

بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی

علیرضا حسنی اصل^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهدی معلم^۲، استاد؛ محمد کیوان فرد^۳، کارشناس ارشد
 ۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - a.hasani@ec.iut.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - moallem@cc.iut.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - keivanfard@gmail.com

چکیده: کوره‌های قوس الکتریکی که برای ذوب و بازیابی فلزات در کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به علت ماهیت قوس و فرآیند ذوب مشکلات عدیده کیفیت توان نظیر عدم تعادل ولتاژ و جریان، فلیکر، هارمونیک و ضریب توان پایین را ایجاد می‌کنند. جبران کننده استاتیکی توان راکتیو، یک تجهیز کارآمد جهت تأمین توان راکتیو کوره‌های قوس الکتریکی و بهبود پارامترهای کیفیت توان آن‌ها است که لازم است طراحی فیلترهای هارمونیک آن انجام شود. در این مقاله جهت طراحی فیلترهای هارمونیک، علاوه بر قیود هارمونیک، قید بررسی رزونانس‌های موازی سیستم در بلوک دیاگرام پیشنهادی در نظر گرفته شده و با استفاده از آن بهینه‌سازی بین میزان هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و دامنه رزونانس‌های موازی سیستم انجام می‌گیرد. جهت احتراز از رزونانس‌های موازی، آنالیز حساسیت نسبت به تغییر پارامترهای مختلف فیلتر نظیر خازن، سلف و مقاومت میراکننده فیلتر نوع C و نسبت به تغییر در ساختار شبکه انجام خواهد شد. همچنین با اندازه‌گیری عملی هارمونیک‌های کوره‌های قوس ۲۰۰ تنی یک مجتمع فولاد، طراحی و بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران کننده‌های استاتیکی آن مجتمع با استفاده از روش پیشنهادی انجام شده و مقاومت بهینه فیلتر هارمونیک نوع C تعیین می‌گردد. همچنین پس از در مدار آمدن جبران کننده، میزان بهبود هارمونیک‌های جریان با اندازه‌گیری عملی نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کوره قوس الکتریکی، جبران کننده استاتیکی توان راکتیو، فیلتر هارمونیک، کیفیت توان.

Performance Improvement of SVC Harmonic Filters for Electrical Arc Furnace using Sensitivity Analysis and Measurement Results

Alireza Hasaniasl¹, MSc Student; Mehdi Moallem², Professor; Mohammad Keivanfard³, MSc

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran, Email: a.hasani@ec.iut.ac.ir
 2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran, Email: moallem@cc.iut.ac.ir
 3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran, Email: Keivanfard@gmail.com

Abstract: Electric Arc Furnaces which are used for melting and recovery of metals in steelmaking plants, due to the nature of the arc melting process, cause many power quality problems such as current and voltage harmonics, flicker, current and voltage unbalance, low power factor and etc. Static Var Compensator (SVC) is a suitable system for reactive power compensation and power quality improvement. To use SVC for improving power quality at arc furnace bus, it is necessary to determine the SVC harmonic filters parameters based on required reactive power for electric arc furnaces. Also, the order of harmonic filters which is specified must be proportionate with electric arc furnace harmonic current and total reactive power being distributed between harmonic filters. In this paper, the analysis and design of SVC harmonic filter parameters and necessary calculations are done to avoid parallel resonance. Also, using measurement data from voltage and current harmonics of a 200-ton Electric Arc Furnace obtained from several melting process, further tuning is done to improve design and performance of the harmonic filters.

Keywords: Electrical arc furnace (EAF), Static var compensator (SVC), Harmonic filter, Power quality.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۲ و ۱۳۹۳/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۶

نام نویسنده مسئول: مهدی معلم

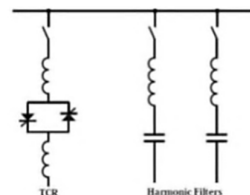
نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - بلوار دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

مبحث کیفیت توان در شبکه‌های برق دارای اهمیت روزافزونی است زیرا از یک طرف کاربرد بارهای غیرخطی آلوده‌کننده نظیر کوره‌های قوس الکتریکی^۱، کوره‌های القایی، درایوها و یکسوکننده‌ها به‌طور وسیعی در حال افزایش بوده و از طرف دیگر بارهای حساس به پدیده‌های کیفیت توان نظیر میکروپروسورها، کامپیوترها، پردازنده‌ها و کنترل‌کننده‌های دیجیتال در حال گسترش هستند. لذا در صورت عدم‌اصلاح و بهبود کیفیت توان، خسارات و مشکلات جبران‌ناپذیری برای این بارهای حساس و تجهیزات شبکه به وجود خواهد آمد.

کوره‌های قوس الکتریکی به دلیل ماهیت قوس و فرآیند ذوب، مشکلات عدم تعادل ولتاژ و جریان، پدیده‌های کوتاه‌مدت و گذرای ولتاژ، فلیکر، هارمونیک و ضریب توان پایین را ایجاد می‌کنند [۳-۱]. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های کیفیت توان کوره‌های قوس، جاری شدن جریان‌های هارمونیک است که با توجه به امپدانس شبکه به‌صورت اعوجاج هارمونیک ولتاژ به سایر تجهیزات اعمال می‌شود؛ لذا تجهیزات مورد‌استفاده در شبکه‌های قدرت آلوده به هارمونیک، دائم در معرض این اعوجاج‌ها می‌باشند که می‌تواند سبب ایجاد تلفات اضافی در ترانسفورمرها و افزایش تلفات توان در کابل‌ها، موتورها و خازن‌ها شود. علاوه بر آن وجود هارمونیک‌ها می‌تواند سبب عملکرد اشتباه تجهیزات اندازه‌گیری که برای ولتاژ سینوسی طراحی شده‌اند، شود [۴، ۵].

جهت تأمین توان راکتیو متغیر و بهبود کیفیت توان کوره‌های قوس، جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو SVC^۲ به‌عنوان یک تجهیز کارآمد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جبران‌کننده همانند یک امپدانس متغیر موازی با بار عمل می‌کند که با تولید یا جذب توان راکتیو، دامنه ولتاژ در PCC^۳ را تنظیم می‌کند [۶، ۷]. یکی از ساختارهای پرکاربرد جبران‌کننده SVC به‌منظور کاهش اعوجاج‌های هارمونیک ناشی از کوره‌های قوس، فیلترهای هارمونیک به‌موازات راکتور کنترل‌شونده با تریستور (TCR^۴) است که در شکل ۱ نشان داده شده است. لذا اولین قدم در استفاده از فیلترهای هارمونیک، طراحی و انتخاب مناسب نوع و پارامترهای آن‌ها است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱: ساختار جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو SVC

در [۸] فیلترهای هارمونیک بالاگذر مورد بررسی قرار گرفته شده است. هدف اصلی طراحی فیلتر در این مرجع بر اساس افزایش ضریب توان به ۹۹ درصد و در نظر گرفتن قیود هارمونیک مطابق استاندارد IEEE 519 است. در [۹] نیز فیلترهای هارمونیک مختلف بررسی شده و روشی برای تقسیم توان راکتیو بین آن‌ها ارائه گردیده است. این روش

جهت حداقل کردن هارمونیک‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شده است. در [۱۰] انواع فیلترهای هارمونیک شده و روابط پخش بار هارمونیک با توجه به امپدانس شبکه و فیلتر بررسی شده است. در این مرجع بهینه‌سازی فیلتر هارمونیک با در نظر گرفتن قیود هزینه، محدودیت‌های هارمونیک و ضریب توان انجام شده است.

مراجع [۱۱] و [۱۲] به تشریح فیلتر هارمونیک نوع C پرداخته و همچنین مقایسه‌ای بین فیلتر تک‌فرکانس و فیلتر نوع C انجام داده‌اند. در [۱۳] نیز قابلیت‌ها، معادلات و محدودیت‌های فیلتر هارمونیک نوع C بررسی شده و همچنین دلایل گران بودن این فیلتر هارمونیک برای استفاده در فرکانس‌های پایین بیان شده است. مرجع [۱۴] محدودیت‌ها و قابلیت‌های فیلترهای پسیو را بررسی کرده است. در [۱۵] علاوه بر قید حداقل کردن THD ولتاژ، مجاز بودن اعوجاج‌های هارمونیک تکی ولتاژ و ضریب توان نیز مدنظر قرار گرفته است. مرجع [۱۶] انتخاب ضریب کیفیت فیلترهای هارمونیک را تشریح کرده است. در [۱۷] طراحی فیلترهای هارمونیک نوع C برای کوره‌های قوس الکتریکی و پاتیلی بررسی شده است. مرجع [۱۸] به بررسی ساختار SVC و راکتور کنترل‌شونده با تریستور و هارمونیک‌های آن می‌پردازد. مرجع [۱۹] طراحی فیلترهای تک‌تنظیم را برای بهبود هارمونیک و تأمین توان راکتیو بررسی نموده است. در مرجع [۲۰] طراحی فیلتر برای یک واحد صنعتی را انجام داده است.

