



طراحی و شبیه سازی کنترل کننده تناسبی مرتبه کسری به منظور بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع دارای کوره قوس الکتریکی

احسان اکبری^۱

^۱دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده

کیفیت توان سیستم‌های قدرت از جمله مفاهیمی هست که همواره مورد توجه مهندسان و متخصصان برق قرار گرفته است. اغتشاشات کیفیت توان الکتریکی سیستم قدرت، به هر گونه مشکلی که موجب تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس شده و بر عملکرد تجهیزات و مصرف‌کننده‌ها تأثیر گذارد، اطلاق می‌شود. کوره‌های قوس الکتریکی از جمله بارهای بزرگی هستند که مشخصه ولتاژ-جریان آن‌ها غیرخطی، تغییرپذیر با زمان و تا حدودی تصادفی می‌باشد. طیف هارمونیک گسترده، دامنه بالای هارمونیک‌های تولیدی، ضریب توان پایین و تغییرات زیاد در توان اکتیو و راکتیو مصرفی، از جمله مهم‌ترین مشخصه این نوع بارها هست. یکی از راه‌های غلبه بر مشکلات و اغتشاشات هارمونیک و بهبود کیفیت توان سیستم قدرت استفاده از فیلترهای هارمونیک می‌باشد. یکی از این فیلترها که در این مقاله از آن استفاده می‌شود، فیلتر مرکب می‌باشد که چندین قابلیت مهم را یک جا دارند. در این مطالعه، به بررسی بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع کوره قوسی الکتریکی با استفاده از فیلتر مرکب پرداخته شده است که با استفاده از کنترل کننده مرتبه کسری کنترل می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حالتی که فیلتر مرکب (اکتیو و پسیو) در مدار قرار می‌گیرد، درصد اعوجاج هارمونیک شبکه (THD)، به ۰/۲۶ درصد کاهش پیدا می‌کند که بهبود کیفیت توان سیستم را نشان می‌دهد. بنابراین، نتایج کیفیت توان در این پژوهش نشان می‌دهد که فیلتر ترکیبی پیشنهادی در این پژوهش به خوبی توانسته است کیفیت توان شبکه توزیع مورد بررسی در این پژوهش را بهبود دهد به نحوی که میزان THD سیستم مربوط به ولتاژ و جریان در این حالت به شدت کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: کوره قوس الکتریکی، کیفیت توان، فیلتر مرکب، کنترل کننده مرتبه کسری.

۱. مقدمه

کیفیت توان الکتریکی^۱ سیستم‌های قدرت از جمله مفاهیمی هست که از اواخر دهه ۱۹۸۰ مورد توجه مهندسان و متخصصان برق قرار گرفت. اغتشاشات کیفیت توان الکتریکی سیستم قدرت، به هر گونه مشکلی که موجب تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس شده و بر عملکرد تجهیزات و مصرف‌کننده‌ها تأثیر گذارد، اطلاق می‌شود. یکی از این اغتشاشات که در مبحث کیفیت توان الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد، اعوجاج‌های هارمونیک است؛ در واقع با فرض سینوسی بودن ولتاژ شبکه قدرت و منابع موجود در آن، در صورت جاری شدن جریان‌های هارمونیک در شبکه و به دلیل وجود امپدانس‌های سری و موازی، اعوجاج ولتاژ در باس بارها ایجاد می‌شود و بارهای حساس را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱].

کوره‌های قوس الکتریکی از جمله بارهای بزرگی هستند که مشخصه ولتاژ-جریان آن‌ها غیرخطی، تغییرپذیر با زمان و تا حدودی تصادفی می‌باشد. این کوره‌های در کارخانه‌های نورد کوچک و مجتمع برای تولید ورق‌های فلزی سنگین، ریل‌های راه‌آهن، میل‌گرد، تیر آهن و ... به کار می‌روند. به‌رغم مزایای این کوره‌ها، یک سری آثار مخرب در عملکرد این کوره‌ها بر سیستم قدرت مشاهده شده است. طیف هارمونیک گسترده، دامنه بالای هارمونیک‌های تولیدی، ضریب توان پایین و تغییرات زیاد در توان اکتیو و راکتیو مصرفی، از جمله مهم‌ترین مشخصه این نوع بارها هست [۲]. به‌طور کلی از لحاظ الکتریکی دو دسته مطالعات بر روی کوره‌های قوس الکتریکی انجام می‌شود. یک دسته از این مطالعات بر روی بهبود سیستم کنترلی، به‌منظور افزایش بازده کوره که با توجه به توان بالایی که این کوره‌ها مصرف می‌کنند، می‌تواند صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته باشد و دسته دیگر از مطالعات بر روی اثرات مخرب کوره بر روی شبکه قدرت، مانند اثرات هارمونیک، فلیکر تمرکز دارند. یکی از راه‌های غلبه بر مشکلات و اغتشاشات هارمونیک و بهبود کیفیت توان سیستم قدرت استفاده از فیلترهای هارمونیک می‌باشد. فیلترهای هارمونیک را می‌توان بر حسب فعال یا منفعل بودن طبقه‌بندی کرد. فیلترهای اکتیو (فعال) علاوه بر عناصر منفعل (مقاومت، سلف، خازن) که تنها عناصر سازنده فیلترهای منفعل هستند، ادوات الکترونیک قدرت را نیز در ترکیب خود دارند. در مقایسه با فیلترهای غیرفعال معمولی که از سلف، خازن و مقاومت تشکیل شده‌اند، فیلترهای فعال عملکرد بهتری دارند و از نظر ابعاد کوچک‌تر و دارای قابلیت انعطاف بیشتری هستند. یکی از این فیلترها که در این پژوهش از آن استفاده می‌شود، فیلتر مرکب^۲ می‌باشد که چندین قابلیت مهم را یکجا دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از فیلتر کردن هارمونیک‌ها، میرا سازی تشدید هارمونیک، کنترل توان راکتیو، اصلاح ضریب توان، تنظیم ولتاژ و کاهش فلیکر ولتاژ [۳].

حال با توجه به آنچه بیان شد در این پژوهش هدف، بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع کوره قوسی الکتریکی با استفاده از فیلتر مرکب می‌باشد. کوره قوسی با توجه به معادلات مربوط به آن و به‌صورت سلف و مقاومت متغیر مدل شده و فیلتر مرکب نیز شامل ترکیب دو فیلتر پسیو خازنی و فیلتر اکتیو می‌باشد. کنترل مناسب فیلتر مرکب یکی از مسائل ضروری در عملکرد چنین سیستم‌هایی در بهبود کیفیت توان آن می‌باشد و به همین دلیل لازم است از کنترل‌کننده مناسب استفاده شود. در این پژوهش از کنترل‌کننده PI مرتبه کسری (FOPI)^۳ که نسل جدید از کنترل‌کننده‌های تناسبی می‌باشند استفاده می‌شود [۴]. کنترل‌کننده‌ها و سیستم‌های دینامیک مرتبه کسری بر اساس حسابان مرتبه کسری می‌باشند. اخیراً تعمیمی از کنترل‌کننده‌های PID به نام PID مرتبه کسری (FOPID) ارائه شده است که بر اساس معادله حاکم بر آن، علاوه بر پارامترهای K_p ، K_i و K_d دو پارامتر μ و λ نیز باید طراحی شوند. به‌طور کلی کنترل‌کننده PID مرتبه کسری دارای آزادی بیشتر و امکان تنظیم دقیق‌تری برای سیستم حلقه بسته فراهم می‌کند.

