



بررسی تأثیرات قوس الکتریکی بر روی پدیده های کیفیت توان در سیستم های توزیع

رحمت اله هوشمند
دانشگاه اصفهان

hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

مهدی ترابیانی اصفهانی
شرکت توسعه و نوسازی هدایت وابسته به وزارت نیرو
Torabian_mehdi@yahoo.com

چکیده

قوس الکتریکی پدیده ای غیرخطی و متغیر با زمان است که باعث خرابی کیفیت توان را در سیستم های توزیع می شود. با توجه به بارهای مختلفی نظیر کوره های قوس و دستگاه های جوش که در سیستم های توزیع به فراوانی یافت می شوند. لازم است مدلی دقیق و واقعی برای تحلیل عملکرد قوس الکتریکی ارائه گردد. در این مقاله، ابتدا مدلی جدید برای قوس الکتریکی بر مبنای فضای احتمالاتی ارائه می شود. مدل پیشنهادی، تا حد زیادی در برگزیده حالات تصادفی قوس الکتریکی بوده و تطابق مطلوبی با عملکرد واقعی قوس الکتریکی در صنایع فولاد دارد. سپس آثار این پدیده بر روی شاخص های کیفیت توان نظیر فلیکر ولتاژ، عدم تعادل، اعوجاج هارمونیک و توان الکتریکی در سیستم توزیع مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: پدیده های کیفیت توان - قوس الکتریکی - اعوجاج هارمونیک - فلیکر ولتاژ

۱- مقدمه

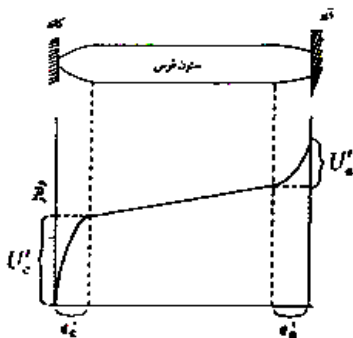
مدل هایی نیز بر اساس ساختار مدارات بی نظمی وجود دارند که این مدل ها بیشتر برای محاسبه فلیکر ولتاژ مناسباند [۶، ۷]. در هر صورت از مهمترین مزیت های یک مدل قوس، سادگی بکارگیری جهت شبیه سازی و عدم تقریب زیاد می باشد. مدل های بیان شده تاکنون به نحو مطلوبی رفتار قوس الکتریکی را پوشش نمی دهند. برخی از آنها حتی حالات تصادفی قوس را به درستی بیان نمی کنند. همچنین اغلب این مدل ها بر اساس یک رابطه ریاضی مشخصی قوس الکتریکی را مدل کرده اند. بنابراین مشخصه قوس در یک چهارچوب کاملاً معینی قرار دارد که با رفتار غیر قابل پیش بینی قوس در تضاد است. بنابراین لازم است مدل مناسبی برای تحلیل قوس الکتریکی بیان گردد تا هم طبیعت تصادفی قوس را بتواند بررسی کند و هم با حالت واقعی تطابق مطلوبی داشته باشد.

در این مقاله مدلی جدید بر پایه شناسایی قوس الکتریکی بیان می شود که با نمونه برداری احتمالاتی از ولتاژ و جریان قوس الکتریکی از یک قوس واقعی حاصل می شود. در حقیقت مدل

قوس الکتریکی در صنعت برق دارای اهمیت فوق العاده است و موارد مصرف مختلف دارد که از این جمله می توان از کاربردهای روشنایی، ذوب فلزات و جوشکاری نام برد. ضمناً قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت و فیوزها پیش می آید و شناخت مشخصات قوس به دلایل بالا لازم و ضروری به نظر می رسد. در این راستا، مدل های متعددی برای قوس پیشنهاد شده است [۷-۱].

برخی از این مدل ها بر اساس خطی سازی معادله مشخصه استوارند [۱، ۲]. این نوع مدل بیشتر به منظور تحلیل هارمونیک مورد استفاده قرار می گیرند. برخی دیگر از این مدل ها بر پایه معادلات دیفرانسیل در حوزه می باشند که این مدل ها نیاز به شرایط اولیه خاص دارند [۳]. دسته ای دیگر از مدل مبتنی بر حوزه فرکانس هستند که این دسته اکثراً برای مطالعات هارمونیک شبکه کاربرد دارند. همچنین در این گونه مدل ها به دلیل اینکه مدل تطابق مطلوبی با حالت واقعی ندارد، بررسی سیستم قدرت در شرایط واقعی بسیار مشکل است. [۴، ۵].

درجه حرارت بسیار بالایی تولید می‌گردد به طوری که به حدود چند ده هزار درجه سانتیگراد می‌رسد. توان تولید شده در این منطقه با توجه به هدایت حرارتی سطح خارجی که باید حرارت را به محیط خارج انتقال دهد بسیار زیاد است و به ۱۰ مگاوات در هر سانتیمتر مربع می‌رسد.



