

ارائه روش اندازه‌گیری سریع جهت بهره‌برداری بهینه ظرفیت SVC به منظور کاهش فلیکر کوره‌های قوس الکتریکی

محمد رضا آسبان^۱، دانشجوی دکترا؛ جمشید آقایی^۲، دانشیار؛ طاهر نیکنام^۳، استاد؛ سید ناصر هاشمی‌پور^۴، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران و

گروه ملی صنعتی فولاد ایران- اهواز- ایران - power_asban@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران - aghaei@sutech.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران - niknam@sutech.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران - n.hashemipour@sutech.ac.ir

چکیده: بهره‌برداران شبکه‌های الکتریکی به منظور جبران‌سازی توان راکتیو، افزایش کیفیت توان، کاهش نوسانات ولتاژ و فلیکر، از ادواتی نظیر SVC استفاده می‌نمایند. میزان اثربخشی تجهیزات ذکر شده در شبکه قدرت جهت کاهش نوسانات ولتاژ، فلیکر و جبران توان راکتیو، نیازمند افزایش سرعت پاسخ‌گویی این تجهیزات می‌باشد. در هنگام طراحی این تجهیزات جبران‌ساز، جهت افزایش سرعت پاسخ‌گویی باید به قسمت‌های مختلف آن‌ها از قبیل مدارهای کنترلی، مدارهای اندازه‌گیری توان راکتیو و اکتیو و ادوات کلیدزنی دقت نمود. در این مقاله سعی شده است با محاسبه توان راکتیو و اکتیو در زمان‌های کم‌تر از نیم سیکل و حذف هارمونیک‌های مزاحم در مدار اندازه‌گیری، سرعت پاسخ‌گویی SVC را به حد قابل قبول رساند. بر این اساس، معادلات توان اکتیو و راکتیو به‌گونه‌ای استخراج شده‌اند که در مدت یک-هشتم سیکل قابل محاسبه می‌باشند. ضمناً برای حذف هارمونیک‌ها، از یک فیلتر مقایسه‌ای سریع با ساختار بسیار ساده بر مبنای مدار شکاف فرکانس اصلی استفاده شده است. روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار EWB512 طراحی و ساخته شده، و نهایتاً مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان برای بررسی کیفیت روش پیشنهادی، یک کوره قوس الکتریکی در صنایع فولادسازی با استفاده از نرم‌افزار EMTP مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کلیدزنی، هارمونیک، فلیکر، کیفیت توان، فیلتر، کوره قوس الکتریکی

Presenting High Speed Measuring Method for Optimal Capacity Utilization of SVC to Reduce Flicker in Electric ARC Furnaces

M. Asban¹, PhD Student; J. Aghaei², Associate Professor; T. Niknam³, Professor; N. Hashemipour⁴, MSc Student

- 1- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, and Iran National Steel Industrial Group, Ahwaz, Iran, Email: power_asban@yahoo.com
- 2- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: aghaei@sutech.ac.ir
- 3- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: niknam@sutech.ac.ir
- 4- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: n.hashemipour@sutech.ac.ir

Abstract: Electrical systems operators implement compensating equipment like SVC to compensate reactive power, enhance power quality, reduce voltage fluctuations and flicker. The effectiveness of utilizing these devices to compensate reactive power and decrease voltage fluctuations and flicker depends increasing their response speed. In the designing of these equipment, their response speed can be enhanced in different parts of these devices including control circuit, active and reactive power measurement circuits and switching devices. In this paper, it is tried to achieve a desired response speed by the aid of calculating the active and reactive power in the time less than a half-cycle and removing disturbing harmonics. Accordingly, the active and reactive power equations are derived in such a way that they are calculated within one-eighth cycle. Also, to exclude the harmonics, a simple and fast comparing filter based on the notch circuit in the main frequency is used. The proposed methodology has been designed and manufactured using EWB512 software. Finally, to evaluate the quality of the proposed method, an electric arc furnace in a steal company has been simulated and studied in the EMTP simulation package.

Keywords: Switching, harmonic, flicker, power quality, filter, electric arc furnace.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۴

نام نویسنده مسئول: جمشید آقایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

در سراسر جهان، آهن همانند دیگر فلزات قراضه، توسط کوره‌های قوس الکتریکی (EAF) ذوب می‌شوند و در قسمت کوره‌های پاتیلی (LF) بر روی آن‌ها، فعالیت‌های متالوژی صورت می‌گیرد. خصوصیات غیرخطی، نامتعادلی و نامتقارنی عملکرد کوره‌های قوس الکتریکی باعث ایجاد اغتشاش در سیستم تغذیه می‌گردد [۴-۱]. در نتیجه، این‌گونه بارها باعث پدید آمدن مشکلاتی برای کیفیت توان از قبیل ایجاد اغتشاش، عدم تعادل، پائین آمدن ضریب توان، ایجاد فلیکر^۲ و نوسانات ولتاژ در شبکه می‌گردند. در اکثر مشکلات مربوط به کیفیت توان، استفاده مناسب از جبران‌سازها با در نظر گرفتن نیازمندی‌هایی نظیر موارد زیر می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد [۵]:

- فراهم نمودن توان راکتیو بار مبنا جهت محدود کردن انحرافات ولتاژی
- استفاده از فیلتر جهت حفظ انحرافات ولتاژی در محدوده قابل قبول
- کنترل نامتعادلی توان راکتیو منبع تغذیه برای فرونشاندن نوسانات ولتاژ غیرمجاز مربوط به فلیکر و نامتعادلی‌های بارهای متغیر نسبت به زمان.

امروزه بر روی فیلتر توان اکتیو [۶] و جبران‌ساز استاتیکی STATCOM [۷] مطالعات زیادی صورت گرفته و در عمل نیز از آن‌ها استفاده شده است. عیوب مهم این سیستم‌ها، تحمیل هزینه‌های زیادی به مصرف‌کنندگان، ایجاد تلفات زیاد و بهره‌برداری پیچیده‌تر می‌باشند. از طرفی، جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو همواره به عنوان یک راه‌حل اقتصادی [۴-۳] مورد توجه قرار دارد. در واقع، SVC شامل فیلترهای هارمونیک (جهت تثبیت ولتاژ در محدوده مجاز خود) و همچنین راکتور کنترل شده با تریستور^۵ می‌باشد که ظرفیت آن به طور دینامیکی قابل تنظیم است. در این جبران‌سازها، تأمین توان راکتیو متغیر با زمان موردنیاز، با استفاده از سیستم کنترل تنظیم سوسپتانس^۶ معادل خروجی به وسیله‌ی تنظیم نرم زاویه آتش تریستورها انجام می‌پذیرد. برای این منظور روش‌های کلی کنترل SVC عبارتند از دو استراتژی کلی کنترل غیرمستقیم [۳، ۱۳-۷] و مستقیم [۱۴، ۱۵] که در ادامه این دو روش بیان می‌شوند. روش غیرمستقیم بر اساس تغییرات توابع کنترلی در سیستم کنترل کار می‌کند. این روش کنترلی در مقالات زیادی ارائه شده و می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی نمود:

- استراتژی کنترل فازی [۱۰-۷، ۱۶ و ۱۷]: این روش از استراتژی کنترلی PID فازی یا کنترل فازی پیش‌فاز- پس‌فاز با استفاده از تکنیک پیشرفته در محاسبه ولتاژهای کمکی جهت مقایسه با ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ مرجع مدار کنترلی حلقه بسته جبران‌ساز انجام می‌شود. این استراتژی، دارای دقت خوبی بوده ولی عملکرد توابع کنترلی می‌بایستی بر اساس تجربه و دانش فرد خبیره تنظیم شود.

