

تأثیر جبرانگرهای TCR/FC و TSC در عملکرد موازی کوره‌های قوس الکتریکی بر پارامترهای کیفیت توان شبکه‌های قدرت

رحمت‌الله هوشمند^{۱*}، مهدی ترابیان اصفهانی^۲

۱- دانشیار مهندسی برق، دانشگاه اصفهان

۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه اصفهان

*اصفهان، کد پستی ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱

Hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷)

چکیده- کوره‌های قوس الکتریکی، بارهایی غیرخطی و متغیر با زمان هستند که باعث افت کیفیت توان در سیستم‌های قدرت شده و پدیده‌های مرتبط با کیفیت توان را در این سیستم‌ها باعث می‌شوند. در صنایع فولادسازی اغلب دو کوره قوس الکتریکی با یکدیگر موازی شده و روی یک شین شبکه قرار می‌گیرند. در این شرایط کیفیت توان به مراتب بیشتر دچار اختلال می‌شود. در این مقاله به منظور بررسی و تحلیل آثار زیان بار عملکرد موازی کوره‌های قوس الکتریکی، ابتدا حالات مختلف عملکرد با کوره با مدل دقیق هذلولی - نمایی مدلسازی می‌شود. به منظور تطابق عملکرد کوره با حالت واقعی کلیه اندوکتانس‌ها و مقاومت‌های خطوط انتقال (کابل‌ها) و بین الکترودهای کوره در مدلسازی در نظر گرفته می‌شود. سپس به منظور بهبود پارامترهای کیفیت توان، به طراحی و شبیه‌سازی جبرانگرهای استاتیکی از نوع TCR/FC و TSC پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC انجام شده، دقت و صحت طراحی را نشان می‌دهد.

کلید واژگان: کوره‌های قوس الکتریکی، پدیده‌های کیفیت توان، جبران کننده TCR و TSC، فیلتر هارمونیک.

۱- مقدمه

کوره‌های قوس الکتریکی بزرگ‌ترین بارهای الکتریکی متمرکز در شبکه‌های قدرت هستند. این‌گونه بارها در بیشتر مراکز تولید فولاد به صورت موازی و در یک شین از سیستم قدرت قرار می‌گیرند. با توجه به تغییرات شدید و سریع توان الکتریکی در این بارها و به خصوص در حالتی که در سیستم قدرت موازی شده‌اند، ولتاژ شین این کوره‌ها نامتعادل بوده و نوسانات شدیدی دارند. علاوه بر این، کوره‌های قوس الکتریکی باعث افت کیفیت توان، ایجاد فلیکر ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ و جریان و هارمونیک‌های زوج و فرد و ایجاد اینترهارمونیک در سیستم قدرت می‌شوند. به منظور مطالعه در

این زمینه، باید سیستم قدرت با کوره قوس الکتریکی به طور کامل و دقیق طراحی شود. لذا لازم است مدل مناسبی برای این کوره‌ها در نظر گرفته شود تا بتواند حالات مختلف عملکرد کوره را به درستی نشان دهد. در این راستا، مدل‌های متعددی برای قوس الکتریکی پیشنهاد شده است [۱-۷].

برخی از این مدل‌ها بر اساس خطی‌سازی معادله مشخصه استوارند [۱، ۲]. این نوع مدل‌ها بیشتر به منظور تحلیل هارمونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی دیگر از این مدل‌ها بر پایه معادلات دیفرانسیل در حوزه زمان بوده و نیاز به شرایط اولیه خاص دارند [۳]. دسته‌ای دیگر، مبتنی بر حوزه فرکانس هستند که بیشتر برای مطالعات هارمونیک شبکه کاربرد دارند.

بیان شده و [۹] نیز بحث مختصری در مورد سیستمی خاص و جبران‌سازی آن انجام داده است.

در این مقاله، ابتدا سیستم قدرت سه‌فاز با کوره قوس الکتریکی طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. سپس به بررسی مراحل مختلف ذوب پرداخته و مهمترین آنها مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. به‌منظور بهبود کیفیت توان و جبران توان راکتیو در سیستم قدرت، به طراحی بهینه جبرانگرهای استاتیکی از نوع جبران کننده راکتور تایریستور کنترل همراه با خازنهای ثابت (TCR/FC)^۲ و خازن تریستور سوئیچ (TSC)^۳ پرداخته می‌شود. همچنین برای بهبود عملکرد این دو جبران کننده، سیستم کنترل به‌نحو مطلوبی طراحی می‌شود؛ به‌طوری‌که دارای سرعت و دقت لازم در جبران‌سازی بار کوره باشد. همچنین در این مقاله با توجه به نیاز سیستم قدرت و به‌منظور بهبود عملکرد جبران کننده TCR از فیلترهای هارمونیک RLC استفاده شده است. از طرفی در جبران کننده TSC نیز این فیلترها به‌منظور کاهش اعوجاج هارمونیک در شبکه قدرت به‌کار رفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC انجام شده، صحت و دقت طراحی را به‌خوبی نشان می‌دهد.

۲- طراحی مدل بار کوره قوس الکتریکی

برای توصیف پدیده‌های کیفیت توان در سیستمهای قدرت با کوره قوس، لازم است مدل مناسبی طراحی شود که بتواند عملکرد واقعی کوره را نشان دهد. به این‌منظور در این مقاله برای مدلسازی قوس الکتریکی بار کوره، رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$V(i) = \begin{cases} V_{at} + \frac{C}{D+i} & \frac{di}{dt} \geq 0, i > 0 \\ V_{at}(1 - e^{-i/\tau}) & \frac{di}{dt} < 0, i > 0 \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه، V و i به‌ترتیب ولتاژ و جریان کوره است.

همچنین به‌دلیل اینکه این گونه مدلها تطابق مطلوبی با حالت واقعی ندارد، لذا بررسی سیستم قدرت در شرایط واقعی بسیار مشکل است [۴، ۵]. مدل‌هایی نیز بر اساس ساختار مدارهای آشوبی^۱ وجود دارند که بیشتر برای محاسبه فلیکر ولتاژ مناسب‌اند [۶، ۷]. در هر صورت از مهمترین مزایای مدل قوس، سادگی به‌کارگیری در شبیه‌سازی و عدم تقریب زیاد است. در این راستا، این مقاله بر پایه مشخصه ولتاژ-جریان قوس، مدل مناسبی را بیان می‌کند که اولاً توانایی توصیف بیشتر مدلها را دارد و ثانیاً قابلیت توصیف حالات مختلف بار کوره را داشته باشد طوری‌که تطابق مطلوبی با حالت واقعی داشته باشد.

از طرفی برای جبران توان راکتیو و بهبود پارامترهای کیفیت توان از جبرانگرهای استاتیکی به‌طور موازی کوره‌های قوس الکتریکی استفاده می‌شود. در این زمینه تاکنون فعالیت‌های محدودی انجام شده است [۸-۱۲]. تحلیل جبرانگرهای استاتیکی و بحث دینامیکی آنها در [۸، ۹] آورده شده و به‌طور مختصر، مقایسه‌ای سطحی بین جبرانگرهای استاتیکی از نظر رفتار دینامیکی صورت گرفته و بحثی درباره سیستم کنترل آنها آورده نشده است. در [۱۰، ۱۱] نیز به نمونه خاصی از جبرانگرهای استاتیکی موازی در کوره‌ها اشاره شده است. همچنین ساختار و عملکرد جبران کننده TCR و STATCOM در کاهش فلیکر ناشی از کوره‌های قوس نیز در [۱۲] مقایسه شده است. مبحث اندازه‌گیری توان راکتیو در سیستمهای قدرت سه‌فاز نیز در [۱۳، ۱۴] آورده شده است. عیب روش مذکور آن است که خطای احتمالی در سیستم، در هر لحظه تقویت شده و باعث کاهش سرعت و دقت می‌شود. در [۱۵، ۱۶] نیز نحوه طراحی فیلترهای هارمونیک در سیستمهای قدرت با وجود کوره‌های قوس ارائه شده است. البته در ارتباط با موازی‌سازی کوره‌های قوس الکتریکی مقالات محدودی به چاپ رسیده که در این رابطه، در [۱۷] در باره آثار ترانسفورماتور کوره مطالبی

2. Thyristor Reactor Controlled with Fixed Capacitor
3. Thyristor Switched Capacitor

1. Chaotic Circuits

$$\begin{aligned} V_{at1} &= V_{at01}(1 + k_1 \sin \omega_f t) \\ V_{at2} &= V_{at02}(1 + k_2 \sin \omega_f t) \\ V_{at3} &= V_{at03}(1 + k_3 \sin \omega_f t) \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه، ولتاژهای سه فاز بار کوره، $V_{atj}(j=1,2,3)$ مقادیر ثابت ولتاژها در فازهای مختلف، ω_f فرکانس زاویه‌ای فلیکر و ضرایب $k_j(j=1,2,3)$ نیز شدت فلیکر در فازهای مختلف است.