شکل (۱): قسمت‌های مختلف یک قوس و تقسیم ولتاژ در آن

شدت میدان الکتریکی در منطقه آندی بیشتر از شدت میدان در منطقه ستون قوس بوده ولی کمتر از شدت میدان الکتریکی در منطقه کاتدی است. درجه حرارت زیاد گاز در قوس الکتریکی باعث ایجاد نور شدید می‌گردد که از مشخصه‌های بارز قوس الکتریکی است، توان وارد شده به یک قوس الکتریکی با توجه به افت ولتاژ و جریان شدید، نسبتاً زیاد است. یک قوس الکتریکی با طول یک سانتیمتر و جریان ۲۰۰ آمپر دارای افت ولتاژی در حدود ۲۰ ولت است و توان الکتریکی که در فضای کوچک قوس به حرارت تبدیل می‌شود برابر ۴ کیلو وات است. مثال بالا برای یک دستگاه جوشکاری عنوان گردیده است که در آن از پدیده قوس الکتریکی استفاده می‌شود.

در قوس الکتریکی به دلیل میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی قوس، گاز به حرکت درآید. خطوط میدان مغناطیسی به صورت حلقه‌هایی قوس الکتریکی را در بر می‌گیرند. بر یک خط جریان الکتریکی که در فاصله r از محور قوس قرار گرفته باشد نیرویی وارد می‌شود که مقدار آن در واحد حجم از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\frac{dF}{dv} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

این نیرو دارای دو مولفه است. یکی از آنها نیرویی است که سعی می‌کند جریان را در محور قوس فشرده نماید (در جهت r) و مولفه دیگر باعث حرکت قوس به سمت پایین (در جهت z) می‌شود. نیروی وارده به قوس الکتریکی باعث می‌شود که جریان در یک مسیر نازک جمع گردد و در داخل این مسیر فشار گاز بیشتر از فشار گاز در بیرون قوس خواهد بود. در حالت‌های گذرا مثلاً در صورت متغیر بودن مقدار جریان، یعنی در حالت‌هایی که

قوس بر اساس یک منبع ولتاژ کنترل شده با جریان استوار است. مدل پیشنهادی، محدودیت‌های مدل‌های بیان شده را از بین برده و دارای دقت زیادی نسبت به حالت واقعی می‌باشد. زیرا بر اساس نمونه‌گیری واقعی از قوس الکتریکی در صنایع فولاد می‌باشد و در نتیجه، نزدیکترین رفتار را در مطالعات به قوس واقعی دارد. سپس با در نظر گرفتن این مدل، به بررسی و تحلیل آثار این پدیده بر شاخص‌های کیفیت توان نظیر فلیکر ولتاژ، عدم تعادل، اعوجاج هارمونیک و توان الکتریکی در سیستم‌های توزیع پرداخته می‌شود. با نتایج بدست آمده از این تحقیق قادر خواهیم بود به چگونگی رفع آثار زیان بار قوس الکتریکی بپردازیم. نتایج شبیه سازی که توسط نرم افزار PSCAD/EMTDC صورت گرفته است دقت و صحت شبیه سازی را نشان می‌دهد.

۲- بررسی خواص قوس الکتریکی

یکی از انواع تخلیه الکتریکی در گازها قوس الکتریکی و یا تخلیه قوسی تحت هر شرایطی می‌باشد. شکست الکتریکی به صورت قوس الکتریکی، در عایق گازی ظاهر می‌گردد. مشخصه عمده قوس الکتریکی جریان نسبتاً زیاد (تا چندین کیلو آمپر) و افت ولتاژ بسیار کم (بسته به میزان جریان تا چند ولت) و درجه حرارت بسیار بالا زیاد گاز (تا چندین هزار درجه سانتیگراد) می‌باشد. قوس الکتریکی از قابلیت هدایت الکتریکی بسیار خوبی برخوردار است و هر چه جریان آن بیشتر شود، افت ولتاژ در طول آن کمتر می‌شود. لذا قوس الکتریکی ذاتاً یک پدیده ناپایدار است و تنها در شرایط خاص به سوختن ادامه می‌دهد؛ بنابراین در بسیاری از موارد قوس الکتریکی خود به خود خاموش می‌شود. در سال ۱۸۰۸ هنری دیوی قوس الکتریکی را به وسیله پیل‌های ولتا به وجود آورد و برای این پدیده لغت قوس (arc) را انتخاب نمود. با وجود این قوس الکتریکی هنوز به خوبی شناخته نشده است. دلیل این مطالب حالت‌های کاملاً متفاوتی است که قوس الکتریکی می‌تواند داشته باشد. ضمن آنکه بسیاری از عوامل که تشخیص آنها مشکل می‌باشد در خواص قوس الکتریکی اثر می‌گذارند. قوس الکتریکی شامل ستون قوس در وسط و منطقه کاتدی آندی است (شکل (۱)). افت ولتاژ در طول ستون قوس بسیار اندک است چرا که ستون قوس یک ستون هادی است. در داخل این ستون به دلیل درجه حرارت زیاد، گاز به صورت یونیزه در می‌آید و تعداد قابل توجهی الکترون آزاد و یون در این ستون به وجود می‌آید که در انتقال بار الکتریکی و به وجود آوردن جریان نقش اساسی دارند.

