

مدل سازی کوره قوس الکتریکی بر مبنای نظریه آشوب به منظور کنترل پارامترهای کیفیت توان

محمد عطایی^۱، هاجر قطب^۲، غزنفر شاهقلیان^۳، آرش کیومرثی^۴

^۱دانشیار گروه فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان Ataei@eng.ui.ac.ir

^۲فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد hajarghotb@yahoo.com

^۳استادیار گروه مهندسی برق - قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد shahgholian@iaun.ac.ir

^۴دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان Ataei@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۳/۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۵/۲)

چکیده: کوره های قوس الکتریکی یکی از بزرگترین بارهای متمرکز در شبکه قدرت و از مهمترین منابع تولید هارمونیک، فلیکر ولتاژ و نامتعادلی به شمار می روند. در این مقاله، براساس نظریه آشوب، در ابتدا یک مدل توصیف کننده رفتار کوره قوس الکتریکی AC از لحاظ پارامترهای کیفیت توان ارائه می گردد. در این راستا حالت استاتیک قوس الکتریکی با استفاده از یک تابع هذلولی - نمایی مدل گردیده و نوسانات موجود در آن بوسیله یک مدل آشوبی توصیف می گردد. در این خصوص انتخاب مناسب پارامترهای مدل آشوبی به منظور تطبیق سیگنال آشوبی حاصل با نوسانات ولتاژ قوس الکتریکی از منظر پارامترهای کیفیت توان موضوع مهمی به شمار می رود. بدین منظور، الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری^۱ و الگوریتم ژنتیک با تابع هزینه مشتمل بر انحراف هارمونیک های ولتاژ و جریان استفاده گردیده، تا مناسب ترین برازش از حیث هارمونیک حاصل گردد. داده های مورد استفاده در این مقاله داده های واقعی جمع آوری شده از یک کوره قوس الکتریکی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان می باشد. اعتبار مدل آشوبی ارائه شده با اندازه گیری میزان فلیکر ولتاژ از روی داده های واقعی و مدل پیشنهادی ارزیابی می گردد. در مرحله دوم، ایده استفاده از کنترل کننده های آشوبی برای کنترل پارامترهای کیفیت توان دنبال می گردد. در این راستا سیستم کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی در نظر گرفته شده و با استفاده از داده های واقعی رابطه ای بین جریان و طول قوس الکتریکی برآزش می گردد. سپس با ارائه دو کنترل کننده آشوبی به روش تطبیقی و تاخیر دار به کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی و در نهایت کنترل جریان شبکه توان پرداخته می شود. در ادامه به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده، ضمن ارائه نتایج شبیه سازی، اثرات این دو کنترل کننده را در کاهش هارمونیک ها و فلیکر ولتاژهای کوره قوس الکتریکی، قبل و بعد از اعمال کنترل کننده آشوبی محاسبه و با یکدیگر مقایسه می نماییم.

کلمات کلیدی: کوره قوس الکتریکی، نظریه آشوب، هارمونیک ها، فلیکر ولتاژ، کنترل کننده های آشوب

Modeling of the Electric Arc Furnaces using Chaos Theory and Control of Power Quality Parameters

Mohammad Ataei, Hajar Ghotb, Ghazanfar Shahgholian, Arash Kiyoumars

Abstract: Chaos-Based modeling of Electric Arc Furnaces (EAF) in order to control the power quality parameters is the purpose of this paper. Electric arc furnaces represent one of the major sources of perturbations for the feeding system. For modeling the electric arc furnace, at first, the arc is modeling using current-voltage characteristic of time-domain, then the random characteristic has been taken into account by modulating the arc voltage by a chaotic attractor. This paper deals with the problem of the arc modeling using three well-known chaotic attractors (Rössler, Chua, and Lorenz) attractors. A new tuning procedure is carried out to determine the most adequate parameters of the attractors to model the arc furnace by imperialist competitive algorithm (ICA). Finally two methods (time delay feedback controller (TDFC), adaptive controller) for controlling electrode in electric arc furnaces are proposed. Then, the power quality indices before and after applying controller are compared to show the effectiveness of the proposed idea.

Keywords: Electric Arc Furnaces, Chaos Theory, Voltage Flicker, Harmonics, Control of Chaos

^۱ Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

۱- مقدمه

کوره های قوس الکتریکی یکی از بزرگترین بارهای متمرکز در شبکه قدرت می باشند که اغلب به منظور ذوب و تصفیه فلزات مورد استفاده قرار می گیرد. با گسترش جریان استفاده از کوره های قوس الکتریکی در صنعت، مشکلات کیفیت توان ناشی از آنها نیز افزایش یافته است. امروزه یکی از مهمترین منابع تولید هارمونیک^۱، فلیکر^۲ و ولتاژ و نامتعادلی در شبکه های قدرت، کوره های قوس الکتریکی می باشند. به دلیل حرکت ظاهراً اتفاقی قوس الکتریکی همانگونه که طول قوس هنگام ذوب تغییر می کند نوسانات شدید ولتاژی در مدار تغذیه مشاهده می شود. هنگامی که این تغییرات در محدوده ۱ تا ۲۵ هرتز به وقوع بپیوندد، می تواند باعث مساله فلیکر گردد. علاوه بر این بر اثر تغییرات ناگهانی قوس و مشخصه به شدت غیرخطی ولتاژ - جریان، هارمونیک های فرکانس اصلی شکل می گیرند [۱-۳] به منظور یافتن روشهایی برای کم کردن این تبعات مخرب، باید اثرات این بارهای غیرخطی و تغییر پذیر با زمان را به روی شاخصه های کیفیت توان در سرتاسر سیستم قدرت مورد بررسی قرار دهیم. لذا در دست داشتن مدل توصیف کننده رفتار یک کوره قوس الکتریکی، که مبین طبیعت غیرقابل پیش بینی، غیرپریودیک و غیرخطی قوس الکتریکی بوده، به شدت احساس می شود. در راستای آنالیز شاخصه های کیفیت توان و مدلسازی قوس الکتریکی مدل های متعددی پیشنهاد شده است [۴-۱۴]. برخی از این مدل ها براساس خطی سازی معادله مشخصه می باشند، که دارای تقریب زیادی می باشند [۴-۵]. برخی دیگر از این مدل ها برپایه مدل های تقریبی و با استفاده از معادلات دیفرانسیل در حوزه زمان بیان شده و نیاز به شرایط اولیه خاص دارند [۶] و تطابق مطلوبی بین مدل های آنها و حالت واقعی وجود ندارد و دارای تقریب زیادی می باشد [۷، ۹]. یکی از جدیدترین روشهایی که برای مدلسازی قوس الکتریکی، در این مقاله مد نظر می باشد، ارائه روشی برای مدل سازی کوره های قوس الکتریکی بر مبنای تئوری آشوب بوده، که تا حد زیادی دربرگیرنده طبیعت تصادفی قوس الکتریکی بوده و همچنین قابلیت کنترل را نیز دارا باشد [۱۳]. به این منظور، از سه نوع از سیستم های آشوبی در مدل سازی کوره قوس الکتریکی استفاده می نماییم. یکی از نکات مهم در استفاده از مدل های آشوب، حساسیت شدید این مدل ها به پارامترهای اولیه بوده، که با اعمال اندک تغییراتی در پارامترهای آنها، رفتارهای متفاوتی را از این مدل ها شاهد خواهیم بود. بنابراین تنظیم دقیق پارامترها امری ضروری می باشد [۱۵-۱۷]. بدین منظور، برای طراحی دقیق پارامترهای مدل های آشوب، دو نوع از الگوریتم های بهینه سازی (الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک) با تابع هزینه مشتمل بر انحراف هارمونیک های ولتاژ و جریان انتخاب، و نتایج با یکدیگر مقایسه می گردد. این دو نوع الگوریتم، به هر نوع مساله بهینه سازی بدون هیچ محدودیتی قابل اعمال بوده و از آنها در

