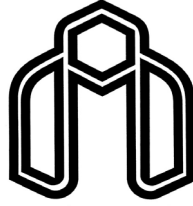


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه قدرت

شناسایی منابع هارمونیک در سیستم توزیع با در نظر گرفتن بانک‌های خازنی

دانشجو: حمید رضا غفوری قریب

استاد راهنما:

دکتر علی دستفان

استاد مشاور:

دکتر مهدی بانژاد

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره : ۰۸۶۷/آت/ب

تاریخ : ۹۰/۴/۱۲

ویرایش : _____

فرم صورت جلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم حمید رضا غفوری قریب رشته : بسوق گرایش : مدیریت تحت عنوان : تشخیص منابع هارمونیک در یک شبکه با در نظر گرفتن خازن های موازی که در تاریخ ۹۰/۴/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه بسیار خوب امتیاز ۱۸) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علی دستغیب	استادیار	
۲- استاد مشاور	سهراب بانزاده	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	امین حاج زاده	استادیار	
۴- استاد منتحن	هادی گرابلیو	استادیار	
۵- استاد منتحن	محمد باصیل	استادیار	

رئیس دانشکده:

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و فداکارم

سپاس خدای بی‌همتا را که در مسیر زندگی همواره دست این بنده کوچک و ناچیز خود را گرفته و از میان سنگلاخ‌ها و کوره‌راه‌های زندگی به سلامت عبور داده است. از پدر و مادرم که همیشه مشوق و پشتیبان و مایه دلگرمی من در دوران تحصیل بوده‌اند کمال تشکر را دارم و دستشان را می‌بوسم. همچنین از اساتید محترم گروه قدرت و دانشجویان مهربان و صمیمی ارشد ورودی ۸۷ دانشگاه صنعتی شاهرود که خاطره خوش دوران تحصیل را با کوله‌باری از علم و دانش برایم رقم زدند سپاس‌گذارم.

تعهد نامه

اینجانب **محمدعلی غفوری فرزند محمد** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

.....

تحت راهنمایی آقای دکتر **علی رمضان** متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا پافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۹۰/۴/۱۳

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد ، این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد .

• متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

افزایش میزان هارمونیک‌ها که به دلیل کاربرد روزافزون ابزارهای الکترونیک قدرت می‌باشد یکی از مسائل مهم کیفیت توان در سیستم‌های قدرت در سال‌های اخیر بوده است. هارمونیک‌ها اثرات زیانبار زیادی بر تجهیزات شبکه و عملکرد بارهای حساس دارند. در نتیجه منابع تولید هارمونیک و عوامل افزایش میزان هارمونیک‌ها در شبکه بایستی شناسایی شوند. بایستی در نظر داشت که بانک‌های خازنی می‌توانند سهم زیادی در افزایش میزان هارمونیک‌ها در یک مرتبه خاص به دلیل وقوع رزونانس داشته باشند.

روش‌های شناسایی منابع هارمونیک به دو گروه کلی تک‌نقطه که بر مبنای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در یک نقطه از سیستم هستند و چندنقطه که بر مبنای اندازه‌گیری‌ها در چندین نقطه به صورت سنکرون هستند تقسیم می‌شوند. روش‌های چندنقطه نیاز به سیستم اندازه‌گیری پیچیده و گران‌قیمت دارند. در روش‌های تک‌نقطه نیز منبع غالب هارمونیک تنها از بین دو طرف نقطه اندازه‌گیری یک طرف به عنوان تولیدکننده و طرف دیگر به عنوان مصرف‌کننده تعیین می‌شود.

در این پایان‌نامه با استفاده از بسط یک روش تک‌نقطه، روشی برای محاسبه مشارکت‌های هارمونیکی در یک سیستم چند تولیدکننده- چند مصرف‌کننده به جای مورد یک تولیدکننده- یک مصرف‌کننده که در روش‌های مرسوم تک‌نقطه وجود دارد ارائه شده است. با استفاده از این روش می‌توان سهم هر شاخه متصل به یک فیدر سیستم توزیع را در میزان هارمونیک‌های ولتاژ و جریان آن در هر مرتبه خاص تعیین نمود.

در روش بیان شده امپدانس‌های معادل نورتن و تونن شاخه‌های متصل به فیدر بایستی معلوم باشند. برای این که بتوان سهم احتمالی بانک‌های خازنی را نیز در میزان هارمونیک‌ها در نظر گرفت بایستی برای هر شاخه امپدانس مرجع تعیین نمود و از آن بجای امپدانس معادل واقعی شاخه‌ها استفاده کرد. در روش

پیشنهاد شده امیدانس مرجع نورتن و تونن برای هر شاخه معرفی شده است که محاسبه آن تنها به داده‌های مؤلفه اصلی بارها و سایر المان‌های موجود در شاخه که معمولاً در دسترس هستند نیاز دارد. در نتیجه استفاده از امیدانس‌های مرجع پیشنهاد شده علاوه بر تعیین مشارکت‌های هارمونیک منابع هارمونیک می‌توان تأثیر بانک‌های خازنی را نیز در میزان هارمونیک‌های فیدر تعیین کرد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Digsilent بروی سیستم ۱۳ باسه IEEE انجام شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک و نیز شاخه‌هایی که به دلیل وجود بانک خازنی در میزان هارمونیک‌های فیدر مؤثرند با استفاده از روش بیان شده به درستی شناسایی شده‌اند.

کلمات کلیدی: هارمونیک، شناسایی منبع هارمونیک، مشارکت‌های هارمونیک، هارمونیک ولتاژ، هارمونیک جریان، امیدانس مرجع.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۶	فصل دوم: مباحث کلی در زمینه هارمونیک‌ها
۷	۱-۲-۱- مقدمه
۸	۲-۲-۱- منابع هارمونیک
۹	۱-۲-۲- یکسوکننده تک‌فاز
۱۱	۲-۲-۲- مبدل‌های سه‌فاز
۱۱	۱-۲-۲-۲- مبدل منبع جریانی سه‌فاز
۱۳	۱-۱-۲-۲-۲- هارمونیک‌های مربوط به ساختار ۱۲ پالس
۱۴	۲-۱-۲-۲-۲- ساختارهای بالاتر پالس
۱۴	۲-۲-۲-۲- مبدل منبع ولتاژی سه‌فاز (VSC)
۱۵	۱-۲-۲-۲-۲- ساختارهای VSC چندسطحه
۱۵	۳-۲- اثرات هارمونیک‌ها
۱۷	۱-۳-۲- رزونانس‌ها
۱۷	۱-۱-۳-۲- رزونانس موازی
۱۸	۲-۱-۳-۲- رزونانس سری
۱۹	۲-۳-۲- اثر هارمونیک‌ها روی ماشین‌های دوار
۱۹	۱-۲-۳-۲- تلفات هارمونیکی
۲۰	۲-۲-۳-۲- گشتاورهای هارمونیکی
۲۰	۳-۲-۳-۲- بقیه اثرات
۲۱	۳-۳-۲- اثر هارمونیک‌ها بر سیستم قدرت
۲۱	۱-۳-۳-۲- سیستم انتقال
۲۱	۲-۳-۳-۲- ترانسفورمرها
۲۲	۳-۳-۳-۲- بانک‌های خازنی
۲۳	۴-۳-۳-۲- اثرات هارمونیک‌ها بر ابزارهای اندازه‌گیری

۲۴	۲-۳-۳-۵- تداخل هارمونیک‌ها با حفاظت سیستم قدرت
۲۵	۲-۳-۳-۶- اثر هارمونیک‌ها بر بارهای مصرف‌کننده
۲۶	۲-۳-۴- تداخل هارمونیک‌ها با مدارهای مخابراتی
۲۶	۲-۴- استانداردهای هارمونیکی
۲۹	فصل سوم: انواع روش‌های شناسایی منابع هارمونیک
۳۰	۳-۱- مقدمه
۳۰	۳-۲- روش‌های تک‌نقطه
۳۱	۳-۲-۱- روش جهت توان اکتیو
۳۱	۳-۲-۱-۱- بررسی اعتبار روش جهت توان اکتیو
۳۴	۳-۲-۲- روش انطباق
۳۵	۳-۲-۲-۱- هارمونیک جریان
۳۶	۳-۲-۲-۲- هارمونیک ولتاژ
۳۷	۳-۲-۳- روش انطباق با امپدانس مرجع
۳۸	۳-۲-۳-۱- هارمونیک جریان
۴۰	۳-۲-۳-۲- هارمونیک ولتاژ
۴۱	۳-۲-۴- روش امپدانس بحرانی
۴۲	۳-۲-۴-۱- هارمونیک جریان
۴۵	۳-۲-۴-۱-۱- روش CI تعمیم یافته
۴۷	۳-۲-۴-۲- هارمونیک ولتاژ
۴۹	۳-۲-۵- روش بر اساس مقایسه توان‌های غیراکتیو
۴۹	۳-۲-۵-۱- شرح روش برای یک سیستم تک‌فاز
۵۲	۳-۲-۵-۲- بسط به سیستم سه‌فاز
۵۲	۳-۲-۵-۳- بهسازی روش با معرفی یک کمیت جدید
۵۳	۳-۳- روش‌های چندنقطه
۵۳	۳-۳-۱- اندازه‌گیری‌های سنکرون چندنقطه
۵۴	۳-۳-۲- تخمین حالت هارمونیکی (HSE)
۵۵	۳-۳-۲-۱- تخمین حالت با روش حداقل مربعات
۵۶	۳-۳-۲-۲- تخمین حالت بر اساس مینیمم واریانس
۵۸	۳-۳-۲-۳- تخمین حالت با استفاده از تجزیه مقدار ویژه
۶۰	۳-۳-۲-۴- تخمین حالت با استفاده از فیلتر کالمن

۶۲	۳-۲-۵- تخمین حالت با استفاده از شبکه عصبی
۶۳	۳-۳-۳- شناسایی منابع هارمونیک با استفاده از آنالیز مؤلفه مستقل
۶۴	۳-۳-۱- معرفی ICA
۶۵	۳-۳-۲- پیش پردازش‌ها
۶۶	۳-۳-۳- مشخصات آماری بارها
۶۶	۳-۳-۴- تخمین بارهای هارمونیکی
۶۸	فصل چهارم: روش پیشنهادی برای تشخیص چندین منبع هارمونیکی
۶۹	۴-۱- مقدمه
۶۹	۴-۲- محاسبه مشارکت‌های هارمونیکی
۷۰	۴-۲-۱- حالت استفاده از امیدانس واقعی
۷۱	۴-۲-۱-۱- هارمونیک جریان
۷۳	۴-۲-۱-۲- هارمونیک ولتاژ
۷۵	۴-۲-۲- حالت استفاده از امیدانس مرجع
۷۶	۴-۲-۲-۱- هارمونیک جریان
۷۷	۴-۲-۲-۲- هارمونیک ولتاژ
۷۸	۴-۳- تعیین امیدانس مرجع برای هر شاخه
۷۹	۴-۳-۱- امیدانس مرجع بارها
۸۰	۴-۳-۱-۱- هارمونیک جریان
۸۰	۴-۳-۱-۲- هارمونیک ولتاژ
۸۱	۴-۳-۲- امیدانس سایر المان‌های سیستم
۸۲	۴-۳-۳- تعیین امیدانس مرجع شاخه‌ها
۸۳	۴-۳-۳-۱- امیدانس مرجع نورتن پیشنهاد شده برای هر شاخه
۸۳	۴-۳-۳-۲- امیدانس مرجع تونن پیشنهاد شده برای هر شاخه
۸۷	فصل پنجم: شبیه‌سازی
۸۸	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- معرفی سیستم نمونه
۹۰	۵-۳- مورد ۱
۹۰	۵-۳-۱- حالت قطع خازن
۹۳	۵-۳-۲- حالت وصل خازن
۹۷	۵-۴- مورد ۲

۹۷	۱-۴-۵- حالت قطع خازن
۹۹	۲-۴-۵- حالت وصل خازن
۱۰۳	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۴	۱-۶- نتیجه گیری
۱۰۵	۲-۶- پیشنهادات
۱۰۶	پیوست
۱۰۹	مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

۷	شکل (۱-۲) شکل موج مولفه اصلی و هارمونیک‌های مرتبه دوم و سوم یک سیگنال
۸	شکل (۲-۲) شکل موج ولتاژ دارای هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷
۱۰	شکل (۳-۲) یک یکسوکننده تک‌فاز نوعی با فیلتر RC در خروجی آن
۱۰	شکل (۴-۲) شکل موج ولتاژ و جریان یک گیرنده تلویزیون با یکسوکننده دیودی
۱۲	شکل (۵-۲) ساختار یک یکسوکننده نیم‌موج سه‌فاز
۱۲	شکل (۶-۲) شکل موج جریان یکسوکننده نیم‌موج سه‌فاز شکل (۵-۲)
۱۲	شکل (۷-۲) مبدل تمام موج سه‌فاز
۱۳	شکل (۸-۲) ساختار یک مبدل ۱۲ پالس به‌همراه شکل موج جریان فاز آن در حوزه زمان
۱۵	شکل (۹-۲) (الف) جریان ناپیوسته با دو پالس در هر نیم‌سیکل (ب) طیف فرکانسی جریان
۱۸	شکل (۱۰-۲) رزونانس موازی در نقطه اتصال مشترک (PCC)
۱۹	شکل (۱۱-۲) مدار رزونانس سری
۳۰	شکل (۱-۳) تولیدکننده و مصرف‌کننده و نقطه اندازه‌گیری
۳۱	شکل (۲-۳) هارمونیک ولتاژ و جریان در PCC
۳۲	شکل (۳-۳) معادل نورتن تولیدکننده و مصرف‌کننده
۳۳	شکل (۴-۳) بدست آوردن مشارکت‌های اسکالر با تصویر I_{UP} و I_{CP} بروی I_{PCC}
۳۵	شکل (۵-۳) معادل نورتن تولیدکننده و مصرف‌کننده
۳۶	شکل (۶-۳) معادل تونن تولیدکننده و مصرف‌کننده در PCC
۳۸	شکل (۷-۳) بار و شبکه تغذیه آن
۳۹	شکل (۸-۳) تبدیل جریان راکتانس به منبع جریان معادل با آن
۴۰	شکل (۹-۳) تبدیل افت ولتاژ دو سر راکتانس به منبع ولتاژ معادل با آن
۴۲	شکل (۱۰-۳) مدار معادل تونن تولیدکننده و مصرف‌کننده
۴۳	شکل (۱۱-۳) نقطه‌ای با کم‌ترین ولتاژ در طول امپدانس Z_X
۴۸	شکل (۱۲-۳) مدار معادل برای آنالیز ولتاژ هارمونیک
۷۰	شکل (۱-۴) یک فیدر سیستم توزیع
۷۱	شکل (۲-۴) مدار معادل نورتن همه شاخه‌ها در PCC
۷۴	شکل (۳-۴) مدار معادل تونن همه شاخه‌ها در PCC

- شکل (۴-۴) معادل نورتن یک تولیدکننده و یک مصرف‌کننده در PCC ۷۷
- شکل (۵-۴) تبدیل تغییرات امپدانس شاخه از مقدار مرجع به منبع جریان معادل ۷۷
- شکل (۶-۴) امپدانس مرجع شاخه‌ها به همراه منبع جریان جدید معادل ۷۷
- شکل (۷-۴) تجزیه امپدانس شاخه به دو امپدانس مرجع و تغییرات امپدانس از مقدار مرجع ۷۸
- شکل (۸-۴) تبدیل تغییرات امپدانس به منبع ولتاژ معادل ۷۸
- شکل (۹-۴) نمایش معادل نورتن یک بار متصل به شبکه ۸۰
- شکل (۱۰-۴) نمایش معادل تونن یک بار متصل به شبکه ۸۱
- شکل (۱۱-۴) نحوه تعیین امپدانس مرجع نورتن یک شاخه فرضی ۸۳
- شکل (۱۲-۴) نحوه تعیین امپدانس مرجع تونن یک شاخه فرضی ۸۴
- شکل (۱-۵) دیاگرام تک‌خطی سیستم نمونه ۸۹
- شکل (۲-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی ۹۱
- شکل (۳-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع ۹۲
- شکل (۴-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده ۹۲
- شکل (۵-۵) نمودار اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در مورد ۱ ۹۳
- شکل (۶-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی ۹۴
- شکل (۷-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع ۹۴
- شکل (۸-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده ۹۵
- شکل (۹-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی ۹۸
- شکل (۱۰-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع ۹۸
- شکل (۱۱-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده ۹۹
- شکل (۱۲-۵) اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در مورد ۲ ۱۰۰
- شکل (۱۳-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی ۱۰۰
- شکل (۱۴-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده ۱۰۱
- شکل (۱۵-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده ۱۰۲

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۸۵	جدول (۴-۱) مقایسه مزایا و معایب انواع روش‌های شناسایی منابع هارمونیک به همراه روش پیشنهادی
۹۰	جدول (۵-۱) مقادیر نامی منابع هارمونیک و بانک‌های خازنی اضافه شده به سیستم در شبیه‌سازی
۹۶	جدول (۵-۲) مقادیر ولتاژ و جریان هارمونیکی PCC قبل و بعد از اتصال بانک خازنی - مورد ۱
۱۰۲	جدول (۵-۳) مقادیر ولتاژ و جریان هارمونیکی PCC قبل و بعد از اتصال بانک خازنی - مورد ۲

فصل اول

مقدمه

در یک سیستم قدرت ایده‌آل ولتاژها و جریان‌های نقاط مختلف شبکه به صورت سینوسی خالص در فرکانس اصلی و با مقادیر نامی مشخص فرض می‌شوند. نبود چنین شرایطی می‌تواند منجر به عملکرد بد ابزارها و تجهیزات شبکه شود. با پیشرفت تکنولوژی نیز حساسیت برخی تجهیزات به کیفیت شکل‌موج ولتاژ تغذیه‌شان افزایش یافته است. این امر موجب توجه بیشتر به مسأله کیفیت توان در سیستم قدرت در سال‌های اخیر شده است.

یکی از موارد مطرح در زمینه کیفیت توان مسأله هارمونیک‌ها در سیستم قدرت می‌باشد. هارمونیک‌ها موجب می‌شوند شکل‌موج ولتاژ و جریان شبکه از حالت سینوسی خالص خارج شود. این امر می‌تواند موجب اثرات منفی زیادی از جمله افزایش تلفات در شبکه و کاهش عمر تجهیزات و ابزارهای شبکه و نیز عملکرد بد ابزارهای حساس و سیستم‌های کنترلی شود. ظهور نیمه‌هادی‌ها و استفاده از آن‌ها در ساخت ابزارهای الکترونیک قدرت و افزایش کاربرد این تجهیزات در موارد گوناگون از جمله در سیستم‌های تغذیه، جبران‌سازی توان راکتیو و باعث افزایش بیشتر هارمونیک‌ها در شبکه شده است. در نتیجه هارمونیک‌ها به عنوان یکی از پدیده‌های مهم کیفیت توان در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند.

برای محدود کردن میزان تولید و نشر هارمونیک‌ها در شبکه استانداردهای هارمونیکی وضع شده‌اند. از جمله این استانداردها می‌توان استاندارد IEC 61000 و یا استاندارد IEEE 519-1992 را نام برد. در این استانداردها محدودیت‌ها مثلاً به صورت مقادیر قدرمطلق برای ولتاژها و جریان‌های هارمونیکی وضع شده‌اند که نبایستی از آن‌ها تجاوز شود [۱]. بنابراین بایستی منابع تولید هارمونیک در شبکه که از محدودیت‌های در نظر گرفته شده تجاوز می‌کنند مشخص شوند.

یکی از پدیده‌هایی که منجر به افزایش میزان هارمونیک‌ها در شبکه می‌شود پدیده رزونانس است. پدیده رزونانس زمانی اتفاق می‌افتد که در قسمتی از شبکه از بانک خازنی استفاده شده باشد. در مورد رزونانس موازی می‌توان گفت که با افزایش فرکانس راکتانس اندوکتیو شبکه افزایش و راکتانس خازنی بانک خازنی

کاهش می‌یابد و در یک فرکانسی به نام فرکانس رزونانس که می‌توان آن را محاسبه کرد این دو راکتانس با هم برابر شده و همدیگر را خنثی می‌کنند. در فرکانس رزونانس موازی امپدانس شبکه به بالاترین مقدار خود می‌رسد. اگر در حول و حوش این فرکانس جریان هارمونیک حتی ناچیزی به شبکه تزریق شده باشد ولتاژهای هارمونیک خیلی بزرگی تولید خواهد شد. بنابراین بایستی تأثیر این پدیده را نیز در میزان هارمونیک‌ها در شبکه در نظر گرفت و محاسبه نمود. زیرا ممکن است جریان‌های هارمونیک یک بار غیر خطی که از محدوده‌های تعیین شده هم تجاوز نمی‌کند در مواجهه با یک رزونانس تولید ولتاژها و به تبع آن جریان‌های هارمونیک بزرگی کند. در این جا نمی‌توان بار غیرخطی را در این تخطی از مقادیر مجاز مسئول دانست. این پدیده به خصوص در زمانی که برای تجهیزاتی که از مقادیر تعیین شده تجاوز می‌کنند جریمه‌ای در نظر گرفته می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. همان طور که گفته شد پدیده رزونانس زمانی اتفاق می‌افتد که راکتانس شبکه توسط راکتانس خازنی بانک خازنی خنثی شود. پس می‌توان اتصال بانک خازنی را به عنوان عاملی در ایجاد رزونانس در نظر گرفت. با توجه به موارد گفته شده بسیار مطلوب است که بتوان تاثیر ناشی از اتصال بانک خازنی را در میزان هارمونیک‌های قسمتی از شبکه محاسبه نمود.

روش‌های شناسایی منابع هارمونیک در شبکه بر دو مبنای کلی روش‌های تک‌نقطه و روش‌های چندنقطه قرار دارند. روش‌های چندنقطه بر اساس اندازه‌گیری‌هایی هستند که در چندین نقطه از سیستم قدرت به صورت هم‌زمان انجام می‌شوند و اطلاعات هارمونیک کامل‌تری در مورد شبکه نسبت به روش‌های تک‌نقطه ارائه می‌دهند. اما این روش‌ها به دلیل سیستم اندازه‌گیری پیچیده و گران کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش‌های تک‌نقطه بر مبنای اندازه‌گیری‌هایی هستند که در یک نقطه از سیستم قدرت انجام می‌شوند و بالادست یا پایین‌دست نقطه اندازه‌گیری را به عنوان منبع غالب هارمونیک تعیین می‌کنند. اجرای این

روش‌ها و سیستم اندازه‌گیری آن‌ها نسبت به روش‌های چندنقطه به مراتب ساده‌تر و ارزان‌تر است و در عمل کاربرد بیشتری دارند [۲]. اما این روش‌ها منبع غالب هارمونیک را تنها از بین دو طرف نقطه اندازه‌گیری یک طرف به عنوان تولیدکننده و طرف دیگر به عنوان مصرف‌کننده تعیین می‌کنند و اطلاعات چندانی در مورد وضعیت هارمونیکی سیستم بدست نمی‌دهند. بنابراین ارائه روشی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های تک‌نقطه که بتواند اطلاعات بیشتری در مورد محل منابع هارمونیک و میزان تاثیر آن‌ها در هارمونیک‌های نقطه اندازه‌گیری بدست دهد ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به این که روش‌های مرسوم تک‌نقطه منبع غالب را از بین دو طرف تعیین می‌کنند ارائه روشی که توانایی تعیین مشارکت‌های هارمونیکی را برای چندین شاخه متصل به نقطه اندازه‌گیری داشته باشد بسیار مطلوب به نظر می‌رسد.

در این پایان‌نامه سعی بر این است که با استفاده از یک روش تک‌نقطه پیشنهاد شده اولاً بتوان اطلاعات بیشتری از وضعیت منابع هارمونیک در محل اندازه‌گیری نسبت به سایر روش‌های تک‌نقطه مرسوم بدست آورد ثانیاً روش پیشنهاد شده قادر به محاسبه تاثیر بانک خازنی مخصوصاً در شرایط رزونانس در میزان هارمونیک‌های اندازه‌گیری شده باشد. بر مبنای یک روش تک‌نقطه روشی ارائه شده است که توانایی محاسبه مشارکت‌های هارمونیکی را در سیستم‌های چند تولیدکننده-چند مصرف‌کننده دارد. با استفاده از این روش می‌توان سهم شاخه‌های متصل به نقطه اندازه‌گیری را در هارمونیک‌های ولتاژ و جریان در هر مرتبه هارمونیکی به طور جداگانه تعیین نمود. در نتیجه می‌توان شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک غالب را شناسایی کرد. همچنین با معرفی امپدانس‌های مرجع نورتن و تونن برای هر شاخه و ارائه روشی برای تعیین آن امکان محاسبه تاثیر اتصال بانک خازنی ناشی از وقوع رزونانس احتمالی در میزان هارمونیک‌های ولتاژ و جریان فراهم شده است. روش پیشنهاد شده و مزایای مطرح شده در مورد آن با استفاده از شبیه‌سازی بروی سیستم ۱۳ باسه استاندارد IEEE تایید شده است. فصول پیش رو در پایان‌نامه به قرار

زیرند:

ابتدا در فصل دوم مباحث کلی در زمینه هارمونیک‌ها، منابع آن‌ها، اثراتشان در داخل و نیز خارج سیستم قدرت و همچنین به طور مختصر در مورد استانداردهای هارمونیکی صحبت می‌شود. در فصل سوم انواع روش‌های شناسایی منابع هارمونیک در شبکه که در مقالات ارائه شده‌اند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در فصل چهارم روش پیشنهاد شده برای شناسایی منابع هارمونیک و محاسبه تاثیر اتصال بانک خازنی در میزان هارمونیک‌ها معرفی می‌شود. در فصل پنجم نیز چندین مورد شبیه‌سازی بر روی سیستم استاندارد IEEE با استفاده از نرم‌افزار Digsilent انجام شده است و نتایج بدست آمده بررسی شده‌اند.

فصل دوم

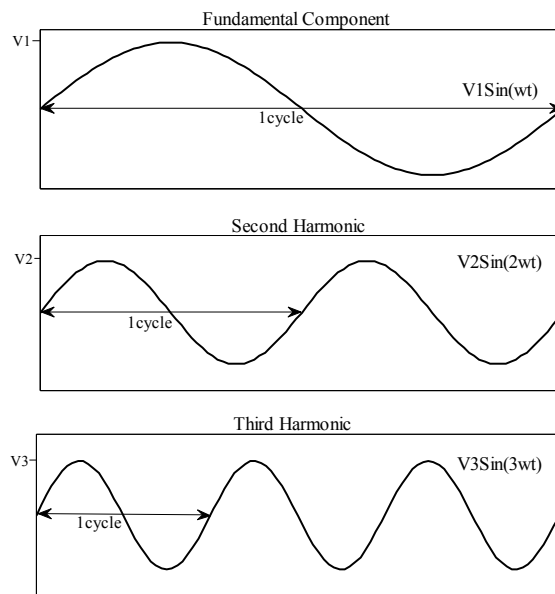
مباحث کلی در زمینه

هارمونیک‌ها

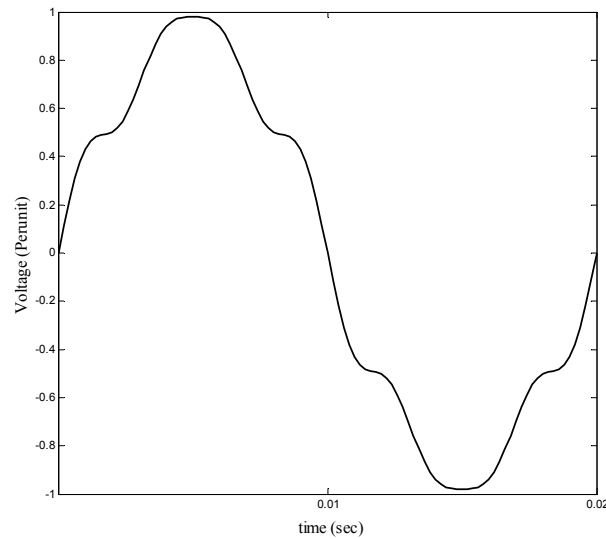
۲-۱- مقدمه

هارمونیک یک سیگنال مولفه‌ای از آن است که فرکانس آن مضرب صحیحی از فرکانس مولفه اصلی سیگنال می‌باشد؛ یعنی اگر فرکانس مولفه اصلی موج f باشد، فرکانس‌های هارمونیک $2f$ ، $3f$ ، $4f$ و هستند که به ترتیب هارمونیک مرتبه ۲، ۳، ۴ و ... موج نامیده می‌شوند. هارمونیک‌ها این خصوصیت را دارند که همگی نسبت به فرکانس مولفه اصلی متناوب هستند و بنابراین جمع آن‌ها نیز یک مولفه متناوب شکل موج اصلی است. به‌طور نمونه در شکل (۱-۲) شکل موج مولفه اصلی یک سیگنال و هارمونیک‌های مرتبه دوم و سوم نشان داده شده‌اند.

در یک سیستم قدرت شکل موج‌های ولتاژ و جریان در نقاط مختلف ممکن است دارای مولفه‌های هارمونیک در فرکانس‌های گوناگون باشند. این هارمونیک‌ها باعث می‌شوند که شکل موج ولتاژ یا جریان از شکل سینوسی خالص خارج شده و به اصطلاح دارای اعوجاج باشد. می‌توان هارمونیک‌ها را دلیل اصلی



شکل (۱-۲) شکل موج مولفه اصلی و هارمونیک‌های مرتبه دوم و سوم یک سیگنال



شکل (۲-۲) شکل موج ولتاژ دارای هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷

اعوجاج شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه دانست. به‌طور نمونه در شکل (۲-۲) شکل موج ولتاژ قسمتی از شبکه که حاوی هارمونیک مرتبه ۵ به میزان ۰.۹٪ و هارمونیک مرتبه ۷ به میزان ۰.۶٪ مولفه اصلی است نشان داده شده است. در این فصل به اختصار در مورد منابع تولید هارمونیک در شبکه، اثرات هارمونیک‌ها و نیز در مورد استانداردهای هارمونیکی صحبت می‌شود.

۲-۲- منابع هارمونیک

تولید هارمونیک‌ها در شبکه ناشی از مشخصات غیرخطی بارها و ابزارهای سیستم قدرت می‌باشد. تجهیزات و ابزارهایی غیرخطی گفته می‌شوند که رابطه بین ولتاژ و جریان لحظه‌ای آن‌ها غیرخطی باشد. منابع هارمونیک را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد [۳]: ابزارهای اشباع‌شدنی، ابزارهای قوس‌الکتریکی و ابزارهای الکترونیک‌قدرت. همه این تجهیزات مشخصه ولتاژ-جریان غیرخطی دارند. ابزارهای اشباع‌شدنی مثل ترانس‌ها و ابزارهای قوس‌الکتریکی از قبیل کوره‌های قوس‌الکتریکی، دستگاه‌های جوش و لامپ‌های تخلیه، پسیو هستند و غیرخطی بودن آن‌ها به دلیل مشخصات فیزیکی هسته آهنی و قوس‌الکتریکی است. در تجهیزات الکترونیک‌قدرت، سویچینگ ابزارهای نیمه‌هادی باعث ایجاد مشخصه

غیرخطی است. از جمله این ابزارها درایوهای موتور تنظیم سرعت، سیستم‌های تغذیه DC، شارژکننده-های باتری، بالاست‌های الکترونیک و انواع مختلف یکسوکننده‌ها و اینورترها می‌باشند. افزایش کاربرد ابزارهای الکترونیک قدرت دلیل اصلی افزایش میزان هارمونیک‌ها در شبکه قدرت در سال‌های اخیر بوده است. در زیر چند نمونه از تجهیزات الکترونیک قدرت معرفی می‌شوند.

