به نام خدا

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

# کاربرد کنترل پیش‌بین با حالات محدود در فیلترهای اکتیو هیبرید موازی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

**مهرداد چپری‌ها**

استاد راهنما

**دکتر حمیدرضا کارشناس**

۱۳۸۸

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای مهرداد چپری‌ها

تحت عنوان

# کاربرد کنترل پیش‌بین با حالات محدود در فیلترهای اکتیو هیبرید موازی

در تاریخ ۸۸/۲/۱۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر حمیدرضا کارشناس |
| ۲- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر مهدی معلم |
| ۳- استاد داور | دکتر سید محمد مدنی |
| ۴- استاد داور | دکتر جعفر قیصری |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر علیمحمد دوست‌حسینی |

بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های ارزنده‌ی دکتر حمیدرضا کارشناس از دوره‌ی کارشناسی تا کنون سپاسگزاری نموده و کمک و پشتیبانی ایشان را در قسمت‌های مختلف تئوری و عملی این پایان‌نامه ارج نهم. همچنین از همه‌ی اساتید محترمی که در طول تحصیل در محضرشان بوده‌ام سپاسگزاری می‌نمایم. به طور خاص از دکتر سید محمد مدنی به دلیل دلگرمی‌هایشان برای تحصیل مدارج علمی بالاتر و از دکتر اکبر ابراهیمی برای پشتیبانیشان در مراحل مختلف تحصیل تشکر می‌نمایم. از دکتر مهدی معلم که زحمت مشاوره‌ی این پایان‌نامه را تقبل کردند هم سپاسگزاری می‌نمایم. از همراهی دوستان و کمک‌های دانسته و نادانسته‌ی ایشان نیز در سال‌های مختلف مخصوصاً در مراحل مختلف این تحقیق کوچک کمال تشکر را دارم. از آقایان هادی ثقفی، محمدصادق گلسرخی و مسعود داوری برای طراحی و ساخت بردهای الکترونیکی و مشاوره در قسمت‌هایی از کار ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی قدردانی می‌کنم. همچنین از راهنمایی‌ها و مشاوره‌های دوستان دیگر در مرکز پژوهشی قدرت مخصوصاً آقایان مجتبی بهادری و مهدی نیرومند نیز سپاسگزاری می‌نمایم.

**کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

تقدیم به:

پدر و مادرم،

که جبران محبتشان امکان ناپذیر است.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ..... ۱
**فصل اول: مقدمه**
۱-۱ آلودگی‌های هارمونیکی در شبکه ..... ۳
۱-۲ روش‌های کنترل هارمونیک‌ها ..... ۴
۱-۳ فیلترهای قدرت ..... ۴
۱-۳-۱ فیلترهای پسیو ..... ۴
۱-۳-۲ فیلترهای اکتیو ..... ۵
۱-۳-۳ ترکیب فیلترهای اکتیو با پسیو یا فیلترهای هیبرید ..... ۶
۱-۴ هدف و اهمیت بحث این پایان‌نامه ..... ۶
۱-۵ روند ارائه مطالب ..... ۷
**فصل دوم: معرفی دو نوع پایه‌ای فیلترهای هیبرید**
۲-۱ چرا فیلترهای هیبرید؟ ..... ۹
۲-۲ تاریخچه‌ی فیلترهای اکتیو و فیلترهای هیبرید ..... ۱۲
۲-۳ فیلتر هیبرید نوع ۱ ..... ۱۴
۲-۳-۱ کنترل فیلتر نوع ۱ با منبع ولتاژ کنترل شده با جریان هارمونیکی ..... ۱۶
۲-۴ فیلتر هیبرید نوع ۲ ..... ۱۷
۲-۴-۱ کنترل فیلتر نوع ۲ با منبع ولتاژ کنترل شده با جریان هارمونیکی ..... ۱۹
۲-۴-۲ کنترل فیلتر نوع ۲ با تبدیل مبدل به سلف مجازی ..... ۱۹
۲-۴-۳ کنترل فیلتر نوع ۲ با کنترل مستقیم جریان ..... ۲۰
۲-۵ برخی دیگر از ساختارهای فیلترهای هیبرید ..... ۲۲
۲-۶ طراحی شاخه‌ی پسیو در فیلترهای هیبرید ..... ۲۳
۲-۷ مقایسه‌ی فیلترهای هیبرید نوع ۱ و ۲ ..... ۲۵
۲-۷-۱ شبیه‌سازی فیلتر هیبرید نوع ۱ ..... ۳۰
۲-۷-۲ شبیه‌سازی فیلتر هیبرید نوع ۲ ..... ۳۱
۲-۷-۳ انتخاب فیلتر برتر ..... ۳۴
**فصل سوم: کنترل پیش‌بین با حالات محدود و کاربرد آن در کنترل جریان**
۳-۱ کنترل پیش‌بین مدلی ..... ۳۷
۳-۲ کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود برای بار تک‌فاز ..... ۴۱
۳-۲-۱ نتایج عملی کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی معمول PI برای مبدل تک‌فاز ..... ۴۴
۳-۳ کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود برای بار سه‌سیمه‌ی سه‌فاز ..... ۵۰
۳-۳-۱ نتایج عملی کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود برای مبدل سه‌فاز ..... ۵۴

