تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: کارخانه فولاد خوزستان)

ایمان رضائی نسب [۱]، دکتر سید محسن سید موسوی [۲،*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت ،گروه مهندسی برق، واحد اهواز،دانشگاه آزاداسلامی، اهواز،ایران
iman_rezayi@yahoo.com

۲*- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز،دانشگاه آزاداسلامی،اهواز،ایران، mohsenmoosavi2000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۰

چکیده: کوره قوس الکتریکی یکی از بارهای مصرفی بزرگ در شبکه قدرت می‌باشد و که با توجه به اینکه یک بار غیرخطی و تصادفی است، باعث اختلالات زیادی را در شبکه ایجاد می‌کند. کوره قوس باعث ایجاد مشکلاتی مانند هارمونیک، زیر هارمونیک، نامتعادلی ولتاژ، فلیکر ولتاژ و نوسان ولتاژ و جریان روی شبکه قدرت می‌شود. از این رو به منظور کاهش مشکلات ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی، نیاز به نصب تجهیزات جبران کننده مانند SVC در کنار آنها می‌باشد. به منظور تحلیل اثرات کوره قوس الکتریکی بر روی شبکه، محاسبه ظرفیت و نوع جبران‌ساز موردنیاز هر کوره قوس، ابتدا باید مدل مناسب کوره استخراج شده و در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام گیرد. بعد از انجام شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار و مطالعه رفتار کوره، جبران‌کننده مناسب برای کوره قوس طراحی خواهد شد. با توجه به اینکه کوره قوس رفتار غیرخطی و تصادفی دارد ارائه یک مدل مناسب و تا حد امکان دقیق برای مطالعه پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره بر روی شبکه، دشوار است. هدف از این مقاله به دست آوردن یک مدل مناسب برای کوره قوس الکتریکی شرکت فولاد خوزستان می‌باشد. برای این منظور ابتدا از ولتاژ و جریان ترانسفورماتور کوره داده برداری انجام شده، سپس جهت تطبیق مدل‌های موردنظر و به دست آوردن پارامترهای بهینه مدل از الگوریتم ژنتیک، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بهترین مدل انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: کوره قوس الکتریکی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، ولتاژ، جریان، جبران‌ساز استاتیکی وار

۱- مقدمه

به علت رشد تصاعدی نیاز جهان به فولاد به عنوان مهمترین ماده اولیه ساخت و ساز، تولید جهانی فولاد رشدی تصاعدی پیدا کرده و تنها طی ۱۲ سال گذشته رشد آن به حدود ۴۵ درصد رسیده است. مصرف انرژی در این صنعت حدود ۸ درصد از مصرف کل انرژی جهان را شامل می‌شود. در کشور ما نیز طبق گزارشات موجود نزدیک به ۱۰ درصد از مصرف کشور مربوط به کارخانجات فولاد می‌باشد. نکته قابل توجه اینکه مصرف برق کوره‌های شرکت‌های فولاد نزدیک به ۴۰ درصد برق مصرفی را شامل می‌شود. اکثر کوره‌های موجود در صنعت فولاد از نوع کوره قوس الکتریکی می‌باشد. کوره قوس الکتریکی یکی از بارهای مصرفی بزرگ در شبکه قدرت می‌باشد و که با توجه به اینکه یک بار غیرخطی و تصادفی است، باعث اختلالات زیادی را در شبکه ایجاد می‌کند. کوره قوس باعث ایجاد مشکلاتی مانند هارمونیک، زیرهارمونیک، نامتعادلی ولتاژ، فلیکر ولتاژ و نوسان ولتاژ و جریان روی شبکه قدرت می‌شود[۱]. در کوره‌های قوس الکتریکی با بالابردن توان الکتریکی، ترانسفورماتورهای کوره نه تنها میزان هدر رفتن انرژی را کاهش می‌دهند بلکه ازدیاد توان ترانسفورماتور باعث کوتاه‌تر شدن مدت زمان ذوب و در نتیجه اقتصادی‌تر شدن تولید فولاد نیز شده است. بنابراین با توجه به اهمیت تولید فولاد به روش قوس الکتریکی، اگر بتوان ماکزیمم توان ممکن را در کمترین زمان به کوره منتقل نمود، بازده تولیدی فولاد افزایش خواهد یافت. کوره‌های قوس الکتریکی با وجود مزیت‌های فراوانی که در زمینه تولید فولاد نسبت به سایر روش‌ها دارند معایب زیادی نیز دارند که اگر بتوان این معایب را برطرف یا کم رنگ‌تر نمود، گامی بزرگ در صنعت تولید فولاد برداشته شده است[۲].