در این مقاله ابتدا به بررسی ساختار کوره قوس الکتریکی و معادلات حاکم بر آن پرداخته و مدل‌سازی کوره قوس الکتریکی با توجه به معادلات صورت می‌گیرد. در ادامه فیلتر مرکب برای سیستم مورد مطالعه در پژوهش طراحی و کنترل‌کننده

¹ power quality² composite filter³ Fractional-order PI controller

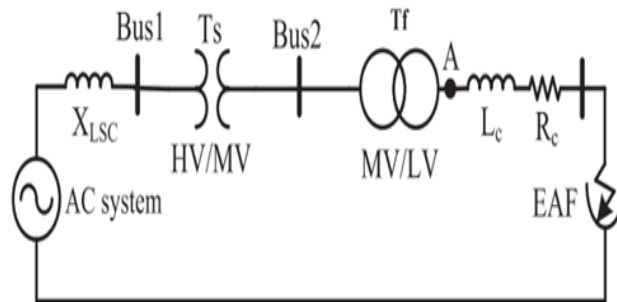
پیشنهادی که یک کنترل کننده PI مرتبه کسری (FOPI) است پیاده سازی می شود و برای بررسی عملکرد سیستم آنالیز هارمونیک صورت می گیرد. در آخر برای بررسی مزایای کنترل کننده پیشنهادی، نتایج با حالتی که کنترل کننده PI معمولی در سیستم قرار دارد مقایسه و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر می باشد کلیه شبیه سازی ها در محیط نرم افزار MATLAB صورت می گیرد.

۲. پیشینه پژوهش

در مرجع [۵] به مدل سازی کوره قوس الکتریکی و محاسبه پارامترهای آن با استفاده از شبکه عصبی پرداخته اند. در این مرجع پارامترهای طراحی کوره قوسی و تخمین پارامترها با توجه به مشخصات کوره قوسی با استفاده از شبکه عصبی صورت گرفته است که نتایج به دست آمده از مدل نشان دهنده تطابق بالای آن با مدل واقعی کوره قوسی می باشد. در مرجع [۶] با استفاده از جبران ساز SVC به کاهش فلیکر ولتاژ و هارمونیک در یک سیستم قوس الکتریکی متصل به شبکه قدرت پرداخته اند. در این مرجع به منظور کنترل سیستم از روش کنترل تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی استفاده شده است که نتایج شبیه سازی نشان می دهد عملکرد سیستم کنترلی در کاهش فلیکر و هارمونیک ولتاژ مناسب می باشد. در مرجع [۷] به تحلیل هارمونیک کوره قوس الکتریکی با ارائه یک روش جدید به نام پریدوگرام پرداخته اند. در این روش که بر اساس معادلات ریاضی ارائه شده است، مقدار هارمونیک های تزریقی توسط کوره قوس الکتریکی و کیفیت توان شبکه محاسبه می شود. نتایج به دست آمده از این روش دقت بالای آن را نشان می دهد. در مرجع [۸] انواع روش های محاسبه هارمونیک در سیستم هایی که به تزریق هارمونیک به سیستم قدرت می پردازند را بررسی کرده و بهترین روش دارای دقیق ترین جواب را تحلیل FFT اعلام می کند که نزدیک ترین مقدار به محاسبات عملی را نشان می دهد. در مرجع [۹] به ارائه روش های مختلف مدل سازی کوره قوس الکتریکی بررسی تاثیر هارمونیک و اعوجاجی آن ها بر سیستم قدرت پرداخته اند. در این مرجع روش های تحلیل هارمونیک با استفاده از روابط تحلیل بررسی شده که هر یک از روش ها دارای دقت متفاوتی می باشند. در مرجع [۱۰] به ارائه روش تحلیلی با استفاده از روابط حاکم بر کوره قوس الکتریکی به منظور محاسبه پارامترهای مربوط به مدل کوره قوسی با استفاده از نتایج به دست آمده از یک کوره قوس الکتریکی واقعی پرداخته اند. در این مرجع برای یک نمونه کوره آزمایشگاهی مدل سازی صورت گرفت و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی نشان دهنده دقت بالای مدل ارائه شده می باشد. در مرجع [۱۱] به ارائه ساختار کنترل کننده PID مرتبه کسری و معادلات مربوط به این نوع کنترل کننده ها پرداخته اند. در این مرجع با مقایسه این کنترل کننده با PID معمولی، معایب و مزایای کنترل کننده های تناسبی مرتبه کسری ارائه شده است. در تحقیقی مشابه در مرجع [۱۲] به ارائه راهکارهای مناسب جهت کنترل و تنظیم پارامترهای کنترل کننده تناسبی مرتبه کسری پرداخته اند. در مرجع [۱۳] عملکرد فیلتر مرکب از نظر کاهش هارمونیک و فلیکر ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفت. فیلتر مرکب شامل یک فیلتر پسیو LC شانت است که به یک فیلتر توان اکتیو سری (SAPF) مبتنی بر مبدل PWM منبع ولتاژ با نرخ اسمی کمتر متصل می باشد. عملکرد فیلتر مرکب (CF) از نظر بهبود کیفیت توان در نقطه اتصال مشترک (PCC) با فیلتر پسیو مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت و شبکه توزیع EAF متعارف به همراه PF و فیلتر CF شبیه سازی شد تا عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳. اثر کوره قوس الکتریکی بر شبکه قدرت

انرژی الکتریکی در اثر قوس به انرژی حرارتی تبدیل می گردد و در نتیجه مواد شارژی کوره، گرم و سپس ذوب می شود. در این کوره ها با بالا بردن توان الکتریکی ترانسفورماتورهای کوره، نه تنها میزان هدر رفتن انرژی را کاهش می دهند، بلکه ازدیاد توان ترانسفورماتور، باعث کوتاه تر شدن مدت زمان ذوب و در نتیجه اقتصادی تر شدن تولید فولاد نیز شده است. با توسعه روز افزون صنعت فولاد و مجتمع های ذوب فلز در کشور، اهمیت کوره های قوس الکتریکی و بررسی آثار ناشی از اتصال کوره های قوس الکتریک این کارخانه ها به شبکه سراسری برق هر چه بیشتر مشهود می گردد. شکل (۱) مدل غیرخطی الکتریکی مربوط به کوره قوس الکتریکی را نشان می دهد.

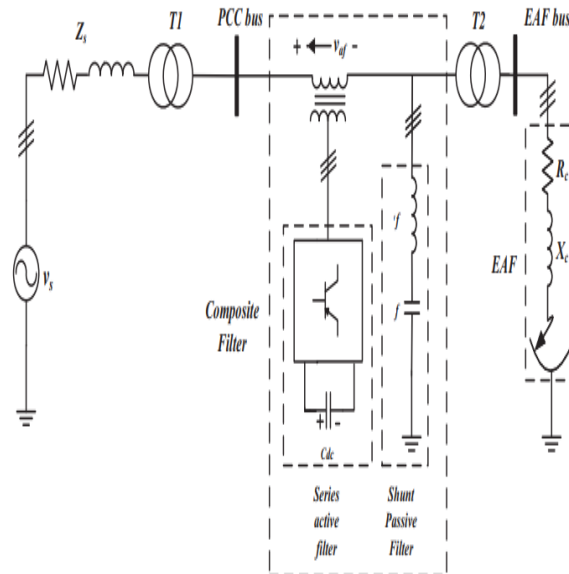


شکل ۱- مدل غیر خطی الکتریکی مربوط به کوره قوس الکتریکی [۱۴]

از آنجا که فیلتر ولتاژ ایجاد شده توسط این کوره‌ها بر سیستم‌های حفاظتی و مخابراتی سیستم انتقال نیرو و همچنین بر مشترکین و مصرف‌کننده‌های تغذیه شده از نقطه کویلاژ مشترک (PCC) اثرات سوء و مزاحمت‌های به وجود می‌آورد، لذا پیش‌بینی شدت این آثار در مرحله طراحی و مکان‌یابی شینه مناسب برای تغذیه آن بسیار مهم و ضروری است. در سال‌های اخیر با توسعه هر چه بیشتر مجتمع‌های ذوب فلز و اتصال کوره‌های قوس الکتریک به شبکه سراسری، مسئله فلیکر ولتاژ ناشی از این کوره‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۴].

۴. ساختار سیستم مورد مطالعه

در این مقاله هدف بررسی سیستم شکل (۲) می‌باشد که شامل کوره قوس الکتریکی، فیلتر هیبرید و سیستم کنترلی است.