- استراتژی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۱، ۳، ۱۱ و ۱۷]: در این روش، از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی توان راکتیو بار استفاده می‌شود. این امکان وجود دارد که توان راکتیو بار را زیر یک نیم‌سیکل پیش‌بینی کرد؛ در حالی که دقت آن به طور قابل ملاحظه‌ای به نوع روش پیش‌بینی توان راکتیو بار وابسته می‌باشد. در برخی روش‌ها، از روش‌های Gray Markov [۱] و ARMA [۱] جهت پیش‌بینی توان راکتیو به منظور کاهش فلیکر استفاده شده است. مقایسه نتایج این روش‌ها حاکی از آنست که روش Gray Markov از قابلیت بهتری در کاهش فلیکر برخوردار می‌باشد.

- استفاده از فیلتر مناسب [۱۴-۱۲]: این روش دارای پاسخی مناسب می‌باشد ولی تحت تأثیر هارمونیک‌های جریان قرار می‌گیرد.

روش کنترل مستقیم بر اساس یک نمونه‌برداری سریع از ولتاژ و جریان جهت محاسبه توان اکتیو و راکتیو به منظور محاسبه سوسپتانس جبران‌کننده عمل می‌کند. پاسخ سریع به تغییرات ولتاژ، از مزایای این روش محسوب می‌شود. براساس مطالعات اخیر، روش‌های مستقیم ممکن است در یکی از گروه‌های زیر دسته بندی شود:

- استخراج رابطه سوسپتانس SVC [۱۸]: این روش بر مبنای ارائه یک رابطه جهت محاسبه مقدار سوسپتانس سیستم کنترل SVC با استفاده از توابع توان اکتیو بار فازی همانند توان راکتیو جهت کاهش نوسانات ولتاژی و فلیکر و جبران‌سازی یک‌پارچه EAF کار می‌کند.

- طراحی SVC با ظرفیتی بالاتر از نیاز بار طبق شاخص فلیکر [۱۹، ۲۰]: در این روش، ظرفیت SVC معادل ۱/۶ برابر میزان بار انتخاب می‌شود. به وسیله این روش، انحرافات ولتاژ و فلیکر به خوبی جبران‌سازی می‌شوند؛ گرچه به دلیل نصب جبران‌ساز با ظرفیتی بالاتر از میزان مورد نیاز بار، هزینه بیش‌تری به مصرف‌کننده تحمیل می‌گردد.

- استفاده از روش‌های اندازه‌گیری جهت کنترل SVC [۱۴، ۱۵]: مزیت مهم این روش این است که دارای پاسخ دقیقی در محاسبات توان راکتیو، حتی در نیم‌سیکل می‌باشد.

اما مشکل این روش این است که نیازمند فیلترهای مناسبی جهت حذف هارمونیک‌های جریان است. از جمله این روش‌ها، روش محاسبه معادلات توان اکتیو و راکتیو [۱۵] می‌باشد که در این روش، محاسبات بر اساس اندازه‌گیری‌ها در زمان $T/4$ ، معادل ۵ میلی ثانیه در فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد که طبیعتاً مدت زمان لازم برای این روش برای جبران فلیکر کفایت نمی‌کند. روش‌های فوق به طور خلاصه در جدول (۱) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱: مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود

نام روش	انواع و نحوه پیاده‌سازی	مزایا	معایب
روش‌های غیر مستقیم	کنترل فازی: استفاده از شبکه فازی جهت محاسبه بهره کنترل‌کننده PID (کنترل حلقه باز) یا استفاده از کنترل فازی پیش‌فاز- پس‌فاز با استفاده از الگوریتم پیشرفته در محاسبه Vaux در حضور ولتاژ اندازه‌گیری و ولتاژ مبنا در کنترل مدار بسته جبران ساز [۱۰-۱۶، ۱۷ و ۱۸]	دارای دقت مناسب می‌باشد.	وابسته به تجربیات و دانش لازم در خصوص چگونگی تنظیم توابع و حدود کارایی آن‌هاست.
	کنترل عصبی: استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی توان راکتیو [۱۱، ۱۳، ۱۷ و ۱۸]	امکان پیش‌بینی توان راکتیو بار زیر نیم‌سیکل وجود دارد.	دقت آن شدیداً وابسته به آموزش نوع روش پیش‌بینی توان راکتیو و نوع بار دارد.
روش‌های مستقیم	استفاده از فیلتر مناسب در مسیر محاسبه جریان Id و Iq جهت محاسبه توان راکتیو مبنا [۱۴-۱۲]	سرعت پاسخ‌گویی مناسبی دارد	تحت تأثیر هارمونیک جریان است.
	استفاده از روش‌های اندازه‌گیری به منظور کنترل بهتر SVC [۱۴، ۱۵] و محاسبه توان راکتیو در کمتر از نیم سیکل.	سرعت پاسخ‌گویی مناسب در محاسبه توان راکتیو در حدود نیم‌سیکل	نیازمند فیلتر مناسب جهت حذف هارمونیک‌های جریان است.
	استخراج رابطه سوسپتانس SVC مبتنی بر استفاده از توابع توان اکتیو علاوه بر توان راکتیو.	سرعت پاسخ‌گویی مناسب	نیازمند فیلتر مناسب جهت حذف هارمونیک‌ها در محاسبه توان راکتیو و اکتیو است.
	روش پیشنهادی: استفاده از روش‌های اندازه‌گیری به منظور کنترل بهتر SVC در محاسبه توان راکتیو و اکتیو در کمتر از نیم سیکل و فیلتر پیشنهادی.	دارای سرعت و دقت کافی می‌باشد	افزایش حجم تجهیزات سخت‌افزاری و نیاز به کالیبراسیون‌های دوره‌ای
طراحی SVC با ظرفیت بالاتر از بار بر اساس شاخص فلیکر: در این روش ظرفیت جبران‌ساز جهت جبران نوسانات ولتاژ و فلیکر معمولاً بیش از بار معادل تغذیه شده از باس در نظر گرفته می‌شود. این میزان در حدود ۱/۶ برابر بار معادل پیشنهاد می‌شود [۱۹، ۲۰].	به خوبی فلیکر را جبران می‌نماید.	با توجه به نصب جبران‌ساز با ظرفیت بیش‌تر هزینه اضافی ناشی از این افزایش ظرفیت نصب به مصرف‌کننده تحمیل می‌شود.	