در مقالات مذکور طراحی فیلترهای هارمونیک بر اساس درصد مجاز هارمونیک‌های جریان و ولتاژ انجام شده است. در مورد فیلتر نوع C نیز، مقدار مقاومت میراکننده فقط با توجه به اعوجاج مجاز جریان و ولتاژ انتخاب شده و یا به‌صورت ثابت با توجه به مرتبه فیلتر هارمونیک در نظر گرفته شده و متناسب با آن مقدار مقاومت میراکننده محاسبه شده است. یکی از نکات بسیار مهم که در طراحی باید مدنظر قرار گیرد احتراز از رزونانس‌های موازی خطرناک است که می‌تواند سبب ایجاد ولتاژهای هارمونیک بزرگی شوند. در این مقاله علاوه بر در نظر گرفتن قیود هارمونیک، بررسی رزونانس‌های موازی سیستم در بلوک دیگرام پیشنهادی در نظر گرفته شده تا با استفاده از آن بهینه‌سازی بین میزان هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و همچنین دامنه و فرکانس رزونانس‌های موازی سیستم انجام شود. همچنین با شبیه‌سازی دقیق و بررسی پاسخ فرکانسی و قیود حداقل THD ولتاژ و جریان و هارمونیک‌های تکی آن‌ها، مقاومت میراکننده بهینه برای فیلتر نوع C تعیین می‌شود. جهت بررسی رزونانس‌های موازی ایجادشده، آنالیز حساسیت نسبت به تغییر پارامترهای مختلف فیلتر هارمونیک و همچنین نسبت به تغییر در ساختار شبکه انجام می‌شود. برای بررسی قیود هارمونیک پاسخ فرکانسی بدون حضور شبکه از دید بار هارمونیک و جهت احتراز از رزونانس‌های موازی خطرناک در سیستم، پاسخ فرکانسی در حضور شبکه و در نقاط مختلف آن بررسی می‌گردد.

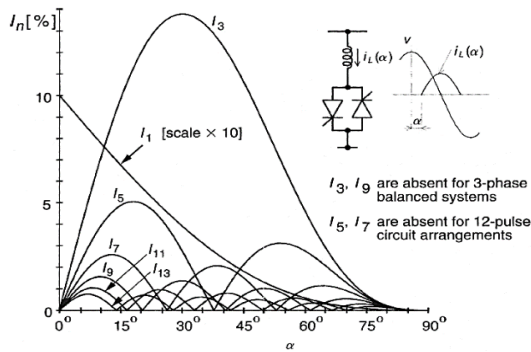
پس از بررسی روش طراحی فیلترهای هارمونیک، به بررسی و شبیه‌سازی شبکه مجتمع فولاد ۵/۵ میلیون تنی در نرم‌افزار

سلف کنترل‌شونده با تریستور، علاوه بر مؤلفه اصلی جریان، هارمونیک‌هایی را نیز ایجاد می‌کند که دامنه این هارمونیک‌ها تابعی از زاویه آتش α است. دامنه جریان‌های هارمونیکي راکتور کنترل‌شونده با تریستور بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$I_{Ln} = \frac{V}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2-1)} \right\} \quad (2)$$

که $n = 2k + 1$ و $k = 1, 2, 3, \dots$ است.

در شکل ۳ درصد هارمونیک‌های جریان راکتور کنترل‌شونده با تریستور نسبت به مؤلفه اصلی جریان برحسب زاویه آتش تریستور نشان داده شده است.



شکل ۳: درصد هارمونیک جریان TCR نسبت به مؤلفه اصلی [۱۸]

در یک سیستم سه‌فاز، سه سلف کنترل‌شده با تریستور تک‌فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند که معمولاً اتصال آن‌ها به‌صورت مثلث است. در نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی مشابه جریان، فقط هارمونیک‌های فرد تولید می‌شوند. تحت شرایط متعادل، هارمونیک‌های جریان مضرب سه (سومین، نهمین، پانزدهمین و ...) در TCRهایی که به‌صورت مثلث بسته شده‌اند گردش می‌کنند و وارد سیستم قدرت نمی‌شوند. البته در TCRهای سه‌فاز اتصال مثلث که به‌صورت مجزا (تک‌فاز) کنترل می‌شوند، دامنه هارمونیک‌های مضرب سه نیز به علت متفاوت بودن زاویه آتش تریستورهای هر فاز، متفاوت خواهد بود و بنابراین مقداری از این هارمونیک‌ها وارد جریان خط خواهد شد. مقادیر حداکثر جریان‌های هارمونیکي TCR که در زوایای آتش مختلف رخ می‌دهد برحسب درصدی از جریان نامی آن در هدایت کامل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: حداکثر درصد هارمونیک‌های جریان TCR

مرتبه هارمونیک	درصد هارمونیک جریان نسبت به مؤلفه اصلی
۵	۵/۰۵
۷	۲/۵۹
۱۱	۱/۰۵
۱۳	۰/۷۵
۱۷	۰/۴۴
۱۹	۰/۳۵
۲۳	۰/۲۴

DIGSILENT پرداخته شده و مطابق روش پیشنهادی، طراحی فیلترهای هارمونیکي SVC‌های آن و تعیین مقاومت میراکننده بهینه برای فیلتر نوع C انجام می‌شود. همچنین پس از فیلترگذاری بهبود اعوجاج‌های هارمونیکي با اندازه‌گیری عملی نشان داده خواهد شد. با توجه به این که کوره‌های قوس و TCR سبب ایجاد هارمونیک می‌شوند، در ادامه هارمونیک‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- کوره قوس الکتریکی

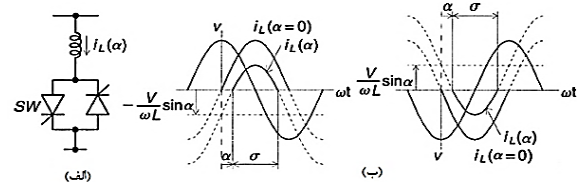
با توجه به غیرخطی بودن و توان بالای کوره‌های قوس الکتریکی، هارمونیک‌های ایجادشده ناشی از آن‌ها بیش‌تر از تمام تجهیزات الکتریکی است. کوره‌های قوس الکتریکی تحت شرایط نامتعادل، به میزان قابل‌توجهی هارمونیک سوم ایجاد کرده و همچنین هارمونیک‌های پنجم و هفتم که تحت شرایط متعادل نیز وجود دارند، تحت این شرایط افزایش خواهند یافت. جدول ۱ درصد هارمونیک‌های جریان یک کوره قوس الکتریکی در اولیه ترانسفورمر کوره قوس که توسط دستگاه آنالایزر کیفیت توان اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد.

جدول ۱: درصد هارمونیک‌های جریان کوره قوس الکتریکی

مرتبه هارمونیک	درصد هارمونیک جریان نسبت به مؤلفه اصلی
۲	۳/۷
۳	۴/۷
۴	۱/۵
۵	۴/۲
۶	۰/۷
۷	۱/۳
۸	۰/۵
۹	۰/۷

۳- راکتور کنترل‌شونده با تریستور (TCR)

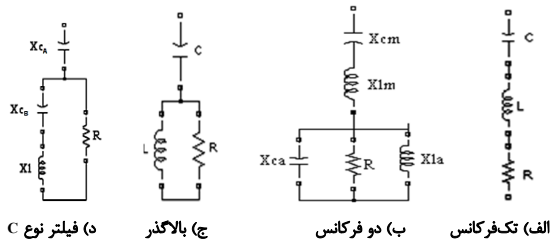
اصول کار راکتور کنترل‌شونده با تریستور که شامل یک سلف ثابت و دو تریستور است، در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ زاویه آتش α ، نسبت به پیک ولتاژ در نظر گرفته شده و با تغییر آن جریان و توان راکتور TCR تغییر می‌کند. بنابراین در زاویه آتش صفر تریستورها به‌طور کامل وصل بوده و جریان نامی از راکتور عبور می‌کند و با تغییر زاویه آتش، rms جریان عبوری تغییر کرده و در نتیجه توان راکتیو مصرفی راکتور کنترل می‌شود [۱۸].



شکل ۲: اصول کار راکتور کنترل‌شونده با تریستور [۱۸]

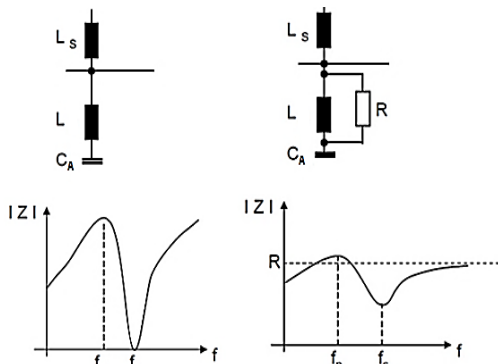
مطابق شکل ۲ جریان سلف می‌تواند به‌صورت رابطه (۱) بیان شود که در آن ولتاژ اعمال‌شده و $i_L(t)$ جریان سلف است.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (1)$$



شکل ۴: انواع مختلف فیلترهای شنت

از میان فیلترهای هارمونیکی نشان داده شده در شکل ۴ عموماً فیلترهای تک‌فرکانس و نوع C برای کوره‌های قوس مورد استفاده واقع می‌شوند. فیلتر نوع C در واقع همان فیلتر بالاگذر است که در آن یک خازن به‌طور سری با راکتور قرار گرفته است [۸]. این خازن به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که راکتانس خازنی آن در فرکانس اصلی با راکتانس سلفی سری شده با آن برابر باشد. در واقع رزونانس سری سلف و خازن شاخه سری (X_L و X_{Ca}) در فرکانس اصلی سبب جلوگیری از عبور مؤلفه اصلی جریان از مقاومت میراکننده شده و منجر به کاهش تلفات در فیلتر نوع C می‌گردد [۹، ۱۱، ۱۲]. در شکل ۵ اثر مقاومت میراکننده فیلتر هارمونیکی در کاهش رزونانس موازی و همچنین افزایش امپدانس در فرکانس تنظیم نشان داده شده است.



