ تا۳۳ کیلوولت) وفوق توزیع (۳۳ تا۱۰۰ کیلوولت) در نزدیکی منابع تولید هارمونیک حد پائین اعوجاج کلی ولتاژ ۵ درصد وحد بالا ۷ درصد می باشد.

جدول۳ نتیجه اندازه گیری های انجام شده درمورد هارمونیک ها در شبکه های مختلف ولتاژ زیاد تا ۲۲۰ کیلوولت را که کمیته سیگره گزارش کرده است ارائه می دهد.

جدول۳-نتایج جمع بندی شده اندازه گیری هارمونیک های ولتاژ درشبکه های با ولتاژ زیادتا۲۲۰ کیلوولت

هارمونیک های فردکه مضرب ۳ نمی باشند		هارمونیک های فردکه مضرب۳ می باشند		هارمونیک های زوج	
مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد		مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد		مرتبه	مقدارهارمونیک ولتاژبه درصد	
	حدپائین	حدبالا		حدپائین	حدبالا		حدپائین	حدبالا
پنجم	۱	۲	سوم	۰/۸	۱/۵	دوم	۱	۱/۵
هفتم	۱	۲	نهم	۰/۵	۱	چهارم	۰/۵	۱
یازدهم	۰/۸	۱/۵	پانزدهم	<۰/۳	۰/۲	ششم	۰/۵	
سیزدهم	۰/۸	۱/۵	بیست ویکم	<۰/۲	<۰/۲	هشتم	۰/۲	
هفدهم	۰/۵	۱	وبه بالا			وبالاتر		
نوزدهم	۰/۵	۱						
بیست وسوم وبالاتر	۰/۳	۰/۷						

دراندازه گیری انجام شده درمورد شبکه های ولتاژ زیاد حدپائین اعوجاج کلی ولتاژ برابر ۱/۵ درصد وحد بالای آن ۳ درصد گزارش شده است.درمورد شبکه های بهم پیوسته با ولتاژ خیلی زیاد ظاهرا اندازه گیری های زیاد وجود ندارد ولی اندازه گیری های محدود نشان داده که حد پائین اعوجاج کلی ولتاژ دراین شبکه ها ۰/۵ درصد وحد بالای آن ۱/۵ درصد می باشد.

نتایج اندازه گیری ها که در جداول ۲،۱ و۳ نشان داده شده اند درمواردی است که هارمونیک ها باعث تشدید نشوند، در صورت تشدید مقدار هارمونیک ها بیشتر از مقادیر ارائه شده در جدول های فوق می باشد.

اندازه گیری ها در کشور فرانسه نشان می دهد که درموارد نادری مقدار هارمونیک های با مرتبه کمتراز ۱۵ از مقدار ۱۰ درصد هم بیشتر بوده است. البته وقتی مرتبه هارمونیک افزایش پیدا می کند مقدار ولتاژ هارمونیک کاهش می یابد. متخصصین فرانسوی ماکزیمم مقدار ممکن هارمونیک ولتاژ با مرتبه کمتراز ۱۵درشبکه را ۱۵ درصد تخمین زده اند.

پیوست هـ

روابط ولتاژ ، جریان و توان در شرایط هارمونیکی

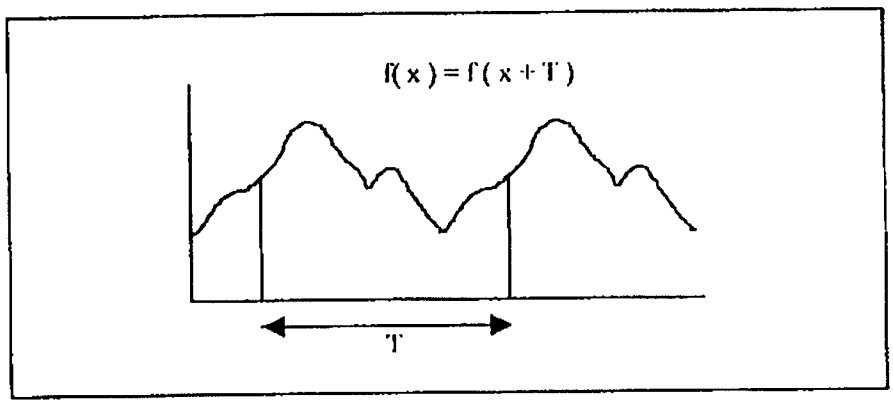
(اطلاعاتی)

دراین ضمیمه توضیحات مورد نیاز در خصوص شکل کلاسیک سری فوریه و تبدیل فوریه گسسته و بعضی از تعاریف مرتبط با هارمونیک ها آورده شده است.

