بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

ارائه‌ی ساختاری نوین در فیلترهای فعال ترکیبی برای حذف گروهی هارمونیک‌ها

نگارش

مسعود جلیل

استاد راهنما :دکتر رضا قندهاری

استاد مشاور: دکتر پیمان نادری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

بهمن ماه ۱۳۹۲

بسمه تعالی

مدیریت

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **مسعود جلیل** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکرگردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف(در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد .

امضاء

مسعود جلیل

تهران – لویزان – کدپستی ۱۶۷۸۸- صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵ تلفن ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ (داخلی ۲۳۴۷)نمابر ۲۲۹۷۰۰۱۱ پست الکترونیک sru@sru.ac.ir

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر

نام دانشجو: مسعود جلیل

عنوان پایان‌نامه: ارائه‌ی ساختاری نوین از فیلترهای فعال ترکیبی برای حذف گروهی هارمونیک‌ها

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی برق

گرایش: قدرت

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	رضا قندهاری	استادیار	شهید رجایی تهران	
۲	استاد مشاور	پیمان نادری	استادیار	شهید رجایی تهران	
۳	استاد مدعو خارجی				
۴	استاد مدعو داخلی				

تقدیم به:

دانشجویانی که عقل‌شان بر احساس‌شان غلبه می‌کند؛

دانشجویانی که برای تحمل آرای دیگران، تمرین می‌کنند؛

دانشجویانی که به‌واسطه‌ی زحمتی که می‌کشند، همیشه خسته‌اند؛

دانشجویانی که برای چهل سال آینده‌ی خود، برنامه دارند؛

دانشجویانی که فرق بین هشت و هشت و یک دقیقه را می‌دانند؛

دانشجویانی که رنگ‌های شاد خلقت را در ظاهر خود سپاس می‌دارند؛

دانشجویانی که با محاسبه‌ی حروف اضافه، سخن می‌گویند؛

دانشجویانی که قاعده‌مند، فکر می‌کنند؛

دانشجویانی که برای هر سوالی، چندین پاسخ متفاوت قایلند؛

دانشجویانی که عصبانیت خود را به تأخیر می‌اندازند؛

دانشجویانی که شأن را بر قدرت مقدم می‌شمارند؛

دانشجویانی که در رفتار قابل پیش‌بینی‌اند؛

دانشجویانی که معنای تناسب، درصد و کار تدریجی را می‌دانند؛

دانشجویانی که برای افزایش قدرت کشور، تأمل می‌کنند؛

دانشجویانی که برای جلب اعتماد دیگران، حتی در نگاه کردن دقت می‌کنند؛

دانشجویانی که دغدغه‌ی وفای به عهد، آن‌ها را شب از خواب بیدار می‌کند؛

تشکر و قدردانی:

ستایش می‌کنم خداوند را که برآرنده‌ی عالم و آفریننده‌ی بنی آدم، که پادشاهی او را سزاست و فرمانروایی او را رواست.

این پژوهش مرهون و مدیون زحمات و تلاش‌ها و راهنمایی‌های دلسوزانه اساتید بزرگواری است که حقیر افتخار شاگردی آن‌ها را داشته‌ام به ویژه اساتید ارجمند آقایان، **دکتر رضا قندهاری و دکتر پیمان نادری** که حق راهنمایی را تمام کردند و به خاطر رهنمودهای بی‌دریغشان کمال تشکر را دارم.

در نهایت از تمامی دوستانی که به هر نحو در انجام این پژوهش مرا یاری رسانده‌اند و در این کوتاه سخن مجال آوردن نام تک تک آن‌ها نیست کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

کمیت و کیفیت انرژی الکتریکی تولید شده در یک کشور معیاری مناسب برای سنجش میزان پویایی صنعتی آن کشور می‌باشد. بارهای غیرخطی با کشیدن جریان هارمونیکی و در نتیجه مخدوش کردن ولتاژ باعث بروز مشکلات در زمینه کیفیت توان می‌شوند. استفاده از فیلترهای غیرفعال، فعال و ترکیبی، معمول‌ترین روش برای تقلیل هارمونیک‌های شبکه و بهبود کیفیت توان است. لذا، به منظور بررسی در بهبود اعوجاجات و جبران‌سازی هارمونیکی، ساختارهای مختلف فیلترهای فعال ترکیبی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند.