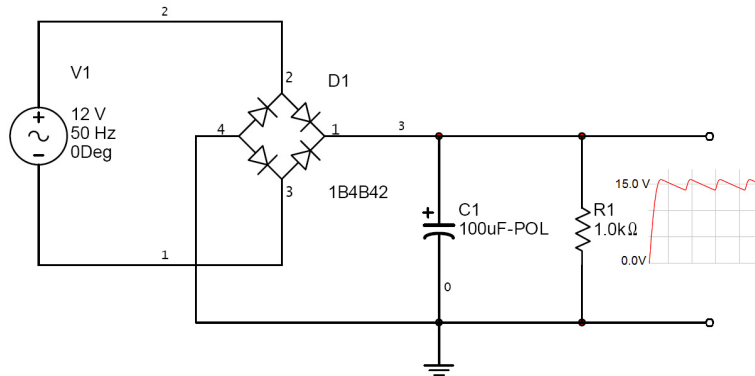
۲-۲-۱- یکسوکننده تک‌فاز

یکسوکننده‌های تک‌فاز در تجهیزات الکترونیکی ولتاژ پایین که از ولتاژ DC تغذیه می‌شوند بکار می‌روند. ولتاژ DC در خروجی توسط یک خازن هموارسازی می‌شود. توان نامی این ابزارها کوچک و از چند وات تا چندین کیلو وات متغیر است. در این تجهیزات THD جریان خط اغلب بیشتر از ۱۰۰٪ است و بسته به طراحی اتصال DC می‌تواند تا ۱۵۰٪ برسد. شکل موج جریان دارای همه مولفه‌های هارمونیک فرد می‌باشد. این گروه هم در مصارف خانگی و هم صنعتی کاربرد دارد. بعضی مصارف آن‌ها تلویزیون‌ها، کامپیوترها، چاپگرها، میکروویوها، درایوهای تنظیم سرعت توان پایین، لامپ‌های فلورسنت فرکانس بالا، UPS‌های کوچک و غیره می‌باشند [۴].

در شکل (۲-۳) یک یکسوکننده دیودی تک‌فاز نوعی که در خروجی آن یک فیلتر RC بکار رفته است به همراه مقادیر المان‌ها و شکل موج ولتاژ خروجی آن نشان داده شده است.

شکل موج جریان یکسوکننده‌های تک‌فاز به صورت پالسی است زیرا جریان تنها وقتی که ولتاژ تغذیه بیشتر از ولتاژ خازن DC باشد شارش می‌یابد. شکل (۲-۴) ولتاژ و جریان ورودی یک گیرنده تلویزیون با یکسوکننده دیودی را نشان می‌دهد. سری فوریه پالس جریان شکل (۲-۴) به صورت زیر است [۱]:

$$I_n = \frac{8\alpha I}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\cos n\alpha\pi}{1-n^2\alpha^2\pi^2} \cos n\omega t \quad (1-2)$$



شکل (۳-۲) یک یکسوکننده تک‌فاز نوعی با فیلتر RC در خروجی آن

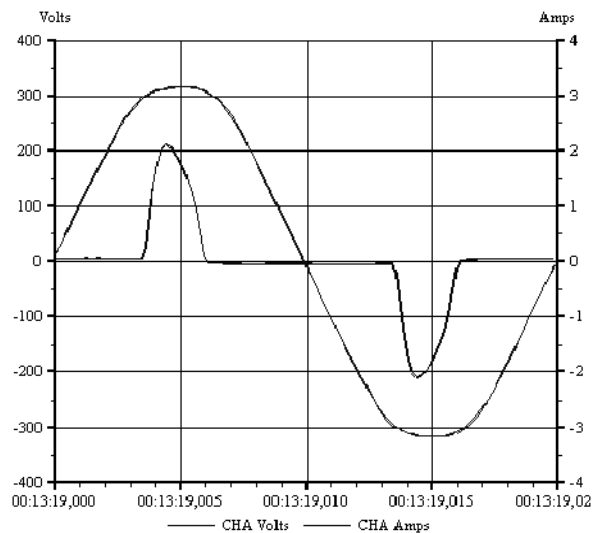
که I مقدار پیک پالس و $\alpha = \theta/T$ نسبت طول زمانی پالس به پریود شکل موج است.

در محاسبه جریان‌های هارمونیک‌ها در معادله (۱-۲) فرض شده است که ولتاژ تغذیه سینوسی خالص باشد.

اما در عمل انباشتگی پالس‌های جریان در مرکز شکل موج ولتاژ موجب صاف شدن پیک شکل موج

سینوسی ولتاژ می‌شود. این عمل موجب پهن شدن پالس‌های جریان بکار رفته برای شارژ خازن‌ها می‌شود

و در نتیجه مولفه‌های هارمونیک‌ها کاهش می‌یابد [۴].



شکل (۴-۲) شکل موج ولتاژ و جریان یک گیرنده تلویزیون با یکسوکننده دیودی [۴]

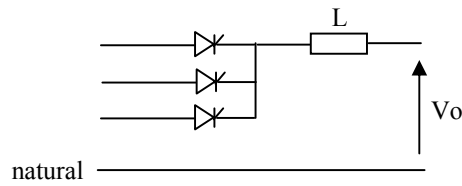
۲-۲-۲- مبدل‌های سه‌فاز

برای خروجی‌های با توان نامی بالا مبدل‌های سه‌فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مبدل‌ها به خاطر توان نامی قابل توجهشان منبع اصلی تولید هارمونیک به حساب می‌آیند. مبدل‌ها در دو ساختار منبع جریانی و منبع ولتاژی قرار می‌گیرند که هر یک از آن‌ها نیز به دو صورت نیم‌موج و تمام‌موج می‌باشند. این ساختارها در زیر بررسی می‌شوند.

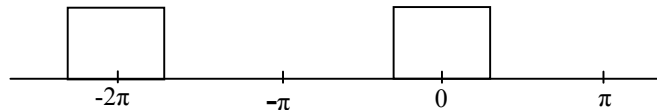
۲-۲-۱- مبدل منبع جریانی سه فاز [۱]

در این ساختار طرف DC نسبت به طرف AC به‌طور غالب اندوکتیو است. بدین منظور از یک سلف سری در طرف DC و یک بانک خازنی (معمولاً به شکل فیلترهای تنظیم‌شده) در طرف AC استفاده می‌شود. تحت این شرایط جریان DC ثابت است و مبدل به عنوان یک منبع ولتاژ هارمونیک در طرف DC و منبع جریان هارمونیک در طرف AC عمل می‌کند. در ساختار منبع جریانی سویچ‌ها بایستی ولتاژ را در هر دو پلاریته مسدود کنند اما هدایت جریان فقط در یک جهت مورد نیاز است. چون این نوع سویچ با مقادیر نامی بالا در صنعت موجود است مبدل‌های با توان نامی بالا معمولاً از نوع منبع جریانی هستند. ساختار یک یکسوکنده دیودی سه‌فاز نیم‌موج در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. اگر امپدانس سیستم صفر و طرف DC اندوکتیو خالص فرض شود شکل موج جریان فاز ورودی به صورت شکل (۲-۶) خواهد بود.

طبق شکل (۲-۶) جریان‌های فاز به شکل پالس‌های مستطیلی با پهنای $\omega = 2\pi/3$ و با فرکانس سیستم تغذیه می‌باشند. اگر در آنالیز این شکل موج، مبدا در مرکز پالس انتخاب شود، $F(\omega t)$ یک تابع زوج است و سری فوریه آن تنها شامل جملات کسینوسی است. ضرایب فوریه در این حالت نسبت به یک پریودیت جریان DC عبارتند از:



شکل (۵-۲) ساختار یک یکسوکننده نیم‌موج سه‌فاز



شکل (۶-۲) شکل موج جریان یکسوکننده نیم‌موج سه‌فاز شکل (۵-۲)

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega/2}^{\omega/2} d(\omega t) = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{3} \quad (۲-۲)$$

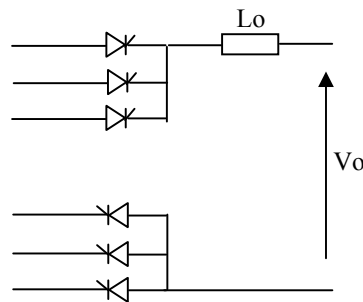
$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\omega/2}^{\omega/2} \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (۳-۲)$$

یک مبدل تمام موج سه فاز ایده‌آل نیز که پالس‌های جریان مثبت و منفی تولید می‌کند در شکل (۷-۲) نشان داده شده است. سری فوریه شکل موج جریان ورودی این مبدل برابر است با:

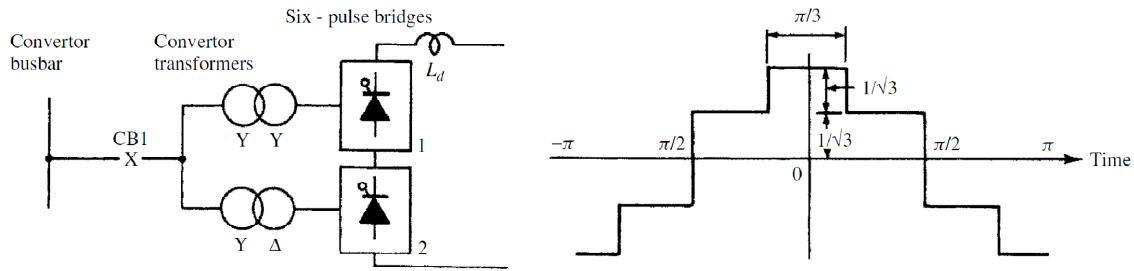
$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) \dots \right) \quad (۴-۲)$$

که I_d برابر جریان DC خروجی می‌باشد. بعضی نکات مفید می‌تواند از معادله (۴-۲) بدست آید:

(۱) عدم حضور هارمونیک‌های مضرب ۳



شکل (۷-۲) مبدل تمام موج سه‌فاز



شکل (۸-۲) ساختار یک مبدل ۱۲ پالسه به همراه شکل موج جریان فاز آن در حوزه زمان [۱]

(۲) وجود هارمونیک‌های با مرتبه $6k \pm 1$ برای مقادیر صحیح k

(۳) هارمونیک‌های با مرتبه $6k+1$ مولفه مثبت و هارمونیک‌های با مرتبه $6k-1$ مولفه منفی هستند.

۲-۲-۱-۱-۱-۲-۲ هارمونیک‌های مربوط به ساختار ۱۲ پالسه [۱]

ساختارهای ۱۲ پالسه از دو گروه ۶ پالسه تشکیل شده‌اند که از دو ترانس سه‌فاز موازی که ولتاژ ورودی یکسان و شیفت فاز ۳۰ درجه دارند تغذیه می‌شوند. یک ساختار ۱۲ پالسه معمول به همراه شکل موج جریان فاز آن در شکل (۸-۲) نشان داده شده است.

سری فوریه جریان AC ورودی با جمع سری فوریه جریان ترانس‌های ستاره-ستاره و ستاره-مثلث بدست می‌آید و برای یک ساختار ۱۲ پالسه دیودی با خروجی کاملاً سلفی به صورت زیر خواهد بود:

$$(i_a)_{12} = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) \dots \right) \quad (5-2)$$

این سری تنها هارمونیک‌های مرتبه $12k \pm 1$ را در بر می‌گیرد. جریان‌های هارمونیک‌های مرتبه‌های $6k \pm 1$ با k فرد بین دو ترانس مبدل دوران می‌کند اما به شبکه AC نفوذ نمی‌کند.

۲-۲-۲-۲-۲-۲ ساختارهای بالاتر پالس [۱]

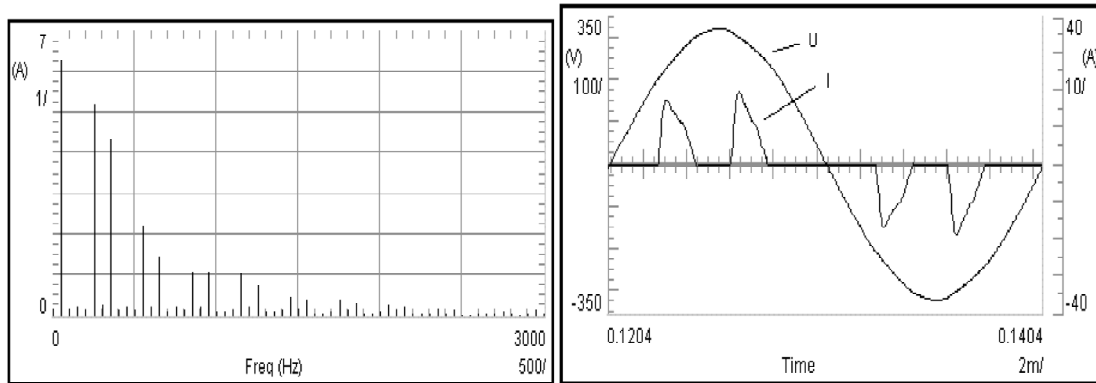
در بخش قبلی گفته شد که برای ایجاد یک ساختار ۱۲ پالسه می‌توان از دو ترانس با یک شیفت‌فاز ۳۰ درجه نسبت به هم برای ترکیب دو ساختار شش پالسه استفاده کرد. به همین ترتیب می‌توان برای ایجاد ساختارهای پالس بالاتر تعداد بیشتری ساختار شش پالسه را با ترانس‌های شیفت‌فاز با هم ترکیب نمود. برای نمونه، عملکرد ۲۴ پالسه توسط ۴ ترانس با شیفت‌فاز ۱۵ درجه بدست می‌آید و عملکرد ۴۸ پالسه هم هشت ترانس با شیفت‌فاز ۷/۵ درجه نیاز دارد. ساختارهای با تعداد پالس‌های بیشتر از ۴۸ با وجود این‌که از لحاظ تئوری درست است به ندرت ساخته می‌شود زیرا اگر اعوجاجی در شکل موج ولتاژ تغذیه وجود داشته باشد تاثیر آن بر شیفت‌فاز بین ترانس‌ها قابل ملاحظه است.

از لحاظ تئوری جریان‌های هارمونیکی مبدل p -پالسه در مرتبه‌های $pk \pm 1$ هستند که دامنه‌هایشان رابطه معکوس با مرتبه هارمونیکی دارد. به‌طور کلی می‌توان از هارمونیک‌های بالاتر از مرتبه ۴۹ به خاطر کوچک بودن دامنه‌هایشان صرف‌نظر کرد.

۲-۲-۲-۲-۲-۲ مبدل منبع ولتاژی سه‌فاز (VSC)^۱ [۱]

در این ساختار طرف DC خازنی غالب و طرف AC اندوکتیو غالب است و ولتاژ خروجی DC ثابت خواهد بود. ساده‌ترین ساختار مبدل VSC یک پل دیودی شش پالسه با یک خازن بزرگ در ترمینال‌های خروجی است. در این مدار خازن هر نیم‌سیکل فرکانس تغذیه با دو پالس جریان کوتاه شارژ می‌شود که در شکل (۹-۲) نشان داده شده است. مولفه‌های هارمونیکی این جریان می‌تواند به میزان ۹۰٪ برای هارمونیک پنجم، ۸۰٪ برای هارمونیک هفتم، ۷۵٪ برای یازدهم و ۷۰٪ برای هارمونیک سیزدهم نسبت به مولفه اصلی برسد. اما برخلاف یکسوکننده تک‌فاز، نبود اتصال خنثی در این مورد هارمونیک‌های مضرب سه را

^۱ Voltage Source Converter



(ب)

(الف)

شکل (۲-۹) (الف) جریان ناپیوسته با دو پالس در هر نیم‌سیکل (ب) طیف فرکانسی جریان، $THD = 121\%$ [۴]

حذف می‌کند. با استفاده از یک سلف سری در ورودی می‌توان یک کاهش اساسی در میزان هارمونیک‌های جریان‌های ورودی ایجاد کرد. وقتی مبدل برای شارش توان در دو جهت طراحی می‌شود سویچ‌ها باید ولتاژ را در یک پلاریته مسدود اما جریان را در هر دو طرف هدایت کنند. این نوع مبدل برای درایو موتور AC مناسب است زیرا سیستم AC و موتور هر دو اندوکتیو غالب هستند.

۲-۲-۱- ساختارهای VSC چندسطحه [۱]

با این‌که با استفاده از IGBTها امکان ساخت درایوهایی با مقادیر نامی بالای ۲۰۰ KW فراهم شده است اما ساخت درایوهای با مقادیر نامی بالاتر به خاطر این‌که گذراهای سویچینگ ایجاد شده ممکن است فشارهای زیادی به سیم‌پیچی موتور وارد کند عملی نیست. در این مورد راه‌حل استفاده از ساختارهای چندسطحه برای ایجاد ولتاژهای با مقادیر بالاتر است که در نتیجه ابزارهای سویچینگ با مقادیر نامی کم‌تری مورد نیاز خواهد بود.

۲-۳- اثرات هارمونیک‌ها

در بخش قبلی به اختصار در مورد بعضی از منابع تولید هارمونیک در سیستم قدرت بحث شد. در

این بخش اثر هارمونیک‌ها در داخل و خارج سیستم قدرت بررسی می‌شود. میزان حساسیت ابزارها و المان‌های شبکه به مقدار هارمونیک‌ها عامل مهمی در تعیین سطوح مجاز هارمونیک‌ها است. هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت موجب اثرات ناخواسته زیادی می‌شوند. هارمونیک‌ها می‌توانند منجر به تداخل سیگنال، اضافه ولتاژها، عیب در بریکر مدار و نیز موجب اضافه‌گرما، عملکرد اشتباه و آسیب تجهیزات شوند [۳].

کارگروه IEEE روی هارمونیک‌های سیستم قدرت اثرات هارمونیک‌ها را به صورت زیر لیست کرده است [۳]:

- ۱) عیب در بانک‌های خازنی ناشی از شکست عایقی یا اضافه‌بار توان راکتیو
- ۲) تداخل با سیستم‌های کنترل ریپل، عملکرد اشتباه در سیستم‌های سویچینگ از راه دور و سیستم‌های کنترل بار
- ۳) تلفات در ماشین‌های القایی و سنکرون که منجر به اضافه‌حرارت می‌شود
- ۴) اضافه‌ولتاژها و جریان‌های بیش از حد در سیستم که از رزونانس ناشی می‌شود
- ۵) شکست عایقی کابل‌های روپوش‌دار که از اضافه‌ولتاژهای هارمونیکی در سیستم ایجاد می‌شود
- ۶) تداخل با مدارهای مخابراتی
- ۷) خطا در سیستم‌های اندازه‌گیری
- ۸) عملکرد ناقص و یا اشتباه رله‌ها به دلیل تداخل سیگنال به‌خصوص در رله‌های حالت جامد و سیستم‌های کنترل شده با میکروپردازشگرها
- ۹) تداخل با کنترل‌کننده‌های موتورهای بزرگ و سیستم‌های تحریک نیروگاه

۱۰) نوسانات مکانیکی ماشین‌های القایی و سنکرون

۱۱) عملکرد ناپایدار مدارهای آتشی که بر اساس آشکارسازی نقاط عبور از صفر هستند

در زیر ابتدا در مورد رزونانس‌ها که عامل تشدید ولتاژها و جریان‌های هارمونیک در سیستم هستند صحبت می‌شود و سپس در مورد بعضی اثرات هارمونیک‌ها در سیستم قدرت بیشتر بحث می‌شود.

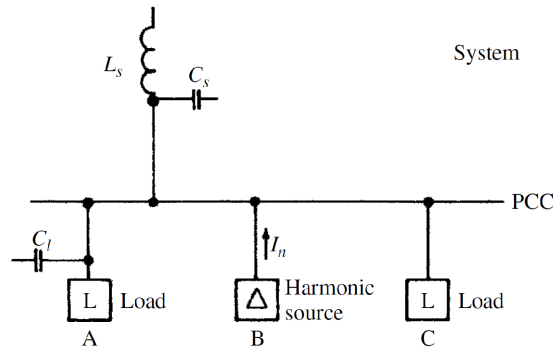
۲-۳-۱- رزونانس‌ها

حضور خازن‌ها از جمله خازن‌هایی که برای تصحیح ضریب قدرت بکار می‌روند، می‌تواند منجر به رزونانس‌های محلی سیستم شود که نتیجه آن تشدید جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک و نیز احتمال آسیب جدی به خازن‌ها است. رزونانس‌ها می‌توانند در دو نوع کلی موازی و سری در سیستم قدرت به وقوع بپیوندند که در زیر معرفی می‌شوند.

۲-۳-۱-۱- رزونانس موازی

رزونانس موازی باعث ایجاد یک امپدانس خیلی بالا در فرکانس رزونانس می‌شود. از آن‌جا که اکثر منابع هارمونیک را می‌توان به صورت منابع جریان در نظر گرفت، این امپدانس بالا منجر به وقوع ولتاژهای هارمونیک بالا خواهد شد که به نوبه خود ایجاد جریان‌های هارمونیک بالا خواهند کرد. رزونانس موازی زمانی اتفاق می‌افتد که راکتانس خازنی یک بانک خازنی و راکتانس اندوکتیو امپدانس سیستم در یک فرکانس هارمونیک یکدیگر را خنثی کنند و یک امپدانس خیلی بالا را در آن فرکانس نتیجه دهند.

رزونانس‌های موازی به طرق مختلف می‌توانند اتفاق بیافتند. ساده‌ترین حالت وقتی است که یک خازن به باسی که یک منبع هارمونیک در آن قرار دارد متصل شود. در نتیجه یک رزونانس موازی می‌تواند بین امپدانس سیستم و خازن اتفاق بیافتد. با فرض این که امپدانس سیستم کاملاً اندوکتیو است، فرکانس



شکل (۲-۱۰) رزونانس موازی در نقطه اتصال مشترک (PCC) [۱]

رزونانس برابر است با:

$$f_p = f \sqrt{\left(\frac{S_s}{S_c}\right)} \quad (۶-۲)$$

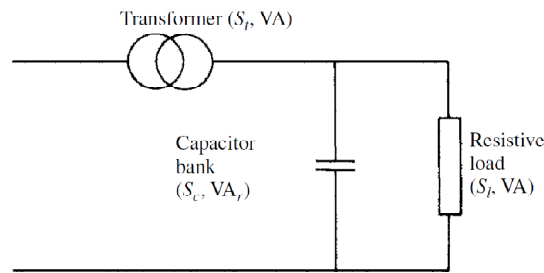
که f و f_p به ترتیب فرکانس مولفه اصلی و فرکانس رزونانس موازی (Hz) و S_s و S_c نیز به ترتیب توان نامی اتصال کوتاه سیستم و توان نامی خازن (VAR) هستند.

حالت دیگر می‌تواند به صورت شکل (۲-۱۰) اتفاق بیافتد. در این شکل جریان هارمونیکی مصرف‌کننده B با یک امپدانس بالا در باس بار مواجه می‌شود که ممکن است به دلیل رزونانس بین اندوکتانس سیستم (L_s) و ظرفیت خازنی سیستم (C_s) و/یا ظرفیت خازنی بار (C_t) باشد [۱].

۲-۳-۱-۲- رزونانس سری

سیستم شکل (۲-۱۱) را در نظر بگیرید. به دلیل کاهش امپدانس خازن در فرکانس‌های بالا از امپدانس بار می‌تواند صرف نظر شود. تحت این شرایط رزونانس سری در فرکانس زیر اتفاق می‌افتد [۱]:

$$f_s = f \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2}\right)} \quad (۷-۲)$$



شکل (۲-۱۱) مدار رزونانس سری [۱]

که f_s فرکانس رزونانس سری (Hz)، S_t و Z_t توان نامی و امپدانس پریونیت ترانس، S_c توان نامی خازن و S_r توان نامی بار است.

۲-۳-۲- اثر هارمونیک‌ها روی ماشین‌های دوار [۱]

۲-۳-۲-۱- تلفات هارمونیکی

ولتاژهای هارمونیکی می‌توانند موجب اضافه حرارت در ماشین‌های الکتریکی شوند. به عبارت دقیق‌تر زمانی که میزان هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه از حدود تعیین شده در استانداردها تجاوز کند موجب مشکلات گرمایی بیش از حد برای موتور خواهد شد. ولتاژها و جریان‌های هارمونیکی تلفات را در سیم‌پیچی‌های استاتور، مدارات روتور و ورقه‌های روتور و استاتور افزایش می‌دهند. به دلیل اثر پوستی و نیز وجود جریان‌های فوکو تلفات ایجاد شده در این حالت بزرگتر از تلفات محاسبه شده با در نظر گرفتن مقدار DC مقاومت‌ها است.

میدان‌های ناشی ایجاد شده به وسیله جریان‌های هارمونیکی در سیم‌پیچی‌های انتهایی روتور و استاتور نیز تلفات اضافی تولید می‌کند. همچنین در موتورهای القایی با روتور اریب تغییرات شار در استاتور و روتور در فرکانس‌های بالا موجب ایجاد تلفات آهن زیادی می‌شود. دامنه این تلفات به مقدار اریب و نیز مشخصه تلفات-آهن ورقه‌ها بستگی دارد.

میزان تحمل یک ماشین برای تلفات ایجاد شده به وسیله هارمونیک‌ها به دمای کلی و نیز اضافه‌حرارت-های موضعی ماشین بستگی دارد. موتورهای القایی روتور قفسی نسبت به موتورهای روتور سیم‌پیچی شده دماهای بالاتر و در نتیجه تلفات بیشتری را در روتور تحمل می‌کنند. یک مقدار تقریبی برای سطوح مجاز هارمونیک‌ها در ماشین‌ها را با توجه به این واقعیت می‌توان تعیین کرد که به‌طور تقریبی جریان مولفه منفی در ژنراتورها به ۱۰٪ و ولتاژ مولفه منفی در موتورهای القایی به ۲٪ مقادیر نامی محدود شده‌اند. بنابراین منطقی است که وقتی میزان هارمونیک‌ها از این محدودیت‌های مولفه منفی تعیین شده تجاوز کند احتمال بروز مشکلات اضافه‌حرارت در ماشین وجود داشته باشد.

۲-۳-۲-۲- گشتاورهای هارمونیکی

جریان‌های هارمونیکی در موتورهای القایی ایجاد میدان‌های هارمونیکی و در نتیجه گشتاورهای هارمونیکی می‌کنند. هارمونیک‌های مولفه مثبت گشتاور شفت را در جهت چرخش آن زیاد می‌کنند و هارمونیک‌های مولفه منفی اثر مخالف دارند. اما به دلیل این‌که لغزش در فرکانس‌های هارمونیکی تقریباً واحد است، گشتاورهای تولیدشده به وسیله مقادیر عملی جریان‌های هارمونیکی خیلی کوچک است. علاوه بر این گشتاورها به صورت جفت اتفاق می‌افتند و تمایل به خنثی کردن یکدیگر دارند. به همین دلیل اثر هارمونیک‌ها بر میانگین گشتاور در اکثر موارد صرف‌نظر می‌شود.

۲-۳-۲-۳- بقیه اثرات

حضور هارمونیک‌ها می‌تواند منجر به تغییر مشخصه گشتاور-سرعت موتور به صورت ایجاد یک نقطه عملکردی پایدار در فرکانسی پایین‌تر از فرکانس کار موتور شود. در نتیجه در راه‌اندازی موتور القایی و رسیدن به سرعت نرمال آن مشکل ایجاد می‌شود.

همچنین ضربان‌های گشتاور تولید شده توسط گشتاورهای هارمونیکی منجر به ایجاد نویز صوتی در موتورهای الکتریکی مغناطیس دائم و القایی و نیز موتورهای رلوکتانسی می‌شود.

۲-۳-۳- اثر هارمونیک‌ها بر سیستم قدرت [۱]

۲-۳-۳-۱- سیستم انتقال

شارش جریان‌های هارمونیکی در شبکه انتقال دو اثر مهم ایجاد می‌کند. یک اثر تلفات ایجاد شده به خاطر افزایش مقدار r.m.s. شکل موج جریان است یعنی:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (۸-۲)$$

که I_n جریان هارمونیکی مرتبه n ام و R_n مقاومت سیستم در فرکانس هارمونیکی متناظر است. بایستی در نظر داشت اثر پوستی تابعی از فرکانس است و مقدار مقاومت AC کابل و در نتیجه میزان تلفات را افزایش می‌دهد.

اثر دوم شارش جریان‌های هارمونیکی ایجاد افت ولتاژهای هارمونیکی در دو سر امپدانس‌های مختلف مدار و در نتیجه ایجاد اعوجاج در شکل موج ولتاژ شبکه است. این روند باعث نشر هارمونیک‌ها در سراسر سیستم قدرت می‌شود. در مورد انتقال به وسیله کابل ولتاژهای هارمونیکی فشار بر عایق کابل را به نسبت پیک ولتاژ افزایش می‌دهند که موجب کوتاه شدن عمر کابل و افزایش هزینه تعمیرات می‌شود.

۲-۳-۳-۲- ترانسفورمرها

اثر اولیه هارمونیک‌ها بر ترانس‌ها تلفات و در نتیجه اضافه‌گرمایی است که توسط هارمونیک‌های جریان ایجاد می‌شود. بقیه اثرات شامل امکان وقوع رزونانس بین اندوکتانس ترانس و ظرفیت خازنی سیستم،

فشار بر عایق‌بندی مکانیکی (سیم‌پیچی و ورقه‌ها) ناشی از گردش دما و نیز لرزش‌های کم احتمالی در هسته می‌باشد.

ولتاژهای هارمونیک نیز موجب افزایش تلفات جریان فوکو و هیستریزیس در ورقه‌ها شده و فشار بر عایق-بندی ترانس را افزایش می‌دهند. به‌طور کلی تلفات ایجاد شده ناشی از هارمونیک‌ها در هسته، به اثر آن‌ها بر ولتاژ ترانس و نیز به طراحی هسته ترانس وابسته است.

سیم‌پیچی مثلثی ترانس‌ها برای جریان‌های هارمونیک مولفه صفر با فرکانس مضرب سه نسبت به مولفه اصلی به صورت یک تله عمل کرده و این جریان‌ها در داخل مثلث جاری می‌شوند که ممکن است باعث اضافه بار سیم‌پیچی شود. شارهای هارمونیک ایجاد شده توسط این جریان‌ها نیز در ترانس‌های سه‌پایه موجب افزایش تلفات و اضافه حرارت در هسته می‌شوند.

۲-۳-۳- بانک‌های خازنی

ولتاژهای هارمونیک موجب ایجاد تلفات عایقی در خازن‌ها می‌شوند. این تلفات برای ولتاژ هارمونیک هر مرتبه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (9-2)$$

که $\tan \delta = R/(1/\omega C)$ ضریب تلفات، $\omega_n = 2\pi f_n$ و V_n ولتاژ موثر هارمونیک n ام است.