حل بسیاری از مسائل در حوزه های مهندسی استفاده گردیده است [۱۸-۲۲]. پس از ارائه مدل پیشنهادی، به منظور کنترل شاخصه های کیفیت توان در شبکه قدرت، ایده طراحی کنترل کننده آشوبی برای کنترل حرکت الکترودهای کوره قوس الکتریکی مطرح می گردد. در زمینه کنترل کوره قوس الکتریکی و آنالیز تاثیر بر پارامترهای کیفیت توان تاکنون مطالعات محدودی بر مبنای نظریه کلاسیک کنترل انجام شده است [۲۳-۲۷]. در این مقاله، با توجه به ارائه مدل توصیف کننده کوره قوس الکتریکی بر مبنای نظریه آشوب، با ارائه دو کنترل کننده آشوبی (کنترل تطبیقی سیستم آشوبی همسان Lorenz^۳ و کنترل فیدبک تاخیر زمان^۴) به کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی پرداخته و بنابراین طول قوس الکتریکی کنترل می گردد و به دلیل رابطه غیر خطی بین طول قوس الکتریکی و جریان الکتریکی، کنترل جریان شبکه توان نیز محقق می شود [۲۸-۳۱]. پس از ارائه مقدمه، ساختار ادامه مقاله به این صورت است که، طراحی مدل قوس الکتریکی در حالت استاتیک در بخش دوم شرح داده می شود. در بخش سوم به مدلسازی قوس الکتریکی بر مبنای نظریه آشوب پرداخته می شود، همچنین طراحی پارامترهای مدل های آشوب، بر اساس الگوریتم های بهینه سازی در این بخش مورد توجه قرار گرفته است. در بخش چهارم بر روی طراحی کنترل کننده برای کنترل حرکت الکترودها و بررسی اثرات این کنترل کننده به روی پارامترهای کیفیت توان بحث و بررسی انجام می گردد. و در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری از بحث ارائه می گردد.

۲-۱ مدل سازی قوس الکتریکی بر اساس مدل هذلولی - نمایی

از مهمترین مزیت های مدل قوس، سادگی بکارگیری جهت شبیه سازی و عدم تقریب زیاد می باشد. رابطه (۱) به بیان مدلی برای کوره قوس الکتریکی می پردازد.

$$v = \text{sign}(i) \left[v_{at} + \frac{C}{D + |i|} \right] \quad (1)$$

$$v_{at} = A + B i$$

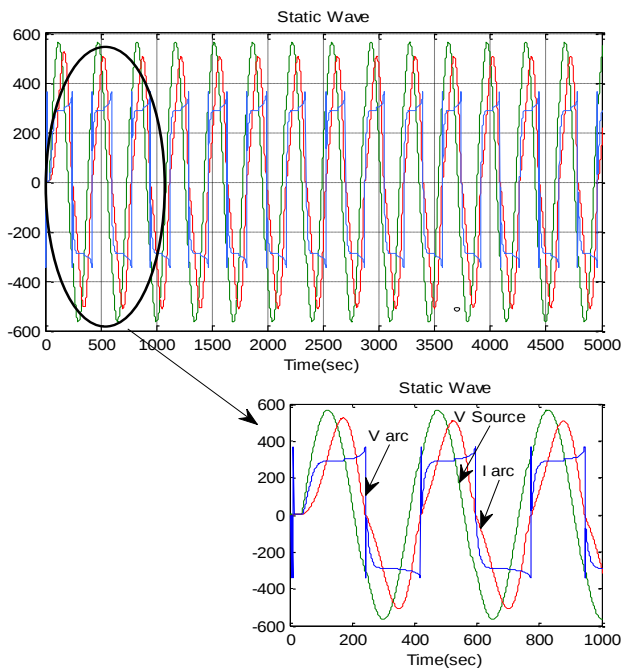
در این مدل، که آن را مدل هذلولی گون گویند، v ولتاژ قوس الکتریکی، i جریان قوس الکتریکی و v_{at} ولتاژ آستانه ذوب می باشد، که به طول قوس بستگی دارد. C, D اعداد ثابتی هستند که در هنگامی که جریانها افزایشی باشد به صورت C_i, D_i و هنگامی که جریانها کاهشی باشد به صورت C_d, D_d نشان داده می شود. A افت ولتاژ مجموع کاتد و آنود، B افت ولتاژ در هر واحد قوس و L طول قوس می باشد که این مقادیر نیز، با توجه به خصوصیات هر کوره مقادیر متفاوتی را به خود می گیرند [۱۱]. رابطه (۲) مدل دیگری از مشخصه ولتاژ-

^۲ Adaptive Controller^۳ Time-Delay Feedback Control (TDFC)^۱ Harmonics^۲ Flicker

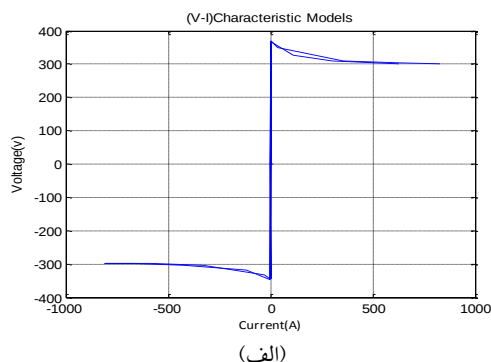
جدول (۱): مقادیر پارامترهای مدل‌های قوس الکتریکی

پارامترهای قوس الکتریکی	پارامترهای شبکه قدرت
$Z=0.3366+j3.2 \text{ m}\Omega$	$Z=0.0528+j0.46 \text{ m}\Omega$
$I_0=10000(\text{A})$	$V=566(\text{v})$
$C_i=190000 \text{ } C_d=39000$	$V_{at}=289.75(\text{v})$
$D_i=5000 \text{ } D_d=5000$	$F=60 \text{ HZ}$

با استفاده از دیاگرام سیستم قدرت، مدل استاتیک قوس الکتریکی را پیاده سازی می نماییم. که نتایج این شبیه سازی در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده است. شکل (۲) مشخصه ولتاژ قوس و جریان قوس و ولتاژ منبع بر حسب زمان را نشان می دهد و شکل (۳) مشخصه ولتاژ بر حسب جریان مدل نمایی، مدل هذلولی و مدل هذلولی-نمایی را نشان می دهد.