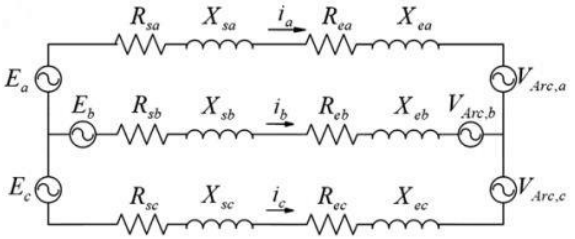
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021

کوره‌های قوس الکتریکی به طور گسترده در صنایع تولید فولاد برای ذوب فلزات استفاده می‌شود. از آنجا که فرآیند ذوب در یک کوره قوس الکتریکی یک فرآیند تصادفی ناپایدار است، می‌تواند سبب برخی رخدادها از قبیل فلیکر، هارمونیک، اینترهارمونیک در شبکه‌ی تولید به خصوص در نقطه‌ی کوپلینگ مشترک شود. کوره قوس الکتریکی یک بار شدیدا غیرخطی است که به واسطه‌ی طبیعت تصادفی امپدانس قوس و فاکتورهایی از قبیل فشار و دما، رسانایی آن تعیین می‌شود. از آنجا که کوره قوس الکتریکی سبب بروز مشکلات کیفیت توان در سیستم قدرت می‌شود، به‌کارگیری اقدامات احتیاطی برای کمینه‌سازی اثرات مخرب آن بر بهره‌برداری لازم است. بنابراین ضروری است که مدل دقیق و عملی از کوره قوس الکتریکی توسعه داده شود. این مهم به واسطه پیچیدگی مشخصات کوره قوس الکتریکی و تصادفی بودن مرحله ذوب فلزات مسئولیتی چالش برانگیز است.