چگالی سطحی جریان در منطقه کاتدی بسیار زیاد است و بر روی سطح کاتد چگالی سطحی جریان به 10^6 آمپر بر سانتیمتر مربع می‌رسد. حرارت تولید شده در این منطقه بسیار زیاد و

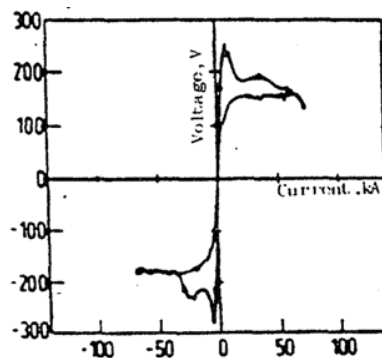
مولکولهای گاز با شتاب وارد قوس شده یا از آن خارج می‌گردند، نیروی لازم برای شتاب را باید منظور نمود. در این حالت رابطه (۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} + \text{grad}(P) = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

در این رابطه \vec{V} سرعت و ρ چگالی جرمی گاز و P فشار درونی گاز می‌باشد.

پس از آنکه قوس الکتریکی به وجود آمد تغییرات ناگهانی الکترونها و یونها و درجه حرارت گاز در اثر تغییرات ناگهانی جریان ممکن نخواهد بود. بنابراین تغییر ناگهانی جریان بلافاصله منجر به تغییر مشخصه قوس نمی‌شود و این عمل تحت سرعت محدودی انجام می‌گیرد. تا زمانی که شرایط گاز به شرایط مربوط به مقدار جریان جدید نرسیده است، مشخصه قوس نیز با مشخصه قوس متناظر با این مقدار جریان برابر نخواهد بود.

با توجه به مطالب فوق مشخص می‌گردد که مشخصه قوس الکتریکی در هر لحظه بستگی به شرایط کار آن در همان لحظه و لحظه‌های قبل دارد. شکل (۳) تغییرات ولتاژ قوس الکتریکی را بر حسب جریان برای یک قوس واقعی در صنایع فولاد نشان می‌دهد. این مشخصه همانطور که ملاحظه می‌شود حالت هیستریزس در این منحنی وجود دارد. دلیل این حالت اثر جریان در لحظه‌های پیش است. پس از عبور جریان از نقطه صفر، ابتدا جریان قوس کم است و ولتاژ بین دو سر قوس افت می‌نماید. یعنی مشخصه منفی قوس نمایان می‌گردد. پس از رسیدن جریان به مقدار حداکثر و شروع کاهش آن مقدار ولتاژ به ازاء یک جریان معین کمتر از مقداری است که در مدت افزایش داشته است.



شکل (۲): رابطه بین ولتاژ و جریان یک قوس الکتریکی در حالت واقعی و در فرکانس ۵۰ هرتز

دلیل این امر آن است که قوس الکتریکی بر اثر عبور جریان قبلی گرم شده است و تعداد یونها و الکترونها آزاد افزایش یافته و در نتیجه قابلیت هدایت الکتریکی آن نیز افزایش یافته است. این مسئله در هر نیم پریود مشاهده می‌شود

در قوس الکتریکی کوتاه هنگامی که کاتد بر اثر گرما به حالت التهاب درآمده باشد و گاز نیز پس از کم شدن جریان همچنان گرم نگاه داشته شده باشد، اثر هیستریزس کمتر ملاحظه می‌شود. برعکس در قوسهای الکتریکی طولانی و در مواردی که الکترونها و گاز را گرم نگاه ندارند. شروع مجدد قوس در ولتاژ بالاتر و اثر هیستریزس نیز مشخص تر خواهد بود.

