

طراحی پارامترهای جبران کننده راکتور تایریستور کنترل برای کوره‌های قوس الکتریکی

مهدی ترابیان اصفهانی^(۱) - رحمت‌اله هوشمند^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - شرکت برق منطقه‌ای، اصفهان

(۲) دانشیار - گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: تابستان ۱۳۸۸ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۸۹

خلاصه: به منظور استفاده مؤثر از توان الکتریکی در کوره‌های قوس صنایع فولادسازی لازم است تا مشکل جبران توان راکتیو در کوره‌های قوس الکتریکی حل گردد. بدین منظور در این مقاله، ابتدا یک مدل بهینه برای قوس الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. بر روی این مدل بار، فلیکر ولتاژی با فرکانس 3 تا 14 هرتز به صورت سینوسی منظور می‌شود تا تأثیرات جبران کننده بر روی فلیکر ولتاژ نیز بررسی شود. سپس با توجه به اهمیت جبران‌سازی در کوره‌های قوس الکتریکی، به طراحی و شبیه‌سازی یک جبران کننده بهینه راکتور تایریستور کنترل (TCR) پرداخته می‌شود. همچنین در این راستا علت ایجاد حداقل نیم سیکل تأخیر در تصمیم‌گیری TCR و لزوم وجود فیلترهای هارمونیک با این جبران کننده بیان می‌شود و در نهایت مزایا و معایب این جبران کننده با سایر جبران کننده‌های توان راکتیو مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: کوره‌های قوس الکتریکی، هارمونیک، فلیکر، جبران کننده TCR.

۱- مقدمه

تایریستور سوئیچ⁽¹⁾ (TSC)، راکتور تایریستور سوئیچ⁽²⁾ (TSR) و راکتیو تایریستور کنترل⁽³⁾ (TCR) از این نمونه هستند. در جبران کننده‌های TSC و TSR سوسپیتانس مورد نیاز در اثر قطع یا وصل خازن‌ها یا راکتور صورت می‌پذیرد. بنابراین جبران کننده دارای خاصیت پله‌ای می‌باشد. ولی بر خلاف این دو، در جبران کننده TCR امپدانس مؤثر بطور پیوسته تغییر می‌کند و جریان می‌تواند در حداکثر پیش‌فاز بودن تا حداقل پس‌فاز بودن تغییر نماید؛ اما در جبران کننده‌های TSC و TSR این‌گونه نخواهد بود. مسئله اساسی در مدل‌سازی کوره‌های قوس الکتریکی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی قوس الکتریکی می‌باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای آن ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش معادلات تعادل حالت ماندگار [۱-۲]، روش‌های معادلات دیفرانسیل در حوزه زمان [۳-۴]، روش‌های خطی‌سازی و تقریب خطی [۵-۶] و روش‌های استفاده از مشخصه V-I برای قوس الکتریکی [۷] اشاره نمود. هر کدام از این روش‌ها دارای محدودیت‌ها و مشکلات زیادی می‌باشند؛ به عبارت دیگر یا اینکه نمی‌توانند کلیه حالات کوره را به خوبی بیان کنند و یا

کوره‌های قوس الکتریکی بارهای غیرخطی و متغیر با زمان هستند که پدیده کیفیت توان (که شامل عدم تعادل ولتاژ و جریان، تولید هارمونیک‌های زوج و فرد و فلیکر ولتاژ می‌باشد) را باعث می‌شوند. به این منظور، دستیابی به یک مدل بهینه برای کوره‌های قوس الکتریکی (که بتواند کلیه حالات مذکور را نشان دهد) الزامی است تا به کمک آن بتوان به طراحی جبران کننده بهینه برای این کوره‌ها پرداخت. بطور کلی می‌توان گفت جبران کننده‌های توان راکتیو، به دو دسته تقسیم می‌شود؛ یکی جبران بار راکتیو و دیگری جبران ولتاژ ترمینال و ثابت نگاه داشتن ولتاژ ترمینال.

به منظور جبران مؤثر تغییرات دینامیکی در سیستم لازم است تا جبران کننده، اولاً دارای سوسپیتانس قابل کنترل سریع و دقیق باشد؛ ثانیاً قابلیت اندازه‌گیری کمیت‌های بار را نیز داشته باشد؛ ثالثاً با سرعت بالا عمل پردازش سیگنال را نیز انجام دهد. در این راستا، جبران کننده‌های استاتیک توان راکتیو تمامی این مشخصه را دارا هستند. بطور کلی جبران کننده‌های استاتیک دارای انواع مختلفی هستند که خازن