**فصل چهارم: طراحی کنترل‌کننده‌ی مستقیم جریان برای فیلتر هیبرید نوع ۲**


۴-۱ روش‌های جداسازی هارمونیک‌ها ۶۰
۴-۱-۱ فیلتر کردن به کمک دستگاه‌های سنکرون گردان ۶۰
۴-۱-۲ فیلترکردن به کمک تئوری توان‌های لحظه‌ای ۶۲
۴-۲ سیستم آزمون ۶۶
۴-۳ مفهوم کنترل مستقیم جریان فیلتر هیبرید نوع ۲ ۶۸
۴-۴ کنترل جریان هارمونیکی ۶۹
۴-۴-۱ کنترل جریان هارمونیکی با کنترل‌کننده‌ی تناسبی ۷۰
۴-۴-۲ کنترل جریان هارمونیکی با کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین با حالات محدود ۷۱
۴-۵ کنترل جریان کامل ۷۳
۴-۵-۱ کنترل جریان کامل با کنترل‌کننده‌ی تناسبی ۷۵
۴-۵-۲ کنترل جریان کامل با کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین با حالات محدود ۷۶
۴-۶ بررسی نتایج به دست آمده از روش‌های کنترل مستقیم جریان ارائه شده ۷۷
۴-۷ کنترل یکپارچه‌ی پیش‌بین با حالات محدود ۷۹


**فصل پنجم: نتایج عملی**


۵-۱ مدل سیستم آزمایشگاهی ۸۶
۵-۲ نتایج شبیه‌سازی مدل ۸۶
۵-۲-۱ کنترل متداول ۸۷
۵-۲-۲ کنترل جریان کامل پیش‌بین با حالات محدود ۸۷
۵-۲-۳ کنترل یکپارچه‌ی پیش‌بین با حالات محدود ۸۸
۵-۳ نتایج عملی مدل ۸۹
۵-۳-۱ کنترل جریان کامل پیش‌بین با حالات محدود ۹۰
۵-۳-۲ کنترل یکپارچه‌ی پیش‌بین با حالات محدود ۹۳


**فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها**


۶-۱ خلاصه‌ی کارهای انجام شده و نتایج آن‌ها ۹۷
۶-۲ بررسی روش‌های کنترل ارائه شده و پیشنهادها ۱۰۰
پیوست: مشخصات سخت‌افزارهای استفاده شده ۱۰۲
پ-۱- مشخصات واحد قدرت هوشمند PM25RSB120 ۱۰۲
پ-۲- مشخصات برد ارزیابی OLIMEX TMS320-P28016 ۱۰۳
پ-۳- مشخصات برد ارزیابی Spectrum Digital eZdsp™ F2812 ۱۰۴
پ-۴- تصویر دستگاه آزمایشگاهی ۱۰۵
مراجع ۱۰۶

**چکیده**

در این پایان‌نامه، پس از مطالعه‌ی اجمالی مشکلات هارمونیک‌ها و روش‌های مختلف رفع آن‌ها ، به بررسی فیلترهای هیبرید پرداخته می‌شود. فیلترگذاری، روش متداول کنترل و تضعیف هارمونیک‌ها می‌باشد. فیلترهای هیبرید نوع جدیدی از فیلترهای هارمونیکی هستند که از ترکیب فیلترهای پسیو و فیلترهای اکتیو ساخته شده‌اند. پس از معرفی انواع فیلترها و برخی روش‌های ترکیب آن‌ها، به جزئیات دو نوع متداول فیلترهای هیبرید می‌پردازیم و روش‌های کنترل ارائه شده برای هر کدام را معرفی می‌کنیم. سپس با روابط تئوریک و نیز به کمک مثالی از طریق شبیه‌سازی‌های زمانی مقایسه‌ای را بین این دو نوع مطرح می‌نماییم. علت رویکرد بیشتر به نوع موازی را نشان داده و بحث را با این نوع ادامه می‌دهیم. در مورد مسائل طراحی قسمت پسیو هم بررسی‌ای انجام می‌شود. از آن‌جا که هدف بیشتر فیلترهای موازی کنترل جریان است، کنترل جریان این نوع فیلتر مورد توجه قرار می‌گیرد. برای کنترل جریان، کنترل پیش‌بین با حالات محدود که کیفیت بسیار خوبی در کاربردهای مختلف الکترونیک قدرت و درایو از خود نشان داده است مورد توجه قرار می‌گیرد. سپس به معرفی روش کنترل پیش‌بین جریان با حالات محدود می‌پردازیم و نتایج عملی نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شده با استفاده از پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال (DSP) TMS320F28016 نمایش داده می‌شود. همچنین روش‌هایی برای رفع برخی عیوب این روش کنترل ارائه و در عمل پیاده‌سازی می‌شود. از آن‌جا که فیلترها قسمت مهمی از فیلترهای اکتیو را تشکیل می‌دهند، دو نوع متداول آن‌ها برای حذف تک فرکانس از محتوای سیگنال زمانی معرفی می‌گردد. سپس روش‌های کنترل جدیدی برای یکی از فیلتر هیبرید پرکاربردتر ارائه می‌گردد. یکی از این کنترل‌کننده‌ها، به صورت مستقیم سعی در کنترل جریان فیلتر می‌کند. در این روش به طور ساده با حذف مولفه‌ی اصلی از حلقه‌ی کنترل جریان، کنترل هارمونیک‌های جریان مستقل از مولفه‌ی اصلی صورت می‌گیرد به گونه‌ای که با توان کوچک قسمت اکتیو کنترل جریان‌های هارمونیکی به خوبی صورت گیرد. با اضافه کردن مولفه ی اصلی جریان فیلتر به حلقه‌ی کنترل جریان، روش کنترل جریان ارائه شده گسترش داده شده تا کیفیت بهتری با استفاده از کنترل‌کننده‌ی جریان پیش‌بین با حالات محدود به دست آید. با این کار امکان مقایسه با روش کنترل جریان موجود فراهم شده و سادگی روش ارائه شده نسبت به آن مشخص می‌گردد. استفاده از کنترل‌کننده‌ی دیجیتال ارائه شده، یکپارچه کردن کنترل‌کننده را مورد توجه قرار می‌دهد. برای این کار از تخمین جریان فیلتر و تئوری p-q لحظه‌ای استفاده می‌شود. با این کار مستقیما با توجه به مقادیر لحظه‌ای ولتاژها و جریان‌ها تصمیم کنترلی اتخاذ می‌شود. به علت یکپارچه شدن کنترل‌کننده در بسیاری از موارد کنترل بهتری نسبت به همه‌ی روش‌های دیگر به دست آمده است. پیش از نتیجه‌گیری و پیشنهادات، نتایج عملی پیاده‌سازی روش کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود و روش کنترل یکپارچه‌ی پیش‌بین با حالات محدود با استفاده از پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال TMS320F2812 ارائه شده و نزدیک بودن نتایج عملی با نتایج شبیه‌سازی نشان داده می‌شود. در بخش‌های عملی، توضیحات لازم برای چگونگی پیاده‌سازی دیجیتال روش‌های ارائه شده داده می‌شود.