نوع دوم: در این حالت، ولتاژ V_{at} به صورت تابعی تصادفی با فرکانس دید چشم انسان (۴ تا ۱۴ هرتز) نوسان می‌کند. برای تأمین این شرایط، از فیلتر میان‌گذر استفاده شده است. در نتیجه، ولتاژهای سه‌فاز برای V_{at} به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} V_{at1} &= V_{at01} + k_1 N_1(t) \\ V_{at2} &= V_{at02} + k_2 N_2(t) \\ V_{at3} &= V_{at03} + k_3 N_3(t) \end{aligned} \quad (4)$$

در این رابطه، $N_j(t), (j=1,2,3)$ نویز سفید با فرکانس ۴ تا ۱۴ هرتز برای فلیکر و با میانگین صفر و واریانس یک است. همچنین شاخص مدولاسیون با پارامترهای $k_j(j=1,2,3)$ و واریانس سیگنال تصادفی با $k_j \cdot N_j(t)$ نشان داده می‌شود. لازم است ذکر شود با تغییر k_j می‌توان شدت فلیکر را تغییر داد.

۲-۲- حالات مختلف عملکرد موازی دو کوره قوس

در این قسمت به بررسی حالات مختلف عملکرد کوره قوس می‌پردازیم. مراحل مختلف کارکرد کوره، عبارت است از مرحله ذوب اولیه^۱، ذوب آرام^۲ و مرحله تصفیه^۳. در مراحل اولیه ذوب، طول قوس تغییرات شدیدی داشته و باعث افت کیفیت توان و ایجاد پدیده‌های مخرب کیفیت توان در شبکه قدرت می‌شود که در نتیجه، بیشترین فلیکر ولتاژ در سیستم قدرت ایجاد می‌شود. از طرفی هنگامی که کوره در حالت پایدار به کار خود ادامه می‌دهد (در حالت ذوب آرام)، سطح مواد مذاب در سطح کوره

ولتاژ V_{at} ولتاژی است که به طول قوس بستگی دارد. ثوابت C و D به ترتیب مربوط به توان و جریان کوره و τ ثابت جریانی بر حسب آمپر است. بر اساس رابطه (۱)، برای جریانه‌های مثبت و با توجه به خاصیت هیستریزس قوس، دو حالت در نظر گرفته شده که در حالت جریانه‌های افزایشی، از معادله هذلولی و در حالت جریانه‌های کاهش‌ی از معادله نمایی استفاده شده است. به همین دلیل به این مدل، مدل هذلولی - نمایی نیز گفته می‌شود.

برای دستیابی به مدلی دقیق برای توصیف حالات واقعی کوره‌های قوس در صنایع فولادسازی، مقاومت و اندوکتانس کابل‌ها نیز باید در نظر گرفته شود. لذا در این مقاله، مدل کوره به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$F(i) = V(i) + R_c i + L_c \frac{di}{dt} \quad (2)$$

در این رابطه، $F(i)$ بیانگر مشخصه ولتاژ - جریان کوره در حالت واقعی و $V(i)$ مربوط به رابطه (۱) است. R_c و L_c به ترتیب اندوکتانس و مقاومت موجود در سیستم است. این مدل، همچنین قابلیت توصیف مراحل مختلف ذوب، اعم از ذوب اولیه و تصفیه را دارد و از طرفی توانایی توصیف مدل‌های کوره قوس در حوزه زمان با معادلات دیفرانسیل را دارد؛ بدون آنکه به حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل پیچیده نیاز داشته باشد.

۲-۱- ایجاد فلیکر ولتاژ در کوره‌های قوس

برای بررسی اثر فلیکر ولتاژ در سیستم‌های با کوره قوس الکتریکی، کافی است در رابطه (۱)، ولتاژ V_{at} را متغیر با زمان در نظر بگیریم. در این بخش، اثر دو نوع فلیکر بر مشخصه دینامیکی قوس بررسی می‌شود.

نوع اول: ولتاژ V_{at} در این نوع فلیکر، به صورت سینوسی تغییر می‌کند که در نتیجه، مقدار مؤثر ولتاژ و جریان نیز با فرکانس فلیکر تغییر خواهد کرد. برای تأمین این شرایط، ولتاژهای سه‌فاز برای V_{at} به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

1. Scrap Stage
2. Plating Stage
3. Refinement Stage

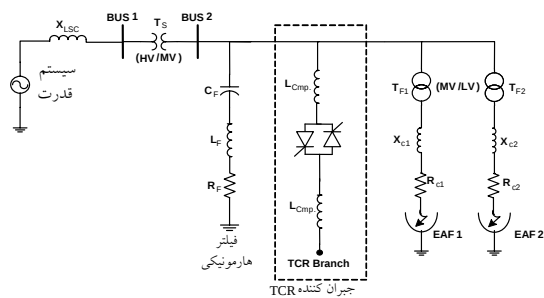
در این رابطه V ولتاژ مؤثر، X_L راکتانس راکتور، α زاویه تأخیر آتش و σ زاویه هدایت تایریستورهای TCR است. مؤلفه اصلی این جریان با تحلیل فوری به دست می آید:

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi \cdot X_L} V \quad (6)$$

که σ با رابطه زیر با α مرتبط می شود:

$$\alpha + \sigma / 2 = \pi \quad (7)$$

لذا برای تولید توان راکتیو در سیستم قدرت، استفاده از خازنهای موازی در کنار TCR لازم است. در این مقاله، آرایش جبران کننده TCR به صورت مثلث است. زمانی که سیستم متقارن باشد، تمامی هارمونیک‌های مضرب ۳ در اتصال مثلث به گردش درمی آیند و لذا، این هارمونیک‌ها از جریان خط حذف می شوند. البته در صورت نامتعادل بودن بار، هارمونیک سوم نیز در خط وجود دارد اما دامنه آن کمتر است. شکل ۱ سیستم تغذیه کوره قوس را همراه با جبرانگرهای آن به طور کامل نشان می دهد. در این شکل، باس ۱، نقطه اتصال مشترک^۱ (باس PCC) و در حقیقت، باس تغذیه کننده اصلی ترانسفورماتور کوره است. همچنین برای تغییر دادن توان اکتیو ورودی کوره قوس اول (EAF1) از ترانسفورماتور T_{F1} (MV/LV) و برای کوره قوس دوم (EAF2) از ترانسفورماتور T_{F2} استفاده می شود. هر دو ترانسفورماتور دارای تپ چنجر اولیه است که با



شکل ۱ دیاگرام تک خطی سیستم تغذیه دو کوره قوس همراه با جبران کننده TCR/FC

تقریباً ثابت است. البته هنوز طول قوس تغییراتی دارد که ممکن است باعث ایجاد پدیده‌های مخرب کیفیت توان در سیستم قدرت شود. همچنین زمانی که کوره به مرحله تصفیه وارد می شود تغییرات طول قوس بسیار ناچیز و قابل چشمپوشی است. لذا برای بررسی عملکرد موازی کوره‌های قوس الکتریکی، در این مقاله دو وضعیت ذوب اولیه و ذوب پایدار برای کارکرد کوره در نظر گرفته می شود. در این راستا فرض می شود که یکی از دو کوره در حالت ذوب اولیه و دیگری در وضعیت پایدار به کار خود ادامه می دهد. در این وضعیت به جبران سازی سیستم قدرت پرداخته شده و پدیده‌های مرتبط با کیفیت توان بررسی و تحلیل می شوند. در صنایع فولادسازی، معمولاً دو کوره با الگوریتمی به مدار وارد می شوند که یکی در حالت ذوب اولیه و دیگری در حالت ذوب آرام باشد تا میزان اغتشاشات وارد شده به سیستم به حداقل کاهش یابد. لذا در این مقاله سعی شده نتایج بر اساس واقعیت بنا شود.