۲-۱- ارائه مدل پیشنهادی

در این قسمت بر اساس نمونه برداری دقیق از ولتاژ و جریان یک قوس الکتریکی در حالت واقعی و بر اساس شکل (۲) مدلسازی انجام می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که این مدل بر مبنای شناسایی سیستم استوار است و هیچ‌گونه تقریب خطی در آن صورت نگرفته است. نمونه برداری از مشخصه قوس الکتریکی در حالت واقعی به این صورت انجام شده است که نمونه‌ها در فواصل زمانی مساوی از شکل موج انتخاب شده‌اند. این کار نیز با استفاده از حاصلضرب یک قطار ضربه متناوب و شکل اخیر صورت گرفته است. بنابراین رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$x_p(t) = x(t)p(t) \quad (3)$$

در این رابطه $p(t)$ قطار ضربه متناوب، $x(t)$ مشخصه ولتاژ-جریان قوس الکتریکی و $x_p(t)$ تابع نمونه برداری شده است. بنابراین $p(t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \quad (4)$$

همچنین با توجه به اینکه ضرب $x(t)$ در یک ضربه واحد، نمونه‌ای از سیگنال در محل قرار گرفتن ضربه است، که می‌توان رابطه (۳) را به شکل زیر نوشت:

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT)\delta(t - nT) \quad (5)$$

که در این روابط، T دوره تناوب نمونه برداری است. بنابراین با در نظر گرفتن قوس واقعی می‌توان نمونه‌های واقعی از قوس را به روش ذکر شده بدست آورد. سپس به منظور مدلسازی قوس الکتریکی از نمونه‌های بدست آمده، از روش درون‌یابی استفاده شده است. در حقیقت، قوس الکتریکی به صورت یک منبع ولتاژ وابسته به جریان ورودی مدل شده است که مقدار ولتاژ دو سر آن با جریان ورودی بار در ارتباط است. لازم به ذکر است که هر چه میزان نمونه‌برداری بیشتر باشد، مدل سازی نیز دقیق‌تر خواهد بود.

۳- بررسی شاخص‌های کیفیت توان

در این قسمت به بررسی مهمترین شاخص‌های کیفیت توان در ارتباط با قوس الکتریکی پرداخته می‌شود.

۳-۱- فلیکر ولتاژ

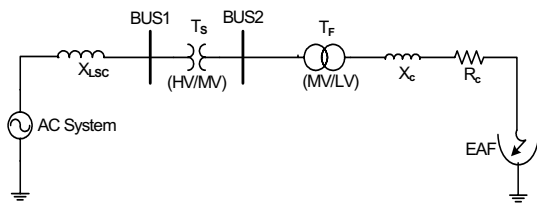
بارهای سنگین مثل کوره‌های قوس، پمپ‌ها و موتورهای باعث

دسته از ولتاژ یا جریان سه فاز (X_a و X_b و X_c) را می‌توان به سه دسته متعادل (X_1 و X_2 و X_0) تجزیه نمود که توالی‌های مثبت، منفی و صفر نامیده می‌شوند. بنابراین، شاخص عدم تعادل بصورت نسبت بین ولتاژ مؤلفه منفی به مؤلفه مثبت تعریف می‌شود. یعنی،

$$X_x = \frac{|X_2|}{|X_1|} \times 100 \quad (10)$$

۴- مدل سازی سیستم توزیع با باری دارای قوس الکتریکی

در این قسمت فرض می‌شود سیستم توزیع دارای باری نظیر کوره قوس الکتریکی باشد. بر این اساس شکل (۳) دیاگرام تک خطی یک سیستم الکتریکی که یک کوره قوس را تغذیه می‌کند نشان می‌دهد. در این شکل، باس ۱، بیانگر نقطه اتصال مشترک (Point of Common Coupling یا باس PCC) می‌باشد که در حقیقت، باس تغذیه کننده اصلی ترانسفورماتور کوره می‌باشد. برای تغییر دادن توان اکتیو ورودی کوره قوس از ترانسفورماتور T_F (MV/LV) استفاده می‌شود. این ترانسفورماتور دارای سیم‌پیچ 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.



شکل (۳): نمای کلی سیستم تغذیه کوره قوس الکتریکی

در این شکل، 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.

۵- بررسی نتایج شبیه سازی

در این قسمت با توجه به مقادیر زیر، اثر قوس الکتریکی بر سیستم قدرت شکل (۳) مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

(۱۱)

$$X_{Lsc} = 9.4245\Omega, \quad X_c = 2.356m\Omega, \\ R_c = 0.4m\Omega, \quad f_{sys} = 50Hz$$

با توجه به مقادیر فوق و در نظر گرفتن شکل (۲)، مشخصه ولتاژ-جریان قوس الکتریکی در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های تغییرات ولتاژ و جریان قوس در شکل (۵) نشان داده شده است.