د-۱ سری فوریه

با استفاده از سری فوریه می توان فرکانس و اندازه چندین موج سینوسی را که با یک دیگـــر ترکیـب شده و یک شکل موج دلخواه را ایجاد می کنند مشخص ساخت.

از دیدگاه ریاضی بسط سری فوریه یک سیگنال بهترین پردازش ، از نظر خطای متوسط مربعات ، بـه کمک استفاده از هارمونیک مرتبه اول و مرتبه های بالاتر (مضارب صحیح از هـارمونیک مرتبـه اول) می باشد. اگر یک سیگنال متناوب با دوره تناوب T ثانیه شکل ۱ در اختیار باشد می توان با استفاده از بسط سری فوریه به صورت دقیق این سیگنال را به صورت جمـع مولفـه اول و مولفـه هـای دیگـر نمایش داد.



شکل ۱- سیگنال متناوب دلخواه

چون هر سیکل در پریود 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 فوریه را به صورت زیر می توان نوشت :

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

$$F(t) = \frac{1}{2}c_o + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \phi_n) \qquad n=1,2,\ldots,\infty$$

$Co = ao \quad Cn \sin \phi_n = a_n \quad Cn \cos \phi_n = b_n$

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

که درآن :

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

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

و

$$a_o = \frac{2}{T}\int_{O}^{T} f(t)dt = \frac{\omega}{\pi}\int_{O}^{\infty} f(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{O}^{T} f(t)\cos n\omega\ t\ dt = \frac{\omega}{\pi}\int_{o}^{\infty} f(t)\cos n\omega\ t\ dt \qquad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{O}^{T} f(t)\sin n\omega\ t\ dt = \frac{\omega}{\pi}\int_{o}^{\infty} f(t)\sin n\omega\ t\ dt$$

اعتبار سری فوریه بمنظور نمایش یک تابع ریاضی توسط ریاضیدانی بنام دریخله اولین بار مورد توجه قرار گرفت. از نظر تئوری، برای داشتن یک سری فوریه، ft(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 دورهٔ زمانی تناوب خود داشته باشد.

۳) f(t) و مشتق آن باید پیوسته خطی در دورهٔ 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.

د-۱-۱ سری فوریه گسسته (DFT)[1]

1-Disintograted Fowier Transformation

معادلات سری فوریه که تا کنون مورد توجه قرار گرفت بـرای محاسبات توابـع آنـاتحلیلی مناسـب بودند لذا لازم است که به شکل جدیدی از آن دست یافت تا بتوان در برنامه هـای کـامپیوتری مـورد 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 راتوسط رابطهٔ زیـر بدسـت آورد. که در آن N نرخ نمونه برداری از تابع است.

$$X(K)=\frac{2}{N}\sum_{N=0}^{N=1}x(n)e^{-jk\frac{2\pi n}{N}} \qquad (٤)$$

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.

$$A_K=\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{n=1}x(n)\cos(K\frac{2\pi n}{N}) \qquad (٥)$$

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

که در آن: $n=0,1,\ldots, N-1$

و $K=0,1,2,\ldots, \frac{n}{2}$

د-۱-۲ تبدیل فوریه سریع (FFT)[1]

بمنظور کاهش حجم محاسبات تبدیل فوریه گسسته از تبدیل فوریه سریع اسـتفاده مـی شـود. بـرای استفاده از آلگاریتم FFT ، مقدار نمونه برداری در یک پریود اندازه گـیری بـاید تـوان صحیحـی از ۲ باشد. از سوی دیگر شکل موج باید فقط شامل فرکانس هایی باشد که مضارب صحیحی از فرکـانس اصلی هستند.

این آلگاریتم روش بسیار خوبی برای محاسبه توابـع گسسـته مـی باشـد لیکـن دارای دو مشـکل aliasing و leakage است.