۳- طراحی بهینه جبرانگرهای استاتیکی

در این قسمت به طراحی بهینه جبرانگرهای استاتیکی از نوع راکتور تایریستور کنترل همراه با خازن موازی (TCR/FC) و خازن تایریستور سوئیچ (TSC) در حالت کارکرد موازی دو کوره می پردازیم.

۳-۱- جبران کننده TCR/FC

جبران کننده TCR با تغییر زوایای آتش تایریستورها می تواند اندوکتانس مؤثر را تغییر دهد. اگر تایریستورها دقیقاً در لحظه پیک ولتاژ تغذیه آتش شوند به طور کامل هدایت خواهند کرد. جریان TCR اساساً راکتیو بوده و ولتاژ آن، تقریباً ۹۰ درجه از جریان عقب تر است. لذا:

$$i = \begin{cases} \frac{V\sqrt{2}}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (8)$$

$$h^2 = \frac{X_C}{X_L} \Rightarrow X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (8)$$

$$X_C = \frac{(V_{L-L})^2}{M \text{ var}_{3-phase}} \quad (9)$$

که h مرتبه هارمونیک مورد نظر به منظور حذف آن است. راکتانس های X_C و X_L به ترتیب راکتانس خازنی و راکتانس سلفی فیلتر است. همچنین V_{L-L} ، ولتاژ نامی بانک خازنی و $Mvar_{3-phase}$ مگاوار نامی بانک خازنی است. بنابر این می توان مگاوار خروجی هر فیلتر را از رابطه زیر به دست آورد [۱۶]:

$$M \text{ var}_{filter} = \frac{(V_{L-L})^2}{X_C - X_L} \quad (10)$$

در این رابطه V_{L-L} ولتاژ سیستم به کار رفته است.

۳-۱-۲- طراحی سیستم کنترل جبران کننده

طراحی سیستم کنترل TCR، بر اساس ترکیبی از سیستمهای کنترل حلقه باز و حلقه بسته است. سیستم کنترل حلقه باز به دلیل پاسخ سریع، برای کاهش فلیکر ولتاژ و جبران سازی تغییرات سریع توان راکتیو کوره به کار می رود. از طرفی، به منظور جبران در حالت ماندگار و نگاه داشتن کمیتها در مقدار میانگین مجاز، از سیستم کنترل حلقه بسته استفاده شده است. یادآوری می شود که متغیر کنترلی در جبران سیستم قدرت با وجود کوره قوس، جریان راکتیو بار است. همچنین سیگنال کنترلی حلقه بسته، جریان راکتیو منبع است.

با توضیحات اخیر می توان الگوریتم سیستم کنترل جبران کننده را در پنج مرحله به صورت زیر نوشت:

- (۱) اندازه گیری تغییرات توان راکتیو بار و سیستم قدرت به طور بهینه و با سرعت و دقت مطلوب
- (۲) ایجاد زمانبندی سنکرون (همزمان) که پالسهای این زمانبندی نسبت به پیک ولتاژ تولید می شود.

- (۳) سومین مرحله، جریان راکتیو (یا ادمیتانس) کنورتور زاویه آتش است. در این مرحله با اجرایی کردن رابطه ریاضی

تغییر آن، ولتاژ کوره تغییر می کند. این دو کوره توسط ترانسفورماتور T_S (HV/MV) به باس PCC متصل شده است. در این شکل، X_{C1} و R_{C1} (و X_{C2} و R_{C2}) اندوکتانس و مقاومت خطوط انتقال (کابلها) و بین الکترودهای کوره اول (کوره دوم) است. X_{LSC} راکتانس اتصال کوتاه در باس PCC است.

روند طراحی سلف TCR در شکل ۱، چنین است که بر اساس توان راکتیو مصرفی کوره، ابتدا میزان توان راکتیو تولیدی خازنهای ثابت در حدود ۱۱۰ درصد راکتیو مصرفی کوره انتخاب می شود. سپس با توجه به این نکته که اگر کوره به طور ناگهانی از مدار خارج شود، خازنها سبب ایجاد ولتاژ شدیدی در سیستم می شوند؛ میزان توان راکتیو کل TCR در حدود ۱۲۰ درصد توان راکتیو تولیدی خازنها در نظر گرفته شده و به این ترتیب سلف TCR طراحی می شود.

۳-۱-۳- طراحی خازنهای موازی RLC

همانطور که گفته شد، همواره جریان جبران کننده TCR به صورت پس فاز است، بنابر این تنها توانایی جذب توان راکتیو دارد. در صورتی که موازی با این جبران کننده از خازنهای موازی استفاده شود، سیستم جبران، می تواند توان راکتیو نیز تولید کند (مطابق شکل ۱). بدین منظور در این قسمت به جای استفاده از خازنهای ثابت، از فیلترهای میان گذر LC سری برای فرکانسهای معین استفاده شده است. این نوع فیلترها، ضمن آنکه در فرکانس همناوی خود، نقش حذف هارمونیکها را به عهده دارند؛ در فرکانس شبکه نیز مشخصه خازنی داشته و مانند خازن ثابت، توان راکتیو به سیستم تزریق می کنند. از طرفی این فیلترها جریانهای هارمونیکی تولید شده توسط TCR را فیلتر کرده و از عبور آنها به سیستم خارجی جلوگیری می کنند.

در فیلتر LC سری، راکتانس خازنی و سلفی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۶]:

$$\begin{cases} Q_c^{ab} = Q_L^a + Q_L^b - Q_L^c \\ Q_c^{bc} = Q_L^b + Q_L^c - Q_L^a \\ Q_c^{ca} = Q_L^c + Q_L^a - Q_L^b \end{cases} \quad (11)$$

پس از این متعادل‌سازی، اندازه‌گیری توان راکتیو به‌وسیله متوسط‌گیری در نیم پریود به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t v(\tau - \frac{T}{4}) i(\tau) d\tau = \frac{2}{T} \left[\int_0^{t-T/2} v(\tau - \frac{T}{4}) i(\tau) d\tau - \int_0^{t-T/2} v(\tau - \frac{T}{4}) i(\tau) d\tau \right] \quad (12)$$

لذا با انتخاب $F(t) = v(t - \frac{T}{4}) i(t)$ داریم:

$$Q = \frac{2}{T} \int_0^t (F(\tau) - F(\tau - \frac{T}{4})) d\tau \quad (13)$$

عملکرد این روش چنین است که مقدار توان راکتیو در هر نیم سیکل، صفر می‌شود و دوباره انتگرال‌گیری شروع می‌شود. در زمان انتگرال‌گیری، حاصل انتگرال‌گیری در مرحله قبلی به‌عنوان سیگنال توان راکتیو ارائه شده و در پایان زمان انتگرال‌گیری و قبل از صفر شدن انتگرال‌گیر، مقدار آن به‌عنوان سیگنال توان راکتیو جدید در نظر گرفته می‌شود. بنابر این مقدار انتگرال‌گیر در این سیستم در هر نیم‌سیکل، صفر^۲ می‌شود. این خاصیت سبب می‌شود که اثر نویز یا اختلال، فقط در یک نیم‌سیکل باقی بماند و بعد از آن حذف شود. به این ترتیب سیستم اندازه‌گیر توان راکتیو علاوه بر سرعت مناسب، دقت کافی نیز دارد.

