

مدل جدیدی از کوره‌های قوس الکتریکی بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی به منظور مطالعات کیفیت توان

جواد مؤمن پور آکردی^۱، کارشناسی ارشد؛ مهدی ترابیان اصفهانی^۲، محقق پسا دکتری؛ بهروز وحیدی^۳، استاد

۱- دانشکده‌ی مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- javad.momenpour@yahoo.com

۲- دانشکده‌ی مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- torabian_mehdi@yahoo.com

۳- دانشکده‌ی مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- vahidi@aut.ac.ir

چکیده: کوره‌های قوس الکتریکی بارهای غیرخطی و متغیربازمان هستند که باعث نوسانات شدید جریان، هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، فلیکر ولتاژ، تغییرات فرکانس و غیره می‌شوند. از طرفی این کوره‌ها، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی انرژی در شبکه‌های قدرت می‌باشند. بنابراین لازم است مدلی نزدیک به واقعیت عملکرد قوس، برای تحلیل عملکرد این گونه بارها ارائه گردد تا مطالعات کیفیت توان، طراحی جبران‌کننده‌های توان راکتیو و تحلیل اثرات این بارها را بر روی کوره‌های قوس الکتریکی به‌درستی انجام داد. در این مقاله مدل جدیدی برای کوره‌های قوس الکتریکی بر مبنای اندازه‌گیری واقعی از کوره‌های قوس مجتمع فولاد مبارکه ارائه می‌شود. این مدل اثرات کلیه‌ی المان‌های کوره‌های قوس نظیر اثرات ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان، کابل‌های انعطاف‌پذیر و ترانسفورماتور کوره را برای مدل‌سازی در نظر می‌گیرد. به‌این ترتیب این مدل قابلیت ایجاد پارامترهای مختلف کیفیت توان را دارا است و می‌تواند در طراحی دقیق جبران‌کننده‌های توان راکتیو کوره‌های قوس، بسیار مفید باشد. مدل پیشنهادی با یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های موجود به نام مدل کسی-مایر مقایسه می‌گردد. نتایج مقایسه، دقت و صحت عملکرد مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کوره‌های قوس الکتریکی، داده‌های اندازه‌گیری، کیفیت توان، مدل‌سازی.

A New Model of Electric Arc Furnace Based on Actual Measurements for Power Quality Studies

Javad Momenpour Akerdi¹, MSc; Mahdi Torabian Esfahani², Post Doc. Research Fellow; Behrooz Vahidi³, Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: javad.momenpour@yahoo.com

2- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: torabian_mehdi@yahoo.com

3- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: vahidi@aut.ac.ir

Abstract: Electric arc furnaces are nonlinear and time variant loads that cause high fluctuations of current, voltage and current harmonics, voltage flicker, frequency variations, and so on. On the other hand, these furnaces are the huge energy consumer in power networks. Therefore, it is necessary to present a precise and actual model for analyzing the performance of these loads so that power quality studies, design of reactive power compensators and analysis of the effects of these loads on electric arc furnaces can be done correctly. In this paper, a new model for electric arc furnaces is proposed based on actual measurements of Mobarakeh steel company's arc furnaces. This model considers the effects of all elements of arc furnaces, such as the effects of voltage and current transformers, flexible cables, and furnace transformers for modeling. In this way, this model is capable of generating various power quality parameters and can be very useful in the accurate design of reactive power compensators for arc furnaces. The proposed model is compared with one of the most commonly used models, called Cassie-Mayer. The results of the comparison show the accuracy and validity of the proposed model.

Keywords: Electric arc furnaces, measured data, power quality, modeling.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۵ و ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

نام نویسنده مسئول: بهروز وحیدی

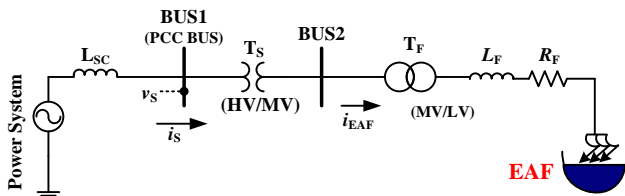
نشانی نویسنده مسئول: دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۱- مقدمه

در این مقاله مدلی جدید بر پایه‌ی اندازه‌گیری واقعی از کوره‌های قوس الکتریکی بیان می‌شود. لذا بر اساس نمونه‌های واقعی اندازه‌گیری شده از یک قوس الکتریکی در چندین سیکل عملکردی کوره، نقاط کار مختلفی در نواحی مختلف تولید می‌شود. پس از این مرحله مدل قوس به صورت یک منبع جریان وابسته به ولتاژ (که مقدار جریان دو سر آن با ولتاژ ورودی کوره در ارتباط است) طراحی می‌گردد. لذا، مدل پیشنهادی مطابق با حالت واقعی می‌باشد. این مدل می‌تواند به خوبی کلیه تغییرات ایجاد شده توسط کوره قوس را در سیستم قدرت پیاده نماید. به منظور اطمینان از عملکرد مدل طراحی شده، این مدل با نمونه‌های واقعی و مدل گسی-مایر مقایسه می‌گردد. سپس به بررسی تاثیرات عملکرد کار کوره بر روی سیستم قدرت پرداخته می‌شود. شایان ذکر است مقادیر المان‌های شبکه قدرت و داده‌های اندازه‌گیری، مقادیر موجود در شرکت فولاد مبارکه استفاده شده است. این شرکت دارای ۸ کوره قوس الکتریکی است که یکی از بارهای بزرگ در سیستم قدرت محسوب می‌شود.