در حال حاضر مطالعات زیادی در خصوص مدلسازی کوره قوس الکتریکی انجام شده است که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره شده است. در مرجع [۳] یک حل فرم بسته برای معادله تعادل توان کوره قوس الکتریکی پیشنهاد شده است که مبتنی بر اندازه‌گیری همزمان جریان و ولتاژ کوره می‌باشد که بر اساس حل تحلیلی معادله تعادل توان در حالت کلی توسعه یافته است. در مرجع [۴] یک مدل دینامیکی برای یک کوره قوس الکتریکی در حوزه زمان با در نظر گرفتن رفتار تصادفی آن‌ها پیشنهاد شده است که برای تخمین فلیکر ولتاژ در شبکه‌ی انتقال توان به کار گرفته شده است. در مرجع [۵] یک مدل ولتاژ – جریان دینامیکی بهبودیافته برای یک کوره قوس الکتریکی برای مراحل مختلف بهره-برداری و مطالعه‌ی انتشار نوسانات ولتاژ در شبکه‌های توان پیشنهاد شده است و با استفاده از تبدیل ویولت و روش‌های مبتنی بر شبکه‌ی عصبی مصنوعی با آموزش داده‌های واقعی ولتاژ و جریان توسعه داده شده است. در مرجع [۶] اثرات استتکام بر کارایی کوره‌های قوس الکتریکی مطالعه شده است. در این مقاله، یک مدل تصادفی واقعی برای کوره قوس الکتریکی استفاده شده است. تمامی پارامترهای این مدل بر اساس یک مدل واقعی کوره قوس الکتریکی ۲۸/۲ مگاواتی مدل‌سازی شده است. در مرجع [۷] یک روش پیش‌بین جدید برای بهبود کارایی جبران‌ساز وار استاتیکی در کوره‌های قوس الکتریکی توسعه داده شده است که الگوی جبران‌سازی توان در کوره قوس الکتریکی را برای نیم سیکل به منظور بهبود فرآیند جبران‌ساز تجهیز SVC مدل‌سازی می‌کند. در مرجع [۸] برای غلبه بر محدودیت پالس آتش تریستور و تاخیر در اندازه‌گیری توان راکتیو کوره‌های قوس الکتریکی، رورش‌های پیش‌بینی به کار گرفته شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان توان راکتیو کوره قوس الکتریکی را برای نیم سیکل تخمین زد. در مرجع [۹] یک مدل هوشمند و دینامیکی کوره قوس الکتریکی در حوزه زمان بر اساس سیستم نرو فازی تطبیقی پیشنهاد و طراحی شده است. در این روش، سیستم نرو فازی تطبیقی توسط چندین بهره‌برداری حقیقی کوره قوس الکتریکی آموزش داده می‌شود و یک الگوی شناسایی مبتنی بر روش کد زنجیری اصلاح شده نیز ارایه شده است. در مرجع [۱۰] یک تکنیک بهینه‌سازی دو مرحله‌ای جدید برای شناسایی پارامترهای کوره قوس الکتریکی با در نظر گرفتن طبیعت تصادفی طول قوس ارایه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است که شکل موج‌های ولتاژ و جریان را برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی زمان متغیر یک کوره قوس الکتریکی وفق می‌دهد. در [۱۱] مدلی دقیق برای تحلیل تابعیت بین تغییرات فرکانس، فلیکر ولتاژ، هارمونیک جریان و ولتاژ ارایه شده است. در این مقاله مدلی جدید مبتنی بر تئوری مدل مارکوف پنهانی برای یک قوس الکتریکی ارایه شده است.

یک شماتیک دقیق برای تخمین شکل موج‌های ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی را می‌توان با استفاده از مدل‌های مرسوم که شامل تغییرات سینوسی و تصادفی مقاومت قوس و یا ولتاژ قوس می‌شود، به دست آورد. مقاومت قوس و یا ولتاژ قوس به طول قوس بستگی دارد. بنابراین هر دو روش تغییرات سینوسی و تصادفی را می‌توان برای طول قوس در نظر گرفت. تغییرات سینوسی طول قوس از یک قاعده‌ی معین و باند محدود با تغییر نویز طول قوس در اطراف یک مقدار مرجع که از قوانین تصادفی پیروی می‌کند. در نظر گرفتن طول قوس متغیر با زمان همچون یک پدیده‌ی تصادفی، روش تصادفی را پشتیبانی می‌کند. مدل تصادفی دقت بیشتری برای محاسبات واقع‌بینانه دارد. یک روش تخمین پارامتر از تغییرات تصادفی طول قوس استفاده می‌کند. روش یاد شده به شکل موفقیت‌آمیزی طبیعت تصادفی قوس را شامل می‌شود. با این حال، پیشینه‌ی اصولی این مدل این است که تمامی مشخصات کوره قوس الکتریکی را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین لازم است یک روش موثرتری برای تخمین شکل موج‌های ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی و با دقت بیشتر پیشنهاد گردد. با توجه به اثربخشی بهینه‌سازی چندهدفه در تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی، این روش در تحقیقات مربوطه تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی استفاده نشده است. در این مقاله، یک مکانیسم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی جدید برای تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی پیشنهاد خواهد شد که هدف از این تخمین، پیش‌بینی شکل موج‌های جریان و ولتاژ و ارزیابی کارایی کوره تحت شرایط مختلف می‌باشد. در شکل ۱، دیاگرام مداری کوره قوس الکتریکی آورده شده است.