در این تحقیق، چند ساختار پیشنهادی از فیلتر قدرت فعال ترکیبی موازی که برای حذف گروهی هارمونیک‌های جریان و همچنین جبران توان راکتیو در سیستم‌های قدرت ولتاژ متوسط یا بالا مناسب است، معرفی شده است. براساس ساختارهای متداول فیلترهای ترکیبی موازی، ساختارهایی پیشنهادی شامل یک مدار رزونانس سری با یک اندوکتانس با مقدار کم در حالت موازی با فیلتر قدرت فعال می‌باشد. به عبارت دیگر طراحی فیلتر غیرفعال ساختار ترکیبی به‌گونه‌ای است که اکثریت جریان راکتیو اصلی بجای عبور از فیلتر فعال قدرت از اندوکتانس اضافی عبور می‌کند که باعث کاهش جریان عبوری از تجهیزات کلیدزنی مبدل قدرت می‌شود. همچنین، به دلیل طراحی خاص فیلتر غیرفعال در این ساختار پیشنهادی، فیلتر فعال قدرت نیاز به تحمل ولتاژ هارمونیکی نیست. بنابراین نتیجه و مزیت این ویژگی‌ها این است که ولت-آمپر فیلتر فعال قدرت به طور محسوسی کاهش یافته است.

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، کارایی مؤثر فیلتر قدرت فعال ترکیبی موازی مورد نظر را در حذف هارمونیک‌های جریان، جبران توان راکتیو در ولتاژهای بالا ، بهبود فیلترینگ فیلترهای غیرفعال، قابلیت اطمینان فیلترهای غیرفعال و همچنین جلوگیری از رزونانس‌های سری و موازی بین فیلتر غیرفعال و امپدانس سیستم را بخوبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای قدرت فعال موازی ترکیبی، جبران‌سازی و تضعیف هارمونیک، ولت-آمپر فیلتر فعال، بهبود فیلترینگ، قابلیت اطمینان و رزونانس‌های سری و موازی

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه‌ای بر موضوع ۲

۱-۲- فیلترهای هارمونیکی ۳

۱-۲-۱- تاریخچه فیلترهای هارمونیکی ۳

۱-۲-۲- انواع فیلترهای هارمونیکی ۸

۱-۲-۲-۱- فیلترهای غیرفعال ۸

۱-۲-۲-۲- فیلترهای فعال ۱۰

۱-۲-۲-۳- فیلترهای ترکیبی ۱۲

۱-۳- بیان مسأله ۱۴

۱-۴- اهمیت و ضرورت تحقیق ۱۵

۱-۵- اهداف پروژه ۱۶

۱-۶- ساختار گزارش ۱۶

فصل دوم: ساختارهای مختلف فیلترهای هارمونیکی ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۹