شکل (۲): مشخصه ولتاژ و جریان قوس و ولتاژ منبع بر حسب زمان



جریان کوره قوس الکتریکی را بیان می نماید. از آنجا که در این مدل مشخصه ولتاژ-جریان قوس با استفاده از یک تابع نمایی تقریب زده شده است، به این مدل، مدل نمایی کامل می گویند.

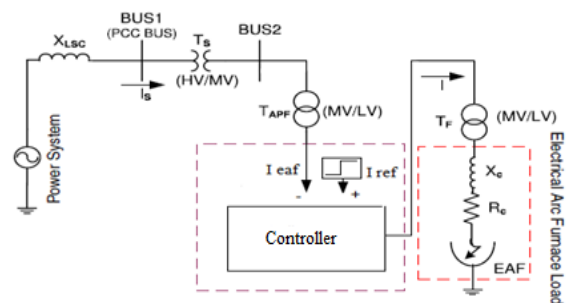
$$v = \text{sign}(i)[v_{at} (1 - \exp(-|i|/I_0))] \quad (2)$$

$$v_{at} = A + B I$$

در این رابطه I_0 یک ثابت جریانی برای جریانهای مثبت و منفی می باشد که این پارامتر، با توجه به خصوصیات هر کوره مقادیر متفاوتی را به خود می گیرد [۱۱]. رابطه (۳) مدل دیگری از مشخصه ولتاژ-جریان قوس الکتریکی را نشان می دهد که از دو مدل هذلولی گون و مدل نمایی کامل تشکیل شده است. همانطور که در این رابطه قابل مشاهده است، برای جریانهای مثبت و با توجه به خاصیت هیستریزس قوس، دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت جریانهای افزایشی از مدل هذلولی گون و در حالت جریانهای کاهش از مدل نمایی کامل استفاده می شود. به همین دلیل به این مدل، مدل هذلولی-نمایی نیز گفته می شود. مدل هذلولی-نمایی به مدل واقعی قوس الکتریکی بسیار نزدیک می باشد. همچنین می تواند حالات مختلف بار کوره را در سیستم قدرت ایجاد نماید. به همین دلیل از این مدل به عنوان مدل استاتیک قوس الکتریکی استفاده می گردد.

$$v = \begin{cases} v_{at}(1 - \exp(-|i|/I_0)) & \frac{di}{dt} \geq 0, i > 0 \\ v_{at} + \frac{C}{D+|i|} & \frac{di}{dt} < 0, i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

برای پیاده سازی مدل قوس پیشنهادی از یک شبکه قدرت استفاده می نماییم. شکل (۱) نشان دهنده این شبکه قدرت می باشد. مقادیر امیدانهای شبکه قدرت، به همراه مقادیر پارامترهای آن، در جدول (۱) بیان شده است [۱۲].



شکل (۱): دیاگرام مدار کوره قوس الکتریکی و بلوک کنترل کننده آن در یک سیستم توان

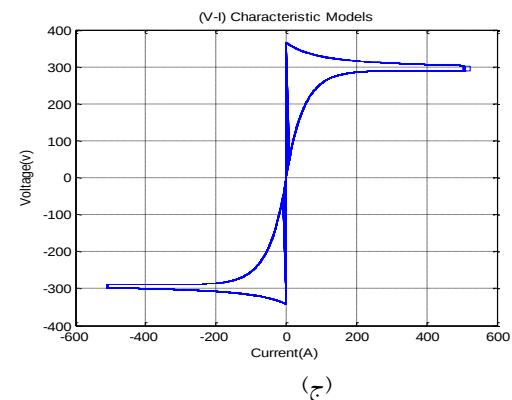
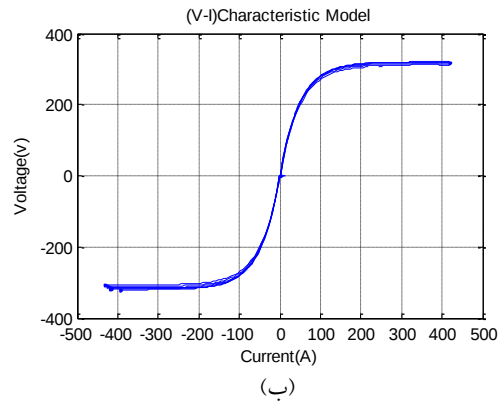
استفاده می نماییم. معادلات حاکم بر این سه سیستم در پیوست مقاله ارائه می گردد. پس از ارائه مدل حالت استاتیک قوس الکتریکی، به منظور مدل کردن خاصیت به ظاهر تصادفی قوس، ولتاژ خروجی کوره قوس الکتریکی در حالت استاتیک را با خروجی سیستمهای آشوب مدوله می نماییم. به این ترتیب مدل واقعی کوره قوس الکتریکی با استفاده از رابطه (۴) بیان می گردد.

$$V_a \cong V_{a(estic)}(1 + \Delta v) \quad (4)$$

که در این رابطه V_a ولتاژ کل خروجی قوس الکتریکی، $V_{a(estic)}$ ولتاژ کوره قوس الکتریکی حاصل از مدل هذلولی - نمایی در حالت استاتیک و Δv خروجی هر کدام از سیستمهای آشوب می باشد. برای اینکه بتوان سیگنال Δv را با استفاده از سیستمهای آشوب به قوس الکتریکی اعمال نماییم، لازم است که از هر مدل آشوب یک خروجی را به عنوان Δv انتخاب کرده و با ولتاژ کوره مدوله نماییم. همچنین برای اینکه بتوان سیگنالهای سیستمهای آشوب را در یک بازه خاص آشوبناک برای اعمال به ولتاژ قوس الکتریکی قرار داد از یک پارامتر q استفاده می نماییم. به این گونه که سمت راست معادلات حالت را در پارامتر q ضرب می نماییم [۱۳].

۳-۲- طراحی بهینه پارامترهای مدل آشوب با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

در راستای مدلسازی قوس الکتریکی، در ابتدا لازم است که یک سیستم آشوبی را به مدل فوق برازش نماییم. در این راستا اهداف گوناگونی را می توان مد نظر قرار داد. ایده ما در این مقاله به این گونه است که، در ابتدا به طراحی پارامترهای مدلهای آشوب براساس حداقل ساختن خطای بین هارمونیکهای ولتاژ و جریان مدل طراحی شده و مدل واقعی (که با استفاده از داده های واقعی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان، بدست آمده) پرداخته و در مرحله بعد، پس از معرفی طرح پیشنهادی، به منظور بررسی عملکرد مطلوب مدل طراحی شده، به اندازگیری فلیکر ولتاژ در مدل طراحی شده و مدل واقعی می پردازیم. بدین منظور روشهای بهینه سازی متفاوتی مطرح شده است که از دو روش بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک استفاده می گردد. الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری بر اساس رویه استعمار کشورها بنا نهاده شده است. این الگوریتم، از چندین کشور در حالت اولیه شروع می شود، کشورها در حقیقت جوابهای ممکن مساله می باشند. کشورها، به دو دسته تقسیم می شوند: امپریالیست و مستعمره. کشورهای استعمارگر با اعمال سیاست جذب، در راستای محورهای مختلف بهینه سازی، کشورهای مستعمره را به سمت خود می شکند. رقابت امپریالیستی، هسته ی اصلی این الگوریتم را تشکیل می دهد و باعث می شود که کشورها به سمت مینیمم مطلق تابع حرکت کنند [۲۱-۲۲].