۳-۲- جبران‌کننده TSC

اصول کار خازن تایریستور سوئیچ (TSC) چنین است که سوسپتانس به‌وسیله کنترل تعداد خازنهای در حال هدایت تنظیم می‌شود. همواره هر خازن برای مجموعه‌ای از نیم سیکل‌ها هدایت می‌کند.

در روند طراحی، به‌منظور بهبود عملکرد جبران‌کننده و کاهش کلیدزنی از دوبانک خازنی مجزا استفاده می‌شود. دیاگرام

میان دامنه مؤلفه اصلی جریان TCR (یعنی I_1 و زاویه تأخیری که در رابطه (۵) داده شده) از طریق یک مدار هم‌زمان، تأمین می‌شود. با این توضیحات، در این مقاله "جدول جستجوی" دیجیتالی برای جریان نرمال شده I_1 در مقابل تابع α طراحی شده است. در این جدول با شروع از $\alpha = 0$ (پیک ولتاژ)، زاویه تأخیر، در فواصل زمانی منظم در هر درجه خوانده می‌شود تا مقدار جریان درخواست شده پیدا شود. با محاسبه جریان، یک پالس آتش آغاز می‌شود.

۴) در چهارمین مرحله، مؤلفه اصلی جریان مورد نیاز راکتور، از کل جریان درخواستی که با I_{Qref} مشخص شده، محاسبه می‌شود. این پارامتر، برابر با جمع جریانهای خازن ثابت و TCR است. در این راستا، علامت مثبت I_{Qref} به‌معنای جریان خروجی القایی و علامت منفی به‌معنای جریان خروجی خازنی است.

۵) مرحله پنجم، عبارت است از تولید پالس آتش تریستور. این کار با استفاده از مدار مولد پالس آتش که جریان پالس دریچه مورد نیاز را تولید می‌کند انجام می‌شود. این جریان باعث می‌شود تریستور در پاسخ به سیگنال خروجی ایجاد شده توسط جریان راکتیو در کنورتور زاویه آتش، متصل شود.

به‌منظور افزایش سرعت جبران‌کننده، هر تایریستور به‌طور جداگانه کنترل می‌شود. به این ترتیب میزان تأخیر در پاسخ جبران‌کننده نیز کاهش می‌یابد.

۳-۱-۳- طراحی سیستم اندازه‌گیر توان راکتیو

یکی از مهمترین قسمت‌های سیستم کنترل، اندازه‌گیر توان راکتیو می‌باشد که باید سرعت و دقت مناسبی داشته باشد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا باید سیستم سه‌فاز نامتعادل کوره قوس الکتریکی تبدیل به سیستم متعادل شود. بر این اساس، توان راکتیو مورد نیاز برای هر شاخه جبران‌کننده، بر حسب ترکیبی از توان راکتیو هر فاز بار به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۳]:

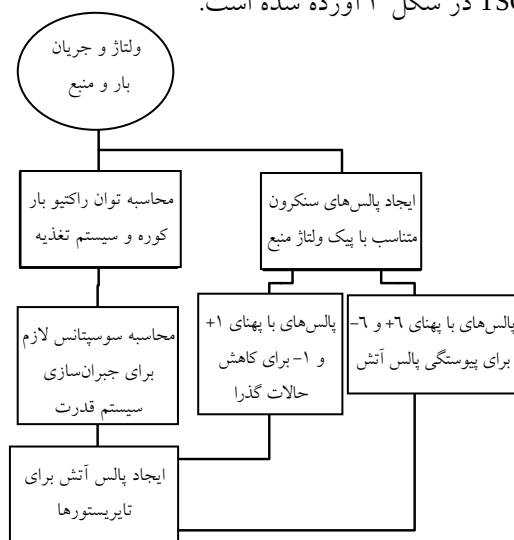
تا بتواند به نحو مطلوبی جبران سازی را انجام دهد. الگوریتم طراحی این سیستم کنترلی چنین است:

- (۱) اندازه گیری تغییرات توان راکتیو بار و سیستم قدرت به طور بهینه و با سرعت و دقت مطلوب؛
- (۲) ایجاد سیگنال مورد نیاز برای سیستم کنترل به منظور بهبود عملکرد این سیستم. در این مرحله، برای حداقل سازی حالات گذرای ولتاژ و جریان روی تائریستورها لازم است خازن ها بعد از خارج شدن از مدار همچنان در حداکثر مقدار خود شارژ باقی بمانند. بدین منظور، پالس های سنکرون کننده ای با پهنای $+1$ و -1 میلی ثانیه با توجه به ولتاژ شبکه تولید می شوند. از طرفی، به منظور ساختن پالس های آتش پیوسته به تائریستورها، پالس های سنکرون کننده ای با پهنای $+6$ و -6 میلی ثانیه مانند پالس های قبلی تولید می شوند.

- (۳) محاسبه سوسپتانس لازم برای جبران سازی سیستم قدرت. در این مرحله، تعداد پله های خازنی متصل شده در هر لحظه محاسبه می شوند.

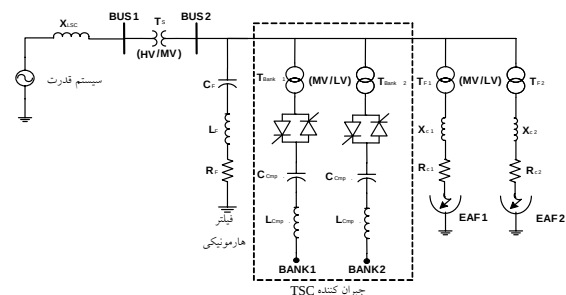
- (۴) ایجاد پالس آتش تائریستور با توجه به شرایط بدون گذرا در مراحل قبل.

بلوک دیاگرام این سیستم کنترلی برای جبران کننده TSC در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳ روندنمای طراحی سیستم کنترل TSC

تک خطی این ساختار در شکل ۲ آورده شده است. هر بانک خازنی در هر فاز خود، هشت پله خازنی متغیر و یک پله خازنی ثابت دارد که هر یک از پله ها به صورت اتصال مثلث به یکدیگر متصل شده اند. نحوه اتصال پله ها باعث می شود که هارمونیک های مضرب سه - ناشی از کلیدزنی - در اتصال مثلث جریان یابد و از جریان خط حذف شوند. همچنین این ساختار باعث می شود که تعداد کلیدزنی خازن ها در واحد زمان به حدود نصف کاهش یابد. لذا بهبود عمر مفید خازن ها و تائریستورها حاصل می شود. از طرفی پله های ثابت خازنی باعث تنظیم ضریب توان میانگین کلی می شوند. در نهایت در شکل ۲، برای محدود کردن آثار گذرای حاصل از کلیدزنی، میرا کردن جریانهای هجومی و جلوگیری از تشدید با شبکه، از یک سلف کوچک (L_{comp} سری شده با خازن) استفاده شده است.



شکل ۲ دیاگرام تک خطی سیستم تغذیه دو کوره قوس همراه با جبران کننده TSC

نحوه طراحی خازن های TSC چنین است که با توجه به توان راکتیو مصرفی کوره، ابتدا کل توان راکتیو تولیدی TSC محاسبه می شود. سپس با تقسیم این توان بر کل پله های خازنی، میزان توان راکتیو در هر پله محاسبه و در نهایت، خازن هر پله تعیین می شود.

۳-۲-۱- طراحی سیستم کنترل جبران کننده

مهمترین قسمت جبران گرهای استاتیکی، سیستم کنترل آنها است. این سیستم باید سرعت و دقت لازم را داشته باشد

۳-۲-۳- طراحی فیلترهای هارمونیک

بانک‌های خازنی نسبت به جریان هارمونیک بسیار حساس است. اگر فرکانس جریان هارمونیک با فرکانس طبیعی سیستم یکی باشد، تقویت جریان بانک خازنی اتفاق می‌افتد و گاهی باعث نابودی بانک خازنی می‌شود. بهترین روش برای حفاظت از این خرابی، استفاده از فیلترهای موازی RLC است. این فیلترها علاوه بر حذف جریان‌های هارمونیک از سیستم، در فرکانس اصلی نیز به‌عنوان جبرانگر فاز عمل می‌کنند. لذا در این بخش به طراحی فیلتر هارمونیک مرتبه سه برای سیستم قدرت با کوره قوس می‌پردازیم.