۲- مدل سازی سیستم قدرت با کوره‌ی قوس الکتریکی

به منظور مدل سازی روش پیشنهادی بایستی سیستم تغذیه‌ی کوره‌ی قوس در حالت واقعی مدل سازی شود. به این منظور شکل ۱ دیاگرام تک خطی سیستم تغذیه‌ی یک کوره‌ی قوس را نشان می‌دهد. در این شکل، باس ۱ بیانگر نقطه‌ی اتصال مشترک^۱ (باس PCC) می‌باشد که در حقیقت، باس تغذیه کننده‌ی اصلی ترانسفورماتور کوره می‌باشد. همچنین باس ۲، باس کوره می‌باشد. برای تغییر دادن توان اکتیو ورودی کوره قوس از ترانسفورماتور T_F (MV/LV) استفاده می‌شود. این ترانسفورماتور دارای سیم پیچ ثانویه متغیر (تپ‌چنجر) می‌باشد که می‌توان با تغییر دادن آن، ولتاژ کوره را تغییر داد. کوره توسط ترانسفورماتور T_S (HV/MV) به باس PCC وصل شده است. در این شکل، L_F و R_F به ترتیب مقادیر اندوکتانس و مقاومت کابل متصل کننده‌ی ترانسفورماتور کوره به الکترودهای کوره و بازوهای متصل به الکترودها می‌باشد. همچنین L_{SC} اندوکتانس اتصال کوتاه در باس PCC می‌باشد.



شکل ۱: نمای کلی سیستم تغذیه‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی

به منظور برداشت داده‌های ولتاژ و جریان قوس از یک دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ-جریان در باس ۲ استفاده شده است. نرخ برداشت اطلاعات در حدود ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد. لازم به ذکر است دریافت اطلاعات حداکثر در ۳۰ سیکل کافی می‌باشد. پس از دریافت اطلاعات، کوره قوس الکتریکی به صورت یک منبع جریان کنترل شده با ولتاژ

کوره‌های قوس الکتریکی بزرگ‌ترین بارهای الکتریکی متمرکز در شبکه‌های قدرت هستند. تغییرات شدید و سریع ولتاژ شین این کوره‌ها نامتعادل بوده و دارای نوسانات شدیدی می‌باشد. علاوه بر این، کوره‌های قوس الکتریکی باعث خرابی کیفیت توان، ایجاد فلیکر ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ و جریان و هارمونیک‌های زوج و فرد و ایجاد اینترهارمونیک در سیستم قدرت می‌گردند. به منظور مطالعه در این زمینه و بهبود پارامترهای فوق می‌بایست سیستم قدرت با کوره‌ی قوس الکتریکی به طور کامل و دقیق طراحی گردد. بنابراین لازم است مدل مناسبی برای کوره قوس الکتریکی در نظر گرفته شود تا بتواند حالات مختلف عملکرد کوره را به درستی نشان دهد. از طرف دیگر قوس الکتریکی کاربردهای دیگری نظیر روشنایی، ذوب فلزات و جوشکاری در صنعت دارد. ضمناً قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت و فیوزها پیش می‌آید و شناخت مشخصات قوس به دلایل بالا لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، مدل‌های متعددی برای قوس الکتریکی پیشنهاد شده است [۷-۱۱].

برخی از این مدل‌ها بر اساس خطی سازی معادله‌ی مشخصه استوارند [۱، ۲]. این نوع مدل‌ها بیش تر به منظور تحلیل هارمونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی دیگر از این مدل‌ها بر پایه‌ی معادلات دیفرانسیل در حوزه فرکانس می‌باشند که این مدل‌ها نیاز به شرایط اولیه‌ی خاص دارند [۳]. دسته‌ای دیگر از مدل‌ها مبتنی بر حوزه‌ی فرکانس هستند که این دسته اکثراً برای مطالعات هارمونیک شبکه کاربرد دارند. همچنین در این گونه مدل‌ها به دلیل اینکه مدل تطابق مطلوبی با حالت واقعی ندارد، بررسی سیستم قدرت در شرایط واقعی بسیار مشکل است [۴، ۵]. مدل‌هایی نیز بر اساس ساختار مدارات بی‌نظمی وجود دارند که این مدل‌ها بیش تر برای محاسبه‌ی فلیکر ولتاژ مناسباند [۶، ۷]. یکی دیگر از مدل‌های قوس الکتریکی، مدل گسی-مایر است که می‌تواند با انتخاب مناسب پارامترهای مختلف قوس الکتریکی را به خوبی مدل نماید [۸].

در هر صورت از مهم‌ترین مزیت‌های یک مدل قوس، سادگی به کارگیری جهت شبیه سازی و عدم تقریب زیاد می‌باشد. در این راستا، این مقاله بر پایه‌ی مشخصه‌ی ولتاژ-جریان قوس مدل مناسبی را بیان می‌کند که اولاً این مدل قادر به بیان رفتار اکثر مدل‌های موجود می‌باشد و ثانیاً می‌تواند حالات مختلف بار کوره را در سیستم قدرت ایجاد نماید که تطابق مطلوبی با حالت واقعی دارد.