شکل ۵: اثر مقاومت میراکننده در رزونانس موازی

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فیلتر تک‌تنظیم برخلاف فیلتر بالاگذر دارای مشخصه با پهنای باند باریک بوده و همچنین دارای امپدانس کوچک در فرکانس تنظیم و امپدانس بزرگ در فرکانس رزونانس موازی است [۱۰]. از مزایای فیلتر نوع C کاهش دامنه امپدانس رزونانس‌های موازی سیستم ناشی از وجود مقاومت میراکننده است. البته وجود این مقاومت، دامنه امپدانس در فرکانس تنظیم فیلتر نوع C نسبت به فیلتر تک‌فرکانس را افزایش می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که این فیلتر نسبت به فیلتر تک‌تنظیم ضریب تضعیف کم‌تری از خود نشان دهد. بنابراین ممکن است مقداری از هارمونیک‌ها به شبکه بالادست نفوذ کرده و همچنین باعث افزایش THD ولتاژ و جریان موردنظر شود [۱۱، ۱۳].

۵- الگوریتم پیشنهادی طراحی فیلترهای هارمونیکی

در این بخش الگوریتم طراحی فیلترهای هارمونیکی جهت محدود کردن هارمونیک‌های جریان و ولتاژ کوره‌های قوس الکتریکی با در نظر گرفتن

لازم به ذکر است اگرچه هارمونیک‌های مختلف جریان در یک زاویه آتش خاص و به‌صورت هم‌زمان حداکثر نیستند ولی جهت طراحی فیلتر باید حداکثر میزان هارمونیک‌های جریان برای تحلیل هارمونیکی در نظر گرفته شود، چراکه زاویه آتش ترستورها بر مبنای اصول کنترلی مشخص به‌طور پیوسته تغییر می‌کند.

۴- طراحی فیلترهای هارمونیکی

با توجه به مشکلات کیفیت توان مذکور ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی به‌کارگیری جبران‌کننده‌هایی نظیر SVC ضروری است. جهت اصلاح ضریب توان و اعوجاج‌های هارمونیک معمولاً از بانک‌های خازنی به‌صورت فیلترهای هارمونیکی پس‌پسوی که روی یک هارمونیک خاص تنظیم شده‌اند استفاده می‌شود. در ابتدا جهت طراحی فیلترهای هارمونیکی، شناخت انواع فیلترهای هارمونیکی مورد نیاز است که در بخش (۴-۱) مطرح می‌گردد.

۴-۱- انواع فیلترهای هارمونیکی

وظیفه اصلی فیلترهای هارمونیکی، جبران جریان‌های هارمونیکی بار و جلوگیری از عبور آن‌ها از شبکه بالادست است. فیلتر کردن می‌تواند به یکی از دو حالت زیر جهت جلوگیری از عبور جریان‌های هارمونیکی از شبکه بالادست انجام پذیرد:

- انسداد مسیر عبور جریان‌های هارمونیکی
- انحراف مسیر عبور جریان‌های هارمونیکی

انسداد مسیر معمولاً با استفاده از موج‌گیرها که به‌صورت مدارهای موازی سلف و خازن بوده و به‌صورت سری با مسیر عبور جریان‌های هارمونیکی قرار می‌گیرند (فیلتر سری)، انجام می‌شود.

انحراف مسیر عبور جریان‌های هارمونیکی، توسط فیلترهای شنت که در فرکانس هارمونیکی موردنظر دارای امپدانس کمی هستند، انجام می‌گیرد. این مدارها معمولاً از یک سلف، یک مقاومت (عمدتاً مقاومت سلف) و یک خازن که به‌صورت سری قرار داده می‌شوند، تشکیل شده‌اند. با توجه به این‌که فیلترهای هارمونیکی مورد استفاده در جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو SVC از نوع فیلترهای شنت تشدید سری است در ادامه به بررسی این فیلترهای هارمونیکی پرداخته می‌شود.

۴-۱-۱- فیلترهای شنت تشدید سری

فیلترهای شنت تشدید سری متداول‌ترین فیلترهای مورد استفاده در شبکه‌های قدرت می‌باشند. این فیلترها جهت ایجاد مسیر اتصال کوتاه برای هارمونیک‌های خاص و جلوگیری از عبور جریان‌های هارمونیکی از شبکه بالادست مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی فیلترهای شنت مورد استفاده در سیستم قدرت را می‌توان به دودسته فیلترهای تک‌فرکانس و فیلترهای بالاگذر تقسیم نمود. این فیلترها از نظر طراحی ساده‌ترین و از نظر اجرا از ارزان‌ترین نوع فیلترها می‌باشند. شکل ۴ انواع مختلف این فیلترها را نشان می‌دهد [۹-۱۱].

قید رزونانس‌های موازی سیستم بررسی می‌شود. جهت پیاده‌سازی این الگوریتم مراحل بیان شده باید جزء به جزء و با در مدار آوردن فیلترهای هارمونیک به ترتیب از مرتبه پایین به بالا انجام شود.

مرحله ۱: جهت طراحی فیلترهای هارمونیک لازم است میزان هارمونیک‌های جریان مشخص باشند. این مقادیر می‌توانند توسط اندازه‌گیری در صورت احداث واحد صنعتی و یا به صورت تخمینی در مرحله طراحی واحد صنعتی مدنظر قرار گیرند.

مرحله ۲: با توجه به این که فیلترهای هارمونیک علاوه بر کاهش اعوجاج‌های هارمونیک در شبکه جهت تأمین توان راکتیو موردنیاز بار به کار گرفته می‌شوند، لذا با در نظر گرفتن مقادیر توان راکتیو موردنیاز کوره‌های قوس الکتریکی و ضریب توان بهینه، توان راکتیو کل فیلترهای هارمونیک تعیین می‌شود.

مرحله ۳: مرتبه فیلترهای هارمونیک متناسب با درصد هارمونیک‌های جریان و همچنین مقادیر مجاز استاندارد تعیین می‌گردد. متناسب با مرتبه فیلتر هارمونیک، فرکانس تنظیم فیلتر هارمونیک به گونه‌ای انتخاب می‌شود که میزان اعوجاج کلی ولتاژ و جریان در حد مجاز تعیین شده قرار گیرند. برای دستیابی به این هدف، مرتبه فیلتر هارمونیک روی کم‌ترین فرکانسی که بیش‌ترین میزان تولید هارمونیک را دارد، تنظیم می‌شود. به‌عنوان نمونه اگر بیش‌ترین سطح هارمونیک‌های جریان برای هارمونیک‌های پنجم و هفتم باشد، یک فیلتر هارمونیک که در نزدیکی هارمونیک مرتبه پنجم تنظیم شده است، ممکن است برای به حد مجاز رساندن اعوجاج هارمونیک کفایت کند. فرکانس فیلتر هارمونیک معمولاً به‌صورت دقیق روی فرکانس یک هارمونیک خاص تنظیم نمی‌شود. تنظیم دقیق فرکانس روی فرکانس یک هارمونیک خاص می‌تواند منجر به دو پدیده ناخوشایند شود:

الف- امپدانس بسیار پایین در محل رزونانس سری فیلتر می‌تواند منجر به جذب تمام هارمونیک‌های جریان ایجادشده در آن فرکانس توسط فیلتر گردد که سبب بزرگ‌تر و گران‌تر شدن تجهیزات موردنیاز می‌گردد. در صورتی که امپدانس بالاتر نیز برای عملکرد مطلوب فیلتر قابل قبول خواهد بود.

ب- در صورت اضافه شدن فیلترهای هارمونیک، رزونانس موازی آن‌ها در حضور شبکه در فرکانسی کم‌تر از فرکانس تنظیم‌شده فیلتر رخ می‌دهد. با توجه به این که فرکانس رزونانس موازی سیستم به فرکانس رزونانس سری فیلتر نزدیک است، در صورتی که فرکانس تنظیم فیلتر هارمونیک دقیقاً روی فرکانس یک هارمونیک خاص قرار داده شود، تغییر اندکی در مقادیر امپدانس واقعی تجهیزات نسبت به مقادیر طراحی شده، منجر به تغییر فرکانس رزونانس موازی شده و ممکن است این رزونانس در فرکانس هارمونیک موردنظر رخ دهد. در این صورت فیلتر هارمونیک سبب اعوجاج ولتاژ بسیار زیاد و افزایش دامنه ولتاژ در آن فرکانس می‌گردد. به‌عنوان نمونه می‌توان اختلال در خازن‌های فیلتر هارمونیک را مثال زد که در نتیجه آن میزان خازن فیلتر هارمونیک

کاهش یافته و سبب بالاتر رفتن فرکانس رزونانس موازی سیستم می‌گردد.