۲-۲- ساختار فیلترهای غیرفعال ۱۹

۲-۲-۱- معرفی شاخص‌های مهم برای ارزیابی اثربخشی فیلتر غیرفعال ۲۲

۲-۳- ساختار فیلترهای فعال ۲۵

۲-۳-۱- فیلتر فعال موازی ۲۵

۲-۳-۱-۱- استراتژی جبران‌سازی ۲۷

۲-۳-۲- فیلترهای فعال سری ۲۸

۲-۳-۲-۱- اصول جبران‌سازی ۲۹

۲-۴- تقسیم‌بندیهای مختلف فیلتر فعال ترکیبی ۳۰

۲-۴-۱- تقسیم‌بندی بر اساس توپولوژی ۳۱

۲-۴-۱-۱- ترکیب فیلتر قدرت فعال سری با فیلتر موازی غیرفعال (SAPPF) ۳۲

۲-۴-۱-۲- ترکیب فیلتر قدرت فعال موازی با فیلتر موازی غیر فعال (PPPAF) ۳۷

۲-۴-۱-۳- ترکیب فیلتر قدرت فعال به‌صورت سری با فیلتر موازی غیرفعال (PPAF) ۳۸
۲-۴-۲- تقسیم‌بندی بر اساس مشخصات مبدل ۴۰
۲-۴-۳- تقسیم‌بندی بر اساس منبع تغذیه ۴۲
۲-۴-۴- تقسیم‌بندی بر اساس نوع فیلتر غیرفعال ۴۳
۲-۴-۴-۱- معرفی فیلتر غیرفعال از نوع تزریقی ۴۵
فصل سوم: راهبردهای کنترلی در فیلترهای ترکیبی ۵۴
۳-۱- مقدمه ۵۵
۳-۲- کنترل فیلتر فعال ترکیبی ۵۵
۳-۳- تشخیص سیگنال ۵۶
۳-۴- بلوک شناسایی‌کننده هارمونیک در فیلترهای ترکیبی ۵۶
۳-۴-۱- روش‌های حوزه فرکانس ۵۷
۳-۴-۲- روش‌های حوزه زمان ۵۷
۳-۴-۲-۱- روش تئوری توان لحظه‌ای برای تولید سیگنال مرجع (روش pq) ۵۸
۳-۴-۲-۲- روش قاب مرجع همزمان (روش dq) ۶۰
۳-۴-۲-۳- روش ترکیبی تئوری توان لحظه‌ای و قاب مرجع همزمان (روش dq-pq) ۶۱
۳-۴-۳- تنظیم ولتاژ شین DC ۶۲
۳-۴-۴- تنظیم‌کننده جریان مرجع ۶۳
۳-۴-۴-۱- کنترل‌کننده هیسترزیس ۶۴
۳-۵- نتیجه‌گیری ۶۵
فصل چهارم: ساختاری نوین برای فیلترهای ترکیبی ۶۶
۴-۱- مقدمه ۶۷
۴-۲- ساختار فیلتر ترکیبی اولیه ۶۸
۴-۲-۱- اصول جبران‌سازی و ظرفیت فیلتر ترکیبی اولیه ۶۹
۴-۳- فیلتر فعال ترکیبی پیشنهادی ۷۲
۴-۴- فیلتر غیرفعال ۷۳
۴-۴-۱- طراحی بهینه پارامترهای فیلتر غیرفعال با الگوریتم ژنتیک ۷۵

۴-۴-۲- توابع هدف و قیدهای مساله ۷۷
۴-۵- ظرفیت فیلتر فعال (APF) ۷۸
۴-۵-۱- فرکانس اصلی ۷۸
۴-۵-۲- فرکانس‌های هارمونیکی ۷۹
۴-۶- اصول عملکرد و جبران‌سازی ۸۰
۴-۷- نتایج شبیه‌سازی ۸۲
۴-۷-۱- جریان هارمونیکی جاری از بار به سمت منبع ۸۲
۴-۷-۲- جریان هارمونیکی جاری از منبع به سمت فیلتر غیرفعال ۸۴
۴-۷-۳- بهبود جریان شبکه قدرت و اعوجاج هارمونیکی کل ۸۵
۴-۸- مقایسه فنی و اقتصادی ساختارها ۸۹
۴-۹- نتیجه‌گیری ۹۱
فصل پنجم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات ۹۳
۵-۱- جمع‌بندی ۹۴
۵-۲- ارائه پیشنهادات ۹۵
مراجع ۹۶