مدل‌هایی که برای کوره‌های قوس تاکنون ارائه شده‌اند، قادر نیستند رفتار این کوره‌ها را به نحو مطلوبی پوشش دهند. برخی از آن‌ها حتی حالات تصادفی قوس را به درستی مدل نمی‌کنند. همچنین اغلب این مدل‌ها بر اساس یک رابطه‌ی ریاضی مشخص قوس الکتریکی را مدل کرده‌اند، در نتیجه مشخصه‌ی قوس در یک چهارچوب کاملاً معینی قرار می‌گیرد که با رفتار غیرقابل پیش‌بینی قوس در تضاد است. بنابراین لازم است مدل مناسبی برای تحلیل کوره‌های قوس بیان گردد که طبیعت تصادفی قوس را بتواند بررسی کند و با حالت واقعی تطابق مطلوبی داشته باشد.

در شرایط پایدار وقتی جریان و ولتاژ خیلی آرام تغییر کند $vi = P_0$ از این رو مشخصه حالت پایدار قوس به صورت هیپربولیک می‌باشد، که برای رفتار قوس در جریان‌های کم مناسب است.

با توجه به رفتار و عملکرد مدل‌های گسی و مایر، با ترکیب این دو مدل می‌توان یک مدل دقیق برای قوس الکتریکی به دست آورد. برای حل این معادلات، از روش‌های نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. بدین منظور، برای راحتی در محاسبات و همگرایی این روش‌ها، به جای مقاومت قوس از رسانایی قوس استفاده شده است. بدین ترتیب، روابط گسی و مایر به صورت رابطه‌ی (۳) و (۴) تغییر می‌کنند.

$$G = \frac{vi}{E_0^2} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (3)$$

$$G = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (4)$$

رابطه‌ی (۳) مربوط به معادله‌ی گسی و رابطه‌ی (۴) مربوط به معادله‌ی مایر می‌باشد. برای ترکیب این دو معادله، جریان انتقال I_0 به گونه‌ای تعریف می‌شود که رسانایی قوس به صورت رابطه‌ی (۵) بیان شود.

$$\begin{cases} G = \frac{vi}{E_0^2} - \theta \frac{dG}{dt} & i > I_0 \\ G = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} & i < I_0 \end{cases} \quad (5)$$

بنابراین برای رسانایی قوس ضریب انتقال $o(i)$ به صورت رابطه‌ی (۶) تعریف می‌شود.

$$G = [1 - o(i)]G_c + o(i)G_m \quad (6)$$

G_m و G_c به ترتیب رسانایی داده‌شده در روابط (۳) و (۴) می‌باشند. فاکتور انتقال $o(i)$ بین صفر و یک تغییر می‌کند. زمانی که جریان قوس افزایش می‌یابد، $o(i)$ به سمت صفر میل می‌کند. با توجه به این مطلب می‌توان $o(i)$ را به صورت رابطه‌ی (۷) بیان نمود.

$$o = \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \quad (7)$$

زمانی که جریان قوس کوچک است، مقدار o برابر یک می‌باشد و رسانایی قوس از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید. همچنین در حالتی که جریان قوس بزرگ باشد، o آن قدر کوچک می‌شود که قابل چشم‌پوشی است و رسانایی قوس از رابطه‌ی (۳) محاسبه خواهد شد. برای دقت در مدل‌سازی قوس، رسانایی کوچک و ثابتی که بین الکترودها وجود دارد نیز در نظر گرفته می‌شود. این رسانایی به فاصله بین الکترودها، موقعیت الکترودها، نوع گاز و دمای آن بستگی دارد و با G_{min} نشان داده شده است. بنابراین، مدل کامل ارائه‌شده برای قوس الکتریکی به صورت زیر می‌باشد.

$$G = G_{min} + [1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)] \frac{vi}{E_0^2} + [\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)] \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (8)$$

در حالت کلی پارامتر θ باید مانند پارامتر جریان قوس رفتار کند؛ زیرا زمانی که قوس الکتریکی روشن یا خاموش می‌شود انرژی ذخیره‌شده در

پیاده‌سازی می‌شود. علت انتخاب باس شماره‌ی ۲ به عنوان محل اندازه‌گیری، سهولت اندازه‌گیری در این باس نسبت به پایانه‌های ثانویه ی ترانسفورماتور کوره می‌باشد. به علاوه با انتخاب این محل، المان‌های مختلف نظیر کابل‌های انعطاف‌پذیر، شینه‌های موجود و ترانسفورماتور کوره نیز در مدل‌سازی لحاظ می‌شوند. به این ترتیب می‌توان کلیه پارامترهای کیفیت توان را به صورت واقعی در سیستم، پیاده‌سازی نمود. در مدل‌های موجود تلاش شده است مدلی ارائه گردد که بتواند رفتار قوس الکتریکی را در شبکه قدرت به خوبی مدل نماید ولی در اکثر آنها خطاهای زیادی در مطالعه‌ی سیستم قدرت ایجاد شده است. در ادامه ابتدا مدل گسی-مایر بررسی شده و سپس مدل پیشنهادی بیان می‌گردد.

۲-۱- مدل گسی-مایر [۸]

از چندین سال قبل، استفاده از معادلات دیفرانسیل گسی و مایر در مدل‌سازی رفتار کوره‌ی قوس الکتریکی با توجه به مکانیسم توان تلفاتی و انرژی ذخیره‌شده در ستون قوس رواج یافته است. هدف در این قسمت ترکیب دو معادله دیفرانسیل مذکور به منظور بیان دقیق رفتار دینامیکی قوس الکتریکی می‌باشد.