فشار حرارتی که توسط ولتاژهای هارمونیک به خازن‌هایی وارد می‌شود که مستقیم (یعنی بدون اندوکتانس سری) به سیستم متصل شده‌اند را به‌طور تقریبی می‌توان به کمک یک ضریب THD وزن‌دار که به صورت زیر تعریف می‌شود ارزیابی نمود:

$$\text{THD}_C = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N (n \cdot V_n^2)}}{V_1} \quad (10-2)$$

وقوع رزونانس بین خازن و بقیه سیستم نیز می‌تواند اضافه‌ولتاژها و جریان‌های هارمونیکی بالا ایجاد کند و در نتیجه تلفات و اضافه‌حرارت را در خازن به مقدار زیادی افزایش دهد که این اغلب منجر به خرابی خازن‌ها می‌شود. بنابراین همه رزونانس‌های ممکن بایستی در طراحی بانک‌های خازنی در نظر گرفته شوند. استاندارد ANSI/IEEE 18-1980 از جمله استانداردهای محدودکننده اضافه‌جریان است که در طراحی خازن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

علاوه بر این توان راکتیو کلی خازن شامل توان مولفه اصلی و مولفه‌های هارمونیکی، یعنی

$$Q = \sum_{n=1}^N Q_n \quad (11-2)$$

بایستی از توان راکتیو نامی خازن تجاوز کند (با در نظر گرفتن اثر اضافه‌ولتاژهای مجاز و نیز خطاهای احتمالی در ساخت خازن).

البته بایستی در نظر داشت که خازن‌های تصحیح ضریب قدرت معمولاً با اضافه کردن یک اندوکتانس سری کوچک به عنوان فیلتر برای هارمونیک مرتبه سوم یا پنجم تنظیم می‌شوند. این امر باعث می‌شود خازن برای فرکانس‌های بالای هارمونیک سوم (یا پنجم) اندوکتیو باشد و از رزونانس‌های موازی پیشگیری شود.

۲-۳-۳-۴- اثرات هارمونیک‌ها بر ابزارهای اندازه‌گیری [۱]

ابزارهای اندازه‌گیری کمیت‌های مولفه اصلی برای جریان سینوسی خالص تنظیم می‌شوند و در نتیجه بکارگیری آن‌ها در حضور هارمونیک‌ها می‌تواند منجر به خطا در سنجش شود. اساس عملکرد ابزارهای

اندازه‌گیری کلاسیک الکترومغناطیسی است و در آن‌ها شارهای رانش و ترمز برای اعمال گشتاور به روتور تولید می‌شود. عناصر تولیدکننده شار نسبت به فرکانس غیرخطی هستند. بنابراین پاسخ این ابزارها به فرکانس‌هایی غیر از فرکانس طراحی‌شان نادرست است و خطای بزرگی را در نتایج بوجود می‌آورد. یک عبارت برای توان کلی سنجش شده توسط این ابزار برابر است با:

$$\text{Total power} = V_{dc} I_{dc} + V_F I_F \cos \phi_F + V_H I_H \cos \phi_H \quad (12-2)$$

$$(P_T) \quad (P_{dc}) \quad (P_F) \quad (P_H)$$

این ابزارها P_{dc} را اندازه نمی‌گیرند اما توان DC که بار تولید و یا مصرف کند موجب یک خطا به نسبت P_{dc}/P_T در اندازه‌گیری می‌شود. همچنین این ابزارها مقدار P_F (توان مولفه اصلی) را درست و مقدار P_H (توان مولفه‌های هارمونیک) را نادرست اندازه می‌گیرند که خطای سنجش به فرکانس وابسته است. هر خطایی در اندازه‌گیری توان هارمونیک P_H موجب خطایی به مقدار $\pm KP_H/P_T$ می‌شود که ضریب K به مشخصه پاسخ فرکانسی ابزار سنجش وابسته است.

۲-۳-۳-۵- تداخل هارمونیک‌ها با حفاظت سیستم قدرت [۱]

بسته به خصوصیات طراحی و اساس عملکرد رله‌های حفاظتی، هارمونیک‌ها ممکن است باعث عملکرد اشتباه و یا انحراف در مشخصه عملکردی آن‌ها شوند. به ویژه رله‌های دیجیتال و رله‌هایی که عملکردشان براساس نمونه‌برداری داده‌ها یا نقاط عبور از صفر شکل موج‌ها است در حضور هارمونیک‌ها دچار خطا می‌شوند. البته در اکثر مواقع تغییرات در مشخصات عملکردی رله‌ها ناچیز است و مشکلی ایجاد نمی‌کند. عملکرد بیشتر رله‌ها تا زمانی که سطوح ولتاژ هارمونیک‌ها زیر ۲۰٪ باشند تاثیر چندانی نمی‌پذیرد.

یک اثر جریان‌های هارمونیک می‌تواند بر رله‌های دیستانس باشد. تنظیمات این رله‌ها بر اساس امپدانس-های مولفه اصلی خطوط انتقال است. در نتیجه هنگام وقوع یک عیب جریان‌های هارمونیک (به‌ویژه

هارمونیک سوم) می‌توانند منجر به خطاهای اندازه‌گیری قابل توجه در این رله‌ها شوند.

همچنین جریان‌های هارمونیکی بر قابلیت قطع بریکرها و فیوزها اثر می‌گذارند. این می‌تواند ناشی از مقدار بالاتر di/dt شکل موج جریان هارمونیک‌دار در نقاط عبور از صفر آن باشد. در بریکرهای مغناطیسی حرارتی نیز اضافه‌حرارت سیم‌پیچی ناشی از وجود هارمونیک‌ها بر قابلیت سنس جریان اثر گذاشته و موجب قطع زود هنگام نسبت به نقطه عملکردی آن می‌شود. المان‌های تاثیرپذیر دیگر از وجود هارمونیک‌ها فیوزها هستند که اساس عملکردشان حرارتی است و در حقیقت ابزارهای اضافه جریان موثر هستند.

۲-۳-۳-۶- اثر هارمونیک‌ها بر بارهای مصرف‌کننده [۱]

بررسی اثر هارمونیک‌ها بر مصرف‌کننده‌ها موضوع گسترده‌ای است که در مقالات زیادی بحث شده است.

بعضی از این اثرات عبارتند از:

(۱) **گیرنده‌های تلویزیون:** هارمونیک‌هایی که بر پیک ولتاژ اثر می‌گذارند موجب تغییرات در روشنایی و اندازه تصویر تلویزیون می‌شوند.

(۲) **لامپ‌های مهتابی و قوس جیوه‌ای:** گاهی اوقات در این ابزارها برای تصحیح ضریب توان از خازن‌هایی استفاده می‌شود. این خازن با اندوکتانس بالاست و مدار یک فرکانس رزونانس تشکیل می‌دهد. اگر این فرکانس متناظر با فرکانس یک هارمونیک تولید شده باشد، موجب گرمای بیش از حد و احتمالاً ایجاد عیب می‌شود. گرچه فرکانس رزونانس اکثر لامپ‌ها حدود ۷۵ تا ۸۰ هرتز است که در نتیجه با هارمونیک‌های منبع تغذیه واکنشی نخواهد داشت. نویز صوتی از دیگر اثرات ولتاژهای هارمونیکی بر این ابزارها می‌باشد.

۳) کامپیوترها و پردازش‌گرها: به منظور عملکرد درست این ابزارها محدودیت‌هایی برای میزان هارمونیک‌های ولتاژ تغذیه آن‌ها تعیین شده است. اگر میزان هارمونیک‌ها از مقادیر مجاز تعیین شده فراتر رود بر عملکرد این ابزارها تاثیر منفی خواهد داشت.

۴) تجهیزات الکترونیک قدرت: هارمونیک‌ها ممکن است موجب عملکرد نادرست درایوهای سرعت متغیر کنترل شده با تریستور شوند. مثلا وجود هارمونیک‌ها می‌تواند موجب عملکرد ناقص پالس‌دهی تریستورها و در نتیجه ایجاد نچ در شکل موج ولتاژ شود. همچنین اثرات رزونانس بین تجهیزات مختلف می‌تواند منجر به ایجاد اضافه‌ولتاژ شود.

۲-۳-۴- تداخل هارمونیک‌ها با مدارهای مخابراتی [۱]

نویز در مدارهای مخابراتی کیفیت انتقال پیام را پایین می‌آورد و می‌تواند در فرایند پیام‌دهی ایجاد تداخل کند. نویز در سطوح پایین منجر به ایجاد مزاحمت و در سطوح بالا باعث از دست رفتن برخی اطلاعات پیام می‌شود که در موارد شدیدتر موجب می‌شود مدار مخابراتی غیر قابل استفاده شود.

نسبت پیام به نویز معمولا در مدارهای مخابراتی به عنوان معیاری برای میزان کیفیت انتقال پیام بکار می‌رود. این نسبت هنگام محاسبه برای تعیین میزان تداخل سیستم قدرت در انتقال پیام بایستی با توجه به این موضوع که سطوح توان سیگنال‌ها مختلفند (مگاوات برای سیستم قدرت و میلی‌وات برای مدار مخابراتی) بکار گرفته شود. بنابراین حتی یک مولفه فرکانس صوتی نامتعادل کوچک در داخل شبکه قدرت براحتمی یک سطح نویز غیرمجاز را در یک مدار مخابراتی ایجاد می‌کند.

۲-۴- استانداردهای هارمونیک

در گذشته اکثر کشورها به منظور حل مشکلات مربوط به کیفیت توان خود، استانداردهایی برای اعمال به

سیستم قدرت داخلی‌شان وضع نمودند. اما با رشد جهانی شدن و بهم پیوسته شدن شبکه‌های قدرت و همچنین نیاز به تطبیق تجهیزات ساخته شده در یک کشور با استانداردهای کشور دیگر یک تلاش جمعی برای ایجاد استانداردهای بین‌المللی در زمینه هارمونیک‌ها بوجود آمد.

موسسه IEC مستقر در ژنو به عنوان متصدی استانداردهای کیفیت توان الکتریکی شناخته شده است. این موسسه یک سری استاندارد به نام استانداردهای سازش‌پذیری الکترومغناطیسی (EMC) برای مسائل مربوط به کیفیت توان تعریف کرده است. استاندارد سری IEC 61000، در مورد هارمونیک‌ها و اینترهارمونیک‌ها می‌باشد.

استاندارد معروف دیگر در زمینه هارمونیک‌ها استاندارد IEEE 519-1992 است. این استاندارد محدودیت‌هایی را برای میزان هارمونیک‌های ولتاژ و جریان سطوح مختلف سیستم‌های توزیع و انتقال مشخص کرده است. همچنین این استاندارد محدودیت‌هایی را برای جریان‌های هارمونیکی یک مصرف‌کننده نوعی در نظر گرفته است. این محدودیت‌ها به نسبت توان بار به ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بستگی دارند [۳].

به‌طور کلی ایجاد و توسعه استانداردهای هارمونیکی بر موضوعات زیر متمرکز شده است [۱]:

(۱) توصیف و مشخصه‌سازی پدیده هارمونیک‌ها

(۲) منابع اصلی هارمونیک

(۳) اثرات هارمونیک‌ها روی بقیه تجهیزات و نیز اجزاء سیستم قدرت

(۴) توصیف ریاضی پدیده هارمونیک‌ها با استفاده از شاخص‌ها یا تحلیل آماری برای ارزیابی کمی آن

(۵) تکنیک‌ها و رهنمودهای اندازه‌گیری

(۶) محدودیت‌های تولید هارمونیک برای انواع مختلف تجهیزات

(۷) حدود مجاز هارمونیک‌ها یا میزان تحمل تجهیزات گوناگون

(۸) رهنمودهای کاهش هارمونیک‌ها

فصل سوم

انواع روش‌های شناسایی

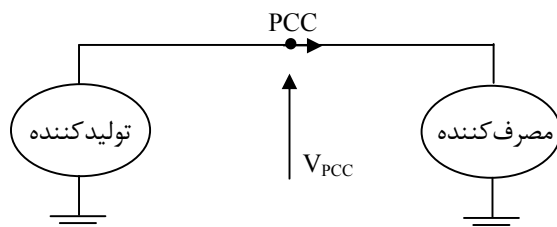
منابع هارمونیک

۳-۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای شناسایی منابع هارمونیک در شبکه وجود دارد. این روش‌ها به دو نوع کلی تقسیم می‌شوند. روش‌های تک‌نقطه و روش‌های چندنقطه. روش‌های تک‌نقطه بر مبنای اندازه‌گیری‌هایی هستند که در یک نقطه از سیستم قدرت انجام می‌شوند و بالادست یا پایین‌دست نقطه اندازه‌گیری را به عنوان منبع غالب هارمونیک تعیین می‌کنند. روش‌های چندنقطه بر اساس اندازه‌گیری‌هایی هستند که در چندین نقطه از سیستم قدرت به صورت هم‌زمان انجام می‌شوند. در این فصل انواع روش‌های تک‌نقطه و چندنقطه معرفی می‌شوند.

۳-۲- روش‌های تک‌نقطه

در روش‌های تک‌نقطه یک طرف نقطه اندازه‌گیری به عنوان تولیدکننده و طرف دیگر به عنوان مصرف‌کننده در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۳-۱) تولیدکننده و مصرف‌کننده و نقطه اندازه‌گیری نشان داده شده‌اند. در این روش‌ها ابتدا با اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان در PCC^۱ و استفاده از یک روش برای بدست آوردن طیف فرکانسی شکل‌موج مانند بسط سری فوریه، ولتاژ و جریان هارمونیک در PCC در مرتبه‌های مختلف بدست می‌آیند. سپس با استفاده از این داده‌ها و بعضی اطلاعات مربوط به شبکه منبع



شکل (۳-۱) تولیدکننده و مصرف‌کننده و نقطه اندازه‌گیری

^۱ Point of Common Coupling

غالب هارمونیک به یکی از دو طرف نسبت داده می‌شود. انواع مختلف روش‌های تک‌نقطه در زیر معرفی می‌شوند.

۳-۲-۱- روش جهت توان اکتیو [۵]

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های مورد استفاده برای شناسایی منبع غالب هارمونیک است. در این روش از جهت توان اکتیو هارمونیکی برای شناسایی منبع غالب استفاده می‌شود. در شکل (۲-۳) فرض کنید V_{PCC} و I_{PCC} به ترتیب ولتاژ و جریان نقطه مشترک در یک مرتبه هارمونیکی خاص هستند. از زیرنویس h به اختصار صرف‌نظر شده است. توان اکتیو هارمونیکی در مرتبه موردنظر در PCC از رابطه زیر بدست می‌آید:

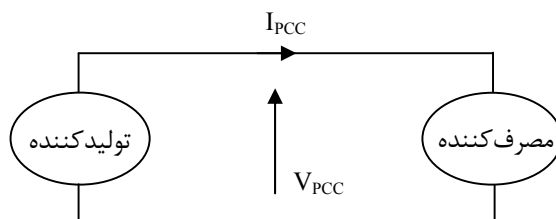
$$P = R(V_{PCC} I_{PCC}^*) \quad (1-3)$$

با توجه به شکل (۲-۳) مشخص است که جهت مثبت توان اکتیو از تولیدکننده به مصرف‌کننده در نظر گرفته شده است. منبع غالب هارمونیک در روش جهت توان اکتیو به صورت زیر تعیین می‌شود:

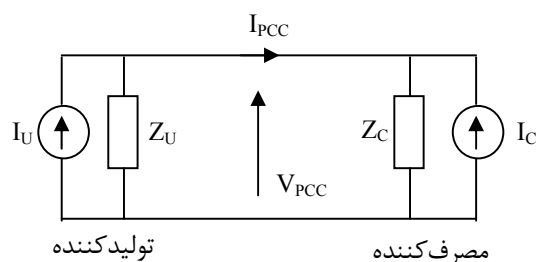
اگر $P > 0$ تولیدکننده سهم بیشتری در هارمونیک PCC در آن مرتبه دارد.

اگر $P < 0$ مصرف‌کننده سهم بیشتری در هارمونیک PCC در آن مرتبه دارد.

۳-۲-۱-۱- بررسی اعتبار روش جهت توان اکتیو



شکل (۲-۳) هارمونیک ولتاژ و جریان در PCC



شکل (۳-۳) معادل نورتن تولیدکننده و مصرف کننده

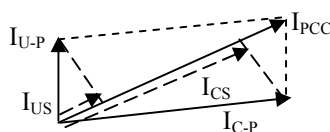
روش جهت توان اکتیو ظاهراً درست به نظر می‌رسد و سال‌ها به عنوان ابزاری جهت تعیین منبع هارمونیک در صنعت استفاده شده است. اما بعد نشان داده شد که این روش برای آشکارسازی منبع هارمونیک مناسب نیست و در برخی موارد منجر به نتایج نادرست می‌شود. برای اثبات این موضوع با توجه به شکل (۳-۳) معادل نورتن تولیدکننده و مصرف کننده در یک هارمونیک خاص در نظر گرفته شده است. در این شکل I_U و Z_U به ترتیب منبع جریان و امپدانس نورتن معادل طرف تولیدکننده و I_C و Z_C کمیت‌های متناظر طرف مصرف کننده هستند.

با استفاده از اصل جمع آثار سهم منابع جریان هارمونیکی دو طرف در I_{PCC} برابر است با:

$$I_{U-P} = \frac{Z_U}{Z_U + Z_C} \times I_U \quad (۲-۳)$$

$$I_{C-P} = -\frac{Z_C}{Z_U + Z_C} \times I_C \quad (۳-۳)$$

که I_{U-P} و I_{C-P} به ترتیب سهم فازوری منابع تولیدکننده و مصرف کننده در هارمونیک جریان I_{PCC} هستند. این کمیت‌ها هنوز برای تعیین سهم هارمونیکی مبهم هستند چون فازوری می‌باشند. بنابراین I_{PCC} به دو مؤلفه اسکالر که از تصویر دو بردار I_{U-P} و I_{C-P} بروی آن بدست می‌آیند تجزیه می‌شود که در شکل (۳-۴) نشان داده شده‌اند. دو کمیت I_{US} و I_{CS} به ترتیب تصویر بردارهای I_{U-P} و I_{C-P} بروی I_{PCC} هستند. این دو کمیت اسکالر معیار مناسبی برای تعیین منبع غالب هارمونیک در نقطه مشترک می‌باشند. البته در



شکل (۴-۳) بدست آوردن مشارکت‌های اسکالر با تصویر I_{U-P} و I_{C-P} بروی I_{PCC}

روش انطباق که در بخش ۲-۲-۳ معرفی می‌شود از همین روش برای تعیین منبع غالب استفاده می‌شود که در آنجا به تفصیل توضیح داده خواهد شد. در این جا از این دو کمیت برای اثبات نادرستی روش جهت توان اکتیو استفاده می‌شود. برای جلوگیری از پیچیده شدن روابط فرض می‌شود که در شکل (۳-۳) امیدانس‌های Z_U و Z_C راکتانسی خالص باشند که البته نتایج را می‌توان به حالت کلی نیز تعمیم داد. توان اکتیوی که در یک هارمونیک مرتبه خاص از طرف تولیدکننده به مصرف‌کننده شارش می‌یابد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{E_U E_C}{X_U + X_C} \sin \delta = \frac{X_U X_C}{X_U + X_C} I_U I_C \sin \delta \quad (۴-۳)$$

که $E_C = X_C I_C$ و $E_U = X_U I_U$ ولتاژهای هارمونیکی مدار باز دو طرف در آن مرتبه هستند. δ نیز اختلاف زاویه بین دو منبع هارمونیکی است. اهمیت این معادله این است که مشخص می‌کند جهت شارش توان بین دو منبع تابعی از δ است.

می‌توان ثابت کرد که اگر $|I_{C-P}| > |I_{U-P}|$ برقرار باشد آن‌گاه $I_{CS} > I_{US}$ خواهد بود. رابطه بین اندازه جریان‌های فازوری I_{U-P} و I_{C-P} به ترتیب با اندازه منابع جریان هارمونیکی I_U و I_C در زیر بیان شده است:

$$|I_{U-P}| = \frac{X_U}{X_U + X_C} |I_U| \quad (۵-۳)$$

$$|I_{C-P}| = \frac{X_C}{X_U + X_C} |I_C| \quad (۶-۳)$$

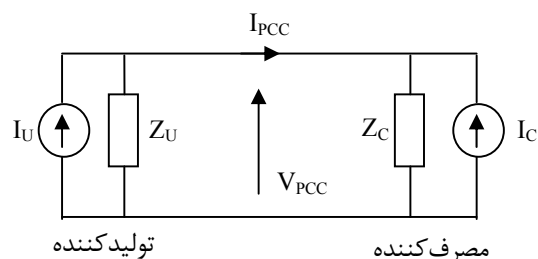
از روابط (۳-۵) و (۳-۶) مشخص است که برای برقرار بودن $|I_{C-P}| > |I_{U-P}|$ یا $I_{CS} > I_{US}$ بایستی شرط زیر برقرار باشد:

$$X_C |I_C| > X_U |I_U| \quad (۳-۷)$$

که این شرط به زاویه فاز δ وابسته نیست در حالی که جهت توان شارش یافته از تولیدکننده به مصرف‌کننده به δ وابسته است. در نتیجه آنالیز ریاضی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از روش جهت توان اکتیو برای شناسایی منبع غالب هارمونیک معتبر نیست.

۳-۲-۲- روش انطباق

در روش انطباق از معادل نورتن و تونن هر یک از طرفین نقطه اندازه‌گیری در هر هارمونیک خاص برای تعیین مشارکت‌های هارمونیکی استفاده می‌شود [۶]. برای این کار نیاز به دانستن امپدانس‌های هارمونیکی هر یک از دو طرف است. برای تعیین مقادیر این امپدانس‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. در بعضی مراجع با سویچ المانی از سیستم مثلاً خازن و یا بار، یک اختلال در محل اندازه‌گیری ایجاد و با استفاده از داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان قبل و بعد از اختلال، امپدانس هارمونیکی محاسبه شده است [۷]، [۸]. همچنین می‌توان با استفاده از اسکن فرکانسی در آنالیز حالت ماندگار سیستم امپدانس را تخمین زد [۹]. در روش انطباق با امپدانس مرجع نیز برای هر یک از دو طرف یک امپدانس مرجع تعیین شده است که بعداً توضیح داده خواهد شد. البته امپدانس تولیدکننده را می‌توان با تقریب خوبی از جمع امپدانس آخرین ترانس قبل از نقطه اتصال و امپدانس اتصال کوتاه شبکه بدست آورد [۱۰]، [۱۱]. در روش انطباق سهم هر یک از دو طرف در هارمونیک‌های ولتاژ و جریان PCC جداگانه محاسبه می‌شود که در زیر به آن می‌پردازیم.



شکل (۵-۳) معادل نورتن تولیدکننده و مصرف‌کننده

۳-۲-۲-۱- هارمونیک جریان [۶]

در مورد هارمونیک جریان از معادل نورتن تولیدکننده و مصرف‌کننده در هر هارمونیک خاص استفاده می‌شود. در شکل (۵-۳)، I_U و Z_U به ترتیب منبع جریان و امپدانس نورتن هارمونیکی طرف تولیدکننده و I_C و Z_C کمیت‌های متناظر طرف مصرف‌کننده هستند. با معلوم بودن فازور ولتاژ و جریان هارمونیکی در PCC و نیز امپدانس‌های معادل هر طرف می‌توان I_U و I_C را بدست آورد:

$$I_U = V_{PCC} / Z_U + I_{PCC} \quad (۸-۳)$$

$$I_C = V_{PCC} / Z_C - I_{PCC} \quad (۹-۳)$$

حال سهم برداری هر کدام از منابع I_U و I_C در I_{PCC} با استفاده از قانون جمع آثار تعیین می‌شود:

$$I_{U-P} = \frac{Z_U}{Z_U + Z_C} \times I_U \quad (۱۰-۳)$$

$$I_{C-P} = -\frac{Z_C}{Z_U + Z_C} \times I_C \quad (۱۱-۳)$$

با توجه به شکل (۴-۳) بردار I_{PCC} جمع برداری دو بردار I_{U-P} و I_{C-P} که به ترتیب سهم هر کدام از منابع تولیدکننده و مصرف‌کننده در هارمونیک جریان PCC هستند، می‌باشد. با بدست آوردن تصویر فازورهای I_{U-P} و I_{C-P} بروی I_{PCC} می‌توان سهم اسکالر هر طرف را در هارمونیک جریان بدست آورد:

$$I_{US} = |I_{U-P}| \cos(\varphi_{U-P} - \varphi_{PCC}) \quad (12-3)$$

$$I_{CS} = |I_{C-P}| \cos(\varphi_{C-P} - \varphi_{PCC}) \quad (13-3)$$

که φ_{U-P} ، φ_{C-P} و φ_{PCC} به ترتیب آرگومان بردارهای I_{U-P} ، I_{C-P} و I_{PCC} می‌باشند. دو کمیت I_{CS} و I_{US} نیز به ترتیب مشارکت اسکالر تولیدکننده و مصرف‌کننده در هارمونیک جریان PCC در آن مرتبه خاص هستند. هر طرف که سهم اسکالر بزرگ‌تری در I_{PCC} داشته باشد به عنوان منبع غالب برای هارمونیک جریان در آن مرتبه خاص در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۲-۳- هارمونیک ولتاژ [۶]

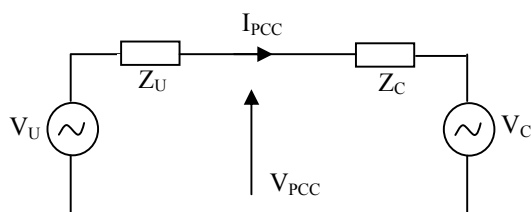
در این مورد از معادل تونن هر یک از دو طرف در هر مرتبه استفاده می‌شود. در شکل (۶-۳)، V_U و Z_U به ترتیب منبع ولتاژ و امپدانس تونن طرف تولیدکننده و V_C و Z_C کمیت‌های متناظر طرف مصرف‌کننده هستند. با توجه به شکل (۶-۳) منابع ولتاژ هارمونیکی V_U و V_C از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$V_U = V_{PCC} + Z_U I_{PCC} \quad (14-3)$$

$$V_C = V_{PCC} - Z_C I_{PCC} \quad (15-3)$$

سهم هر کدام از منابع V_U و V_C در هارمونیک ولتاژ PCC برابر است با:

$$V_{U-P} = \frac{Z_C}{Z_U + Z_C} V_U \quad (16-3)$$



شکل (۶-۳) معادل تونن تولیدکننده و مصرف‌کننده در PCC

$$V_{C-P} = \frac{Z_U}{Z_U + Z_C} V_C \quad (17-3)$$

مشابه قبل می‌توان سهم اسکالر هر طرف را نیز در V_{PCC} بدست آورد:

$$V_{US} = |V_{U-P}| \cos(\delta_{U-P} - \delta_{PCC}) \quad (18-3)$$

$$V_{CS} = |V_{C-P}| \cos(\delta_{C-P} - \delta_{PCC}) \quad (19-3)$$

که δ_{U-P} ، δ_{C-P} و δ_{PCC} به ترتیب آرگومان بردارهای V_{U-P} ، V_{C-P} و V_{PCC} می‌باشند. دو کمیت V_{US} و V_{CS} نیز به ترتیب مشارکت اسکالر تولیدکننده و مصرف‌کننده در هارمونیک ولتاژ PCC در آن مرتبه خاص هستند. هر طرف که سهم اسکالر بزرگ‌تری در V_{PCC} داشته باشد به عنوان منبع غالب برای هارمونیک ولتاژ در آن مرتبه خاص در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که گفته شد با استفاده از روش انطباق می‌توان سهم طرفین PCC را در هارمونیک ولتاژ و جریان در هر مرتبه مورد نظر تعیین کرد. اما بکارگیری این روش گاهی اوقات منجر به نتایج نادرست می‌شود. چون در این روش از امپدانس‌های واقعی دو طرف استفاده می‌شود و تغییرات امپدانس در تعیین مشارکت‌های هارمونیکی محاسبه نمی‌شوند. یکی از مواردی که باعث تغییر امپدانس یک طرف می‌شود اتصال بانک‌های خازنی است مخصوصاً هنگامی که در شرایط رزونانس قرار داشته باشند. در روش انطباق با امپدانس‌های مرجع با تعیین امپدانس مرجع برای طرفین PCC این مشکل برطرف شده است که در زیر به آن می‌پردازیم.

۳-۲-۳- روش انطباق با امپدانس مرجع [۱۱]، [۱۲]

سیستم شکل (۷-۳) را در نظر بگیرید. فرض کنید که امپدانس مصرف‌کننده به هر دلیلی کاهش یابد و باعث افزایش هارمونیک‌های تزریق شده توسط تولیدکننده شود. در اینجا مصرف‌کننده نیز به خاطر تغییر

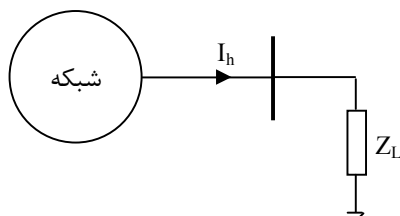
امپدانس که موجب افزایش هارمونیک‌ها شده است مسئول می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان گفت که اساس نظریه روش انطباق با امپدانس‌های مرجع تبدیل تغییرات امپدانس تولیدکننده و مصرف‌کننده به منبع جریان یا ولتاژ هارمونیکی معادل است. در حقیقت در این روش برای تولیدکننده و مصرف‌کننده در هر مرتبه هارمونیکی امپدانس‌های مرجع Z_{C-ref} و Z_{U-ref} در نظر گرفته می‌شود و هرگونه تغییر امپدانس آن‌ها از امپدانس‌های مرجعشان به صورت یک منبع هارمونیک متناسب با این تغییر منظور می‌شود. اساس این روش برای هارمونیک جریان و ولتاژ در زیر آمده است.

۳-۲-۳-۱- هارمونیک جریان

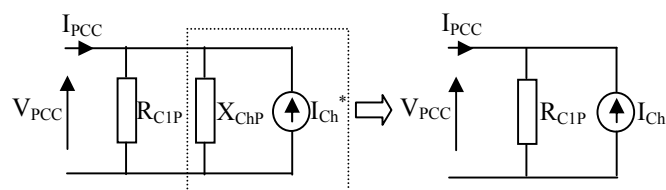
با توجه به شکل (۳-۸) چون هنگام محاسبه مشارکت‌های جریان هارمونیکی از معادل نورتن هر طرف استفاده می‌شود پس امپدانس مصرف‌کننده می‌تواند به صورت اتصال موازی یک مقاومت و راکتانس نشان داده شود. در این روش جریانی که در شاخه راکتانس جاری می‌شود مطابق شکل (۳-۸) به یک منبع جریان هارمونیکی معادل با آن تبدیل می‌شود. امپدانس مرجع مصرف‌کننده در این حالت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_{C-ref} = R_{CIP} = \frac{|V_{P1}|^2}{P} = \frac{|V_{P1}|}{|I_{P1}| \cdot \cos \phi_1} \quad (3-20)$$

در رابطه (۳-۲۰)، P توان اکتیو مصرفی بار در فرکانس اصلی، ϕ_1 زاویه بین ولتاژ و جریان مؤلفه اصلی



شکل (۳-۷) بار و شبکه تغذیه آن



شکل (۳-۸) تبدیل جریان راکتانس به منبع جریان معادل با آن

اندازه‌گیری شده در PCC و $|V_{P1}|$ و $|I_{P1}|$ دامنه‌های این دو هستند.