مرحله ۴: جهت تقسیم توان راکتیو کل بین فیلترهای هارمونیک جواب‌های اولیه‌ای برای برنامه بهینه‌سازی مورد نیاز است که مطابق با جریان‌های هارمونیک قرار داده می‌شود:

$$Q_C^{(n)} \propto I^{(n)} \quad (3)$$

همچنین قیودی که باید در برنامه بهینه‌سازی مدنظر قرار گیرد در ذیل آورده شده‌اند.

الف- مجموع توان راکتیو فیلترهای هارمونیک باید برابر توان راکتیو کل جبران‌کننده باشند.

ب- قید حداکثر اعوجاج هارمونیک ولتاژ و جریان جهت اطمینان از عملکرد صحیح فیلتر باید مدنظر قرار گیرد. بنابراین باید مقادیر استاندارد برای حداکثر اعوجاج‌های هارمونیک و قیود حداقل کردن THDi و THDv در نظر گرفته شوند.

ج- در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای شبکه و تجهیزات: - تغییرات ولتاژ: ولتاژ سیستم قدرت به‌صورت تقریبی در محدوده $\pm 5\%$ درصد تغییر می‌کند. این بدان معنی است که امپدانس شبکه نیز متناسب با ولتاژ و در نتیجه ظرفیت اتصال کوتاه شبکه در محدوده حداقل و حداکثر خود تغییر می‌کند.

- تغییرات فرکانس: فرکانس شبکه حداکثر دارای تغییرات $\pm 1\%$ درصد است که باید در طراحی مدنظر قرار گیرد [۱۹]:

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| \leq 1\% \quad (4)$$

- تغییر فرکانس تنظیم فیلتر: دو عامل مهم تغییرات دما و تغییرات مقادیر سلف و خازن از مقادیر نامی خود در تغییر فرکانس تنظیم فیلتر نقش دارند. به‌طور مثال خازن دارای تغییرات $\pm 2\%$ درصد به علت تغییرات دما در طول سال و دارای تغییرات -5% تا $+10\%$ درصد به دلیل خطای ساخت است. بنابراین تغییرات کل خازن فیلتر هارمونیک به‌صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به این که بیش‌تر راکتورها دارای هسته هوایی می‌باشند و اندوکتانس آن‌ها از تغییرات دما، تأثیر چندانی نمی‌پذیرد، بنابراین فقط به دلیل خطای ساخت تغییرات $\pm 3\%$ درصد در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۶)) [۱۹].

$$-7\% \leq \frac{\Delta C}{C} \leq 12\% \quad (5)$$

$$-3\% \leq \frac{\Delta L}{L} \leq 3\% \quad (6)$$

معادلات لازم جهت به دست آوردن جواب‌های مسئله به‌صورت زیر است.

تابع هدف

$$\min[\text{THD}_i] = \min\{f(Q_{Fn}, n_m)\} \quad (7)$$

قیود مسئله

$$\sum_{n=1}^p Q_{Fn} = Q_{Total}, Q_{Fn} > 0 \quad (8)$$

$$THD_I \leq \overline{THD}_I \quad (9)$$

$$THD_V \leq \overline{THD}_V \quad (10)$$

$$I_n \leq \bar{I}_n \quad (11)$$

$$n[i] - 1 \leq n_m[i] \leq n[i] \quad (12)$$

در روابط (۸) تا (۱۲):

Q_{Fn} : توان راکتیو فیلتر برای حذف هارمونیک مرتبه n ام.

$n_m[i]$: نقطه تشدید برای فیلتر هارمونیک مرتبه n ام.

Q_{Total} : توان راکتیو مورد نیاز کوره‌های قوس الکتریکی.

\overline{THD}_I : حداکثر اعوجاج هارمونیک جریان مطابق استاندارد.

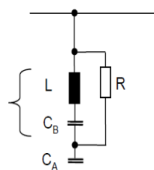
\overline{THD}_V : حداکثر اعوجاج هارمونیک ولتاژ مطابق استاندارد.

I_n : اعوجاج هارمونیک جریان مرتبه n ام.

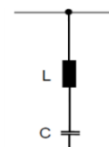
\bar{I}_n : حداکثر اعوجاج هارمونیک جریان مرتبه n ام.

$n[i]$: مرتبه هارمونیک که باید فیلتر شود.

با توجه به توان راکتیو و فرکانس تنظیم هر فیلتر هارمونیکی تک‌فرکانس که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقادیر سلف و خازن مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌گردد.



شکل ۷: فیلتر هارمونیک نوع C



شکل ۶: فیلتر هارمونیک تک‌فرکانس

$$jnX_{L1} + \frac{X_{CA1} + X_{CB1}}{jn} = 0 \rightarrow X_{L1} = \frac{X_{CA1} + X_{CB1}}{n^2} \quad (15)$$

$$Q_{comp} = \frac{V_1^2}{X_{CA1} + X_{CB1} - X_L} = \frac{V_1^2}{X_{CA1} + X_{CB1} (1 - \frac{1}{n^2})} \quad (16)$$

جهت بهینه کردن تلفات مقاومت میراکننده، باید در فرکانس نامی رزونانس سری بین المان‌های L و C_B رخ دهد. بنابراین مطابق رابطه (۱۷) باید امپدانس خازن و راکتور سری شده باهم برابر باشند.

$$X_{L1} = X_{CB1} \quad (17)$$

جهت تعیین مقاومت میراکننده R ، ضریب کیفیت فیلتر تعریف می‌شود که در رابطه (۱۸) آورده شده است.

$$QF = \frac{R}{X_L - X_C} \rightarrow QF_n = \frac{R}{nX_{L1} - X_{CB1}} \quad (18)$$

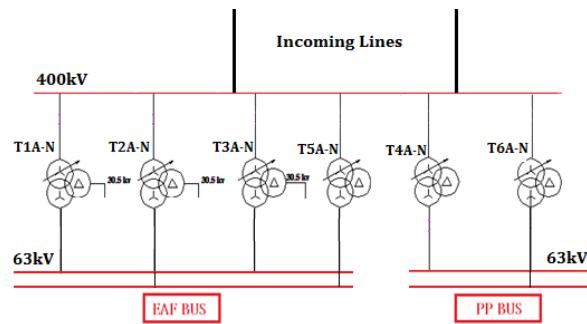
بلوک دیاگرام طراحی فیلترهای هارمونیک در شکل ۸ آورده شده است.

$$jnX_{L1} + \frac{X_{C1}}{jn} = 0 \rightarrow X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n^2} \quad (13)$$

$$Q_{comp} = \frac{V_1^2}{X_{C1}} = \frac{V_1^2}{X_{C1} - X_L} = \frac{V_1^2}{X_{C1} (1 - \frac{1}{n^2})} \quad (14)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴)، n مرتبه فیلتر هارمونیک را مشخص می‌کند. Q_{comp} توان راکتیو فیلتر هارمونیک است که با توجه به X_{C1}^* (راکتانس خازنی مؤلفه اصلی معادل سلف و خازن) به دست می‌آید. همچنین X_{L1} و X_{C1} مؤلفه‌های اصلی سلف و خازن می‌باشند.

مرحله ۵: در این مرحله رزونانس‌های موازی سیستم با توجه به پاسخ فرکانسی آن بررسی می‌گردد. امپدانس مجموعه فیلترهای موازی به‌صورت تابعی از فرکانس، یعنی به‌صورت $Z_f = F(\omega)$ و نیز امپدانس سیستم تغذیه نیز به‌صورت تابعی از فرکانس یعنی به‌صورت $Z_N = G(\omega)$ مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا از وجود رزونانس‌های موازی بین امپدانس سیستم تغذیه‌کننده یعنی Z_N و امپدانس فیلترها اطمینان حاصل شود.