شکل ۲- ساختار کلی سیستم مورد مطالعه [۱۳]

مدل مربوط به کوره قوسی از نوع مدل کاسی مایر^۴ می‌باشد که در ادامه به معرفی و نحوه مدل‌سازی آن می‌پردازیم.

⁴ cassie-mayer

۱.۴. مدل سازی کوره قوس الکتریکی

یکی از مهم ترین روش های مدل سازی کوره قوس استفاده از معادلات کاسی مایر است. ثابت شده است که مدل کاسی پیشنهاد خوبی برای مدل سازی قوس با جریان زیاد است و مدل مایر برای مدل سازی قوس با جریان کم مناسب است. مدل کاسی مایر برای رنج جریان از صفر تا ده ها کیلو آمپر استفاده می شود [۱۵]. مدل کاسی به صورت زیر مدل سازی می شود.

$$G_C(t) = \frac{u(t)i(t)}{E_0^2} - \theta \frac{dG_C(t)}{dt} \quad (1)$$

$$E_0 = A + B_1(t)$$

که در این رابطه E_0 ولتاژ لحظه ای مربوط به قوس دائمی (مربوط به لحظه پایدار شدن قوس) و θ ثابت زمانی یون زدایی قوس است که برابر انرژی ذخیره شده تقسیم بر نرخ اتلاف انرژی پر یونیتی قوس است و $i(t)$ و $u(t)$ مسیر حرکت جریان و ولتاژ قوس را نشان می دهد. در رابطه مربوط به E_0 ولتاژ به ثابت های A و B و طول قوس l بستگی دارد. معادله مایر به صورت رابطه (۲) است.

$$G_M(t) = \frac{i^2(t)}{E_0^2} - \theta \frac{dG_M(t)}{dt} \quad (2)$$

یک راه ترکیب رابطه های بالا و ایجاد یک رابطه جدید تعریف یک فاکتور انتقال $\sigma(i)$ است. دامنه جریان کوره قوس بسیار متغیر است و بنابراین تابع توزیع آن به صورت زیر است، که بر اساس دامنه مدل جریان به علاوه وزن قوس مناسب است.

$$\sigma(i) = e^{\frac{i^2}{I_0^2}} \quad (3)$$

$$G = (1 - \sigma(i))G_C + \sigma(i)G_M$$

که G_C و G_M مقدار کندوکتانس های به دست آمده از رابطه های کاسی و مایر است. که در اینجا ما جریان گذار انتقال حالت) یا جریان محدود است. زمانی که i کوچک است، مقدار $\sigma(i)$ نزدیک به ۱ است و در رابطه G مقدار G_M (اندوکتانس رابطه مایر) مسلط است. زمانی که مقدار خیلی بزرگی دارد، $\sigma(i)$ مقدار ناچیزی دارد و در نتیجه در رابطه G مقدار G_C (اندوکتانس رابطه کاسی) مسلط است. با این حال یک مقدار ناچیز کندوکتانس در زمان قوس بین الکترودها وجود دارد. مقدار این کندوکتانس ثابت برابر G_{min} است که به فاصله بین الکترودها، شکل هندسی الکترودها و نوع گاز و دما بستگی دارد [۱۶]. مدل کامل به صورت رابطه روبرو به دست می آید:

$$G = G_{min} + \frac{ui}{(A + Bl)^2} \left(1 - e^{\frac{i^2}{I_0^2}} \right) + \frac{i^2}{P_0} e^{\frac{-i^2}{I_0^2}} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (4)$$

$$I = GV$$

دامنه جریان قوس به ثابت زمانی یون زدایی بستگی دارد که به صورت معادله زیر است، که از یک جزء ثابت θ_0 و یک جزء متغیر θ_1 و جریان قوس و ثابت α به دست می آید. در فرم کلی، θ تابعی از جریان قوس است:

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 e^{\frac{\alpha}{|i|}} \quad (5)$$

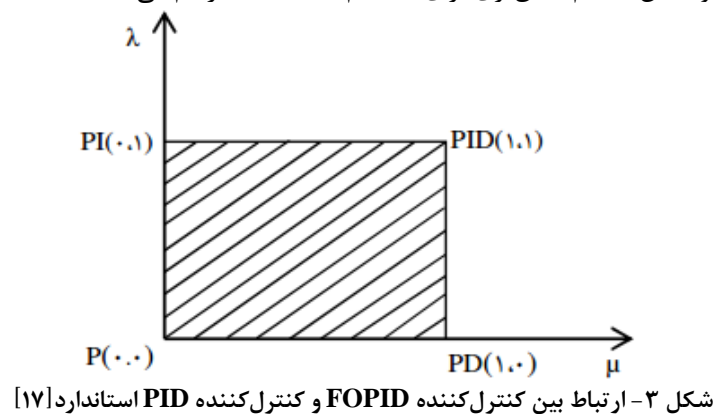
که در این رابطه $0 < \alpha$ و $\theta_1 \gg \theta_0$ است.

۲.۴. ساختار کنترل کننده مرتبه کسری

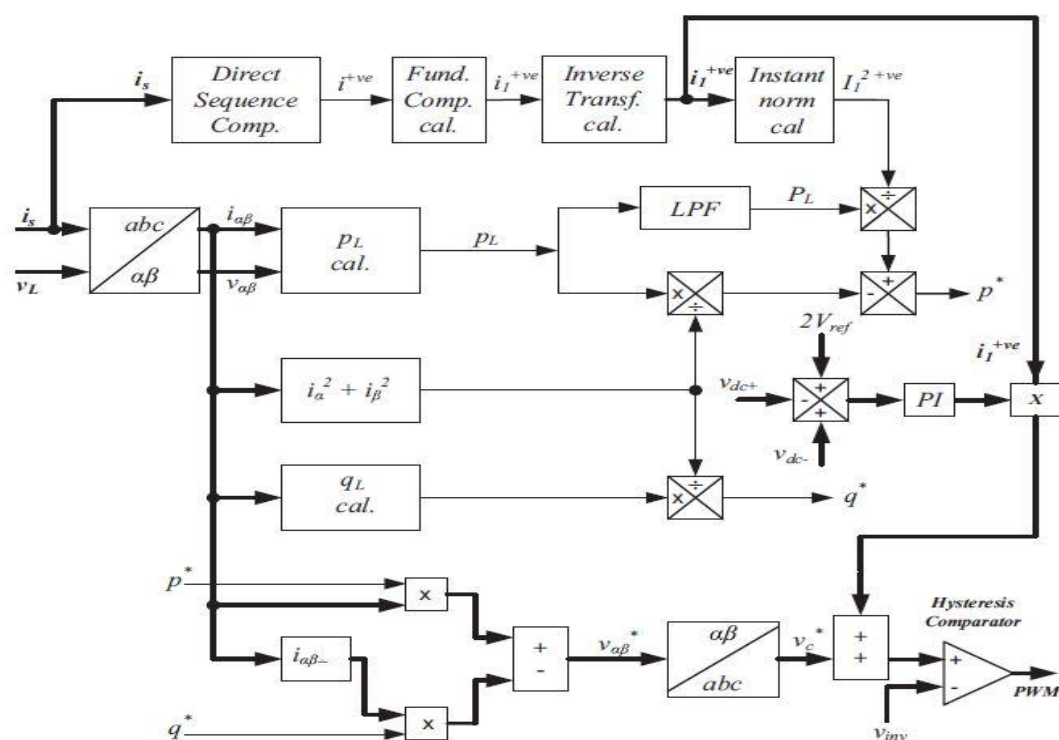
همان گونه که بیان شد در این مقاله از کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده می شود. در واقع در این روش به روش مرتبه کسری با توجه به شرایط و عملکرد سیستم ضرایب کنترل کننده PID تنظیم می شوند که این سبب بهتر عمل کردن این کنترل کننده در رنج وسیعی از عملکرد سیستم مورد مطالعه می گردد. در ادامه بخش های مختلف سیستم کنترلی که شامل کنترل کننده PID و PID مرتبه کسری می باشد پرداخته می شود و بلوک دیاگرام سیستم در این مقاله تشریح می شود. یکی از روش های توسعه کنترل کننده های PID کلاسیک، استفاده از کنترل کننده های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می باشد. حسابان کسری (مشتق و انتگرال گیری با مرتبه کسری) یک مبحث ریاضی با بیش از ۳۰۰ سال سابقه تاریخی می باشد اما اخیراً در حوزه علم و مهندسی به شدت مورد استقبال قرار گرفته است. حسابان کسری پتانسیل هایی برای درک بهتر پدیده هایی از جمله نوسانات کم، هرج و مرج، اشاعه و انتشار امواج، نفوذ و برگشتناپذیری را نشان داد. کنترل کننده ها و سیستم های دینامیک مرتبه کسری بر اساس حسابان مرتبه کسری می باشند. در سال ۱۹۹۹ پودلوبنی تعمیمی از کنترل کننده های PID به نام PID مرتبه کسری را بیان نمود و اثر بخشی چنین کنترل کننده هایی را بر روی پاسخ محرک سیستم های مرتبه کسری نشان داد. معادله دیفرانسیلی کنترل کننده FOPID به صورت رابطه (۶) می باشد [۱۷].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^{\mu} e(t) \quad (6)$$