همچنین امپدانس مرجع تولیدکننده به صورت جمع امپدانس اتصال کوتاه شبکه و امپدانس آخرین ترانس قبل از نقطه اندازه‌گیری تعیین می‌شود. در نتیجه منابع جریان هارمونیک هر یک از دو طرف بدست می‌آیند:

$$I_{Ch} = \frac{V_{PCC}}{R_{C1P}} - I_{PCC} \quad (۳-۲۱)$$

$$I_{Uh} = \frac{V_{PCC}}{Z_{Uh-ref}} + I_{PCC} \quad (۳-۲۲)$$

مشارکت‌های برداری دو طرف در هارمونیک جریان PCC با توجه به قانون جمع آثار برابر است با:

$$I_{U-Ph} = \frac{Z_{Uh-ref}}{Z_{Uh-ref} + R_{C1P}} \cdot I_{Uh} \quad (۳-۲۳)$$

$$I_{C-Ph} = -\frac{R_{C1P}}{Z_{Uh-ref} + R_{C1P}} \cdot I_{Ch} \quad (۳-۲۴)$$

مشابه روش انطباق تصویر هر کدام از این بردارها بروی بردار I_{PCC} سهم اسکالر هر طرف را در هارمونیک جریان بدست می‌دهد. مقایسه این کمیت‌های اسکالر منبع غالب را برای هارمونیک جریان در هر مرتبه مشخص می‌کند.

۲-۳-۲-۳- هارمونیک ولتاژ

هنگام محاسبه مشارکت‌های ولتاژ هارمونیکی از معادل تونن هر طرف استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۹-۳) در این حالت امپدانس مصرف‌کننده می‌تواند به صورت اتصال سری یک مقاومت و راکتانس در نظر گرفته شود.

مشابه حالت هارمونیک جریان مؤلفه مقاومتی به عنوان امپدانس مرجع مصرف‌کننده معرفی می‌شود و افت ولتاژ دو سر بخش راکتانسی بار به منبع ولتاژ هارمونیکی معادل تبدیل می‌شود. در این جا امپدانس مرجع مصرف‌کننده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_{C-ref} = R_{CIS} = \frac{P}{|I_{p1}|^2} = \frac{|V_{p1}| \cdot \cos \phi_1}{|I_{p1}|} \quad (25-3)$$

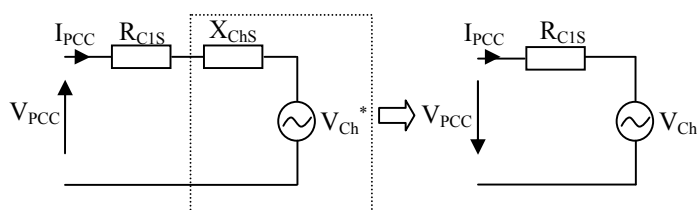
امپدانس مرجع تولیدکننده مشابه حالت هارمونیک جریان محاسبه می‌شود. اکنون می‌توان منابع ولتاژ هارمونیکی طرفین را محاسبه نمود:

$$V_{Ch} = V_{PCC} - I_{PCC} R_{CIS} \quad (26-3)$$

$$V_{Uh} = V_{PCC} + I_{PCC} Z_{Uh-ref} \quad (27-3)$$

سهام هر یک از دو طرف در هارمونیک ولتاژ PCC برابر است با:

$$V_{U-Ph} = \frac{R_{CIS}}{Z_{Uh-ref} + R_{CIS}} \cdot V_{Uh} \quad (28-3)$$



شکل (۹-۳) تبدیل افت ولتاژ دو سر راکتانس به منبع ولتاژ معادل با آن

$$V_{C-Ph} = \frac{Z_{Uh-ref}}{Z_{Uh-ref} + R_{CIS}} \cdot V_{Ch} \quad (29-3)$$

مشابه قبل تصویر هر یک از این بردارها بروی V_{PCC} سهم اسکالر هر طرف را در هارمونیک ولتاژ PCC بدست می‌دهد و با مقایسه آن‌ها می‌توان منبع غالب برای هارمونیک ولتاژ را در یک مرتبه خاص تعیین نمود.

۳-۲-۴- روش امیدانس بحرانی

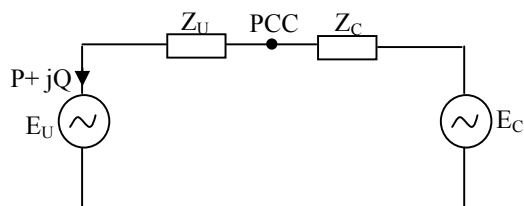
در شکل (۳-۱۰) اگر امیدانس‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده راکتانسی خالص فرض شوند، روابط توان اکتیو و راکتیو شارش یافته بین دو منبع E_U و E_C به ترتیب برابر است با:

$$P = E_U I \cos \theta = \frac{E_U E_C}{X_U + X_C} \sin \delta \quad (30-3)$$

$$Q = E_U I \sin \theta = \frac{E_U}{X_U + X_C} (E_C \cos \delta - E_U) \quad (31-3)$$

که δ اختلاف زاویه بین دو منبع است. با توجه به روابط (۳۰-۳) و (۳۱-۳) مشخص است که زاویه ولتاژهای باس بیشتر بر جهت شارش توان اکتیو و دامنه ولتاژهای باس بر جهت شارش توان راکتیو اثر می‌گذارند. با توجه به این که منبع غالب هارمونیک منبعی در نظر گرفته می‌شود که دامنه آن بزرگ‌تر است، می‌توان گفت که جهت شارش توان راکتیو کمیت مناسبی برای تعیین منبع غالب هارمونیک است [۵].

اگر در رابطه (۳۱-۳) فرض کنیم $X_U + X_C > 0$ ، در نتیجه اگر $Q > 0$ یعنی تولیدکننده توان راکتیو جذب کند می‌توان گفت که $E_C > E_U$ است (البته با فرض کوچک بودن δ) و طرف مصرف‌کننده سهم بیشتری در هارمونیک PCC دارد. اما اگر $Q < 0$ یعنی طرف تولیدکننده توان راکتیو تولید نمی‌تواند در مورد



شکل (۳-۱۰) مدار معادل تونن تولیدکننده و مصرف‌کننده

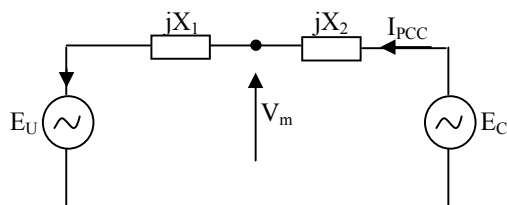
منبع غالب اعوجاج نظر قطعی داد چون توان راکتیو تولید شده ممکن است به سمت مصرف‌کننده نرسد. به این دلیل که خط توان راکتیو جذب می‌کند و ممکن است طرف مصرف‌کننده هم توان راکتیو تولید کند [۹]. در نتیجه حداقل در مورد $Q > 0$ می‌توان به این روش تکیه کرد.

در روش امپدانس بحرانی با تعریف یک پارامتر جدید امکان شناسایی منبع غالب هارمونیک در حالتی که $Q < 0$ است نیز فراهم شده است. در این روش فرض می‌شود که امپدانس هارمونیکی طرف تولیدکننده تقریباً معلوم است که معمولاً فرض درستی است زیرا امپدانس تقریبی تولیدکننده را می‌توان از جمع امپدانس آخرین ترانس نقطه اتصال و امپدانس اتصال کوتاه شبکه بدست آورد. در مورد امپدانس بار چون بارهای مصرف‌کننده ممکن است خیلی تغییر کنند و مشکلاتی برای تعیین امپدانس‌های هارمونیکی آنها وجود داشته باشد، در این روش فرض می‌شود که رنج تقریبی امپدانس مصرف‌کننده معلوم است که این تخمین با استفاده از آنالیز اسکن فرکانسی روی یک مدل شبیه‌سازی مصرف‌کننده ممکن است [۹].

۳-۲-۴-۱- هارمونیک جریان [۹]

در این بخش ابتدا روش امپدانس بحرانی برای تعیین منبع غالب هارمونیک جریان PCC شرح داده می‌شود. سپس هارمونیک ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. با شروع از ساده‌ترین مورد یعنی منبع ولتاژ هارمونیکی تولیدکننده E_U در شکل (۳-۱۱) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_U = V_{PCC} - I_{PCC} Z_U = V_{PCC} - I_{PCC} \cdot jX_U \quad (۳۲-۳)$$

شکل (۱۱-۳) نقطه‌ای با کم‌ترین ولتاژ در طول امپدانس jX

روش امپدانس بحرانی بر این فرض استوار است که توان راکتیو تولید شده به وسیله منبع E_U می‌تواند در طول امپدانس jX حرکت کند. اگر فرض کنیم که امپدانس بین E_U و E_C مثل امپدانس یک خط به طور یکسان توزیع شده است با توجه به شکل (۱۱-۳) ولتاژ در نقطه دلخواه m در طول این امپدانس به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_m = \frac{X_1}{X_1 + X_2} E_U \angle 0 + \frac{X_2}{X_1 + X_2} E_C \angle \delta \quad (33-3)$$

که $X_1 + X_2 = X$. با فرض $\partial V_m^2 / \partial X_2 = 0$ نقطه‌ای با کم‌ترین ولتاژ را می‌یابیم:

$$x = \frac{E_U^2 - E_U E_C \cos \delta}{E_U^2 + E_C^2 - 2E_U E_C \cos \delta} X \quad (34-3)$$

که x راکتانس از E_U تا نقطه کم‌ترین ولتاژ است. رابطه (۳۱-۳) را در نظر گرفته و با توجه به این که رابطه زیر برقرار است:

$$I^2 = \frac{E_U^2 + E_C^2 - 2E_U E_C \cos \delta}{X^2} \quad (35-3)$$

معادله (۳۴-۳) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$x = \frac{-Q}{I^2} = -\frac{E_U}{I} \sin \theta \quad (36-3)$$

توان راکتیو جذب شده به وسیله راکتانس x ، xI^2 است که طبق رابطه (۳-۳۶) مساوی $|Q|$ است، یعنی x راکتانسی است که همه توان راکتیو تولید شده به وسیله E_U را جذب می‌کند. به عبارت دیگر x دورترین محلی است که توان راکتیو خروجی E_U می‌تواند به آن جا شارش کند. این محل همچنین پایین‌ترین ولتاژ را در طول امپدانس بین E_U و E_C دارد. طبق روش امپدانس بحرانی اگر x به طرف مصرف‌کننده نزدیک‌تر باشد ($x > X/2$)، انتظار می‌رود که منبع تولیدکننده دامنه بزرگ‌تری داشته باشد زیرا توانسته توان راکتیو خروجی خودش را به آن سوی نیمه خط بفرستد. همین‌طور اگر $x < X/2$ یا x به طرف تولیدکننده نزدیک‌تر باشد انتظار می‌رود منبع مصرف‌کننده دامنه بزرگ‌تری داشته باشد. بنابراین یک روش برای تعیین دامنه نسبی دو منبع می‌تواند بر اساس مقایسه مقادیر x و $X/2$ باشد.

از آن جایی که علامت توان راکتیو جذب شده به وسیله منبع E_U و کمیت $2x$ ، دو پارامتر مهم در روش امپدانس بحرانی هستند، یک امپدانس فرضی علامت‌دار برای ترکیب این دو شاخص معرفی می‌شود. شاخص جدید CI^1 نامیده شده و با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$CI = 2 \frac{Q}{I^2} \quad (3-37)$$

که Q توان راکتیو جذب شده به وسیله E_U است. توجه کنید که CI و Q علامت‌های یکسان دارند. بنابراین $CI > 0$ دلالت می‌کند که تولیدکننده توان راکتیو جذب می‌کند و در نتیجه طرف مصرف‌کننده منبع هارمونیکی غالب است. اگر $CI < 0$ طرف تولیدکننده توان راکتیو تولید می‌کند و در این مورد بایستی مقدار X با مقدار قدر مطلق CI برای تعیین منبع غالب مقایسه شود. به طور خلاصه برای مورد $Z=jX$ روش پیشنهاد شده می‌تواند به صورت زیر اجرا شود:

$$1- \text{ تعیین منبع ولتاژ طرف تولیدکننده با استفاده از } E_U = V_{pcc} - I_{pcc} Z_U \text{ که } Z_U \text{ معلوم است.}$$

¹ Critical Impedance

۲- محاسبه توان راکتیو جذب شده به وسیله E_U ، $Q = E_U I \sin \theta$.

۳- به دست آوردن CI از رابطه $CI = 2(Q/I^2)$.

۴- اگر $CI > 0$ منبع تولیدکننده توان راکتیو جذب می‌کند و مصرف‌کننده منبع هارمونیک غالب است.

۵- اگر $CI < 0$ تولیدکننده توان راکتیو تولید می‌کند که این قسمت شامل گام‌های زیر است:

الف) اگر $|CI| > X_{max}$ که X_{max} ماکزیمم مقدار همه مقادیر ممکن X است، طرف تولیدکننده توانسته توان راکتیو خود را از نیمه راه بیشتر به سمت مصرف‌کننده بفرستد که این نشان می‌دهد منبع ولتاژ هارمونیک طرف تولیدکننده بزرگ‌تر و در نتیجه تولیدکننده منبع هارمونیک غالب است.

ب) اگر $|CI| < X_{min}$ که X_{min} مینیمم مقدار همه مقادیر ممکن X است، طرف مصرف‌کننده به دلیل مشابه بالا منبع هارمونیک غالب است.

ج) اگر $X_{min} < |CI| < X_{max}$ نتیجه مشخصی بدست نمی‌آید. یک چنین شرایطی عموماً بر این دلالت دارد که تولیدکننده و مصرف‌کننده مشارکتی قابل مقایسه در جریان هارمونیک PCC دارند.

۳-۲-۴-۱-۱- روش CI تعمیم یافته

در بخش قبلی فرض بر این بود که امپدانس بین تولیدکننده و مصرف‌کننده کاملاً سلفی است اما در سیستم‌های قدرت واقعی امپدانس معمولاً به صورت $R+jX$ است. برای حل این مشکل از یک چرخش فاز به صورت زیر استفاده می‌شود. معادله کلی توان راکتیو دریافت شده توسط تولیدکننده به صورت زیر است:

$$Q = \frac{E_U E_C}{|Z|} \cos(\delta + \beta) - \frac{E_U^2}{|Z|} \cos(\beta) \quad (3-38)$$

که $\beta = \text{tg}^{-1}(R/X)$ با مقایسه رابطه (۳۸-۳) با رابطه (۳۱-۳) پیداست که اختلاف این دو رابطه به اندازه یک چرخش β درجه است. بنابراین یک ماتریس دوران به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (39-3)$$

توان انتقال یافته برابر است با:

$$\begin{bmatrix} P_t \\ Q_t \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_U E_C}{|Z|} \sin \delta \\ \frac{E_U E_C}{|Z|} \cos \delta - \frac{E_U^2}{|Z|} \end{bmatrix} \quad (40-3)$$

روابط توان اکتیو P_t و توان راکتیو Q_t در معادله (۴۰-۳) مشابه مورد راکتانسی خالص است. در نتیجه اگر از P_t ، Q_t و $|Z|$ در این حالت به جای P ، Q و X در مورد راکتانسی خالص استفاده شود همه نتایج بدست آمده از مورد راکتانسی خالص می‌تواند برای مورد کلی بکار برده شود. به طور خلاصه گام‌های آشکارسازی منبع هارمونیک در حالت کلی به صورت زیر است:

$$1- \text{ محاسبه ولتاژ تولیدکننده } E_U = V_{PCC} - I_{PCC} Z_U \text{ و نیز شاخص } CI = 2(E_U / I) \sin(\theta + \beta).$$

۲- اگر $CI > 0$ طرف مصرف کننده سهم غالب را در اعوجاج دارد.

۳- اگر $CI < 0$ گام‌های زیر را داریم:

الف) اگر $|CI| > Z_{\max}$ که Z_{\max} ماکزیمم مقدار همه مقادیر ممکن Z است، طرف تولیدکننده منبع هارمونیک غالب است.

ب) اگر $|CI| < Z_{\min}$ که Z_{\min} مینیمم مقدار همه مقادیر ممکن Z است، طرف مصرف کننده منبع هارمونیک غالب است.

ج) اگر $Z_{\min} < |CI| < Z_{\max}$ نتیجه‌ای بدست نمی‌آید.

اگر مصرف‌کننده تحت شرایط بار سبک باشد یا جبران‌سازی توان راکتیو کافی داشته باشد امیدانس می‌تواند به صورت خازنی یعنی $Z = -jX$ باشد. در این حالت توان راکتیو جذب شده به وسیله منبع تولیدکننده برابر است با:

$$Q = E_U I \sin \theta = \frac{E_U}{X} (E_C \cos \delta - E_U) \quad (41-3)$$

طبق معادله (۴۱-۳) اگر تولیدکننده توان راکتیو تحویل دهد ($CI < 0$)، $E_C > E_U$ خواهد بود. از این رو نتایج برای امیدانس خازنی دقیقاً مخالف مورد اندوکتیو است.

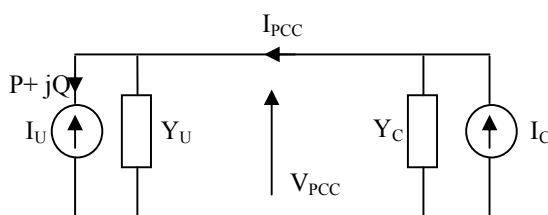
۳-۲-۴-۲-۳- هارمونیک ولتاژ [۹]

روش امیدانس بحرانی برای تعیین منبع غالب هارمونیک جریان شرح داده شد. تعیین منبع غالب برای هارمونیک ولتاژ نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. در واقع لزوم محدودیت‌ها برای هارمونیک ولتاژ در ایجاد و توسعه استانداردهای هارمونیکی مهم‌تر بوده است. در این بخش روش امیدانس بحرانی برای تعیین منبع غالب هارمونیک ولتاژ بررسی می‌شود. با توجه به مدار شکل (۳-۱۲) این معادل با یافتن این است که کدام یک از منابع جریان I_U یا I_C دامنه بزرگ‌تری دارد. اگر مشابه با حالت هارمونیک جریان فرض کنیم که ادمیتانس طرف تولیدکننده معلوم است، جریان هارمونیکی آن برابر است با:

$$I_U = Y_U V_{PCC} - I_{PCC} \quad (42-3)$$

توان راکتیو جذب شده به وسیله منبع جریان تولیدکننده نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Q = \frac{I_U (I_C \cos \delta - I_U)}{|Y|} \quad (43-3)$$



شکل (۳-۱۲) مدار معادل برای آنالیز ولتاژ هارمونیک

که $Y = Y_1 + Y_2$ با توجه به رابطه (۳-۴۳) اگر $Q > 0$ ، طرف تولیدکننده توان راکتیو دریافت می‌کند و این یعنی مصرف‌کننده منبع هارمونیک غالب برای V_{PCC} است. اگر $Q < 0$ ، منبع جریان تولیدکننده توان راکتیو تولید می‌کند و مشابه مورد هارمونیک جریان نیاز به بررسی این داریم که چه میزان ادمیتانس این توان راکتیو را جذب می‌کند. فرض کنید که ادمیتانس بین I_C و I_U به طور یکنواخت توزیع شده است. در نتیج جریان در نقطه‌ای بین دو منبع برابر است با:

$$I_m = \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} I_C \angle \delta + \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} I_U \angle 0 \quad (۳-۴۴)$$

نقطه‌ای که در آن $|I_m|$ کم‌ترین مقدار است به صورت زیر بدست می‌آید:

$$y = -\frac{Q}{V^2} \quad (۳-۴۵)$$

که y را می‌توان به عنوان CA^1 در نظر گرفت. توان راکتیو تولید شده توسط منبع جریان تولیدکننده به وسیله امپدانس با مقدار y جذب می‌شود. با مقایسه y و $|Y|/2$ می‌توان منبع هارمونیک غالب را برای هارمونیک ولتاژ PCC یافت. به عبارت دیگر با جایگزین کردن X با Y و I با V نتایج بسط یافته در مورد هارمونیک جریان را می‌توان برای آشکارسازی منبع غالب در این جا بکار برد. وقتی نتوان از رسانایی صرف نظر کرد یعنی $Y = G + jB$ ، توان راکتیو از رابطه زیر بدست می‌آید:

¹ Critical Admittance

$$Q = \frac{I_U I_C}{|Y|} \cos(\delta + \beta) - \frac{I_U^2}{|Y|} \cos \beta \quad (46-3)$$

که $\beta = \text{tg}^{-1}(G/B)$. انتقال چرخشی بسط یافته در بخش CI تعمیم یافته را در این جا نیز می‌توان بکار برد و ماتریس انتقال همان ماتریس رابطه (۳-۳۹) است. در نتیجه می‌توان در حالت کلی نیز با استفاده از روش امپدانس بحرانی منبع غالب هارمونیک ولتاژ را شناسایی کرد.

۳-۲-۵- روش بر اساس مقایسه توان‌های غیراکتیو

برای شناسایی منابع غالب هارمونیک مخصوصاً وقتی بیشتر از یک منبع هارمونیک در شبکه موجود باشد که معمولاً این‌گونه است، تعیین بیشتر از یک شاخص می‌تواند مفید باشد زیرا این امکان را فراهم می‌کند تا بی‌اعتباری احتمالی یک شاخص در یک وضعیت بحرانی مشخص شود و اطلاعات بهتری در مورد وضعیت هارمونیکی سیستم بدست آید. روشی که در این بخش معرفی می‌شود بر اساس اندازه‌گیری چندین شاخص در PCC و مقایسه آن‌ها با یکدیگر است. ابتدا این روش بروی یک سیستم تک‌فاز شرح داده شده و سپس به حالت سه‌فاز بسط داده می‌شود [۱۳].

۳-۲-۵-۱- شرح روش برای یک سیستم تک‌فاز [۱۳]

در یک سیستم تک‌فاز ولتاژ و جریان لحظه‌ای در حالت کلی می‌توانند به صورت زیر بیان شوند:

$$\begin{aligned} v &= v_1 + v_h \\ &= \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) + V_0 \end{aligned} \quad (47-3)$$

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_h \\ &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) + I_0 \end{aligned} \quad (48-3)$$

در روابط (۳-۴۷) و (۳-۴۸)، V_1 و I_1 مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان و v_h و i_h مولفه‌های هارمونیک باقیمانده را در بر می‌گیرند. همچنین V_1 و I_1 مقدار موثر مؤلفه‌های اصلی، V_h و I_h مقدار موثر مولفه‌های هارمونیک مرتبه h ، α_1 و β_1 زوایای فاز مولفه‌های اصلی برای ولتاژ و جریان، α_h و β_h زوایای فاز مولفه‌های هارمونیک مرتبه h ولتاژ و جریان و V_0 و I_0 ولتاژ و جریان مؤلفه DC هستند.

توان لحظه‌ای حاصل ضرب ولتاژ و جریان لحظه‌ای است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p_a = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] + V_0 I_0 \quad (۳-۴۹)$$

$$\begin{aligned} p_q = & -\sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) \\ & + 2 \sum_n \sum_{\substack{m \\ m \neq n}} V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \\ & + \sqrt{2} V_0 \sum_h I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \\ & + \sqrt{2} I_0 \sum_h V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \end{aligned} \quad (۳-۵۰)$$

که $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ اختلاف بین فازهای v_h و i_h است. نخستین پارامتر یعنی p_a همه مؤلفه‌هایی را در بر می‌گیرد که مقدار میانگین غیر صفر دارند. مقدار میانگین این مؤلفه برابر توان اکتیو است که از جمع توان اکتیو همه مولفه‌های هارمونیک بدست می‌آید.

$$P = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h + V_0 I_0 \quad (۳-۵۱)$$

پارامتر دوم یعنی p_q که از رابطه (۳-۵۰) بدست می‌آید همه مؤلفه‌هایی را در بر می‌گیرد که مقدار میانگین صفر دارند و در انتقال خالص انرژی نقشی ندارند. جمله نخست p_q مربوط به مولفه‌های هارمونیک است که در ولتاژ و جریان مشترکند و بقیه جملات آن مربوط به مؤلفه‌های غیرمشترک ولتاژ و جریان است. تفسیر p_q در شرایط غیرسینوسی به‌طور گسترده‌ای در مقالات بحث شده است و تعریف‌های

مختلفی برای توان غیراکتیو ارائه شده است. در بعضی تعاریف فقط مولفه‌های مشترک ولتاژ و جریان در نظر گرفته شده‌اند. در بعضی دیگر هم مولفه‌های مشترک و هم غیرمشترک ولتاژ و جریان و در بعضی موارد هم یک وضعیت میانگین بین این دو در نظر گرفته شده است. با توجه به تعاریف مختلف توان در مقالات روشی برای آشکارسازی منبع هارمونیک غالب بر اساس مقایسه میان بعضی تعاریف مختلف توان غیراکتیو ارائه شده است. کمیت‌های در نظر گرفته شده در این روش عبارتند از:

توان راکتیو مؤلفه اصلی:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (52-3)$$

توان راکتیو فریز:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (53-3)$$

توان راکتیو شارون:

$$S_Q = V \sqrt{\sum_k I_k^2 \sin^2 \theta_k} \quad (54-3)$$

شاخص k در رابطه (۵۴-۳) مربوط به مؤلفه‌هایی است که در ولتاژ و جریان مشترکند. Q_1 مقدار مرجع مینیمم است چون مؤلفه توان غیراکتیو در شرایط سینوسی است. Q_F چون مربوط به همه جملات p_q است، مقدار ماکزیمم توان غیراکتیو است. به سادگی می‌توان دریافت که هر چه میزان هارمونیک‌ها بیشتر باشد اختلاف بین Q_1 و Q_F بیشتر می‌شود زیرا Q_1 تنها مربوط به توان راکتیو مؤلفه اصلی است. مقدار توان راکتیو شارون S_Q بین Q_1 و Q_F است چون به هارمونیک‌های مشترک و غیرمشترک ولتاژ و هارمونیک‌های مشترک جریان وابسته است. در شرایط سینوسی این سه کمیت مساوی هستند. حال فرض کنید یک بار توسط یک منبع در یک سیستم تک‌فاز تغذیه می‌شود. در مورد ولتاژ تغذیه غیر

سینوسی و بار خطی اعوجاج جریان کم است و هارمونیک‌های مشترک جریان و ولتاژ عمدتاً به مؤلفه اصلی کاهش می‌یابند، در نتیجه اختلاف میان Q_1 و Q_F زیاد نیست و S_Q به Q_1 نزدیک‌تر است تا Q_F . برعکس، در مورد یک بار غیرخطی مقدار اعوجاج جریان زیاد است و سهم هارمونیک‌های جریان در مقدار S_Q بیشتر می‌شود. به علاوه اختلاف بین Q_1 و Q_F زیادتر می‌شود زیرا مقدار کلی اعوجاج بیشتر شده است. یعنی اختلاف بین کمیت‌ها بیشتر شده و S_Q به Q_F نزدیک‌تر است تا Q_1 . در نهایت وقتی هم بار و هم منبع در اعوجاج هارمونیک موثرند یک وضعیت میانی اتفاق می‌افتد یعنی اختلاف بین Q_1 و Q_F باز هم قابل توجه است و S_Q مقدار تقریبی میانگین این دو کمیت را دارد و نزدیک‌تر بودن آن به یکی از آن‌ها قابل ملاحظه نیست. در نتیجه می‌توان از مقایسه میان سه کمیت Q_1 ، Q_F و S_Q که در نقطه اندازه‌گیری و در یک شرایط کاری سیستم محاسبه شده‌اند اطلاعاتی در مورد منبع غالب هارمونیک بدست آورد.

۳-۲-۵-۲- بسط به سیستم سه فاز [۱۳]

تعریف‌های مختلفی برای توان ظاهری در سیستم‌های سه فاز ارائه شده است. درست است که این تعریف‌ها در شرایط متعادل مقدار یکسانی دارند، اما در شرایط نامتعادل این تعریف‌ها به نتایج مختلفی منجر می‌شوند. برای بسط روش بالا به سیستم‌های سه فاز متعادل کافی است که توان‌های غیر اکتیو سه فاز Q_1 ، Q_F و S_Q را برابر با جمع کمیت‌های تک‌فاز آن‌ها در نظر بگیریم. در شرایط نامتعادل هم با استفاده از این روش می‌توان منبع غالب اعوجاج را تعیین نمود اما جداسازی اثرات نامتعادلی و غیرخطی بودن ممکن نیست.

۳-۲-۵-۳- بهسازی روش با معرفی یک کمیت جدید

با استفاده از بعضی کمیت‌های تعریف شده در [۱۴] IEEE Std. 1459-2000 می‌توان روش ارائه شده بر مبنای مقایسه کمیت‌های توان غیراکتیو را با معرفی یک کمیت جدید بهبود داد. این کمیت از رابطه زیر

بدست می‌آید [۱۵]:

$$Q_x = V \sqrt{I_1^2 \sin^2 \theta_1 + I_H^2 \left(\frac{D_H^2}{V_H^2} \right)} \quad (۵۵-۳)$$

که V_H^2 و I_H^2 به ترتیب مربع مقدار موثر جریان و ولتاژ هارمونیک و D_H توان غیراکتیو هارمونیک است. با جایگزینی Q_x با S_Q در روش توان‌های غیراکتیو می‌توان عمل مقایسه را به همان طریق انجام داد. مزیت اصلی این روش این است که تنها بر اساس جداسازی مولفه‌های اصلی از محتوای هارمونیک شکل موج-های ولتاژ و جریان است. بنابراین این روش به هیچ‌گونه آنالیز طیفی برای ولتاژ و جریان نیاز ندارد و می‌تواند به طور کامل در حوزه زمان پیاده شود. در نتیجه سیستم اندازه‌گیری ساده خواهد شد [۱۵].

۳-۳- روش‌های چندنقطه

همان‌طور که در ابتدای این فصل گفته شد این نوع روش‌ها بر مبنای اندازه‌گیری‌هایی هستند که در چندین نقطه از شبکه به صورت هم‌زمان انجام می‌شوند. این روش‌ها می‌توانند اطلاعاتی در مورد وضعیت هارمونیک کل سیستم بدست دهند و محل منابع هارمونیک در شبکه را مشخص کنند. تخمین حالت هارمونیک و آنالیز مؤلفه مستقل از جمله این روش‌ها هستند که به آن‌ها پرداخته می‌شود. قبل از آن به-طور مختصر در مورد اندازه‌گیری‌های سنکرون صحبت می‌شود.

۳-۳-۱- اندازه‌گیری‌های سنکرون چندنقطه [۱۶]

همان‌طور که گفته شد روش‌های چندنقطه به انجام اندازه‌گیری‌های هم‌زمان در چندین نقطه از سیستم قدرت نیاز دارند. کمیت‌های اندازه‌گیری شده می‌توانند ولتاژ و جریان هارمونیک باس‌ها و یا جریان هارمونیک خطوط باشند. بایستی در نظر گرفت که عامل هزینه تعداد ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده

و نیز تعداد محل‌هایی که در آن‌ها ابزارها نصب می‌شوند را محدود می‌کند. پس باید تعداد و محل بهینه ابزارهای اندازه‌گیری که بهترین تخمین را بدست می‌دهد تعیین کرد. سیستم اندازه‌گیری هارمونیک در چندین ایستگاه فرعی نصب می‌شود. هر ایستگاه فرعی از یک واحد اندازه‌گیری فازوری و یک کامپیوتر تشکیل شده که در آن ایستگاه نصب شده‌اند. یک سیستم پردازش مرکزی نیز اطلاعات هارمونیک بدست آمده در هر سیستم محلی را دریافت می‌کند تا کار پردازش کلی داده‌ها را انجام دهد.