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

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 حالت جریان‌های افزایشی، از معادله هذلولی و در حالت جریان‌های کاهش‌ی از معادله نمایی استفاده شده است. به همین دلیل به این مدل، مدل هذلولی-نمایی نیز گفته می‌شود. این مدل، قابلیت بیان مدل‌هایی که در معادلات دیفرانسیل برای مدل‌سازی استفاده می‌کند و یا مدل‌های حوزه فرکانس را نیز دارا می‌باشد؛ بدون اینکه نیازی به حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل پیچیده داشته باشد. همچنین این مدل بار کوره قوس الکتریکی می‌تواند مراحل مختلف ذوب، اعم از مرحله ذوب و مرحله تصفیه را به خوبی بیان کند که تطابق بسیار مطلوبی با حالت واقعی در کوره‌های قوس صنایع فولاد دارد. برای بیان فلیکر، ولتاژ V_{at} به صورت سینوسی تغییر می‌کند (V_{at} ولتاژی است که با طول قوس بستگی دارد) که به همان ترتیب مقدار مؤثر ولتاژ و جریان نیز با فرکانس فلیکر تغییرات خواهد داشت. برای تأمین این شرایط، ولتاژهای سه فاز برای V_{at} به صورت زیر در نظر گرفته شود.

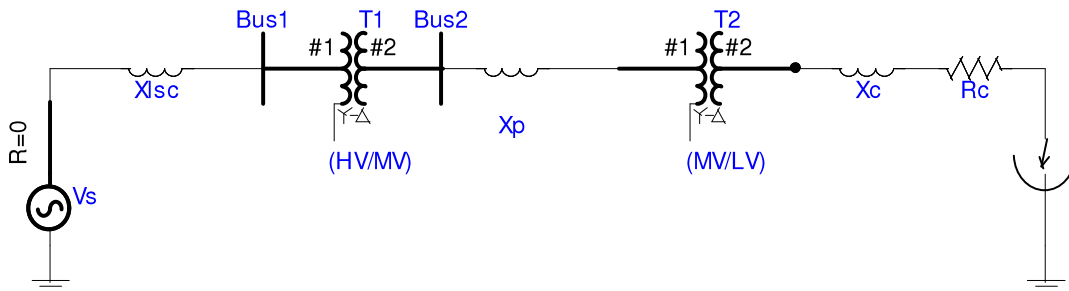
$$\begin{aligned} V_{at1} &= V_{at+1}(1 + k_1 \cdot \sin \omega_f t) \\ V_{at2} &= V_{at+2}(1 + k_2 \cdot \sin \omega_f t) \\ V_{at3} &= V_{at+3}(1 + k_3 \cdot \sin \omega_f t) \end{aligned} \quad (2)$$

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

اینکه در بیان حالات کوره نیاز به شرایط اولیه خاصی دارند. در مراجع [۹-۸] فقط به تحلیل جبران کننده‌ها پرداخته شده است و در مرجع [۱۱-۱۰] فقط یک نمونه TCR بیان گردیده است و توضیح خاصی در مورد جبران توان راکتیو توسط این جبران کننده داده نشده است. در این مقاله با توجه به کلیه محدودیت‌ها و مشکلات مدل‌های مورد نظر، ابتدا به مدل‌سازی یک مدل بهینه بار کوره (که هم بتواند حالات کوره را به خوبی بیان کند و هم نیاز به شرایط اولیه خاصی ندارد) پرداخته می‌شود. سپس اثر فلیکر ولتاژ به صورت سینوسی با فرکانس مورد بحث برای این مدل در نظر گرفته می‌شود. همچنین یک جبران کننده بهینه توان راکتیو TCR برای کوره‌های قوس الکتریکی طراحی شده و آثار توان راکتیو این جبران کننده را قبل و بعد از جبران بررسی می‌کنیم. در این راستا علت ایجاد حداقل نیم سیکل تأخیر در تصمیم‌گیری TCR و لزوم وجود فیلترهای هارمونیک با این جبران کننده را بیان می‌کنیم. در نهایت، مزایا و معایب این جبران کننده نسبت به سایر جبران کننده‌های استاتیکی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی بار کوره و در نظر گرفتن فلیکر ولتاژ

دیگرام مداری واحد الکتریکی که یک کوره قوس را تغذیه می‌کند در شکل (۱) آورده شده است. در این شکل، باس PCC، باس تغذیه کننده اصلی ترانسفورماتور کوره می‌باشد. برای تغییر دادن توان اکتیو ورودی یک کوره قوس از ترانسفورماتور T2 (MV/LV) که باس ۲ وصل شده است استفاده می‌شود. این ترانسفورماتور دارای سیم‌پیچ ثانویه متغیر (تپ‌چنجر) می‌باشد و می‌توان با تغییر دادن آن، ولتاژ کوره را تغییر داد. کوره توسط ترانسفورماتور T1، به نقطه اتصال مشترک^۴ (باس ۱) وصل شده است. در این شکل، X_p راکتانس سری برای جبران فلیکر ولتاژ می‌باشد که در مدار قرار می‌گیرد. مقادیر X_c و R_c اندوکتانس و مقاومت خطوط انتقال (کابل‌ها) و بین الکترودهای کوره می‌باشد. همچنین X_{Lsc} راکتانس اتصال کوتاه در باس PCC می‌باشد. برای مدل کردن قوس الکتریکی، رابطه زیر در نظر گرفته شده است [۳]:



شکل (۱): نمای کلی مدار تغذیه یک کوره قوس الکتریکی

Fig. (1): The general view of the power supply of an arc furnace

۳- طراحی جبران کننده بهینه TCR

به منظور جبران توان راکتیو کوره‌های قوس الکتریکی، در این قسمت به طراحی یک جبران کننده راکتور تایریستور کنترل (TCR) که به موازات کوره‌های قوس قرار می‌گیرد، می‌پردازیم. اصول کار این نوع جبران کننده‌ها به این صورت است که توان راکتیو کوره قوس الکتریکی با سرعتی که امکان پذیر باشد اندازه گیری شده و جبران کننده به طریقی کنترل می‌شود که مجموع توان راکتیو کوره و توان راکتیو جبران کننده تا حد امکان، ثابت بماند. در حقیقت، جبران کننده فقط نقش جبران توان راکتیو و تا حدی تثبیت ولتاژ در فرکانس پایه را برعهده دارد. زمانی که این جبران کننده به طور موازی با کوره قوس الکتریکی متصل گردد، سوسپتانس قابل کنترل با تولید و یا جذب توان راکتیو، سعی می‌کند تا حد ممکن ترکیب توان راکتیو کوره و جبران کننده را ثابت نگاه دارد. در سیستمی که جبران توان راکتیو با TCR انجام می‌شود، معمولاً این مقدار ثابت توان راکتیو با حداکثر پیک‌های تکراری توان راکتیو کوره برابر است. در TCR با تغییر زاویه آتش تایریستورها می‌توان اندوکتانس مؤثر را تغییر داد. اگر تایریستورها دقیقاً در لحظه پیک ولتاژ تغذیه، آتش شوند، آنگاه آنها به طور کامل هدایت خواهند کرد. جریان TCR اساساً راکتیو بوده که از ولتاژ آن، تقریباً 90 درجه عقب‌تر است. این جریان، به واسطه تلفات راکتور (که ممکن است 0.5 تا 2 درصد توان راکتیو باشد) دارای مؤلفه‌ای کوچک و هم‌فاز با ولتاژ خواهد بود. آرایش کلی جبران کننده TCR که به یک کوره قوس الکتریکی اعمال شده، در شکل (۲) آورده شده است. همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، همواره با این

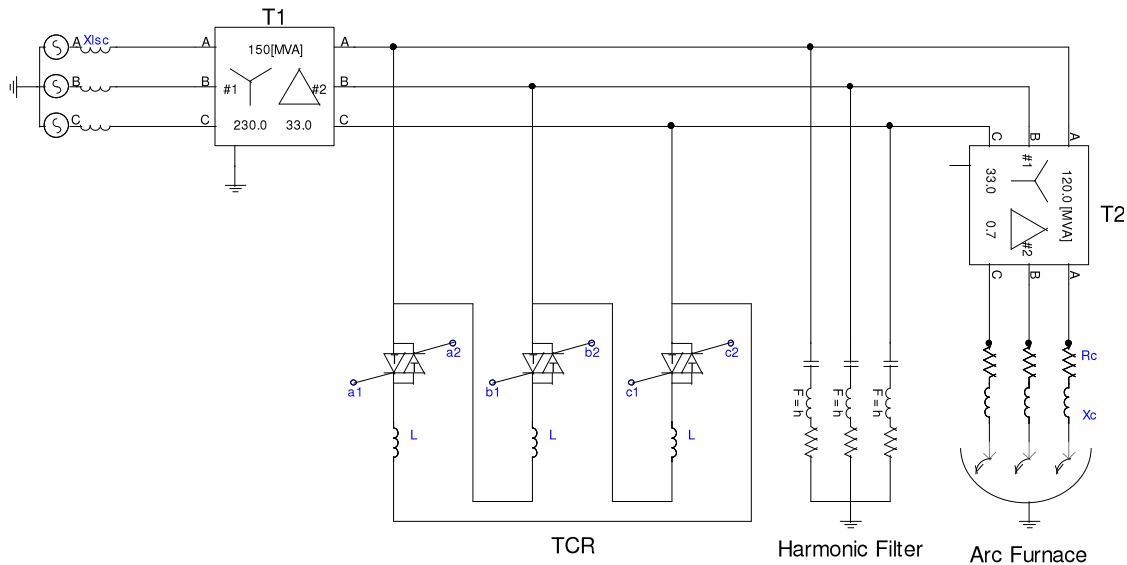
جبران کننده‌های TCR، از فیلترهای هارمونیک نیز استفاده می‌شود که در ادامه، لزوم وجود این فیلترها را تشریح خواهیم کرد. برای کنترل TCR از ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC) و جریان بار (I_L) نمونه برداری می‌شوند. پس از عبور این سیگنال‌ها از فیلتر پایین‌گذر، تصمیم‌گیری زاویه آتش تایریستورها بر اساس هارمونیک اول ولتاژ و جریان صورت می‌پذیرد. بنابراین سایر هارمونیک‌های احتمالی موجود در ولتاژ و جریان بار هیچگونه تأثیری بر تصمیم‌گیری ندارند. در این روش، خازن‌های ثابت براساس حداکثر توان راکتیو مورد نیاز کوره، طراحی می‌گردند و تفاوت بین توان راکتیو تولید شده توسط خازن‌ها و توان راکتیو مورد نیاز بار، به وسیله TCR جذب می‌شود. به عبارت دیگر،