افزایش تغییرات نوسانی ولتاژ در شبکه می‌شوند. در بیشتر حالت‌ها این تغییرات ولتاژ با فرکانس‌های پایین تکرار می‌شوند که به این پدیده فلیکر گویند. بسته به نوع بار، فرکانس تغییرات نوسانی و سیستم تغذیه، چشمک زنی (فلیکر) آزاردهنده در لامپها مشاهده می‌شود. مطالعات نشان داده است که انسان‌ها نسبت به فلیکر لامپها در فرکانس نزدیک ۴Hz تا ۱۴Hz حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. در این فرکانس مدولاسیون در حد ۰/۲۵ درصد کافی است تا فلیکر اذیت کننده ای را ایجاد کند [۹، ۱۰]. به منظور بررسی فلیکر ولتاژ ناشی از قوس الکتریکی، برای مدل پیشنهادی طبق رابطه فلیکر ولتاژ (۶) در نظر گرفته شده است.

$$V_T(i) = V_M(i) \cdot [1 + F(t)] \quad (6)$$

در این رابطه $V_T(i)$ ولتاژ مدوله شده با فلیکر می‌باشد. همچنین $V_M(i)$ نیز ولتاژ نمونه برداری شده وابسته به جریان است. $F(t)$ نیز تابع فلیکر می‌باشد و بسته به نوع فلیکر می‌تواند بصورت سینوسی و تصادفی تغییر کند. اگر فلیکر بصورت سینوسی تغییر کند این تابع بصورت رابطه (۷) می‌باشد. همچنین اگر فلیکر ایجاد شده بصورت تصادفی تغییر کند، این تابع مطابق رابطه (۸) خواهد بود.

$$F(t) = k \cdot \sin \omega_f t \quad (7)$$

$$F(t) = k \cdot N(t) \quad (8)$$

در این روابط، ω_f فرکانس زاویه‌ای فلیکر، $N(t)$ نویز سفید با محدوده فلیکر (۴ تا ۱۴ هرتز) و k ضریب تغییر در شدت فلیکر می‌باشد.

۳-۲- ضریب اعوجاج هارمونیکی کل

اعوجاج هارمونیکی کل (THD) طبق رابطه زیر، برابر نسبت مقدار مؤثر هارمونیک‌ها به مقدار مؤثر مؤلفه اصلی شکل موج می‌باشد [۹، ۱۰]. لذا،

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{h_{max}} H_n^2}}{H_1} \quad (9)$$

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

۳-۳- شاخص عدم تعادل ولتاژ و جریان

در حالتی که ولتاژ و جریان سه فاز در سیستم قدرت، اختلاف فاز ۱۲۰ درجه نداشته باشند، شاخص عدم تعادل ولتاژ و جریان مطرح می‌گردد. با توجه به اینکه کوره‌های قوس الکتریکی، عدم تعادل را در سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کنند، لذا لازم است این مبحث بطور کامل مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. هر

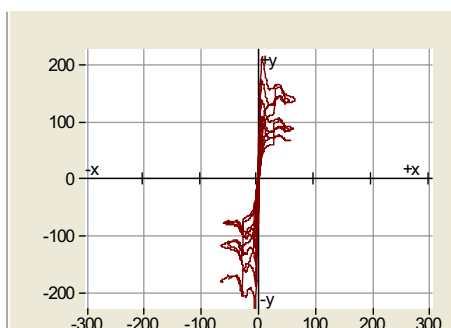
با توجه به منحنی‌های اخیر در می‌یابیم که سیستم قدرت با بار کوره قوس دچار تغییرات شدیدی در توان الکتریکی می‌شود. همچنین میزان توان راکتیو سیستم از حالت متعادل خارج شده و توان راکتیو بار را دنبال می‌کند. از طرفی میزان تغییرات ضریب توان نیز افزایش یافته در مقدار ۰/۴۵ نوسان می‌کند.

۵-۲- بررسی فلیکر ولتاژ در سیستم قدرت

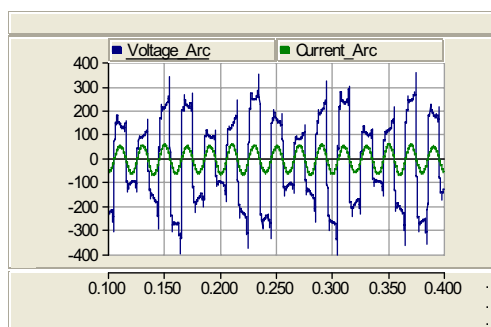
به منظور ایجاد فلیکر ولتاژ بصورت سینوسی و با توجه به رابطه (۷) مقادیر زیر برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

$$\omega_f = 50 \text{ rad/sec}, \quad k = 0.5 \quad (12)$$

با توجه به رابطه اخیر، شکل (۸) منحنی مشخصه ولتاژ-جریان قوس را نشان می‌دهد. همچنین منحنی ولتاژ و جریان کوره نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.