به منظور این که اندازه‌گیری فاز هارمونیک‌ها با دقت $1\mu s$ هم‌زمان یا سنکرون باشند هر سیستم محلی به یک دریافت‌کننده GPS برای هماهنگ نمودن زمان اندازه‌گیری‌ها مجهز شده است. این زمان به امکان اندازه‌گیری زاویه فاز هارمونیک مرتبه ۲۵ با دقت کمتر از یک درجه برمی‌گردد. به دلایل مختلفی از جمله خطای ابزارهای اندازه‌گیری داده‌های بدست آمده دارای مقداری نویز هستند.

۳-۲- تخمین حالت هارمونیک (HSE)^۱

با استفاده از تکنیک‌های مختلف تخمین حالت می‌توان اطلاعات هارمونیک سیستم را از داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری‌های محدودی تخمین زد. در حقیقت تخمین حالت هارمونیک یک تکنیک پردازش بر اساس روابط ریاضی بین متغیرهای حالت سیستم و اندازه‌گیری‌های بدست آمده از آن است [۱۷]. متغیرهای حالت می‌توانند ولتاژ هارمونیک باس‌ها در مرتبه‌های مختلف انتخاب شوند. البته برای تخمین زدن متغیرهای حالت برخی اطلاعات ماتریس ادمیتانس هارمونیک سیستم نیز مورد نیاز است.

به طور کلی معادلات بدست آمده در فرایند حل مسأله تخمین حالت در سه دسته *over-determined*، *determined* و *under-determined* قرار می‌گیرند، بسته به این که تعداد معادلات اندازه‌گیری مستقل (یا به عبارتی تعداد متغیرهای معلوم) به ترتیب بزرگ‌تر، مساوی و یا کمتر از تعداد متغیرهای حالت مجهول

^۱ Harmonic State Estimation

باشند. در مسأله HSE تعداد اندازه‌گیری‌ها معمولاً کمتر از تعداد متغیرهای حالت است و بنابراین معادلات بدست آمده under-determined خواهد بود [۱۸].

در حل مسأله تخمین حالت می‌توان از شبه اندازه‌گیری‌ها^۱ نیز استفاده کرد و مسأله تخمین را حل نمود. شبه اندازه‌گیری‌ها داده‌هایی هستند که از هر گونه اطلاعات در مورد پارامترهای سیستم (مثلاً اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری‌های قبلی و یا داده‌های بدست آمده از نتایج تخمین حالت با استفاده از شبکه عصبی) بدست می‌آیند. دقت این نوع داده‌ها از داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری واقعی کمتر است که این خطا بایستی در فرایند حل مسأله منظور شود [۱۹].

روش‌های مختلفی برای حل مسأله تخمین بکار گرفته شده است که برخی از آن‌ها به اختصار بیان می‌شود.

۳-۳-۱- تخمین حالت با روش حداقل مربعات [۲۰]

روش حداقل مربعات یکی از قدیمی‌ترین روش‌های مورد استفاده در حل مسأله تخمین حالت است. یک بیان ساده برای استفاده از این روش در تخمین حالت هارمونیکی می‌تواند به صورت زیر باشد. فرض کنید $V(\omega)$ و $I(\omega)$ به ترتیب ماتریس ولتاژ و جریان هارمونیکی تزریق شده به باس‌ها در مرتبه‌های مختلف و $Y(\omega)$ ماتریس ادمیتانس متناظر آن‌ها باشد. بنابراین

$$I(\omega) = Y(\omega) V(\omega) \quad (۵۶-۳)$$

اگر $V_o(\omega)$ و $I_o(\omega)$ ماتریس ولتاژها و جریان‌های اندازه‌گیری شده و $V_u(\omega)$ و $I_u(\omega)$ ولتاژها و جریان‌های مجهول باشند یعنی:

^۱ Pseudo Measurements

$$V(\omega) = \begin{bmatrix} V_u(\omega) \\ V_o(\omega) \end{bmatrix}, I(\omega) = \begin{bmatrix} I_u(\omega) \\ I_o(\omega) \end{bmatrix} \quad (۵۷-۳)$$

آن‌گاه رابطه (۵۶-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} I_u \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{uu} & Y_{uo} \\ Y_{ou} & Y_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_u \\ V_o \end{bmatrix} \quad (۵۸-۳)$$

بهترین تخمین در روش حداقل مربعات برابر است با:

$$\hat{V}_u = Y_{ou}^T (Y_{ou} Y_{ou}^T)^{-1} (I_o - Y_{oo} V_o) \quad (۵۹-۳)$$

و تخمین I_u نیز برابر است با:

$$\hat{I}_u = Y_{uu} \hat{V}_u + Y_{uo} V_o \quad (۶۰-۳)$$

۳-۲-۲- تخمین حالت بر اساس مینیمم واریانس [۲۰]

در این روش محل‌های اندازه‌گیری (از میان همه محل‌های ممکن) بر این اساس انتخاب می‌شوند که مقدار امید ریاضی جمع مربعات اختلاف میان مقدارهای تخمین زده شده و مقدارهای واقعی مینیمم شود. این مسأله بدین صورت نوشته می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{مینیمم نسبت به محل‌های اندازه‌گیری} \\ \text{Min} \{ E(\hat{I}_u - I_u)^2 \} \\ \hat{I}_u \end{array} \right\} \quad (۶۱-۳)$$

در این جا فرض می‌شود که $I = (I_u, I_o)$ دارای توزیع گوسی است. این فرض یک مدل ریاضی قابل حل را برای مسأله تخمین نتیجه می‌دهد. با فرض این که I توزیع گوسی دارد می‌توان ثابت کرد که V نیز مشترکاً گوسی است و می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} V_u \\ I_u \\ V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{uu} & Z_{uo} \\ I & 0 \\ Z_{ou} & Z_{oo} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_u \\ I_o \end{bmatrix} \quad (۶۲-۳)$$

اگر فرض کنیم که منابع هارمونیک در باس‌های مجزا ناهمبسته اند ماتریس واریانس احتمال وجود منابع هارمونیک قطری خواهد بود. بنابراین اطلاعات قبلی^۱ در مورد احتمال وجود منابع هارمونیک در هر باس می‌تواند به سادگی در یک چنین مدلی قرار داده شود:

$$\sigma^2 = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & \sigma_o^2 \end{bmatrix} \quad (۶۳-۳)$$

که σ_u و σ_o به ترتیب زیر ماتریس‌های قطری احتمال وجود منابع هارمونیک در باس‌های اندازه‌گیری نشده و اندازه‌گیری شده هستند. هرگونه دانش قبلی در تعیین مقادیر این ماتریس می‌تواند مفید باشد و بایستی منظور شود مثلاً اگر یک باس باری ندارد نمی‌تواند یک منبع هارمونیک باشد و یا اگر یک باس اکثراً از مصرف‌کننده‌های صنعتی تشکیل شده است به احتمال زیاد یک منبع هارمونیک است. با توجه به روابط (۵۷-۳) تا (۵۹-۳) داریم:

$$\text{COV} \begin{bmatrix} V_u \\ I_u \\ V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{uu}\sigma_u^2 & Z_{uo}\sigma_o^2 \\ \sigma_u^2 & 0 \\ Z_{ou}\sigma_u^2 & Z_{oo}\sigma_o^2 \\ 0 & \sigma_o^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{uu}^T & I & Z_{ou}^T & 0 \\ Z_{uo}^T & 0 & Z_{oo}^T & I \end{bmatrix} \quad (۶۴-۳)$$

رابطه (۶۴-۳) را می‌توان برحسب متغیرهای مورد نیاز مسأله مینیمم‌سازی به صورت زیر نوشت:

^۱ Priori Information

$$\text{cov} \begin{bmatrix} I_u \\ V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_u^2 Z_{ou}^T & 0 \\ Z_{ou} \sigma_u^2 & Z_{ou} \sigma_u^2 Z_{ou}^T + Z_{oo} \sigma_o^2 Z_{oo}^T & Z_{oo} \sigma_o^2 \\ 0 & \sigma_o^2 Z_{oo}^T & \sigma_o^2 \end{bmatrix} \quad (۶۵-۳)$$

کواریانس خطای تخمین با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\text{Cov}(\hat{I}_u - I_u) = \text{Var}(\hat{I}_u) - \text{Cov}(I_u, V_o I_o) \text{Var}(V_o I_o)^{-1} \text{Cov}(V_o I_o, I_u) \quad (۶۶-۳)$$

با بکار بردن روابط (۳-۵۷) تا (۳-۶۱) برای حل ماتریس کواریانس خطای شرطی بدست می‌آوریم:

$$\text{Cov}(\hat{I}_u - I_u) = \sigma_u^2 - \sigma_u^2 Z_{ou}^T (Z_{ou} \sigma_u^2 Z_{ou}^T)^{-1} Z_{ou} \sigma_u^2 \quad (۶۷-۳)$$

جمع عناصر روی قطر ماتریس کواریانس عدد مناسب خطا برای مینیمم‌سازی مسأله است. بخشی از ماتریس Z که باعث مینیمم شدن این معیار شود محل بهینه اندازه‌گیری‌ها را مشخص می‌کند. در یک سناریوی بدتر می‌توان ماکزیمم عنصر روی قطر ماتریس کواریانس را به جای جمع عناصر روی قطر به عنوان معیار مینیمم‌سازی برگزید. بهترین تخمین برای مسأله مینیمم واریانس از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\hat{I}_u = \sigma_u^2 Z_{ou}^T (Z_{ou} \sigma_u^2 Z_{ou}^T)^{-1} (V_o - Z_{oo} I_o) \quad (۶۸-۳)$$

۳-۳-۲-۳- تخمین حالت با استفاده از تجزیه مقدار ویژه

اگر $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$ ماتریس قطری مقادیر ویژه G که یک ماتریس مختلط است باشد، در نتیجه G را همواره می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$G = Y \Sigma U^H \quad (۶۹-۳)$$

این شکل تجزیه ماتریس به تجزیه مقدار ویژه SVD^۱ معروف است [۲۱]. از SVD می‌توان در حل مسأله

^۱ Singular Value Decomposition

تخمین حالت استفاده کرد. بسط معادلات در این حالت می‌تواند به صورت زیر باشد.

یک مدل ریاضی کلی که بردار اندازه‌گیری Z را به متغیر حالت X مربوط می‌کند را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد [۲۲]:

$$Z(h) = H(h)X(h) + E(h) \quad (۷۰-۳)$$

که $Z(h)$ بردار اندازه‌گیری، $H(h)$ ماتریس اندازه‌گیری، $X(h)$ بردار متغیر حالت که باید تخمین زده شود و $E(h)$ نویز اندازه‌گیری در هارمونیک مرتبه h است. متغیرهای حالت ولتاژ گره‌ها در نظر گرفته می‌شوند. نویز اندازه‌گیری بر قابل حل بودن این مسأله تأثیری ندارد و می‌توان آن را حذف کرد. الگوریتم پیشنهاد شده در هر دفعه فقط یک مرتبه هارمونیک را در نظر می‌گیرد و بنابراین متغیر مرتبه هارمونیک h در معادلات قبل می‌تواند حذف شود. مجموعه گره‌های سیستم به دو بخش باس بارهای غیرمنبع (V_{No}, I_{No}) و باس بارهای مشکوک به منبع هارمونیک (V_{Ns}, I_{Ns}) تقسیم می‌شوند. در نتیجه با توجه به رابطه ماتریس ادمیتانس سیستم با ولتاژ و جریان باس‌ها داریم:

$$\begin{bmatrix} I_{No} \\ I_{Ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NoNo} & \bar{Y}_{NoNs} \\ \bar{Y}_{NsNo} & \bar{Y}_{NsNs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{No} \\ V_{Ns} \end{bmatrix} \quad (۷۱-۳)$$

از آن‌جا که $V_{No}, I_{No}=0$ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$V_{No} = -\bar{Y}_{NoNo}^{-1} \bar{Y}_{NoNs} V_{Ns} \quad (۷۲-۳)$$

ماتریس اندازه‌گیری H نیز می‌تواند به دو بخش (H_{Ns}, H_{No}) تقسیم شود پس:

$$Z = \begin{bmatrix} H_{Ns} & H_{No} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ns} \\ V_{No} \end{bmatrix} \quad (۷۳-۳)$$

جایگزین کردن رابطه (۷۲-۳) در (۷۳-۳) نتیجه می‌دهد:

$$Z = \left[H_{Ns} + H_{No} \left(-\bar{Y}_{NoNo}^{-1} \bar{Y}_{NoNs} \right) \right] V_{Ns} \quad (74-3)$$

با محاسبه V_{Ns} از معکوس رابطه (۷۴-۳) می‌توان V_{No} را از (۷۲-۳) محاسبه کرد. یعنی همه متغیرهای حالت محاسبه شده‌اند. در حل مسأله تخمین به روش SVD ابتدا تجزیه مقدار ویژه ماتریس H به صورت $H = UWV^T$ نوشته می‌شود. سپس با توجه به رابطه $Z = HX$ و ضرب طرفین در H^T و استفاده از برخی روابط ماتریسی خواهیم داشت [۲۲]:

$$X = V(W^T W)^{-1} W^T U^T Z \quad (75-3)$$

از مزایای روش SVD این است که اگر سیستم به دلیل تغییرات پیش‌بینی نشده و یا خرابی سیستم‌های مخابراتی موقتاً مناطق مشاهده ناپذیری داشته باشد، می‌توان با در نظر گرفتن تنها مقادیر ویژه غیر صفر در ماتریس W پاسخ‌های درستی را برای قسمت‌های مشاهده‌پذیر سیستم بدست آورد. مثلاً اگر ماتریس H ، مقدار ویژه غیر صفر داشته باشد بایستی در رابطه (۷۵-۳)، فقط r ستون نخست ماتریس V و r سطر اول U را در نظر گرفت که در نتیجه جواب تنها برای قسمت‌هایی از سیستم که مشاهده‌پذیر است بدست می‌آید [۲۲].

۳-۲-۴- تخمین حالت با استفاده از فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یک تخمین‌گر بهینه است که برای سیستم‌های توصیف شده به شکل متغیر حالت مناسب است. با استفاده از فیلتر کالمن در حل مسأله تخمین حالت هارمونیک می‌توان حضور نویز در اندازه‌گیری‌ها را در نظر گرفت. همچنین بر خلاف روش‌های استاتیکی قبلی تخمین در این‌جا می‌تواند در حوزه زمان و دینامیکی باشد. بسط معادلات در حوزه زمان را می‌توان به صورت زیر نوشت: [۲۳]:

$$X_{k+1} = \phi_k X_k + W_k \quad (76-3)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (۷۷-۳)$$

که X بردار متغیرهای حالت، Z بردار اندازه‌گیری و W_K و V_K ماتریس‌های نویز حالت و نویز اندازه‌گیری هستند. ماتریس‌های کواریانس سیستم برای W_K و V_K عبارتند از:

$$E[W_k W_k^T] = Q_k, \quad E[V_k V_k^T] = R_k \quad (۷۸-۳)$$

با فرض $E[W_K] = 0$ و $E[V_K] = 0$ و نیز $E[X_{(0)}] = 0$ ماتریس کواریانس اولیه برابر است با:

$$P_0^- = E[(\hat{X} - \hat{X}_{(0)}) (\hat{X} - \hat{X}_{(0)})^T] = E[(\hat{X})(\hat{X})^T] = \sigma \quad (۷۹-۳)$$

ماتریس کواریانس اولیه به دانش قبلی ما در مورد احتمال وجود منابع هارمونیک و میانگین سطح بار در باس‌های مشخص بستگی دارد و فرض تقریبی ناهمبسته بودن تزریقات هارمونیک در باس‌های مجزا باعث می‌شود ماتریس کواریانس بالا قطری باشد.

مسئله در این جا به قرار زیر است. برای Z_0, Z_1, \dots, Z_k که بردار اندازه‌گیری و معلوم هستند، تخمین بهینه

\hat{X}_k چنان تعیین شود که P_k در رابطه زیر مینیمم باشد [۲۴]:

$$P_k = E[e_k e_k^*] \quad e_k = X_k - \hat{X}_k \quad (۸۰-۳)$$

می‌توان نشان داد بهره فیلتر کالمن به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (۸۱-۳)$$

تخمین جاری متغیرهای حالت با استفاده از فیلتر کالمن نیز برابر است با:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_k^-) \quad (۸۲-۳)$$

به طوری که

$$P_{k+1}^- = \phi_k P_k \phi_k^T + Q_k, \quad \hat{X}_{k+1}^- = \phi_k \hat{X}_k \quad (۸۳-۳)$$

ست محل‌های اندازه‌گیری بهینه نیز می‌تواند با در نظر گرفتن ست‌های مختلف محل‌های اندازه‌گیری و انتخاب مجموعه‌ای که مقدار مینیمم را برای trace ماتریس P_K نتیجه دهد تعیین شود [۲۳].

۳-۲-۵- تخمین حالت با استفاده از شبکه عصبی [۱۹]

شبکه عصبی به خاطر توانایی‌اش در تشخیص الگوهای ورودی- خروجی غیرخطی و پیچیده با روش‌های شناسایی الگوی سنتی متفاوت است و در موردی که یک رابطه تابعی ورودی- خروجی دقیق به سادگی بدست نمی‌آید بکار می‌رود. از شبکه‌های عصبی می‌توان برای فراهم نمودن تخمین‌های اولیه‌ای از محل منابع هارمونیک در یک سیستم قدرت استفاده کرد. تخمین‌های اولیه اغلب به عنوان شبه اندازه‌گیری‌هایی برای تخمین حالت هارمونیک‌ها استفاده می‌شوند که در نتیجه آن امکان تخمین درست محل منابع هارمونیک با تعداد نسبتاً کمی ابزارهای اندازه‌گیری فراهم می‌شود. یک بسط ساده برای معادلات تخمین حالت که نحوه کاربرد اطلاعات حاصل از شبکه عصبی را برای حل مسأله تخمین نشان می‌دهد در زیر آمده است:

اگر امپدانس‌های هارمونیک سیستم معلوم باشند، اندازه‌گیری‌های جریان در هر مرتبه هارمونیک را می‌توان در رابطه زیر قرار داد:

$$i_{hm} = A_h i_h + s_h \quad (۸۴-۳)$$

که i_{hm} بردار اندازه‌گیری و شبه اندازه‌گیری جریان با مرتبه m و i_h بردار جریان‌های باس غیر صفر با مرتبه n ، A_h ماتریس اندازه‌گیری با مرتبه $(m \times n)$ و s_h بردار نویز اندازه‌گیری است. با فرض انتخاب بهینه محل-های اندازه‌گیری و نیز فرض $m > n$ معادله (۳-۷۹) می‌تواند به روش حداقل مربعات حل شود. در نتیجه i_h برابر است با:

$$i_h = (A_h^T R_h^{-1} A_h)^{-1} A_h^T R_h^{-1} i_{hm} \quad (۸۵-۳)$$

و ماتریس‌های کواریانس تخمین حالت و نویز به ترتیب از چپ به راست برابرند با:

$$P_{i_h} = (A_h^T R_h^{-1} A_h)^{-1}, R_h = E[s_h s_h^T] \quad (۸۶-۳)$$

که R_h یک ماتریس $(m \times m)$ است. اگر اندازه‌گیری‌ها مستقل باشند، در نتیجه R_h یک ماتریس قطری با درایه‌های زیر است:

$$R_{ii} = \sigma_i^2 \quad (۸۷-۳)$$

σ_i انحراف معیار نویز است که میزان درجه اطمینان در اندازه‌گیری i ام را بیان می‌کند. به عنوان مثال داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های واقعی انحراف معیاری حدود ۱٪ مقدار کامل را دارند، در حالی که شبه اندازه‌گیری‌ها بسته به دقتشان ممکن است انحراف معیاری حدود ۱۰٪ تا ۷۰٪ بالاترین مقدار را داشته باشند. عناصر قطری P_{i_h} در رابطه (۸۶-۳) واریانس خطا بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده می‌باشند.

۳-۳-۳- شناسایی منابع هارمونیک با استفاده از آنالیز مؤلفه مستقل

تکنیک‌های مختلف تخمین حالت هارمونیک به دانش مفصل و دقیق توپولوژی و پارامترهای شبکه و معلوم بودن تمام یا بخشی از ماتریس ادمیتانس یا امپدانس سیستم در مرتبه‌های هارمونیک مختلف نیاز دارند و دقیق نبودن مدل سیستم و دانش ناکافی در مورد پارامترهای شبکه می‌تواند منجر به خطاهای بزرگ در نتایج آن‌ها شود. بنابراین تخمین منابع هارمونیک بدون نیاز به دانستن پارامترها و توپولوژی

شبکه امر مطلوبی است. آنالیز مؤلفه مستقل ICA^۱ قادر به تخمین محل منابع هارمونیک با فرض استقلال بین سیگنال‌های منابع هارمونیک است [۲۵].

۳-۳-۱- معرفی ICA

فرض کنید $s(t)$ ماتریس $N \times T$ حاوی سیگنال‌های منابع هارمونیک و $x(t)$ ماتریس $M \times T$ سیگنال‌های اندازه‌گیری شده یا مشاهده شده باشد. رابطه بین $s(t)$ و $x(t)$ به صورت زیر می‌تواند بیان شود [۲۵]:

$$x(t) = As(t) \quad (۸۸-۳)$$

که A ماتریس mixing با مرتبه $M \times N$ است. مسأله در این جا بازیابی بردار منبع $s(t)$ تنها با استفاده از داده‌های مشاهده شده $x(t)$ و با فرض استقلال بین درایه‌های بردار $s(t)$ و احتمالاً بعضی اطلاعات قبلی در مورد توزیع منابع است. در واقع هدف در این جا محاسبه ماتریس B در رابطه زیر است:

$$y(t) = Bx(t) \quad (۸۹-۳)$$

در رابطه (۸۹-۳) $y(t)$ تخمینی از بردار سیگنال‌های منابع است. ماتریس B ماتریس جداساز^۲ نامیده می‌شود. اکنون آنالیز مؤلفه مستقل ICA را می‌توان به اختصار به صورت زیر معرفی کرد:

آنالیز مؤلفه مستقل یا ICA بردار تصادفی x عبارت از پیدا کردن یک تبدیل خطی $s=Ax$ است به طوری که مولفه‌های s_i تا آن جا که ممکن است مستقل باشند، یعنی تابع $F(s_1, s_2, \dots, s_n)$ که استقلال بین مولفه‌های بردار s را اندازه می‌گیرد ماکزیمم شود. بنابراین از ICA می‌توان برای حل مسأله بیان شده در رابطه (۸۸-۳) که در حقیقت همان یافتن $y(t)$ در رابطه (۸۹-۳) است استفاده کرد. برای حل مسأله با استفاده از آنالیز مؤلفه مستقل فرضیات زیر بایستی برقرار باشند [۲۶]:

^۱ Independent Component Analysis

^۲ Separating Matrix

(۱) سیگنال‌های منابع $s(t_i)$ به طور آماری مستقلند.

(۲) حداکثر یکی از سیگنال‌های منابع توزیع گوسی دارد.

(۳) تعداد مشاهدات M بزرگ‌تر یا مساوی تعداد منابع N است. ($M \geq N$)

۳-۳-۲- پیش پردازش‌ها [۲۵]

الگوریتم‌های مختلفی بر اساس آنالیز مؤلفه مستقل را می‌توان برای تخمین منابع هارمونیک بکار برد. اما اگر قبل از بکار بردن یک الگوریتم بعضی پیش‌پردازش‌ها انجام شوند معمولاً خیلی مفید است. پیش-پردازش‌هایی که باعث می‌شود مسأله تخمین ساده‌تر و بهتر حل شود عبارتند از:

(۱) متمرکزسازی^۱: اساسی‌ترین و لازم‌ترین پیش‌پردازش متمرکز کردن x است یعنی آن را از میانگینش $m=E(x)$ کم کنیم به طوری که x یک متغیر با میانگین صفر شود. این عمل تنها برای سادگی الگوریتم ICA بکار می‌رود و به معنی این نیست که نمی‌توان میانگین را تخمین زد. بعد از تخمین ماتریس mixing با داده‌های متمرکز شده، می‌توان تخمین را با اضافه کردن بردار میانگین s به تخمین‌های متمرکز آن کامل کرد. میانگین بردار s از $A^{-1}m$ بدست می‌آید که m بردار میانگین x است که در پیش‌پردازش از آن کم شده بود.

(۲) سفیدسازی^۲: پیش‌پردازش مفید دیگر در ICA سفیدسازی متغیرهای مشاهده شده است، یعنی قبل از بکار بردن الگوریتم ICA (و بعد از متمرکزسازی) بردار مشاهدات x با یک تبدیل خطی به بردار جدید \bar{x} تبدیل می‌شود که سفید است یعنی مولفه‌های آن ناهمبسته هستند و واریانس آن‌ها واحد است. به عبارت دیگر کواریانس ماتریس \bar{x} ماتریس واحد خواهد بود.

¹ Centering

² Whitening

$$E\{\tilde{\mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}}^T\} = \mathbf{I} \quad (۹۰-۳)$$

۳-۳-۳-۳- مشخصات آماری بارها [۲۵]

پروفایل بارهای الکتریکی از دو بخش تشکیل شده است: (۱) مؤلفه با تغییرات آرام و (۲) مؤلفه با تغییرات سریع. مؤلفه اول تغییرات بارها را وابسته به دما، شرایط آب و هوایی، روزهای هفته، ساعات روز و غیره نشان می‌دهد. مؤلفه دوم می‌تواند به صورت یک فرایند تصادفی که تغییرات موقتی را نشان می‌دهد مدل شود. به طور کلی بارهای الکتریکی به دلیل وجود مؤلفه اول که تغییرات آرام دارد از لحاظ آماری مستقل نیستند. این وابستگی می‌تواند با بکار بردن یک فیلتر خطی برای داده‌های مشاهده شده از میان برداشته شود. در نتیجه این عمل فیلتر کردن بخشی که دارای تغییرات آرام است حذف می‌شود و مؤلفه با تغییرات سریع باقی می‌ماند. فرض می‌شود که این مؤلفه‌های با تغییرات سریع از لحاظ آماری مستقلند و توزیع غیرگوسی دارند. بنابراین ICA می‌تواند برای قسمتی که تغییرات سریع دارد بکار گرفته شود.

۳-۳-۳-۴- تخمین بارهای هارمونیک [۲۵]

در تخمین به وسیله ICA ممکن است برخی نامعلومی‌ها وجود داشته باشد. در مورد تخمین منابع هارمونیک این نامعلومی به مقادیر فازها مربوط می‌شود و بدون یک دانش قبلی فازهای منابع تخمین زده شده مجهول خواهد بود. اگر بعضی اطلاعات قبلی در مورد منابع هارمونیک موجود باشد این نامعلومی می‌تواند برطرف شود. منطقی است که فرض کنیم در سیستم‌های قدرت الکتریکی بعضی داده‌های بارها که مربوط به گذشته هستند در دسترس‌اند که می‌توان از آن‌ها برای تطبیق منابع تخمین زده شده و منابع اصلی استفاده کرد. همچنین فرض می‌شود که مقدار پیک بارها را داریم که می‌تواند برای مقیاس پروفایل بارها بکار رود. الگوریتم شناسایی منابع هارمونیک با فرض برابر بودن تعداد مشاهدات و تعداد منابع ($M=N$) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱) استفاده از یک فیلتر خطی برای بدست آوردن مولفه‌های با تغییرات سریع (fast-varying) بردار اندازه‌گیری
- ۲) متمرکزسازی و سفیدسازی داده‌های اندازه‌گیری
- ۳) بکار بردن یک الگوریتم بر اساس ICA برای مولفه‌های fast-varying
- ۴) بدست آوردن تخمین‌های منابع جریان در فرکانس هارمونیکی مرتبه h
- ۵) اجرای گام‌های ۱ تا ۴ برای هارمونیک‌های موردنظر
- ۶) مقیاس‌گذاری دوباره منابع تخمین زده شده با استفاده از داده‌های گذشته

فصل چهارم

روش پیشنهادی برای تشخیص

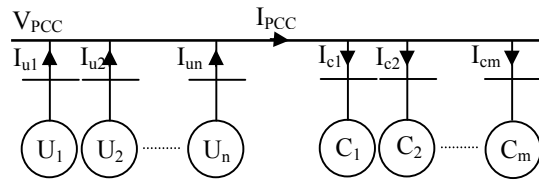
چندین منبع هارمونیک

۴-۱- مقدمه

در همه روش‌های تک‌نقطه که در فصل پیش به آن‌ها پرداختیم یک طرف نقطه سنجش به عنوان تولیدکننده و طرف دیگر به عنوان مصرف‌کننده در نظر گرفته شده و یکی از این دو، منبع غالب برای هارمونیک‌های PCC تشخیص داده می‌شود. با این که اجرای این روش‌ها از لحاظ عملی به مراتب از روش‌های چندنقطه آسان‌تر است اما استفاده از آن‌ها اطلاعات چندانی در مورد وضعیت هارمونیک سیستم بدست نمی‌دهد و تنها یکی از طرفین نقطه اندازه‌گیری منبع غالب تشخیص داده می‌شود. در این فصل ابتدا با بسط روش انطباق که یک روش تک‌نقطه است و در فصل پیش به آن پرداخته شد مشارکت‌های هارمونیک در یک سیستم چند تولیدکننده - چند مصرف‌کننده بدست آورده می‌شود. یعنی این امکان فراهم می‌شود که بتوان منابع غالب هارمونیک را از بین چندین شاخه متصل به محل اندازه‌گیری شناسایی کرد. سپس برای هر شاخه متصل به فیدر امپدانس مرجع نورتن و تونن معرفی می‌شود که با استفاده از این امپدانس‌ها می‌توان مشارکت هر شاخه در هارمونیک‌های فیدر را چه به دلیل وجود منبع هارمونیک در آن و چه به دلیل اتصال بانک خازنی و وقوع رزونانس احتمالی در آن بدست آورد.

۴-۲- محاسبه مشارکت‌های هارمونیک

روش پیشنهاد شده یک روش تک‌نقطه است و بر مبنای اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان صورت گرفته در فیدر یک سیستم توزیع است. با استفاده از این روش می‌توان مشارکت‌های هارمونیک را در سیستم‌های چند تولیدکننده-چند مصرف‌کننده تعیین کرد. برای این کار با تعمیم روش انطباق از معادل نورتن و تونن شاخه‌های متصل به فیدر استفاده می‌شود. در نتیجه بایستی امپدانس معادل شاخه‌ها را تعیین کرد. در این بخش ابتدا مورد امپدانس ثابت در نظر گرفته می‌شود که در آن فرض می‌شود امپدانس معادل

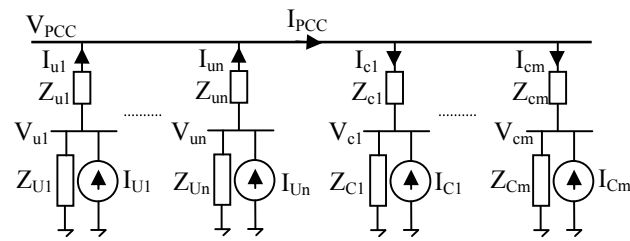


شکل (۴-۱) یک فیدر سیستم توزیع

شاخه‌ها ثابت است و تاثیر هر شاخه در هارمونیک‌های فیدر تنها مربوط به منبع جریان نورتن و یا منبع ولتاژ تونن هر شاخه است. سپس در حالت کلی تر تغییرات امپدانس شاخه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. در این حالت تاثیر یک شاخه در میزان هارمونیک‌ها نه صرفاً به دلیل منبع جریان و یا منبع ولتاژ معادل آن بلکه ممکن است به دلیل تغییرات امپدانس معادل آن از یک مقدار مرجع باشد. روشی نیز برای تعیین امپدانس مرجع هر شاخه بیان می‌شود.