$$Q_{TCR} = Q_C - Q_L \quad (3)$$

که در این رابطه Q_C توان راکتیو تولید شده توسط خازن‌ها و Q_L توان راکتیو جذب شده توسط بار است و از طرف دیگر:

$$Q_{TCR} = \frac{V_{PCC}^2}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (4)$$

که در این رابطه، L اندوکتانس TCR، ولتاژ V_{PCC} ولتاژ باس PCC و ω فرکانس زاویه‌ای مینا و α نیز زاویه آتش تایریستورها می‌باشد. با توجه به اینکه تصمیم‌گیری در TCR، بر پایه هارمونیک اصلی است و برای محاسبه Q در هارمونیک اصلی، حداقل به نیم‌سیکل زمان احتیاج است، لذا حداقل نیم‌سیکل در تصمیم‌گیری تأخیر ایجاد می‌شود. علت این تأخیر آن است که اساساً Q یک کمیت متوسط در طول یک پریود کامل می‌باشد.



شکل (۲): آرایش کلی جبران کننده TCR متصل به کوره قوس الکتریکی

Fig. (2): The general arrangement of the TCR compensator connected to an arc furnace

TCR می‌باشند که،

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (6)$$

بنابراین، مقدار مؤثر هارمونیک‌های جریان TCR از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_n = \frac{2V_{PCC}}{\pi\omega L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + 2\cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (7)$$

مشاهده می‌شود که دامنه هارمونیک جریان به α نیز بستگی دارد. برای هارمونیک اول جریان داریم:

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi\omega L} V_{PCC} \quad (8)$$

برای سیستم سه فاز، ترکیب شکل (۲) که در آن سه TCR تک‌فاز به صورت مثلث بسته شده‌اند ترجیح داده می‌شود. وقتی سیستم متقارن باشد، تمامی هارمونیک‌های مضرب سه، در اتصال مثلث بسته، به گردش در می‌آیند و بالطبع این هارمونیک‌ها از جریان‌های خط، حذف می‌گردند. در نتیجه نیاز است تا فیلترهای هارمونیک‌های 2، 4 و 5 نیز در این سیستم به کار روند.

۵- طراحی فیلترهای هارمونیک

همانطور که گفته شد، همواره جریان جبران کننده TCR به صورت پس‌فاز است. بنابراین تنها قادر به جذب توان راکتیو می‌باشد. در صورتیکه به موازات این جبران کننده از خازن‌های موازی استفاده شود، سیستم جبران، قادر است توان راکتیو نیز تولید کند (مطابق شکل ۲). بدین منظور در این قسمت به جای استفاده از خازن‌های ثابت، از فیلترهای میان‌گذر LC سری برای فرکانس‌های معین استفاده شده است. این نوع فیلترها، ضمن آنکه در فرکانس هم‌نویایی خود، نقش حذف هارمونیک‌ها را بر عهده دارند؛ در فرکانس شبکه نیز مشخصه خازنی داشته و مانند خازن ثابت، توان راکتیو به سیستم تزریق می‌کنند. از طرفی این فیلترها جریان‌های هارمونیک تولید شده توسط TCR را فیلتر نموده و از عبور آن‌ها به سیستم خارجی ممانعت می‌نمایند. در یک فیلتر LC سری، میزان راکتانس خازنی و سلفی به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۲]:

$$h^2 = \frac{X_C}{X_L} \Rightarrow X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (9)$$

$$X_C = \frac{(V_{L-L})^2}{M \text{var}_{3\text{-phase}}} \quad (10)$$

که در این روابط، مقدار h مرتبه هارمونیک مورد نظر به منظور حذف آن می‌باشد. راکتانس‌های X_L و X_C نیز به ترتیب راکتانس خازنی و راکتانس سلفی فیلتر است. همچنین V_{L-L} ، ولتاژ نامی بانک خازنی و $M \text{var}_{3\text{-phase}}$ ، مگاوار نامی بانک خازنی است. بنابراین می‌توان مگاوار خروجی هر فیلتر را از رابطه زیر به دست آورد [۱۲]:

$$M \text{var}_{\text{filter}} = \frac{(V_{L-L})^2}{X_C - X_L} \quad (11)$$

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

از آن گذشته، بعد از مشخص شدن Q_{TCR} و مشخص شدن α ، لازم است برای رسیدن به آن Q و با کمک روابط (۳) و (۴)، اعمال α در هر نیم‌سیکل، فقط یک‌بار امکان‌پذیر خواهد بود. به عبارتی، باید صبر کرد تا زمان اعمال α فرا رسد که این زمان، بین صفر تا نیم سیکل می‌باشد. پس در مجموع می‌توان گفت که بین نیم تا یک سیکل کامل، تأخیر در تصمیم‌گیری وجود دارد.