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ مخدوش شدن ولتاژ به علت وجود بار غیرخطی ۲
شکل ۲-۱ ساختارهای مختلف فیلترهای غیرفعال موازی[۲۷] ۱۹
شکل ۲-۲ پاسخ فرکانسی انواع فیلترهای غیرفعال موازی[۲۷] ۲۰
شکل ۲-۳ نمودار محاسبه شاخص پاسخ فرکانسی[۲۷] ۲۳
شکل ۲-۴ پیکر بندی یک فیلتر فعال موازی[۳۷] ۲۵
شکل ۲-۵ مبدل‌های PWM برای فیلترهای فعال موازی (الف).اینورتر منبع جریان (ب). اینورتر منبع ولتاژ[۳۷] ۲۶
شکل ۲-۶ فیلتر فعال موازی[۳۸] ۲۷
شکل ۲-۷ مدار معادل تک‌فاز یک فیلتر فعال موازی[۳۸] ۲۸
شکل ۲-۸ پیکربندی فیلتر فعال سری[۳۸] ۲۹
شکل ۲-۹ مدار معادل تک‌فاز فیلتر فعال سری[۳۸] ۳۰
شکل ۲-۱۰تقسیم‌بندی فیلترهای فعال ترکیبی[۴۰] ۳۱
شکل ۲-۱۱ ساختاری از فیلتر فعال قدرت ترکیبی، ترکیب فیلتر قدرت فعال سری با فیلتر موازی غیرفعال[۴۰] ۳۲
شکل ۲-۱۲مدار معادل تک فاز مربوط به فیلتر ترکیبی فعال سری با فیلتر موازی غیرفعال[۳۸] ۳۳
شکل ۲-۱۳نسبت جریان منبع به جریان بار[۱۵] ۳۵
شکل ۲-۱۴جریان منبع حاصل از جریان بار[۱۵] ۳۶
شکل ۲-۱۵ ساختاری از فیلتر فعال قدرت ترکیبی، ترکیب فیلتر قدرت فعال موازی با فیلتر موازی غیرفعال[۴۰] ۳۷
شکل ۲-۱۶ مدار معادل تک‌فاز فیلتر ترکیبی فعال موازی با فیلتر موازی غیرفعال[۳۸] ۳۸
شکل ۲-۱۷ ساختاری از فیلتر فعال قدرت ترکیبی، ترکیب فیلتر قدرت فعال به‌صورت سری با فیلتر موازی غیرفعال[۴۰] ۳۹
شکل ۲-۱۸ مدار معادل تک‌فاز فیلتر ترکیبی، ترکیب فیلتر قدرت فعال به‌صورت سری با فیلتر موازی غیرفعال[۳۸] ۳۹
شکل ۲-۱۹فیلتر فعال قدرت ترکیبی با اینورتر چندسطحی[۴۰] ۴۱
شکل ۲-۲۰ فیلترهای قدرت فعال ترکیبی (الف). تکفاز دو سیمه، (ب). سه فاز سه سیمه، (پ). سه فاز چهار سیمه[۴۰] ۴۳
شکل ۲-۲۱ تقسیم‌بندی‌فیلترهای ترکیبی براساس فیلتر غیرفعال به کار برده شده: (الف). LC (ب). رزونانس موازی (پ). RLC (ت). LCL (ث). نوع تزریقی[۴۰] ۴۵
شکل ۲-۲۲ مدار معادل تک‌فاز فیلتر فعال قدرت ترکیبی[۲۱] ۴۶
شکل ۲-۲۳ مدار تک‌فاز هارمونیکی شکل ۲-۲۲. (الف). مدار تکفاز با در نظرگرفتن iLh به تنهایی(ب). مدار معادل تکفاز با امپدانس هارمونیکی[۲۱] ۴۷
شکل ۲-۲۴ توانایی جلوگیری از رزونانس موازی بین فیلتر غیرفعال قدرتs و شبکه قدرت. (الف). فقط فیلتر غیرفعال قدرت استفاده شده است. (ب). فیلتر غیرفعال قدرت و فیلتر فعال قدرت هر دو با هم استفاده شدهاند[۲۱] ۴۸
شکل ۲-۲۵ توانایی بهبود اثر فیلترینگ فیلتر فیلتر غیرفعال قدرت[۲۱] ۴۹