در مدل گسی، شدت جریان الکتریکی ثابت فرض می‌شود و سطح مقطع قوس الکتریکی با شدت جریان الکتریکی تغییر می‌کند. با ثابت فرض نمودن جریان، مقاومت قوس و انرژی ذخیره‌شده در واحد حجم قوس نیز ثابت فرض می‌شود. همچنین هوا یا هر گاز دیگر که بین الکترودها وجود دارد حرارت را از قوس به مدار مذاب حمل می‌کند و معرف توان تلف‌شده از قوس می‌باشد. از این رو توان تلف‌شده در واحد حجم نیز با توجه به ثابت بودن سطح مقطع قوس، ثابت است. بنابراین با در نظر گرفتن مقاومت قوس به عنوان متغیر وابسته، معادله‌ی گسی به صورت رابطه‌ی (۱) مطرح می‌گردد.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\theta} \left(1 - \frac{v^2}{E_0^2}\right) \quad (1)$$

در این رابطه E_0 ثابت ولتاژ قوس در حالت پایدار، θ ثابت زمانی قوس (که برابر است با انرژی ذخیره‌شده در واحد حجم، تقسیم بر میزان انرژی تلف‌شده در واحد حجم قوس)، R و v به ترتیب مقاومت و ولتاژ قوس می‌باشد. عیب این مدل این است صرفاً برای بیان قوس الکتریکی بی‌وقفه، کارایی دارد؛ یعنی فقط می‌تواند رفتار قوس را وقتی که روشن است بررسی نماید. به عبارت دیگر این مدل صرفاً برای بیان رفتار قوس الکتریکی در حالتی که جریان زیاد است، نافذ می‌باشد. در مدل مایر، حرارت تلف‌شده، فقط در پیرامون قوس الکتریکی فرض می‌شود و مقاومت قوس با انرژی ذخیره‌شده در آن تغییر می‌کند. بدین ترتیب، معادله مایر به صورت رابطه‌ی (۲) مطرح می‌گردد.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\theta} \left(1 - \frac{vi}{P_0}\right) \quad (2)$$

در این رابطه P_0 ثابت توان تلفاتی می‌باشد و i جریان قوس است.

(۱۱) رابطه‌ای که برای به‌دست آوردن جریان هارمونیک k در نظر گرفته شده است به صورت رابطه‌ی (۱۲) می‌باشد.

$$\Delta I_k = y_{k1} \Delta V_1 + y_{k2} \Delta V_2 + \dots + y_{kj} \Delta V_j + \dots + y_{kK} \Delta V_K \quad (12)$$

بنابراین با جایگذاری هر یک از نمونه‌ها در رابطه‌ی (۱۲)، مجموع مربعات خطا در تخمین جریان هارمونیک k ام، مطابق رابطه‌ی (۱۳) به‌دست می‌آید.

$$E_k = \sum_{n=1}^N \left| \Delta I_{k_n} - (y_{k1} \Delta V_{1_n} + y_{k2} \Delta V_{2_n} + \dots + y_{kj} \Delta V_{j_n} + \dots + y_{kK} \Delta V_{K_n}) \right|^2 \quad (13)$$

که در آن زیروند n نشان‌دهنده‌ی نمونه‌ی n ام نقطه‌ی $(\Delta I_k, \Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_j, \dots, \Delta V_K)$ می‌باشد. با جداکردن ترم‌های حقیقی و مجازی، رابطه‌ی (۱۳) به صورت رابطه‌ی (۱۴) می‌شود.

$$E_k = \sum_{n=1}^N (\text{Re}_{k_n}^2 + \text{Im}_{k_n}^2) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \text{Re}_{k_n} = \text{Re}[\Delta I_{k_n}] - \sum_{j=1}^K (\text{Re}[y_{kj}] \cdot \text{Re}[\Delta V_{j_n}] - \text{Im}[y_{kj}] \cdot \text{Im}[\Delta V_{j_n}]) \\ \text{Im}_{k_n} = \text{Im}[\Delta I_{k_n}] - \sum_{j=1}^K (\text{Im}[y_{kj}] \cdot \text{Re}[\Delta V_{j_n}] + \text{Re}[y_{kj}] \cdot \text{Im}[\Delta V_{j_n}]) \end{cases}$$

بنابراین متغیرهای مجموع مربعات خطای تخمین جریان هارمونیک k ام، ترم‌های حقیقی و موهومی درایه‌های سطر k ام ماتریس Y می‌باشد. چنانچه با استفاده از یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مجموع مربعات خطای تخمین جریان هارمونیک k ام، مینیمم شود، ترم‌های حقیقی و موهومی درایه‌های سطر k ام ماتریس Y معلوم خواهد شد. نهایتاً با ترکیب ترم‌های حقیقی و موهومی هر یک از درایه‌های سطر k ام به‌دست می‌آید. با انجام مراحل مذکور برای هر یک از مراتب هارمونیک، می‌توان درایه‌های هر یک از سطرها را محاسبه کرد و به این ترتیب ماتریس Y مربوط به این بار غیرخطی به‌دست خواهد آمد. روش مذکور به صورت جامع برای مدل‌سازی همه‌ی اقسام بارهای غیرخطی قابل استفاده می‌باشد. در این مقاله از روش مذکور به منظور مدل‌سازی کوره‌های قوس که یکی از اقسام بارهای غیرخطی می‌باشد، استفاده شده است.

۳- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مدل کوره‌ی قوس الکتریکی

پارامترهای انتخابی برای مدار معادل شکل ۱ بر اساس مقادیر واقعی در صنایع فولاد مبارکه به صورت جدول ۱ می‌باشد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود برای بار کوره قوس الکتریکی المان‌هایی نظیر کابل‌های انعطاف‌پذیر، بازوهای نگهدارنده الکترودها محاسبه شده است که بتوان تا حد مطلوب نتایج را به واقعیت نزدیک نمود.