شکل (۱): دیاگرام مداری کوره قوس الکتریکی [۱۲]

روش بهینه‌سازی چندهدفه خطای انحراف ولتاژ و مقاومت قوس را به طور همزمان کمینه می‌کند تا از این طریق کارایی مدل کوره قوس

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

الکتریکی بهبود یابد. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی الگوریتم ژنتیک و تغییرات تصادفی طول قوس را به کار می‌بندد تا پارامترهای مدل متغیر با زمان و غیرخطی مقاومت کوره قوس الکتریکی را با استفاده از داده‌های واقعی ولتاژ و جریان تخمین بزند. داده‌های موردنیاز از یک کارخانه فولاد خوزستان اخذ و استفاده خواهد شد. ساختار مقاله به این شرح است: در بخش دوم فرمول‌بندی و مدلسازی مساله آورده شده است، در فصل سوم نتایج شبیه‌سازی بیان شده است و در پایان نیز نتیجه‌گیری کلی مقاله مهیا شده است.

۲- فرمول‌بندی و مدلسازی مساله

یک کوره قوس الکتریکی مشخصات غیرخطی شدیدی دارد که می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در کیفیت توان گردد. کارایی آن یک مساله‌ی حیاتی برای کاربردهای الکتریسیته می‌باشد. در این مقاله، فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی با هدف دستیابی به تخمین دقیقی از شکل موج ولتاژ و جریان کوره اعمال می‌گردد. روش بهینه‌سازی چندهدفه خطای انحراف ولتاژ و مقاومت قوس را به طور همزمان کمینه می‌کند تا از این طریق کارایی مدل کوره قوس الکتریکی بهبود یابد. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی الگوریتم ژنتیک و تغییرات تصادفی طول قوس را به کار می‌بندد تا پارامترهای مدل متغیر با زمان و غیرخطی مقاومت کوره قوس الکتریکی را با استفاده از داده‌های واقعی ولتاژ و جریان تخمین بزند. این داده‌ها از یک کارخانه فولاد در خوزستان به دست آمده است.

۲-۱- مدل مقاومت غیرخطی متغیر با زمان کوره قوس الکتریکی

داده‌های ولتاژ و جریان EAF بحث شده برای تخمین پارامترهای مدل مقاومت غیرخطی متغیر با زمان EAF ا ستفاده شده ا ست. مدل مقاومت غیرخطی متغیر با زمان به صورت زیر بیان می‌شود[۱۳]:

$$R_a=\begin{cases} R_g & 0\le|i|<i_{ig},\ \dfrac{d|i(t)|}{dt}>0 \\ V_d+\dfrac{(V_{ig}-V_d)e^{\frac{|i|-i_{ig}}{\tau_1}}}{|i|} & |i|\ge i_{ig},\ \dfrac{d|i(t)|}{dt}>0 \\ \dfrac{V_t+(V_{ig}-V_t)e^{\frac{|i|}{\tau_2}}}{|i|+i_{ig}} & \dfrac{d|i(t)|}{dt}<0 \end{cases} \quad (۱)$$

$$V_d=A+B.l \quad (۲)$$

$$V_{ig}\approx 1.15V_d \quad (۳)$$

$$i_{ig}=\frac{V_{ig}}{R_g} \quad (۴)$$

$$V_t=\left(\frac{I_{\max}+i_{ig}}{I_{\max}}\right) \quad (۵)$$

در روابط فوق A ثابتی است که افت ولتاژ را در الکترودهای کاتد و آند EAF بیان می‌کند. B نیز ثابتی است که ولتاژ در واحد طول قوس را بیان می‌کند. واحدهای A و B به ترتیب V و V/cm است. طول قوس نیز به صورت l نشان داده شده است. ولتاژ V_d و V_{ig} به ترتیب ولتاژهای از بین رفته و آتش را نشان می‌دهد. جریان آتش نیز به صورت i_{ig} نشان داده می‌شود. R_g یک مقاومت ثابت می‌باشد. افت ولتاژ از V_{ig} به V_d با یک تابع نمایی با ثابت زمانی τ_1 نشان داده می‌شود. یک تابع نمایی دیگر با ثابت زمانی τ_2 نیز بیانگر دوره‌ای است که قوس رو به افول می‌رود. تغییرات تصادفی طول قوس در مدل بالا دخیل شده است. رابطه‌ی طول قوس به صورت زیر است:

$$I(t)=Ir-r(t) \quad (۶)$$

در این رابطه Ir طول قوس مرجع و $r(t)$ سیگنال نویز سفید باند محدود با محدوده فرکانسی ۵ تا ۲۰ هرتز می‌باشد.