سنتی موجود ارائه شده و سپس روش پیشنهادی برای استخراج معادلات توان اکتیو و راکتیو ارائه خواهد شد.

۲-۱- روش سنتی

در صورتی که ولتاژ و جریان بار هارمونیک به ترتیب، از معادلات (۱) و (۲) پیروی نمایند، در نتیجه معادلات توان راکتیو و اکتیو طبق روابط (۳) و (۴) بیان می‌شوند [۵، ۱۵].

$$V = V_1 \sin \omega t \quad (1)$$

$$I = I_1 \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{2} \left[v \left(t - \frac{T}{4} \right) \cdot i(t) - v(t) \cdot i \left(t - \frac{T}{4} \right) \right] \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \left[v(t) \cdot i(t) + v \left(t - \frac{T}{4} \right) \cdot i \left(t - \frac{T}{4} \right) \right] \quad (4)$$

در این صورت، بر اساس این روش، مقدار توان راکتیو و اکتیو بار با ولتاژ و جریان هارمونیک مطابق رابطه (۵) و (۶) می‌باشد.

$$Q = \frac{1}{2} V_1 I_1 \sin \phi_1 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_1 I_n}{2} \left(\cos \omega t \cdot \sin(n\omega t - \phi_n) + \sin \omega t \cdot \sin \left(n\omega t - f_n - \frac{n\pi}{2} \right) \right) \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos \phi_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_1 I_n}{2} \left(\sin \omega t \cdot \sin(n\omega t - \phi_n) + \cos \omega t \cdot \sin \left(n\omega t - f_n - \frac{n\pi}{2} \right) \right) \quad (6)$$

بر اساس مطالعات فوق، نوآوری‌های این مقاله نسبت به کارهای

پیشین، را به طور خلاصه می‌توان موارد زیر برشمرد:

- ارائه معادلات جبری توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر اندازه‌گیری‌ها در مدت $T/8$ ؛ بر این اساس، با استفاده از توان اکتیو علاوه بر توان راکتیو در محاسبه سوسپتانس جهت کنترل SVC می‌توان جبران‌سازی بهتری به منظور جلوگیری از پدیده‌هایی نظیر فلیکر انجام داد.
- طراحی یک فیلتر ساده و سریع جهت استخراج دقیق هارمونیک‌های جریان از موج جریان بار کوره قوس الکتریکی.

با توجه به موارد فوق، ضرورت انجام این مطالعه به طور خلاصه شامل مزایایی نظیر کاهش زمان محاسبه مقادیر توان راکتیو و اکتیو در کمتر از نیم سیکل، کاهش حساسیت محاسبات توان راکتیو و اکتیو به هارمونیک‌های جریان، افزایش سرعت پاسخ‌گویی جبران‌ساز به تغییرات جریان بار، کاهش میزان جریان هارمونیک تزیق شده توسط جبران‌ساز به شبکه و کاهش ظرفیت جبران‌ساز پیشنهادی می‌باشد. دقت شود که در این مقاله، با توجه به حجم محاسبات بالاتر، ساخت مدار محاسبه‌گر به صورت پیوسته صورت پذیرفته است.

در ادامه مقاله، در بخش دوم، معادلات جبری جدید جهت محاسبه توان اکتیو و راکتیو بار بیان می‌شود و پس از آن ساختار فیلتر پیشنهادی ارائه می‌گردد. در پایان نیز نتایج اعمال روش پیشنهادی برای یک کوره قوس واقعی در کارخانجات فولادسازی بر اساس شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار EMTP ارائه شده است.

۲- استخراج معادلات توان اکتیو و راکتیو جهت پاسخ سریع

به منظور مشخص شدن معادلات سابق توان اکتیو و راکتیو در کاربردهایی نظیر جبران‌سازی پدیده‌های کیفیت توان، ابتدا روش

هارمونیک توصیه می‌شود استفاده از فیلترها می‌باشد. اما از آنجایی که استفاده از فیلتر جهت حذف بعضی از فرکانس‌های هارمونیک، نیازمند افزایش مرتبه فیلتر و بالتبع آن سبب بروز تأخیر در موج ورودی می‌شود، و از طرفی افزایش مرتبه فیلتر موجب می‌شود فیلتر نسبت به هارمونیک‌های مختلف، پاسخ فرکانسی متفاوتی از خود بروز دهد، عملاً استفاده از فیلترهای معمول چندان مؤثر نمی‌باشد. علاوه بر این فیلترها نسبت به حالت‌های کلیدزنی و گذار نیز بسیار حساس می‌باشند و این حالت سبب به هم ریختگی شکل موج خروجی از فیلتر می‌گردد. استفاده از فیلترهای پیوسته در مقایسه با فیلترهای دیجیتال، دارای سرعت بالاتری می‌باشند؛ ولی استفاده از فیلترهای دیجیتال در عوض دارای پایداری بیش‌تری هستند و جهت حل مشکل فیلترهای پیوسته نیازمند کالیبراسیون دوره‌ای می‌باشد. از طرفی جهت اندازه‌گیری و محاسبه توان مصرفی در زمانی کم‌تر از یک سیکل در بعضی از بارها نظیر کوره‌های قوس الکتریکی که طیف هارمونیک زیادی در جریان بار تولید می‌نمایند، مستلزم پیش‌بینی و نصب فیلترهای متفاوت بر روی جریان می‌باشد تا بتوان به خوبی و با دقت کافی توان مصرفی را محاسبه نمود. در کنترل زاویه آتش ترستور یا زاویه هدایت در SVC، محاسبه سوسپتانس هر چه در بازه زمانی کم‌تر از نیم سیکل صورت پذیرد پاسخ جبران‌ساز به تغییرات جریان و بالتبع ولتاژ با سرعت بیش‌تری صورت می‌پذیرد. افزایش سرعت پاسخ SVC سبب کاهش تغییرات ولتاژ می‌شود؛ با کاهش تغییرات ولتاژ، فلیکر ولتاژ که یکی از شاخص‌های طراحی SVC در شبکه‌های صنعتی به خصوص کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد بهبود می‌یابد. به همین سبب لازم است زمان محاسبه توان راکتیو و اکتیو سریع‌تر صورت پذیرد.