واضح است که برای کنترل کننده FOPID علاوه بر پارامترهای K_p ، K_i و K_d دو پارامتر λ و μ نیز باید طراحی شوند. اگر پارامترهای λ ، μ به صورت $(0,0)$ ، $(0,1)$ و $(1,0)$ و $(1,1)$ انتخاب شوند از کنترل کننده رابطه (۶) به ترتیب کنترل کننده PI، PD، P، حاصل می شود. ارتباط بین کنترل کننده FOPID و کنترل کننده PID استاندارد در شکل (۳) نمایش داده شده است. بنابراین همان طور که مشاهده می شود کنترل کننده FOPID تعمیم یافته کنترل کننده PID می باشد. کنترل کننده PID مرتبه کسری دارای آزادی بیشتر و امکان تنظیم دقیق تری برای سیستم حلقه بسته فراهم می کند.



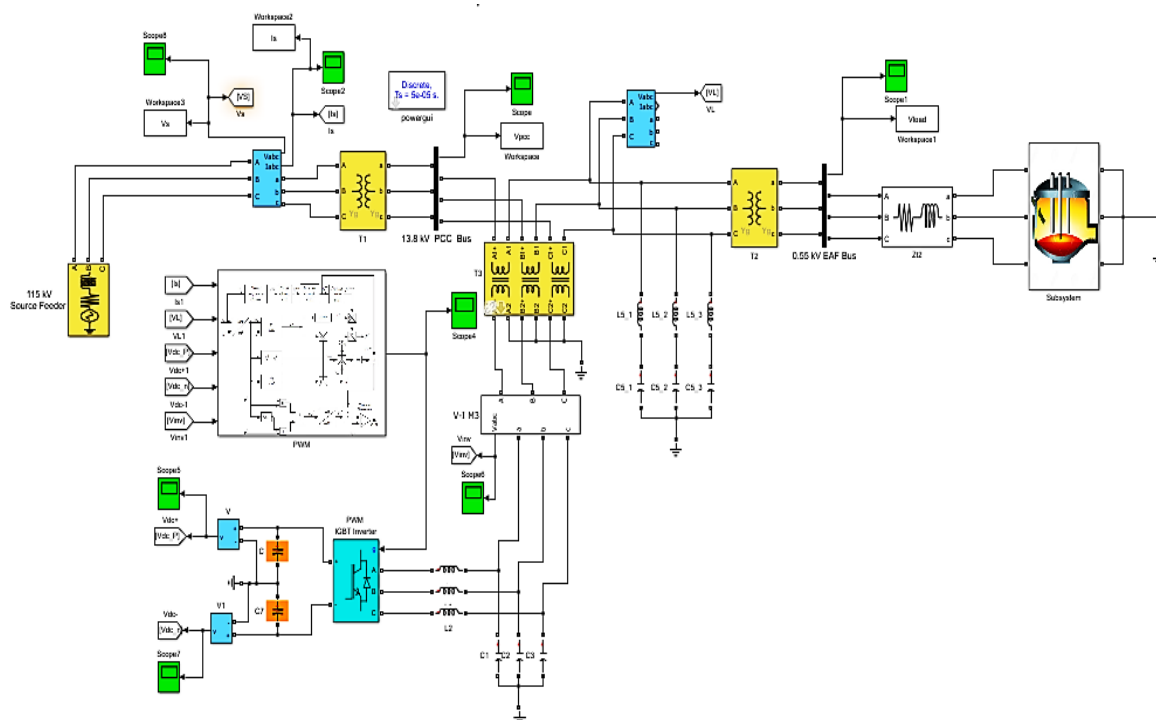
در واقع در کنترل کننده PID معمولی در واقع در چهار حالت P، PI، PD و PID ما تنها محدوده حرکتان محیط شکل (۳) است اما در کنترل کننده FOPID علاوه بر محیط شکل (۳) محدوده حرکت و در نتیجه دقت سیستم افزایش می یابد. به عبارتی دیگر کنترل کننده PID معمولی، یک کنترل کننده FOPID محدود شده و ساده شده است پس دارای دقت کمتری نسبت به FOPID می باشد. مطابق مطالب ارائه شده، بلوک دیاگرام سیستم کنترلی مربوط به فیلتر مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل (۴) می باشد.



شکل ۴- بلوک دیاگرام سیستم کنترلی پیشنهادی

۵. نتایج شبیه سازی

دیگرام و مدل شبیه‌سازی شده سیستم توزیع به همراه کوره قوس الکتریکی در محیط نرم‌افزاری متلب در شکل (۵) نشان داده شده است. سایر اطلاعات مربوط به پارامترهای این سیستم در جدول (۱) آورده شده است.



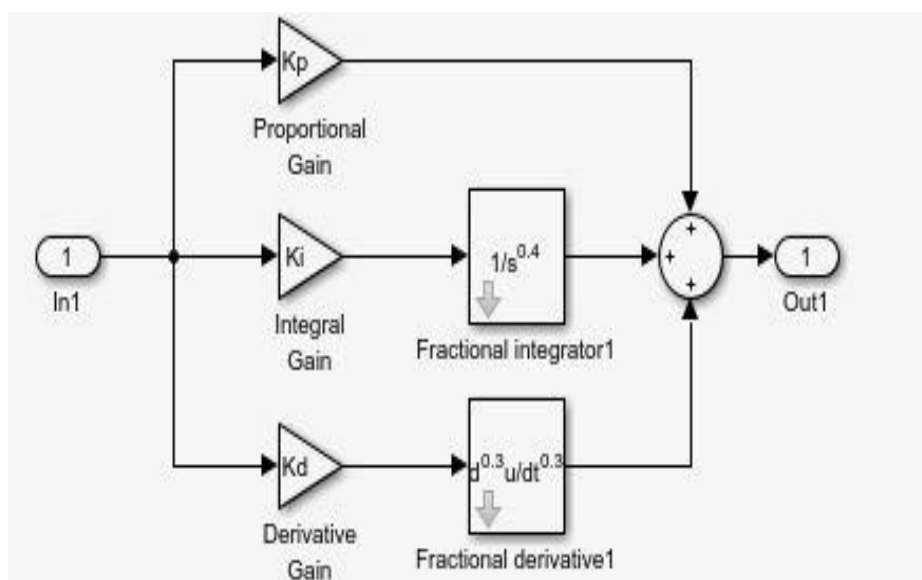
شکل ۵- مدل شبیه سازی شده سیستم توزیع با کوره قوس الکتریکی

در این بخش پارامترهای سیستم شبیه‌سازی در این پژوهش ارائه می‌گردد که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای سیستم شبیه‌سازی [۱۳]

توصیف پارامتر	پارامتر	مقدار
منبع ولتاژ	V_s	۱۱۵ کیلوولت
فرکانس تغذیه	f	۵۰ هرتز
توان ظاهری	S	۱۰۰ مگاوات آمپر
T_1 ترانس	V_p / V_s	۱۱۰ به ۱۳/۸ کیلوولت
		۳۰ مگاوات آمپر
T_2 ترانس	V_p / V_s	۱۳/۲ به ۰/۵۵ کیلوولت
		۴۲ مگاوات آمپر
امپدانس کابل	Z_l	۰/۳۸ میلی اهم
		۸/۵۸۹ میکرو هانری
خازن قسمت dc فیلتر اکتیو	C_{dc}	۲۲۰۰ میکروفاراد

در این بخش، سیستم توزیع پیشنهادی با قراردادن فیلتر مرکب که ترکیبی از پسیو خازنی هارمونیک پنجم و فیلتر اکتیو سری می‌باشد، در شبکه بررسی شده و تحلیل‌های هارمونیک ولتاژ و جریان در نقاط مختلف سیستم اجرا خواهد شد. در ساخت پالس‌های اینورتر فیلتر اکتیو، از کنترلر پیشنهادی PID مرتبه کسری استفاده شده است. مدل شبیه‌سازی شده این کنترلر به همراه جزئیات آن در شکل (۶) و پارامترهای تنظیمی آن در جدول (۲) نشان داده شده است.