کلمات کلیدی: ۱- فیلتر هیبرید قدرت ۲-کنترل پیش‌بین با حالات محدود ۳-پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال (DSP) ۴-کنترل یکپارچه ۵-تئوری p-q لحظه‌ای ۶-فیلتر کردن با دستگاه‌های گردان

# فصل اول
## مقدمه

گسترش سیستم‌های انتقال قدرت و پدیدار شدن ادوات جدید، مسائل تازه‌ای را در دنیای انتقال انرژی از تولیدکننده به مصرف‌کننده به وجود آورده است. در واقع انقلاب نیمه‌هادی‌ها باعث ایجاد مصرف‌کننده‌های نویی در سیستم‌های قدرت شده است. این بارها که عمدتاً شامل المان‌های نیمه‌هادی با مشخصه‌ی غیر خطی هستند، جریان‌های غیر سینوسی از شبکه اخذ می‌کنند. این جریان‌های غیر سینوسی و پریودیک از نقطه نظر ریاضی به مولفه‌های سینوسی با فرکانس‌های بالاتر تفکیک می‌گردد که در فرهنگ مهندسی برق با نام هارمونیک‌ها شناخته می‌شوند. این جریان‌ها به نوبه‌ی خود در شبکه منتشر شده و ولتاژهای هارمونیکی را به وجود می‌آورند.

وجود هارمونیک‌ها در شبکه باعث اختلالات و مشکلات زیادی از قبیل گرم شدن ترانسفورمرها، اشغال ظرفیت خطوط، سوختن فیوز خازن‌ها، اختلالات رادیویی و عملکرد نادرست سیستم‌های حفاظتی و دستگاه‌های حساس می‌شود. به همین دلایل، کنترل و محدود کردن هارمونیک‌ها یکی از چالش‌های مهندسی برق می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای کنترل هارمونیک‌ها در شبکه وجود دارد مانند جلوگیری از ایجاد هارمونیک‌ها در محل، تغییر پاسخ فرکانسی شبکه، و منحرف کردن مسیر هارمونیک‌ها به گونه‌ای که در شبکه منتشر نشوند. فیلترهای پسیو، اکتیو و ترکیب آن‌ها برای کنترل هارمونیک‌ها به کار می‌روند. فیلترهای پسیو، نخستین نوع فیلترهای هارمونیکی هستند که طراحی و محاسن و معایب آن‌ها مورد مطالعه‌ی زیادی قرار گرفته است. نوع اکتیو فیلترها با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، معایب فیلترهای پسیو را نداشته و دارای قابلیت‌های زیادی برای

کنترل هارمونیک‌ها هستند. این قابلیت‌ها ناشی از سرعت بالای پاسخ مبدل‌های الکترونیک قدرتِ به کار رفته در ساخت آن‌ها می‌باشد. با این وجود، هزینه‌ی نسبتاً زیاد و مشکلات تکنولوژیکی ساخت مبدل‌ها، اجازه‌ی ساخت فیلترهای اکتیو را در هر توان و ولتاژی نمی‌دهد. با ترکیب دو نوع فیلتر اخیر، فیلترهای هیبرید[1] ساخته شده‌اند که دارای محاسن هر دو نوع فیلتر می‌باشند. در این پایان‌نامه برخی از مهمترین انواع این فیلترها بررسی، مقایسه و شبیه‌سازی می‌شوند. سپس یکی از انواع پرکاربردتر انتخاب و روش‌های کنترلی جدیدی برای آن ارائه می‌گردد. دو مورد از روش‌های کنترل ارائه شده پیاده‌سازی عملی شده و کیفیت عملکرد واقعی آن نشان داده می‌شود.