۳- فیلتر پیشنهادی با پاسخ سریع

با استفاده از روش مقایسه‌ای به همراه یک فیلتر شکاف (Notch) ۵۰ هرتز می‌توان اکثر هارمونیک‌های موج جریان را به سادگی حذف نمود و شرایط را برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو بر اساس روابط (۹) و (۱۰) فراهم آورد. نحوه پیاده‌سازی فیلتر مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. در واقع به کارگیری روش مقایسه، این اجازه را می‌دهد که درجه فیلتر را کاهش داد. همچنین مشکلات ذکر شده به دلیل بالا بردن درجه فیلتر در حذف هارمونیک‌ها تا حدودی مرتفع می‌گردد. از طرفی فاز هارمونیک‌های ایجاد شده در شکل موج جریان بر حسب این‌که این هارمونیک‌ها از طرف بارهای غیرخطی سمت بار یا از طرف شبکه بالادست سبب ایجاد اغتشاش و تغییر شکل موج جریان شده‌اند بی‌اثر خواهد شد (شناسائی فاز هارمونیک‌ها). به منظور حذف هارمونیک‌های موج جریان بار یا شبکه، می‌توان از یک فیلتر میان‌گذر برای فرکانس اصلی استفاده نمود. منحنی مشخصه، برای یک فیلتر میان‌گذر ایده‌آل مطابق شکل ۲ می‌باشد. حال اگر مطابق شکل ۱ فیلتری طراحی شود که فقط فرکانس ۵۰ هرتز یا فرکانس مورد نظر را تضعیف نماید، به طور مثال، اگر میزان تضعیف دامنه تابع $H(j\omega)$ به

همانطور که در (۵) و (۶) دیده می‌شود، قسمت دوم این روابط ناشی از تأثیر هارمونیک‌ها در مقدار توان راکتیو و اکتیو محاسباتی است. در صورتی که بتوان به نحوی اثر دامنه هارمونیک‌ها را کاهش یا از بین برد، مقدار توان راکتیو Q و توان اکتیو P مطابق روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند.

$$Q = \frac{1}{2} V_1 I_1 \sin \phi_1 = V_{rms} I_{rms} \sin \phi \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos \phi_1 = V_{rms} I_{rms} \cos \phi \quad (8)$$

معمولاً روش بیان شده دارای سرعت پاسخ‌گوئی در مدت ۵ میلی ثانیه را دارد و همانطور که در روابط (۵) و (۶) دیده می‌شود مقادیر توان راکتیو و اکتیو نسبت به هارمونیک‌های موجود در جریان بار دارای حساسیت زیادی می‌باشد.

۲-۲- روش پیشنهادی

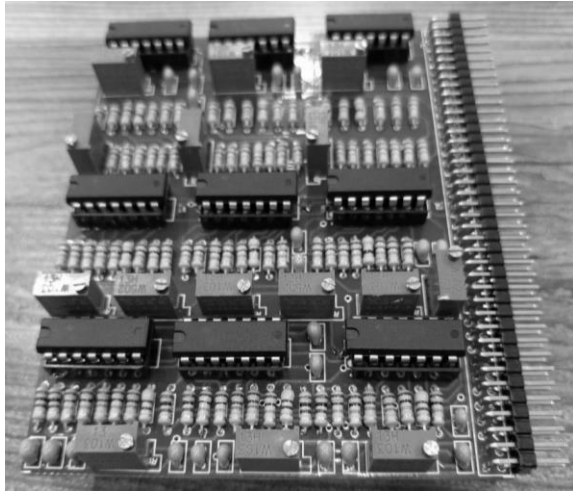
با توسعه روش محاسباتی ذکر شده در قسمت قبل و کاهش زمان محاسبات توان راکتیو و اکتیو به زیر نیم‌سیکل نظیر $T/8$ یا $2/5$ میلی ثانیه، سرعت پاسخ‌گوئی این روش در محاسبه توان اکتیو و راکتیو به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و عملاً محاسبات زیر نیم‌سیکل صورت می‌پذیرد. بنابراین، می‌توان قبل از نیم‌سیکل تصمیم‌گیری لازم را انجام داد. بر این اساس، روابط توان راکتیو و اکتیو به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[V \left(t - \frac{T}{8} \right) I(t) - V(t) \cdot I \left(t - \frac{T}{8} \right) \right] \begin{pmatrix} \cos \left((n-1)\omega t - \phi_n + \frac{n\pi}{4} \right) \\ - \cos \left((n+1)\omega t - \phi_n - \frac{n\pi}{4} \right) \\ + \cos \left((n-1)\omega t - \phi_n + \frac{\pi}{4} \right) \\ - \cos \left((n-1)\omega t - \phi_n - \frac{n\pi}{4} \right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

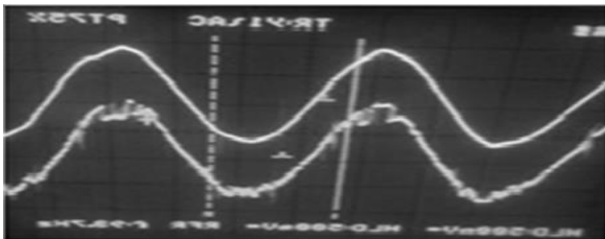
$$P = V(t) \cdot I(t) + V \left(t - \frac{T}{8} \right) \cdot I \left(t - \frac{T}{8} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \left[V(t) \cdot I \left(t - \frac{T}{8} \right) + V \left(t - \frac{T}{8} \right) \cdot I(t) \right] \quad (10)$$

همانطور که در رابطه (۹) دیده می‌شود افزایش سرعت محاسبه در کم‌تر از ربع سیکل، سبب افزایش حساسیت پاسخ روش به هارمونیک‌ها شده است. با توجه به نقطه قوت محاسبه توان راکتیو و اکتیو شبکه در ربع سیکل و نقطه ضعف حساسیت روش به تأثیر هارمونیک‌ها، در صورتی که بتوان نقش هارمونیک‌های جریان را در رابطه (۲) از بین برد بی‌شک می‌توان یک روش بسیار سریع برای محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو به دست آورد. یکی از راه‌هایی که جهت حذف

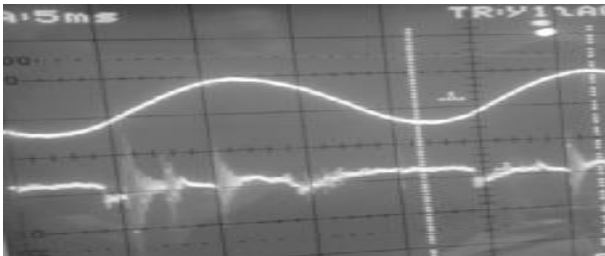
برای فیلتر پیشنهادی و خروجی آن، در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴: کارت ساخته‌شده برای فیلتر پیشنهادی



(الف)



(ب)

شکل ۵: نتایج فیلتر پیشنهادی بر روی اسیلوسکوپ؛

الف- مقایسه جریان ورودی I_{in} (منحنی پایین) و خروجی (منحنی بالا) جریان I_{out} فیلتر پیشنهادی،

ب- شکل موج جریان خروجی فیلتر I_{out} (منحنی بالا) و شکل موج اعوجاج‌های هارمونیک‌های ورودی به‌غیر از مؤلفه اصلی I_h (منحنی پایین)

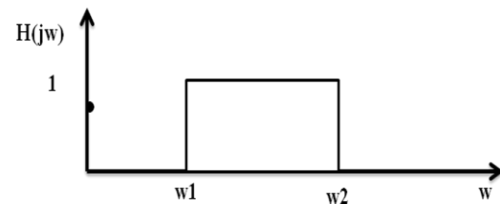
۴- بررسی نحوه عملکرد فیلتر پیشنهادی در حضور هارمونیک و فلیکر

در این قسمت به طور نمونه به بررسی نتایج حاصل از اعمال فیلتر تسریع‌یافته پیشنهادی و استفاده از معادلات توان اکتیو و راکتیو پیشنهادی در روابط (۹) و (۱۰) جهت حذف هارمونیک و کاهش فلیکر پرداخته خواهد شد.