شکل (۳): مشخصه ولتاژ برحسب جریان (الف) مدل نمایی، (ب) مدل هذلولی، (ج) مدل هذلولی - نمایی

۳-۳- مدل سازی قوس الکتریکی بر اساس نظریه آشوب

به موازات مدل سازی رفتار حالت استاتیک قوس الکتریکی، ایده استفاده از مدلی به ظاهر تصادفی که در باطن طبیعتی قطعی داشته و قابل کنترل نیز می باشد، بیان می گردد. در پژوهشهای انجام گرفته تاکنون از مدل نویز سفید همراه با باند محدود به منظور مدلسازی حالت استاتیک قوس الکتریکی استفاده می گردید. در این بخش سعی می شود با استفاده از تئوری آشوب^۱ خصوصیت ظاهرا تصادفی قوس الکتریکی لحاظ گردد. بدین منظور به انتخاب مدلهای آشوب پرداخته می شود، و پس از آن، طراحی پارامترهای مدل آشوب با استفاده از الگوریتمهای بهینه سازی (الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک) ارائه می گردد.

۳-۱- طراحی سیستمهای آشوبی

آشوب در واقع یک خاصیت دینامیکی است که در سیستم های غیر خطی (در صورت وجود شرایطی خاص) امکان بروز پیدا می کند. مدلهای گوناگونی از سیستمهای مختلف آشوب بیان شده است، که ما در این مقاله از سه سیستم متداول آشوب Lorenz, Rossler, Chua

^۱ Chaos Systems

۳-۲-۱ تابع هدف:

یک حد بیشینه و کمینه باشد. براین اساس لازم است که در ابتدا در هر سیستم، پارامترهایی را به عنوان پارامترهای ثابت با مقادیر ثابت در نظر گرفته، که خود تضمینی برای رفتار آشوبناک آن معادلات بوده و در ادامه به طراحی دیگر پارامترها پردازیم. یکی از دیاگرامهایی که برای شناسایی محدوده پارامترهای معادلات آشوب به کار می‌رود، دیاگرام دو شاخگی می‌باشد. برطبق این دیاگرام با ثابت انتخاب کردن دو پارامتر از سه پارامتر سیستمهای آشوب، اگر پارامتر سوم در بازه معینی قرار گیرد این معادلات از خود رفتار آشوبناک نشان می‌دهند [۱۵، ۱۶، ۱۷]. به این گونه که با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای زیر در هر سه سیستم آشوب، و طراحی پارامترهای c, β, r, q می‌توان به سیستم مورد نظر دست یافت [۹]. محدوده این پارامترها به صورت رابطه (۶) بیان می‌گردد.

$$a_1 = b_1 = 0.1 \quad \sigma = 10 \quad b_3 = \frac{8}{3}$$

$$b_2 = \frac{2}{7} \quad a_2 = \frac{-1}{7} \quad \alpha = 10$$

$$c \in [9.4, 10.1] \cup [15.6, 20.5] \cup [30.4, 38.9] \\ \cup [39.6, 41.5] \cup [42, 43.4] \cup [43.8, 44.5] \quad (6)$$

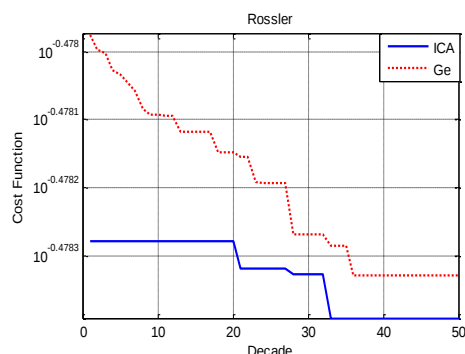
$$\beta \in [13.9, 17.9]$$

$$r \in [25, 91] \cup [94, 99] \cup [101, 122] \cup$$

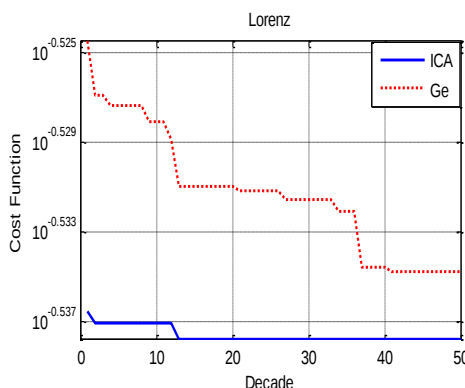
$$[167, 180] \cup [182, 198] \cup [200, 204]$$

با استفاده از فلوجارت نشان داده شده در مرجع [۲۱] که روند

اجرای این الگوریتم را نشان می‌دهد، می‌توان به طراحی پارامترهای آشوب پرداخت. که نتایج این طراحی در جدول (۲) و شکل (۴) بیان گردیده است.



(الف)



(ب)

در راستای مدل سازی قوس الکتریکی، در ابتدا لازم است که یک سیستم آشوبی را به مدل فوق برآزش نماییم. در این راستا اهداف گوناگونی را می‌توان مد نظر قرار داد. ایده ما در این مقاله به این گونه است که، در ابتدا به طراحی پارامترهای مدلهای آشوب براساس حداقل ساختن خطای بین هارمونیک‌های ولتاژ و جریان مدل طراحی شده و مدل واقعی (که با استفاده از داده‌های واقعی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان، بدست آمده) پرداخته و در مرحله بعد، پس از معرفی طرح پیشنهادی، به منظور بررسی عملکرد مطلوب مدل طراحی شده، به اندازگیری فلیکر ولتاژ در مدل طراحی شده و مدل واقعی می‌پردازیم. بدین منظور روشهای بهینه سازی متفاوتی مطرح شده است که از دو روش بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری بر اساس رویه استعمار کشورها بنا نهاده شده است. این الگوریتم، از چندین کشور در حالت اولیه شروع می‌شود، کشورها در حقیقت جوابهای ممکن مساله می‌باشند. کشورها، به دو دسته تقسیم می‌شوند: امپریالیست و مستعمره. کشورهای استعمارگر با اعمال سیاست جذب، در راستای محورهای مختلف بهینه سازی، کشورهای مستعمره را به سمت خود می‌شکنند. رقابت امپریالیستی، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهد و باعث می‌شود که کشورها به سمت مینیمم مطلق تابع حرکت کنند [۲۱-۲۲]. همانگونه که بیان گردید در طراحی پارامترهای مدلهای آشوب با استفاده از الگوریتمهای بهینه سازی، تابع هدف را حداقل خطای بین هارمونیکهای ولتاژ و هارمونیکهای جریان مدل طراحی شده و مدل واقعی که با استفاده از داده‌های واقعی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان، بدست آمده تعریف می‌نماییم. بر این اساس تابع هدف بصورت رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$cost = \sum_{v=1}^{100} K_v F_v + \sum_{i=1}^{100} K_i F_i \quad (5)$$