۲-۲- توابع هدف برای تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی

تابع هدف استفاده شده برای تخمین پارامترهای مدل مقاومت غیرخطی متغیر با زمان در این بخش تشریح شده است. دو تابع هدف برای تخمین پارامترهای موردنیاز EAF استفاده شده است. اولین تابع هدف مجموعه‌ی پارامترهای λ متعلق به فضای حل β را تخمین می‌زند که خطای بین ولتاژ تخمین زده شده $V_{d(est)}$ و ولتاژ قرایت شده $V_{d(meas)}$ را کمینه می‌کند. این تابع هدف یک مساله‌ی کمینه سازی بدون محدودیت برای تخمین خطاست که به صورت زیر بیان می‌شود[۱۳]:

$$\begin{cases} \lambda=\{A,B,l\} \\ \min_{\lambda\in\beta} f(\lambda) \\ f(\lambda)=OF1\left(V_{d(meas)},V_{d(est)}\right) \end{cases} \quad (۷)$$

اولین تابع هدف $OF1$ مقدار خطا را محاسبه می‌کند:

$$OF1=V_{d(est)}-V_{d(meas)} \quad (۸)$$

تابع هدف دوم مجموعه پارامترهای μ مربوط به فضای حل α را تخمین می‌زند تا خطای بین مقاومت قوس اندازه‌گیری شده $R_{a(meas)}$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

و مقاومت قوس تخمین زده شده $R_{a(est)}$ کمینه گردد. این مساله به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \mu = \tau_1, \tau_2, I_{\max} \\ \min_{\mu\in\alpha} f\ (\mu) \\ f\ (\mu) = OF2\left(R_{a(meas)}, R_{a(est)}\right) \end{cases} \quad (۹)$$

دومین تابع هدف مقدار میانگین مجموع خطای مربعات را تعیین می‌کند:

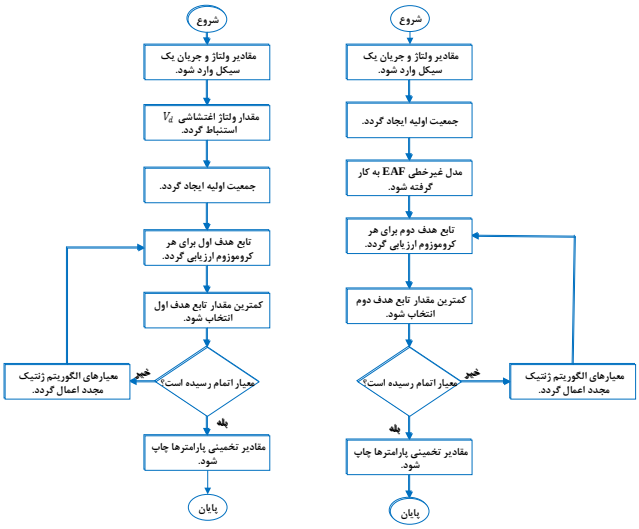
$$OF2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(R_{a(est)_i} - R_{a(meas)_i}\right)^2}}{N} \quad (۱۰)$$