## ۱-۱ آلودگی‌های هارمونیکی در شبکه

استفاده از سیستم‌ها و بارهای مبتنی بر الکترونیک قدرت در شبکه‌های انتقال و در مصرف‌کننده‌ها در طول دو دهه‌ی گذشته به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. اغلب قریب به اتفاق این سیستم‌ها و بارها جریان‌های غیرسینوسی از شبکه اخذ کرده و به اصطلاح غیرخطی هستند. به بیان دیگر، ماهیت غیرخطی این ادوات باعث به وجود آمدن هارمونیک‌های مختلف در شبکه می‌شود. این هارمونیک‌ها علاوه بر آسیب رساندن و اختلال کار ادوات حساس، می‌تواند باعث کاهش توان انتقالی ترانسفورمرها، عملکرد نابجای رله‌های حفاظتی و تداخل‌های الکترومغناطیسی شود.

مهمترین اثرات هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند: [۲]

- امکان تقویت هارمونیک‌ها بر اثر رزونانس موازی یا سری
- کاهش بازدهِ تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی
- کاهش عمر عایق اجزای سیستم قدرت و در نتیجه کاهش عمر مفید آن‌ها
- عملکرد نادرست سیستم یا دستگاه‌های آن

یکی از اثرات هارمونیک‌ها سوختن فیوزهای بانک‌های خازنی می‌باشد. حضور خازن‌ها در شبکه، امکان رزونانس بین آن‌ها و امپدانس بارها یا منبع در فرکانس‌های مختلف را به وجود می‌آورد. این رزونانس‌ها می‌توانند باعث جریان‌های شدید و خرابی متوالی خازن‌ها شوند [۲]. عملکرد طولانی در محیط‌های هارمونیکی، استرس ولتاژ را افزایش داده و باعث افزایش دمای تجهیزات می‌شود. مثلاً ٪۱۰ افزایش ولتاژ، ٪۷ افزایش دما را منجر شده که می‌تواند طول عمر را تا ٪۳۰ کاهش دهد [۱]. افزون بر این، هارمونیک‌ها به عنوان عامل افزایش دما در ماشین‌های

[1] Hybrid

گردان شناخته شده‌اند. به این صورت که شارهای غیر سنکرون به وجود آورده که جریان‌هایی در روتور جاری کرده و تلفات آن را افزایش می‌دهند. ماشین‌های آسنکرون حساسیت کمتری به هارمونیک‌ها دارند، اما مقادیر زیاد هارمونیک‌ها باعث کاهش اجباری توان نامی ماشین[1] می‌شود [۱]. هارمونیک‌ها در ترانسفورمرها به گونه‌های مختلف تولید تلفات می‌کنند. در صورت عدم حذف آن‌ها، باید ملاحظاتی در طراحی و انتخاب ترانسفورمر برای کار در محیط‌های هارمونیکی در نظر گرفته شود [۲].

## ۱-۲ روش‌های کنترل هارمونیک‌ها

با ظهور هارمونیک‌ها و اثرات مخرب آن‌ها روش‌های جلوگیری از اثرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. می‌توان با ایمن کردن و کاهش حساسیت تجهیزات نسبت به هارمونیک‌ها و در نظر گرفتن آن‌ها در طراحی، اثرات مخرب آن را کاهش داد، اما این کار همیشه امکان‌پذیر نیست. در عوض روش‌هایی برای جلوگیری از تولید و یا انتشار هارمونیک‌ها وجود دارد. در بسیاری از موارد بار غیر قابل تغییر بوده و کنترلی بر تولید هارمونیک آن وجود ندارد. اما به طور نمونه، شیفت فاز یکسوسازهای ۶ پالسه در یک کارخانه می‌تواند منافع یک یکسوساز ۱۲ پالسه را ایجاد کند [۳].

روش دیگر برای کاهش هارمونیک‌های شبکه جلوگیری از نفوذ و جاری شدن آن‌ها در شبکه می‌باشد. این مبحث تحت عنوان فیلترهای قدرت در بخش آینده مورد توجه قرار می‌گیرد.

## ۱-۳ فیلترهای قدرت

به طور کلی فیلتر المان یا ترکیبی از المان‌های اکتیو و پسیو است که با تغییر پاسخ شبکه، کنترل هارمونیک‌های جریان یا ولتاژ را انجام می‌دهد. در این بخش روش‌های مختلف کنترل هارمونیک‌ها از طریق فیلترهای پسیو، اکتیو و پیوند آن‌ها بررسی می‌شود.

### ۱-۳-۱ فیلترهای پسیو

فیلترهای پسیو متشکل از عناصر پسیو (سلف، خازن و مقاومت) هستند که می‌توانند به صورت آرایش‌های سری، موازی یا ترکیب آن‌ها در مدار قرار گیرند. فیلترهای پسیو سری معمولاً برای حذف هارمونیک‌های ولتاژ

[1] Derating

منبع به کار می‌روند و برای حذف هارمونیک‌های جریان بارهای موازی از فیلترهای موازی استفاده می‌شود. فیلترهای یاد شده معمولاً به صورت شبکه‌های LC که در فرکانس خاصی تنظیم شده‌اند[1]، می‌باشند.

مرسومترین ساختارهای پسیو دارای ساختار موازی می‌باشند. در این ساختار یک یا تعدادی فیلترها با فرکانس تنظیم مشخص به صورت موازی با بار قرار می‌گیرند. هر شاخه به گونه‌ای تنظیم شده است که یک مسیر کم امپدانس برای یک هارمونیک خاص به وجود می‌آورد. طراحی این فیلترها به عوامل مختلفی بستگی دارد و پیچیدگی‌هایی در طراحی آن‌ها بایستی در نظر گرفته شود [۴]. نمونه‌هایی از این پیچیدگی‌ها در زیر آمده است.

