

طراحی و مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی

علی سعیدیان
استادیار

محمود جورابیان
استادیار

مهران نصیرزاده
کارشناس ارشد

دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

این مقاله طراحی و مدلسازی کوره قوس الکتریکی و پدیده‌های مربوط به آن را در قالب یک نرم افزار قدرتمند ارائه می‌نماید. محیط کار این نرم افزار سیمولینک مطلب می‌باشد که با ترکیبی از تولباکس‌های سیستم‌های قدرت، شبکه‌های عصبی، طراحی فیلتر و طراحی نمایشگرها و با استفاده از بلوکهای پرقدرت S-Function بسته‌ای نرم افزاری تهیه شده است. در اینجا از یک روش جدید برای توصیف خاصیت غیرخطی و هیستریزس و متغیر با زمان قوس الکتریکی استفاده شده است. این نرم افزار سیستم کوره الکتریکی سه فاز را بسادگی مانند یک بلوک معمولی سیمولینک همراه با قابلیت های مختلف و تنظیم پارامترهای آن درمی‌آورد. همچنین قابلیت اعمال نویز سینوسی و نویز سفید همراه تنظیمات آن تعبیه شده است. چندین بلوک دیگر نیز طراحی شده‌اند که عبارتند از بلوک فلیکرمتر استاندارد، هارمونی‌سنج بیستگانه و اندازه‌گیر پارامترهای سه فاز. بدین ترتیب با امکانات موجود بسادگی می‌توان هرگونه آرایش کوره‌ها و شبکه الکتریکی و تجهیزات را بررسی نمود و بهترین نقطه کار را بدست آورد و نیز می‌توان میزان اختلال شبکه را با توجه به شرایط مختلف مورد بررسی قرار داد.

کلمات کلیدی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، کوره‌های قوس الکتریکی، فلیکر، سیمولینک مطلب

Design and Modelling of Electrical Arc Furnaces

M. Joorabian
Assistant Professor

A. Saedian
Assistant Professor

M. Nasiri
Msc. Engineering
Shahid Chamran University,
Department of Electrical Engineering

Abstract

Design and modelling of electrical arc furnaces and their dynamic behaviour is presented in this paper. With this view, a powerful software package has been designed based on Matlab Simulink, using Matlab toolboxes and S-Function blocks. This package is capable of easily modelling different electrical arrangements of arc furnaces and their related effects such as harmonics and flicker. Therefore, a three-phase furnace was designed as a simulink block and neural networks were used to estimate the hysteresis model of the electric arc. Standard flickermeter (UIE) and harmonymeter Simulator have also been designed as an independent block in this package.

Keywords

Artificial Neural Networks (ANNs), Electrical Arc Furnaces, Flicker, Harmonics, Matlab Simulink.

اساس کار کوره قوس برقراری قوس الکتریکی میان الکترودهایی از جنس گرافیت و مواد ذوب شونده در دیگ ذوب می‌باشد. در کوره‌های dc و تکفاز جریان الکتریکی از طریق الکتروده، قوس و ظرف مذاب راه خود را می‌بندد و در کوره سه فاز این جریانها از طریق مواد مذاب مسیر خود را بسته و بین سرهای الکترودها ردوبدل می‌شوند.

قوس الکتریکی مدام در دیگ ذوب تغییر مسیر داده و می‌چرخد و طول آن کم و زیاد می‌شود. بنابراین یک بار متغیر با زمان، غیرخطی و نیز نامتعادل بوجود می‌آید. نحوه چرخش و تغییرات طول قوس اتفاقی بوده و قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. البته هر قدر مواد حالت مذاب و مایع تر بخود گیرند، قوس پایدارتر بوده و دامنه تغییرات آن کاهش می‌یابد. شناسایی محدوده تغییرات شکل موج جریان و ولتاژ کوره قوس و همچنین الگوی شکلی آن همواره مورد توجه بوده و سعی بر آن می‌باشد که احاطه بر آن بعمل آید. فرم کلی تغییرات و نوسانها همیشه ثابت بوده و از این فرم برای بررسی جبران کننده‌ها و اختلالات استفاده می‌شود.

مسئله اساسی در مدلسازی کوره قوس الکتریکی، شبیه‌سازی قوس الکتریکی می‌باشد که تاکنون روشهای مختلفی برای آن ارائه شده است. برای توصیف قوس الکتریکی قبلا از روشهای گوناگونی شامل معادلات تعادل حالت ماندگار [۱ و ۲]، روش آنالیز در حوزه زمان [۳]، روشهای مبتنی بر مشخصه ولتاژ - جریان [۴ و ۵] و نیز معادله بالانس انرژی [۶] استفاده شده است. یکی از مهمترین مزیت‌های یک مدل می‌تواند سادگی بکارگیری آن جهت شبیه‌سازی باشد و یکی از نقض‌های هر مدل می‌تواند تقریب زیاد و همچنین پیچیدگی آن باشد.

یک روش، مدل معادلات حالت در حالت ماندگار می‌باشد [۱ و ۲]، این روش برای کارهای محاسباتی و فرمولی بسیار جالب است ولی عیب آن این است که اولاً جریان سه فاز را متعادل در نظر گرفته و همچنین برای شکل موج V-I قوس، مدل کاملاً تقریبی پله را بکار برده است. روش دوم، روش آنالیز در حوزه زمان [۳] است که با در نظر گرفتن منبع ولتاژ هارمونیکی برای فرمولبندی و برآورد پارامترها از طریق ریاضی کاربرد دارد. در این روش نیز شکل منحنی ولتاژ - جریان قوس بصورت پله ای بکار رفته است. اما برخلاف روش اول، این روش برای جریان نامتقارن سه فاز کوره قوس نیز کاربرد دارد. روش دیگر معادله بالانس انرژی است [۶] که با توجه به شرایط درونی و محیطی کوره، مشخصه استاتیکی قوس را مدل می‌کند ولی مشخصه دینامیکی آن را مدل نمی‌کند.