واحد حجم در مقایسه با انرژی تلف‌شده در واحد حجم بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین θ را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۹) بیان کرد.

$$\theta = \theta_0 - \theta_1 \exp(-\alpha|j|) \quad (9)$$

در این رابطه $\alpha > 0$ و $\theta_1 \gg \theta_0$ می‌باشد. زمانی که جریان قوس کوچک است $\theta_1 \approx \theta$ ؛ در حالی که وقتی جریان قوس بزرگ می‌باشد $\theta \approx \theta_0$. در مرجع [۸] آثار پارامترهای مختلف قوس نظیر I_0 ، E_0 و θ بر مشخصه‌ی استاتیکی قوس توضیح داده شده است.

در بین همه‌ی مدل‌هایی که برای کوره‌های قوس ارائه شده است، مدل کسی-مایر نزدیک‌ترین رفتار را به حالت واقعی کوره‌های قوس دارد؛ این مدل قابلیت بیان حالات مختلف قوس الکتریکی را دارد. به همین جهت، در این مقاله از مدل کسی-مایر برای مقایسه با مدل پیشنهادی استفاده شده است.

۲-۲- مدل پیشنهادی برای قوس الکتریکی

در حالت کلی، می‌توان گفت جریان یک بار غیرخطی همواره تابعی از ولتاژ دو سر بار می‌باشد. مطابق رابطه‌ی (۱۰)، در حالت فازوری، جریان هارمونیک مرتبه‌ی k ام، تابعی از ولتاژ اعمال‌شده به بار در همه‌ی مراتب هارمونیک می‌باشد [۹].

$$I_k = f(V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_K) \quad (10)$$

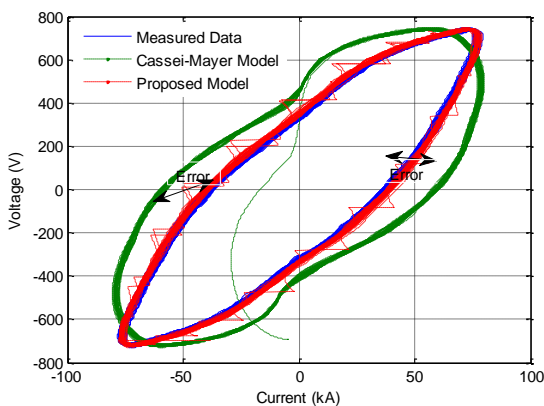
با خطی‌سازی رابطه‌ی (۱۰) حول نقطه‌ی کار مورد بررسی، رابطه‌ی (۱۱) به‌دست خواهد آمد [۱۰].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_K \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1K} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2j} & \dots & y_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{k1} & y_{k2} & \dots & y_{kj} & \dots & y_{kK} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{K1} & y_{K2} & \dots & y_{Kj} & \dots & y_{KK} \end{bmatrix}}_Y \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_j \\ \vdots \\ \Delta V_K \end{bmatrix}}_{\Delta V} + \underbrace{\begin{bmatrix} I_{ref_1} \\ I_{ref_2} \\ \vdots \\ I_{ref_k} \\ \vdots \\ I_{ref_K} \end{bmatrix}}_{I_{ref}} \quad (11)$$

که در آن Y معروف به ماتریس ادمیتانس فرکانس متقاطع^۲ می‌باشد. ΔV_j تفاضل ولتاژ هارمونیک z ام (V_j) از مقدار آن در نقطه‌ی کار ($V_{j,ref}$) می‌باشد و I_{ref_k} جریان هارمونیک k ام نقطه‌ی کار بار می‌باشد. برای به‌دست آوردن درایه‌های ماتریس Y از روش برازش منحنی، به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، استفاده می‌شود. به منظور تعیین هر یک از درایه‌های سطر k ام ماتریس Y ، فرض می‌شود دستگاه‌های اندازه‌گیری تعداد N نمونه از نقاط $(\Delta I_k, \Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_j, \dots, \Delta V_K)$ را ارائه دهند. مطابق رابطه‌ی

و هر یک از هماهنگ‌ها، محاسبه می‌شود. برآیند جریان‌های مؤلفه‌ی اصلی و هر یک از هارمونیک‌ها در حوزهی زمان مربوط به هر سیکل، برای فاز مورد بررسی، جریان آن فاز در آن سیکل می‌باشد. به‌طریق مذکور جریان هر یک از فازها با استفاده از روش پیشنهادی، محاسبه می‌شود.

شکل ۲ منحنی مشخصه ولتاژ-جریان کوره‌ی قوس الکتریکی در باس ۲ را برای فاز A نشان می‌دهد. به‌علت اینکه مشخصه‌ی ولتاژ-جریان دو فاز B و C نیز تقریباً مشابه شکل ۲ است، لذا از آوردن آن‌ها در این مقاله اجتناب شده است. همان‌طور که در این شکل نیز قابل مشاهده است منحنی تغییرات ولتاژ و جریان در مدل کسی-مایر نسبت به مدل پیشنهادی دارای خطای قابل توجهی است در صورتی که این خطا در مدل پیشنهادی بسیار کم بوده و به‌طور مطلوبی داده‌های اندازه‌گیری را دنبال می‌نماید.