با این توضیحات می‌توان مراحل کنترل جبران کننده به صورت زیر طراحی نمود:

(۱) اندازه‌گیری 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 می‌شود.

(۳) سومین مرحله، جریان راکتیو (یا ادمیتانس) کنورتور زاویه آتش است. در این مرحله با اجرایی کردن رابطه ریاضی میان دامنه مؤلفه اصلی جریان TCR از طریق یک مدار همزمان، تأمین می‌شود. با این توضیحات، در این مقاله یک "جدول قابل مراجعه" دیجیتال برای جریان نرمال شده جبران کننده 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 می‌گردد.

(۴) در چهارمین مرحله، مؤلفه اصلی جریان مورد نیاز راکتور، از کل جریان درخواستی که با $I_{Q_{ref}}$ مشخص می‌شود، محاسبه می‌گردد. این پارامتر، برابر جمع جریان‌های خازن ثابت و TCR می‌باشد. در این راستا، پلاریته مثبت $I_{Q_{ref}}$ به معنی جریان خروجی القایی و پلاریته منفی به معنی جریان خروجی خازنی است.

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

لازم به ذکر است به منظور افزایش سرعت جبران کننده، هر تریستور به طور جداگانه کنترل می‌شود. به این ترتیب میزان تأخیر در پاسخ جبران کننده نیز کاهش می‌یابد.

۴- تحلیل هارمونیک جبران کننده TCR

لازم به ذکر است که حتی اگر بار کوره، هیچ هارمونیک تولید نکند، خود TCR، مولد هارمونیک خواهد بود. پس وجود فیلترهای هارمونیک در کنار TCR الزامی است. بدین منظور، رابطه جریان لحظه‌ای TCR برای نیم‌سیکل به صورت زیر آورده شده است:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V_{PCC}}{\omega L} (\cos\alpha - \cos\omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (5)$$

که در این رابطه، α زاویه آتش و σ زاویه هدایت تریستورهای

۶- نتایج شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی سیستم ارائه شده در شکل (۱)، مقادیر زیر برای سیستم قدرت در نظر گرفته شده‌اند:

$$X_{isc} = 9.425\Omega, X_c = 424.413\Omega \quad (12)$$

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

برای مدل کردن بار کوره بر اساس مدل هذلولی-نمایی و با توجه به رابطه (۱)، مقادیر زیر جایگزین شده‌اند:

$$V_{at} = 200V$$

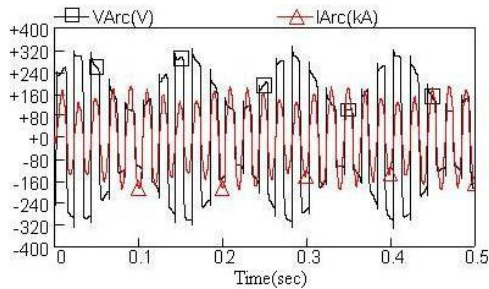
$$C = 190000W \quad (13)$$

$$D = 5000A$$

$$\tau = 10kA$$

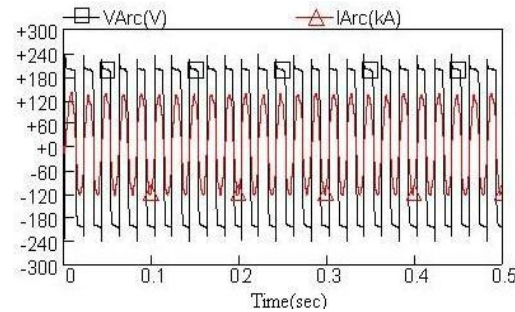
که با این مقادیر، منحنی‌های ولتاژ و جریان کوره در شکل (۳) و مشخصه ولتاژ - جریان کوره شکل (۴) نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد که مقدار و مؤثر ولتاژ و جریان، با فرکانس زاویه‌ای 50 رادیان بر ثانیه تغییر می‌کند. از طرفی می‌توان مشاهده نمود که مدل انتخاب شده به خوبی قادر به نشان دادن پدیده هاس کیفیت توان در سیستم قدرت می‌باشد. همچنین می‌تواند حالات مختلف عملکرد کار کوره را نیز نشان دهد. با توجه به سیستم کنترل طراحی شده برای جبران کننده TCR و در نظر گرفتن شکل (۲)، در این مقاله برای طراحی جبران کننده TCR مقدار $L = 0.03H$ در هر شاخه در نظر گرفته شده است. مقادیر توان راکتیو فیلترهای هارمونیک‌های 2، 4 و 5 به ترتیب 45، 45 و 45 مگاوار می‌باشند.