که در این رابطه، $cost$ تابع هدف و یا تابع هزینه، F_v تابع هزینه تلفات هارمونیکهای ولتاژ، K_v پارامتر متغیر ولتاژ و F_i تابع هزینه تلفات هارمونیکهای جریان، K_i پارامتر متغیر جریان می‌باشد. THD_v ضریب اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ، $THD_v(EAF)$ ضریب اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ مدل واقعی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان، THD_i ضریب اعوجاج هارمونیک کل جریان واقعی $THD_i(EAF)$ ضریب اعوجاج هارمونیک کل جریان مدل واقعی کوره قوس الکتریکی می‌باشد.

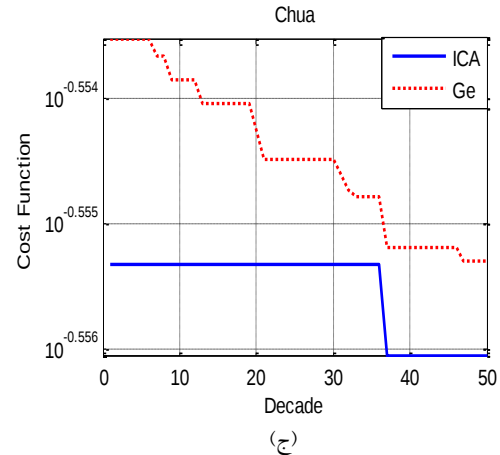
۳-۲-۲ محدودیت‌ها:

علاوه بر کمینه کردن انحراف هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به عنوان یک هدف، میزان انحراف تک تک پارامترهای سیستم‌های آشوب نیز نباید از حد مجاز تجاوز کند و حدود پارامترها باید در بین

جدول (۳): مقادیر Pst مربوط به مدل کوره قوس الکتریکی و مدل‌های

طراحی شده

Pst	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
Pst (EAF)	0.9816	1.4571	1.7496	2.0959	2.1764	2.2181	2.2139
Rossler	.5985	2.190	2.4167	2.6377	2.6244	2.630	2.7651
Lorenz	1.0090	1.2082	1.3960	2.1946	2.2156	2.6281	2.6539
Chua	1.1399	1.099	1.3087	2.331	2.562	2.9186	2.3160



شکل (۴): نمودار بهترین تابع هزینه در سه مدل (الف) Rossler و (ب)

Lorenz و (ج) Chua با استفاده از دو الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک

جدول (۲): مقادیر و نتایج پارامترها و بهترین تابع هزینه، در سه مدل آشوبی

الگوریتم	Chua	Lorenz	Rossler
رقابت استعماری	$\beta=17.1963$	$r=78.485$	$c=34.7444$
	$q=15.9263$	$q=49.269$	$q=38.3045$
	$C.F=0.2779$	$C.F=0.290$	$C.F=0.332$
ژنتیک	$\beta=17.025$	$r=42.4913$	$c=42.4913$
	$q=10.0734$	$q=31.035$	$q=31.0355$
	$C.F=0.2784$	$C.F=0.292$	$C.F=0.332$

همانگونه که در شکل (۴) و جدول (۲) نشان داده شده است، برای طراحی بهتر پارامترهای سیستم‌های آشوب از دو الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با توجه به شکل (۴) الگوریتم رقابت استعماری در زمان کمتری به میزان نهایی خود می‌رسد و با توجه به جدول (۲) تابع هزینه کمتری نیز دارد. بنابراین در طراحی پارامترها از الگوریتم رقابت استعماری استفاده می‌گردد.

۳-۳- ارزیابی و تعیین اعتبار مدل‌های آشوبی ارائه شده

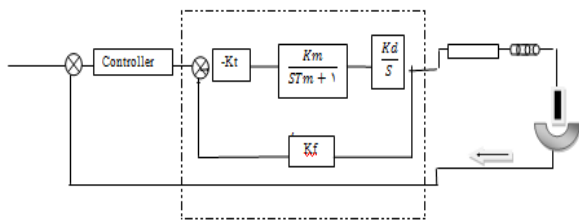
از دیدگاه اندازه گیری فلیکر

همانگونه که در مراحل قبل بیان گردید، به برازش مدلی با مدل واقعی کوره قوس الکتریکی پرداختیم، که شاخص برازش میزان هارمونیک‌های ولتاژ و هارمونیک‌های جریان بوده است. در ادامه به منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی، به اندازه‌گیری میزان فلیکر ولتاژ، پرداخته و نتایج را با نتایج بدست آمده از مدل واقعی، مقایسه می‌نماییم. جدول (۳) مقادیر فلیکر ولتاژ لحظه ایی (Pst) را در بین مدل واقعی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان و مدل‌های طراحی شده با استفاده از سیستم‌های آشوب را نشان می‌دهد.

با استفاده از مقادیر جدول (۳) می‌توان به این نتیجه رسید که اولاً انتخاب این سه سیستم آشوب برای مدلسازی قوس الکتریکی صحیح بوده است، زیرا حداکثر میزان اختلاف مربوط به مدل Rossler بوده، که ماکزیموم آن در ثانیه دوم می‌باشد که برابر ۰.۷۳۳ است. که مقدار اندکی می‌باشد. همچنین بهترین مدل، مدل Lorenz می‌باشد. همچنین می‌توان این چنین بیان کرد که برازش مدل طراحی شده با تابع هدف حداقل خطای بین هارمونیک‌های ولتاژ و جریان با مدل واقعی، از دیدگاه فلیکر ولتاژ نیز دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد.

۴- کنترل کوره قوس الکتریکی بر مبنای تئوری آشوب به منظور بهبود پارامترهای کیفیت توان

همانگونه که بیان گردید، به دلیل اینکه قوس الکتریکی تحت تاثیر حرکت الکترونها و جابجائی مواد مذاب قرار دارد، هنگامی که طول قوس هنگام ذوب تغییر می‌کند نوسانات شدید ولتاژی در مدار تغذیه مشاهده می‌گردد، و جریان قوس نیز مسیر نامنظمی خواهد داشت. جریانهایی نامتعادل باعث اعوجاج و تغییرات زیادی در شبکه توان می‌شوند. برای کاهش این تغییرات که خود عاملی برای افزایش فلیکرها و هارمونیک‌ها می‌باشد، لازم است که از یک سیستم کنترل به منظور کنترل موقعیت الکترونها و در نتیجه آن کنترل طول قوس و در نهایت کنترل جریان کوره قوس الکتریکی استفاده کرد. با توجه به آشوب گونه فرض کردن حرکت قوس الکتریکی، و مدلسازی آن بوسیله سیستم‌های آشوبی، به منظور طراحی کنترل کننده کوره قوس الکتریکی، این ایده دنبال می‌شود که برای سیستم آشوبی برازش شده به رفتار دینامیکی سیستم، یک کنترل کننده آشوبی طراحی شود که اعمال آن به سیستم منجر به کنترل طول قوس الکتریکی و در نتیجه موقعیت الکترونها گردد. به این ترتیب جریان کوره قوس الکتریکی که عامل حرکت الکترونها است، کنترل می‌گردد. در این راستا دو روش کنترل آشوبی در بخش بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این روشها موسوم به روش کنترل فیدبک تاخیر از روشهای شناخته شده در کنترل آشوب می‌باشد.