شکل ۹: دیاگرام تک‌خطی مجتمع فولاد مورد مطالعه

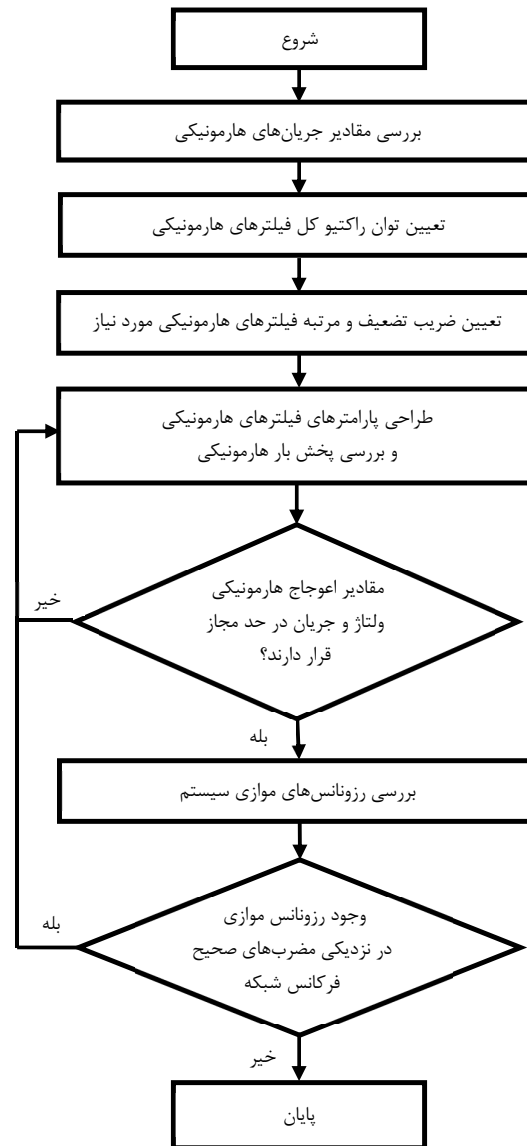
قدرت اتصال کوتاه در باس ۴۰۰kV که نقطه اتصال به شبکه مجتمع فولاد مورد مطالعه است در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: قدرت اتصال کوتاه PCC

جریان اتصال کوتاه سه فاز (A)		توالی صفر		توالی مثبت	
حداکثر	حداقل	$R_0 (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$	$R_+ (\Omega)$	$X_+ (\Omega)$
۲۸/۴۰۸	۲۳/۹۱۳	۱/۶۹۲	۱۲/۹۶۱	۰/۸۱۸	۸/۹۰۵

به‌منظور جبران توان راکتیو و کاهش فلیکر ولتاژ و حذف هارمونیک‌ها باید از جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو در هر یک از باس‌بارهای کوره‌های قوس استفاده شود. ساختار این جبران‌کننده‌های استاتیکی توان راکتیو به‌صورت فیلترهای هارمونیکی به همراه راکتور کنترل‌شونده با تریستور (TCR) است که در ادامه به طراحی فیلترهای هارمونیکی آن مطابق با روش طراحی مذکور پرداخته می‌شود.

ابتدا مطابق مرحله ۱ باید میزان هارمونیک‌های جریان کوره‌های قوس الکتریکی و TCR مشخص گردد که در جدول‌های ۱ و ۲ این مقادیر آورده شده است. بر اساس درصد جریان‌های هارمونیکی مذکور و حد مجاز استاندارد، ملاحظه می‌گردد که به‌کارگیری فیلترهای هارمونیکی مرتبه‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۵ الزامی است. لازم به ذکر است میزان هارمونیک چهارم جریان کوره‌های قوس الکتریکی در حد مجاز بوده ولی در صورت عدم استفاده از این فیلتر رزونانس موزی شدیدی ناشی از سایر فیلترها روی این فرکانس ایجاد خواهد شد که لزوم به‌کارگیری این فیلتر هارمونیکی را نشان می‌دهد. ضمناً میزان توان راکتیو کل فیلترهای هارمونیکی هر SVC نیز متناسب با توان راکتیو موردنیاز کوره‌های قوس الکتریکی در هر باس‌بار و شرایط هم‌زمانی عملکرد آن‌ها و همچنین ضریب توان موردنظر برابر $200\text{MVA}\tau$ تعیین می‌گردد. توان راکتیو کل متناسب با جریان هارمونیکی هر فیلتر و در نظر گرفتن قیود مذکور بین آن‌ها تقسیم می‌شود. در ابتدا فرض شده است که همه فیلترهای هارمونیکی از نوع فیلتر هارمونیکی تک‌فرکانس بوده و فرکانس تنظیم آن‌ها دقیقاً برابر با مرتبه هارمونیکی فیلتر باشد. پس از انجام مراحل طراحی و بهینه‌سازی، پاسخ فرکانسی در این حالت به‌صورت شکل ۱۰ است.



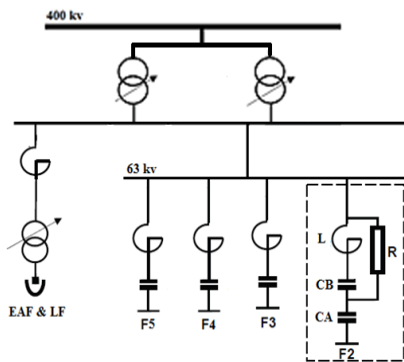
شکل ۸: بلوک دیاگرام طراحی فیلترهای هارمونیکی

۶- بررسی شبکه برق مجتمع فولاد مورد مطالعه و طراحی فیلترهای هارمونیکی SVC

این مجتمع فولاد ۵/۵ میلیون تنی توسط دو خط ۴۰۰kV تغذیه شده و سپس توسط ۶ ترانسفورمر ۴۰۰kV با ظرفیت نامی ۲۲۰MVA و امپدانس ۱۳/۸ درصد، باس‌بارهای ۶۳kV تغذیه می‌شوند. با توجه به این‌که کوره‌های قوس الکتریکی از بزرگ‌ترین بارهای غیرخطی آلوده‌کننده می‌باشند، باس‌بارهای تغذیه‌کننده آن‌ها از باس‌بارهای تغذیه‌کننده نواحی دیگر ایزوله می‌باشند. این مجتمع فولاد دارای ۸ کوره قوس الکتریکی ۲۰۰ تنی جهت تولید مذاب از ترکیب قراضه و آهن اسفنجی است که توسط ۲ باس‌بار کوره قوس تغذیه می‌شوند. در شکل ۹ دیاگرام تک‌خطی مجتمع فولاد مورد مطالعه آورده شده است.

بنابراین فیلترهای هارمونیکی SVC مطابق شکل ۱۲ در نظر گرفته

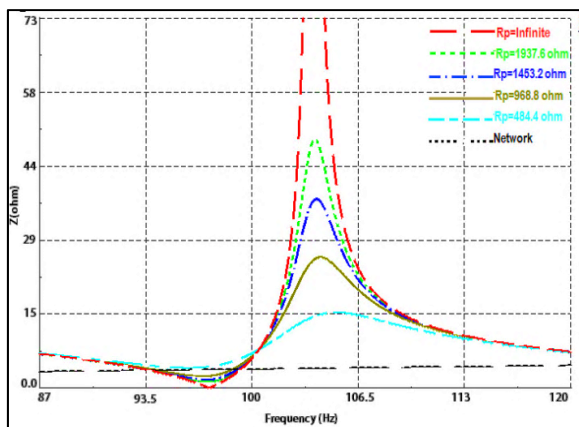
می‌شوند.



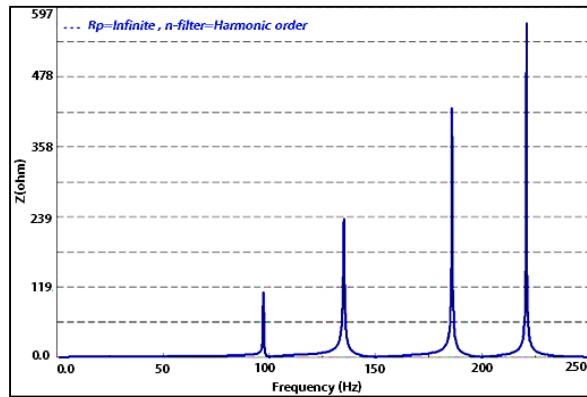
شکل ۱۲: فیلترهای هارمونیکی SVC

با توجه به این که مراحل طراحی فیلترهای هارمونیکی باید به ترتیب از مرتبه پایین به بالا انجام پذیرد بنابراین ابتدا به طراحی فیلتر هارمونیکی مرتبه دوم که از نوع فیلتر نوع C است پرداخته می‌شود. برای به دست آوردن مقدار مقاومت میراکننده فیلتر هارمونیکی مرتبه دوم باید ضریب کیفیت به گونه‌ای انتخاب گردد که هم دامنه رزونانس موازی سیستم در حضور فیلترهای هارمونیکی دیگر کاهش یافته و هم امپدانس فیلتر در فرکانس تنظیم به گونه‌ای باشد که اعوجاج‌های هارمونیکی به نحو مطلوب جذب فیلتر شده و در حد مجاز استاندارد قرار گیرند. بنابراین پاسخ فرکانسی فیلترهای هارمونیکی در عدم حضور شبکه به ازای ضرایب کیفیت مختلف بررسی می‌شود.

در شکل ۱۳ تأثیر کاهش مقدار مقاومت میراکننده فیلتر هارمونیکی مرتبه دوم در بهبود رزونانس موازی مشاهده می‌گردد. در حالتی که مقاومت میراکننده فیلتر نوع C بینهایت باشد بیش‌ترین رزونانس موازی و کم‌ترین امپدانس در فرکانس تنظیم ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است در حالتی که مقاومت میراکننده فیلتر نوع C بینهایت است، این فیلتر معادل با فیلتر تک‌فرکانس است. شکل فوق به ازای ضرایب کیفیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ رسم گردیده که مقاومت متناظر و مقادیر دامنه امپدانس رزونانس موازی با ازای ضرایب کیفیت مذکور، در جدول ۴ آورده شده است.