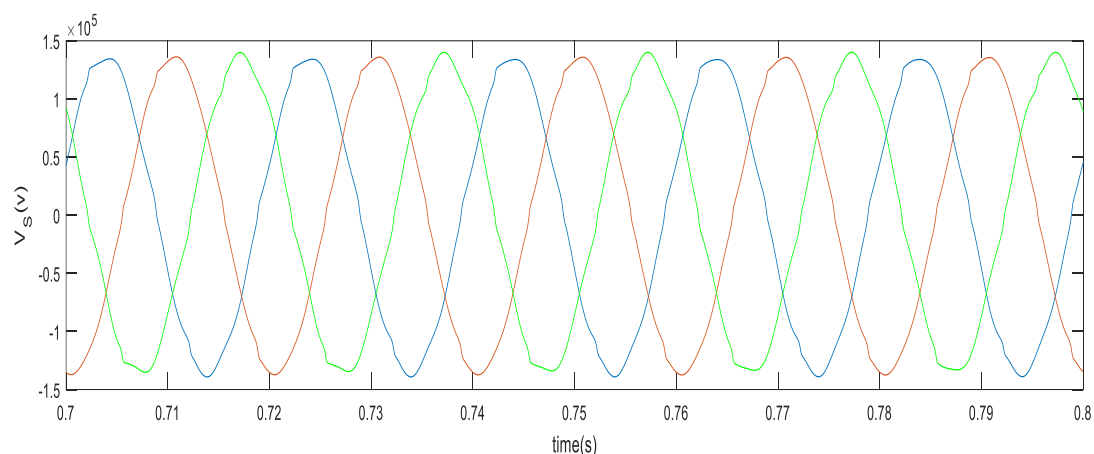
شکل ۶- مدل شبیه‌سازی شده کنترلر پیشنهادی PID مرتبه کسری در محیط MATLAB

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی کنترلر پیشنهادی PID مرتبه کسری

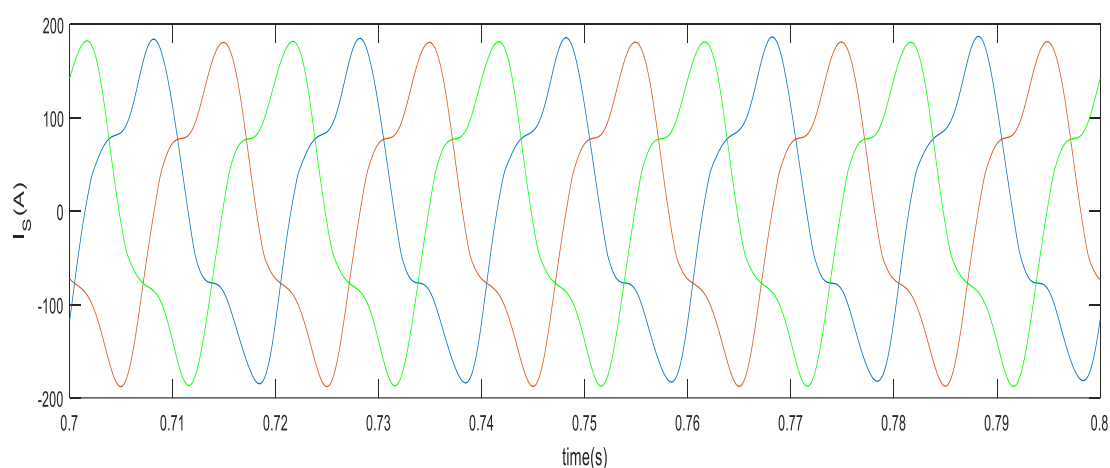
پارامتر	اندازه
K_p	۲.۶
K_I	۱.۶
K_D	۰.۲۴
λ	۰.۴
μ	۰.۳

۱.۵. عملکردی سیستم بدون حضور فیلتر مرکب

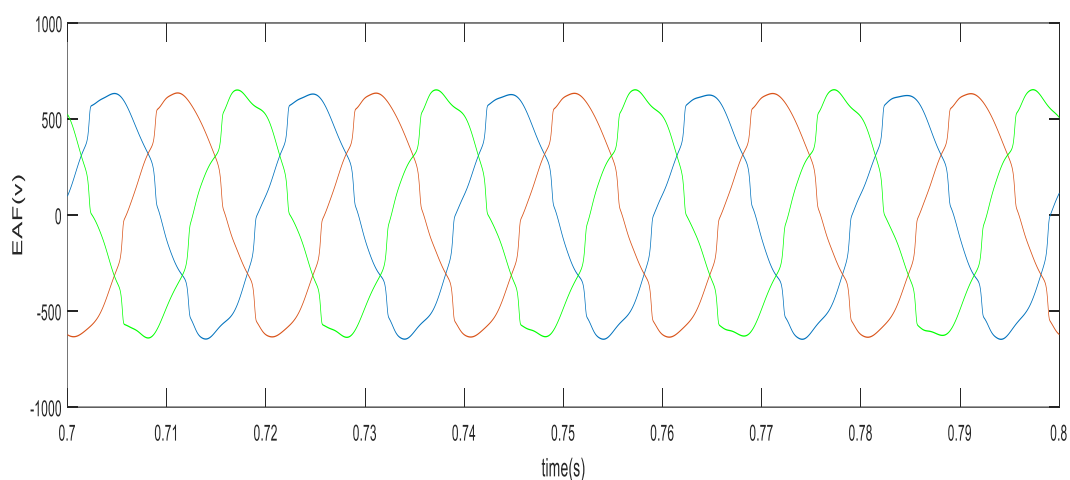
در این قسمت ولتاژ منبع تغذیه، جریان منبع تغذیه، ولتاژ باس EAF و ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC) بدون حضور فیلتر مرکب بررسی شده و نتایج در شکل‌های (۷) الی (۱۰) بیان شده است. لازم به ذکر می باشد که با استفاده از آنالیز FFT در محیط سیمولینک، به تحلیل هارمونیکی جریان و ولتاژ در نقاط مختلف شبکه پرداخته شده است که نتایج آن در جدول (۳) بیان شده است.