روشهای دیگری بر پایه مشخصه ولتاژ - جریان (VIC¹) وجود دارد که اصطلاحاً VIC نامیده می‌شود. در همه آنها این مشخصه که از نوع هیستریزس است بوسیله روابطی خاص تخمین زده می‌شود. در یک مورد برای مراحل روشن شدن و خاموش شدن قوس دو مقاومت الکتریکی مختلف در نظر گرفته می‌شود [۵]، که البته منحنی ولتاژ - جریان بکار رفته در آن تقریبی است. در نوع ساده شده آن از قسمت پایین هیستریزس صرف‌نظر می‌شود و فقط یک منحنی واحد برای آن در نظر گرفته می‌شود [۴] که تقریب ضعیفتری بدست می‌آید. در روشی دیگر، قسمت بالا و پایین منحنی هیستریزس بوسیله دو تابع نمایی مدل می‌شوند [۴] که از دو روش بالا دقیقتر می‌باشد. لازم بذکر می‌باشد که در همه این مدلها فرم کلی شکل موج ثابت در نظر گرفته شده و توسط معادلات ریاضی خاص خود تخمین زده می‌شود.

در این مقاله شیوه جدیدی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدلسازی قوس الکتریکی ارائه شده است. در این شیوه از اصل مشخصه ولتاژ - جریان بجای تخمین بوسیله روابط ریاضی استفاده شده است. در صورت تغییر شکل موج که در اثر تغییر شرایط حاصل می‌شود، شکل موجهای خاص همان وضعیت را می‌توان در نظر گرفت. در اینصورت با توجه به امکانات جعبه ابزار شبکه عصبی در سیمولینک مطلب، قادر خواهیم بود از تمامی قابلیت‌های سیمولینک برای مدل کردن قوس الکتریکی در حالت‌های مختلف استفاده کنیم. با گسترش ساخت بلوکهای شبیه‌سازی در نهایت مدلی از سیستم کوره قوس سه فاز تهیه گردیده که مسئله تغییرات طول قوس و نویزهای استاندارد، نیز در آن منظور گردیده است و پارامترهای مختلف و شکل موجها و هارمونیکیهای مربوطه در آن براحتی قابل اندازه گیری می‌باشد.

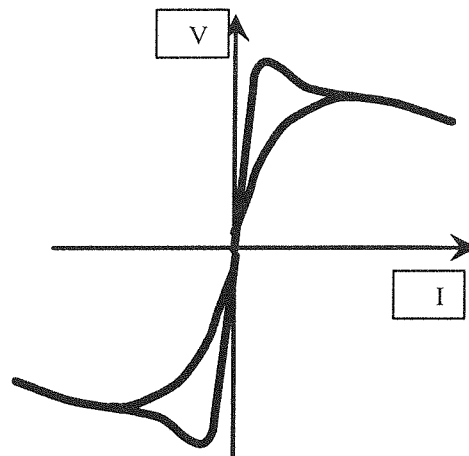
بنابراین برای مدل کردن پدیده‌های فوق و اندازه گیری اختلالات ناشی از آن، بلوک‌هایی در سیمولینک مطلب شبیه سازی شده است تا بتواند آرایش‌های مداری مختلف کوره در حضور ادوات دیگر شبکه را بررسی نماید. همچنین ادوات شبیه سازی ۲۰ هارمونی اول، نمایش میله‌ای آنها و مدلسازی وسیله سنجش پدیده فلیکر نیز طراحی گردیده است. لازم بذکر است

فلیکر، اختلالات ولتاژی است که روی نور لامپها تاثیر می گذارد [۷و۴]. بلوکهای شبیه سازی در قالب مدولهای سیمولینک در یک فایل کتابخانه ای بنام alib0241 قرار داده شده اند و برای هر گونه کاربرد می توان با کلیک روی مدول مورد نظر آنرا برداشت و در هر مدار دلخواه قرار داد.

در شروع مقاله ابتدا به خاصیت غیر خطی قوس پرداخته می شود و سپس روش مدل کردن آن و بلوک بدست آمده برای آن ارائه می گردد. آنگاه با استفاده از این بلوک، یک بلوک کوره سه فاز همراه ادوات مربوط به آن باضافه قسمت‌های مربوط به تنظیم نویز و پارامترهای دیگر کوره تهیه می گردد. این بلوک تحت عنوان بلوک سیستم کوره سه فاز در فایل کتابخانه ای گفته شده قرار داده شده است. سپس بلوک هارمونی سنج بیستگانه و پس از آن بلوک فلیکرمتر توضیح داده خواهد شد. در نهایت این مقاله با استفاده از مجموعه ای از تجربیات و توصیفات ریاضی و بکارگیری نرم افزار توانمند سیمولینک مطلب مدلی مداری، عملی و نسبتاً عام از عملکرد کوره قوس الکتریکی در قالب یک نرم افزار ارائه می نماید.

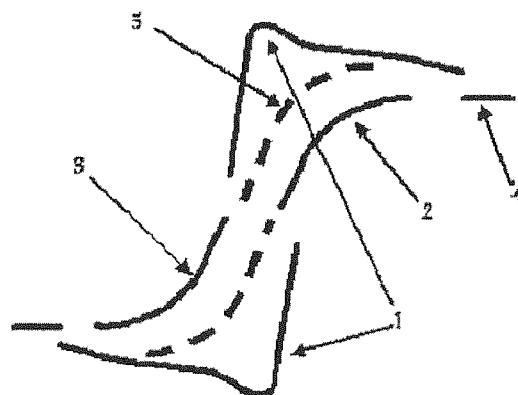
۱- منحنی V-I قوس الکتریکی

شکل (۱) طرح کلی یک قوس الکتریکی را نمایش می دهد. منحنی مورد بحث یک شکل کاملاً غیر خطی دارد که از یک هیستریزس خاص پیروی می کند [۴-۶]. نقطه شروع و بسیار حساس در شبیه سازی کوره، مدل کردن این منحنی می باشد.



شکل (۱) منحنی V-I مدل قوس الکتریکی.