روابط حاکم بر این نوع فیلتر را می‌توان به‌صورت بیان کرد:

$$X_L = L \omega_o \quad (14)$$

$$X_C = \frac{1}{C \omega_o}$$

$$(n \omega_o)^2 = \frac{1}{LC}$$

از طرفی ضریب کیفیت عملکرد فیلتر برابر است با:

$$Q_F = \frac{nX_L}{R} \quad (15)$$

همچنین رابطه میزان توان راکتیو فیلتر در فرکانس اصلی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{Fund} = Q_C - Q_L = \frac{|V|^2 (n^2 - 1)}{X_L \left[\left(\frac{n}{Q_F} \right)^2 + (1 - n^2)^2 \right]} \quad (16)$$

در این روابط، ω_o سرعت زاویه‌ای در فرکانس اصلی، n مرتبه هارمونیک، R و L و C به‌ترتیب میزان مقاومت، سلف و خازن فیلتر است. V و I ولتاژ و جریان فیلتر است.

۴- تحلیل هارمونیک سیستم قدرت و

محاسبه شاخص عدم تعادل

در این قسمت با توجه به اهمیت تحلیل هارمونیک در سیستم‌های قدرت، به محاسبه ضریب اعوجاج هارمونیک

کل (THD)^۱ و شاخص عدم تعادل ولتاژ و جریان در سیستم قدرت می‌پردازیم.

۴-۱- ضریب اعوجاج هارمونیک کل

ضریب THD، بیانگر نسبت مقدار مؤثر هارمونیک‌ها به مقدار مؤثر مؤلفه اصلی شکل موج است. لذا:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} H_n^2}}{H_1} \quad (17)$$

در این رابطه H_1 مقدار مؤثر مؤلفه اصلی، H_n مقدار مؤثر مؤلفه‌های هارمونیک و n_{max} بزرگ‌ترین مرتبه هارمونیک است که در محاسبات مورد توجه قرار می‌گیرد.

۴-۲- بررسی شاخص عدم تعادل ولتاژ و جریان

در حالتی که ولتاژ و جریان سه‌فاز در سیستم قدرت، اختلاف فاز ۱۲۰ درجه نداشته باشند، شاخص عدم تعادل ولتاژ و جریان مطرح می‌شود. با توجه به اینکه کوره‌های قوس الکتریکی عدم تعادل را در سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کنند، لازم است این مبحث مورد مطالعه قرار گیرد.

هر دسته از ولتاژ یا جریان سه‌فاز را می‌توان به سه دسته متعادل تجزیه کرد که توابعی مثبت، منفی و صفر نامیده می‌شوند. به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} X_o \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

در این رابطه X_a و X_b و X_c به‌ترتیب بیانگر ولتاژ یا جریان نامتعادل سه‌فاز است. X_1 و X_2 و X_o به‌ترتیب مربوط به توابعی مثبت، منفی و صفر است. از طرفی $a = e^{j120}$ است. بنابر این شاخص عدم تعادل به‌صورت نسبت بین ولتاژ مؤلفه منفی به مؤلفه مثبت تعریف می‌شود؛ یعنی:

$$X_x = \frac{|X_2|}{|X_1|} \times 100 \quad (19)$$

$$V_{at0} = V_{at02} = V_{at03} = 200V$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = 0.5 \quad (22)$$

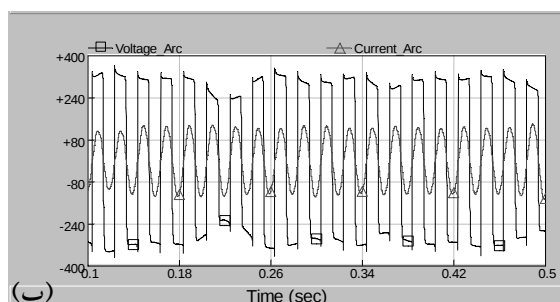
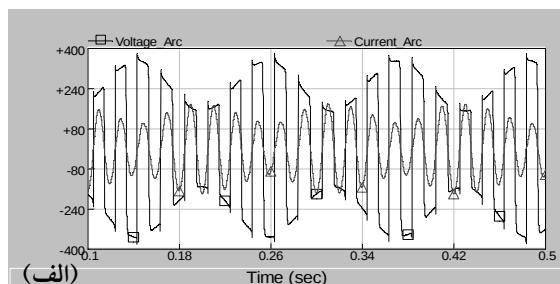
$$\omega_f = 50 \text{ rad/sec}$$

با توجه به مقادیر انتخاب شده، منحنی تغییرات ولتاژ و جریان کوره در شکل ۶-الف آورده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی فلیکر ولتاژ در حالت تصادفی و با توجه به رابطه (۴) مقادیر زیر مد نظر قرار گرفته است:

$$V_{at01} = V_{at02} = V_{at03} = 200V$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = 1 \quad (23)$$

با این مقادیر، منحنی تغییرات ولتاژ و جریان کوره در شکل ۶-ب آورده شده است. با توجه به دو منحنی اخیر، درمی‌یابیم که در حضور فلیکر ولتاژ، میزان مؤثر ولتاژ و جریان کوره متناسب با فلیکر ایجاد شده تغییر می‌کند.



شکل ۶ منحنی ولتاژ و جریان کوره در حالت فلیکر ولتاژ؛ الف) فلیکر سینوسی ب) فلیکر تصادفی

۵-۲- ارزیابی و شبیه‌سازی جبران‌کننده TCR/FC

در این قسمت بر اساس شکل ۱ فرض می‌شود که کوره اول در حالت ذوب اولیه و کوره دوم در وضعیت ذوب پایدار قرار

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- ارزیابی و شبیه‌سازی سیستم قدرت با وجود

کوره قوس الکتریکی

به‌منظور شبیه‌سازی سیستم تغذیه کوره ارائه شده شکل ۱، مقادیر زیر در نظر گرفته شده است:

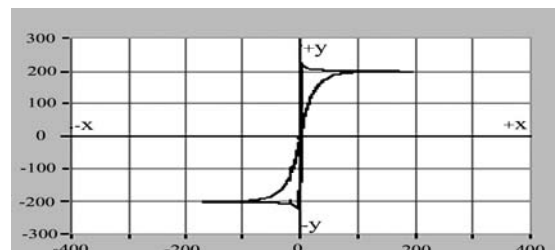
$$X_{lsc} = 9.4245 \Omega, \quad X_c = 2.356 \text{ m}\Omega, \quad (20)$$

$$R_c = 0.4 \text{ m}\Omega, \quad f_{sys} = 50 \text{ Hz}$$

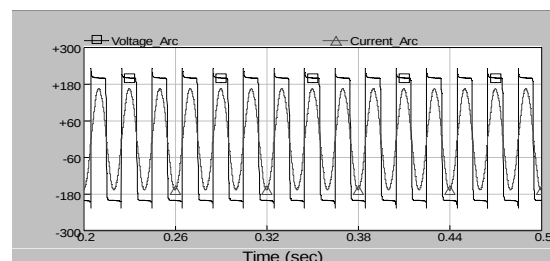
همچنین کمیت‌های مدل بار بر اساس مدل هذلولی-نمایی و با توجه به رابطه (۱) به‌صورت زیر انتخاب شده است:

$$V_{at} = 200V, C = 190 \text{ kW}, D = 5 \text{ kA}, \tau = 10 \text{ kA} \quad (21)$$

توان ظاهری کوره قوس نیز ۱۲۰ Mvar در نظر گرفته شده است. با این مقادیر، منحنی مشخصه ولتاژ - جریان کوره در شکل ۴ آورده شده است. همچنین منحنی تغییرات ولتاژ و جریان کوره در شکل ۵ نشان داده شده است.