- امپدانس فیلتر باید در مقایسه با امپدانس منبع در فرکانس هارمونیک خاص کوچک باشد تا تضعیف مورد نظر به وجود آید. اگر امپدانس منبع کوچک باشد، فیلتری با درجه‌ی تضعیف فیلتر بزرگتر لازم است و در این حالت اندازه‌ی فیلترهای پسیو می‌تواند بزرگ شود. حتی اگر کیفیت اجزای پسیو به کار رفته بالا باشد، همواره خطایی در مقدار اولیه‌ی آن‌ها وجود دارد و نیز در شرایط محیطی مختلف تغییرات کمی در مقدار آن‌ها روی می‌دهد.
- در فیلترهای پسیو همواره مشکل رزونانس وجود دارد. در رزونانس موازی، امپدانس فیلتر با امپدانس شبکه رزونانس کرده و پدیده‌ی تقویت هارمونیک‌ها به وجود می‌آید. یعنی در اثر هارمونیک‌های جریان بار هارمونیک‌های جریان بسیار بزرگتری در حلقه‌ی منبع و فیلتر جاری می‌شود. همچنین اگر هارمونیک ولتاژ هر چند کوچکی در فرکانس رزونانس سری امپدانس منبع و امپدانس فیلتر موجود باشد، رزونانس سری باعث جاری شدن هارمونیک‌های جریان بزرگی از منبع می‌شود.
- کیفیت فیلتر کنندگی این فیلترها قابل کنترل نبوده و تحت تاثیر منفی مسائل گفته شده قرار می‌گیرد.

### ۱-۳-۲ فیلترهای اکتیو

اشکالات گفته شده در مورد فیلترهای پسیو از یک طرف و ظهور مبدل‌های الکترونیک قدرت با قابلیت انعطاف زیاد از طرف دیگر موجب پیدایش ساختارهایی با نام فیلتر اکتیو گردید.

فیلترهای اکتیو هم می‌توانند در آرایش‌های سری یا موازی در شبکه به کار روند. آرایش سری معمولاً برای جداسازی[2] هارمونیکی بار و منبع به کار رفته و معمولاً به همراه یک فیلتر پسیو موازی نصب می‌گردد. توان این فیلتر در جداسازی هارمونیکی منبع و بار، محدود به مقادیر نامی آن می‌باشد. نخستین طراحی فیلترهای اکتیو به

[1] Tuned
[2] Isolation

صورت موازی بوده است. این فیلترها از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت جریان‌های هارمونیکی بارهای غیرخطی را به صورت محلی تولید کرده و از نفوذ آن‌ها در شبکه جلوگیری می‌کنند. فیلترهای اکتیو می‌توانند برای جبران هارمونیکی یک بار خاص طراحی شوند بدون اینکه راهی برای جذب هارمونیک‌های دستگاه‌های همسایه فراهم کنند.

### ۱-۳-۳ ترکیب فیلترهای اکتیو با پسیو یا فیلترهای هیبرید

هر ترکیب فیلترهای پسیو با فیلترهای اکتیو، فیلتر هیبرید نامیده می‌شود [۱]، [۵] - [۱۸] این ترکیبات معمولاً با هدف کاهش مقادیر نامی ولتاژها و جریان‌های قسمت اکتیو (مبدل استاتیکی) به علت محدودیت عناصر نیمه‌هادی ساخته شده می‌باشد. حتی انواع بسیار پیشرفته‌ی المان‌های قدرت قادر به تحمل ولتاژهای شبکه در سطوح بالا نیستند. علاوه بر آن با این ترکیب جبران محدودیت پهنای باند فیلتر اکتیو شده و از رزونانس فیلتر پسیو با امپدانس‌های شبکه جلوگیری می‌شود. به دلیل کوچک شدن قابل ملاحظه‌ی توان نامی قسمت اکتیو نسبت به فیلتر اکتیو کامل، فیلتر هیبرید راه حل ارزان و تا حد زیادی کنترل پذیر برای کنترل هارمونیک‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر هدف از این ترکیب استفاده از منافع هر دو نوع فیلتر و رفع عیب هرکدام از آن‌ها به کمک دیگری بوده است.

از همان زمان معرفی فیلتر اکتیو به وسیله‌ی Gyugyi و Strycula در سال ۱۹۷۶ [۴]، ترکیب آن با فیلترهای پسیو مورد توجه قرار گرفت. در مراجع [۶] و [۷] ترکیب‌های گوناگون فیلترهای اکتیو و پسیو مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۴ هدف و اهمیت بحث این پایان‌نامه

همان‌گونه که در مقدمات اشاره شد، هارمونیک‌ها به چالشی در شبکه‌های امروز بدل شده‌اند و کنترل و تضعیف آن‌ها مورد توجه تحقیقات زیادی قرار گرفته است. روش‌های فیلترگذاری شامل فیلترهای پسیو یا اکتیو تنها دارای مشکلاتی هستند. مثلاً فیلترهای پسیو دارای طراحی دشوار و مشکلات رزونانس هستند و کیفیت آن‌ها تحت تاثیر پارامترهای مختلفی قرار می‌گیرد. فیلترهای اکتیو گرچه کیفیت کنترل‌شده‌ای دارند اما به دلایلی مثل هزینه‌ها و تلفات در بسیاری موارد مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. برای رفع عیوب فیلترهای اکتیو یا پسیو تنها و استفاده از محاسن هر دو فیلترهای هِیبرید پیشنهاد شده‌اند. این فیلترها بسیار متنوع بوده و انتخاب آن‌ها برای هر کاربردی

می‌تواند متفاوت باشد. علاوه بر این با استفاده از طراحی‌های دقیق‌تر و یا روش‌های کنترل پیشرفته‌تر ممکن است بتوان فیلتر بهتری از ترکیب دو قسمت پسیو و اکتیو با سرمایه‌گذاری مشخصی بدست آورد.