قسمت بالای منحنی هیستریزس مراحل روشن شدن قوس، قسمت پایین آن مسیر خاموش شدن آن و قسمت‌های خارج از حلقه بیانگر مراحل تثبیت قوس است. بنابراین مسئله اساسی در مدلسازی کوره در نظر گرفتن خاصیت غیرخطی و هیستریزس این منحنی می باشد. برای مدل کردن منحنی قوس آنرا به چهار قسمت اصلی تقسیم میکنیم. شکل (۲) این چهار قسمت را نمایش میدهد.



شکل (۲) تقسیم بندی قسمت های مختلف منحنی V-I.

برای هر کدام از این چهار قسمت بلوکی طراحی کرده‌ایم که قسمت مربوطه را پردازش نماید. یعنی منحنی پاسخ آن با قطعه مربوطه یکی باشد و ابزاری نیز طراحی می‌کنیم که در مواقع مناسب، بلوک متناسب با آن وضعیت را فعال نماید و در نتیجه دائماً یکی از این قطعات منحنی فعال می‌باشد.

در ضمن مسیر پنجمی نیز وجود دارد که در زمانی که قوس چرخه کامل خود را طی نمی‌نماید، منحنی از این مسیر برگشت می‌کند. یعنی اگر قبل از رسیدن به جریان نقطه تقاطع منحنی، جریان مدار شروع به کاهش نماید، برگشت منحنی V-I به صفر از این مسیر خواهد بود. این مسیر بر خلاف منحنی‌های قبلی که برای یک طول قوس معین ثابت می‌باشد به هیچ وجه ثابت نیست و بسته به نقطه بازگشت تغییر می‌کند. الگوریتمی هم برای یافتن این مسیر طراحی می‌نماییم که در قسمت ۴ مقاله به آن پرداخته خواهد شد.

قبل از پرداختن به بحث بلوکهای شبیه‌سازی متذکر می‌گردیم که دامنه منحنی‌های ذکر شده بر حسب طول قوس (فاصله الکترونها از ظرف مذاب) تغییر می‌کند [۸]. تغییرات ولتاژ قوس نسبت به تغییر طول قوس از رابطه (۱) پیروی می‌کند [۴].

$$Va = K \cdot V_{a0} (Ia)$$

$$K = \frac{Vat(L)}{Vat(L_0)} = \frac{A + B.L}{A + B.L_0} \quad (1)$$

$$Vat = A + B.L$$

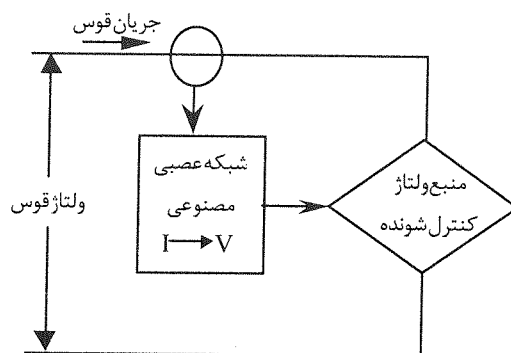
که در آن L_0 طول قوس مرجع و L طول قوس متغیر می‌باشد A و B ضرایب ثابت، V_{a0} ولتاژ قوس در طول قوس L_0 است. از این روش برای تغییر کلی منحنی در اثر تغییر طول قوس استفاده می‌نماییم.

۲- شبیه‌سازی عملکرد منحنی V-I کوره قوس الکتریکی

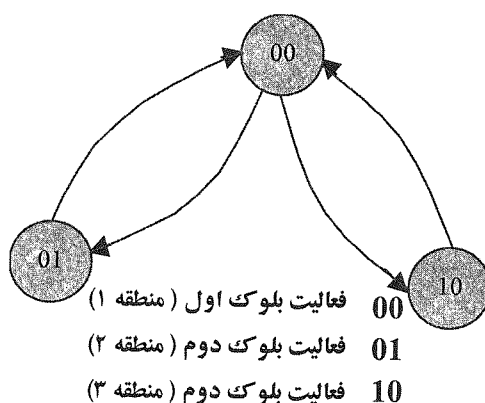
برای مدلسازی منحنی V-I کوره قوس الکتریکی از سیمولینک مطلب با بکارگیری تولباکسهای سیستم‌های قدرت^۲، شبکه‌های عصبی^۳ و طراحی فیلتر^۴ استفاده شده است [۱۱].

برای برآزش قسمت بالای منحنی قوس (شکل ۲) یک شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پیش‌خور^۵ با ساختار (۱، ۷، ۴) و برای قسمت پایین آن از یک شبکه عصبی دیگر با آرایش (۱، ۵، ۱۰) استفاده شده است. جهت آموزش شبکه‌های عصبی از هر یک از قسمت‌های منحنی قوس حدود ۵۰ نقطه انتخاب شده است و نقاط مابین آنها نیز جهت تست شبکه‌ها بکار می‌روند. منحنی حاصل از اعمال این نقاط به شبکه در حالت تست با منحنی اصلی کاملاً تطابق دارد. توابع خروجی نرونها همگی از نوع tansig انتخاب شده است و از الگوریتم trainlm که دارای پاسخ سریع و دقیق می‌باشد استفاده می‌شود. بعد از پیدا شدن وزنها و مقادیر ثابت شبکه، این شبکه عصبی توسط مطلب بصورت یک بلوک مستقل وارد سیمولینک یا محیط شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین با استفاده از امکانات وسیع سیمولینک، انواع عملیات کاربردی جهت توسعه کارایی مدل روی آن صورت می‌گیرد [۱۲]. در اینجا دو بلوک عصبی را طراحی کرده که یکی قسمت ۱ منحنی و دیگری قسمت‌های ۲ و ۳ آنرا مدل می‌کند. برای قسمت‌های ۲ و ۳ بعلاوه شباهت فقط یک بلوک طراحی شده است. نمایش بلوکی عملکرد شبکه‌های عصبی در شکل (۳) تشریح شده است. بنابراین، شبکه‌های عصبی رابطه بین جریان و ولتاژ قوس را برقرار می‌کنند. نمونه‌های منحنی V-I قوس توسط شبکه‌های عصبی تقریب زده می‌شوند و شبکه‌های عصبی به منبع ولتاژ کنترل شونده فرمان می‌دهند تا نمودار ولتاژ - جریان قوس ساخته شود.