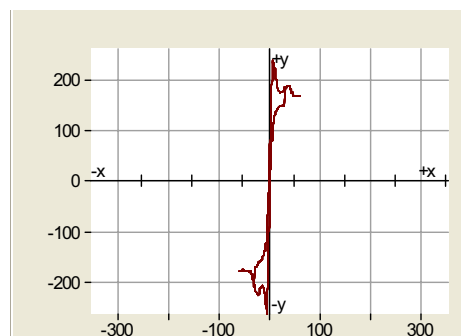
شکل (۸): منحنی ولتاژ-جریان قوس الکتریکی در حالت فلیکر سینوسی



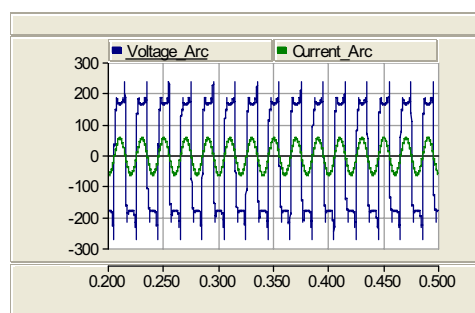
شکل (۹): منحنی ولتاژ و جریان قوس الکتریکی در حالت فلیکر سینوسی

همچنین در حالت فلیکر تصادفی و با توجه به روابط (۸) و (۱۲)، شکل (۱۰) منحنی مشخصه ولتاژ-جریان قوس را نشان می‌دهد. همچنین منحنی ولتاژ و جریان کوره نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

با توجه به اینکه یکی از مهمترین اثرات قوس الکتریکی، تأثیر فلیکر ولتاژ بر باس اصلی سیستم قدرت است، لذا در این قسمت، یک فلیکر متر با توجه به استاندارد IEC (مرجع [۸]) برای اندازه‌گیری میزان فلیکر در این باس، شبیه سازی گردید. در این



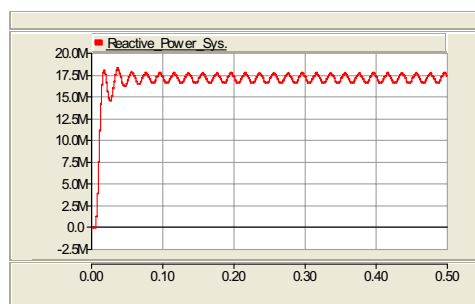
شکل (۴): منحنی مشخصه ولتاژ-جریان قوس الکتریکی



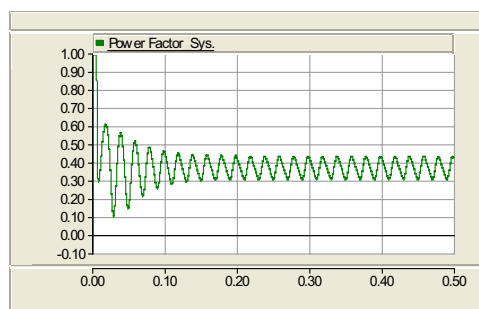
شکل (۵): منحنی ولتاژ و جریان قوس الکتریکی

۵-۱- بررسی تغییرات توان الکتریکی در سیستم

در سیستم‌های قدرت و به خصوص در سیستم‌های توزیع، توان راکتیو و ضریب توان یکی از مهمترین پارامتر مورد بررسی هستند. در این راستا، شکل (۶)، میزان تغییرات توان راکتیو در باس اصلی سیستم را نشان می‌دهد. از طرفی شکل (۷) نیز تغییرات ضریب توان را در این باس نشان می‌دهد.



شکل (۶): منحنی تغییرات توان راکتیو در باس اصلی سیستم

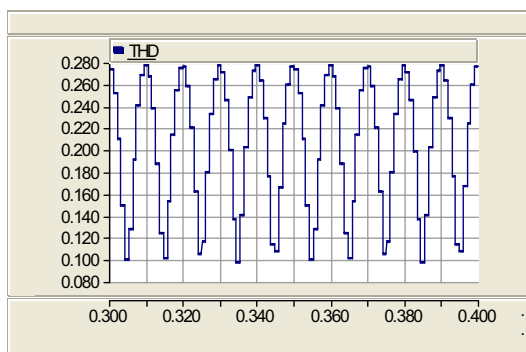


شکل (۷): منحنی تغییرات ضریب توان در باس اصلی سیستم

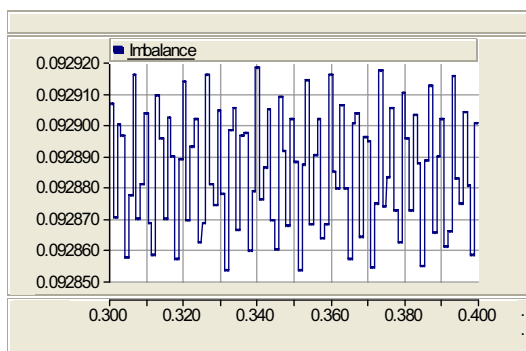
۵-۳- بررسی و تحلیل هارمونیک و شاخص عدم تعادل در سیستم قدرت

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از تحلیل هارمونیک در باس PCC می‌پردازیم. در این راستا، جدول (۱) میزان هارمونیک‌های این باس را به ازای حالات مختلف در مدل پیشنهادی نشان می‌دهد.