شکل ۲-۲۶ توانایی بالا بردن نیرومندی سیستم. (الف). فقط فیلتر غیرفعال قدرتs کار میکند. (ب). فیلتر غیرفعال قدرتs و فیلتر فعال قدرت هر دو با هم کار میکنند.[۲۱] ۵۰
شکل ۲-۲۷ نتایج شبیه‌سازی (الف). شکل‌موج جریان شبکه بدون فیلتر (ب). شکل موج جریان شبکه هنگامی‌که فقط فیلتر غیرفعال قدرت استفاده شده است (ت). شکل موج جریان شبکه هنگامیکه فیلتر غیرفعال قدرت و فیلتر فعال قدرت با هم استفاده شوند[۲۱] ۵۱
شکل ۲-۲۸ نتایج مقایسه ظرفیت فیلتر فعال قدرت. (الف). جریان عبوری از فیلتر فعال قدرت در ساختار آقای لیو (ب). جریان عبوری از فیلتر فعال قدرت در ساختار مرجع[۵۴] ۵۲
شکل ۳-۱ بلوک دیاگرام کلی فیلتر فعال ترکیبی با قسمت کنترلی ۵۶
شکل ۳-۲ اساس تبدیل کلارک (تبدیل αβ0)[۵۷] ۵۸
شکل ۳-۳نمودار بلوکی روش تئوری توان راکتیو لحظه‌ای (روشpq) ۵۹
شکل ۳-۴ جریان مرجع جبران‌کننده تولید شده با استفاده از روش pq ۵۹
شکل ۳-۵ نمودار بلوکی روش قاب مرجع همزمان (روش dq) ۶۰
شکل ۳-۶ جریان مرجع جبران‌کننده تولید شده با استفاده از روش dq ۶۱
شکل ۳-۷ ساختار کنترلی روش ترکیبی dq-pq ۶۱
شکل ۳-۸ جریان مرجع جبران‌کننده تولید شده با استفاده از روش dq-pq ۶۲
شکل ۳-۹ کنترل‌کننده ولتاژ لینک DC ۶۳
شکل ۳-۱۰ ساختار کنترل‌کننده هیسترزیس[۵۸] ۶۴
شکل ۳-۱۱(*Ic). سیگنال مرجع. (Ic). سیگنال جبرانکننده ۶۵
شکل ۴-۱ساختار فیلتر قدرت فعال ترکیبی قدیمی[۴۰] ۶۸
شکل ۴-۲مدار معادل فیلتر فعال ترکیبی اولیه (الف) در فرکانس اصلی f1، (ب) در فرکانس هارمونیکی fh [۱۶] ۷۰
شکل ۴-۳. ظرفیت فیلتر فعال استفاده شده در فیلتر فعال ترکیبی. (الف). ولتاژ دو سر فیلتر فعال. (ب). جریان عبوری از فیلتر فعال[۵۴] ۷۱
شکل ۴-۴ توپولوژی سیستم فیلتر فعال قدرت ترکیبی موازی پیشنهادی ۷۳
شکل ۴-۵ فیلتر غیرفعال مورد استفاده در توپولوژی فیلتر فعال قدرت ترکیبی ۷۵
شکل ۴-۶ توپولوژی فیلتر فعال قدرت ترکیبی در فرکانس اصلی ۷۹
شکل ۴-۷ توپولوژی فیلتر فعال قدرت ترکیبی در فرکانسهای هارمونیکی ۸۰
شکل ۴-۸ مدار معادل تکفاز سیستم. (الف) مدار معادل تکفاز. (ب) مدار معادل تکفاز هارمونیکی ۸۱
شکل ۴-۹مشخصه دامنه برحسب فرکانس iSh/iLh ۸۳
شکل ۴-۱۰نسبت I_S/U_S بر حسب فرکانس به ازای مقادیر مختلف K ۸۴
شکل ۴-۱۱نتایج شبیه‌سازی (الف). شکل‌موج جریان شبکه بدون فیلترگذاری. (ب). شکلموج جریان شبکه وقتیکه فقط فیلتر غیرفعال استفاده شده است. (ج). شکل‌موج جریان شبکه وقتی‌که هم فیلتر غیرفعال و هم فیلتر فعال استفاده شده است. ۸۶
شکل ۴-۱۲طیف هارمونیکی جریان شبکه. (الف). طیف هارمونیکی جریان بدون فیلترگذاری. (ب). طیف هارمونیکی جریان شبکه وقتی‌که فقط فیلتر غیرفعال استفاده شده است. (ج). طیف هارمونیکی جریان شبکه وقتی که هم فیلتر غیرفعال و هم فیلتر فعال استفاده شده است. ۸۷
شکل ۴-۱۳دیاگرام بار اعوجاجات هارمونیکی جریان منبع در حالت‌های بدون جبران‌سازی، جبران‌سازی فقط با فیلتر غیرفعال و جبران‌سازی با ترکیب فیلترهای غیرفعال و فعال ۸۸

شکل ۴-۱۴ مقایسه نتایج مربوط به ظرفیت فیلتر فعال. (الف). جریان خروجی از فیلتر فعال در ساختار پیشنهادی. (ب). جریان خروجی از فیلتر فعال در ساختار مرجع [۵۴]. ۹۰
شکل ۴-۱۵دیاگرام بار برای مقایسه تضعیف هارمونیک‌ها بین ساختارهای مختلف. (الف). ساختار ارائه شده در مقاله [۲۱]. (ب). ساختار پیشنهادی..... ۹۱

فهرست جداول

جدول ۴-۱ مقادیر بهینه برای عناصر فیلتر غیرفعال ۷۸
جدول ۴-۲ اعوجاجات حریان شبکه قدرت ۸۹