Aliaing زمانی رخ می دهد که نرخ نمونه برداری به اندازهٔ کافی بالا نباشد. بمنظـور کـاهش ایـن اثـر بایدنرخ نمونه برداری به اندازهٔ کافی بالاتر از فرکانس نایکوئیست (Nyqust) باشد یعنـی، نـرخ نمونـه برداری باید بزرگ تراز ۲ برابر فرکانس موجود در سیگنال باشد. مشکل دوم یعنی lcakage ، به انتشار انرژی از یک فرکانس به فرکانس های مجاور اطلاق می شود. بمنظور کـاهش lcakage ، تعـداد دورهٔ

1-Fast Fourier Transformation

زمانی تناوب نمونه برداری باید دقیقا عدد صحیحی باشد. برای مثال اگر تعداد نمونه ها شامل کسری از یک سیکل کامل باشد نتایج بدست آمده از FFT صحیح نمی باشد.

د-۲ تعاریف مرتبط با هارمونیکی

دراین بخش بعضی پارامترهای الکتریکی برحسب ضرایب فوریه تعریف می شوند.

د-۲-۱ مقدار RMS[1] یک موج برحسب سری فوریه

دربسیاری مواقع بسیار مناسب است که مؤلفه های الکتریکی را برحسب ضرایب a, b, c سری فوریه نمایش داد.

اگر مقدار مؤثر هر تابع زمانی f(t) با دورهٔ زمانی T بصورت زیر تعریف شود.

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{I}{T}\int_{O} f^2(t)dt} \qquad (٦)$$

اگر دو طرف معادله (۱) را در f(t) ضرب شود خواهیم داشت:

$$\{f(t)\}^2 = \frac{I}{2}a_o f(t) + \sum_{1}^{\infty}\{a_n f(t)\cos n\omega t + b_n f(t)\sin n\omega t\} \qquad (٧)$$

با انتگرال گیری از هردو طرف نسبت به زمان از ۰ تا T ثانیه خواهیم داشت:

$$\int_{O}^{T}\{f(t)\}\,dt = \frac{1}{2}a_o\int_{O}^{T}f(t)dt + \sum_{1}^{\infty}a_n\int_{O}^{T}f(t)\cos n\omega t dt + \sum_{1}^{\infty}b_n\int_{O}^{T}f(t)\sin n\omega t dt \qquad (٨)$$

باجایگزاری مقادیر a_o و a_n و b_n خواهیم داشت:

$$\frac{1}{T}\int_{O}^{T}\{f(t)\}\,dt = \frac{1}{4}a_o^2 + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n^2 + b_n^2) \qquad (٩)$$

این معادله همان معادلهٔ پارسوال است بنابراین:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{4}a_o^2 + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n^2 + b_n^2)} \qquad (١٠)$$

برای توابعی که دارای مؤلفه D.C نیستند خواهیم داشت a_o=O در نتیجه:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}c_n^2} \qquad (١١)$$

که درآن C_n مقدار پیک هارمونیک n ام می باشد.

مقدار rms هارمونیک n ام موج بصورت زیر تعریف شده است.

$$C_n = \frac{c_n}{\sqrt{2}} \qquad (١٢)$$

بنابراین خواهیم داشت:

1-

$$F_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} c_n^2} \qquad (۱۳)$$

اگرولتاژ وجریان را برحسب تبدیل فوریه بنویسیم خواهیم داشت:

$$V(t) = \frac{1}{2} a_o + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t\} \qquad (۱٤)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} A_o + \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t\} \qquad (۱٥)$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{4} a_o^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \qquad (۱٦)$$

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{4} A_o^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 + B_n^2)$$

د-۲-۲ توان ظاهری

توان ظاهری (S) ، ولت آمپر، را می توان با استفاده از جریان وولتاژ مؤثر بصورت زیر نوشت:

$$S^2 = I_{rms}^2 V_{rms}^2 \qquad (۱۸)$$

درصورتیکه مؤلفهٔ DC جریان وولتاژ صفر باشد خواهیم داشت:

$$S^2 = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 + B_n^2) \qquad (۱۹)$$

اگر مقادیر α_n و β_n بصورت زیر تعریف شود داریم.

$$\alpha_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \qquad \beta_n^2 = A_n^2 + B_n^2$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$s^2 = \frac{1}{4} \sum_{N=1}^{\omega} \alpha_N^2 \sum_{N=1}^{\omega} \beta_N^2 \qquad (۲۰)$$

با استفاده از معادلهٔ بالا می توان دید که هر فرکانس از ولتاژ بصورت جداگانه با جریانها با فرکانسهای مختلف ترکیب می شود.