۴-۲-۱- حالت استفاده از امپدانس واقعی

فیدر PCC در شکل (۴-۱) را در نظر بگیرید. این فیدر از چند تولیدکننده تغذیه شده و چندین مصرف‌کننده را تغذیه می‌کند. هر کدام از تولیدکننده‌ها ($U_i, i=1,2,\dots,n$) می‌تواند یک شبکه اصلی و یا یک شبکه محلی باشد. هر کدام از مصرف‌کننده‌ها ($C_j, j=1,2,\dots,m$) نیز می‌تواند نماینده یک دسته بار باشد که از طریق یک خط یا ترانس متصل به PCC تغذیه می‌شوند و یا باری باشد که مستقیماً از خود فیدر تغذیه می‌شود. با اندازه‌گیری ولتاژ فیدر و جریان خطوط و ترانس‌های متصل به آن، ولتاژ هارمونیکی فیدر V_{PCC} و $I_{ui}, i=1,2,\dots,n$ و $I_{cj}, j=1,2,\dots,m$ جریان هارمونیکی خطوط و ترانس‌های متصل به آن، در هر مرتبه هارمونیکی مورد نظر بدست می‌آید. برای بدست آوردن مشارکت‌های جریان و ولتاژ هارمونیکی هر کدام از شاخه‌ها به ترتیب با معادل نورتن و تونن خود جایگزین می‌شوند. در نتیجه بایستی امپدانس معادل شاخه‌ها معلوم باشند. در این قسمت فرض می‌شود این امپدانس‌ها ثابت و معلوم هستند و مقدار واقعی امپدانس شاخه‌ها بکار برده می‌شود. طبق روش انطباق هارمونیک‌های ولتاژ و جریان جداگانه در نظر



شکل (۲-۴) مدار معادل نورتن همه شاخه‌ها در PCC

گرفته می‌شوند.

۴-۲-۱-۱- هارمونیک جریان

در این مورد هر کدام از شاخه‌ها با معادل نورتن خود جایگزین می‌شوند. در شکل (۲-۴) $Z_{ui} \ i=1,2,\dots,n$ امپدانس خط و یا ترانسفورماتوری است که تولیدکننده U_i از طریق آن به فیدر متصل است و $Z_{cj} \ j=1,2,\dots,m$ کمیت متناظر مصرف‌کننده C_j است. اگر باری مستقیماً به این فیدر متصل شده باشد امپدانس متناظر برای آن برابر صفر خواهد بود. اگر این امپدانس‌ها معلوم فرض شوند، می‌توان ولتاژهای $V_{ui} \ i=1,2,\dots,n$ و $V_{cj} \ j=1,2,\dots,m$ در باس‌های نشان داده شده در شکل (۲-۴) را بدست آورد. توجه کنید که همه مقادیر بایستی برحسب پریونیت یا مقادیر مبنای محل فیدر محاسبه شوند.

$$V_{ui} = V_{PCC} + Z_{ui} I_{ui} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-4)$$

$$V_{cj} = V_{PCC} - Z_{cj} I_{cj} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2-4)$$

Z_{ui} امپدانس معادل تولیدکننده U_i و Z_{cj} کمیت متناظر مصرف‌کننده C_j است. همان‌طور که گفته شد در این قسمت فرض می‌شود این امپدانس‌ها ثابت و معلوم هستند. در نتیجه می‌توان I_{ui} و I_{cj} که به ترتیب منابع جریان هارمونیک تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j هستند را بدست آورد:

$$I_{ui} = V_{ui} / Z_{ui} + I_{ui} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-4)$$

$$I_{Cj} = V_{cj} / Z_{cj} - I_{cj} \quad j=1,2,\dots,m \quad (۴-۴)$$

هارمونیک جریان اندازه‌گیری شده در محل فیدر IPCC از مشارکت تمام شاخه‌ها در آن بدست آمده است. اگر IPCC و نیز منابع جریان هارمونیک شاخه‌ها که کمیت‌های فازوری هستند به صورت برداری در نظر شوند می‌توان با استفاده از اصل جمع آثار سهم منابع جریان هر یک از تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها را در IPCC بدست آورد. یعنی برای بدست آوردن مشارکت فازوری منبع جریان هر شاخه، منابع جریان سایر شاخه‌ها مدار باز و با تقسیم جریان مشارکت‌ها بدست می‌آیند که در زیر آمده است:

$$I_{UPi} = \frac{Z_{Ui} \times Z_{UPi}}{(Z_{UPi} \parallel Z_{CQj} + Z_{ui} + Z_{Ui}) \times (Z_{UPi} + Z_{CQj})} \times I_{Ui} \quad (۵-۴)$$

$$I_{CPj} = - \frac{Z_{Cj} \times Z_{CPj}}{(Z_{CPj} \parallel Z_{UQi} + Z_{cj} + Z_{Cj}) \times (Z_{CPj} + Z_{UQi})} \times I_{Cj} \quad (۶-۴)$$

به طوری که

$$Z_{UPi} = 1 / \sum_{k=1, \neq i}^n 1 / (Z_{uk} + Z_{Uk}) \quad (۷-۴)$$

$$Z_{CPj} = 1 / \sum_{l=1, \neq j}^m 1 / (Z_{cl} + Z_{Cl}) \quad (۸-۴)$$

$$Z_{UQi} = Z_{UPi} \parallel (Z_{ui} + Z_{Ui}) \quad (۹-۴)$$

$$Z_{CQj} = Z_{CPj} \parallel (Z_{cj} + Z_{Cj}) \quad (۱۰-۴)$$

از روابط (۵-۴) و (۶-۴) دو کمیت برداری بدست می‌آیند که به ترتیب مشارکت فازوری تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j را در هارمونیک جریان فیدر بدست می‌دهند. جمع برداری مشارکت فازوری همه شاخه‌ها برابر IPCC خواهد بود. ممکن است به نظر برسد که I_{UPi} و I_{CPj} که از روابط (۵-۴) و (۶-۴) بدست می‌آیند معیار مناسبی برای مقایسه میزان مشارکت شاخه‌ها و تعیین شاخه‌هایی که مشارکت غالب دارند باشند.

اما این کمیت‌ها فازوری‌اند و مقایسه میان آن‌ها بعضی ابهامات را در پی خواهد داشت. اگر بردار مشارکت مربوط به هر شاخه بروی I_{PCC} تصویر شود یک کمیت اسکالر بدست می‌آید. مقدار این مولفه اسکالر برای تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j به ترتیب در روابط (۴-۱۱) و (۴-۱۲) آمده است.

$$I_{USi} = |I_{UPi}| \cos(\varphi_{UPi} - \varphi_{PCC}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-11)$$

$$I_{CSj} = |I_{CPj}| \cos(\varphi_{CPj} - \varphi_{PCC}) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4-12)$$

که φ_{UPi} ، φ_{CPj} و φ_{PCC} آرگومان بردارهای I_{UPi} ، I_{CPj} و I_{PCC} هستند. جمع مشارکت اسکالر همه شاخه‌ها مقدار عددی I_{PCC} را بدست می‌دهد. این مقادیر عددی معیار مناسبی برای مقایسه میزان مشارکت‌های شاخه‌ها در هارمونیک‌های PCC هستند.

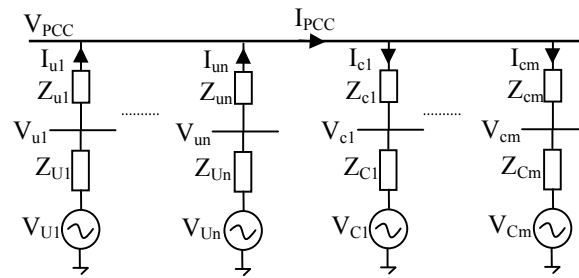
۴-۲-۱-۲-۴- هارمونیک ولتاژ

در مورد هارمونیک ولتاژ هر شاخه با معادل تونن خود جایگزین می‌شود. در شکل (۴-۳) V_{Ui} $i=1,2,\dots,n$ و V_{Cj} $j=1,2,\dots,m$ به ترتیب منابع ولتاژ هارمونیک تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j هستند. با توجه به فرض معلوم بودن امپدانس‌های معادل شاخه‌ها این منابع از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$V_{Ui} = V_{ui} + Z_{Ui} I_{ui} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-13)$$

$$V_{Cj} = V_{cj} - Z_{Cj} I_{cj} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4-14)$$

ولتاژ هارمونیک فیدر V_{PCC} از مشارکت تمام شاخه‌ها در هارمونیک‌های فیدر بدست آمده است. مشابه مورد هارمونیک جریان می‌توان کمیت‌های فازوری V_{PCC} و منابع ولتاژ هارمونیک شاخه‌ها را به صورت برداری در نظر گرفت. سپس با استفاده از اصل جمع آثار سهم هر منبع در هارمونیک ولتاژ در هر مرتبه خاص بدست آورده می‌شود. بدین منظور برای تعیین سهم برداری هر منبع سایر منابع ولتاژ اتصال کوتاه و



شکل (۳-۴) مدار معادل تونن همه شاخه‌ها در PCC

با تقسیم ولتاژ مشارکت آن شاخه بدست می‌آید. این کمیت به ترتیب برای تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده

C_j از روابط زیر بدست می‌آید:

$$V_{UPi} = \frac{Z_{UPi} \parallel Z_{CQj}}{Z_{UPi} \parallel Z_{CQj} + Z_{Ui} + Z_{Uj}} \times V_{Ui} \quad (15-4)$$

$$V_{CPj} = \frac{Z_{CPj} \parallel Z_{UQi}}{Z_{CPj} \parallel Z_{UQi} + Z_{Cj} + Z_{Cj}} \times V_{Cj} \quad (16-4)$$

که Z_{UPi} ، Z_{CPj} ، Z_{UQi} و Z_{CQj} از روابط (۷-۴) تا (۱۰-۴) بدست می‌آیند. جمع برداری مشارکت همه شاخه‌ها در یک مرتبه خاص هارمونیک ولتاژ فیدر در آن مرتبه را بدست می‌دهد. در این مورد نیز با تصویر بردار مشارکت مربوط به هر شاخه بروی V_{PCC} یک کمیت اسکالر بدست می‌آید که از آن می‌توان برای مقایسه میزان مشارکت‌های شاخه‌ها در هارمونیک ولتاژ فیدر بهره جست. این کمیت برای تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{USi} = |V_{UPi}| \cos(\delta_{UPi} - \delta_{PCC}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17-4)$$

$$V_{CSj} = |V_{CPj}| \cos(\delta_{CPj} - \delta_{PCC}) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (18-4)$$

که δ_{UPi} ، δ_{CPj} و δ_{PCC} آرگومان بردارهای V_{UPi} ، V_{CPj} و V_{PCC} هستند. کمیت‌های V_{USi} و V_{CSj} هم میزان مشارکت اسکالر تولیدکننده U_i و مصرف‌کننده C_j را در هارمونیک ولتاژ PCC مشخص می‌کنند.

مقایسه مقادیر عددی مشارکت‌ها، شاخه‌های دارای منابع غالب برای هارمونیک ولتاژ را مشخص می‌کند. مقدار مشارکت اسکالر بدست آمده برای هر شاخه، چه در مورد هارمونیک جریان و چه در مورد هارمونیک ولتاژ، می‌تواند یک کمیت مثبت و یا منفی باشد. در واقع مولفه با علامت منفی از هارمونیک PCC در آن مرتبه می‌کاهد [۱۱]. اگر هدف مشخص کردن شاخه‌هایی است که منابع هارمونیک غالب در آن‌ها قرار دارند بایستی شاخه‌هایی را در نظر گرفت که میزان تاثیر آن‌ها در یک مرتبه هارمونیک بدون توجه به علامت آن از لحاظ مقداری بزرگ است. اگر یک شاخه دارای منبع غالب هارمونیک باشد مقدار قدرمطلق مشارکت مربوط به آن در مقایسه با سایر شاخه‌ها بزرگ است. البته در مورد استفاده از امپدانس‌های مرجع که تاثیر اتصال بانک خازنی نیز در میزان هارمونیک‌ها محاسبه می‌شود مقدار منفی بدست آمده برای مشارکت یک شاخه می‌تواند به دلیل وجود منبع هارمونیک در شاخه و یا اثر کم‌کنندگی میزان هارمونیک‌ها توسط بانک خازنی باشد.

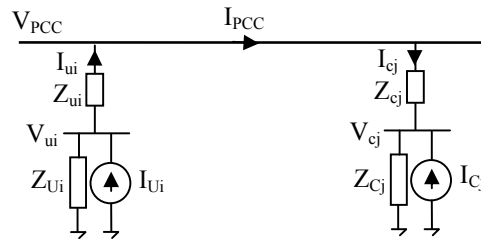
۴-۲-۲- حالت استفاده از امپدانس مرجع

در بخش پیش با بسط روش انطباق دو کمیت اسکالر برای هر شاخه متصل به یک فیدر بدست آورده شد که میزان مشارکت آن را در هارمونیک ولتاژ و جریان فیدر مشخص می‌کند. با مقایسه میان این کمیت‌ها می‌توان شاخه‌هایی که سهم غالب را در هارمونیک ولتاژ و جریان PCC دارند مشخص نمود. البته در بخش پیش امپدانس معادل شاخه‌ها ثابت فرض شد و تنها تاثیر منابع ولتاژ یا جریان هر شاخه در میزان هارمونیک‌ها در نظر گرفته شد. اما بایستی در نظر داشت که تغییر امپدانس یک شاخه نیز می‌تواند در میزان هارمونیک‌های نقطه اندازه‌گیری تاثیرگذار باشد. به عنوان مثال فرض کنید در یکی از شاخه‌ها اتصال یک بانک خازنی منجر به وقوع رزونانس موازی در نزدیکی یک مرتبه هارمونیک شده باشد. در نتیجه این رزونانس امپدانس دیده شده از فیدر زیاد شده و به تبع آن هارمونیک ولتاژ در آن مرتبه خاص

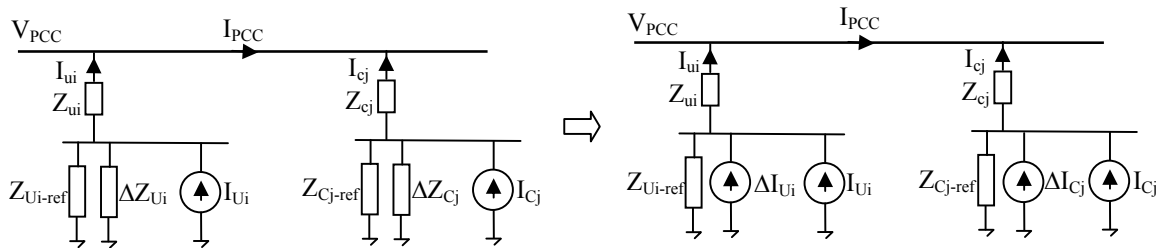
افزایش می‌یابد. پس می‌توان گفت این شاخه را نیز بایستی در افزایش هارمونیک‌های PCC مقصر قلمداد کرد. اما تاثیر این شاخه بدلیل تغییر امپدانس معادل آن ناشی از اتصال بانک خازنی است. پس بایستی تغییر امپدانس شاخه‌ها را نیز در فرایند شناسایی در نظر گرفت. اگر در مورد این مثال مشارکت شاخه‌ها از روش بیان شده در بخش ۴-۲-۱ با استفاده از امپدانس واقعی شاخه‌ها محاسبه شود، تاثیر تغییر امپدانس ناشی از رزونانس موازی در میزان هارمونیک‌ها در محاسبه مشارکت‌های هارمونیک‌ها وارد نخواهد شد. برای رفع این مشکل می‌توان برای هر شاخه در هر مرتبه هارمونیک‌ها امپدانس مرجع تعیین نمود و میزان تغییر امپدانس واقعی شاخه از این مقدار مرجع را در محاسبه مشارکت‌ها منظور کرد. برای توضیح بیشتر این مطلب هارمونیک جریان و ولتاژ را بایستی جداگانه در نظر گرفت.

۴-۲-۲-۱- هارمونیک جریان

در مورد هارمونیک جریان شکل (۴-۴) را در نظر بگیرید که در آن از میان شاخه‌های متصل به فیدر یک تولیدکننده و یک مصرف‌کننده با معادل نورتن آن‌ها در یک مرتبه هارمونیک‌ها خاص نشان داده شده‌اند. فرض کنید که برای هر شاخه یک امپدانس مرجع در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۴-۵) تغییرات امپدانس شاخه از این مقدار مرجع به صورت یک شاخه موازی با آن نشان داده شده است. سپس این شاخه موازی به منبع جریان معادل تبدیل شده و با منبع معادل هر شاخه ترکیب می‌شود. در نتیجه با تعیین امپدانس مرجع برای هر شاخه منبع جریان معادل جدید برای آن بدست می‌آید. پس برای در نظر گرفتن تغییرات امپدانس شاخه در تعیین مشارکت آن در میزان هارمونیک‌ها کافی است که به جای امپدانس معادل شاخه‌ها در تمامی روابط حالت امپدانس واقعی در بخش ۴-۲-۱ امپدانس مرجع آن‌ها را قرار دهیم. در نتیجه در منبع جریان بدست آمده برای هر شاخه از رابطه (۴-۳) یا (۴-۴) تغییرات امپدانس آن نیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مشارکت بدست آمده برای شاخه در هارمونیک جریان نیز



شکل (۴-۴) معادل نورتن یک تولیدکننده و یک مصرف‌کننده در PCC

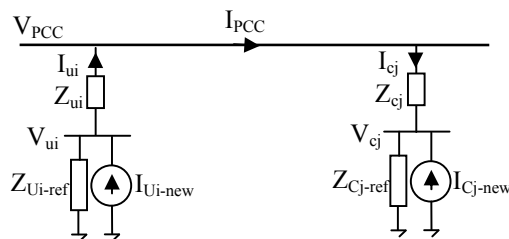


شکل (۵-۴) تبدیل تغییرات امپدانس شاخه از مقدار مرجع به منبع جریان معادل

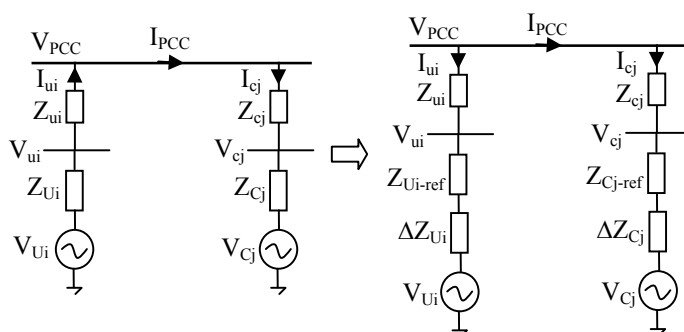
تغییرات امپدانس آن را در بر می‌گیرد.

۴-۲-۲-۲-۴- هارمونیک ولتاژ

در مورد هارمونیک ولتاژ شکل (۷-۴) که در آن دو شاخه متصل به فیدر با معادل تونن آن‌ها نشان داده شده‌اند را در نظر بگیرید. در این حالت امپدانس معادل شاخه به صورت ترکیب سری امپدانس مرجع و تغییرات امپدانس از مقدار مرجع نشان داده می‌شود. تغییرات امپدانس به منبع ولتاژ معادل با آن تبدیل شده و با منبع ولتاژ هارمونیک شاخه ترکیب می‌شود. بنابراین با تعیین امپدانس مرجع برای هر شاخه منبع ولتاژ هارمونیک جدید برای آن بدست می‌آید که تغییرات امپدانس شاخه از مقدار مرجع نیز



شکل (۶-۴) امپدانس مرجع شاخه‌ها به همراه منبع جریان جدید معادل

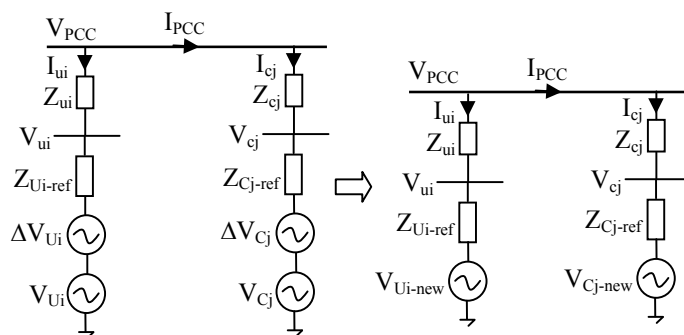


شکل (۷-۴) تجزیه امپدانس شاخه به دو امپدانس مرجع و تغییرات امپدانس از مقدار مرجع

در آن در نظر گرفته شده است. در نتیجه اگر در تمامی روابط حالت امپدانس واقعی برای هارمونیک ولتاژ، به جای امپدانس واقعی شاخه‌ها امپدانس مرجع آن‌ها را قرار دهیم، در منبع ولتاژ بدست آمده برای هر شاخه تغییرات امپدانس شاخه از مقدار مرجع نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین مشارکت بدست آمده از رابطه (۱۷-۴) یا (۱۸-۴) برای شاخه تغییرات امپدانس آن را نیز در نظر گرفته است.

۴-۳- تعیین امپدانس مرجع برای هر شاخه

در بخش پیش گفته شد که برای در نظر گرفتن تغییرات امپدانس در محاسبه مشارکت‌های هارمونیکی بایستی برای هر شاخه امپدانس مرجع تعیین نمود و از این امپدانس‌های مرجع در روابط بیان شده برای روش پیشنهاد شده در بخش ۴-۲-۱ استفاده کرد. در این بخش روشی برای تعیین امپدانس مرجع هر



شکل (۸-۴) تبدیل تغییرات امپدانس به منبع ولتاژ معادل

شاخه ارائه می‌شود. برای تعیین این امپدانس ابتدا بایستی مدلی برای هر کدام از المان‌های شاخه‌ها بیان شود که برای کار تعیین مشارکت‌های هارمونیک مناسب باشد. مدل ارائه شده در این بخش برای المان‌های سیستم به گونه‌ای است که می‌توان امپدانس مرجع شاخه‌ها در هر مرتبه هارمونیک را با استفاده از داده‌های مربوط به ولتاژ و جریان بارها در فرکانس اصلی و مقادیر نامی سایر المان‌های موجود در آن شاخه بدست آورد. بسته به این که هارمونیک جریان و یا ولتاژ مدنظر باشد به ترتیب امپدانس مرجع نورتن و یا تونن برای هر شاخه تعریف می‌شود. این تفاوت مقدار امپدانس برای هر شاخه در دو حالت هارمونیک ولتاژ و جریان به امپدانس تعیین شده برای بارها بر می‌گردد. در زیر ابتدا برای بارها و سپس برای سایر المان‌های سیستم امپدانس مرجع تعیین می‌شود و بعد از آن امپدانس‌های مرجع مربوط به یک شاخه معرفی می‌شوند.

۴-۳-۱- امپدانس مرجع بارها

برای تعیین امپدانس مرجع بارها از روش بیان شده در روش انطباق با امپدانس‌های مرجع در بخش ۳-۲-۳ فصل ۳ پیش استفاده می‌شود. همان‌طور که در بحث‌های مربوط به ضریب توان و توان راکتیو مصرفی بارها از مصرف‌کننده انتظار می‌رود در فرکانس اصلی یک امپدانس مقاومتی خالص (یعنی ضریب توان ۱) از خود نشان دهد، در این روش این موضوع به همه مرتبه‌های هارمونیک بسط داده می‌شود و انتظار این است که بار در مرتبه‌های مختلف یک امپدانس مقاومتی از خود نشان دهد [۱۱]، [۱۲]. بر این اساس امپدانس مرجع بارها به صورت یک مقاومت تعریف شده در فرکانس اصلی تعیین می‌شود. تعیین این مدل به مقادیر فرکانس اصلی بار نیاز دارد که معمولاً در دسترس هستند. مقدار این مقاومت بسته به این که هارمونیک ولتاژ و یا جریان در نظر گرفته شود متفاوت است.

۴-۳-۱-۱- هارمونیک جریان

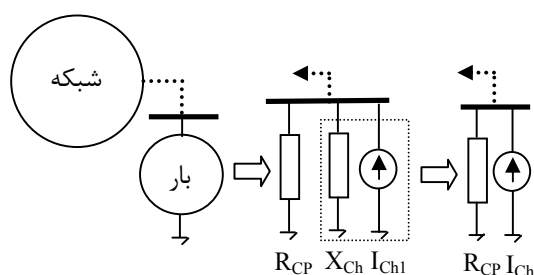
شکل (۹-۴) را در نظر بگیرید که در آن یک بار متصل به شبکه نشان داده شده است. برای تعیین امپدانس مرجع بار در مورد هارمونیک جریان ابتدا معادل نورتن آن را از دید شبکه در نظر بگیرید. مطابق روش انطباق با امپدانس مرجع امپدانس بار به دو قسمت راکتانسی و مقاومتی تجزیه می‌شود [۱۱]، [۱۲]. سپس طبق شکل (۹-۴) جریانی که در قسمت راکتانسی جاری می‌شود به منبع جریان هارمونیک معادل با آن تبدیل می‌شود. مقاومت باقیمانده به عنوان امپدانس مرجع بار در مورد هارمونیک جریان در نظر گرفته می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{CP} = \frac{|U_1|^2}{P} = \frac{|U_1|}{|I_1| \cdot \cos \varphi_1} \quad (19-4)$$

در رابطه (۱۹-۴) P توان اکتیو مصرفی بار در فرکانس اصلی، φ_1 زاویه بین ولتاژ و جریان مؤلفه اصلی بار و $|U_1|$ و $|I_1|$ دامنه‌های این دو هستند.

۴-۳-۱-۲- هارمونیک ولتاژ

در این مورد بار با معادل تونن خود جایگزین می‌شود. سپس طبق شکل (۱۰-۴) امپدانس بار به دو قسمت راکتانسی و مقاومتی تجزیه می‌شود. باز هم مطابق آن چه در مورد روش انطباق با امپدانس مرجع



شکل (۹-۴) نمایش معادل نورتن یک بار متصل به شبکه

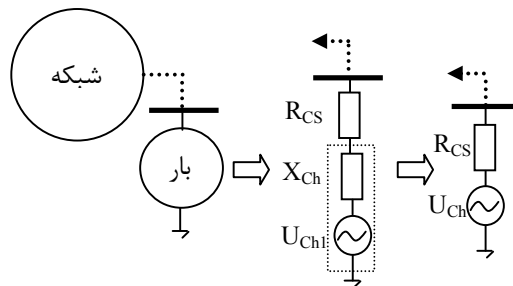
گفته شد افت ولتاژ قسمت راکتانسی به منبع ولتاژ معادل با آن تبدیل می‌شود و مقاومت باقیمانده به عنوان امپدانس مرجع بار برای هارمونیک ولتاژ در نظر گرفته می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]، [۱۲]:

$$R_{CS} = \frac{P}{|I_1|^2} = \frac{|U_1| \cdot \cos \varphi_1}{|I_1|} \quad (۲۰-۴)$$

۴-۳-۲- امپدانس سایر المان‌های سیستم

برای تعیین امپدانس هارمونیک مرجع یک شاخه بایستی همه المانهای موجود در آن با مدل هارمونیک در نظر گرفته شده برای آن‌ها جایگزین شوند. در بخش پیش مدلی برای بارهای سیستم که برای تعیین مشارکت‌های هارمونیک مناسب باشد در نظر گرفته شد. در این بخش برای سایر المان‌های سیستم مدلی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های در نظر گرفته شده به گونه‌ای هستند که اولاً برای تعیین مشارکت‌های هارمونیک مناسب باشند، ثانیاً مدل‌های ساده‌ای بوده و برای تعیین آن‌ها استفاده از مقادیر نامی المان‌ها کافی باشد. این مدل‌ها به طور خلاصه در زیر بیان شده‌اند:

۱- ژنراتورها: از آن‌جا که جریان‌های هارمونیک شارهای دواری با سرعت بیشتر از سرعت روتور ایجاد می‌کنند اثرشان شبیه به اثر جریان مولفه منفی استاتور می‌باشد. بنابراین مدل هارمونیک ژنراتور با راکتانس زیرسنکرون آن تقریب زده می‌شود.



شکل (۴-۱۰) نمایش معادل تونن یک بار متصل به شبکه

۲- ترانس‌ها: مدل ترانس‌ها به صورت یک امپدانس R-L سری در نظر گرفته می‌شود و برای سادگی از شاخه مغناطیس‌کنندگی ترانس صرف‌نظر می‌شود.

۳- خطوط: با توجه به این که خطوط یک سیستم توزیع از نوع بلند نیستند از ظرفیت خازنی خطوط صرف‌نظر و مدل آن‌ها نیز به صورت امپدانس R-L سری در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۴- تعیین امپدانس مرجع شاخه‌ها

در بخش قبل مدل هارمونیک مناسبی برای المان‌های سیستم در نظر گرفته شد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان امپدانس مرجع یک شاخه متصل به فیدر را تعیین نمود و از آن در تعیین مشارکت‌های هارمونیک استفاده کرد. در بخش ۴-۲-۲ در هر دو مورد هارمونیک‌های جریان و ولتاژ مشاهده شد که اگر برای یک شاخه امپدانس مرجع تعیین شود تغییرات امپدانس واقعی شاخه از این مقدار مرجع به منبع ولتاژ یا جریان هارمونیک معادل تبدیل می‌شود. اگر در محاسبه امپدانس مرجع یک شاخه امپدانس المانی در نظر گرفته نشود، از آن‌جا که امپدانس این المان در تعیین امپدانس واقعی شاخه وارد خواهد شد، بنابراین تاثیر این المان در منبع جریان یا ولتاژ هارمونیک معادل شاخه بروز خواهد کرد. پس اگر هدف تعیین اثر اتصال المانی در میزان هارمونیک‌های نقطه اندازه‌گیری باشد، بایستی امپدانس آن المان در محاسبه امپدانس مرجع شاخه در نظر گرفته نشود. از این مطلب برای محاسبه اثر اتصال بانک خازنی در یک شاخه در میزان هارمونیک‌های فیدر استفاده می‌شود. یعنی امپدانس بانک‌های خازنی هنگام تعیین امپدانس مرجع یک شاخه در نظر گرفته نمی‌شوند.

بسته به این که هارمونیک جریان و یا ولتاژ مد نظر باشد دو نوع امپدانس مرجع می‌توان برای یک شاخه تعریف کرد که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود.