۳-۲- اعمال الگوریتم ژنتیک بر حل مساله‌ی بهینه-سازی

شماتیک بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده از اندازه‌گیری‌ها را ممکن می‌سازد و سپس الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامترها به کار گرفته می‌شود. رویه در فلوچارت شکل ۲ نمایش داده شده است. در گام اول کمینه‌سازی اولین تابع هدف انجام می‌شود و پارامترهای A، B و l تخمین زده می‌شود. الگوریتم ژنتیک جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده را در یک سیکل به عنوان مقدار ورودی در نظر می‌گیرد که در نتیجه ولتاژ از بین رفته را محاسبه می‌کند. جمعیت اولیه به تعداد کروموزوم‌ها تخصیص داده می‌شود و $OF1$ برای هر کروموزوم ارزیابی شده تا کمترین مقدار $OF1$ که معیارهای موجود را ارضا کند، به دست آید. جهش، تلفیق و باز تولید برای این کروموزوم‌ها انجام می‌شود تا کمینه‌ی $OF1$ حاصل شود. در گام دوم، دومین تابع هدف کمینه شده و پارامترهای τ_1 ، τ_2 و I_{max} تخمین زده می‌شود. مقادیر ولتاژ و جریان اندازه گیری شده و پارامترهای تخمین زده شده از گام اول به عنوان ورودی مدل EAF غیرخطی داده می‌شود تا مقادیر کمینه $OF2$ به دست آید. این پارامترها مربوط به مقادیر کمینه $OF1$ و $OF2$ می‌باشد. پارامترهای EAF برای هر سیکل جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده در یک نمونه تخمین زده می‌شود. سپس میانگینی برای تمامی پارامترهای یک سیکل نمونه ارایه می‌شود که مقدار نهایی هر پارامتر را در نظر می‌گیرد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

پس از ارایه‌ی روش پیشنهادی برای جبران‌سازی اغتشاشات ناشی از کوره قوس الکتریکی و روش تخمین پارامترهای آن، در این بخش شبیه-سازی روش پیشنهادی ارایه می‌گردد. روش پیشنهادی به این صورت است که در ابتدا مدل ساده و بدون جبران‌سازی کوره قوس الکتریکی در حالت متصل به شبکه شبیه‌سازی می‌شود. سپس در گام بعدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای کوره قوس الکتریکی تخمین زده شده و سپس با استفاده از مقادیر تخمین زده شده، جبران‌ساز وار استاتیکی (SVC) را وارد نموده تا پاسخ‌های مربوط به ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی بهبود پیدا کند. بهینه‌سازی در محیط سیمولینک متلب انجام شده و مدل کوره قوس الکتریکی با پارامترهای تخمین زده شده در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی می‌شود. نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی با داده‌های واقعی از صنعت فولاد اعتبارسنجی می-شود. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی اثربخش و دقیق می‌باشد.



شکل (۲): اعمال الگوریتم ژنتیک بر حل مساله‌ی بهینه‌سازی

۳-۱- ورودی‌های مساله

پارامترهای اولیه‌ی مورد استفاده برای شبیه‌سازی کوره قوس الکتریکی و مشخصلا سیستم قدرت به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات سیستم قدرت

پارامتر	مقدار
مقدار موثر ولتاژ فاز به فاز	$0.4KV$
زاویه فاز	0°
فرکانس	$50Hz$
سطح اتصال کوتاه سه فاز	$90MVA$
ولتاژ پایه	$0.4KV$
نسبت X/R	7

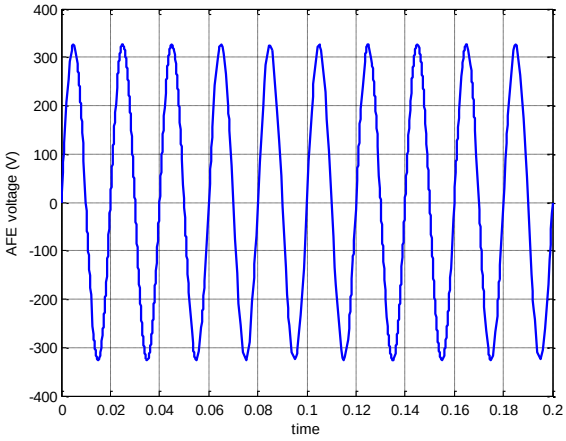
جدول (۲): پارامترهای اولیه‌ی کوره قوس الکتریکی