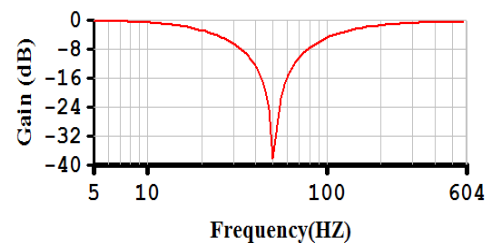
ازای آن فرکانس، مطابق شکل ۳ حدود ۴۰ دسی‌بل باشد، این فیلتر، فرکانس ۵۰ هرتز را شدیداً تضعیف می‌نماید و اجازه عبور فرکانس‌های دیگر به غیر از ۵۰ هرتز را خواهد داد. در صورتی که بتوان تأخیر شکل موج خروجی از فیلتر فوق را جبران نمود و سپس همانند شکل ۱، سیگنال خروجی از این فیلتر را مجدداً از موج ورودی به صورت مقایسه‌ای یا دیفرانسیلی کم نمود، در این حالت فیلتری خواهیم داشت که به یک فیلتر ایده‌آل خیلی نزدیک خواهد شد و تقریباً فقط اجازه عبور موج با فرکانس ۵۰ هرتز را خواهد داشت و بقیه فرکانس‌ها را به صورت مناسبی تضعیف خواهد نمود. به عبارت دیگر ترکیب یک فیلتر شکاف ایده‌آل با شکل موج ورودی، منجر به یک فیلتر نزدیک به ایده‌آل خواهد شد که ضریب تضعیف فیلتر خیلی بزرگ‌تر از ۱ می‌باشد.



شکل ۱: طرح فیلتر پیشنهادی



شکل ۲: فیلتر میان‌گذر ایده‌آل



شکل ۳: گین فیلتر شکاف پیشنهادی

به منظور صحت‌سنجی عملکرد فیلتر پیشنهادی اگر موج خروجی از فیلتر (I_{out}) که دارای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد با هارمونیک به دست آمده از فیلتر شکاف (I_h) جمع گردد، این موج بایستی با موج ورودی (I_{in}) تطبیق داشته باشد و در صورت کسر تفاضلی حاصل این موج‌ها از یکدیگر ($I_{in} - I_{out} - I_h$)، خروجی تفاضلی نزدیک به صفر خواهد شد که این امر نشان‌دهنده رسیدن به نتیجه مطلوب می‌باشد. بر اساس طرح پیشنهادی، چنین فیلتری با استفاده از نرم‌افزار EWB512 طراحی و ساخته شد. همچنین، نمونه کارت ساخته‌شده

۴-۱- حذف هارمونیک جریان بار

در این حالت به بررسی بارهایی نظیر کوره‌های قوس الکتریکی یا مبدل‌های یکسوکندنه که خود عامل به وجود آورنده هارمونیک می باشند پرداخته می‌شود و عملکرد فیلتر و روش ارائه شده در کاهش میزان هارمونیک‌ها در شکل موج خروجی مورد بحث قرار می‌گیرد.

بار مربوط به یک کوره قوس الکتریکی ۶۰ تنی نصب شده در یکی از کارخانجات فولادسازی کشور دارای معادله جریان مطابق رابطه (۱۱) می‌باشد.

$$I = 1.000 \sin \omega t + 0.035 \sin(2\omega t + 20^\circ) + 0.045 \sin(3\omega t + 10^\circ) + 0.022 \sin(4\omega t + 15^\circ) + 0.028 \sin(5\omega t + 30^\circ) + 0.011 \sin 6\omega t + 0.014 \sin 7\omega t \quad (11)$$

منحنی تحلیل هارمونیکی شکل موج جریان بر اساس تحلیل نرم‌افزار EWB512 مطابق شکل ۶ نشان می‌باشد. این تحلیل مربوط به حالت شروع ذوب در کوره قوس الکتریکی می‌باشد که بدترین شرایط بارگیری از شبکه محسوب می‌شود و در مرحله ذوب و تصفیه مذاب، شرایط بسیار بهتر از این حالت دیده می‌شود. شکل موج جریان ورودی با رنگ آبی و خروجی از فیلتر با رنگ قرمز مطابق شکل ۶ نمایش داده شده است، البته جهت نمایش واضح‌تر، دامنه‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است. اگر شرایط بسیار بدبینانه در نظر گرفته شود و دامنه هارمونیک‌های جریان مرتبه دو، سه و چهار، هر کدام ۱۰ درصد جریان مؤلفه اصلی در نظر گرفته شود، در این حالت باز هم عملکرد فیلتر مناسب و مطابق شکل ۷ می‌باشد. عملاً چنین شرایطی در بار کوره رخ نخواهد داد و مقادیر اندازه‌گیری شده در عمل در شرایط مختلف بهره‌برداری، عدم وقوع شرایط ذکر شده را تأیید می‌نماید.

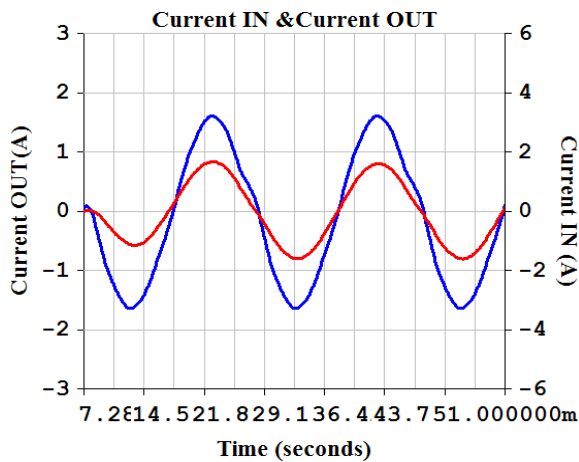
۴-۲- حذف هارمونیک جریان با حضور فلیکر

در این حالت به دلیل تغییرات توان راکتیو در کوره‌های قوس الکتریکی، جریان علاوه بر هارمونیک‌های ایجاد شده، دارای فلیکری با فرکانس حدود ۸ هرتز ($\sin 50.26t$) می‌باشد که این امر سبب بروز نوسانات دامنه ولتاژ و آستانه آزار چشم می‌شود. بر این اساس، موج جریان مطابق رابطه (۱۲) در نظر گرفته شده است.