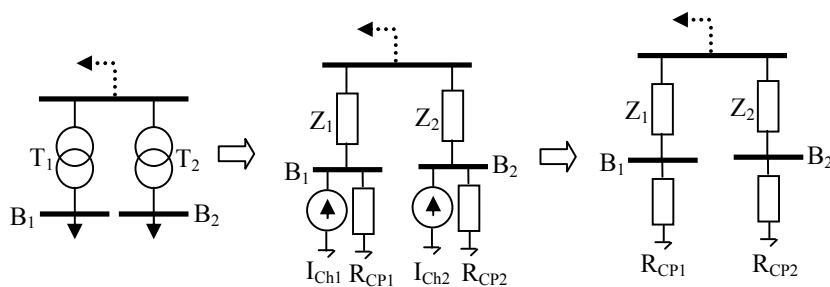
۴-۳-۱- امپدانس مرجع نورتن پیشنهاد شده برای هر شاخه

برای تعیین امپدانس مرجع یک شاخه در مورد محاسبه مشارکت‌های جریان هارمونیکی ابتدا تمام المان‌های موجود در آن با مدل بیان شده در بخش ۴-۳-۲ جایگزین می‌شوند. بارها نیز با مدل نشان داده شده در شکل (۹-۴) جایگزین می‌شوند که مقدار مقاومت R_{CP} از رابطه (۴-۱۹) بدست می‌آید. همان‌طور که گفته شد امپدانس بانک‌های خازنی در صورت وجود در محاسبه امپدانس مرجع یک شاخه در نظر گرفته نمی‌شود. برای نمونه شکل (۴-۱۱) را در نظر بگیرید که یک شاخه متصل به یک فیدر را نشان می‌دهد. برای تعیین امپدانس مرجع شاخه ابتدا خطوط و ترانس‌های این شاخه با مدل خود جایگزین می‌شوند. دو بار موجود در شاخه نیز با مدل هارمونیکی شکل (۴-۹) جایگزین می‌شوند. سپس برای تعیین امپدانس معادل منابع جریان مدار باز و امپدانس دیده شده از سر شاخه امپدانس مرجع نورتن این شاخه نامیده می‌شود. برای شاخه شکل (۴-۱۱) این امپدانس از رابطه زیر بدست می‌آید:

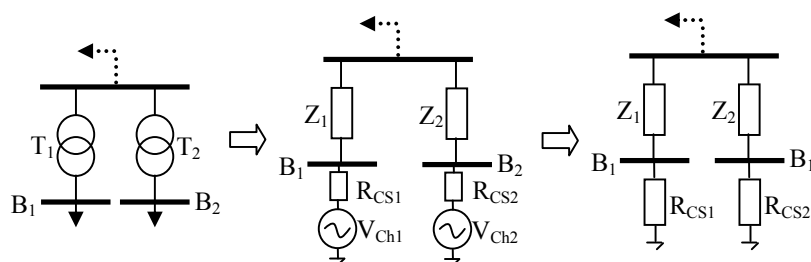
$$Z_{ref} = (Z_1 + R_{CP1}) \parallel (Z_2 + R_{CP2}) \quad (۴-۲۱)$$

۴-۳-۲- امپدانس مرجع تونن پیشنهاد شده برای هر شاخه

تعیین امپدانس مرجع یک شاخه در مورد محاسبه مشارکت‌های ولتاژ هارمونیکی با مورد هارمونیک‌های جریان کمی متفاوت است. این تفاوت به مدل در نظر گرفته شده برای بارهای سیستم وابسته است. سایر



شکل (۴-۱۱) نحوه تعیین امپدانس مرجع نورتن یک شاخه فرضی



شکل (۴-۱۲) نحوه تعیین امپدانس مرجع تونن یک شاخه فرضی

المان‌های سیستم به همان صورت قبلی مدل می‌شوند. برای بارهای سیستم در این حالت از مدل شکل ۴-۱۰ استفاده می‌شود که مقدار مقاومت R_{CS} از رابطه (۴-۲۰) بدست می‌آید. در این حالت نیز امپدانس بانک‌های خازنی در محاسبه امپدانس مرجع شاخه‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند. برای نمونه شاخه شکل ۴-۱۲ را در نظر بگیرید. برای تعیین امپدانس مرجع شاخه در این حالت خطوط و ترانس‌ها با مدل بیان شده در بخش ۴-۳-۲ و دو بار موجود در شاخه نیز با مدل هارمونیکی شکل (۴-۱۰) جایگزین می‌شوند. سپس با اتصال کوتاه کردن منابع ولتاژ امپدانس دیده شده از سر شاخه تعیین می‌شود. این امپدانس، امپدانس مرجع تونن شاخه نامیده می‌شود که برای شاخه شکل (۴-۱۲) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_{ref} = (Z_1 + R_{CS1}) \parallel (Z_2 + R_{CS2}) \quad (۴-۲۲)$$

اگر در روابط بیان شده برای محاسبه مشارکت‌های هارمونیکی در بخش ۴-۲-۱ به جای امپدانس واقعی شاخه‌ها از امپدانس‌های مرجع نورتن و تونن تعیین شده برای هر شاخه در این بخش استفاده شود، سهم شاخه‌ها در میزان هارمونیک‌های فیدر هم ناشی از منابع جریان و ولتاژ معادل آن‌ها و هم ناشی از تغییر امپدانس آن‌ها از مقادیر مرجع در نظر گرفته شده محاسبه خواهد شد. به عبارت دیگر علاوه بر این که می‌توان شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک غالب را شناسایی نمود، اثر اتصال بانک خازنی در میزان هارمونیک‌ها که ممکن است به دلیل وقوع رزونانس احتمالی باشد را نیز می‌توان محاسبه کرد. در فصل بعدی با استفاده از شبیه‌سازی بروی سیستم استاندارد ۱۳ باسه IEEE صحت مطالب بیان شده در این

جدول (۴-۱)

مقایسه مزایا و معایب انواع روش‌های شناسایی منابع هارمونیک به همراه روش پیشنهادی

انواع روش‌ها	مزایا	معایب
روش‌های تک‌نقطه	پایاده شدن این روش‌ها از لحاظ عملی آسان‌تر و ارزان‌تر از روش‌های چندنقطه است.	۱- منبع غالب هارمونیک را تنها از بین دو طرف یعنی بالادست و پایین‌دست نقطه اندازه‌گیری تعیین می‌کنند و اطلاعات کمی در مورد وضعیت هارمونیک سیستم بدست می‌دهند. ۲- در همه روش‌ها به جز روش انطباق با امپدانس مرجع تاثیر ناشی از رزونانس در میزان هارمونیک‌ها به طور دقیق بررسی نشده است.
روش‌های چندنقطه	در این روش‌ها امکان شناسایی محل منابع هارمونیک در باس‌های مختلف سیستم وجود دارد.	سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در این روش‌ها به دلیل نیاز به انجام اندازه‌گیری‌های سنکرون در چندین نقطه از سیستم قدرت پیچیده و گران است.
روش پیشنهادی	۱- از آن‌جا که روش پیشنهادی یک روش تک-نقطه است پیاده‌سازی آن از لحاظ عملی آسان و ارزان می‌باشد. ۲- برخلاف سایر روش‌های تک‌نقطه که منبع غالب را تنها از بین دو طرف تعیین می‌کنند امکان شناسایی شاخه‌های حاوی منابع غالب هارمونیک را از بین چندین شاخه متصل به فیدر فراهم می‌کند. ۳- با معرفی دو امپدانس مرجع برای هر شاخه که محاسبه آن‌ها تنها نیاز به داده‌های مولفه اصلی عناصر شاخه دارد اولاً نیاز به روش‌های عملی سخت و هزینه‌بر تعیین امپدانس واقعی شاخه‌ها در فرایند شناسایی از بین می‌رود ثانیاً علاوه بر امکان شناسایی شاخه‌های حاوی منابع غالب هارمونیک می‌توان تاثیر احتمالی اتصال بانک خازنی در یک شاخه ناشی از وقوع رزونانس را در میزان هارمونیک‌های فیدر محاسبه کرد.	در روش بیان شده امکان جداسازی اثر ناشی از منابع هارمونیک و اثر احتمالی بانک خازنی در یک شاخه وجود ندارد.

فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند. در جدول (۴-۱) مزایا و معایب انواع روش‌های شناسایی منابع هارمونیک که در فصل پیش بررسی شدند و نیز روش پیشنهاد شده در این فصل مقایسه شده‌اند.

فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی

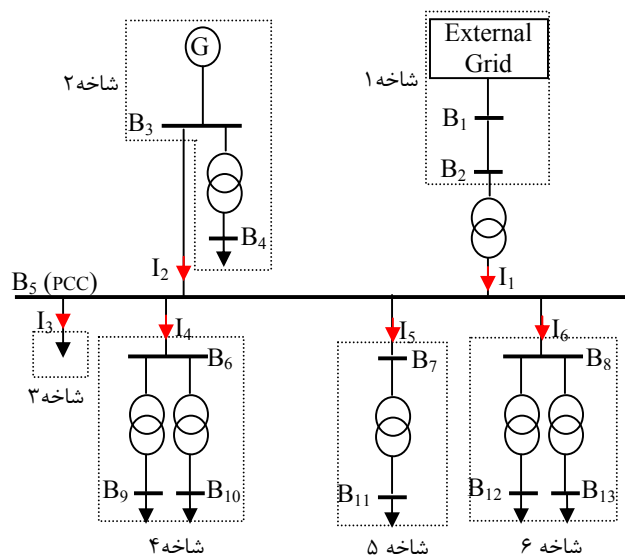
۵-۱- مقدمه

در این فصل مطالعه شبیه‌سازی که بروی یک سیستم نمونه انجام گرفته است بررسی می‌شود. نتایج بدست آمده ارائه شده و مورد بحث قرار می‌گیرند. هدف اثبات این است که اولاً با استفاده از روش پیشنهاد شده می‌توان مشارکت‌های هارمونیک را در یک سیستم چند تولیدکننده- چند مصرف‌کننده بدست آورد که در این مورد شاخه‌های متصل به یک فیدر سیستم توزیع نمونه در نظر گرفته شده‌اند. دوماً نشان داده شود که استفاده از امیدانس‌های واقعی در فرایند شناسایی برخی مواقع همچون اتصال بانک خازنی مخصوصاً وقتی که در شرایط رزونانس قرار داشته باشد منجر به نتایج نادرست می‌شود. سوماً درستی امیدانس‌های مرجع پیشنهاد شده هم در شناسایی شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک غالب و هم در محاسبه تاثیر اتصال بانک خازنی در میزان هارمونیک‌ها با استفاده از نتایج تایید شود.

۵-۲- معرفی سیستم نمونه

سیستم انتخاب شده برای شبیه‌سازی سیستم توزیع ۱۳ باسه استاندارد IEEE می‌باشد که دیاگرام تک-خطی آن در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. این سیستم توزیع در مقالات به عنوان یک سیستم معیار برای آنالیز روش‌های آشکارسازی منابع هارمونیک در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است [۲]، [۸]، [۱۰] و [۱۷]. داده‌های مربوط به این سیستم در پیوست آمده است [۲۷].

فیدر PCC در این شکل را در نظر بگیرید. این فیدر از دو شبکه تغذیه می‌شود. یکی از شبکه‌های تغذیه به شبکه اصلی متصل است و دیگری یک ژنراتور محلی است. همچنین این فیدر چهار شاخه را تغذیه می‌کند که یکی از شاخه‌ها باری است که مستقیماً به فیدر متصل شده است و سه شاخه دیگر هر کدام شامل بار یا بارهایی هستند که از طریق یک خط و ترانس از فیدر تغذیه می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده



شکل (۱-۵) دیاگرام تک‌خطی سیستم نمونه

از نرم‌افزار Digsilent بروی این سیستم انجام شده‌اند. دو مورد در نظر گرفته شده است. در هر مورد تعدادی بار هارمونیک و بانک خازنی به سیستم اضافه شده‌اند و شبیه‌سازی در دو حالت قطع و وصل بانک خازنی مورد نظر انجام شده است. در هر حالت از نتایج شبیه‌سازی ولتاژ فیدر و جریان شاخه‌های متصل به آن در مرتبه‌های هارمونیک مختلف بدست آورده شده‌اند. بعد از آن با استفاده از روش معرفی شده در فصل قبل مشارکت شاخه‌ها در ولتاژ و جریان هارمونیک فیدر محاسبه شده است. برای مقایسه بهتر نتایج مقادیر مشارکت شاخه‌ها به صورت درصدی از هارمونیک ولتاژ و جریان PCC در هر مرتبه محاسبه شده‌اند. به طوری که جمع مقادیر مربوط به سهم همه شاخه‌ها در هارمونیک ولتاژ یا جریان در یک مرتبه خاص ۱۰۰٪ است. همچنین مشارکت شاخه‌ها در دو حالت با استفاده از امپدانس واقعی شاخه‌ها و نیز با استفاده از امپدانس مرجع پیشنهاد شده در فصل قبلی بدست آورده شده‌اند تا اولاً مشخص شود که استفاده از امپدانس‌های واقعی در پاره‌ای موارد مثل اتصال بانک خازنی به نتایج نادرست منجر می‌شود و ثانیاً با مقایسه و بررسی نتایج درستی امپدانس‌های مرجع تعیین شده برای شاخه‌ها مشخص شود. در جدول (۱-۵) مقادیر نامی بارهای هارمونیک و نیز بانک‌های خازنی که در این مطالعه به

جدول (۵-۱)

مقادیر نامی منابع هارمونیک و بانک‌های خازنی اضافه شده به سیستم در شبیه‌سازی

مولفه	مقادیر نامی	مقادیر هارمونیک‌ها
V_h	$V_{base} = 69 \text{ kV}$	$V_5 = .02 \text{ p.u.}$ $V_7 = .01 \text{ p.u.}$ $V_{11} = .007 \text{ p.u.}$ $V_{13} = .002 \text{ p.u.}$
NL_1	$P = 600 \text{ kW}$ $Q = 530 \text{ kW}$	$I_5/I_1 = 20\%$ $I_7/I_1 = 15\%$ $I_{11}/I_1 = 10\%$ $I_{13}/I_1 = 5\%$
مبدل C_a	$P = 500 \text{ kW}$ $PF = 0.9$	$I_h/I_1 = 1/h$ $h = 6k \pm 1$
مبدل C_b	$P = 1310 \text{ kW}$ $PF = 0.76$	$I_h/I_1 = 1/h$ $h = 12k \pm 1$
بانک خازنی C_1	$V_{base} = 13.8 \text{ kV}$ $Q_C = 1 \text{ Mvar}$	-
بانک خازنی C_2	$V_{base} = 0.48 \text{ kV}$ $Q_C = 0.19 \text{ Mvar}$	-

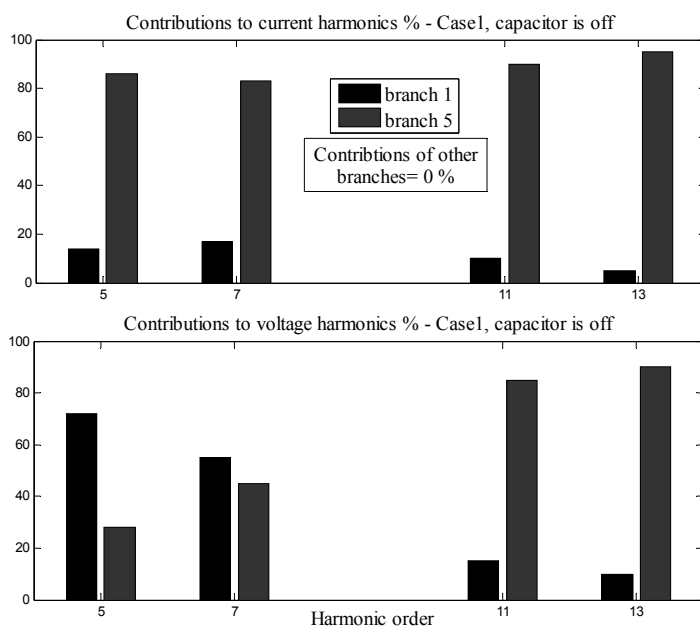
سیستم اضافه شده‌اند آورده شده است.

۵-۳-۱ مورد ۱

در این مورد منبع ولتاژ هارمونیک V_h به صورت سری با شبکه اصلی در شاخه ۱ قرار گرفته است. همچنین مبدل ۶ پالسه C_a جایگزین بار باس B_{11} در شاخه ۵ شده است. همچنین در این مورد مصرف‌کننده متصل به فیدر (شاخه ۳) از بانک خازنی C_1 برای بهبود ضریب توان خود از ۰/۷۵ به ۰/۹۱ استفاده کرده است. مقادیر این بارهای هارمونیک و بانک خازنی در جدول (۵-۱) آورده شده است. همان‌طور که گفته شد شبیه‌سازی در دو حالت قطع و وصل خازن انجام شده است که در زیر بررسی می‌شود.

۵-۳-۱-۱ حالت قطع خازن

نتایج بدست آمده با استفاده از روش بیان شده در حالت استفاده از امپدانس واقعی شاخه‌ها برای مرتبه‌های هارمونیک ۵ تا ۱۳ در شکل (۵-۲) آورده شده است. با توجه به نتایج مشخص است که شاخه

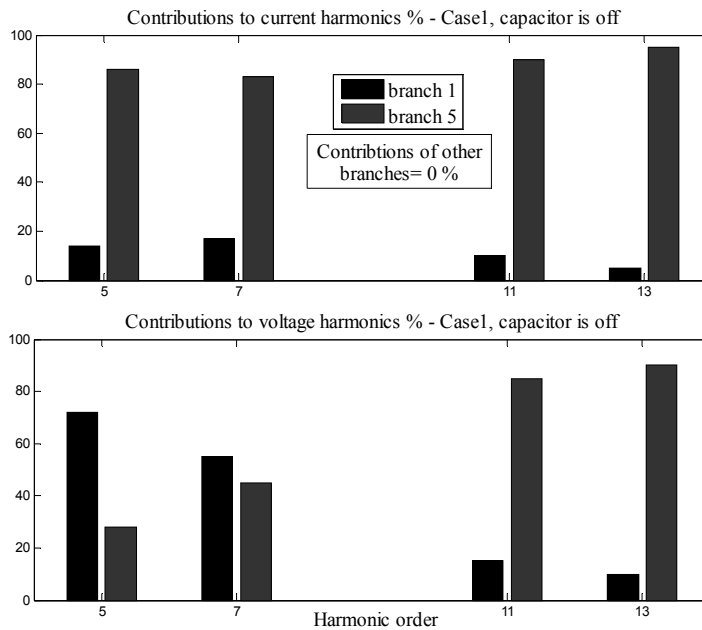


شکل (۲-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی

۵ حاوی مبدل ۶ پالسه در همه مرتبه‌ها منبع غالب برای هارمونیک‌های جریان است. دلیل این امر این است که چون امپدانس تونن شبکه خارجی در مقایسه با امپدانس سیستم توزیع مقدار کمتری دارد، جریان‌های هارمونیکی تزریق شده به فیدر توسط شاخه ۱ در مقایسه با شاخه ۵ ناچیز است. در مورد هارمونیک ولتاژ شاخه ۱ سهم غالب را در مرتبه ۵ دارد. اما در مرتبه ۷، مشارکت دو شاخه تقریباً به یک میزان است. در مرتبه‌های ۱۱ و ۱۳ نیز شاخه ۵ منبع غالب برای هارمونیک ولتاژ است. درستی این نتایج با توجه به مقادیر منابع هارمونیک در جدول ۱ تایید می‌شود.

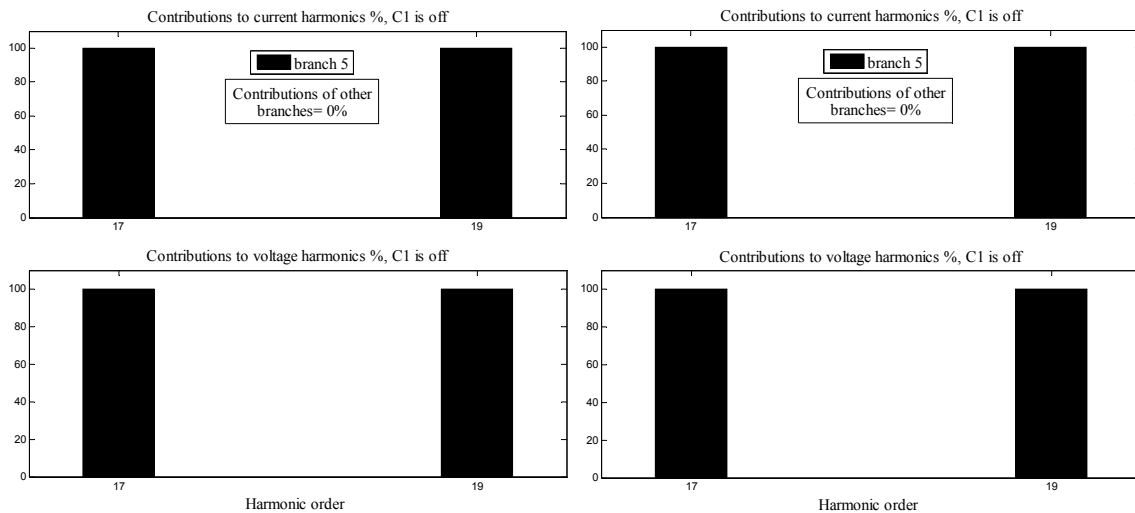
در شکل (۳-۵) نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده برای مرتبه‌های ۵ تا ۱۳ نشان داده شده است. از مقایسه دو شکل (۲-۵) و (۳-۵) می‌توان پی برد که نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی و امپدانس‌های مرجع در حالت قطع خازن تقریباً یکسان است و با استفاده از هر کدام می‌توان شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک غالب را شناسایی کرد.

از آن‌جا که منبع ولتاژ هارمونیکی V_h مولفه‌ای در مرتبه‌های هارمونیکی بالاتر از ۱۳ ندارد، در این مرتبه‌ها



شکل (۳-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع

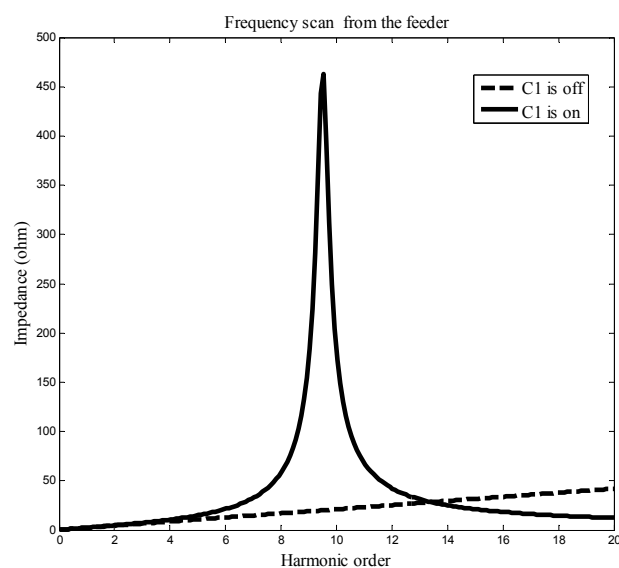
تنها منبع هارمونیک مبدل ۶ پالسه در شاخه ۵ است. به طور نمونه نتایج بدست آمده برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ با استفاده از امپدانس‌های واقعی و امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در شکل (۴-۵)



(ب)

(الف)

شکل (۴-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت قطع خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده



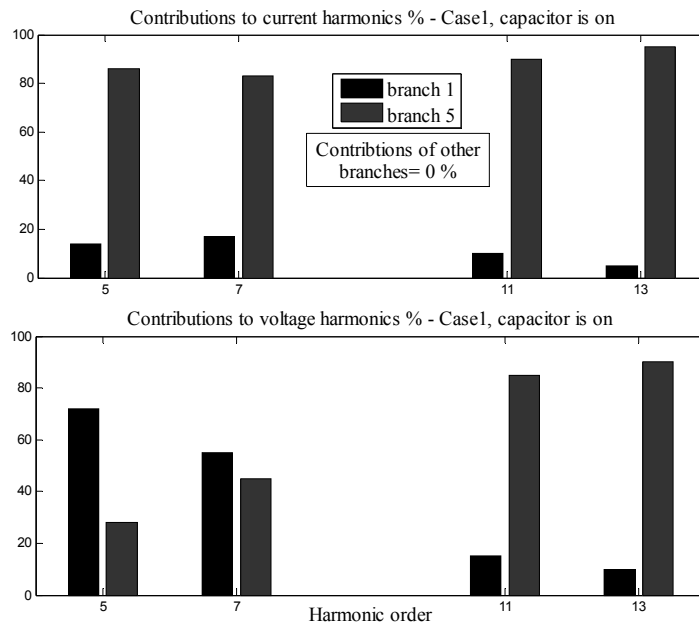
شکل (۵-۵) نمودار اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در مورد ۱

نشان داده شده است.

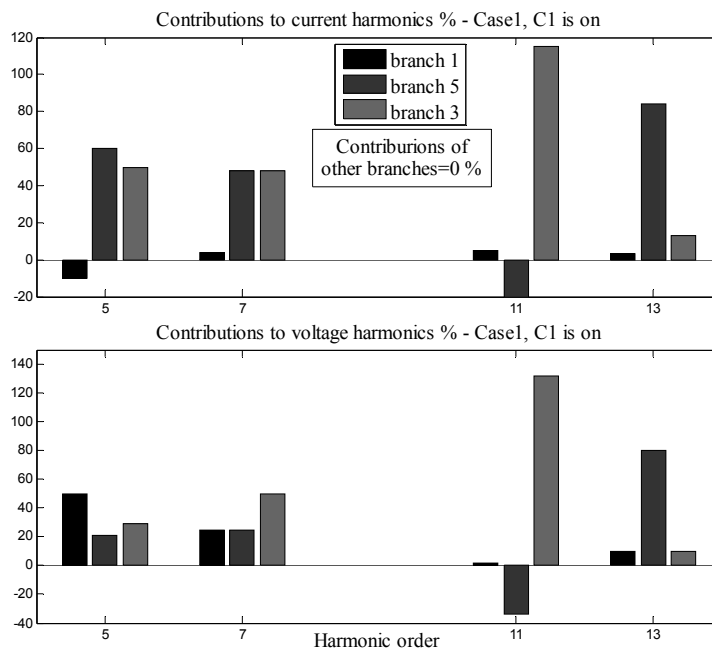
۵-۳-۲- حالت وصل خازن

شکل (۵-۵) نمودار اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر PCC را قبل و بعد از اتصال بانک خازنی C_1 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است اتصال این بانک خازنی توسط بار شاخه ۳ منجر به وقوع یک رزونانس موازی در فرکانس ۴۷۵ Hz می‌شود.

مشارکت بدست آمده برای شاخه‌ها با استفاده از روش بیان شده در حالت استفاده از امپدانس‌های واقعی برای مرتبه‌های هارمونیک ۵ تا ۱۳ در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. مقایسه میان دو شکل (۵-۲) و (۵-۶) نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی در دو حالت قطع و وصل خازن یکسان هستند. به عبارت دیگر در این حالت تاثیر ناشی از اتصال بانک خازنی در میزان هارمونیک‌های فیدر محاسبه نمی‌شود.



شکل (۶-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی

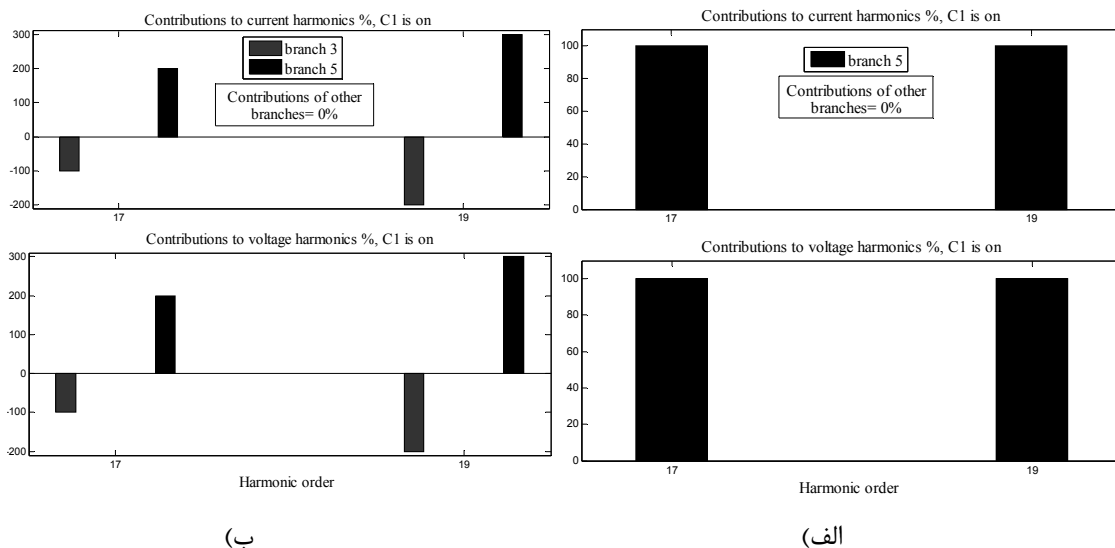


شکل (۷-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع

نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع برای هارمونیک‌های مرتبه ۵ تا ۱۳ نیز در شکل (۷-۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل در مورد هارمونیک‌های جریان مرتبه ۵ و ۷ شاخه ۵ حاوی

مبدل و شاخه ۳ که از بانک خازنی استفاده کرده است مشارکت غالب تقریباً یکسانی را مخصوصاً در مرتبه ۷ دارند. در مورد هارمونیک ولتاژ مرتبه ۵ شاخه ۱ سهم غالب را دارد اما شاخه‌های ۳ و ۵ نیز مقداری مشارکت دارند. اما در مرتبه ۷ شاخه ۳ سهم غالب و دو شاخه دیگر سهم تقریباً یکسان و کمتری را در هارمونیک ولتاژ دارند. در مرتبه ۱۱ هم شاخه ۳ حاوی بانک خازنی سهم غالب را در هر دوی هارمونیک‌های ولتاژ و جریان دارد و مشارکت این شاخه در این مرتبه هارمونیکی بیشترین مقدار را نسبت به مشارکتش در بقیه مرتبه‌ها دارد. علت مشارکت غالب شاخه ۳ در هارمونیک‌های فیدر در دو مرتبه ۷ و ۱۱ این است که این دو مرتبه هارمونیکی در نزدیکی فرکانس رزونانس موازی قرار دارند. البته مرتبه ۱۱ کم‌ترین فاصله را با فرکانس رزونانس نسبت به بقیه مرتبه‌ها دارد و برای همین شاخه ۳ در این مرتبه بیشترین سهم را در هارمونیک ولتاژ و جریان فیدر دارد.

مشابه حالت قطع خازن مشارکت شاخه‌ها با استفاده از امیدانس‌های واقعی و امیدانس‌های مرجع پیشنهاد شده برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ بدست آورده شده و در شکل (۵-۸) نشان داده شده است.



شکل (۵-۸) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۱ حالت وصل خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ (الف) با استفاده از امیدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امیدانس‌های مرجع پیشنهاد شده

جدول (۵-۲)

مقادیر ولتاژ و جریان هارمونیک PCC قبل و بعد از اتصال بانک خازنی - مورد ۱

مرتبه هارمونیک	مورد ۱			
	C ₁ - قطع		C ₁ - وصل	
	V _{PCC} (V)	I _{PCC} (A)	V _{PCC} (V)	I _{PCC} (A)
۵	142.5∠159°	3.8∠179.4°	157.5∠198.2°	6.7∠-146.4°
۷	55.6∠122.4°	3.2∠142.1°	122.5∠118.6°	5.4∠176.5°
۱۱	40.2∠-101.4°	1.4∠-15.6°	116.4∠87.0°	4.4∠155.9°
۱۳	54.7∠-123.0°	1.4∠-19.3°	62.6∠61.1°	2.0∠141.8°
۱۷	49.9∠130.7°	1.1∠-139.0°	22.7∠-47.0°	0.5∠43.3°
۱۹	48.8∠72.3°	0.9∠162.6°	16.7∠-105.8°	0.33∠-15.4°

همان‌طور که از شکل (۵-۸الف) مشخص است نتایج به دست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی در دو حالت قطع و وصل خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ نیز یکسان است. اما طبق شکل (۵-۸ب) نتایج بدست آمده با امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده نشان‌دهنده اثر کم‌کنندگی اتصال بانک خازنی در میزان هارمونیک‌های مرتبه ۱۷ و ۱۹ است که این اثر کم‌کنندگی در هارمونیک مرتبه ۱۹ بیشتر است. علت این امر نیز کاهش امپدانس بانک خازنی با بالا رفتن مرتبه هارمونیک‌ها می‌باشد و هر چه مرتبه هارمونیک بالاتر باشد این اثر کم‌کنندگی بیشتر خواهد بود.