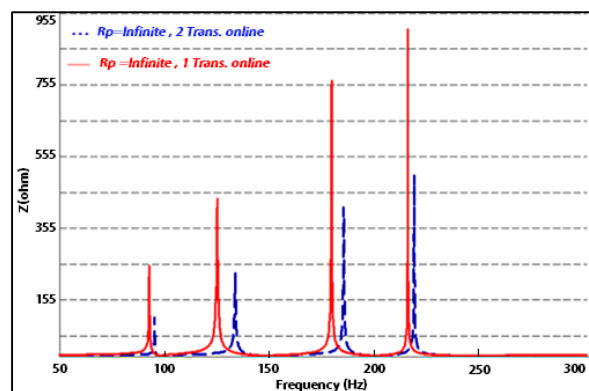
شکل ۱۳: پاسخ فرکانسی فیلتر و شبکه به صورت مجزا



شکل ۱۰: پاسخ فرکانسی فیلترهای هارمونیکی

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد رزونانس موازی در نزدیکی فرکانس ۱۰۰ هرتز رخ داده به گونه‌ای که با اندک تغییری در مقادیر امپدانس تجهیزات واقعی نسبت به مقادیر طراحی، فرکانس تنظیم فیلتر هارمونیکی تغییر کرده و می‌تواند منجر به تغییر فرکانس رزونانس موازی به فرکانس هارمونیک موردنظر گردد. به عنوان نمونه ایجاد اختلال در خازن‌های فیلتر هارمونیکی سبب کاهش ظرفیت خازنی آن و بالاتر رفتن فرکانس رزونانس موازی سیستم می‌شود.

مشکل دیگر این است که با توجه به این که رزونانس موازی ناشی از فیلتر هارمونیکی مرتبه دوم در نزدیکی فرکانس نامی ممکن است اتفاق بیفتد، در صورت نزدیک شدن این رزونانس به فرکانس نامی، سبب ایجاد اعوجاج ولتاژ بسیار زیاد می‌شود. به عنوان نمونه در صورت از مدار خارج شدن یکی از ترانسفورمرهای بالادست رزونانس موازی در فرکانس کم‌تری رخ داده و همچنین دامنه رزونانس‌های موازی سیستم افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: اثر خارج شدن یک ترانسفورمر بالادست از مدار

جهت حل مشکلات فوق دو راه کار انجام شده و مراحل طراحی مجدداً تکرار خواهند شد.

- فرکانس تنظیم فیلتر هارمونیکی کم‌تر از مرتبه هارمونیک موردنظر در نظر گرفته شود.
- از فیلتر هارمونیکی نوع C برای فیلتر هارمونیکی مرتبه دوم جهت کاهش دامنه رزونانس موازی استفاده گردد.

جدول ۴: مقاومت میراکننده و دامنه رزونانس موازی فیلتر

ضریب کیفیت فیلتر	مقاومت میراکننده (اهم)	دامنه امپدانس رزونانس موازی (اهم)
---	∞	۳۳۸۷۲
۴۰	۱۹۳۷/۶	۴۸/۹۱
۳۰	۱۴۵۳/۲	۳۷/۱۷
۲۰	۹۶۸/۸	۲۵/۷۲
۱۰	۴۸۴/۴	۱۴/۸۰

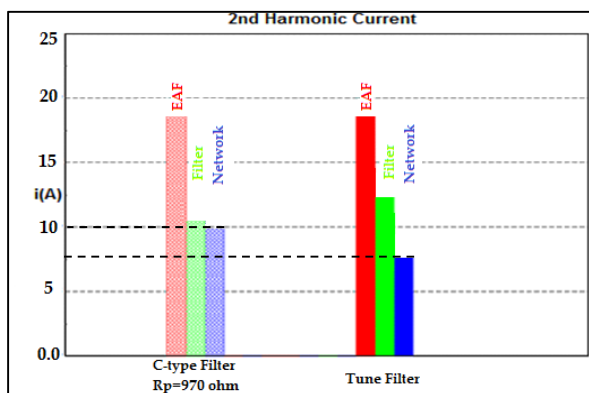
گردند. با اعمال قیود مذکور و همچنین میزان جریان هارمونیک مجاز مطابق استاندارد، بهینه‌سازی انجام شده و مقاومت میراکننده برابر ۹۷۰ اهم انتخاب می‌شود.

نسبت جریان هارمونیک عبوری از شبکه به جریان عبوری از فیلتر مطابق رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$\text{با فرض } \omega_r = n\omega_1 \quad (19)$$

$$\left| \frac{I_{Network}(\omega_r)}{I_{Filter}(\omega_r)} \right| = K = \left| \frac{Z_{Filter}(\omega_r)}{Z_{Network}(\omega_r)} \right|$$

جهت تأثیر مقاومت میراکننده در جذب هارمونیک‌های جریان با توجه به پاسخ فرکانسی‌های ترسیم گردیده، در دو حالت پخش بار هارمونیک در باس بار ۶۳kV بررسی می‌گردد. در حالت اول از یک فیلتر نوع C با مقاومت بهینه ۹۷۰ اهم و در حالت دیگر فیلتر تک‌فرکانس برای فیلتر هارمونیک مرتبه دوم SVC‌های این مجتمع فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱۵ بررسی پخش بار هارمونیک در دو حالت مذکور را نشان می‌دهد.



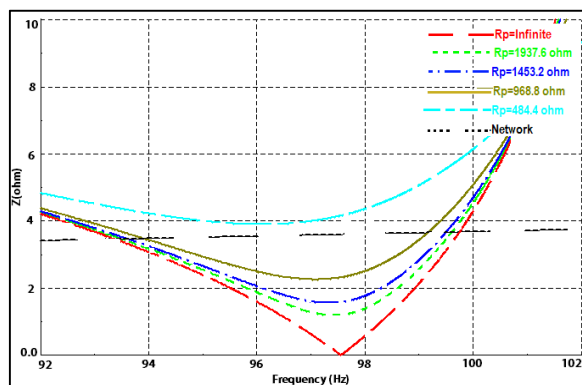
شکل ۱۵: پخش بار هارمونیک برای یک کوره قوس

همان‌گونه که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌گردد در حالتی که فیلتر هارمونیک مرتبه دوم نوع C به جای فیلتر تک‌فرکانس مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل افزایش دامنه امپدانس در فرکانس تنظیم، میزان هارمونیک بیش‌تری از شبکه بالادست عبور می‌کند. در جدول ۶ مقایسه بین دامنه رزونانس موازی و میزان افزایش هارمونیک جریان در دو حالت استفاده از فیلتر تک‌تنظیم و فیلتر نوع C با مقاومت میراکننده ۹۷۰ اهم انجام شده است.

جدول ۶: مقایسه دامنه رزونانس موازی و هارمونیک جریان

مقاومت میراکننده (اهم)	جریان هارمونیک دوم شبکه (آمپر)	دامنه امپدانس رزونانس موازی (اهم)
فیلتر تک‌تنظیم	۷/۲	۳۳۸۷۲
فیلتر نوع C با مقاومت میراکننده ۹۷۰ اهم	۹/۹	۲۵/۷
تغییرات نسبت به فیلتر تک‌تنظیم	۳۷/۵ درصد افزایش	۹۹/۹ درصد کاهش

پس از بررسی رزونانس‌های موازی سیستم و اثر تغییر مقاومت میراکننده بر آن‌ها، به بررسی رزونانس‌های سری فیلتر هارمونیک پرداخته خواهد شد. به‌منظور بررسی پخش بار هارمونیک در حضور SVC و شبکه لازم است که $Z_{Net}(n)$ و $Z_{SVC}(n)$ مشخص گردند که این مقادیر در واقع امپدانس فیلترها و شبکه در فرکانس‌های مختلف می‌باشند. در شکل ۱۴ با تغییر مقاومت میراکننده مقایسه‌ای بین مقادیر امپدانس رزونانس سری صورت می‌گیرد.



شکل ۱۴: بررسی رزونانس سری با تغییر مقاومت میراکننده

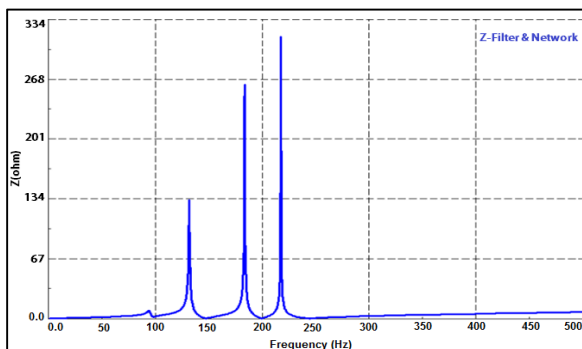
در جدول ۵ دامنه امپدانس رزونانس سری آورده شده است.