شکل (۵): دیاگرام بلوکی سیستم کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی اگر بلوک شکل (۵) را به صورت شکل (۶) در نظر بگیریم، می توان $G(s)$ را به صورت رابطه (۸) در نظر گرفت.

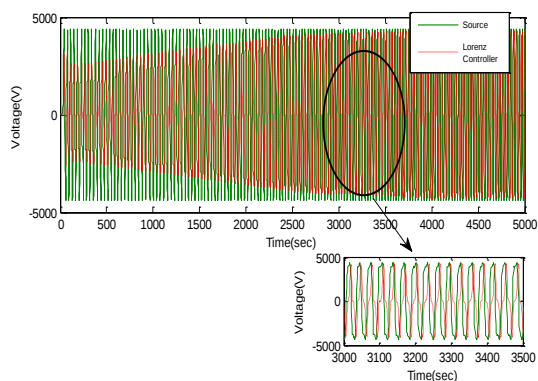


شکل (۶): دیاگرام بلوکی سیستم ساده شده کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی

$$G(s) = \frac{L(s)}{U(s)} = \frac{-K_T K_m K_D}{T_m s^2 + (1 + K_T K_m K_f) s} \quad (8)$$

در این رابطه K_t ضریب عملکرد در ترستور و T_m ثابت زمان و K_m ضریب عملکرد در موتور و K_d ضریب تناسب در سیستم مکانیکی و K_f ضریب فید بک سرعت در نظر گرفته می شود و با قراردادن مقادیر پارامترها به صورت رابطه (۹) خواهد شد:

در ادامه با در نظر گرفتن $G(s)$ به صورت رابطه (۹) به اعمال کنترل کننده های طراحی شده به مدل کامل کوره قوس الکتریکی و مدل در نظر گرفته شده برای الکترودهای کوره قوس الکتریکی پرداخته، و به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده، به اندازه گیری فلیکر ولتاژ لحظه ای (Pst) و هارمونیکهای ولتاژ پرداخته و نتایج را قبل و بعد از اعمال کنترل کننده بدست آورده و با هم مقایسه می نمایم



شکل (۷): منحنی جریان رفرنس جریان کوره قوس الکتریکی کنترل شده با کنترل تطبیقی همسان Lorenz

شکل (۷) منحنی جریان رفرنس، و جریان کوره قوس الکتریکی کنترل شده با کنترل تطبیقی را نشان می دهد که بعد از طی مدتی نوسانات جریان کاملاً منظم شده است.

باشد [۲۸، ۲۹]. روش دیگر نیز روشی است که توسط نویسنده نخست این مقاله برای کنترل تطبیقی سیستم آشوبی همسان لرز-لو-چن در [۳۱]. ارائه گردیده و جهت مشاهده جزئیات می توان بدان مراجعه نمود. بنابراین با استفاده از این دو روش کنترل آشوبی به کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی و کنترل طول قوس و در نهایت کنترل جریان شبکه توان پرداخته می شود. به این ترتیب، با کنترل جریان کوره قوس الکتریکی اثرات وجود هارمونیکها و فلیکر ولتاژهای اعمالی به شبکه توان کاهش می یابد.

۴-۱- اعمال کنترل کننده به کوره قوس الکتریکی

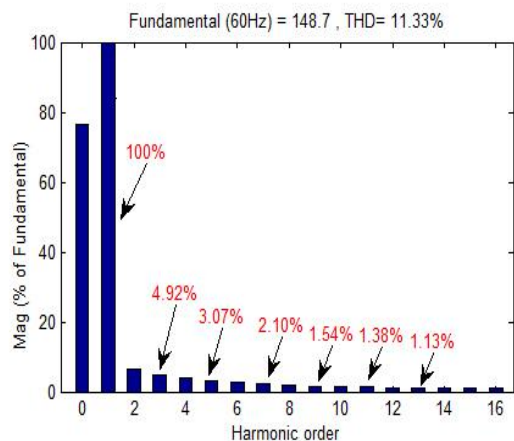
بعد از طراحی کنترل کننده ها، با توجه به این که هدف نهایی اعمال کنترل کننده به کوره قوس الکتریکی، کنترل جریان قوس الکتریکی است، و جریان کوره قوس الکتریکی یک رابطه غیر خطی با طول قوس الکتریکی دارد، برای مدلسازی قوس الکتریکی از مدل کامل آشوبی طراحی شده استفاده می گردد. سپس به منظور کنترل جریان خروجی کوره قوس الکتریکی رابطه غیر خطی بین طول قوس الکتریکی و جریان کوره قوس الکتریکی به صورت رابطه تکه ایی خطی طبق رابطه (۷) در نظر گرفته می شود: [۲۴ و ۳۰].

$$I = f(I) \approx I_{m0} - k_m L \quad (v)$$

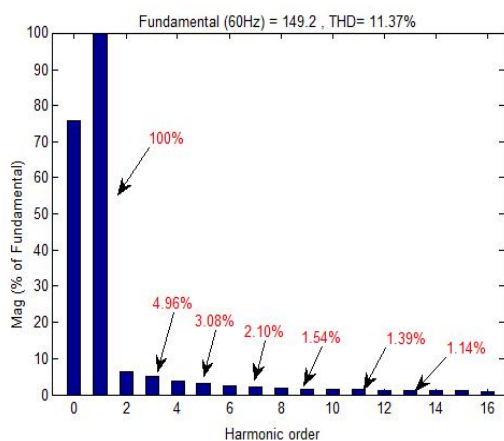
$$L_m < L < L_{m+1}, I_{m0} > 0, K_m > 0$$

در این رابطه I جریان قوس الکتریکی، I_{m0} ماکزیموم جریان قوس الکتریکی که در آستانه شروع ذوب اتفاق می افتد و برابر $4KA$ در نظر گرفته می شود. L طول قوس، K_m پارامتر ثابت طول میباشد. در این قسمت لازم است اشاره مختصری به الکترودها و ملحقات آن گردد. ساختار الکترودها را بوسیله سه قسمت ترستور، موتور، چرخ دنده ها مدل می نمایم. همچنین از یک فیدبک سرعت برای اطمینان از پایداری سیستم طراحی شده، استفاده می نمایم [۲۵، ۲۶، ۲۷] برای کنترل کوره قوس الکتریکی، در ابتدا از یک ترانسفورمر جریان (CT) برای اندازه گیری جریان قوس استفاده می گردد. سپس این جریان را با جریان منبع^۱ مقایسه کرده و به یک کنترل کننده اعمال می نمایم. در نتیجه ولتاژ ترستور که باعث حرکت موتورها و چرخ دنده ها می گردد، کنترل می شود. شکل (۵) و (۶) دیاگرام بلوکی سیستم کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی را نشان می دهد.