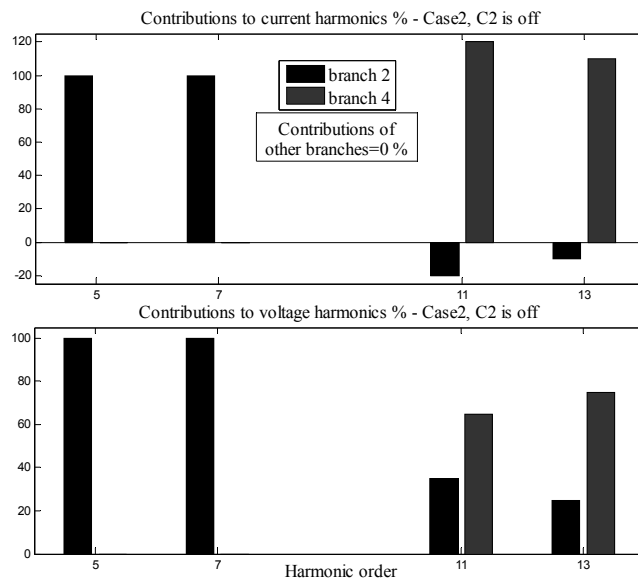
جدول (۲-۵) مقادیر ولتاژ و جریان فیدر را در مرتبه‌های هارمونیک موجود ۵ تا ۱۹ قبل و بعد از اتصال بانک خازنی نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر هارمونیک‌ها قبل و بعد از اتصال بانک خازنی نشان می‌دهد که نمی‌توان تاثیر این المان را در میزان هارمونیک‌ها نادیده گرفت. بنابراین نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی در حالت وصل خازن که منجر به نتایجی یکسان با حالت قطع خازن شد صحیح نیست. همچنین این مقایسه درستی نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در حالت وصل خازن را نشان می‌دهد.

۵-۴-۲ مورد ۲

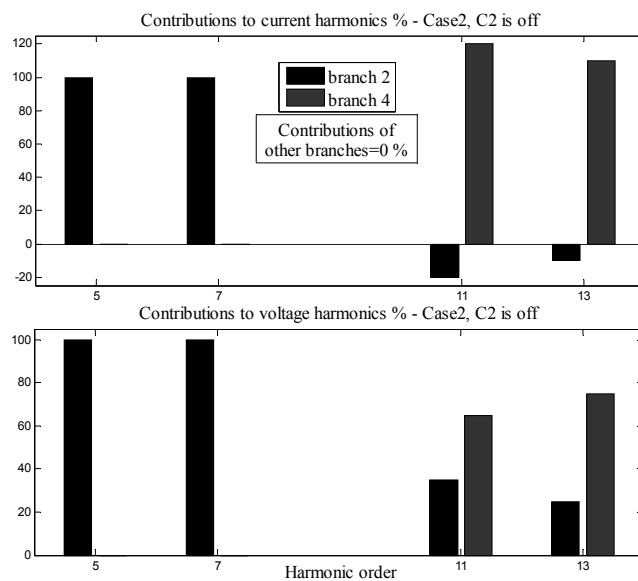
در این مورد بار غیرخطی NL_1 با بار باس B_4 در شاخه ۲ و نیز مبدل ۱۲ پالس C_b با بار باس B_{10} در شاخه ۴ جایگزین شده است. همچنین بار متصل به باس B_{12} در شاخه ۶ از بانک خازنی C_2 برای بهبود ضریب توان خود از 0.71 به 0.91 استفاده کرده است. مقادیر این بارهای هارمونیک و بانک خازنی در جدول ۱ آورده شده است. مشابه مورد ۱ شبیه‌سازی در دو حالت قطع و وصل خازن انجام شده است که در زیر بررسی می‌شود.

۵-۴-۱- حالت قطع خازن

نتایج با استفاده از امپدانس‌های واقعی در حالت قطع خازن برای مرتبه‌های هارمونیک ۵ تا ۱۳ در شکل (۵-۹) آورده شده است. با توجه به این شکل در مرتبه ۵ و ۷ که مبدل ۱۲ پالس هارمونیک تزریق نمی‌کند شاخه ۲ حاوی بار NL_1 تنها منبع هارمونیک است. اما در هارمونیک ولتاژ و جریان مرتبه‌های ۱۱ و ۱۳ شاخه ۴ حاوی مبدل منبع غالب است و شاخه ۲ مخصوصاً در هارمونیک جریان مشارکت ناچیزی دارد. همچنین در جدول (۵-۳) که در بخش ۵-۴-۲ آمده است می‌توان مشاهده کرد که در حالت قطع خازن و در مرتبه‌های ۵ و ۷ که بار NL_1 تنها منبع هارمونیک است، هارمونیک جریان PCC نسبت به سایر مرتبه‌ها مقدار ناچیزی دارد. این بدین علت است که بخشی از جریان هارمونیک این بار از طریق ژنراتور محلی G تامین می‌شود و بنابراین هارمونیک جریان کمتری توسط شاخه ۲ به PCC تزریق می‌شود. نتایج بدست آمده در حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع نیز در شکل (۵-۱۰) آورده شده است. مقایسه میان نتایج بدست آمده از امپدانس‌های واقعی در شکل (۵-۹) و امپدانس‌های مرجع در شکل (۵-۱۰) یکسان بودن نتایج را در این دو مورد در حالت قطع خازن نشان می‌دهد.



شکل (۹-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی



شکل (۱۰-۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع

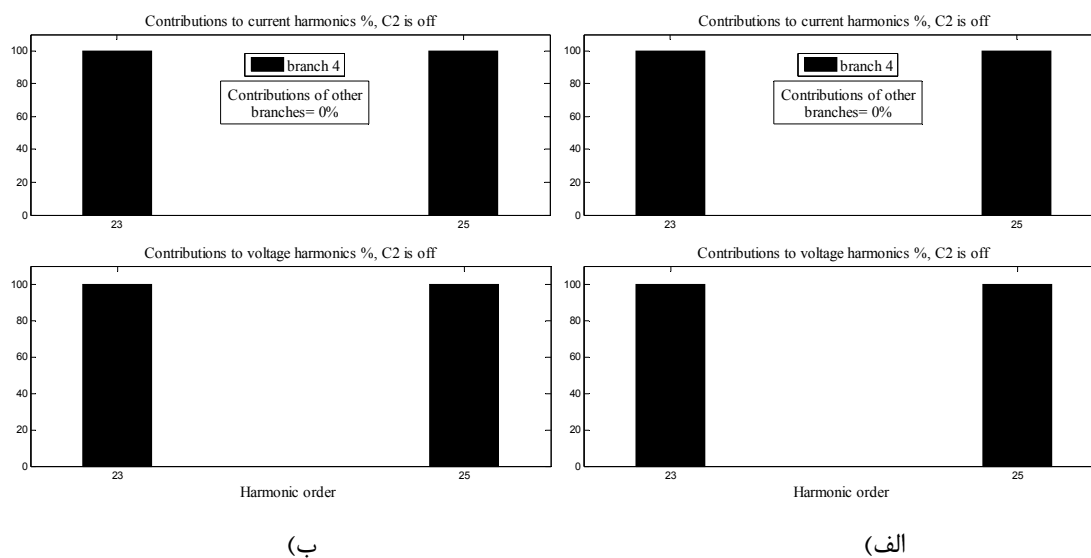
در مرتبه‌های هارمونیک بالاتر از ۱۳ از آن‌جا که بار غیرخطی باس B_4 هارمونیک تزیق نمی‌کند تنها منبع هارمونیک مبدل ۱۲ پالس در شاخه ۴ است. به طور نمونه نتایج برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ با استفاده از امپدانس‌های واقعی و نیز امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در شکل (۱۱-۵) آورده شده

است. همان‌طور که مشخص است در هر دو حالت شاخه ۴ منبع غالب هارمونیک تشخیص داده شده است.

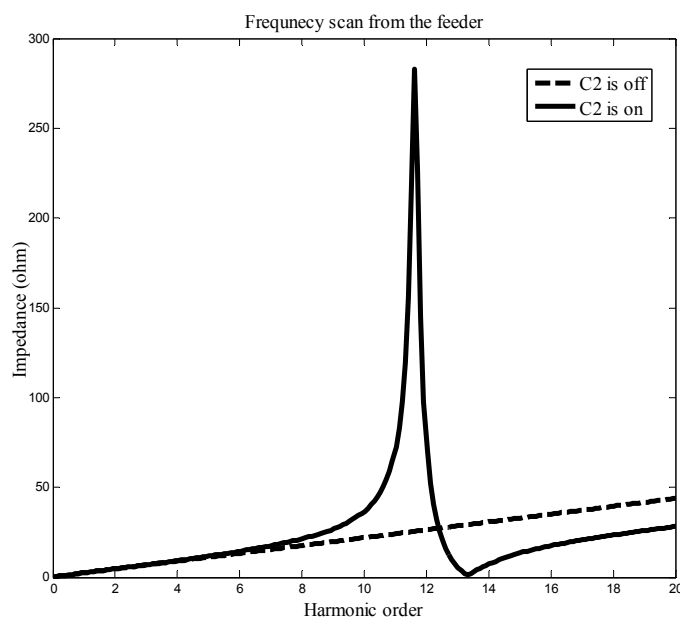
۵-۴-۲- حالت وصل خازن

نمودار اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی C_2 در شکل (۵-۱۲) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است اتصال این بانک خازنی منجر به وقوع یک رزونانس موازی در فرکانس 580 Hz و یک رزونانس سری در فرکانس 670 Hz می‌شود.

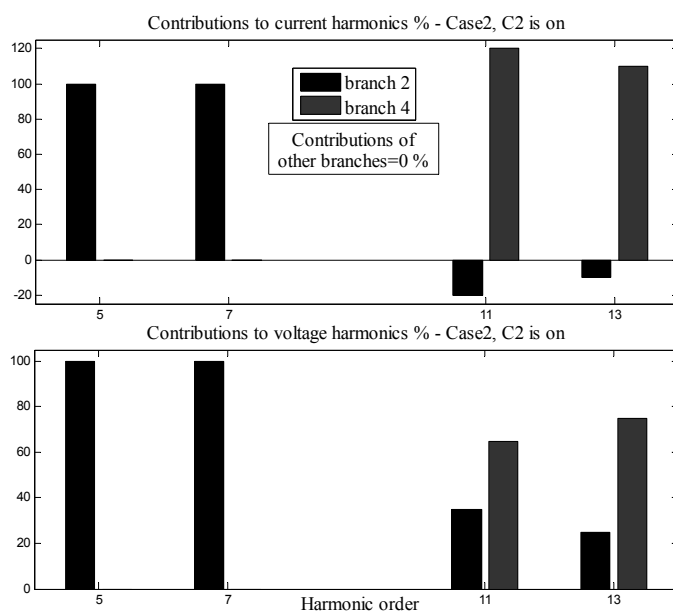
در شکل (۵-۱۳) نتایج بدست آمده در حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی نشان شده است. مقایسه دو شکل (۵-۹) و (۵-۱۳) مشخص می‌کند که استفاده از امپدانس‌های واقعی شاخه‌ها نتایج یکسانی را در دو حالت قطع و وصل خازن بدست می‌دهد. این مشابه نتیجه‌ای است که با مقایسه دو شکل (۵-۲) و (۵-۶) در بخش ۵-۳-۲ بدست آمد.



شکل (۵-۱۱) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت قطع خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از مرجع پیشنهاد شده

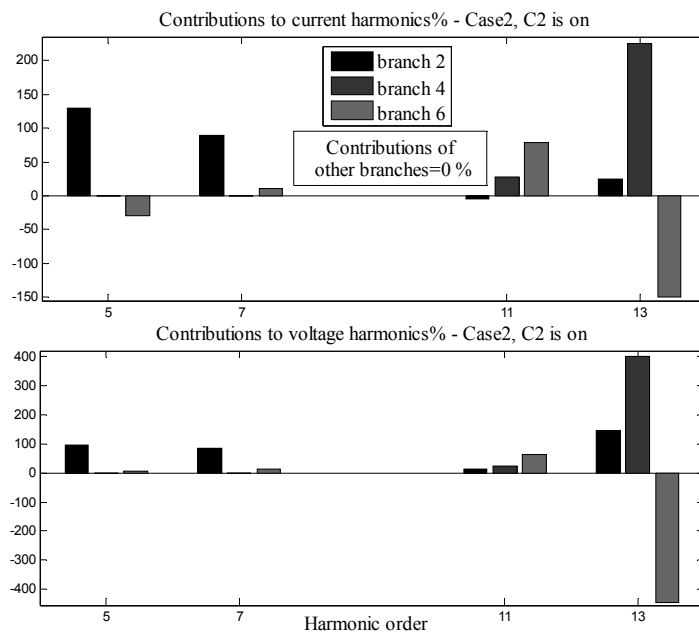


شکل (۵-۱۲) اسکن فرکانسی دیده شده از فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در مورد ۲



شکل (۵-۱۳) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های واقعی

همچنین نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که شاخه ۲ مشابه حالت قطع خازن منبع غالب برای هارمونیک‌های ولتاژ و جریان مرتبه‌های ۵ و ۷ است و شاخه ۶ حاوی بانک خازنی اثر منفی کمی در هارمونیک جریان

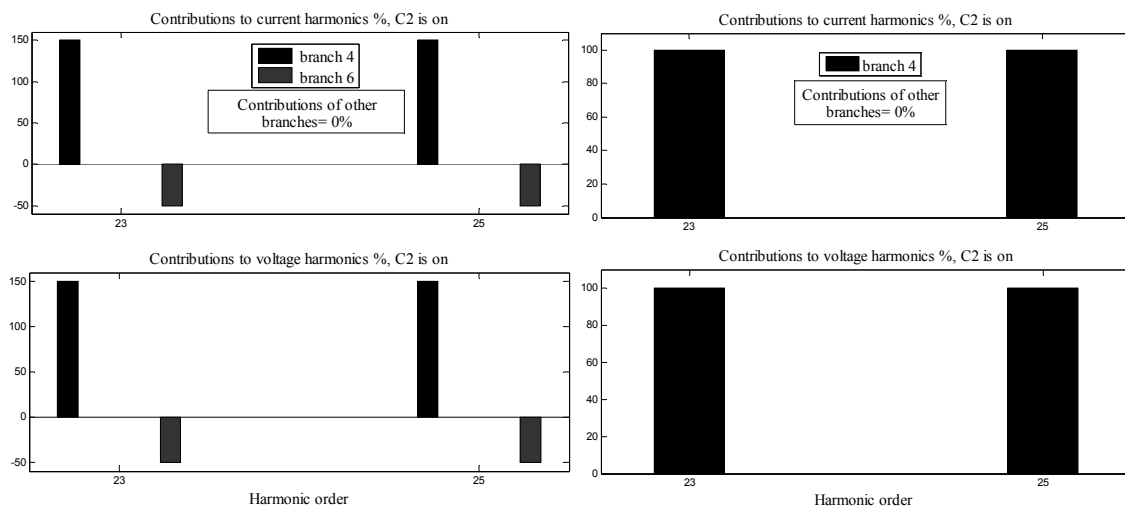


شکل (۵-۱۴) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده

مرتبه ۵ و اثر مثبت ناچیزی در مرتبه ۷ آن دارد. در مورد هارمونیک مرتبه ۱۱ که نزدیک‌ترین مرتبه به فرکانس رزونانس موازی است خازن سهم غالب را در هر دوی هارمونیک ولتاژ و جریان دارد. در این مرتبه مشارکت شاخه ۴ حاوی مبدل نیز قابل ملاحظه است. در مرتبه هارمونیک ۱۳ هم که فاصله خیلی کمی با فرکانس رزونانس سری دارد نقش خازن در هر دو هارمونیک‌های ولتاژ و جریان منفی بدست آمده است. به عبارت دیگر بانک‌خازنی در این مرتبه اثر کم‌کنندگی در میزان هارمونیک‌های فیدر دارد.

همچنین نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی و نیز امپدانس‌های مرجع برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ در شکل (۵-۱۵) آورده شده است. طبق شکل (۵-۱۵الف) استفاده از امپدانس‌های واقعی در حالت وصل بانک خازنی تغییری در نتایج نسبت به حالت قطع آن که در شکل (۵-۱۱) آمده ایجاد نمی‌کند. اما با توجه به شکل (۵-۱۵ب) نتایج در حالت استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده اثر کم‌کنندگی اتصال بانک خازنی را در میزان هارمونیک‌های فیدر نشان می‌دهد.

در جدول (۵-۳) مقادیر هارمونیک‌های فیدر در مورد ۲ در دو حالت قبل و بعد از اتصال بانک خازنی



(ب)

(ف)

شکل (۵-۱۵) نتایج شبیه‌سازی در مورد ۲ حالت وصل خازن برای هارمونیک‌های مرتبه ۲۳ و ۲۵ (الف) با استفاده از امپدانس‌های واقعی (ب) با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده

آورده شده است. مقایسه مقادیر هارمونیک‌ها در این دو حالت اثر اتصال بانک خازنی را در میزان هارمونیک‌های فیدر نشان می‌دهد. بنابراین مشابه نتیجه‌ای که در مورد ۱ بدست آمد استفاده از امپدانس‌های واقعی که نتایج یکسانی را در دو حالت قطع و وصل بانک خازنی بدست می‌دهد صحیح نیست. همچنین این مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده را تایید می‌کند.

جدول (۵-۳)

مقادیر ولتاژ و جریان هارمونیک PCC قبل و بعد از اتصال بانک خازنی - مورد ۲

مرتبه هارمونیک	مورد ۲			
	قطع -C ₂		وصل -C ₂	
	V _{PCC} (V)	I _{PCC} (A)	V _{PCC} (V)	I _{PCC} (A)
۵	77.1∠41.8°	1.2∠-30.1°	81.4∠41.5°	1.0∠-23.1°
۷	80.3∠-47.2°	1.0∠-123.5°	92.6∠-46.3°	1.1∠-85.6°
۱۱	251.9∠129.5°	5.0∠-144.5°	752∠120.6°	21.9∠-151.4°
۱۳	217.4∠38.2°	4.5∠125.6°	39.9∠-119°	2.8∠-37.8°
۲۳	168.2∠-58.3°	2.7∠31.9°	114.9∠-58.0°	1.8∠32.2°
۲۵	168.1∠-149.3°	2.48∠-59.1°	117.6∠-149.0°	1.7∠-58.8°

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری:

در این پایان‌نامه بر مبنای یک روش تک‌نقطه روشی ارائه شد که با استفاده از آن مشارکت‌های هارمونیک در یک سیستم چند تولیدکننده-چند مصرف‌کننده بدست آورده شد. با اندازه‌گیری ولتاژ یک فیدر سیستم توزیع و جریان شاخه‌های متصل به آن، سهم هر شاخه در هارمونیک ولتاژ و جریان فیدر در هر مرتبه هارمونیک مورد نظر به طور جداگانه بدست آورده شد. بدین ترتیب می‌توان شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک را شناسایی کرد. البته برای این کار نیاز به معلوم بودن امپدانس معادل شاخه‌ها است. در این پایان‌نامه برای هر شاخه متصل به فیدر دو امپدانس مرجع معرفی شد. امپدانس مرجع نورتن هارمونیک برای محاسبه مشارکت‌های جریان هارمونیک و امپدانس مرجع تونن هارمونیک در مورد محاسبه مشارکت‌های ولتاژ هارمونیک پیشنهاد شدند. قرار دادن این امپدانس‌ها به جای امپدانس‌های معادل واقعی شاخه‌ها در روابط بدست آمده برای محاسبه مشارکت‌های هارمونیک این امکان را فراهم کرد که اثر اتصال بانک‌های خازنی به خصوص در مواقعی که به وقوع رزونانس منجر می‌شوند نیز در میزان هارمونیک‌های فیدر محاسبه شود.

برای تایید موارد بیان شده در روش پیشنهاد شده یک مطالعه شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Digsilent بروی سیستم ۱۳ باسه استاندارد IEEE انجام شد. دو مورد در نظر گرفته شدند. در هر مورد تعدادی منبع هارمونیک و یک بانک خازنی به سیستم افزوده شدند. اتصال بانک خازنی در مورد ۱ منجر به وقوع یک رزونانس موازی و اتصال بانک خازنی مورد ۲ یک رزونانس موازی و یک سری را در پی داشته است. در هر مورد ابتدا با شبیه‌سازی، ولتاژ فیدر و جریان شاخه‌های متصل به آن در مرتبه‌های هارمونیک مختلف در دو حالت قطع و وصل خازن بدست آورده شدند. سپس با استفاده از روش پیشنهاد شده مشارکت‌های هارمونیک شاخه‌ها در هارمونیک‌های فیدر در مرتبه‌های مختلف با استفاده از امپدانس‌های واقعی و نیز

امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در هر دو حالت قطع و وصل خازن بدست آورده شدند. نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی و امپدانس‌های مرجع نشان داد که در حالت قطع خازن هر دو مورد منجر به نتایج صحیح می‌شوند. یعنی شاخه‌های حاوی منبع هارمونیک به درستی شناسایی شده‌اند.

مقایسه میان مقادیر هارمونیک‌های فیدر قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در هر دو مورد تاثیر اتصال آن را در میزان هارمونیک‌ها نشان داد. به خصوص اختلاف زیاد میان مقادیر هارمونیک‌ها قبل و بعد از اتصال بانک خازنی در مرتبه‌های نزدیک به فرکانس رزونانس در هر مورد مشخص نمود که نمی‌توان تاثیر اتصال بانک خازنی را نادیده گرفت. اما در حالت وصل خازن نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های واقعی با مورد قطع خازن یکسان بودند. یعنی تنها شاخه‌های حاوی منبع هارمونیک شناسایی شدند و تاثیر اتصال بانک خازنی محاسبه نشده بود که نادرست بودن این نتایج را نشان داد. همچنین نتایج بدست آمده با استفاده از امپدانس‌های مرجع پیشنهاد شده در این حالت نشان داد که با استفاده از این امپدانس‌ها هم می‌توان شاخه‌های حاوی منابع هارمونیک را بدرستی شناسایی کرد و هم تاثیر ناشی از اتصال بانک خازنی را در میزان هارمونیک‌ها در نظر گرفت.

۶-۲- پیشنهادات:

در روش پیشنهاد شده جداسازی اثر منابع هارمونیک و اثر احتمالی بانک خازنی در میزان هارمونیک‌ها امر مطلوبی به نظر می‌رسد. یعنی بتوان به طریقی سهم منابع هارمونیک یک شاخه را در میزان هارمونیک‌ها از سهم بانک خازنی موجود در آن جدا نمود.

پیوست

پیوست

داده‌های مربوط به ترانس‌ها، خط‌ها و باس‌های سیستم ۱۳ باسه IEEE به ترتیب در جداول زیر آمده است:

جدول ۱

داده‌های ترانس‌ها برای سیستم ۱۳ باسه IEEE

From	To	Voltage	Tap	kVA	%R	%X
B ₂	B ₅	69:13.8	69	15000	0.4698	7.9862
B ₃	B ₄	13.8:0.48	13.45	1500	0.9593	5.6694
B ₆	B ₉	13.8:0.48	13.45	1250	0.7398	4.4388
B ₆	B ₁₀	13.8:4.16	13.11	1725	0.7442	5.9537
B ₇	B ₁₁	13.8:0.48	13.45	1500	0.8743	5.6831
B ₈	B ₁₂	13.8:0.48	13.8	1500	0.8363	5.4360
B ₈	B ₁₃	13.8:2.4	13.11	3750	0.4568	5.4810

جدول ۲

امپدانس خطوط سیستم ۱۳ باسه IEEE بر حسب پریونیت (مقادیر نامی: ۱۳/۸ KV، ۱۰ MVA)

From	To	R	X
B ₁	B ₂	0.00139	0.00296
B ₃	B ₅	0.00122	0.00243
B ₅	B ₆	0.00075	0.00063
B ₅	B ₇	0.00157	0.00131
B ₅	B ₈	0.00109	0.00091

جدول ۳

داده‌های توان اکتیو و راکتیو و ولتاژ باس‌های سیستم ۱۳ باسه IEEE

Bus	V_{mag} (p.u.)	δ (deg)	P_{gen} kW	Q_{gen} kVar	P_{load} kW	Q_{load} kVar
B ₁	1.000	0.00	7450	540	-	-
B ₂	0.999	-0.13	-	-	-	-
B ₃	0.995	-2.39	2000	1910	-	-
B ₄	0.995	-3.53	-	-	600	530
B ₅	0.994	-2.40	-	-	2240	2000
B ₆	0.994	-2.40	-	-	-	-
B ₇	0.994	-2.40	-	-	-	-
B ₈	0.994	-2.40	-	-	-	-
B ₉	0.980	-4.72	-	-	1150	290
B ₁₀	0.996	-4.85	-	-	1310	1130
B ₁₁	0.981	-4.16	-	-	810	800
B ₁₂	0.979	-3.08	-	-	370	330
B ₁₃	1.001	-4.69	-	-	2800	2500

مراجع

مراجع

- [1] Arrillaga J. and Watson N.R., “*Power System Harmonics*”, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] Cataliotti A. and CosentiNo V., “Comparison of Nonactive Powers for the Detection of Dominant Harmonic Sources in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 57, NO. 8, pp. 1554-1561, 2008.
- [3] Shatshat A., PhD. Thesis, “A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems”, Electrical and Computer Engineering Depart. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2001.
- [4] Lundquist J., Licentiate Thesis, “On Harmonic Distortion in Power Systems”, Electric Power Engineering Depart. Chalmers University of Technology Sweden, 2001.
- [5] Xu W., Liu X. and Liu Y., “An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, NO. 1, pp. 214-219, 2003.
- [6] Xu W. and Liu Y., “A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, NO. 2, pp. 804-811, 2000.
- [7] Chen C., Liu X., Koval D., Xu W. and Tayjasanant T., “Critical Impedance Method—A New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution System”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, NO. 1, pp. 288-297, 2004.
- [8] Hamzah N. and Mohamed A., “A New Method to Detect the Source of Harmonic at the Point of Common Coupling”, *Jurnal Teknik Gelagar*, Vol. 17, NO. 1, pp. 54-63, 2006.
- [9] Li C. and Xu W., “A “Critical Impedance”-Based Method for Identifying Harmonic Sources”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, NO. 2, pp. 671-678, 2004.
- [10] Andrade G. V., Naidu S. R., Neri M. and Costa E., “Estimation of the Utility’s and Consumer’s Contribution to Harmonic Distortion”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 58, NO. 11, pp. 3817-3823, 2009.
- [11] Pfajfar T. and Blazic B., “Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, NO. 1, pp. 425-433, 2008.

- [12] Pfajfar T. and Blazic B., “Managing the Responsibility for Harmonic Distortion in Power Networks”, *Elsevier Ltd.*, Electrical Power and Energy Systems 49, pp. 2583–2545, 2008.
- [13] Barbaro P. V., Cataliotti A., Cosentino V. and Nuccio S., “A Novel Approach Based on Nonactive Power for the Identification of Disturbing Loads in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, NO. 3, pp. 1782-1789, 2007.
- [14] IEEE Std 1459–2000, IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non Sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions IEEE Standard, June 21 2000. Upgraded to Full Use, IEEE Std. 1459–2000, Sep. 12, 2002.
- [15] Cataliotti A. and CosentiNo V., “A New Measurement Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems Based on the Approach of the IEEE Std. 1459–2000”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, NO. 1, pp. 332-340, 2010.
- [16] Meliopoulos A., Zhang F. and Zelingher S., “Power System Harmonic State Estimation”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, NO. 3, pp. 1701-1709, 1994.
- [17] Antona G., Muscas C. and Sulis S., “State Estimation for the Localization of Harmonic Sources in Electric Distribution systems”, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, NO. 5, pp. 1462-1470, 2009.
- [18] Matair S., Watson N., Wong K. Pham V. and Arrilaga J., “Harmonic State Estimation: A Method for Remote Harmonic Assessment in a Deregulated Utility”, *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, City University, pp. 41-46, London, 2000.
- [19] Hartana R. and Richards G., “Harmonic Source Monitoring and Identification Using Neural Networks”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, NO. 4, pp. 1098-1104, 1990.
- [20] Farach J., Grady W. and Arapostathis A., “An Optimal Procedure for Placing Sensors and Estimating the Locations of Harmonic Sources in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, NO. 5, pp. 1303-1310, 1993.
- [21] Maciejowski J. M., “*Multivariable Feedback Design*”, Cambridge University and Pembroke College, Cambridge, 1998.

- [22] Madtharad C., Premrudeepreechacharn S., Watson N. and Saeng-Udom R., "An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, NO. 2, pp. 1514-1521, 2005.
- [23] Ma H. and Girgis A., "Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, NO. 3, pp. 1659-1665, 1996.
- [۲۴] اوگاتا ک، "سیستم‌های کنترل دیجیتال" جلد دوم، دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی و دکتر علی خاکی صدیق، دانشگاه تهران، ۱۳۷۳.
- [25] Gursoy E. and Niebur D., "Harmonic Load Identification Using Complex Independent Component Analysis", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 24, NO. 1, pp. 285-292, 2009.
- [26] Hyvärinen A., Survey on Independent Component Analysis, pp. 94-128, In: "Neural Computing Surveys 2", Berkeley, California, 1999.
- [27] Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, "Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, NO. 2, pp. 579-587, 1999.

Abstract

Increasing amount of harmonics has been one of the main problems of power quality in power systems in recent years because of growing application of power electronic devices. Harmonics have harmful effects on network equipment and sensitive loads. Therefore harmonic sources and causers of increase of harmonic amounts should be detected. It must be considered that capacitor banks can have a big role on amplifying harmonic quantities.

Harmonic sources detection methods are divided into two major groups which are single-point methods and multipoint methods. Multipoint methods are based on the measurements made at several points of system synchronously and require complex and expensive measurement instrumentation. Also one of the two sides of measuring point is determined as the main harmonic source in single-point methods and these approaches give a little information about harmonic state of system.

In this thesis an approach is presented for calculation of harmonic contributions in multi-utilities, multi-consumers systems. By using this approach contribution of each branch connected to a feeder of distribution system into voltage and current harmonics can be obtained in each harmonic order.

The equivalent impedances of the branches must be known in the presented method. Norton and Thevenin Reference impedances are defined for each branch and an approach to obtain these impedances is presented. By using these impedances as the equivalent impedances of the branches, the contributions of capacitor banks in amount of harmonics can be calculated too. A simulation study has been performed on IEEE 13-bus distribution system with Digsilent software. Based on the results the branches responsible for the harmonics because of containing harmonic sources or capacitor banks have been identified accurately by this method.

Key words: harmonic, harmonic source detection, harmonic contributions, voltage harmonic, current harmonic, reference impedance.