برای تشخیص اینکه منحنی در هر لحظه در کجای مسیر هیستریزس قرار دارد، یک مدار کنترل منطقی طراحی شده است که مکان لحظه‌ای را روی منحنی هیستریزس تعیین نموده و بلوک عصبی مربوطه را فعال می‌کند. این مدار منطقی یک دیاگرام حالت است که توسط رجیستر و آرایه منطقی (PLA^۶) ساخته می‌شود. این بلوک کنترل مراحل قوس را بر عهده دارد. دیاگرام حالت مورد استفاده مطابق شکل (۴) است.



شکل (۳) نمایش بلوکی عملکرد شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی منحنی $V-I$ قوس الکتریکی.



شکل (۴) مدار کنترل منطقی برای فعال نمودن بلوک‌های عصبی.

حالت 00 مربوط به فعال شدن بلوک شبیه‌ساز منحنی روشن شدن (قسمت بالایی منحنی) و حالات 01 و 10 مربوط به بلوک شبیه‌ساز منحنی خاموش شدن است. تغییر حالت این دیاگرام توسط سنسورهای صورت می‌گیرد که حالت گذر از صفر جریان و گذر از ماکزیمم را کشف نموده و به واحد PLA گزارش می‌نماید. ورودی بلوک کنترل مراحل قوس از ۴ بلوک اندازه‌گیر و دو رجیستر ثبت حالت فعلی (01, 10, 00) تامین می‌شود. بلوکهای اندازه‌گیر، رسیدن وضعیت $V-I$ را به نقاط برخورد منحنی هیستریزس آشکار می‌سازند. خروجی این بلوک کنترل نیز همان دو رجیستر ثبت حالت است که در نهایت فرمان آن بصورت دو سیگنال بالا (UP) و پایین (Down) مربوط به عملکرد هر یک از بلوکهای عصبی می‌باشد.

۱-۲ - مسیر بازگشت میانبر

در صورتیکه جریان برقرار شده قوس به حدی نباشد که چرخه هیستریزس کامل شود، قوس بین راه از مسیر غیر متعارف به صفر بر می‌گردد. بنابراین مسیر بازگشت قوس، از مسیر بین نقطه شروع تا صفر در نظر گرفته می‌شود که شکل آن شبیه به منحنی زیرین و عرض از مبدا آن متناسب با فاصله نقطه شروع تا منحنی زیرین هیستریزس باشد. برای در نظر گرفتن این حالت نیز یک بلوک دیگر بنام بلوک کنترل بازگشت طراحی گشته است. این بلوک یک زیر سیستم برنامه‌ریزی شده توسط یک برنامه اجرایی در سیمولینک مطلب (m.file-s function) است.

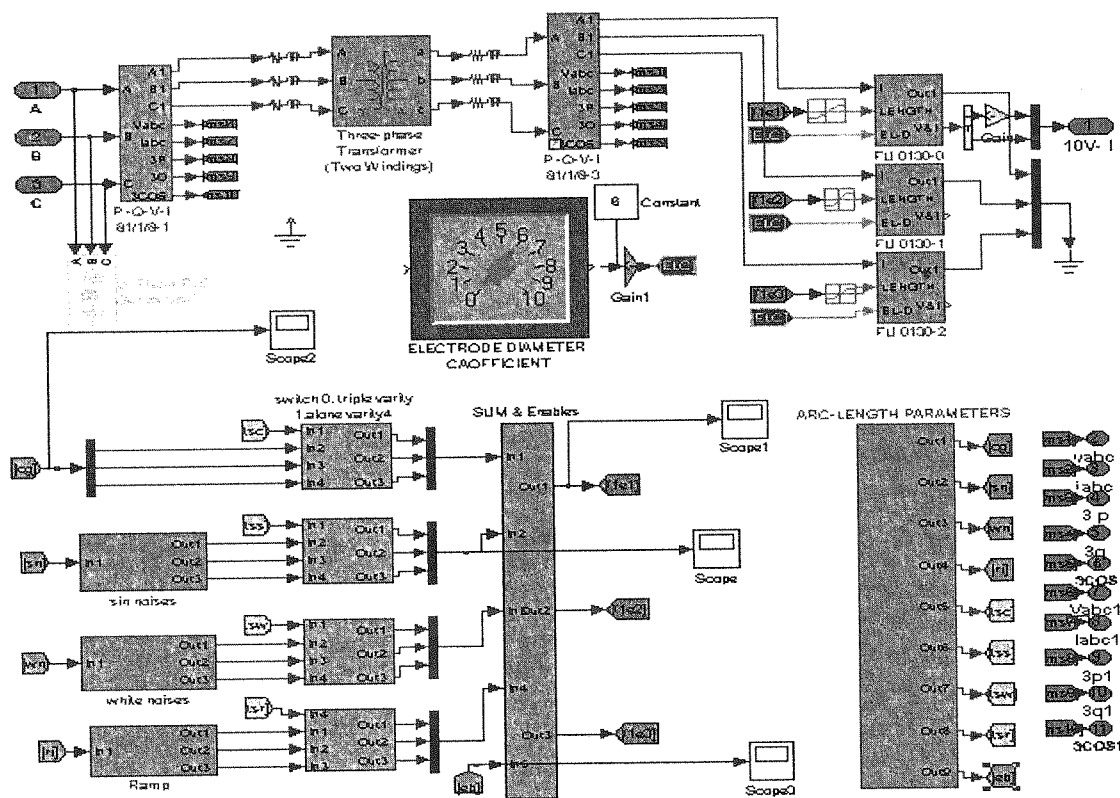
۳- بلوک کوره سه فاز

این بلوک به صورت یک بسته در فایل کتابخانه‌ای ALIB02041 قرار دارد. مطابق شکل (۵) ورودی‌های آن خطوط سه فاز 33 kV بوده و خروجی آن پارامترهای مختلف اندازه‌گیری مربوط به هر سه فاز می‌باشد. با کلیک آن پنجره‌ای باز می‌شود. در

این پنجره سه بلوک قوس تکفاز ترانس اشباع شونده و توابع سازنده نویز و تنظیمات آن نمایان است. نمای تفصیلی این بلوک در شکل (۵) آمده است.