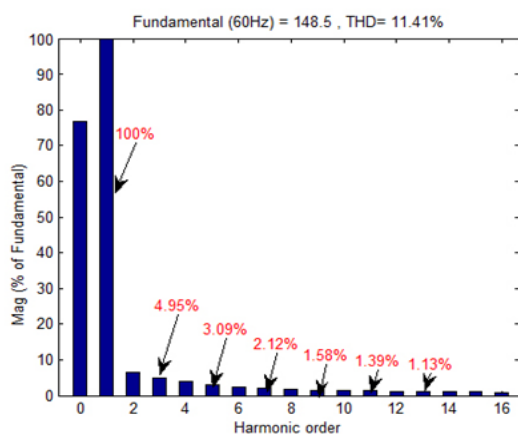
^۱ Set point



(ج)



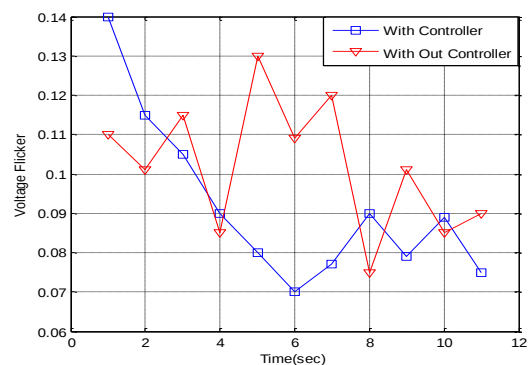
(د)



(ه)

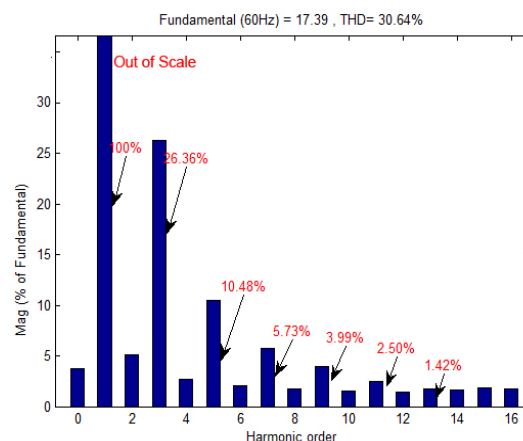
شکل (۹): هارمونیکهای جریان همراه با اعمال کنترل کننده و بدون اعمال کنترل کننده (الف) بدون اعمال کنترل کننده (ب) همراه با اعمال کنترل کننده تطبیقی همسان Lorenz، (ج) فیدبک تاخیر Lorenz، (د) فیدبک تاخیر chua، (ه) فیدبک تاخیر Rossler

شکل (۸) منحنی فلیکرولتاژ، بدون اعمال کنترل کننده، و همراه با اعمال کنترل کننده تطبیقی را نشان می دهد. در شکل (۹) هارمونیکهای

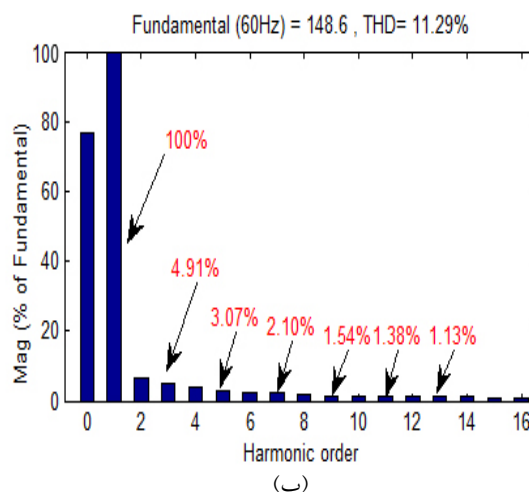


شکل (۸): منحنی فلیکرولتاژ، بدون اعمال کنترل کننده، و همراه با اعمال

کنترل کننده تطبیقی همسان Lorenz



(الف)



(ب)

- for steel industrial power systems", in: IEEE Porto Power Tech Conference, Porto,
- [5] G.C. Montanari, M. Logginil, A. Cavallinil, L. Pittil, D. Zaninelliz, "Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks", IEEE Transactions on Power Delivery 9 (October (4)) (1994).
- [6] S. Varadan, E.B. Makram, A.A. Girgis, "A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery 11 (July (3)) (1996).
- [7] E. O'Neill-Carrillo, G.T. Heydt, E.J. Kostelich, S.S. Venkata, A. Sundaram, "Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads", IEEE Transactions on Power Delivery 14 (April (2)) (1999).
- [8] Anxo, P.O. Alonso, M. Perez, "An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis", IEEE Trans., on Power Del., Vol.9, No.1, pp. 367-373, 2004.
- [9] R. Grunbaum, "SVC light: a powerful means for dynamic voltage and power quality control in industry and distribution", Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475 0 IEE 2000.
- [10] J. Doleial, A.G. Castillo, V. Valouch, "Topologies and control of active filters for flicker compensation", in: ISIE'2000, Cholula, Puebla, Mexico, 2000.
- [11] R. Hooshmand, M. Banejad, M. Torabian, "A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace", Electrical Engineering, Journal, Vol. 59, No. 4, pp. 195-202, 2008.
- [12] M. a. Golkar, M. Tavakoli, S. Meschi, "A Novel Method of Electrical Arc Furnace modeling for Flicker Study", IEEE Trans. Power Del., 2007.
- [13] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, P. Varilone, "Chaos-based modeling of DC arc furnaces for power quality issues", IEEE Transactions on Power Delivery 19 (October (4)) (2004).
- [14] W. Ting, Z. S-Yao, "A new frequency domain for the harmonic analysis ", IEEE Conference, APSCOM-97, Hong Kong, 552-555, 1997.
- [15] T. Alligood, D. Sauer, A. Yorke, Chaos: An introduction to Dynamical System, Thomas Springer, New York, Springer - verlag, 1996
- [16] D. Dutta, S. Chakraborty, "Bifurcation Diagrams in relation to Synchronization in Chaotic systems", Pramana, Journal, Vol. 74, No. 6, pp.919-929, June 2010
- [17] F. C. Hoppensteadt, Analysis and Simulation of Chaotic Systems, Second Edition. E. Marsden, L. Sirovich, Springer, Vol.94, 2000
- [18] E. Atashpaz, C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition" IEEE Trans, 2007.
- [19] Helena Bahrami, Karim Faez, Marjan Abdechiri, "Imperialist Competitive Algorithm Using Chaos