د-۲-۳ توان اکتیو

برای هر مدار الکتریکی با ولتاژ لحظه ای V(t) و جریان لحظه ای I(t) توان اکتیو بصورت زیر تعریف می شود.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \qquad (۲۱)$$

اگر V(t) و I(t) را بر حسب سری فوریه بیان نمود خواهیم داشت:

$$e(t)+i(t)=\frac{1}{2}(a_o+A_0)+\sum_{n=1}^{\omega}\{(a_n+A_n)\cos n\omega t+(b_n+B_n)\sin n\omega t\} \quad (۲۲)$$

$$e(t)-i(t)=\frac{1}{2}(a_o-A_0)+\sum_{n=1}^{\omega}\{(a_n-A_n)\cos n\omega t+(b_n-B_n)\sin n\omega t\} \quad (۲۳)$$

با اعمال تئوری پارسوال به معادلات قبلی خواهیم داشت:

$$\frac{1}{T}\int_o^T(v(t)+i(t))^2dt=\frac{1}{4}(ao+Ao)^2+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n+A_n)^2+(b_n+B_n)^2 \quad (۲٤)$$

$$\frac{1}{T}\int_o^T(v(t)-i(t))^2dt=\frac{1}{4}(ao-Ao)^2+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(a_n-A_n)^2+(b_n-B_n)^2 \quad (۲۵)$$

و درنتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{4}{T}\int_o^T(v(t)i(t)dt=aoAo+2\sum_{n=1}^{\infty}{}_n\{a_nA_n+b_nB_n\} \quad (۲٦)$$

اگر این نتیجه را با توان متوسط اکتیو در یک سیکل مقایسه نمود می توان بدست آوردکه:

$$\frac{1}{T}\int_o^T(v(t)i(t)dt=aoAo+2\sum_{n=1}^{\infty}{}_n\{a_nA_n+b_nB_n\} \quad (۲۷)$$

بااستفاده از نتایج بالا می توان دید که توان اکتیو فقط از طریق ولتاژ و جریان های هم فرکانس منتقل می شود. درصورتیکه مؤلفه DC درشکل موج وجود نداشته باشد داریم:

$$\frac{1}{T}\int_o^T V(t)i(t)dt=\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\{a_nA_n+b_nB_n\} \quad (۲۸)$$

د- ۲-٤ تعریف دیگری از توان ظاهری

دربسیاری ازمحاسبات از تعاریف زیر استفاده می شود:

$$V(t)=\sum_{n=1}^{N}v_n\sin(n\omega t+\varphi_K)$$
$$V(t)=v_1\sin(\omega t+\varphi_1)+\sum_{n\neq1}^{N}v_n\sin(n\omega t+\varphi_K) \quad (۲۹)$$
$$i(t)=\sum_{n=1}^{N}i_n\sin(n\omega t+\phi_K)$$
$$i(t)=i_1\sin(\omega t+\phi_1)+\sum_{n\neq1}^{N}i_n\sin(n\omega t+\phi_K)$$

که درآن V_n و i_n مقدار rms ولتاژ و جریان می باشند دراین صورت توان ظاهری برابراست با:

$$s = v_{rms} \qquad I_{rms} = \sqrt{(v_1^2 + \sum_{n\neq 1}^{N} v_2^n)(i_1^2 + \sum_{n\neq 1}^{N} i_n^2} \qquad (۳۰)$$

معادله فوق را می توان بصورت زیر نوشت:

$$s = \sqrt{(P1 + Ph)^2 + (Q_1^2 + Q_h^2} \qquad (۳۱)$$

مقدار توان اکتیو فرکانس قدرت بصورت زیربدست می آید:

$$P_1 = v_1 i_1 \cos(\phi_1 + \varphi_1) \qquad (۳۲)$$

مقدار توان اکتیو در فرکانس های هارمونیکی برابر است با:

$$P_h = \sum_{n\neq 1} v_n i_n \cos(\phi_n - \varphi_n) \qquad (۳۳)$$

ومقدار توان راکتیو در فرکانس قدرت برابر است با:

$$Q_1 = v_1 i_1 \sin(\phi_1 - \varphi_1) \qquad (۳٤)$$

درمعادلهٔ توان ظاهری ، Q_n توان راکتیو هارمونیکی می باشد.