جدول ۵: دامنه امپدانس رزونانس سری فیلتر

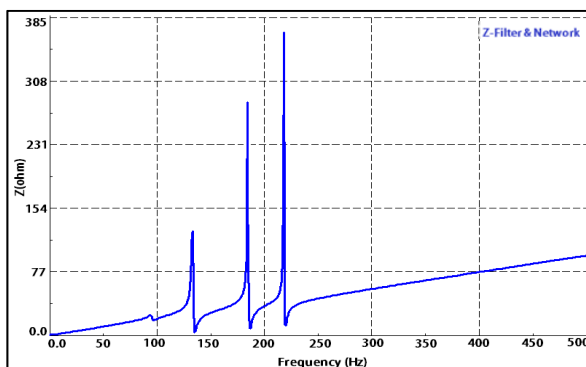
مقاومت میراکننده (اهم)	دامنه امپدانس رزونانس سری (اهم)
∞	۰/۰۰۳
۱۹۳۷/۶	۱/۱۸
۱۴۵۳/۲	۱/۵۶
۹۶۸/۸	۲/۲۵
۴۸۴/۴	۳/۹

مشاهده می‌شود به ازای ضریب کیفیت ۱۰ یا همان مقاومت میراکننده ۴۸۴ اهم امپدانس فیلتر هارمونیک بیش از امپدانس شبکه است. در این حالت دامنه رزونانس موازی در کم‌ترین مقدار است اما با توجه به امپدانس فیلتر در فرکانس تنظیم این مقاومت بهینه نیست. بنابراین جهت کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه بهتر است حالتی انتخاب گردد که امپدانس فیلتر هارمونیک کم‌تر از امپدانس شبکه بوده تا میزان بیش‌تری از هارمونیک‌های کوره‌های قوس الکتریکی جذب فیلتر

جهت بررسی رزونانس‌های موازی سیستم، پاسخ فرکانسی فیلترهای هارمونیکي و شبکه در حضور هم در باس‌های ۶۳kV و ۴۰۰kV به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده می‌شود.



شکل ۱۷: پاسخ فرکانسی در باس ۶۳kV



شکل ۱۸: پاسخ فرکانسی در باس ۴۰۰kV

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ملاحظه می‌گردد که رزونانس‌های موازی سیستم در فرکانس هارمونیک‌های میانی سیستم رخ داده‌اند که از این جهت نیز مسئله‌ای وجود ندارد. پس از پایان یافتن مراحل طراحی و بهینه‌سازی، اطلاعات فیلترهای هارمونیکي به‌طور خلاصه مطابق جدول ۷ به دست آمده است.

جدول ۷: مشخصات فیلترهای هارمونیکي SVC

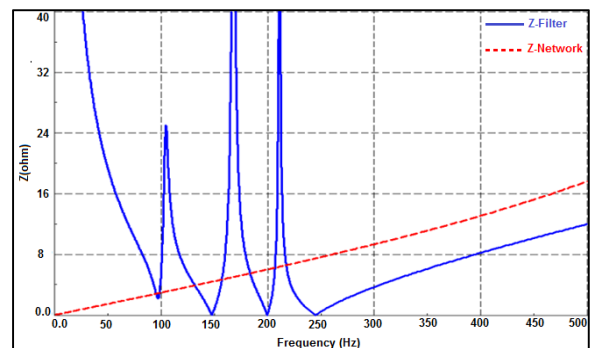
مرتبۀ فیلتر هارمونیکي	نوع فیلتر هارمونیکي	توان راکتیو (MVar)	راکتور (mH)	خازن (μF)
۲	فیلتر نوع C	۴۲	۱۰۷/۳	$C_A=333/7$ $C_B=94/4$
۳	فیلتر تک‌تنظیم	۶۳	۲۶/۰۴	۴۴/۷۳
۴	فیلتر تک‌تنظیم	۲۵	۳۳/۸۷	۱۸/۷۹
۵	فیلتر تک‌تنظیم	۷۰	۷/۸۴	۵۳/۸۲

با استفاده از شبیه‌سازی شبکه مجتمع فولاد مورد مطالعه در نرم‌افزار DIgSILENT، جریان شبکه در حضور یک کوره قوس قبل از به‌کارگیری فیلترهای هارمونیکي به‌صورت شکل ۱۹ است.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد در صورت استفاده از فیلتر هارمونیکي نوع C با مقاومت میراکننده ۹۷۰ اهم، میزان هارمونیک دوم جریان شبکه ۳۷/۵ درصد نسبت به حالتی که از فیلتر تک‌تنظیم استفاده شود، افزایش یافته ولی دامنه رزونانس موازی ۹۹/۹ درصد کاهش یافته است.

پس از طراحی فیلتر هارمونیک دوم نوع C، طراحی فیلترهای هارمونیکي مراتب بالاتر نیز مطابق با روش مذکور انجام می‌شود. لازم به ذکر است چون رزونانس موازی فیلترهای هارمونیکي مراتب بالاتر در نزدیکی فرکانس هارمونیکي موردنظر و همچنین فرکانس نامی رخ نمی‌دهد، لذا از فیلترهای تک‌فرکانس برای آن‌ها استفاده می‌گردد. با توجه به تقسیم توان راکتیو بین فیلترهای هارمونیکي، پاسخ فرکانسی برای سایر فیلترها نیز با اضافه کردن فیلترهای هارمونیکي به ترتیب از پایین به بالا، مورد بررسی قرار می‌گیرند تا از بخش بار هارمونیکي شبکه و فیلترها و در حد مجاز بودن اعوجاج‌های هارمونیکي اطمینان حاصل شود. همچنین باید رزونانس‌های موازی فیلترها و شبکه نیز در حضور هم مورد مطالعه قرار گیرد.

با طراحی فیلترهای هارمونیکي مراتب بالاتر پاسخ فرکانسی فیلترهای هارمونیکي و شبکه به‌طور مستقل از هم در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که امپدانس کم فیلترهای هارمونیکي مرتبه ۳ و ۴ و ۵ سبب می‌شود که به‌خوبی هارمونیک‌های جریان جذب این فیلترها شده و فقط درصد کمی به شبکه نفوذ کند. همچنین استفاده از فیلتر هارمونیکي نوع C سبب افزایش دامنه امپدانس در رزونانس سری فیلتر هارمونیکي مرتبه دوم و کاهش دامنه امپدانس رزونانس موازی شده است.

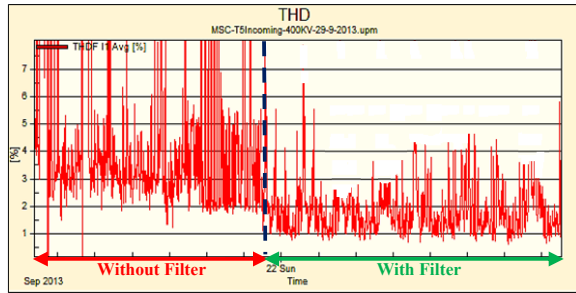


شکل ۱۶: پاسخ فرکانسی فیلترهای هارمونیکي و شبکه

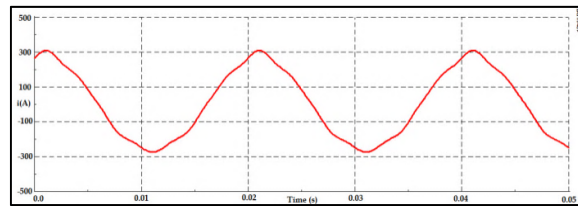
میزان هارمونیک‌های جریان در شبکه بالادست و فیلترها با توجه به روابط (۲۰) و (۲۱) می‌تواند محاسبه شود. در روابط مذکور $I(n)$ جریان هارمونیک مرتبه n ، $Z_{Net}(n)$ امپدانس شبکه در هارمونیک n ام و $Z_{SVC}(n)$ امپدانس فیلترها در هارمونیک n ام نامیده شده است.

$$I_{Net}(n) = \frac{Z_{SVC}(n)}{Z_{Net}(n) + Z_{SVC}(n)} \quad (20)$$

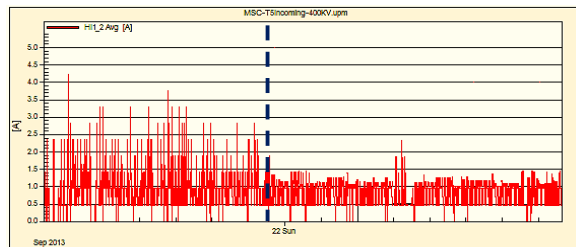
$$I_{SVC}(n) = \frac{Z_{Net}(n)}{Z_{Net}(n) + Z_{SVC}(n)} \quad (21)$$



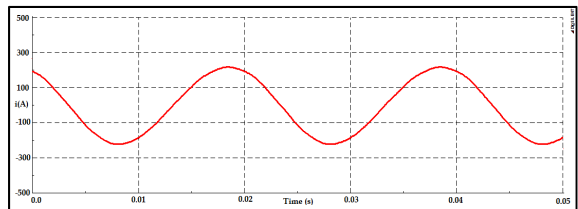
شکل ۱۹: جریان شبکه در شبیه‌سازی بدون فیلترهای هارمونیک



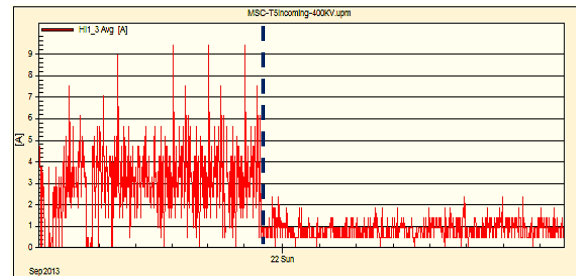
شکل ۲۰: جریان شبکه در شبیه‌سازی با فیلترهای هارمونیک



شکل ۲۱: جریان هارمونیک دوم شبکه بر اساس اندازه‌گیری



شکل ۲۲: THD جریان شبکه بر اساس اندازه‌گیری

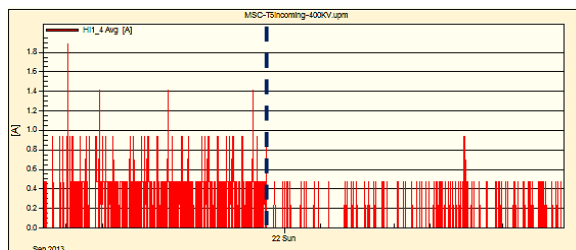


شکل ۲۳: جریان هارمونیک سوم شبکه بر اساس اندازه‌گیری

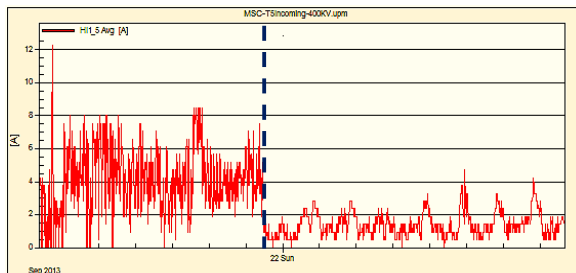
در جدول ۸ مقادیر THD جریان ورودی در دو حالت حضور و عدم حضور SVC مقایسه شده‌اند.