جریان همراه با اعمال هر دو کنترل کننده و بدون اعمال کنترل کننده نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، THD بدون کنترل کننده ۳۰.۶۴٪ می باشد. در هنگام اعمال کنترل کننده فیدبک تاخیر زمان کمترین THD مربوط به مدل Lorenz است که برابر ۱۱.۳۳٪ می باشد. اما بهترین کنترل کننده، کنترل سیستم تطبیقی همسان Lorenz با THD برابر ۱۱.۲۹٪ است هرچند که نتایج حاصل از اعمال هر دو کنترل کننده در کاهش هارمونیکهای جریان قابل توجه است. لازم به ذکر است که در انجام شبیه سازیها، از داده های کوره های قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان در طراحی و مدلسازی قوس الکتریکی و طراحی کنترل کننده، استفاده شده است [۳۲] و نتایج طراحی با مدل های موجود مقایسه شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله در ابتدا به طراحی حالت استاتیک قوس الکتریکی با استفاده از مدل هذلولی - نمایی پرداخته، و با مدوله کردن ولتاژ قوس الکتریکی با ولتاژ خروجی سیستم آشوبی به همراه انتخاب بهینه پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به مدلسازی کوره قوس الکتریکی پرداخته شد. معیار انتخاب بهینه پارامترها بر اساس میزان تطابق شاخصهای کیفیت توان اندازه گیری شده از داده های واقعی در مقایسه با مدل ارائه شده بود. با توجه به لزوم اعمال کنترل کننده، به منظور کاهش اثرات هارمونیکها و فلیکر ولتاژهای ناشی از اعمال کوره قوس الکتریکی به روی شبکه های توزیع در ادامه ایده کنترل الکترودهای کوره قوس الکتریکی بوسیله کنترل کننده های آشوبی ارائه گردید. با اعمال دو کنترل کننده آشوبی، پارامترهای کیفیت توان قبل و بعد از اعمال کنترل کننده ها بررسی گردیدند که کاهش چشمگیری در میزان هارمونیکها و فلیکر ولتاژها مشاهده شد. بررسی نتایج مبین حصول بهترین نتایج با استفاده از مدل آشوبی بر اساس سیستم Lorenz همراه با کنترل کننده تطبیقی همسان Lorenz است که علت این موضوع از موضوعات تحقیقاتی آتی نویسندگان است.

مراجع

- [1] O. Ozgun, A. Abur, "Flicker study using a novel arc furnace model", IEEE Transactions on Power Delivery 17 (4), pp. 1158-1163, (2002).
- [2] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajaković, "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs", IEEE Transactions on Power Delivery 5 (1990).
- [3] T. L. Ochs, A. D. Hartman, Chaotic Responses in Electric Arc Furnaces. Journal Applied Physics, vol. 76, no. 4, pp. 2059-2065, 1994.
- [4] C.S. Chen, H.J. Chaung, C.T. Hsu, S.M. Tseng, "Stochastic voltage flicker analysis and its mitigation

[۳۲] کیومرثی، آ.، هوشمند، ر.، عطایی، م.، "مدلسازی احتمالی بار کوره قوس الکتریکی و روشهای کاهش ولتاژ ناشی از آن"، گزارش طرح پژوهشی، مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، ۱۳۸۷.

پیوست ۱:

معادلات حاکم بر سه سیستم آشوب به صورت روابط زیر می باشد

Rosler:

$$\dot{x} = -y - x$$

$$\dot{y} = x + a_1 y$$

$$\dot{z} = b_1 + (x - c)z$$

Chua:

$$\dot{x} = \begin{cases} \sigma(y - b_2 x - (b_2 - a_2)) & \text{if } x < -1 \\ \sigma(y - a_2 x) & \text{if } -1 < x < 1 \\ \sigma(y - b_2 x + (b_2 - a_2)) & \text{if } x > 1 \end{cases}$$

$$\dot{y} = x + z - y$$

$$\dot{z} = -\beta y$$

Lorenz:

$$\dot{x} = \alpha(y - x)$$

$$\dot{y} = rx - xz - y$$

$$\dot{z} = xy - b_3 z$$

در این روابط b_3, r, α پارامترهای حقیقی مثبت مدل Lorenz

و b_1, c, a_1 پارامترهای حقیقی مثبت مدل Rossler و σ, β, a_2, b_2

پارامترهای حقیقی مثبت مدل Chua، همچنین x, y, z متغیرهای معادلات حالت می باشند.

Theory for Optimization (CICA)", UKSim-AMSS 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation, 2010.

- [20] R. Rajabioun, F. Hashemzadeh, E. Atashpaz-Gargari, B. Mesgari, F. Rajaei Salmasi, "Identification of a MIMO evaporator and its decentralized PID controller tuning using Colonial Competitive Algorithm", In the proceeding of IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [21] E. Atashpaz-Gargari, F. Hashemzadeh, R. Rajabioun, C. Lucas, "Colonial competitive algorithm: A novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process", International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. 2008.
- [22] H. Duan, C. Xu, S. Liu, and S. Shao, "Template matching using chaotic imperialist competitive algorithm", Pattern Recognition Letters, 2009
- [23] F. J. Sharifi, G. Jorjani, "An Adaptive System for Modeling and Simulation of Electrical Arc Furnaces", Control Engineering Practice 17, Journal, pp. 1202-1219, 2009.
- [24] L. Xiaohe, C. Duwu, L. Jie, W. Lijun, "Simulation on Adaptive Control of Electrode Regulator Systems of Arc Furnace", Proceedings of the International Conference on Ele, Vol.5, No. 1, 2001.
- [25] L. Xiaoyan, L. Xiuhe, D. Wang, "Arc Furnace Electrode Control System Design", International Conference on Computer, Mechatronics, Control And Electronic Engineering (CMCE), 2010.
- [26] A. parsapoor, M. Ataei, A. Kiyoumars, "Adaptive Control of the Electric Arc Furnace Electrodes Using Lyapunov Design", International Conference on Control, Automation and Systems, 17-20, October 2007.
- [27] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, "Arc-Furnaces Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks", IEEE Trans. Power Del., Vol.9, No.4, October 1994.
- [28] X. Guan, C. Chen, H. Peng, Z. Fan, "Time-Delayed feedback Control of Time-Delay Chaotic Systems", Bifurcation and chaos, Journal, Vol. 13, No.1, pp.193-205, 2003.
- [29] M. Sun, L. Tian, J. Xu, "Time-delay Feedback Control of the Energy Resource Chaotic System", Nonlinear Science, Journal, Vol. 1, No. 3, pp. 172-177, March 2006.
- [30] F. Abdous, A. Ranjbar, S. H. Hosein Nia, A. Sheikhol Eslami, "Chaos Control of Voltage Fluctuation in DC Arc Furnaces Using Time-Delay Feedback Control", International Conference on Electrical Engineering, 25-26, March 2008.

[۳۱] حقیقت دار، ف.، عطایی م. "کنترل تطبیقی سیستم آشوبی همسان لرنز-لو - چن"، کنترل، جلد ۲، شماره ۱، صفحه ۵۶-۶۴، ۱۳۸۷.