د-۲-۵ هارمونیک ها در سیستم سه فاز

دریک سیستم سه فاز متعادل که هارمونیک ها نیز بصورت متعادل فرض شوند می توان مؤلفه های هارمونیکی ولتاژ وجریان را بصورت توالی صفر، منفی، مثبت دسته بندی نمود.

دریک سیستم متعادل سه فاز ولتاژ فاز را می توان به شکل زیر بیان نمود.

مؤلفهٔ اصلی

$$\begin{aligned} v_{a1}(t) &= v_1 \cos(\omega t + \phi_1) \\ v_{b1}(t) &= v_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \\ v_{c1}(t) &= v_1 \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_1) \end{aligned} \qquad (۳۵)$$

هارمونیک دوم

$$\begin{aligned} v_{a2}(t) &= v_2 \cos(2\omega t + \phi_2) \\ v_{b2}(t) &= v_2 \cos(2\omega(t - \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_2) = v_2 \cos(2\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_2) \\ v_{c2}(t) &= v_2 \cos(2\omega(t + \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_2) = v_2 \cos(2\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_2) \end{aligned} \qquad (۳٦)$$

هارمونیک سوم

$$v_{a3}(t) = v_3 \cos(3\omega t + \phi_3)$$

$$v_{b3}(t) = v_3 \cos(3\omega(t - \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_3) = v_3 \cos(3\omega t - 2\pi + \phi_3) \quad (۳۷)$$
$$v_{c3}(t) = v_2 \cos(3\omega(t + \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_3) = v_3 \cos(3\omega t + 2\pi + \phi_3)$$

هارمونیک چهارم

$$v_{a4}(t) = v_4 \cos(4\omega t + \phi_4)$$
$$v_{b4}(t) = v_4 \cos(4\omega(t - \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_4) = v_4 \cos(4\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_4)$$
$$v_{c4}(t) = v_4 \cos(4\omega(t + \frac{2\pi}{3\omega}) + \phi_4) = v_4 \cos(4\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_4) \quad (۳۸)$$

با مشاهده این هارمونیک ها، کاملا آشکار است که مؤلفه اول در دسته بندی توالی مثبت، دومین مؤلفه در دسته بندی توالی منفی، سومین مؤلفه در دسته بندی توالی صفر وچهارمین مؤلفه در دسته بندی توالی مثبت قرار می گیرد.

جدول ۱ مرتبهٔ هارمونیک ها وتوالی آن ها را دریک سیستم سه فاز متعادل نشان می دهد.

جدول ۱- توالی هارمونیک هادر یک سیستم سه فاز متعادل

مرتبهٔ هارمونیکی	توالی
۱	+
۲	-
۳	۰
٤	+
٥	-
٦	۰
۷	+
۸	-
۹	۰

پیوست ه

واژگان

(اطلاعاتی)

احتمال تجمعی	Cumulative Probablity
القایی	Induction
اینورتر منبع جریان	Current source inverter (CSI)
اینورتر منبع ولتاژ	Voltage source inverter (VSI)
توان اعوجاجی	Distortion Power
حساسیت ویا آسیب پذیری هارمونیکی	Harmonic Susecptibility
سازگاری هارمونیکی	HarmonicCompatibiliy
فیلترتک تنظیم برشی	Single – tuned notch filter
فیلترهای غیرفعال	Passive filter
کل اعوجاج هارمونیکی (THD)	Total harmonic distortion
مبدل	Convertor
محرکه جریان متناوب کنترل سرعت اتوماتیک	Automatic speed drive (ASD)
محرکه های موتور با قابلیت تنظیم سرعت	Adjustable speed drives
مصونیت هارمونیکی	Harmonic Immunity
منابع تغذیه سوئیچینگ	Swtich mode power supplies
مؤلفه های متقارن	Symmetrical Component
نقطه اتصال داخلی کارخانه (IPC)	In – plant point of coupling
نقطه اتصال مشترک (PCC)	Point of common coupling
هارمونیک مرتبه سه	Triplen harmonics
هارمونیک میانی	Interharmonic
هدایت مستقیم	Direct conduction