نکته مهم در بررسی کوره‌های قوس، تغییرات طول قوس الکتریکی با فاصله الکترودها تا ظرف مذاب است. مشخصات $V-I$ قوس بسته به طول قوس هر یک از سه الکتروود تغییر می‌کند. بدلیل عوامل مختلف این فاصله پایدار نمی‌باشد و دائماً تغییر می‌کند. بنابراین باید بتوانیم در مدل خود تغییرات نامنظم طول قوس را مدل کنیم. در اینجا از دو نمونه استاندارد نویز سینوسی و نویز سفید استفاده کرده‌ایم که دامنه، فرکانس و زاویه در آنها قابل تنظیم است. بعلاوه تابع پله و شیب نیز در آنها گنجانده شده است.

با کلیک کردن روی قسمت تنظیمات نویز، پنجره ای دیگر باز می‌شود که یک سری شستی در آن نمایان شده است. با انتخاب هر شستی، نویز خاصی فعال می‌شود. البته کلیه شستی‌ها را می‌توان بصورت همزمان نیز بکار برد. توابع پله، نویز سینوسی، نویز سفید و شیب واحد می‌توانند به طول قوس اعمال شوند. با کلیک روی هر کدام از زیر سیستم‌های تنظیم طول قوس، صفحه‌ای از سلکتورها باز می‌شود که بسادگی از طریق آن می‌توان به صورت بلادرنگ مقادیر طول قوس را حین شبیه‌سازی تغییر داد.



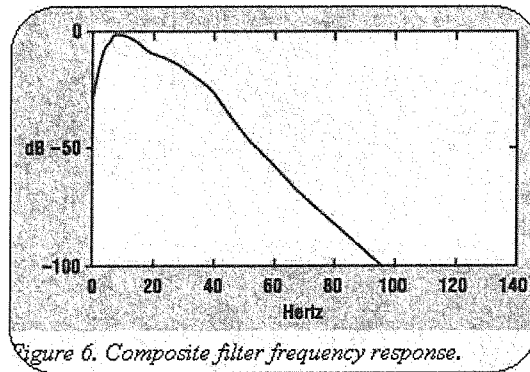
شکل (۵) نمای تفصیلی تنظیمات طول قوس و نویزهای آن.

۴- اختلالات الکتریکی ناشی از کوره قوس

کوره قوس الکتریکی از عوامل اصلی تولید اختلالات الکتریکی در شبکه است. اختلالات ولتاژی ناشی از تغییرات اتفاقی طول قوس، فرکانسهایی در حدود ۰/۵ الی ۲۵ هرتز دارد. فلیکر عبارت است از تغییرات نور لامپها ناشی از اختلالات ولتاژ که می‌تواند روی سیستم بینایی انسان اثر بگذارد [۷و۴]. تغییرات ولتاژی به میزان کم حدود ۳٪ در فرکانس ۸/۸ هرتز می‌تواند بوسیله ۵۰٪ مردم احساس شود [۹]. شکل (۶) منحنی حساسیت چشم انسان را نمایش می‌دهد. همچنین کوره‌قوس یک بار شدت غیر خطی است که جریانهای هارمونیک تولید می‌کند و بسته به امپدانس شبکه، هارمونیک ولتاژ شبکه را بالا می‌برد، و در حالت رزونانس شبکه، این ولتاژها بسیار زیاد می‌شوند و باعث اختلال یا خرابی در تجهیزات متصل به شبکه می‌شود [۱۰، ۱۱]. برای بررسی دو پدیده فوق دستگاه فلیکر متر و هارمونی سنج شبیه‌سازی شده‌اند.

۴-۱- شبیه‌سازی هارمونی سنج

در فایل کتابخانه‌ای ALIB02041 بلوک دیگری نیز طراحی شده است که هارمونی‌سنج بیستگانه نام دارد و در صورت وصل سیگنال به این بلوک، بیست هارمونی اول آن شناسایی می‌شود و با کلیک کردن روی آن، پنجره‌ای باز می‌شود که در قسمت بالای آن برآیند اعوجاج هارمونیکی (THD⁷) لحظه‌ای و متوسط [۱۰ و ۱۲] نشان داده می‌شود. در پایین پنجره نیز یک شستی وجود دارد که با دو بار فشار روی آن هارمونی‌های بیستگانه همراه مقدار متوسطشان بصورت دیاگرام میله‌ای نشان داده می‌شود. جهت طراحی اندازه گیر متوسط و همچنین نمایش دادن میله‌ای از برنامه نویسی در بلوکهای تابعی S-function استفاده شده است.



شکل (۶) منحنی حساسیت چشم انسان نسبت به ولتاژ.

۴-۲- شبیه سازی فلیکرمتر

بلوک دیگری نیز طراحی گردیده است که میزان فلیکر ناشی از اعوجاجات دامنه با فرکانسهای ۰/۵ الی ۲۵ هرتز را مطابق با استاندارد IEC 868 (1986) اندازه‌گیری می‌کند.

برای تامین این استاندارد، از سیگنال مورد نظر نمونه‌گیری می‌شود و با به توان رساندن آن و چندین مرحله فیلتر کردن سیگنال، میزان درصد تغییرات سیگنال بدست خواهد آمد [۹]. با گذر این سیگنال از یک فیلتر خاص که پاسخ آن مطابق با منحنی حساسیت چشم در مقابل تغییرات نور لامپ رشته‌ای، ناشی از تغییرات ولتاژ است (شکل ۶) و ثابت زمانی ماندگاری تصویر در مغز و چشم، یک سیگنال خالص بنام دقت فلیکر کوتاه مدت (P_{st}^8) دست می‌آید.