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی فیلترهای هیبرید و سعی در انتخاب یک نوع و ارائه‌ی روش‌های کنترلی جدیدی برای آن و پیاده‌سازی عملی آن روش‌ها می‌باشد. در بررسی فیلترهای هیبرید، به مسائل طراحی قسمت پسیو و اکتیو هم توجهی می‌شود. برای مقایسه‌ی انواع متداول فیلترهای هیبرید و انتخاب یک نوع برتر آن‌ها (در صورت امکان) از روابط تئوری و شبیه‌سازی‌های زمانی استفاده خواهد شد.در بحث روش‌های کنترل فیلتر، روش‌های پیش‌بین با حالات محدود مورد توجه قرار می‌گیرند. معمولاً روش کنترل جریان پیش‌بین با حالات محدود مورد استفاده قرار گرفته است. این روش معرفی شده و در کنترل فیلتر هیبرید انتخاب شده به کار گرفته می‌شود. علاوه بر روش‌های کنترل ذکر شده، یکپارچه کردن کنترل‌کننده از دیگر اهداف است. با یکپارچه کردن کنترل کیفیت کنترل‌کننده می‌تواند افزایش یابد. مقایسه‌هایی از طریق شبیه‌سازی‌های زمانی بین روش‌های کنترل مختلف انجام می‌گیرد. برای پیاده‌سازی عملی نیاز به پردازنده‌های دیجیتال و بهینه‌سازی‌های مختلفی برای محاسبات آن‌ها وجود دارد که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در نهایت مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با عمل هم انجام خواهد شد.

### ۱-۵ روند ارائه مطالب

بررسی مهمترین ساختارهای فیلترهای هیبرید موضوع فصل دوم این نوشته است. در این فصل دو نوع متداول این ساختارها از نقطه نظر پیچیدگی‌های طراحی قسمت پسیو و ارائه‌ی همه‌ی روش‌های کنترل موجود بررسی می‌گردد. در مقام مقایسه، از روابط تئوریک و شبیه‌سازی‌های زمانی بهره گرفته شده و با دلایل فنی علت رویکرد عمده‌ی محققین به یکی از این ساختارها بیان می‌شود.

برای بهبود کنترل فیلتر انتخاب شده در فصل دوم، نیاز به ابزاری است که موضوع فصل سوم است. این ابزار کنترل پیش‌بین است که از آن برای کنترل جریان با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده شده است. از آن‌جا که این روش کنترل مزایایی از نظر کیفیت و پیاده‌سازی در کاربردهای مختلف الکترونیک قدرت و درایو ارائه داده است، به عنوان یک روش مطلوب مورد توجه این تحقیق قرار گرفته است. در فصل سوم، همچنین نتایج عملی ساخت کنترل‌کننده‌ی جریان مورد نظر آمده است.

در فصل چهارم، روش‌های کنترل فیلتر هیبرید مورد مطالعه بر اساس کنترل جریان ذکر شده است. پس از معرفی روش‌های متداول جداسازی تک هارمونیک، روش کنترل جریان نوین و ساده‌ای برای کنترل جریان فیلتر

مورد نظر ارائه می‌شود. سپس توسعه‌ی روش برای همانند شدن با روش‌های متداول کنترل جریان و استفاده‌ی بهتر در کنترل‌کننده‌ی خاص ارائه شده در فصل سوم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این کنترل‌کننده و کنترل‌کننده‌ی جریان معمولی تناسبی در روش‌های ارائه شده به کار گرفته می‌شود و کیفیت آن‌ها با شبیه‌سازی‌هایی نشان داده می‌شود. در پایان فصل چهارم، روشی یکپارچه برای کنترل فیلتر منتخب ارائه می‌گردد. این روش نوین، بر اساس پیش‌بینی جریان فیلتر، و برای کنترل مستقیم جریان‌های هارمونیکی منبع ابداع شده است. این روش نیز با شبیه‌سازی آزموده می‌شود. در بسیاری از موارد، روش یکپارچه‌ی ارائه شده قابلیت کنترل برتری نسبت به همه‌ی روش‌های موجود از خود نشان می‌دهد.

در فصل پنجم، روش‌های کنترلی ارائه شده به صورت عملی تائید می‌گردد. در این فصل نتایج عملی دستگاه مدل آزمایشگاهی ساخته شده برای یک بار غیرخطی ۳۵۰ واتی نمایش داده می‌شود. از آن‌جا که در عمل امکانات موجود متفاوت از شبیه‌سازی‌هاست، نکاتی که برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری در پردازنده‌ی کنترل دستگاه لازم است توضیح داده می‌شود.

در فصل ششم و پایانی، جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای بهبود یا گسترش این تحقیق ارائه می‌شود.