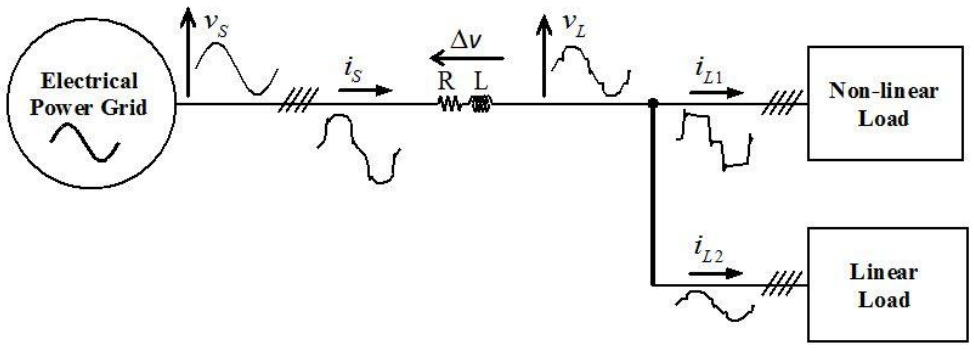
فهرست علائم اختصاری

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه‌ای بر موضوع

امروزه می‌توان کمیت و کیفیت انرژی الکتریکی[1] تولید شده در یک کشور را معیاری مناسب برای سنجش میزان پویایی صنعتی آن کشور در نظر گرفت. آنچه در دنیای صنعتی کنونی برای ما بسیار مهم است، کیفیت بهتر برای عرضه و برآوردن رضایت مصرف‌کنندگان می‌باشد. بارهای غیرخطی با کشیدن جریان هارمونیکی و در نتیجه مخدوش کردن ولتاژ از جمله مشکلات و مسائل در تأمین این اهداف هستند. با پیشرفت در عرصه‌ی تولید عناصر کلیدزنی نیمه‌هادی‌های جدید با مشخصه‌ی کلیدزنی سریع‌تر و به کارگیری روزافزون مبدل‌های الکترونیک قدرت و بارهای غیرخطی، هارمونیک-های تزریق شده به شبکه و اثرات آن‌ها اهمیت بیشتری یافته است. جریان‌های هارمونیکی در مسیرهای با امپدانس کم یا در شرایط تشدید، در سیستم‌های قدرت انتشار یافته و می‌توانند مشکلاتی را برای مصرف‌کننده‌هایی که خود تولیدکننده‌ی هارمونیک نیستند، بوجود آورند. این مسئله در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است[۱].



شکل ۱-۱ مخدوش شدن ولتاژ به علت وجود بار غیرخطی

با توجه به اثرات مخرب هارمونیک‌ها استانداردهایی بین‌المللی برای محدود نگاه‌داشتن هارمونیک-ها نظیر IEEE519-1992، IEC1000-3-2 و IEC1000-3-4 و غیره وضع گردید و روش‌های گوناگونی

1- Power quality

نیز برای مقابله با این هارمونیک‌ها ارائه شده است. استاندارد IEEE-519 مشخص می‌کند که هر مصرف‌کننده با توجه به میزان مصرف بار، جریان اتصال کوتاه و سطح ولتاژ سیستم می‌تواند تنها مقدار معینی جریان هارمونیکی به سیستم تغذیه تزریق کند. وظیفه شرکت‌های توزیع برق این است که با توجه به تجهیزات متصل به نقطه اتصال مشترک[1] (PCC)، کیفیت ولتاژ را در حد مطلوب نگه دارند[۱].

بسیاری از مهندسان برق در مورد توانایی پذیرش اعوجاج هارمونیکی[2] توسط سیستم‌های قدرت به بحث و تبادل نظر پرداختند و روش‌های مختلفی برای حذف هارمونیک‌های شبکه ارائه گردید. استفاده از فیلترها، معمول‌ترین روش برای تقلیل هارمونیک‌های[3] شبکه است. برخلاف دیگر روش‌ها، فیلترها کارایی ساده و اقتصادی‌تر همراه با فواید زیاد دیگری ارائه می‌دهند. در این عرصه، فیلترهای فعال جبران‌سازی هارمونیکی را به نحو مؤثری انجام داده و عملکرد سیستم را نیز بهبود می‌بخشد. در این پایان‌نامه ضمن معرفی آخرین روش‌های دست‌یافته برای جبران‌سازی هارمونیکی، یک ساختار پیشنهادی از فیلترهای فعال ترکیبی موازی برای حذف گروهی هارمونیک‌های جریان برای کاربرد در توان‌های بالا ارائه شده است.