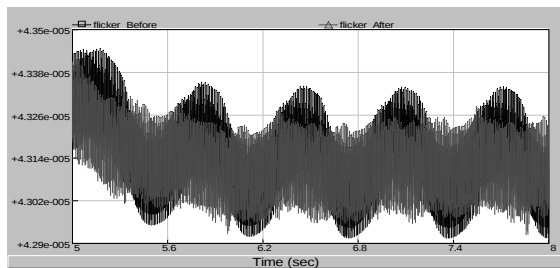
شکل ۴ مشخصه ولتاژ - جریان قوس الکتریکی



شکل ۵ منحنی ولتاژ و جریان کوره

۵-۱-۱- نتایج بررسی فلیکر ولتاژ

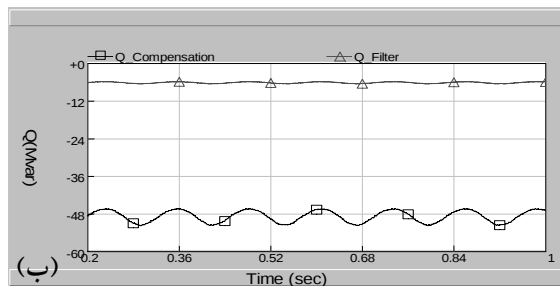
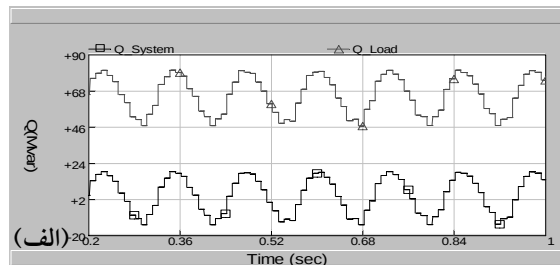
برای شبیه‌سازی فلیکر ولتاژ در حالت سینوسی و با توجه به رابطه (۳) مقادیر زیر در نظر گرفته شده است:



شکل ۹ منحنی تغییرات فلیکر ولتاژ باس PCC، قبل و بعد از حضور جبران‌کننده TCR در حالت فلیکر سینوسی

۳-۵- ارزیابی و شبیه‌سازی جبران‌کننده TSC

در این بخش نیز مانند قسمت قبل، فقط نتایج حاصل از فلیکر سینوسی نشان داده می‌شود و بر اساس شکل ۲ کوره‌ها در دو وضعیت کاری قبل به کار خود ادامه می‌دهد. در این حالت، میزان توان راکتیو منبع و بار در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که جبران‌کننده TSC به خوبی توانسته جبران‌سازی توان راکتیو را انجام دهد. همچنین توان راکتیو جبران‌کننده و فیلتر هارمونیک در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است.



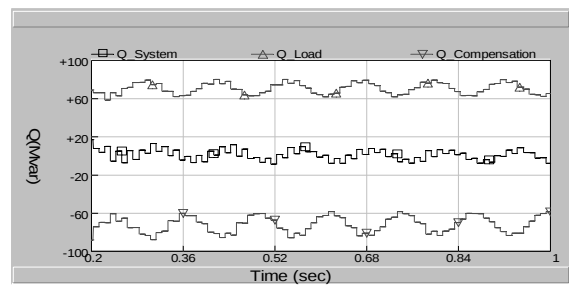
شکل ۱۰ منحنی تغییرات توان راکتیو در حالت فلیکر سینوسی؛
(الف) تغییرات توان راکتیو بار و منبع؛ (ب) تغییرات توان راکتیو جبران‌کننده TSC و فیلتر هارمونیک در فرکانس اصلی

دارد. برای شبیه‌سازی سیستم جبران‌کننده TCR، ابتدا یک سلف ۲۵mH برای هر یک از شاخه‌های آن طراحی می‌شود. همچنین برای سیستم مذکور، فیلترهای مرتبه ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۷ شبیه‌سازی شده‌اند. البته برای بهتر نشان دادن حالات مختلف عملکرد جبران‌کننده، فقط نتایج حاصل از فلیکر سینوسی نشان داده می‌شود. ذکر این نکته لازم است در حالت فلیکر تصادفی نیز جبران‌کننده با دقت و سرعت مطلوب کار می‌کند.

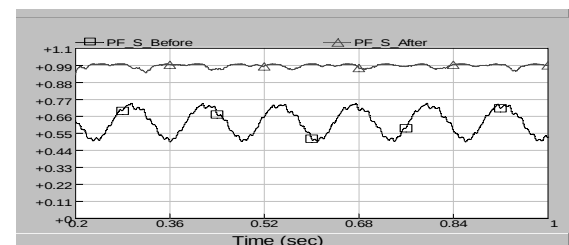
در این حالت و با توجه به رابطه (۳)، شدت فلیکر در حالت ذوب اولیه، چهار برابر وضعیت پایدار در نظر گرفته شده است. در این قسمت آثار جبران‌کننده TCR/FC بر سیستم قدرت بیان می‌شود.

با در نظر گرفتن فلیکر ولتاژ به صورت سینوسی، نحوه تغییرات توان راکتیو بار، سیستم و جبران‌کننده در شکل ۷ نشان داده شده است.

میزان تغییرات ضریب توان قبل و بعد از جبران، در شکل ۸ آورده شده است. شکل ۹ فلیکر ولتاژ ایجاد شده روی باس PCC را بدون وجود جبران‌کننده و با حضور آن نشان می‌دهد. در اینجا منظور از بار الکتریکی، بار کوره همراه با فیلترهای آن است.



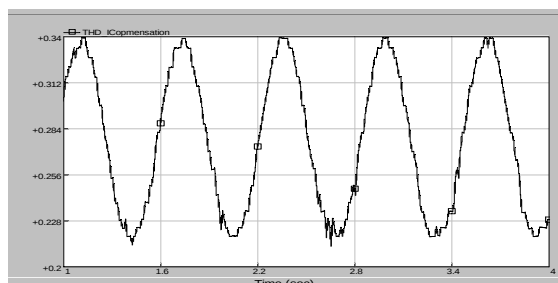
شکل ۷ منحنیهای توان راکتیو سیستم با وجود فلیکر سینوسی



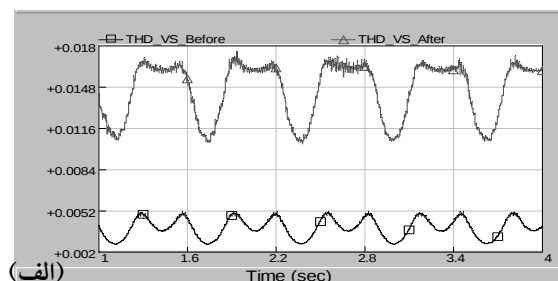
شکل ۸ تغییرات ضریب توان قبل و بعد از حضور جبران‌کننده

۵-۴-۱- بررسی نتایج تحلیل هارمونیکی و شاخص عدم تعادل ناشی از TCR/FC

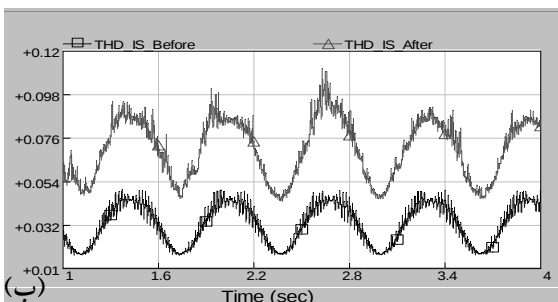
در این حالت، شکل ۱۳ مقدار THD جریان جبران‌کننده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۴-الف و ۱۴-ب به ترتیب منحنی THD ولتاژ و جریان باس PCC را قبل و بعد از وجود این جبران‌کننده و با در نظر گرفتن فلیکر سینوسی نشان می‌دهد. با توجه این منحنیها مشاهده می‌شود که این جبران‌کننده باعث اعوجاج هارمونیکی در سیستم قدرت می‌شود. همچنین منحنیهای مربوط به شاخص عدم تعادل جریان باس PCC و بار کوره با حضور جبران‌کننده TCR/FC شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ THD جریان جبران‌کننده