شکل ۲: مشخصه ولتاژ-جریان در مدل‌های کسی-مایر و پیشنهادی و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری (فاز A)

منحنی تغییرات جریان در هر یک از فازهای A، B و C در باس ۲ برای مدل کسی-مایر، مدل پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری در شکل ۳-الف، ب و ج آورده شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۳-الف قابل مشاهده است جریان‌ها در مدل کسی-مایر دارای تأخیر زمانی بوده و به‌درستی داده‌های اندازه‌گیری را دنبال نمی‌نماید. یکی از دلایل اصلی این موضوع المان‌های مربوط به کابل‌های انعطاف‌پذیر و بازوی الکترودهاست که با تغییرات حرارتی و جریانی تغییر می‌یابند. در نظر گرفتن پارامترهای تخمینی از پارامترهای کوره در رابطه (۸) یکی دیگر از این دلایل است. در مدل پیشنهادی جریان‌های محاسبه‌شده با دقت بالایی به جریان‌های اندازه‌گیری شده نزدیک هستند. همان‌طور که ذکر شد، از ۲۱ سیکل اول برای تشکیل ماتریس Y هر فاز استفاده شده است؛ لذا مقادیر محاسبه‌شده برای این سیکل‌ها، به میزان بسیار بالایی نزدیک مقادیر اندازه‌گیری شده، شده است؛ اما با وجود اینکه از نمونه‌های سیکل‌های بعد از آن، برای تشکیل ماتریس Y استفاده نشده است، باز هم مقادیر محاسبه‌شده با دقت بالایی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک هستند. این موضوع نشان از دقت بالا و صحت مدل ارائه‌شده در این مقاله دارد. این در حالی است که در مدل کسی-مایر جریان‌ها اولاً دارای تأخیر بوده و ثانیاً عدم تطابق با داده‌های اندازه‌گیری مشهود است که این موضوع

جدول ۱: پارامترهای سیستم قدرت مجتمع فولاد مبارکه

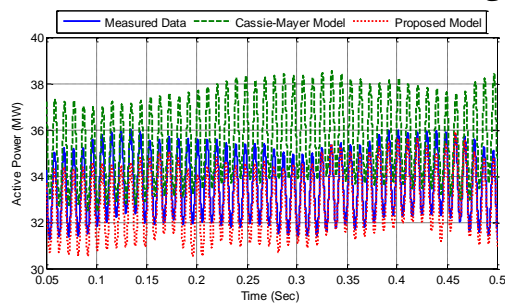
المان	پارامتر
سیستم تغذیه	$S_{sc} = 11000 \text{ MVA}$ $V = 400 \text{ kV}$ $X_{sc} = 14.545$ $f = 50 \text{ Hz}$
ترانسفورماتور T_s	$S_n = 220 \text{ MVA}$ $\frac{400 \text{ kV}}{63 \text{ kV}}$
ترانسفورماتور T_f	$S_n = 140 \text{ MVA}$ $\frac{63 \text{ kV}}{0.95 \text{ kV} - 0.23 \text{ kV}}$
ترانسفورماتور جریان در محل اندازه‌گیری	$S_n = 40 \text{ VA}$ $\frac{1000 \text{ A}}{5 \text{ A}}$
ترانسفورماتور ولتاژ در محل اندازه‌گیری	$S_n = 100 \text{ VA}$ $\frac{63 \text{ kV} / \sqrt{3}}{100 / \sqrt{3}}$
بار کوره‌ی قوس	مقادیر پارامترهای کابل‌های قابل انعطاف: $L_a = 4.0459 \mu\text{H}$, $X_{L_a} = 0.0013 \Omega$ $R_a = 7.1 \mu\Omega$ مقادیر پارامترهای بازوها: $L_a = 3.32 \mu\text{H}$, $X_{L_a} = 0.0010 \Omega$ $R_a = 3.55 \mu\Omega$ مقادیر پارامترهای الکترودها: $L_a = 2.37 \mu\text{H}$, $X_{L_a} = 0.744 \text{ m}\Omega$ $R_a = 129.7 \mu\Omega$ مقادیر برآیند پارامترهای فوق: $L_{eq} = 4.0959 \mu\text{H} + 3.32 \mu\text{H} + 2.37 \mu\text{H} = 9.7859 \mu\text{H}$ $X_{eq} = 3.074 \text{ m}\Omega$

بر اساس جدول ۱ به‌منظور شبیه‌سازی مدل کسی-مایر، مقادیری زیر برای پارامترهای این مدل در نظر گرفته شده است:

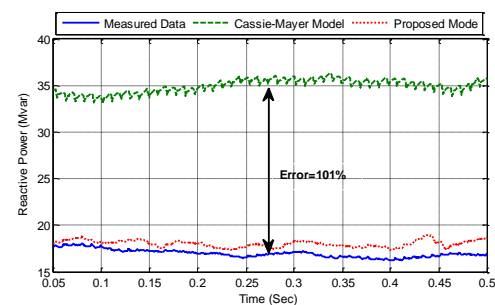
$$E_s = 600 \text{ V}, \alpha = 0.005, \theta = 100$$

با مدل‌سازی شبکه مطابق شکل ۱ و مقادیر جدول ۱ نتایج مدل کسی-مایر به‌دست خواهد آمد. در مدل‌سازی کوره‌ی قوس به روش پیشنهادی، از نمونه‌های اندازه‌گیری شده‌ی واقعی کوره‌ی مورد نظر استفاده شده است. داده‌های اندازه‌گیری با استفاده از اسیلوسکوپ حافظه‌دار به‌دست آمده است. لازم به ذکر است برای اینکه تأثیرات کابل انعطاف‌پذیر و نیز ترانسفورماتور کوره در مدل‌سازی لحاظ شود، نمونه‌گیری از ولتاژ (خط به زمین) و جریان هر فاز، در باس ۲ از شکل ۱، انجام شده است. در مدل پیشنهادی، با استفاده از ۲۱ سیکل اول از ولتاژ و جریان، ماتریس Y مربوط به هر یک از فازها به‌دست آورده شده است. به‌منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده، با داشتن ماتریس Y ، ولتاژ هر فاز و نیز جریان و ولتاژ نقطه‌ی کار، جریان هر یک از فازها با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) پیش‌بینی می‌شود. جریان هر یک از فازها، به تفکیک برای هر یک از سیکل‌ها، در حالت فازوری، برای فرکانس مؤلفه‌ی اصلی