۱-۲- فیلترهای هارمونیکی

۱-۲-۱- تاریخچه فیلترهای هارمونیکی

یکی از منابع تولید هارمونیک در سیستم‌های قدرت، سیستم خطوط انتقال ولتاژ بالای مستقیم[4] (HVDC) است. این روش برای انتقال انرژی الکتریکی با جریان مستقیم توسط مهندس سویسی Rene Thury ارائه شد. این سیستم در سال ۱۸۸۹ میلادی در ایتالیا در شرکت Acquedotto de Ferrari-Galliera مورد استفاده قرار گرفت[۲]. هارمونیک‌های تولیدی بوسیله این سیستم و اعوجاجات ناشی از آن و تأثیرات جدی برروی سیستم‌های انتقال و توزیع به یک نگرانی بزرگ برای مهندسین برق تبدیل شده بود که تا اینکه اولین فیلتر غیرفعال در سال ۱۹۴۰ توسط F.Nebeker معرفی و نصب گردید[۳]. در طی سال‌های زیادی، روش معمول در جبران‌سازی هارمونیکی استفاده از فیلترهای غیرفعال بوده است. در کنار مزایایی همچون سادگی، هزینه پایین و بازده بالا، مشکلاتی از قبیل حذف هارمونیک‌های خاص، وابستگی مشخصه فیلترینگ به امپدانس منبع، امکان ایجاد

1- Point of common coupling
2- Harmonic distortion
3- Harmonic attenuation
4- High voltage direct current

رزونانس سری[1] و موازی[2] بین فیلتر غیرفعال و امپدانس منبع و شبکه و نیز حجم بزرگ المان‌های آن‌ها در رابطه با استفاده از فیلترها وجود دارد. از این رو برای حل مشکلات موجود در استفاده از فیلترهای غیرفعال راه‌حل‌های دینامیکی و قابل تنظیم مطرح شدند.

از زمانی‌که الکترونیک‌قدرت در اواخر دهه ۱۹۶۰ شروع به توسعه کرد، بارهای غیرخطی که جریان غیرسینوسی مصرف می‌کنند، به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافتند. در بعضی موارد، این بارها درصد بسیار بالایی از کل بار را تشکیل می‌دهند. بسیاری از مهندسان برق در مورد توانایی پذیرش اعوجاج هارمونیکی توسط سیستم‌های قدرت به بحث و تبادل نظر پرداختند. از اواخر دهه ۱۹۶۰ تا اوایل دهه ۱۹۷۰ تعدادی مقاله در زمینه این‌که چه چیزی را می‌توان به عنوان اصل اساسی جبران توان راکتیو در نظر گرفت، منتشر شد[۴و۵]. نویسندگان [۴] تعدادی ایده اساسی نظیر "... جبران توان دارای اعوجاج تاکنون ناشناخته مانده است..." را مطرح کردند. T. Fukao و نویسندگان همکار او در مرجع [۵] گفته‌اند که "... با اتصال یک منبع توان راکتیو بصورت موازی به بار و با کنترل آن به طریقی که توان راکتیو بار تأمین شود، شبکه قدرت تنها توان اکتیو را تأمین خواهد کرد. در نتیجه انتقال ایده‌آل توان ممکن خواهد بود."

با پیشرفت در عرصه جبران توان راکتیو به صورت لحظه‌ای با استفاده از جبران‌کننده‌های موازی، ایده‌هایی نیز توسط دانشمندان مبنی بر اینکه علاوه بر توان راکتیو، هارمونیک‌های شبکه را به صورت لحظه‌ای نیز می‌توان جبران کرد که اصول و قواعد اساسی فیلترهای فعال در سال ۱۹۷۱ توسط دانشمندان H. Sasaki و T. Machida مطرح گردید[۶]. ولی در سال ۱۹۷۶، F. Harashima و نویسندگان همکار او در مرجع [۷] می‌توان گفت برای اولین بار از عبارت "توان راکتیو لحظه‌ای[3]" برای یک مدار تکفاز استفاده کردند. در همان سال L. Gyugyi و E. C. Strycula برای اولین بار از عبارت " فیلترهای توان اکتیو ac" استفاده کردند و مفهوم فیلترهای فعال با اینورترهای PWM[4] که از ترانزیستورهای قدرت[5] استفاده می‌کردند را منتشر کردند. با این حال، به دلیل نبود راهکار عملیاتی ساخت شکل موج سینوسی منبع جریان، هیچ توجه‌ای به فیلترهای فعال سری نشد و هیچ مقاله‌ای حاکی از انجام کار آزمایشگاهی به چاپ نرسید[۸].