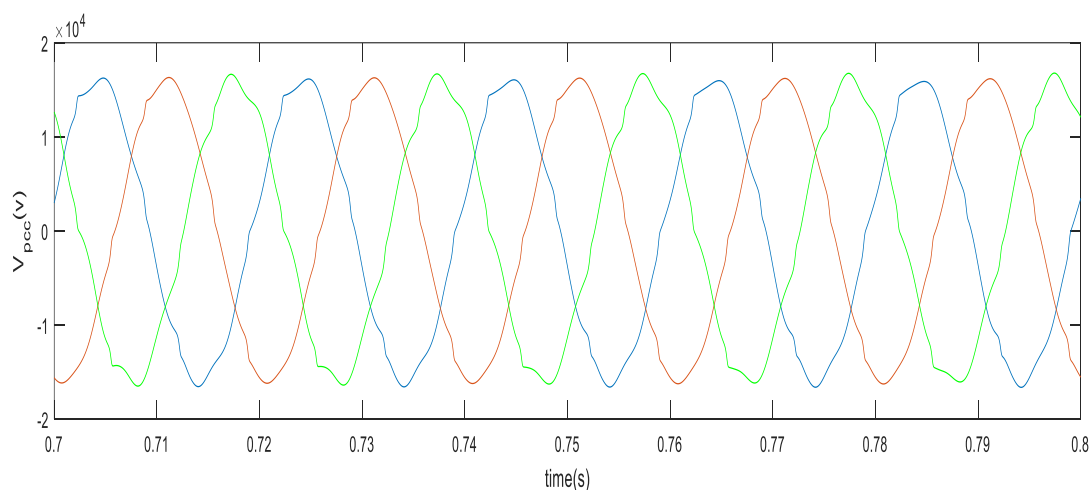
شکل ۷- ولتاژ سه فاز منبع تغذیه در عدم حضور فیلتر مرکب



شکل ۸- جریان سه فاز منبع تغذیه در عدم حضور فیلتر مرکب



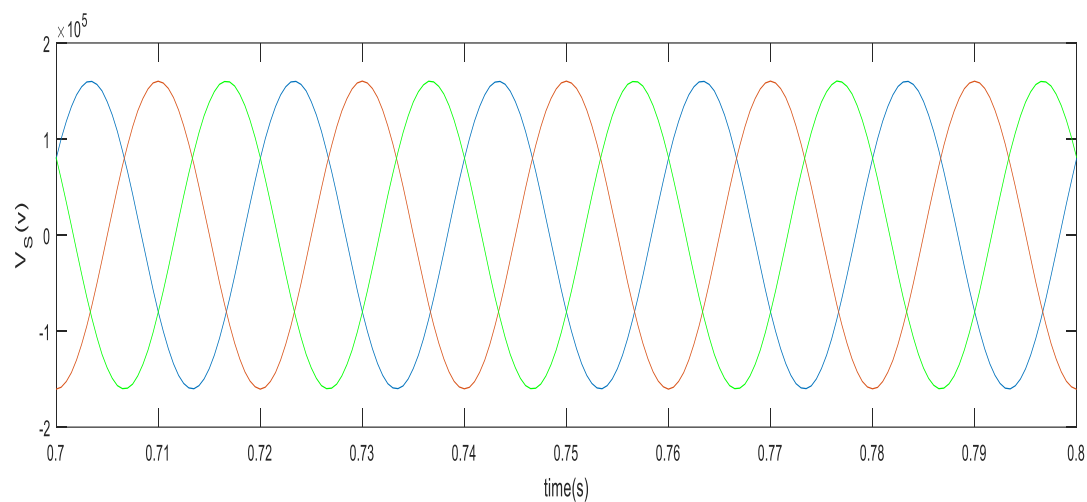
شکل ۹- ولتاژ سه فاز باس EAF در عدم حضور فیلتر مرکب



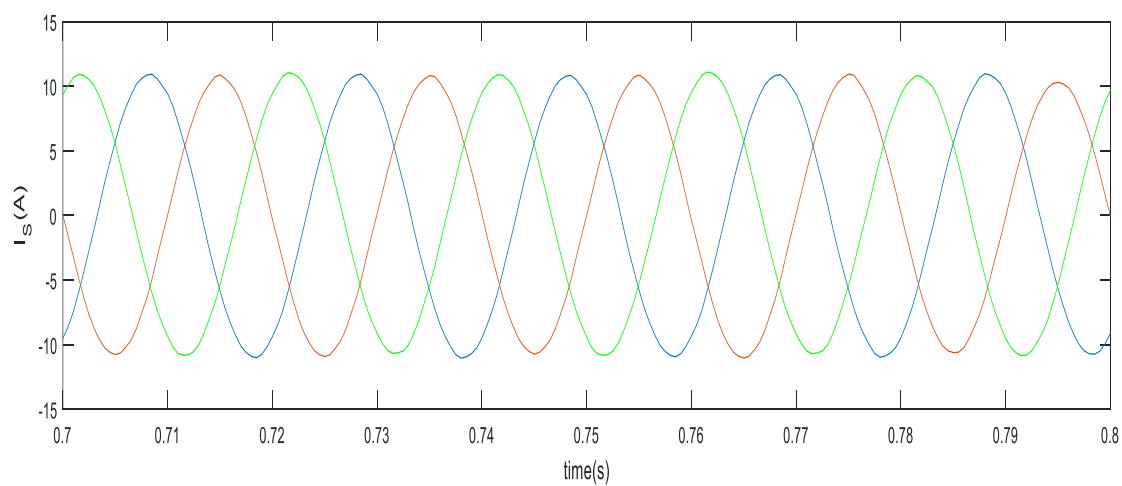
شکل ۱۰- ولتاژ سه فاز باس PCC در عدم حضور فیلتر مرکب

۲.۵. عملکردی سیستم در حضور فیلتر مرکب

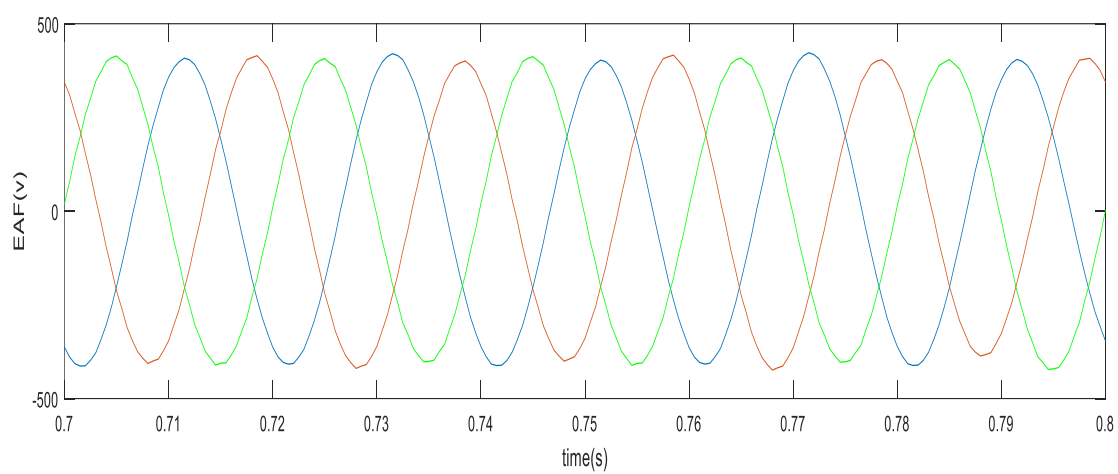
در این قسمت ولتاژ منبع، جریان منبع، ولتاژ باس EAF و ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC) بدون حضور فیلتر بررسی شده و نتایج در شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) بیان شده است. لازم به ذکر می باشد که با استفاده از آنالیز FFT در محیط سیمولینک، به تحلیل هارمونیکی جریان و ولتاژ در نقاط مختلف شبکه پرداخته شده است که نتایج آن در جدول (۳) بیان شده است.