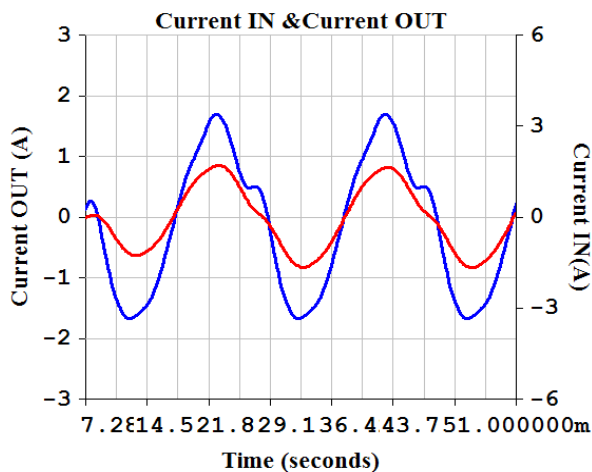
$$I = 1.000 \sin \omega t + 0.100 \sin(2\omega t + 20^\circ) + 0.10 \sin(3\omega t + 10^\circ) + 0.11 \sin(4\omega t + 15^\circ) + 0.028 \sin(5\omega t + 30^\circ) + 0.011 \sin 6\omega t + 0.014 \sin 7\omega t + 0.100 \sin 50.26t \quad (12)$$

در این وضعیت، با استفاده از مکانیزم فیلتر پیشنهادی در شکل ۱، وضعیت موج خروجی نسبت به موج ورودی در شکل ۸، قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود، میزان اعوجاج موجود در شکل موج

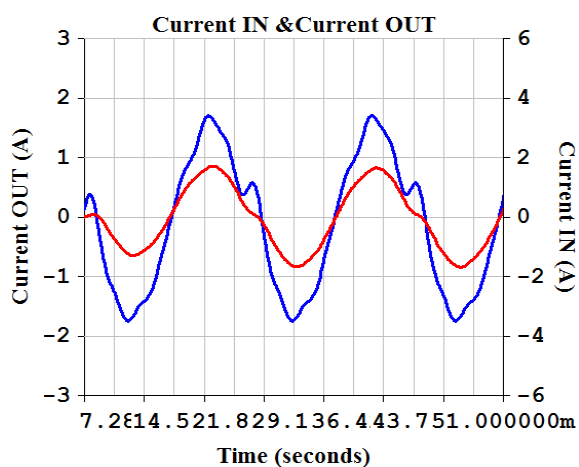
ورودی (منحنی آبی)، به شکل مطلوبی در شکل موج خروجی (منحنی قرمز) کاهش یافته است.



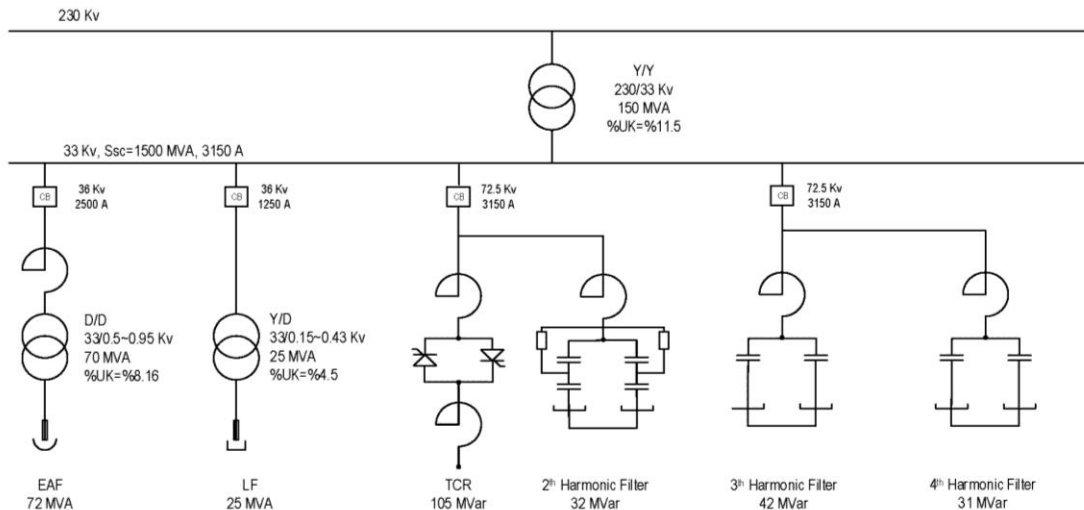
شکل ۶: شکل موج جریان جریان قبل (منحنی آبی) و بعد (منحنی قرمز) از فیلتر



شکل ۷: شکل موج جریان قبل (منحنی آبی) و بعد (منحنی قرمز) از فیلتر با افزایش دامنه هارمونیک‌ها



شکل ۸: شکل موج جریان قبل (منحنی آبی) و بعد (منحنی قرمز) از فیلتر با لحاظ نمودن فلیکر



شکل ۹: شمای تک خط شین کوره قوس الکتریکی

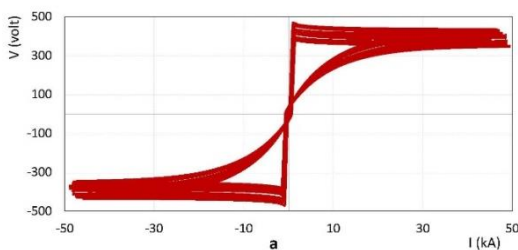
۵- نتایج شبیه‌سازی

کوره قوس الکتریکی را در مراحل مختلف ذوب، اعم از مرحله ذوب و مرحله تصفیه به خوبی بیان نمود که مطابقت بسیار مطلوبی با حالت واقعی کوره‌های قوس دارد.

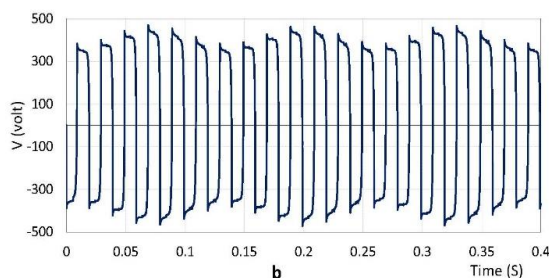
در شبیه‌سازی مدل قوس الکتریکی کوره مقادیر V_T ، C ، D و I_0 از یک کوره واقعی نصب شده در گروه ملی صنعتی فولاد ایران واقع در اهواز استخراج شده است که به ترتیب مقادیر آن‌ها عبارتند از: ۳۹۰ ولت، ۵۰۰۰، ۱۹۰۰۰ و ۱۰۰۰۰. ضمناً جهت بررسی اثر فلیکر در شبیه‌سازی، ولتاژ V_T مطابق رابطه زیر به کار گرفته شده است:

$$V_T = 390(1 + 0.15 \sin(50t)) \quad (14)$$

بر این اساس منحنی مشخصه ولتاژ- جریان کوره قوس مورد استفاده در شبیه‌سازی مطابق شکل ۱۰ می‌باشد. همچنین منحنی مشخصه ولتاژ کوره قوس الکتریکی مدنظر، همانند شکل ۱۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰: منحنی مشخصه ولتاژ- جریان کوره قوس الکتریکی



شکل ۱۱: منحنی مشخصه ولتاژ کوره قوس الکتریکی

در این قسمت، نتایج پیاده‌سازی روش محاسبه توان راکتیو در زمان T/8 و T/4 سیکل در کنترل‌کننده یک SVC نمونه که به منظور کنترل توان راکتیو یک کوره قوس الکتریکی به کارگیری شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبکه مورد مطالعه که شامل یک SVC با ظرفیت حدود ۸۰ مگاوار می‌باشد در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این شبکه، SVC مورد نظر جهت جبران‌سازی یک کوره قوس الکتریکی ۶۰ تنی و یک کوره پاتیلی ۶۰ تن مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر فلیکر از یک مدل بار با فرکانس ۱۰ هرتز که عملاً ماهیت بارگیری کوره قوس را نشان می‌دهد استفاده می‌گردد. همچنین مدل قوس الکتریکی مطابق رابطه (۱۲) در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا مدل قوس در کوره قوس مورد نظر بررسی می‌شود تا رفتار الکتریکی کوره برای مطالعات مورد نظر مشخص گردد. لازم به ذکر است که کلیه شبیه‌سازی‌ها و نتایج آن توسط نرم‌افزار EMTPT تحت آخرین ویرایش Atpdraw6.1 صورت پذیرفته است.