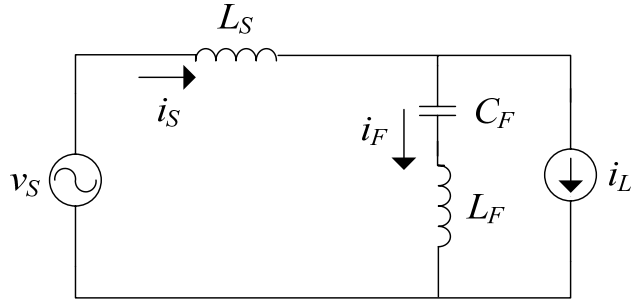
# فصل دوم
# معرفی دو نوع پایه‌ای فیلترهای هیبرید

در این فصل، ابتدا دلایلی برای کاربرد فیلترهای هیبرید بیان می‌گردد. سپس، برخی از روش‌های ترکیب فیلترهای اکتیو و پسیو معرفی شده و دو نوع پایه‌ای این ترکیب‌ها با جزئیات معرفی می‌شود. این دو نوع بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند و می‌توان گفت که بقیه‌ی فیلترهای هیبرید اشتقاقی از آن‌ها می‌باشند. همه‌ی روش‌های کنترلی موجود برای آن‌ها بررسی می‌شود. از نظر تئوریک عملکرد این دو نوع مقایسه شده و با ذکر یک مثال عملی در شبیه‌سازی، این فیلترها از نظر توان نامی قسمت اکتیو مقایسه می‌شود. در شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که بزرگ کردن بهره با وجود اشباع شدن گاه و بیگاه مبدل می‌تواند کمک شایانی به کیفیت کلی کنترل و دنبال کردن جریان بنماید. در پایان، بر اساس مقایسه‌ی ذکر شده و با توجه به مشکلات فنی، دلایل انتخاب یکی از انواع برای مطالعات بیشتر در این پایان‌نامه مثل بسیاری از مقالات موجود در فیلترهای هیبرید ارائه می‌گردد.

## ۲-۱ چرا فیلترهای هیبرید؟

هارمونیک‌های تولید شده توسط یکسوسازهای دیودی و تریستوری پر مصرف در صنعت امروز به تدریج تبدیل به مشکل بزرگی در شبکه‌های الکتریکی شده‌اند. تا کنون فیلترهای پسیو برای به دام انداختن هارمونیک‌ها

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان گونه که در شکل شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود، این فیلترها مسیری با امپـدانس کـم برای هارمونیک‌های جریان در فرکانس رزونانس خود پدید می‌آورند.



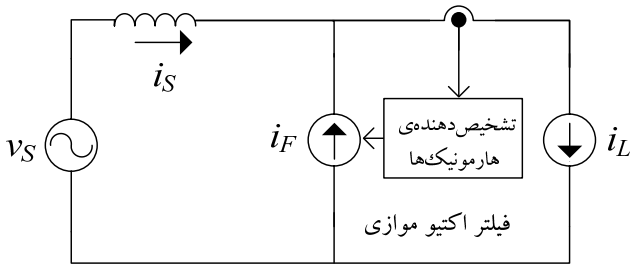

شکل ۲-۱- فیلتر پسیو موازی [۱۰]

اما فیلترهای پسیو دارای مشکلات شناخته شده‌ی زیر هستند [۱۰]، [۱۱] و [۱۹]:

- امپدانس منبع که دقیقاً شناخته شده نبوده و با تغییرات شبکه تغییر می‌کند، به شدت کیفیت فیلتر کننـدگی فیلتـر پسیو را می‌کاهد. همچنین فیلترهای پسیو به حالت‌های گذرای بار و خـط حـساسند. عـلاوه بـر ایـن‌هـا سـاختن فیلترهای دقیقاً تنظیم شده برای شبکه‌هایی با قدرت اتصال کوتاه بالا دشوار است.
- فیلتر پسیو موازی مانند یک چاه جریان برای هارمونیـک‌هـای ولتـاژ موجـود در ولتـاژ منبـع عمـل مـی‌کنـد. در بدترین حالت فیلتر پسیو در حالت رزونانس سری با امپـدانس منبـع در فرکـانس خاصـی قـرار مـی‌گیـرد ( ایـن فرکانس برابر $f_O = 1/2\pi\sqrt{(L_S + L_F)C_F}$ است). به عبارت دیگر این فیلترهـا مـی‌تواننـد هارمونیـک‌هـای بارهای مختلف نزدیک را جذب کنند و دچار اضافه بار شوند.
- در فرکانس خاصی یک رزونانس موازی بین امپدانس منبع و امپدانس فیلتر موازی اتفاق می‌افتد. در این حالـت پدیده‌ی تقویت هارمونیکی اتفاق می‌افتد. یعنی یـک جریـان هـارمونیکی کوچـک باعـث جریـان هـارمونیکی بزرگی در حلقه‌ی متشکل از امپدانس منبع و امپدانس فیلتر می‌گردد.