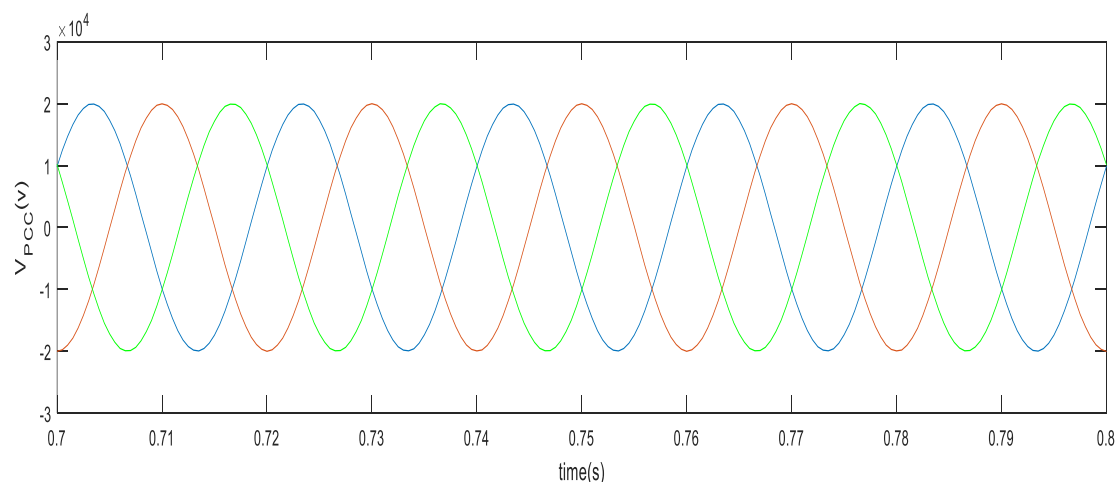
شکل ۱۱- ولتاژ سه فاز منبع تغذیه در حضور فیلتر مرکب



شکل ۱۲- جریان سه فاز منبع تغذیه در حضور فیلتر مرکب

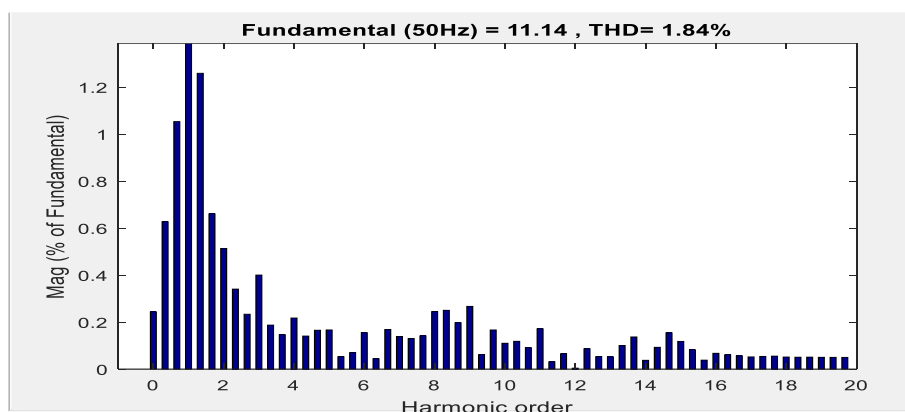


شکل ۱۳- ولتاژ سه فاز باس EAF در حضور فیلتر مرکب

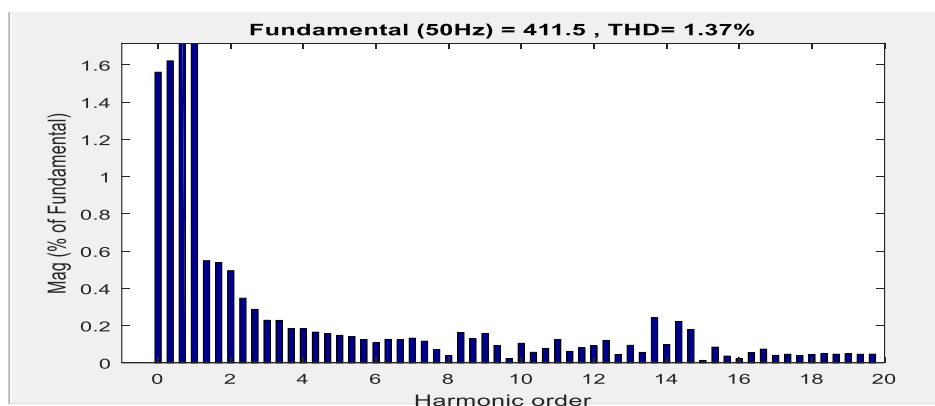


شکل ۱۴- ولتاژ سه فاز باس PCC در حضور فیلتر مرکب

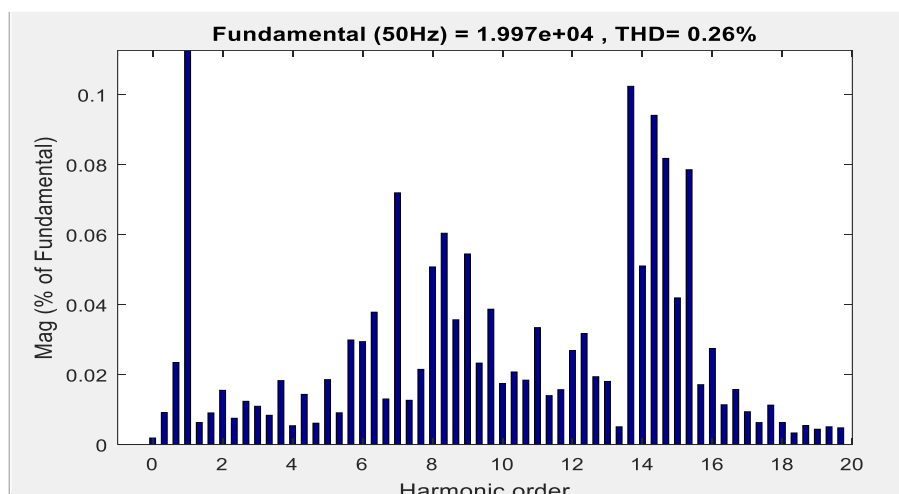
نتایج حاصل از تحلیل FFT هنگام استفاده از فیلتر مرکب در شبکه در شکل‌های (۱۵) الی (۱۸) بیان شده است. همان‌گونه که از نتایج پیداست، زمانی که فیلتر مرکب در شبکه وجود دارد، درصد اعوجاج هارمونیک باس PCC مطابق شکل (۱۷)، به ۰/۲۶ درصد کاهش پیدا می‌کند که نسبت به حالتی که فیلتر حضور ندارد، کاهش چشمگیری داشته است و بهبود کیفیت توان سیستم را نشان می‌دهد.



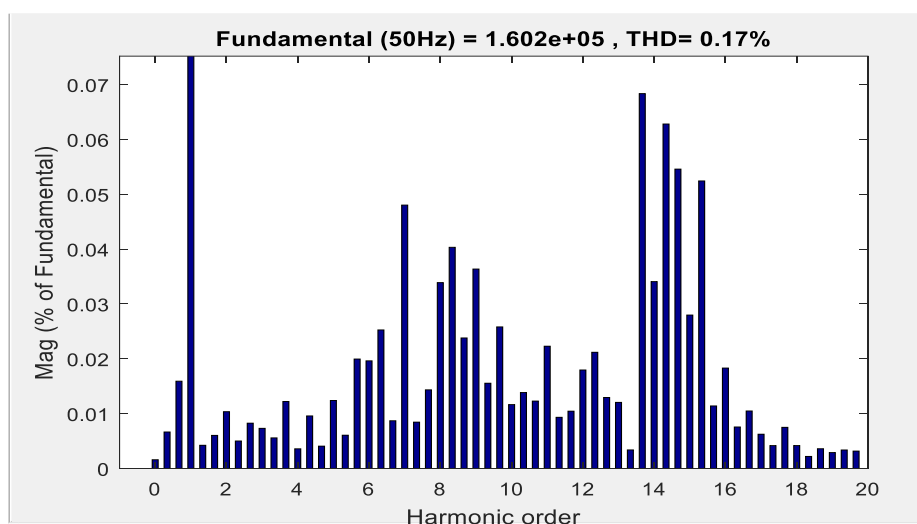
شکل ۱۵- طیف هارمونیک جریانی منبع تغذیه در حضور فیلتر مرکب



شکل ۱۶- طیف هارمونیک ولتاژ باس EAF در حضور فیلتر مرکب



شکل ۱۷- طیف هارمونیکی ولتاژ باس PCC در حضور فیلتر مرکب



شکل ۱۸- طیف هارمونیکی ولتاژ منبع تغذیه در حضور فیلتر مرکب

با توجه به شکل‌های (۱۵) الی (۱۸) مشاهده می‌شود که درصد اعوجاج هارمونیک تقریباً در تمامی نقاط سیستم به کمتر از ۲ درصد رسیده است. دلیل این کاهش چشمگیر، استفاده از فیلتر مرکب به همراه کنترلر پیشنهادی مرتبه کسری می‌باشد که چندین قابلیت مهم از جمله فیلتر کردن هارمونیک‌ها، میرا سازی تشدید هارمونیکی، کنترل توان راکتیو، اصلاح ضریب توان، تنظیم ولتاژ و کاهش فیلکر ولتاژ را به‌خوبی انجام می‌دهد. جدول (۳) آنالیز هارمونیکی جریان منبع I_s ، ولتاژ باس V_s ، EAF و PCC در این مقاله را نشان می‌دهد.