۵-۱- مدل قوس در کوره قوس الکتریکی

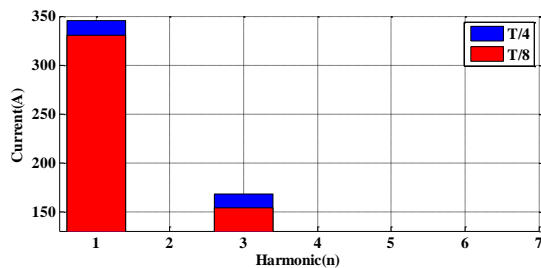
برای مدل‌سازی قوس الکتریکی رابطه زیر در نظر گرفته شده است [۲۱]:

$$V(I) = \begin{cases} V_T + \frac{C}{D+I'} \frac{dI}{dt} \geq 0, I > 0 \\ V_T \left(1 - e^{-\frac{I}{I_0}}\right) \frac{dI}{dt} \leq 0, I > 0 \end{cases} \quad (13)$$

همانطور که در این رابطه قابل مشاهده است، برای جریان‌های مثبت و با توجه به خاصیت هیستریزس قوس، دو حالت در نظر گرفته شده است که در جریان افزایشی از معادله هذلولی و در جریان‌های کاهش از معادله نمائی استفاده شده است. با این معادله می‌توان بار

نمود که SVC در حالت T/8، جریان کم‌تری نسبت به T/4 از شبکه می‌کشد. در نتیجه در این وضعیت، THD ایجاد شده در شکل موج جریان در حالت T/8 نسبت به حالت T/4 از وضعیت بهتری برخوردار است. به طور مثال، اندازه‌گیری‌های نشان می‌دهد که جریان هارمونیک سوم در حالت T/8 برابر ۱۵۲ آمپر و در حالت T/4 برابر ۱۶۸ آمپر است که به عبارتی جریان هارمونیک سوم در حدود ۸ درصد کاهش یافته است.

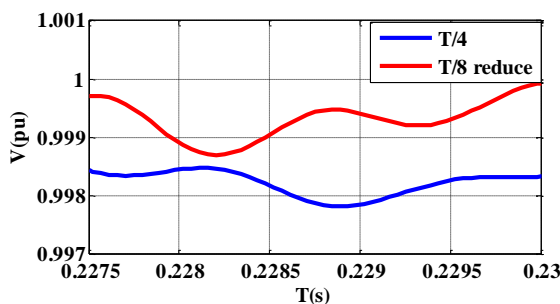
در واقع در حالت T/8، سیستم کنترل در SVC اجازه می‌دهد که جریان خازنی بیش‌تری توسط بانک خازنی به شبکه تزریق گردد. این امر سبب می‌شود که جریان راکتیو جذب شده توسط راکتور TCR کاهش یابد و با توجه به کاهش جریان جذب شده توسط راکتور، سهم جریان هارمونیک تولیدشده توسط آن کم می‌شود و به تبع آن هارمونیک سوم تولیدشده در شبکه کاسته خواهد شد.



شکل ۱۴: میزان هارمونیک در زمان اندازه T/8 و T/4

۵-۵- بررسی ظرفیت SVC

استفاده از روش محاسبه سریع‌تر توان راکتیو در T/8 سبب می‌شود کنترل‌کننده SVC نسبت به تثبیت ولتاژ باس بار سریع‌تر اقدام نماید. در این وضعیت اگر در شرایط یکسان، ظرفیت SVC در حالت T/8 نسبت به T/4، ۵ درصد کاهش یابد باز هم نوسانات ولتاژ در حالت T/8 از شرایط بهتری برخوردار است. این موضوع در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.



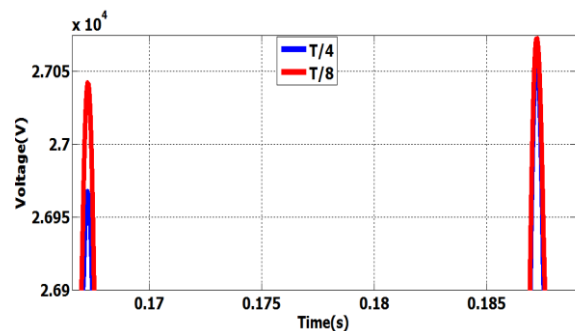
شکل ۱۵: ولتاژ باس در زمان‌های اندازه‌گیری T/4 و T/8 با کاهش ظرفیت SVC به مقدار ۵ درصد

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله جهت تسریع پاسخ‌گویی SVC به نوسانات فلیکر یک کوره قوس الکتریکی، از روش محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو بر مبنای

۵-۲- بررسی اثر نوسانات هارمونیک و فلیکر ولتاژ

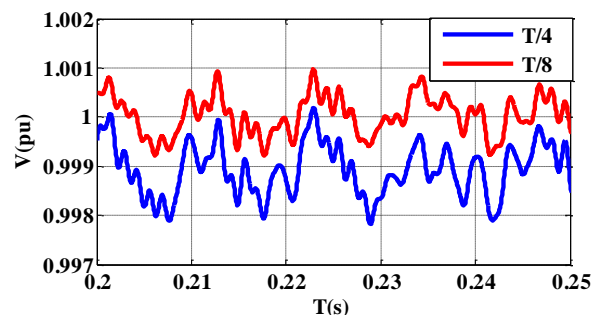
همانطور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۰/۲۵ الی ۰/۳ ثانیه، میزان نوسان ولتاژ فاز A در دو حالت T/8 و T/4 به ترتیب به میزان ۳۱ ولت و ۹۲ ولت می‌باشد که در حالت T/8 به میزان ۶۶ درصد در مقایسه با T/4 کاهش یافته است. به عبارتی با استفاده از فیلتر پیشنهادی و استفاده همزمان از معادلات توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر دوره اندازه‌گیری T/8 نسبت به حالت T/4، میزان نوسانات ولتاژ به طور چشم‌گیری کاهش یافته است. در واقع استفاده از معادلات T/8، در کاهش اثر فلیکر توسط SVC، کارایی مطلوب‌تری دارد. زیرا زمان محاسبه توان در کم‌تر از نیم سیکل انجام می‌شود و کنترل‌کننده می‌تواند به خوبی زاویه آتش تریستورها را جهت تولید میران توان راکتیو مورد نیاز بار توسط SVC کنترل نماید.