جدول ۸: مقایسه مقادیر THDi

	بدون حضور SVC	با حضور SVC
THDi	٪ ۳/۴	٪ ۱/۵



شکل ۲۴: جریان هارمونیک چهارم شبکه بر اساس اندازه‌گیری



شکل ۲۵: جریان هارمونیک پنجم شبکه بر اساس اندازه‌گیری

مطابق نتایج اندازه‌گیری در ورودی یکی از ترانسفورمرهای ۴۰۰kV مشاهده می‌گردد که بهبود قابل توجهی در مقادیر هارمونیک جریان در حضور SVC حاصل شده است. مقادیر متوسط جریان‌های هارمونیک در ورودی ترانسفورمر در جدول ۹ آورده شده و درصد کاهش آن‌ها در

۷- نتایج اندازه‌گیری

در این قسمت اعوجاج هارمونیک جریان مجتمع فولاد مورد مطالعه توسط اندازه‌گیری در ورودی یکی از ترانسفورمرهای ۲۲۰MVA در باس ۴۰۰kV و در شرایطی انجام شده که ابتدا جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو SVC از مدار خارج بوده و سپس وارد مدار شده است. لازم به ذکر است اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری کیفیت توان Unipower مدل 902 Unilyzer با کلاس دقت A مطابق استاندارد IEC 61000-4-30 انجام شده است. در شکل ۲۱ اندازه‌گیری عملی هارمونیک‌های جریان نشان داده شده است.



شکل ۲۶: اندازه‌گیری عملی هارمونیک‌های جریان ورودی

تأثیر فیلترهای هارمونیک SVC بر میزان هارمونیک‌های جریان ورودی در شکل‌های ۲۲ تا ۲۶ نشان داده شده است.

- Engineering Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, pp. 277-282, 2013.
- [4] IEEE power and energy society, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE std. 519, pp. 1-26, 2014.
- [5] J. Arrillaga, and N.R. Watson, *Power System Harmonics*, New York, Wiley Publication, 2003.
- [6] A.A. Gomez, J.J. M. Durango, and A.E. Mejia, "Electric arc furnace modeling for power quality analysis," *ANDESCON IEEE*, pp. 1-6, 2010.
- [7] T.J. Dionise, "Assessing the performance of a static var compensator for an electric arc furnace," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 1619-1629, 2014.
- [8] M.B. Marz, "Harmonic simulations for filter design at a large industrial load," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1080-1087, 2000.
- [9] M.R. Vatani, D. Solati Alkaran, M.J. Sanjari, and G.B. Gharehpetian, "a practical method for optimized reactive power sharing among passive filters," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, 2014.
- [10] C.J. Chou, C.W. Lio, J.Y. Lee, and K. D. Lee, "Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 433-441, 2000.
- [11] R. Horton, R. Dugan, and D. Hallmark, "Novel design methodology for c-type harmonic filter banks applied in HV and EHV networks," *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp.1-6, 2012.
- [12] Y. Xiao, J. Zhao, and S. Mao, "Theory for the design of c-type filter," *IEEE Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 11-15, 2004.
- [13] R. Dwyer, H.V. Nguyen, and S.G. Ashmore, "C Filters for wide-bandwidth harmonic attenuation with low losses," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 4, pp. 2955-2960, 2000.
- [14] J.C. Das, "Passive filters-potentialities and limitations," *IEEE Transaction on Industry Application*, vol. 40, no. 1, pp. 232-241, 2004.
- [15] S.H.E. Abdel Aleem, A.F. Zobaa, and M. Abdel Aziz, "Optimal c-type passive filter based on minimization of the Voltage harmonic distortion for nonlinear loads," *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, vol. 59, no. 1, pp. 281-289, 2012.
- [16] Y.S. Cho, and H. Cha, "Single-tuned passive harmonic filter design considering variances of tuning and quality factor," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 7-13, 2011.
- [17] C.O. Gerçek, M. Ermis, A. Ertas, K.N. Kose, and O. Ünsar, "Design, implementation, and operation of a new c-type 2nd Harmonic Filter for Electric Arc and Ladle Furnaces", *IEEE Transaction on Industry Application*, vol. 47, no. 4, pp. 1545-1557, 2011.
- [18] N.G. Hingorani, and L. Gyugyi, *Understanding FACTS-Concepts and technology of flexible Ac transmission systems*, New York, 1999.
- [19] K.P. Lin, and M.H. Lin, "An advanced computer code for single-tuned harmonic filter design," *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, pp. 107-115, 1997.
- [20] B. Badrzadeh, K.S. Smith, and R.C. Wilson, "Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 973-983, 2011.

صورت در مدار آمدن SVC نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد جریان هارمونیک دوم با توجه به استفاده از فیلتر نوع C حدود ۴۰ درصد کاهش و جریان‌های هارمونیک سوم، چهارم و پنجم حدود ۷۰ درصد کاهش یافته‌اند.

جدول ۹: میزان جریان هارمونیک قبل و بعد از در مدار آمدن SVC

درصد کاهش	متوسط جریان هارمونیک در ولتاژ ۴۰ kV		مرتب‌ه هارمونیک
	با حضور SVC	بدون حضور SVC	
٪ ۴۲/۸	۰/۸ A	۱/۴ A	هارمونیک دوم
٪ ۷۳/۶	۰/۹ A	۳/۴۲ A	هارمونیک سوم
٪ ۷۰/۳	۰/۰۸ A	۰/۲۷ A	هارمونیک چهارم
٪ ۶۸/۲۹	۱/۳ A	۴/۱ A	هارمونیک پنجم
٪ ۵۵/۸	٪ ۱/۴۸	٪ ۳/۳۵	THDi

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع فیلترهای هارمونیک در سیستم قدرت و نحوه طراحی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جهت طراحی فیلترهای هارمونیک، بلوک دیگرام طراحی به صورت جز به جز و با آنالیز حساسیت رزونانس موازی نسبت به تغییر پارامترهای فیلترهای هارمونیک و شبکه نشان داده شده و همچنین مراحل طراحی فیلتر هارمونیک نوع C ارائه گردید. پس از بررسی مراحل طراحی با استفاده از روش ارائه شده فیلترهای هارمونیک SVC مجتمع فولاد ۵/۵ میلیون تنی طراحی گردید و با توجه به قیود لازم جهت طراحی و آنالیز حساسیت، بهینه‌سازی بین رزونانس‌های موازی و میزان هارمونیک‌های تزریقی به شبکه انجام گرفت. مشاهده شد که با کاهش مقاومت میراکننده، امیدانس فیلتر در فرکانس تنظیم افزایش یافته و به همین خاطر میزان هارمونیک‌های جریان تزریقی به شبکه افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری عملی در مجتمع فولاد مورد مطالعه مشاهده گردید که هارمونیک دوم جریان شبکه در حضور فیلتر نوع C حدود ۴۰ درصد کاهش و هارمونیک‌های سوم، چهارم و پنجم حدود ۷۰ درصد کاهش یافته است. همچنین ملاحظه گردید با کاهش مقاومت میراکننده دامنه رزونانس‌های موازی نیز کاهش یافته است به طوری که دامنه رزونانس موازی فیلتر هارمونیک دوم با مقاومت میراکننده ۹۷۰ اهم حدود ۹۹/۹ درصد کاهش یافته است.

مراجع

- [1] M. Gol, O. Salor, B. Albayaci, B. Mutluer, I. Çadırcı, and M. Ermis, "A new field-data-based eaf model for power quality studies," *IEEE Transaction on Industry Application*, vol. 46, no. 3, pp. 1230-1242, 2010.
- [2] I. Vervenne, K. Van Reuse, and R. Belmans, "Electric arc furnace modelling from a power quality point of view," *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, vol. 1, no. 6, pp. 9-11, 2007.
- [3] R. Grunbaum, P. Ekstrom and A.A. Hellstrom, "Powerful reactive power compensation of a very large electric arc furnace," *Fourth International Conference on Power*

زیرنویس‌ها

³ Point of Common Coupling
⁴ Thyristor Reactor Controlled

¹ Electrical Arc Furnace
² Static Var Compensator