در نهایت از طریق روش آماری، درصد P_{st} برحسب در صد زمانهای نمونه برداری محاسبه می‌گردد. یعنی برای هر درصد از زمانها، یک مقدار عددی خاص داریم که P_{st} همواره در آن، از آن مقدار کمتر است. درصدهای مهم عبارتند از: 10، 3، 1.0، 0.1 و 50. بنابراین مقدار P_{st} استاندارد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_{st} = (0.031P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s})^{1/2}$$

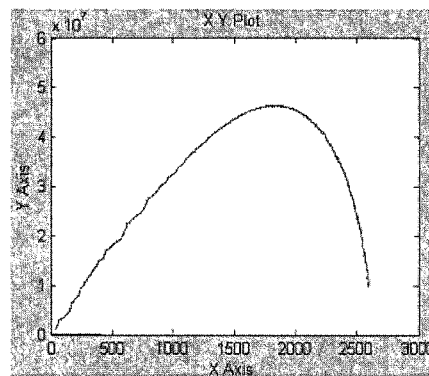
این رابطه در واقع برازش همان منحنی حساسیت فلیکر می باشد. که در آن $P_{0.1}$ ، P_1 ، P_3 ، P_{10} و P_{50} سطحهای فلیکری هستند که برای 10، 3، 1.0، 0.1 و 50 درصد از کل زمان مشاهده پشت سرگذاشته شده‌اند. اندیس s در رابطه فوق به معنی استفاده از مقادیر صاف شده⁹ می‌باشد.

۵- ارزیابی منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی

نمونه‌ای از کاربرد بلوکهای شبیه‌سازی و منحنی‌های بدست آمده در این قسمت ارائه شده است. در اینجا با استفاده از امکانات نرم افزار طراحی شده، نمونه‌ای از پارامترهای مختلف یک کوره در حال کار را در برخی حالات انتخابی بدست آورده، تا نشان دهیم که با مدلسازی‌های انجام شده، متغیرهای مختلف الکتریکی کوره قوس بسادگی قابل دسترسی می‌باشند. لازم به ذکر است که، کاربردهای این نرم افزار بسیار گسترده‌تر از منحنی‌های ارائه شده است. پارامترهای شبکه مورد نظر و ترانس بصورت زیر انتخاب گردیده است:

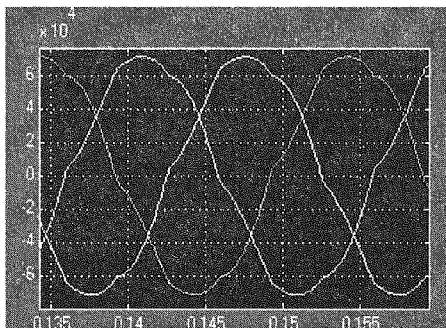
امپدانس تونن ورودی	$0.007 + 0.5j$ (p.u)
امپدانس راکتور قبل از ترانس	$0.1 + 1.4j$ (p.u)
امپدانس اتصال کوتاه ترانس	$0.01 + 0.1j$ (p.u)
قدرت نامی ترانس	120 (MVA)
آرایش ترانس	مثلث / ستاره زمین نشده
نسبت تبدیل	33/1.2 kV

ابتدا با اضافه کردن طول قوس بصورت مستمر بوسیله تابع شیب، منحنی جریان - توان کوره مطابق شکل (۷) بدست می‌آید. بنابراین در یک جریان خاص، ماکزیمم توان حاصل می‌گردد. توسط نرم افزار می‌توان دریافت که این مربوط به طول قوس ماکزیمم: $L_{max} = 29.3$ cm است. این نقطه بهترین ضریب قدرت را نتیجه می‌دهد. از طرفی مشاهده می‌شود که کم کردن طول قوس بیش از این مقدار باعث افزایش جریان همراه کاهش توان می‌گردد که باعث اتلاف امکانات و افزایش تلفات خواهد شد.

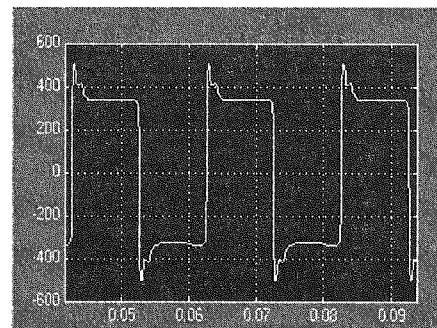


شکل (۷) منحنی جریان - توان کوره.

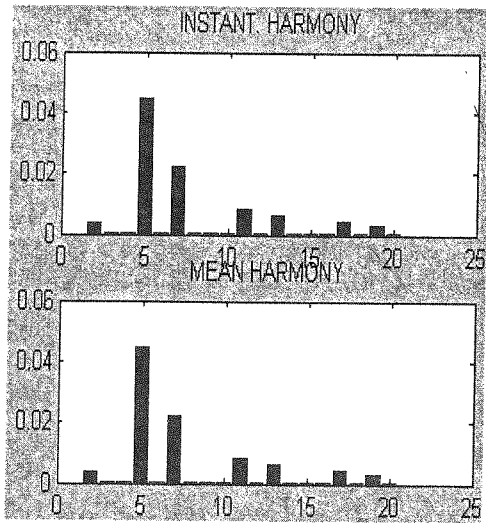
شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب منحنی شکل موج ولتاژ و جریان قوس در نقطه ماکزیمم را نشان می‌دهد و شکل‌های (۱۰) و (۱۱) هارمونی ولتاژ در اولیه و ثانویه ترانس در نقطه کار ماکزیمم را نمایش می‌دهد. بعلت متقارن در نظر گرفتن سیستم، حذف هارمونیهای مضرب ۳ در اولیه با توجه به آرایش ترانس کاملاً مشهود است. در منحنی‌های ۱۲ و ۱۳، موجهای ولتاژ در اولیه و ثانویه را بعد از اعمال نویز سینوسی نامتقارن به طول قوس مشاهده می‌کنیم. نوسانات دامنه در اولیه ترانس در شکل (۱۲) کاملاً مشخص است که همین عامل موجب فلیکر ولتاژ می‌شود. اشکال (۱۴) و (۱۵) هارمونی‌های مربوط به این دو ولتاژ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بعلت عدم تقارن ناشی از نویز سینوسی، هارمونی‌های مضرب ۳ نیز توانسته‌اند از آرایش مثلث ترانس فرار کنند. نتایج بدست آمده بوضوح توانایی نرم افزار ارائه شده در تعیین انواع منحنی‌ها و شکل موجها در نقاط مختلف مدار را نمایش می‌دهد.