شکل ۱۲: اندازه فلیکر ولتاژ دو زمان اندازه‌گیری T/8 و T/4

۵-۳- بررسی ولتاژ باس کوره

با توجه به شکل ۱۳، در وضعیت کنترل توان راکتیو توسط SVC، از مقایسه ولتاژ باس کوره در دو حالت اندازه‌گیری T/8 و T/4 مشاهده می‌شود که حالت ولتاژ باس در حالت T/8 از ثبات مطلوب‌تری برخوردار می‌باشد. در واقع، به دلیل این‌که اندازه‌گیری‌ها در حالت T/8، سریع‌تر صورت می‌پذیرد، کنترل‌کننده فرصت کافی برای جبران ولتاژ باس را داراست.



شکل ۱۳: ولتاژ باس در دو زمان اندازه‌گیری T/8 و T/4

۵-۴- میزان هارمونیک ایجاد شده توسط SVC

بر اساس اطلاعات قائل مشاهده در شکل ۱۴، با مقایسه جریان کشیده‌شده توسط SVC در دو حالت T/8 و T/4 می‌توان استنباط

- [5] T. J. E. Miller, "Reactive power control in electric systems," John-Wiley, 1982.
- [6] L. Tey, P. So, and Y. Chu, "Improvement of power quality using adaptive shunt active filter," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1558–1568, 2005.
- [7] J. M. Gonzalez, C. A. Canizares, and J. M. Ramoirez, "Stability modeling and comparative study of series vertical compensators," IEEE Trans. on Power Del., vol. 25, no. 2, pp. 1093–1103, 2010.
- [8] P. K. Dash, S. Morris, and S. Mishra, "Design of a nonlinear variable gain fuzzy controller for FACTS devices," IEEE Trans. on Control Syst. Tech., vol. 12, no. 3, pp. 428–438, 2004.
- [9] C. F. Lu, and C. F. Juang, "Evolutionary fuzzy control of flexible ac transmission system," IEE Proc.-Gener., Transm. Distrib., vol. 152, no. 4, pp. 441–448, 2005.
- [10] C. F. Lu, C. H. Hsu, and C. F. Juang, "Coordinated control of flexible ac transmission system device using an evolutionary fuzzy lead-lag controller with advanced continuous ant colony optimization," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 1, pp. 385–392, 2012.
- [11] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo and P. Varilone, "Chaos-based modeling of dc arc furnaces for power quality issues," IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1869–1876, 2004.
- [12] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo and P. Varilone, "A new frequency domain approach for flicker planning studies," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 631–638, 2003.
- [13] N. Gibo, K. Yukihiro, K. Deno, and Y. Nagasaka, "Reduction of svc capacity by flicker control using parallel band-pass filters," 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1–6, Sep. 2010.
- [14] J. Guo, X. Xiao, and T. Shun, "Discussion on instantaneous reactive power theory and currents physical component theory," 15th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 427–432, 2012.
- [15] H. Samet, I. Masoudipour, and M. Parniani, "New reactive power calculation method for electric arc furnaces," Measurement, vol. 81, pp. 251–263, 2016.
- [16] Y. J. Hsu, K. H. Chen, P. Y. Huang, and C. N. Lu, "Electric arc furnace voltage flicker analysis and prediction," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, no. 10, pp. 3360–3368, 2011.
- [17] D. B. Kulkarni, and G. R. Udupi, "ANN-Based SVC Switching at Distribution Level for Minimal-Injected Harmonics," IEEE Trans. on Power Del., vol. 25, no. 3, pp. 1978–1985, 2010.
- [18] M. Asban, J. Aghaei, T. Niknam and M. Akbari, "Designing Static Var Compensator capacity to enhance power quality in electric arc furnaces," Simulation: International Transaction of the Society for Modeling and Simulation, vol. 93, no. 6, pp. 515–525, 2017.
- [19] T. L. Morello, S. Dionise, and T. J. Mank, "Comprehensive analysis to specify a static VAr compensator for an electric arc furnace upgrade," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 6, pp. 4840–4852, 2015.
- [20] 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.

اندازه‌گیری در بازه زمانی کمتر از T/8 استفاده شده است. همچنین به منظور حذف اثر هارمونیک‌های جریان در معادلات توان اکتیو راکتیو، یک فیلتر مقایسه‌ای ساده بر اساس فیلتر شکاف پیشنهاد شد. استفاده همزمان از این دو پیشنهاد، در طرح جبران‌ساز SVC، دارای مزایایی نظیر کاهش زمان محاسبه مقادیر توان راکتیو و اکتیو در کمتر از نیم سیکل، کاهش حساسیت محاسبات توان راکتیو و اکتیو به هارمونیک‌های جریان، افزایش سرعت پاسخ‌گویی جبران‌ساز به تغییرات جریان بار، کاهش میزان جریان هارمونیکی تزریق شده توسط جبران‌ساز به شبکه و کاهش ظرفیت جبران‌ساز پیشنهادی می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این مقاله اثبات می‌کند که استفاده از روش محاسبه سریع‌تر توان راکتیو در زمان T/8 باعث می‌گردد تا کنترل کننده SVC توانایی بهتری در راستای تثبیت ولتاژ باس بار، کاهش نوسانات ولتاژ، کاهش هارمونیک سوم از خود نشان دهد. ضمناً با بهینه‌سازی ظرفیت SVC به میزان ۵ درصد کمتر از حالت قبلی، باز هم پایداری و تثبیت ولتاژ در حالت T/8 از شرایط بهتری برخوردار است.

تقدیر

در پایان، نویسندگان مقاله بر خود فرض می‌دانند که از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران در قالب پروژه تحقیقاتی شماره‌ی ۹۴۰۰۰۱ با عنوان «طراحی و ساخت جبران‌کننده توان راکتیو SVC با قدرت ۱۰۰ کیلووار در ولتاژ ۴۰۰ ولت» تقدیر و تشکر به عمل آورند.

مراجع

- [1] H. Samet, and A. Mojallal, "Enhancement of electric arc furnace reactive power compensation using Grey-Markov prediction method," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 8, no. 9, pp. 1626–1636, 2014.
- [2] H. Samet, and M. Parniani, "Predictive method for improving svc speed in electric arc furnace compensation," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 732–734, 2007.
- [3] M. A. Gomez-Martinez, A. Medine, and C. R. Fuerte-Esquivel, "Ac arc furnace stability analysis based on bifurcation theory," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 153, no. 4, pp. 463–468, 2006.
- [4] M. Cernan, and J. Tlustý, "Study of the susceptance control of industrial Static VAr Compensator," 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), pp. 538–541, 2015

زیر نویس‌ها

- ¹ Electric Arc Furnace
- ² Lader Furnace
- ³ Flicker
- ⁴ Static Var Compensator
- ⁵ Thyristor
- ⁶ Susceptance