با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود، همانطور که انتظار می‌رفت، هارمونیک‌های زوج نیز در سیستم تغذیه ایجاد می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود تا تحلیل این سیستم، بسیار دقیقتر شود و به حالت واقعی نزدیکتر شود که میزان THD (Total Harmonic Distortion) ولتاژ فاز a باس PCC در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همچنین میزان شاخص عدم تعادل ولتاژ این باس نیز در شکل (۱۵) آورده شده است.



شکل (۱۴): میزان تغییرات THD در ولتاژ باس PCC



شکل (۱۵): میزان تغییرات شاخص عدم تعادل در ولتاژ باس PCC

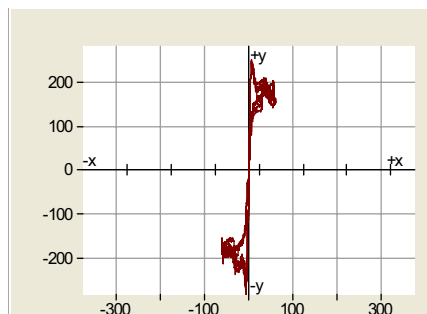
لازم به ذکر است در کلیه نتایج شبیه سازی ولتاژ قوس بر حسب ولت، جریان قوس بر حسب کیلو آمپر و زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.

۵-۴- ارزیابی و تحلیل نتایج شبیه سازی

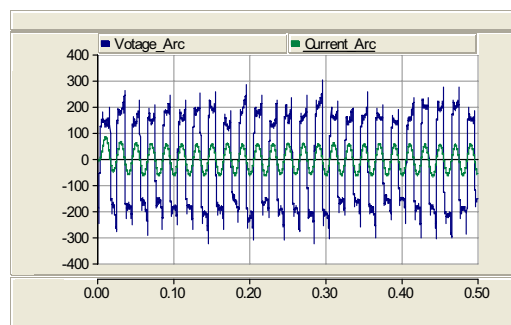
نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در بخش‌های قبلی را می‌توان به صورت زیر مورد ارزیابی قرار داد:

۱- با توجه به نتایج حاصل از مدل قوس الکتریکی (شکل‌های ۴)

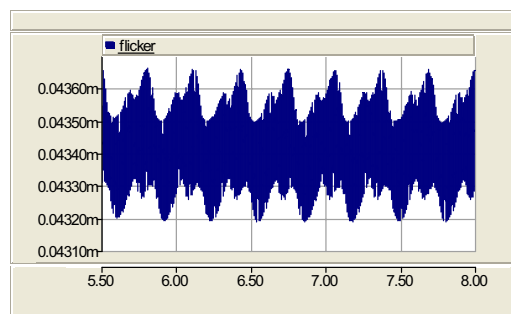
راستا، شکل (۱۲) میزان تغییرات فلیکر سینوسی را در این باس نشان می‌دهد. همچنین در صورتی که تغییرات ولتاژ بار کوره تصادفی باشد، فلیکر اندازه‌گیری شده توسط فلیکرمتر بصورت شکل (۱۳) می‌باشد.



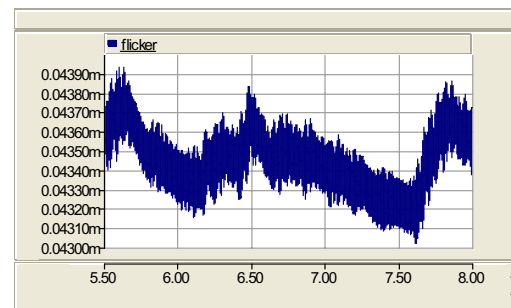
شکل (۱۰): منحنی ولتاژ-جریان قوس الکتریکی در حالت فلیکر تصادفی



شکل (۱۱): منحنی ولتاژ و جریان قوس الکتریکی در حالت فلیکر تصادفی



شکل (۱۲): تغییرات فلیکر بصورت تصادفی در باس PCC



شکل (۱۳): تغییرات فلیکر بصورت تصادفی در باس PCC

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل جدیدی بر مبنای نمونه برداری از ولتاژ و جریان قوس الکتریکی در حالت واقعی و در حوزه زمان ارائه گردید. روش مدل سازی بر پایه منبع ولتاژ کنترل شده با جریان کوره بود. مدل مذکور دارای مزایای فراوانی نظیر تطابق با حالت واقعی، عدم تقریب خطی در مشخصه، حفظ طبیعت تصادفی قوس... بود. سپس آثار این بار غیر خطی بر سیستم قدرت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

همچنین این مدل می تواند برای آزمایش SVCها و TCRها و ادارات FACTS و عملیات کنترلی برای بهبود شاخص های کیفیت توان مورد استفاده قرارگیرد. بعلاوه این مدل، قابلیت تحلیل هارمونیک در سیستم های قدرت با وجود کوره های قوس الکتریکی را دارا می باشد. در ضمن، این مدل می تواند به بهینه سازی مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی به واسطه شناسایی مشخصه ولتاژ- جریان قوس الکتریکی کمک کند.