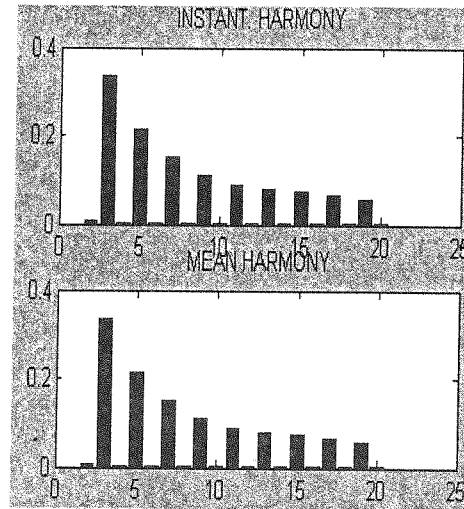
شکل (۹) شکل موج جریان دو سر الکترودها در نقطه کار ماکزیمم توان.



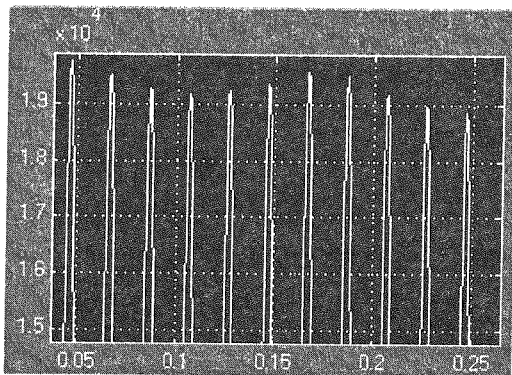
شکل (۸) شکل موج ولتاژ دو سر الکترودها در نقطه کار ماکزیمم توان.



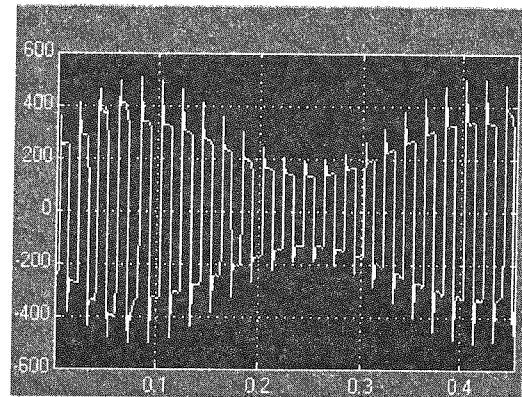
شکل (۱۱) هارمونی های جریان طرف اولیه ترانس در نقطه کار ماکزیمم



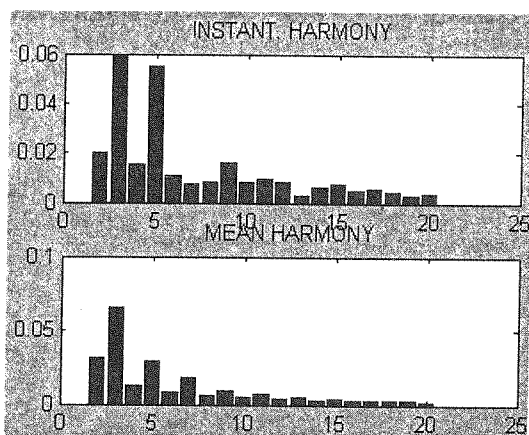
شکل (۱۰) هارمونی های ولتاژ طرف اولیه ترانس در نقطه کار ماکزیمم



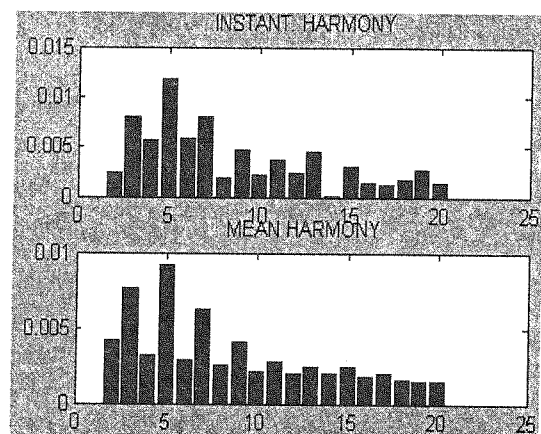
شکل (۱۳) تغییرات ولتاژ طرف اولیه در اثر نویز سینوسی در طول قوس



شکل (۱۲) تغییرات ولتاژ قوس در اثر نویز سینوسی در طول قوس

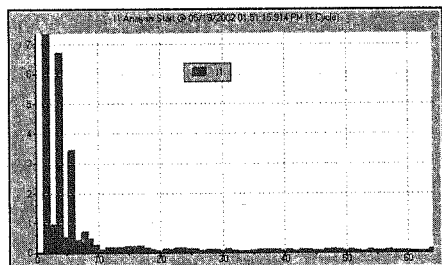


شکل (۱۵) دامنه بیست هارمونی اول جریان قوس بعد از اعمال نویز

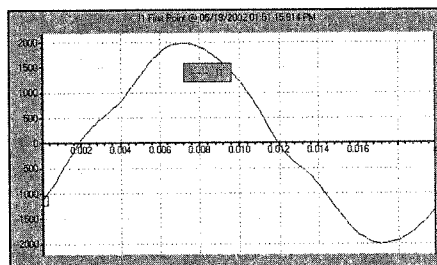


شکل (۱۴) دامنه بیست هارمونی اول ولتاژ قوس بعد از اعمال نویز

اشکال بدست آمده از شبیه‌سازی مطابقت زیادشان را با منحنی های واقعی نشان می‌دهد [۱۲]. به عنوان نمونه شکل (۱۶) و شکل (۱۷) منحنی جریان اولیه ترانس و هارمونی‌های آن که توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری نصب شده بطور واقعی ثبت گردیده است را نمایش می‌دهد، که مشابهت آنها با منحنی‌های شبیه سازی شده درخور توجه است. شرایط تولید موج اگر در تنظیمات مدار شبیه‌سازی آورده شود، آنگاه شکل‌های واقعی و شبیه‌سازی شده بسیار به هم نزدیک خواهند بود.