پارامتر	مقدار
A	۱۹۰۰۰
B	۵۰۰۰
l	۲۰۰
$I_{\max}$	۰/۲

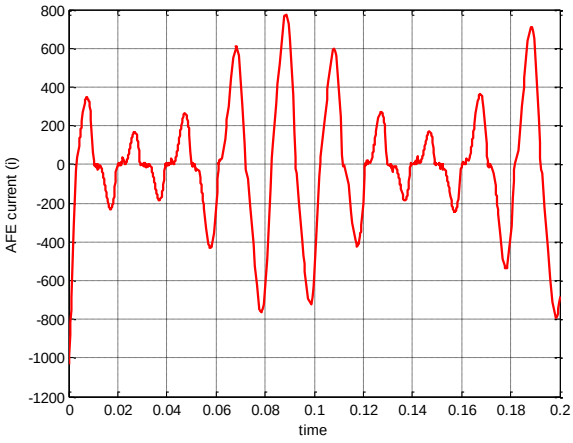
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۲-۳- ساختار مرسوم کوره قوس الکتریکی

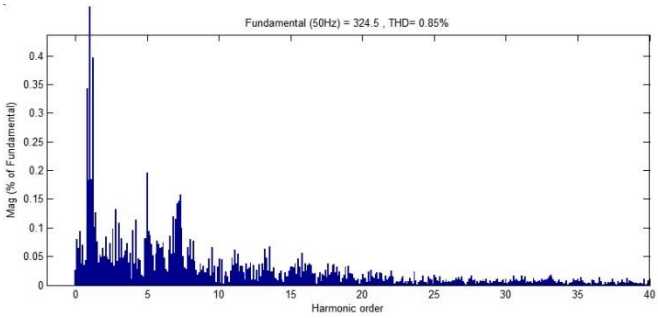
شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب ساختار ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها می‌توان کیفیت توان نامطلوب پاسخ‌های کوره قوس الکتریکی پی برد که نیازمندی آن به یک جبران‌ساز توان راکتیو و بهبود دهنده‌ی کیفیت توان را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب طیف فرکانسی پاسخ ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): پاسخ ولتاژ کوره قوس الکتریکی در ساختار مرسوم

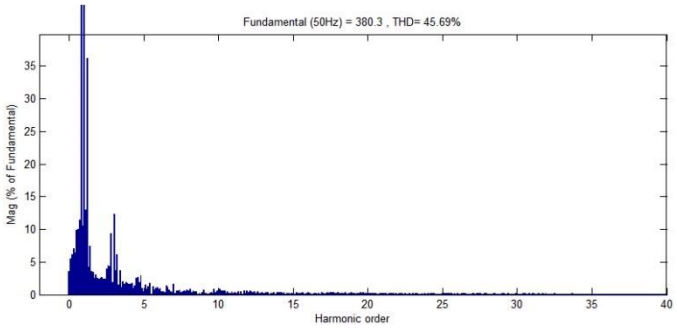


شکل (۴): پاسخ جریان کوره قوس الکتریکی در ساختار مرسوم



شکل (۵): طیف فرکانسی پاسخ جریان کوره قوس الکتریکی در ساختار مرسوم

با دقت در پاسخ مربوط به طیف فرکانسی ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی در حالت مرسوم مشاهده می‌شود که عمده طیف فرکانسی در محدوده حدود یک هرتز بسیار زیاد می‌باشد از این رو ضریب اعوجاج هارمونیکی برای این دو پاسخ بالا می‌باشد.



شکل (۶): طیف فرکانسی پاسخ جریان کوره قوس الکتریکی در ساختار مرسوم

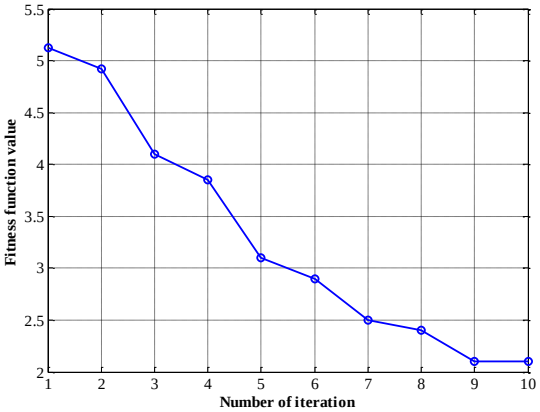
۳-۳- تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی به روش ژنتیک

پارامترهای در نظر گرفته شده برای الگوریتم ژنتیک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۳): مقادیر اولیه‌ی الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۲۰
تعداد تکرارها	۱۰
احتمال جهش	۰/۷
احتمال تلفیق	۰/۳

منحنی همگرایی تابع هدف در الگوریتم ژنتیک در شکل ۷ آورده شده است که در مقدار ۲/۱ ثابت شده است.