۷- مراجع

- [1] M. Anxo, P. O. Alonso, M. Perez, "An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, pp. 367-373, 2004.
- [2] M.A. Gomez-Martinez, A. Medina, C.R. Fuente-Esquivel " 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", *IEEE Conference*, pp. 2078-2083, 2002.
- [4] L. F. Beites, J. G. Mayordomo, A. Hernandez, R. Asensi, "Harmonics, Inter harmonic, Unbalances of arc furnaces: a new frequency domain approach" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, pp. 661-668, 2001.
- [5] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, and M. Izzeddine, "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] W. Fenghua, J. Zhijian, "Application of Extended Kalman Filter to the Modeling of Electric Arc Furnace for Power Quality Issues", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, pp. 991-996, 2005.
- [7] Sh. J. Hung, W. Chen, "Estimation of Stochastic Characteristics of An AC Electrical Arc Furnace", *IEEE Conference*, pp. 2073-2076, 2002.
- [8] J. Mckim, "The UIE Flickermeter Demystified", Hewlett-Packard's Power Products Division, 1997.
- [9] Shin, Y. J., Powers, E. J., Grady, M., Arapostathis A., "Power Quality Indices for Transient Disturbances", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, pp. 253-261, 2006.
- [10] Moncrief, W. A., Sabin, D., "Roadmap for Power-Quality Standards Development", *Trans. on Industry Applications*, Vol. 43, No. 2, pp. 412-411, 2007.

و (۵) مشاهده می شود که روش ارائه شده به خوبی توانسته است مدل واقعی قوس را نشان دهد. همچنین با توجه به این مشخصه در می یابیم که مدل پیشنهادی، دارای هیچ گونه تقریب خطی نمی باشد. این مزیت، یکی از مهمترین خصوصیات این مدل است. همچنین با توجه به شکل (۵) مشاهده می گردد که ولتاژ قوس الکتریکی علاوه بر هارمونیک های فرد، هارمونیک های زوج را نیز در سیستم ایجاد می کند. از طرفی این مدل، تطابق بسیار مطلوبی با حالت واقعی دارد.

جدول (۱): میزان هارمونیک های ایجاد شده در ولتاژ باس PCC

هارمونیک ← حالت ↓	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇
عدم تعادل	۱۳۷٫۶۵	۲۵٫۹۵	۱۶٫۰۳	۱۲٫۲۱	۱۰٫۲۸	۱۰٫۰۷	۱۳٫۵۸
فلیکر سینوسی	۱۳۵٫۶۷	۲۱٫۸۶	۱۵٫۲۶	۱۱٫۶۱	۹٫۶۱	۹٫۶۰۱	۱۲٫۹۳
فلیکر تصادفی	۱۳۶٫۸۹	۲۲٫۰۱	۱۶٫۰۵	۱۳٫۵۴	۱۰٫۰۱	۹٫۸۱	۱۳٫۶۸

۲- با توجه به بررسی نتایج حاصل از توان الکتریکی در سیستم، در می یابیم که زمانی که باری دارای قوس الکتریکی باشد؛ توان راکتیو کل سیستم از حالت تعادل خارج شده و توان راکتیو بار را دنبال می کند (شکل (۶)). از طرفی باعث می شود ضریب توان در سیستم کاهش یابد و به دنبال آن باعث افزایش تلفات و کاهش بازده در کل سیستم می گردد. به این ترتیب جبران توان راکتیو در سیستم مشهود می گردد.

۳- با توجه به نتایج بررسی فلیکر ولتاژ در می یابیم که مدل پیشنهادی به خوبی قادر به ایجاد فلیکر ولتاژ در سیستم قدرت می باشد. علاوه بر این، با این مزیت قادر خواهد بود که حالات مختلف عملکرد را در سیستم قدرت ایجاد کند. همچنین می توان در این حالات به راحتی شدت میزان فلیکر را تغییر داد. به این ترتیب اثرات فلیکر نیز به خوبی توسط مدل مذکور در باس اصلی سیستم ایجاد می شود (شکل های (۱۲) و (۱۳)).

۴- با توجه به تحلیل هارمونیک در سیستم قدرت، مشاهده می شود که کلیه هارمونیک های ایجاد شده توسط کوره قوس در باس اصلی تغذیه کننده این بار اثر می گذارند. بنابراین با مدل مذکور قادر خواهیم بود تا تحلیل های هارمونیک را در سیستم های قدرت با کوره قوس الکتریکی انجام دهیم (جدول (۱)). از طرفی با توجه به شکل های (۱۴) و (۱۵) در می یابیم که این مدل به خوبی توانسته است اعوجاج هارمونیک (THD) و عدم تعادل را در باس اصلی سیستم تغذیه ایجاد نماید.