شکل (۱۶) هارمونی‌های واقعی جریان اولیه ترانس



شکل (۱۷) منحنی واقعی جریان اولیه ترانس

۶- نتیجه گیری

این مقاله طراحی و مدلسازی کوره قوس الکتریکی و پدیده‌های مربوط به آن را در قالب یک نرم‌افزار قدرتمند ارائه می‌نماید. محیط کار این نرم افزار سیمولینک مطلب بوده و از برخی تولباکسهای آن استفاده می‌نماید. مراحل مختلف شبیه‌سازی مدل قوس با بکارگیری نرم افزار سیمولینک شرح داده شده است و کلیه بلوکهای تشکیل دهنده نرم‌افزار و تنظیمات آنها تشریح گردیده است. بعلاوه مدل دستگاههای اندازه گیری هارمونیک و فلیکر ارائه شده است. به طور کلی نکات برجسته در این مقاله و قابلیت‌های نرم افزار به شرح زیر می‌باشد.

- ۱- ارائه الگویی جدید برای مدل کردن قوس الکتریکی
- ۲- طراحی بسته‌ای نرم افزاری برای مطالعات هارمونیک شبکه
- ۳- پیش بینی مقدار فلیکر شبکه
- ۴- پیش‌بینی نقاط کار بهینه با توجه به آرایشهای مختلف مداری
- ۵- قابلیت انعطاف زیاد و عدم وابستگی به موقعیتهای خاص
- ۶- امکان بکارگیری و تعبیه منحنی‌های $V-I$ قوس کاملتر در آینده
- ۷- میزان نوسانات و اختلالات با توجه به نوع مواد ذوب شونده و سیکلهای مختلف ذوب متفاوت است و توسط نرم افزار براحتی و حین انجام کار قابل اعمال است.

بنابراین، با توجه به امکانات وسیع این نرم افزار در سیمولینک مطلب، مطالعات مربوط به مسائل کوره‌های قوس الکتریکی و سیستم‌های قدرت قابل تحقیق و بررسی می‌باشد. برخی از مسائل و مشکلات مربوط به کوره‌ها شامل موارد زیر می‌باشد.

- ۱- بررسی مدار خازنهای سویچ شونده در عملکرد موازی با مدار کوره‌ها
- ۲- قابلیت طراحی جبران کننده های استاتیک توان راکتیو (SVC) و نیز فیلترهای هارمونی مختلف در بهبود عملکرد کوره‌های قوس الکتریکی
- ۳- بهینه سازی مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی به واسطه شناسایی منحنی $V-I$ خاص آنها با استفاده از نرم افزار ارائه شده در این مقاله.

تشکر و قدر دانی

نویسندگان این مقاله مایل هستند از شرکت فولاد خوزستان جهت همکاری صمیمانه در انجام این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی نمایند.

- 1- Voltage-Current Characteristic
- 2- Power System
- 3- Neural Network
- 4- Filter Design
- 5- Multi Layer Feed Forward
- 6- Programmable Logic Array
- 7- Total Harmonic Distortion
- 8- Short-Term Flicker Severity
- 9- Smoothed Value

مراجع

- [1] J.G.Mayordomo, L.F.Beites, R.Asensi, and M.Izzeddine, "A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative Harmonic Analysis" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.4, 1997, PP 1771-1778.
- [2] L.F.Beites, J.G.Mayordomo, A.Hernandez, and R.Asensi, " Harmonics, interharmonics and unbalances of arc furnaces: a new frequency domain approach" IEEE Transactions on Power Delivery; Vol.16, No.4, 2001, PP.661-668.
- [3] H.Schau, and D.Stade, "Mathematical Modeling of Three Phase Arc Furnaces" in Proceedings of the IEEE ICHPS VI, 1994, PP 422-428.
- [4] G.C.Montanari, M.Longhi, A.Cavallini, L.Pitti, and D.Zaninelli, "Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.4, 1997, pp.2026-2033.
- [5] S.Varandan, E.B.Makram, and A.A.Girgis, "A New Time Domain Voltage Source Model For an Arc Using EMTO" IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, Vol.11, No.23 pp.
- [6] E.Acha, A.Semlyen, and N.Rajakoric, "A Harmonic Domain Computational Package Nonlinear Problems" IEEE Transactions on Power Delivery; Vol.5, No.3, 1990, PP 1390-1397.
- [7] L.Tang, S.Kolluri, and M.F.McGranaghan, "Voltage Flicker Prediction for Two Simultaneously Operated AC Arc Furnaces" IEEE Transactions on Power Delivery; Vol.12, No.2, 1997, PP 985-991.
- [8] R.Collantes-Bellido, and T.Gomez, "Identification and Modeling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Distribution Simulation" IEEE Transactions on Power Delivery; Vol.12, No.4, 1997, PP 1812-1817
- [9] J.Mckim, "The UIE Flickermeter Demystified", Hewlett-Packard's Power Products Division, 1997.
- [10] S.R.Mendis, and D.A.Gonzalez, "Harmonic and Transient Over voltage Analyses in Arc Furnace power systems" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.28, No.2, 1992.

[۱۱] راهنمای سیمولینک مطلب نسخه ۶/۱ و تولباکسهای آن.

[۱۲] مهران نصیرزاده، ۱۳۸۱، « بهینه کردن محدودسازی اثرات هارمونیک ناشی از کنترل SVC برای کوره های قوس الکتریکی » پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.