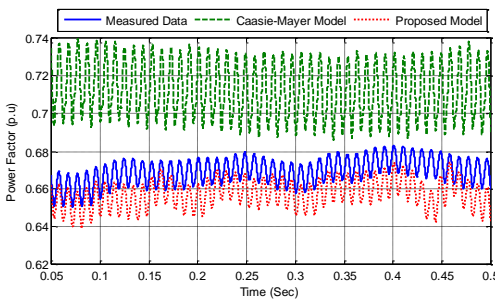
نشان می‌دهد؛ به‌علاوه شکل ۴-ج منحنی تغییرات ضریب توان ۲ نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



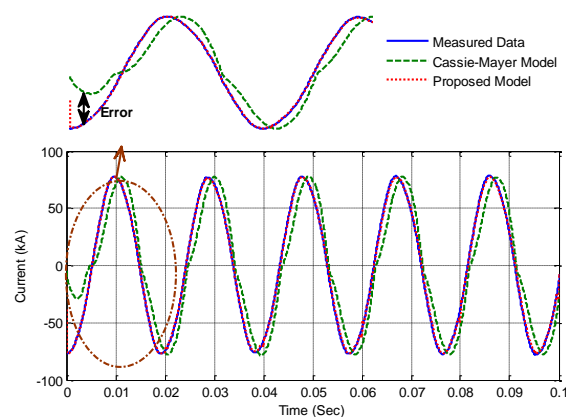
(ج)

شکل ۴: منحنی توان الکتریکی در مدل پیشنهادی، مدل کسی-مایر و داده‌های اندازه‌گیری؛ (الف) تغییرات توان اکتیو، (ب) تغییرات توان راکتیو، (ج) تغییرات ضریب توان در باس ۲

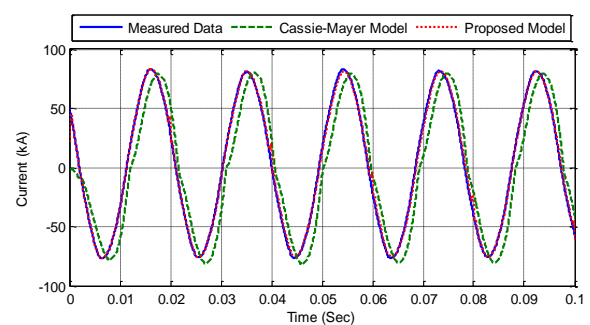
با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد که تغییرات توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان در مدل پیشنهادی تطابق مطلوبی با داده‌های اندازه‌گیری دارد. همچنین نوسانات و تغییرات ایجاد شده توسط کوره قوس الکتریکی بر روی توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان در باس ۲ به‌خوبی توسط مدل پیشنهادی ایجاد شده است. اگر این مقایسه در خصوص مدل کسی-مایر انجام شود، مشاهده می‌گردد که این مدل نتوانسته است توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان را به‌خوبی در سیستم قدرت ایجاد کند و این عیب اکثر مدل‌هایی است که مبتنی بر روابط خاص برای قوس الکتریکی می‌باشند. به این ترتیب نمی‌توان به‌خوبی جبران‌کننده‌های مناسبی برای کوره قوس الکتریکی طراحی نمود که این موضوع مشکل بسیار مهم در مطالعه سیستم‌های قدرت با کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم کیفیت توان هارمونیک‌های جریان تولید شده توسط کوره قوس می‌باشد. دامنه‌ی هارمونیک‌های جریان ایجاد شده توسط کوره قوس الکتریکی در مدل‌های کسی-مایر،

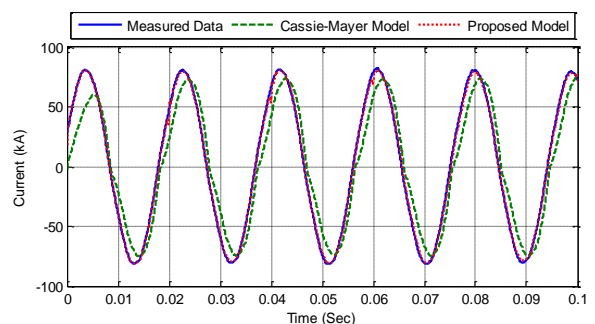
سبب می‌شود محاسبات توان الکتریکی نظیر توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان نسبت به حالت واقعی متفاوت باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: شکل موج جریان هر یک از فازهای کوره‌ی قوس در مدل کسی-مایر، مدل پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری؛ (الف) فاز A، (ب) فاز B، (ج) فاز C

۴- رفتار کوره قوس الکتریکی در سیستم قدرت

یکی از مهم‌ترین خواسته‌های مهندسی برق در شرکت‌های فولاد، تحلیل رفتار کوره‌های قوس الکتریکی و طراحی جبران‌کننده‌های مناسب می‌باشد [۱۱]. در این قسمت با توجه به مدل پیشنهادی، تأثیرات عملکرد کوره قوس الکتریکی در سیستم قدرت بررسی و تحلیل می‌گردد. به‌منظور کاهش تعداد منحنی‌ها، در این قسمت فقط فاز A، در نظر گرفته شده است و دو فاز دیگر نیز نتایج مشابه خواهند داشت. در این راستا، شکل ۴-الف منحنی تغییرات توان اکتیو کوره را در فاز A نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴-ب منحنی تغییرات توان راکتیو را در باس ۲