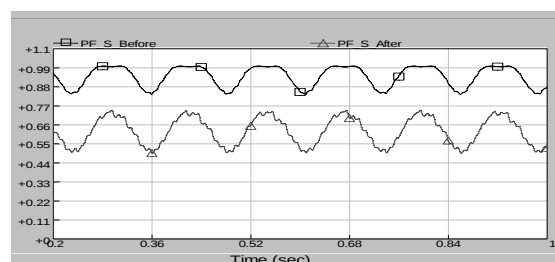
(الف)



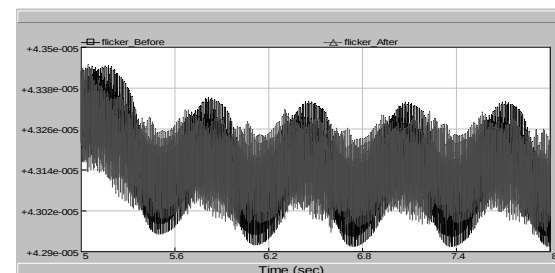
(ب)

شکل ۱۴ تغییرات THD؛ (الف) THD ولتاژ باس PCC قبل و بعد از جبران؛ (ب) THD جریان باس PCC قبل و بعد از جبران

منحنی میزان تغییرات ضریب توان سیستم قدرت قبل و بعد از سیستم جبران در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از طرفی منحنی تغییرات فلیکر ولتاژ باس PCC قبل و بعد از سیستم جبران در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که جبران‌کننده TSC توانسته تا حد بسیار زیادی فلیکر ولتاژ را در باس اصلی سیستم قدرت جبران کند و باعث بهبود ولتاژ این باس شده است.



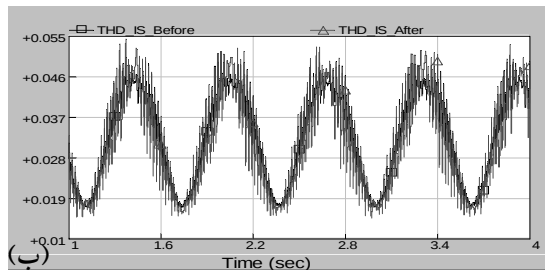
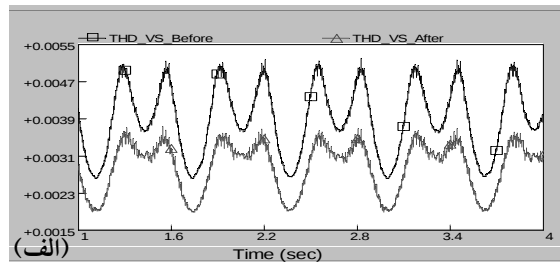
شکل ۱۱ منحنی تغییرات ضریب توان سیستم قدرت، قبل و بعد از حضور جبران‌کننده TSC در حالت فلیکر سینوسی



شکل ۱۲ منحنی تغییرات فلیکر ولتاژ باس PCC، قبل و بعد از حضور جبران‌کننده TSC در حالت فلیکر سینوسی

۵-۴-۲- نتایج بررسی تحلیل هارمونیکی و شاخص عدم تعادل

در این قسمت با توجه به اهمیت تحلیل هارمونیکی در سیستمهای قدرت به عنوان پارامتری از کیفیت توان، میزان اعوجاج هارمونیکی کل ناشی از جبرانگرهای TCR/FC و TSC روی سیستم قدرت و همچنین THD مربوط به این جبرانگرها در حالات مختلف عملکرد نیز بررسی و شبیه‌سازی می‌شود.

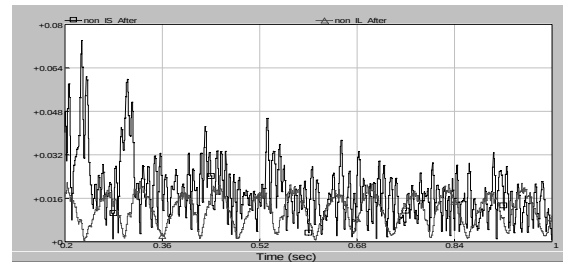


شکل ۱۸ تغییرات THD؛ (الف) میزان THD ولتاژ باس PCC قبل و بعد از جبران؛ (ب) میزان THD جریان باس PCC قبل و بعد از جبران

۵-۵- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی درمی‌یابیم که در حالتی که یکی از کوره‌ها در حالت ذوب اولیه و کوره دیگر در وضعیت ذوب آرام قرار دارد، سیستم قدرت، نوسانات نسبتاً شدیدی دارد که می‌توان این نوسانات را توسط جبران‌گرهای استاتیکی کاهش داد. به این ترتیب می‌توان کیفیت توان را در سیستم قدرت بهبود بخشید. همچنین می‌توان گفت زمانی که کوره در وضعیت ذوب اولیه قرار دارد بار کوره، ضریب توان کمتری نسبت به حالتی دارد که کوره در وضعیت ذوب آرام است. البته مشاهده شد که این پارامتر توسط جبران‌گرهای استاتیکی در این مقاله بهبود داده شده و مقدار آن تا ضریب توان ۱ بالا می‌رود. این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۸ و ۱۱ مشاهده کرد.

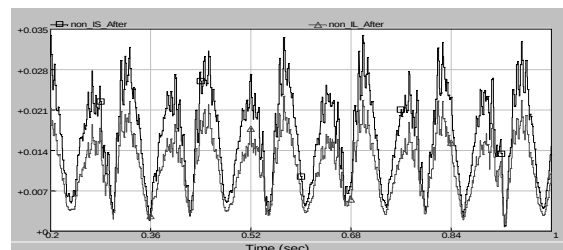
به‌طور خلاصه می‌توان عملکرد دینامیکی و گذرای این دو جبران‌کننده را در جدول ۱ نشان داد. این جدول، کلیه پارامترهای مربوط به عملکرد این دو جبران‌کننده و آثار آن را بر سیستم قدرت نشان می‌دهد. در این جدول،



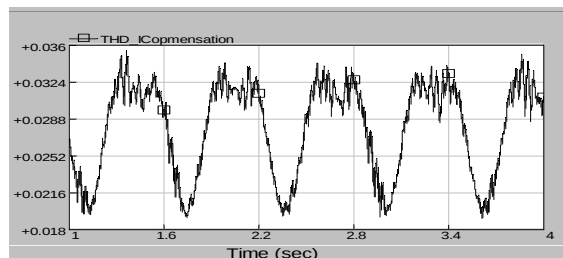
شکل ۱۵ تغییرات شاخص عدم تعادل جریان بار و منبع با وجود جبران‌کننده

۵-۴-۲- بررسی نتایج تحلیل هارمونیک و شاخص عدم تعادل ناشی از TSC

در این حالت، منحنیهای مربوط به شاخص عدم تعادل جریان باس PCC و بار کوره با حضور جبران‌کننده TSC در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۷ THD جریان جبران‌کننده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۸-الف و ۱۸-ب به ترتیب منحنی THD ولتاژ و جریان باس PCC را قبل و بعد از وجود این جبران‌کننده و با در نظر گرفتن فلیکر سینوسی نشان می‌دهد. با توجه این منحنیها مشاهده می‌شود که این جبران‌کننده باعث اعوجاج هارمونیک در سیستم قدرت می‌شود.



شکل ۱۶ تغییرات شاخص عدم تعادل جریان بار و منبع با وجود جبران‌کننده



شکل ۱۷ THD جریان جبران‌کننده

مشخصه‌های ولتاژ - جریان و مشخصه‌های ولتاژ - توان این جبران‌کننده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. تلفات این جبران‌گرها در این جدول قابل مشاهده است.