جدول ۳- آنالیز هارمونیکی جریان منبع Is، ولتاژ باس EAF، Vs و PCC

پارامتر	عدم حضور فیلتر مرکب	حضور فیلتر مرکب
THD _{Is} (%)	۱۵/۷۸	۱/۸۴
THD _{EAF} (%)	۱۶/۳۸	۱/۳۷
THD _{Vs} (%)	۸/۰۵	۰/۱۷
THD _{Vpcc} (%)	۱۲/۸۹	۰/۲۶

همان گونه که در جدول فوق مشاهده می شود، نتایج کیفیت توان مربوط به سیستم مورد بررسی در این پژوهش نشان می دهد که فیلتر ترکیبی پیشنهادی در این پژوهش به خوبی توانسته است کیفیت توان شبکه توزیع مورد بررسی در این پژوهش را بهبود دهد به نحوی که میزان THD سیستم مربوط به ولتاژ و جریان در این حالت به شدت کاهش یافته است.

۶. نتیجه گیری

همان گونه که مشاهده شد، در این مقاله هدف بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع کوره قوسی الکتریکی با استفاده از فیلتر مرکب مبتنی بر کنترل کننده PI مرتبه کسری بود و مراحل انجام مطالعات به این صورت انجام گرفت که ابتدا تحلیل هارمونیکی سیستم در هنگام اتصال به شبکه قدرت با استفاده از آنالیز FFT در حالتی که فیلتر هارمونیکی در سیستم قرار ندارد صورت گرفت و سپس فیلتر مرکب (فیلتر پسیو و فیلتر اکتیو) برای سیستم مورد مطالعه در پژوهش طراحی و کنترل کننده پیشنهادی که یک کنترل کننده FOPID است، پیاده سازی شد و برای بررسی عملکرد سیستم، آنالیز هارمونیکی دوباره صورت گرفت. در حالتی که هیچ فیلتری در شبکه حضور ندارد، مشاهده می شود که درصد اعوجاج هارمونیک تقریباً در تمامی نقاط سیستم بیش از ۱۲ درصد می باشد. در این حالت درصد اعوجاج هارمونیکی باس مشترک، ۱۲/۸۹ بوده که درصد بالایی را نشان می دهد و برای سایر بارهای شبکه مشکل ساز خواهد بود. لذا بایستی با طراحی فیلتر مناسب، این اعوجاج را کاهش داد. در حالتی که فیلتر ترکیبی (اکتیو و پسیو) در مدار قرار می گیرد، درصد اعوجاج هارمونیکی باس PCC، به ۰/۲۶ درصد کاهش پیدا می کند که نسبت به حالتی که فیلتر حضور ندارد، کاهش چشمگیری داشته است و بهبود کیفیت توان سیستم را نشان می دهد. بنابراین، نتایج کیفیت توان در این پژوهش نشان می دهد که فیلتر ترکیبی پیشنهادی در این پژوهش به خوبی توانسته است کیفیت توان شبکه توزیع مورد بررسی در این پژوهش را بهبود دهد به نحوی که میزان THD سیستم مربوط به ولتاژ و جریان در این حالت به شدت کاهش یافته است.

۷. منابع

1. Krishna, D., M. Sasikala, and V. Ganesh. "Adaptive FLC-based UPQC in distribution power systems for power quality problems." *International Journal of Ambient Energy* 43.1 (2022): 1719-1729.
2. Manojlović, Vaso, et al. "Machine learning analysis of electric arc furnace process for the evaluation of energy efficiency parameters." *Applied Energy* 307 (2022): 118209.
3. Sahoo, Buddhadeva, Mohammed M. Alhaider, and Pravat Kumar Rout. "Power quality and stability improvement of microgrid through shunt active filter control application: An overview." *Renewable Energy Focus* (2023).
4. Naidu, R. Pavan Kumar, and S. Meikandasivam. "Power quality enhancement in a grid-connected hybrid system with coordinated PQ theory & fractional order PID controller in DPFC." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 21 (2020): 100317.

5. Golestani, Samaneh, and Haidar Samet. "Polynomial-dynamic electric arc furnace model combined with ANN." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 28.7 (2018): e2561.
6. Samet, Haidar, et al. "Enhancement of SVC performance in electric arc furnace for flicker suppression using a Gray-ANN based prediction method." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29.4 (2019): e2811.
7. Yusoff, M. R., et al. "An Analysis of Harmonic and Interharmonic Contribution of Electric Arc Furnace by Using Periodogram." *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 7.6 (2017): 3753.
8. Junior, Oswaldo Hideo Ando, Arturo Suman Bretas, and Roberto Chouhy Leborgne. "Methodology for calculation and management for indicators of power quality energy." *IEEE Latin America Transactions* 13.7 (2015): 2217-2224.
9. Bracale, Antonio, et al. "DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment." 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2020.
10. Solati Alkaran, D., et al. "Parameters estimation of electric arc furnace based on an analytical solution of power balance equation." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 27.4 (2017): e2295.
11. Gupta, Rohit, Sanjay Gairola, and Sanjeet Diwiedi. "Fractional order system identification and controller design using PSO." 2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH). IEEE, 2014.
12. Zhang, Fengxue, et al. "Fractional-order PID controller tuning using continuous state transition algorithm." *Neural Computing and Applications* 29.10 (2018): 795-804.
13. Bhonsle, Deepak C., and Ramesh B. Kelkar. "Performance evaluation of composite filter for power quality improvement of electric arc furnace distribution network." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 79 (2016): 53-65.
14. Logar, Vito. "Modelling and Simulation of the Melting Process in Electric Arc Furnace: An Overview." *Simul. Notes Eur.* 26.2 (2016): 91-98.
15. Bhonsle, Deepak C., and Ramesh B. Kelkar. "New time domain electric arc furnace model for power quality study." 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE). IEEE, 2014.
16. Xiao, Hongxia, Chunfeng Zhu, and Fahui Liu. "Research of power quality management technology according to distribution network involving electric arc furnace." 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Vol. 1. IEEE, 2012.
17. Zamani, Majid, et al. "Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization." *Control Engineering Practice* 17.12 (2009): 1380-1387.

Design and Simulation of Fractional order Proportional Controller in order to Improve Power Quality in Distribution Network with Electric Arc Furnace

Ehsan Akbari

Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology,
Babol, Iran
e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract—The power quality of power systems is one of the concepts that have always been the focus of electrical engineers and specialists. Electrical power quality disturbances of the power system refer to any problem that causes changes in voltage, current or frequency and affects the performance of equipment and consumers. Electric arc furnaces are one of the large loads whose voltage-current characteristics are nonlinear, variable with time and somewhat random. Wide harmonic spectrum, high range of produced harmonics, low power factor and large changes in active and reactive power consumption are among the most important characteristics of this type of loads. One of the ways to overcome problems and harmonic disturbances and improve the power quality of the power system is to use harmonic filters. One of these filters that is used in this article is a composite filter that has several important functions in one place. In this study, the improvement of power quality in the electric arc furnace distribution network has been investigated using a composite filter, which is controlled using a fractional order controller. The obtained results show that in the case where the composite filter (active and passive) is placed in the circuit, the percentage of network harmonic distortion (THD) decreases to 0.26%, which shows the improvement of the power quality of the system. Therefore, the power quality results in this research show that the combined filter proposed in this research has been able to improve the power quality of the distribution network investigated in this research so that the THD of the system related to voltage and current in this case is greatly Dropped.

Keywords: Electric Arc Furnace (EAF), Power Quality, Composite Filter, Fractional Order Controller.