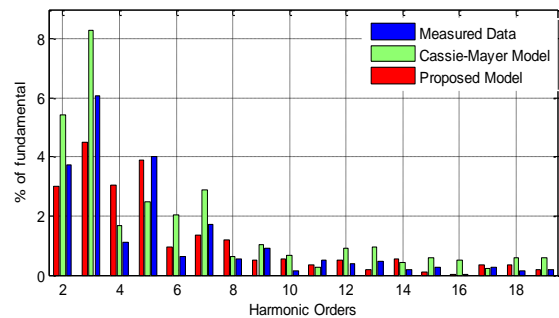
توان راکتیو و فیلترهای هارمونیک استفاده نمود. همچنین کاربرد دیگر این مدل در مطالعه کیفیت توان سیستم قدرت می‌باشد زیرا میزان ضریب توان و هارمونیک‌های تولیدی توسط کوره منطبق بر سیستم واقعی کوره می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Alonso and M. Donsion, "An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 367-373, 2004.
- [2] M. A. Golkar and S. Meschi, "MATLAB modeling of arc furnace for flicker study," In Industrial Technology, IEEE International Conference, pp. 1-6, 2008.
- [3] I. Vervenne, K. Van Reusel and R. Belmans, "Electric arc furnace modeling from a "power quality" point of view," In Electrical Power Quality and Utilisation, IEEE 9th International Conference, pp. 1-6, 2007.
- [4] Y. F. Wang and J. G. Jiang, "A novel chaotic model of ac electric arc furnace for power quality studies," In Electrical Machines and Systems, International Conference, pp. 1759-1762, 2007.
- [5] W. Ting, S. Wennan, Z. Yao, "A new frequency domain method for the harmonic analysis of power systems with arc furnace," In Advances in Power System Control, 4th International Conference, pp. 552-555, 1997.
- [6] G. Chang, C. Hatziaadoni, W. Xu, P. Ribeiro, R. Burch, W. M. Grady, M. Halpin, Y. Liu, S. Ranade, D. Ruthman, N. Watson, T. Ortmeier, J. Wikston, A. Medina, A. Testa, R. Gardinier, V. Dinavahi, F. Acram and P. Lehn, "Modeling devices with nonlinear voltage-current characteristic for harmonic studies," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1802-1811, 2004.
- [7] L. F. Beites, J. G. Mayordomo, A. Hernandez and R. Asensi, "Harmonics interharmonic unbalances of arc furnaces: A new frequency domain approach," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 4, pp. 661-668, 2001.
- [8] H. Mokhtari and M. Hejri, "A new three phase time-domain model for electric arc furnaces using MATLAB," Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 3, pp. 2078-2083, 2002.
- [9] M. Fauri, "Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 4, pp. 1632-1638, 1997.
- [10] J. E. Caicedo, A. A. Romero and H. C. Zini, "Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction," IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), pp. 1-6, 2017.

[۱۱] علیرضا حسنی اصل، مهدی معلم، محمد کیوان‌فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۷۵-۸۶، بهار ۱۳۹۵.

پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری در باس ۲، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: دامنه‌ی هارمونیک‌های مختلف جریان در مدل پیشنهادی،

مدل کسی-مایر و داده‌های اندازه‌گیری

همان‌طور که مشاهده می‌شود که اندازه‌ی هارمونیک‌های تولیدشده در حالت واقعی و پیشنهادی تطابق قابل‌قبولی با هم دارند، در حالی که این موضوع در خصوص مدل کسی-مایر صادق نمی‌باشد. وجود خطا بین مدل کسی-مایر و مقادیر اندازه‌گیری، می‌تواند مشکلات جدی در طراحی فیلترهای هارمونیک برای مطالعات سیستم قدرت به وجود آورد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل جدیدی از کوره قوس الکتریکی بر مبنای نمونه‌های واقعی به‌صورت منبع جریان کنترل‌شده با ولتاژ مبتنی بر ماتریس ادمیتانس متقاطع ارائه گردید. از خصوصیات بارز مدل ارائه‌شده می‌توان به غیرخطی بودن، تصادفی و تطابق مطلوب با رفتار کوره قوس واقعی نام برد. همچنین مدل پیشنهادی با مدل کسی-مایر که یکی از مدل‌های معتبر و پرکاربرد در مدل‌سازی قوس الکتریکی مقایسه گردید. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه این مدل‌ها نشان می‌دهد در مطالعه‌ی کوره قوس الکتریکی بایستی مدلی ارائه شود تا بتواند کلیه اثرات المان‌های کوره را در مدل‌سازی نشان دهد زیرا تغییرات حرارتی و جریانی باعث تغییر در پارامترهای مختلف سیستم قدرت می‌شود. به این ترتیب در مدل پیشنهادی کلیه اثرات به‌طور کامل در مدل‌سازی لحاظ شده است به‌گونه‌ای که سیستم قدرت تحت مطالعه مانند سیستم قدرت واقعی عمل کرده است. لذا از این مدل می‌توان در طراحی انواع جبران‌کننده‌های

زیر نویس‌ها

² crossed frequency admittance matrix

¹ PCC: Point of Common Coupling