با توجه به این جدول در می‌یابیم که از بین دو جبران‌کننده TCR/FC و TSC از نظر عملکردی، جبران‌کننده TCR/FC نقش بهتری در سیستم قدرت ایفا می‌کند و پدیده‌های کیفیت توان را به‌طور مطلوب‌تری بهبود می‌بخشد. اما عیب این جبران‌کننده، تزریق هارمونیک به سیستم قدرت ایجاد THD است که این ضعف توسط فیلترهای هارمونیک قابل حل است (شکلهای ۱۳ و ۱۴). البته باید توجه داشت که این فیلترها در حالت واقعی، قیمت بالایی دارند و در بعضی مواقع، مقرون به صرفه نیستند. جبران‌کننده TSC

نیز تقریباً به‌طور مطلوبی در سیستم عمل می‌کند که محدودیت این جبران‌کننده را می‌توان در مقادیر نامی ولتاژ و جریان خازنهای آن دانست. همچنین مشاهده می‌شود که جبران‌کننده TCR توانایی متعادل کردن فازها را به‌خوبی دارند (شکل ۱۵). به‌علاوه با توجه به طراحی مطلوب، سیستم کنترل، توانایی محدودسازی اضافه ولتاژهای ایجاد شده را خواهد داشت. این در حالی است که جبران‌کننده TSC با مشخصات سیستم کنترل طراحی شده، چنین قابلیت‌هایی را در حد نسبتاً خوبی دارد. خاصیت بارز این جبران‌کننده، عدم هارمونیک‌زایی آن و روش کنترل گسسته آن است که با طراحی درست آن می‌توان به‌صورت پیوسته، توان راکتیو را تغییر داد.

جدول ۱ مقایسه مولدهای استاتیکی توان راکتیو از نظر حالت گذرا و دینامیکی

TSC	TCR/FC	جبران‌کننده استاتیکی	
		اعمالکرد	
حداکثر جریان جبران‌سازی با ولتاژ سیستم، متناسب است. حداکثر توان راکتیو خروجی خازنی با مجذور کاهش ولتاژ کاهش می‌یابد.	حداکثر جریان جبران‌سازی با ولتاژ سیستم، متناسب است. حداکثر توان راکتیو خروجی خازنی با مجذور کاهش ولتاژ کاهش می‌یابد.	مشخصه $V-I$ و $V-Q$	
تلفات کم در خروجی صفر: تلفات به‌صورت پله‌ای با توان خروجی خازنی و به‌صورت یکنواخت با توان خروجی القایی، افزایش می‌یابد.	تلفات زیاد در خروجی صفر: تلفات به‌صورت یکنواخت با توان خروجی خازنی، کاهش یافته و با توان القایی خروجی افزایش می‌یابد.	تلفات در برابر توان راکتیو خروجی	
گسسته	پیوسته	روش کنترل توان راکتیو	
در حدود یک سیکل	در حدود بیشتر از نیم سیکل	مبانی تئوری	تأخیر و متوسط زمان
در حدود بیشتر از نیم سیکل	در حدود نیم سیکل	کنترل مطلوب	پاسخ از نظر
تولید داخلی هارمونیک ناچیز. به فیلتر کردن نیاز ندارد.	تولید داخلی هارمونیک زیاد: (در TCR با $p.u.$ زیاد). نیاز به فیلتر کردن قابل توجهی دارد.	از نظر تولید هارمونیک	
در حد متوسط	در حد مطلوب	از نظر حذف فلیکر	
در حد متوسط	در حد مطلوب	از نظر متعادل‌سازی بار	
در حد مطلوب	بسیار مطلوب	از نظر قابلیت انعطاف در برنامه‌ریزی	
می‌تواند خنثی باشد. (خازن‌ها را می‌توان به بیرون مدار سوئیچ کرد تا اضافه ولتاژهای گذرا حداقل شود)	ضعیف. (خازن ثابت FC باعث اضافه ولتاژهای گذرا در پاسخ به اغتشاشات مرحله‌ای می‌شود)	از نظر رفتار گذرا تحت اثر اغتشاشات ولتاژ سیستم	

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی موازی‌سازی کوره‌های قوس الکتریکی در سیستم قدرت و نحوه جبران توان راکتیو در این سیستم ارائه شده است. در این راستا الگوریتم راه‌اندازی کوره‌ها باید به گونه‌ای باشد که هیچ وقت دو کوره به‌طور هم‌زمان در حالت ذوب اولیه قرار نگیرند؛ زیرا سیستم دچار حالات گذرای شدیدی می‌شود. در این صورت حتی ممکن است در صورت اتصال ژنراتور به شین اصلی، محور آن دچار آسیب و شکستگی شود. همچنین نحوه طراحی و کنترل جبرانگرهای استاتیکی از نوع TCR/FC و TSC در وضعیت کارکرد موازی کوره‌ها به‌طور دقیق بیان شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که عملکرد جبران‌کننده TCR/FC در سیستم قدرت بهتر است، اما هارمونیک زیادی ایجاد می‌کند که این مشکل نیز با طراحی دقیق فیلترهای هارمونیک تا حدی قابل حل است.

۷- منابع

- Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: IEEE/PES IEEE, Vol. 3, pp. 2078-2083, 2002.
- [4] Beites L. F., Mayordomo J. G., Hernandez A., Asensi R., "Harmonics, Inter harmonic, Unbalances of arc furnaces: a new frequency domain approach" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 661-668, 2001.
- [5] Mayordomo J. G., Beites L. F., Asensi R., Izzeddine M., Zabala L., Amantegui J., "A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative Harmonic Analysis" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1771-1778, 1997.
- [6] Fenghua W., Zhijian J., "Application of Extended Kalman Filter to the Modeling of Electric Arc Furnace for Power Quality Issues", International Conference on Networks and Brain Neural, 2005, Vol. 2, pp. 991-996, 2005.
- [7] Pak L. F., Dinavahi V., "Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 1218-1227, 2007.
- [8] Ramos B. N., Parga J. L. deC., "An EMTP Study of Flicker Generation and Transmission in Power System Due to the Operation of an AC Electric Arc Furnace", Harmonics and Quality of Power, 2000.
- [1] Alonso M. A. P., Donsion M. P., "An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 367-373, 2004.
- [2] Gomez-Martinez M. A., Medina A., Fuerte-Esquivel C. R., "AC arc furnace stability analysis based on bifurcation theory", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 153, No. 4, pp. 463-468, 2006.
- [3] Mokhtari H., Hejri M., "A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB",

- [14] Yoon W. K., Devaney M. J., "Reactive Power Measurement Using the Wavelet Transform", IEEE Trans. on Instrumentation, Vol. 49, No. 2, pp. 246-252, 2000.
- [15] Andrade M. T., "A New Current Relay for Capacitors in Medium Voltage LC Harmonic Filters", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES, pp. 686-690, 2004.
- [16] Andrews D., Bishop T., Witte F., "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility" IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 3m, pp. 2021-2029, 1994.
- [17] Alper Akda, Isik Çadirci, "Effects of Main Transformer Replacement on the Performance of an Electric Arc Furnace System", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, pp. 649-658 2000.
- Proceedings. Ninth International Conference on, Vol. 3, pp. 942-947, 2000.
- [9] Parniani M., Mokhtari H., Hejri M., "Effects of Dynamic Reactive Compensation in Arc Furnace Operation Characteristics and its Economic Benefits", Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol. 2, pp. 1044-1049, 2002.
- [10] Depommier B., Stanley J., "Static Var Compensator Upgrade in a Steel Mill", Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, Vol. 1, pp. 362-365, 2003.
- [11] Chen C. S., Chuang H. J., Hsu C. T., Tseng S. M., "Mitigation of Voltage Fluctuation for an Industrial Customer with Arc Furnace", Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, Vol. 3, pp. 1610-1615, 2001.
- [12] Garcia-Cerrada A., Garcia-Gonzalez P., Collantes R., Gomez T., Anzola J., "Comparison of Thyristor-Controlled Reactors and Voltage-Source Inverters for Compensation of Flicker Caused by Arc Furnaces", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1225-1231, 2000
- [13] Chow T. W., "Measurement and Evaluation of Instantaneous Reactive Power Using Neural Networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1253-1260, 1994.