برای حل مشکلات ذکر شده، فیلترهای اکتیو مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌اند. امروزه یـک فیلتـر اکتیـو که با استفاده از مبدل‌های نوع ولتاژ مدولاسیون پهنای باند (PWM[1]) ساخته شده، نسل جدیدتر جبـران کننـده‌هـای هارمونیکی به شمار می‌رود. این فیلتر در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

[1] Pulse Width Modulation




شکل ۲-۲- فیلتر اکتیو موازی [۱۰]

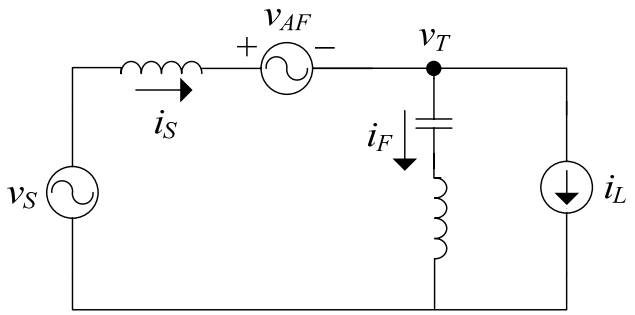
کیفیت این نوع فیلترها به مراتب برتر از نوع پسیو است زیرا که یک تفاوت بنیادی در اساس جبران‌سازی این دو نوع فیلتر وجود دارد. با وجود این، مشکلات زیر استفاده‌ی عملی این نوع فیلتر را محدود کرده است:

- ساختن مبدل‌های پرتوان با سرعت پاسخ بالا دشوار است. این مبدل‌های قسمت اصلی یک فیلتر اکتیو را تشکیل می‌دهند. این به دلیل فن‌آوری موجود برای ساخت کلیدهای الکترونیک قدرت است. معمولاً محدوده‌ی تحمل ولتاژ و جریان آن‌ها از مقادیر موجود در شبکه بسیار کمتر بوده و توانایی تحمل پدیده‌های گذرای شبکه را ندارند.
- اگر محدودیت‌های فن‌آوری ساخت فیلترهای اکتیو را محدود نکند، هزینه‌ی اولیه‌ی نصب این فیلترها بالاتر از فیلترهای پسیو است. افزون بر آن چونکه این فیلترها بر اساس کلیدزنی[1] کار می‌کنند، بازده آن‌ها کمتر از فیلترهای پسیو است.

بنابراین، فیلترهای سنتی پسیو و فیلترهای نوین اکتیو مشکلات ذکر شده را دارند که کاربرد عملی آن‌ها را محدود کرده است. اما آیا راهی برای حل مشکل فیلترهای اکتیو یا پسیو وجود دارد؟

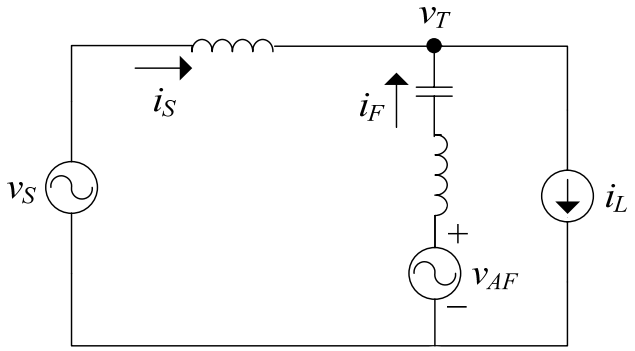
کیفیت فیلتر کنندگی فیلترهای پسیو وابسته به امپدانس منبع است که معمولاً سلفی اما ناشناخته و متغیر است. امپدانس فیلتر پسیو بایستی کوچکتر از امپدانس منبع در فرکانس‌های هارمونیکی باشد تا بتواند تضعیف مورد نیاز را به وجود آورد. بنابراین امپدانس بزرگتر منبع، فیلتر کنندگی بهتر فیلتر پسیو را در بر دارد. اما منبع بایستی امپدانس کوچکی در فرکانس اصلی داشته باشد تا افت ولتاژ زیادی در فرکانس اصلی به وجود نیاورد. این دو خواسته‌ی متناقض با اضافه کردن یک منبع ولتاژ سری با منبع توان امکان پذیر شده است. این ترکیب که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، نخستین نوع فیلتر هیبرید را نشان می‌دهد [۹].

[1] Switching




شکل ۲-۳- فیلتر هیبرید نوع ۱

اما به طریق دیگری هم می‌توان کیفیت فیلترکنندگی فیلتر پسیو را بهبود بخشید. ترکیب دیگری که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است از نظر مداری عملکرد مشابهی داشته و دارای حفاظت ساده‌تری نسبت به فیلتر نوع ۱ می‌باشد. می‌توان گفت که در این ترکیب امپدانس شاخه‌ی پسیو فیلتر به وسیله‌ی قسمت اکتیو آن به گونه‌ای کنترل شده است که جریان‌های هارمونیکی را وارد شاخه کند. در ادامه‌ی این فصل در قسمت‌های معرفی روش‌های کنترلی دو نوع فیلتر هیبرید اخیر خواهد آمد که معمولاً قسمت اکتیو به صورت یک امپدانس اکتیو کنترل نمی‌شود. روش‌های متداول کنترل ولتاژ مبدل است که این ولتاژ در اثر جریان‌های هارمونیکی منبع ساخته شده است. در این شرایط، از نظر مداری قسمت اکتیو به یک مقاومت در هارمونیک‌ها مبدل می‌شود [۲۰].




شکل ۲-۴- فیلتر هیبرید نوع ۲

## ۲-۲ تاریخچه‌ی فیلترهای اکتیو و فیلترهای هیبرید

از نیمه‌ی دوم دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی، تحقیقاتی روی فیلترهای اکتیو موازی صورت گرفته است. در ۱۹۶۲ B.M. Bird و دیگران مفهوم تزریق جریان را مطرح کردند. اصول فیلترهای اکتیو موازی بوسیله‌ی H. Sasaki و T. Matilda در ۱۹۷۱ اختراع شدند. همان گونه که شکل ۲-۲ نشان می‌دهد، فیلتر اکتیو موازی به گونه‌ای کنترل