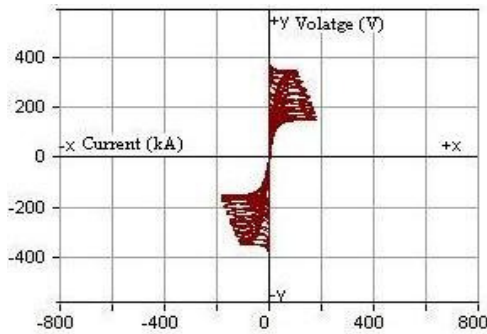
شکل (۵): منحنی ولتاژ و جریان کوره در مدل هذلولی-نمایی با در نظر گرفتن فلیکر ولتاژ

Fig. (5): The current-voltage curve of the furnace in elliptic-exponential model considering the voltage flicker



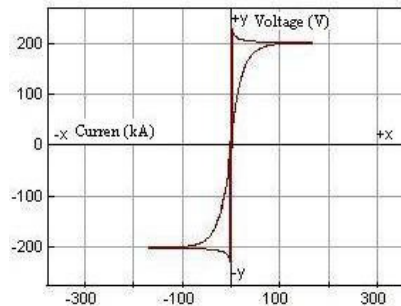
شکل (۳): منحنی ولتاژ و جریان کوره در مدل هذلولی-نمایی

Fig. (3): The current and voltage curve of the furnace in the elliptic-exponential model



شکل (۶): مشخصه ولتاژ - جریان کوره در مدل هذلولی-نمایی با در نظر گرفتن فلیکر سینوسی

Fig. (6): The current-voltage characteristics of the furnace in elliptic-exponential model with sinusoidal flicker



شکل (۴): مشخصه ولتاژ - جریان کوره در مدل هذلولی-نمایی

Fig. (4): The voltage- current characteristics of the furnace in the elliptic-exponential model

همچنین برای بررسی فلیکر ولتاژ برای بار کوره و با توجه به رابطه (۲) مقادیر زیر جایگزین شده‌اند:

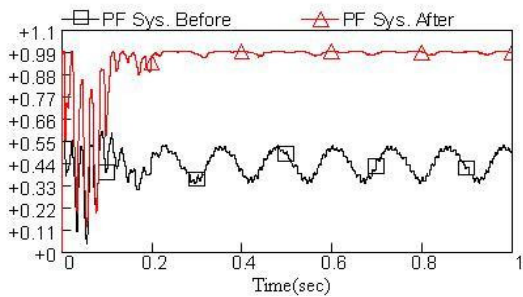
$$V_{ato1} = V_{ato2} = V_{ato3} = 200V$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = 0,5 \quad (14)$$

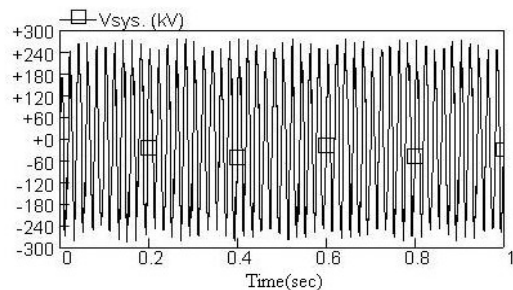
$$\omega_f = 50 \text{ rad/sec}$$

که با این مقادیر، شکل (۵) منحنی ولتاژ و جریان کوره را با اعمال فلیکر سینوسی نشان می‌دهد. همچنین مشخصه ولتاژ-جریان کوره با این فلیکر در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به این دو شکل

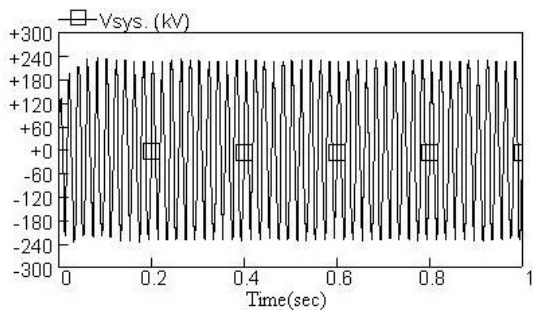
با این مقادیر و با توجه به روابط (۹) و (۱۰)، منحنی جریان TCR در شکل (۷) آورده شده است. به علاوه منحنی‌های توان راکتیو بار و توان راکتیو TCR به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. (در اینجا منظور از بار، کوره به اضافه فیلترها می‌باشد که به همین دلیل توان راکتیو بار در اینجا منفی می‌باشد). همچنین می‌توان منحنی مجموع توان راکتیو بار و TCR را در شکل (۱۰) مشاهده کرد که در این شکل مجموع توان راکتیو بار و TCR پس از طی حالت گذرا به طور بسیار مطلوبی ثابت شده است. از طرفی منحنی مربوط به ضریب توان سیستم قدرت در باس اصلی نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از طرفی شکل (۱۲) و (۱۳) نشان دهنده ولتاژ باس PCC