در ابتدا فیلترهای فعال موازی برای حذف هارمونیک‌های تولید شده توسط مبدل‌های تریستوری[6] و اینورترهای[7] استفاده شده در سیستم‌های انتقال HVDC ارائه شدند. اما به دلیل موجود نبودن

1- Series resonance
2- Parallel resonance
3- Continuos reactive power
4- Pulse width modulation
5- Transistors power
6- Thyristor converters
7- inverters

تجهیزات سوئیچینگ[1] توان-بالا و سرعت-بالا، در سال‌های ۱۹۷۰، در سیستم‌های قدرت واقعی این تجهیزات امکان ظهور نداشتند . سپس در سال ۱۹۷۷، N. Mohan و همکاران یک ابزار عملیاتی برای تزریق جریان جبرانی، که با استفاده از اینورترهای تریستوری کموتاسیون طبیعی با طراحی خاص مدار پسیو برای کاهش ظرفیت ولتاژ اصلی فیلتر فعال کار می‌کند، معرفی کردند[۹]. با این حال اینورترهای تریستوری هارمونیک‌های مرتبه بالای نامطلوب تولید می‌کنند که کاربرد عملی ابزار را تضعیف می کنند.

با توسعه و پیشرفت چشمگیر در سرعت سوئیچینگ و تحول در تکنولوژی ساخت تجهیزات نیمه-هادی قدرت در سال ۱۹۸۰، فیلترهای فعال قدرت با استفاده از اینورترهای PWM، با تمرکز بر کاربردهای عملی آن‌ها در سیستم‌های قدرت واقعی، مورد مطالعه واستفاده قرار گرفتند[۱۰-۱۲]. برخی از پژوهشگران که در این راستا مقاله ارائه دادند عبارتند از:

- در سال ۱۹۸۳، H. Kawahira و همکارانش مقاله‌ای در مورد فیلترهای فعال قدرت با مبدل-های PWM ، ارائه دادند[۱۰].
- در سال ۱۹۸۶، H. Akagi و همکارانش یک روش کنترلی برای فیلترهای فعال قدرت که در آنها از مبدل‌های PWM چند سطحی منبع-ولتاژی استفاده شده بود، ارائه دادند[۱۱].
- در سال ۱۹۸۷، M. Takeda و همکاران، نیز از فیلترهای فعال قدرت برای حذف هارمونیک-های جریان بهره بردند[۱۲].
- همچنین در سال ۱۹۸۷، F. Z. Peng و همکارانش ، ساختاری ارائه دادند که در این ساختار، مدار قدرت آن شامل ترکیب چهار مبدل منبع ولتاژ به صورت سری می‌باشد[۱۳].
- در سال ۱۹۸۸، A. Nakajima و همکارانش یک پیکره‌بندی جدید از فیلترهای هارمونیکی فعال که شامل یک اینورتر فرکانس بالا و مدار سری رزونانسی LC تنظیم شده در فرکانس اصلی بود، برای حل اعوجاجات هارمونیکی در سیستم توزیع با قیمت پایین و بازده بالا معرفی کردند. در این ساختار شاخه رزونانسی باعث کاهش شدید در ولتاژ ترمینال اینورتر می‌شود[۱۴].

با توجه به اینکه فیلترهای فعال برای کاهش مشکلات ناشی از فیلترهای غیرفعال توسعه پیدا کردند و جبران‌سازی هارمونیکی را به نحو مؤثری انجام داده و عملکرد سیستم را نیز بهبود می‌بخشد، ولی استفاده تنها از فیلترهای فعال یک راه‌حل پرهزینه محسوب می‌شود، چرا که به مبدل‌هایی با مقدار نامی نسبتاً بزرگ احتیاج است. همچنین ممکن است که از لحاظ اقتصادی پیاده‌سازی مبدل

1- Switching devise