شکل (۱۱): منحنی ضریب توان قبل و بعد از حضور TCR
Fig. (11): The power factor curve before and in the presence of TCR



شکل (۱۲): منحنی ولتاژ فاز a در طرف ثانویه باس PCC بدون جبران کننده TCR
Fig. (12): The voltage phase a curve in the secondary of PCC bus without TCR compensator

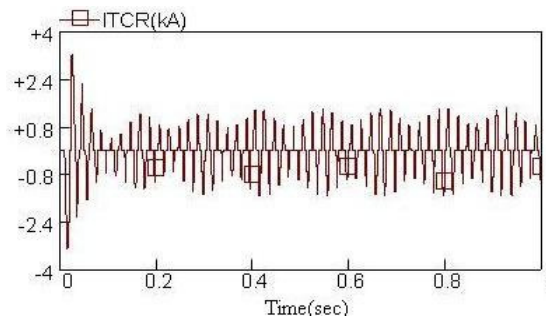


شکل (۱۳): منحنی ولتاژ فاز a در طرف ثانویه باس PCC با وجود جبران کننده TCR
Fig. (13): The voltage phase a curve in the secondary bus PCC in the presence of TCR compensator

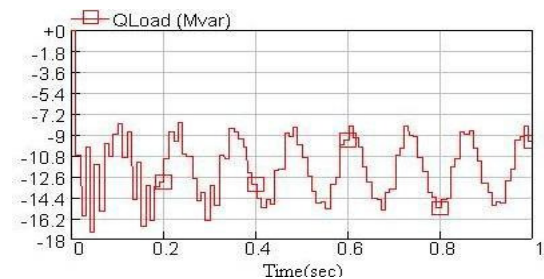
۶-۱- ارزیابی تحلیل نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی را می توان به صورت زیر مورد ارزیابی و تحلیل قرارداد:
۱- با توجه به نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که مدل طراحی شده به خوبی توانسته است حالات مختلف بار و پدیده های کیفیت توان را در سیستم قدرت مورد مطالعه قرار دهد. همچنین با ایجاد فلیکر ولتاژ در مدل بار کوره، میزان مؤثر ولتاژ و جریان کوره متناسب با فلیکر ایجاد شده تغییر می کند. لذا این مدل به راحتی می تواند در سیستم مورد مطالعه با دقت مناسب، حالات مختلف بار را ایجاد نماید.
۲- با توجه به شکل (۸) مشاهده می شود زمانی که جبران کننده در سیستم وجود ندارد، توان راکتیو سیستم، توان راکتیو بار کوره را دنبال

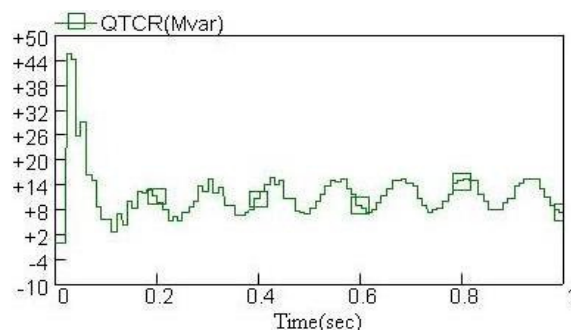
به ترتیب قبل و بعد از اعمال TCR است که با توجه به منحنی ها مشاهده می شود که TCR به میزان خوبی می تواند اثرات فلیکر سینوسی را جبران کند.



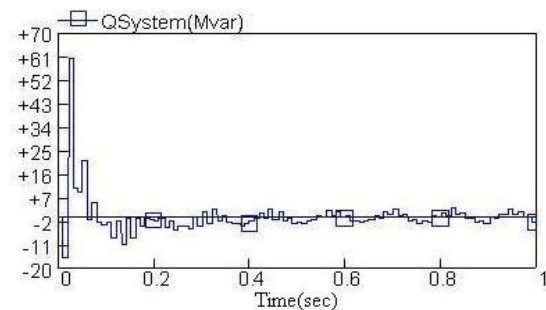
شکل (۷): منحنی جریان جبران کننده TCR
Fig. (7): The TCR compensator current curve



شکل (۸): منحنی توان راکتیو بار کوره
Fig. (8): The reactive power of the furnace load



شکل (۹): منحنی توان راکتیو جبران کننده TCR
Fig. (9): The reactive power of the TCR compensator



شکل (۱۰): منحنی مجموع توان راکتیو بار کوره و جبران کننده TCR
Fig. (10): The sum of reactive power of the furnace and TCR compensator

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک مدل بهینه برای بار کوره ارائه گردید که علاوه بر ساده بودن، نیاز به هیچ شرایط اولیه‌ای نمی‌باشد. سپس اثر فلیکر ولتاژ به صورت تغییرات سینوسی بر روی این مدل پیاده شد. همچنین با توجه به نیاز جبران کننده در کوره‌های قوس الکتریکی، یک جبران کننده راکتور تایریستور کنترل (TCR) به صورت موازی طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با کمک این جبران کننده، توان راکتور کل سیستم، تا حد بسیار مطلوبی ثابت نگاه داشته می‌شود و به میزان مناسبی، نوسانات ولتاژ باس PCC نیز کم گردید. استفاده از این مدل با جبران‌سازی، می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی به واسطه شناسایی مشخصه ولتاژ- جریان قوس الکتریکی کمک نماید. همچنین این مدل با جبران سازی TCR، قابلیت تحلیل هارمونیک در سیستم‌های قدرت با وجود کوره‌های قوس الکتریکی را دارا می‌باشد.

پی نوشت:

- 1- Thyristor Switched Capacitor (TSC)
- 2- Thyristor Switched Reactor (TSR)
- 3- Thyristor Controlled Reactor (TCR)
- 4- Point of Common Coupling (PCC)
- 5-Look-up Table

می‌کند. همچنین در این زمان، ضریب توان نیز در حدود 0.45 با توجه به فلیکر ولتاژ نوسان می‌کند و این باعث خرابی کیفیت توان در سیستم قدرت می‌گردد. زمانی که جبران کننده به سیستم وارد می‌شود (شکل (۱۰)) مشاهده می‌گردد توان رکتیو در حدود صفر با دامنه قابل توجهی نوسان می‌کند. این جبران کننده نسبتاً توانسته است که ضریب توان را بهبود دهد ولی همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ جبران کننده دارای تأخیری در حدود نیم سیکل می‌باشد.

۳- با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد زمانی که جبران کننده TRC/FC در سیستم قرار می‌گیرد فلیکر کاهش پیدا می‌کند و نوسانات ولتاژ در باس اصلی سیستم حذف می‌شود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در این مقاله می‌توان مزایای این جبران کننده را به صورت زیر نوشت:

- ۱- میانگین زمان پاسخ در حدود نیم پریود است.
 - ۲- جبران در هر فاز، قابل پیاده‌سازی است.
 - ۳- می‌توان به جای راکتور از ترانسفورماتوری استفاده کرد که دارای امپدانس اتصال کوتاه بالایی باشد. بنابراین، احتیاج به یک ترانسفورماتور میانی که در TSC نیاز است، نخواهد بود.
- البته بالا بودن تلفات این جبران کننده نسبت به TSC و TSR و تولید هارمونیک جریان از معایب این جبران کننده می‌باشد.

مراجع

- [1] J.G. Mayordomo, L.F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, "A new frequency domain arc furnace model for iterative harmonic analysis", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.12, No.4, pp.1771-1778, 1997.
- [2] L.F. Beites, J.G. Mayordomo, A. Hernandez, R. Asensi, "Harmonics, inter harmonic, unbalances of arc furnaces: A new frequency domain approach", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.16, No.4, pp.661-668, 2001.
- [3] R. Hooshmand, M. Bangad, M. Torabian Esfahani, "A new time domain model for electric arc furnace", *J. of Elec. Engi. (JEEEC)*, Vol.59, No.4, pp.195-202, 2008.
- [4] I. Vervenne, K. Van Reusel, R. Belmans, "Electric arc furnace modeling from a "Power Quality" point of view" *IEEE/ICEPQU*, pp.1-6, 2007.
- [5] The Harmonics Working Groups, IEEE/ PES /T&D Committee, "Modeling devices with nonlinear voltage-current characteristic for harmonic studies", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.19, No.4, pp.1802-1811, 2004.
- [6] H. Mphktari, M. Hejri, "A new three phase time-domain model for electric arc furnaces using MATLAB", *IEEE/PES*, Vol.3, pp.2078-2083, 2002.
- [7] M. Anxo Prieto Alonso, Manuel Perez Donsion, "An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.9, No.1, Jan. 2004.
- [8] B. Novo Ramos, L. de Castro Parga, "An EMTP study of flicker generation and transmission in power system due to the operation of an ac electric arc furnace", *IEEE/ICHQP*, Vol.3, pp.942-947, Orlando, 2000.
- [9] M. Parniani, H. Mokhtari, M. Hejri, "Effects of dynamic reactive compensation in arc furnace operation characteristics and its economic benefits", *IEEE/PES*, Vol.2, pp.1044-1049, Oct. 2002.
- [10] A. Garcia, P. Garcia, R. Collantes, "Comparison of thyristor-controlled reactors and voltage-source inverters for compensayion of flicker caused by arc furnace", *IEEE Trans. on Pow. Deli.*, Vol.15, No.4, pp.1225-1231, 2000.
- [11] B. Depormmier, J. Stanley, "Static var compensator upgrade in a steel mill", *IEEE/PES*, Vol.1, pp.362-365, July 2003.
- [12] D. Andrews, T. Bishop, F. Witte, "Harmonic measurements, analysis, and power factor correction in a modern steel manufacturing facility", *IEEE/IAS*, Vol.3, pp.2021-2029, Denver, Oct. 1994.