شکل (۷): منحنی تابع همگرایی در حل مساله‌ی بهینه‌سازی

پس از اعمال الگوریتم ژنتیک بر تابع هدف در نظر گرفته شده، مقادیر تخمینی این پارامترها به صورت زیر به دست می‌آید.

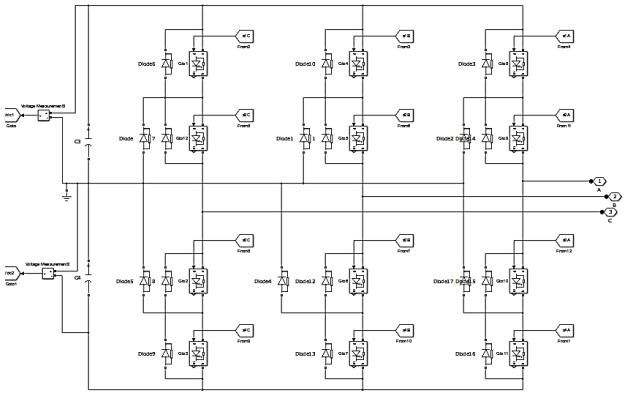
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول (۴): پارامترهای اولیه‌ی کوره قوس الکتریکی

پارامتر	مقدار
A	۱۸۱۰۷/۸۲۴۱
B	۴۱۷۲/۰۹۵۲۱
l	۰/۱۵۰۶۹۷۰۰۹
I_{max}	۲۱۴/۹۱۱۵۴۷

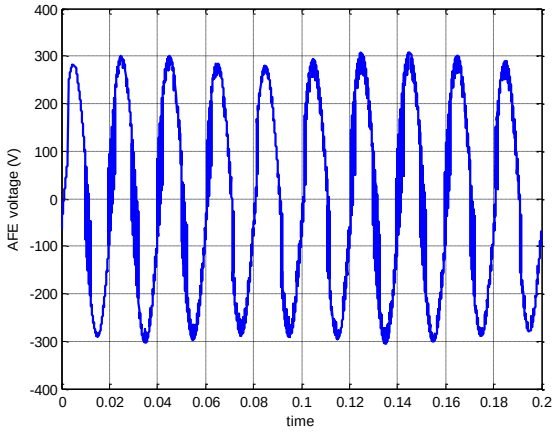
۴-۳- ساختار بهینه‌ی کوره قوس الکتریکی با SVC

مدل پیاده‌سازی شده از جبران‌ساز SVC در محیط سیمولینک MATLB در شکل ۸ نشان داده شده است.

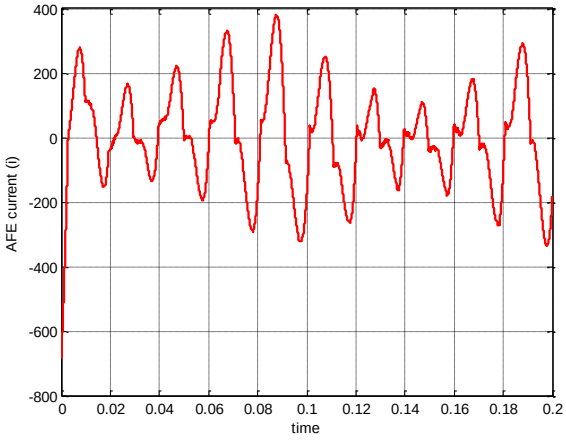


شکل (۸): شماتیک **SVC** در محیط سیمولینک **MATLAB**

در این حالت، پارامترهای تخمینی کوره قوس الکتریکی اعمال شده و برای جبران توان راکتیو کوره قوس الکتریکی نیز، جبران‌ساز وار استاتیکی نصب می‌شود. خروجی مربوط به ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.



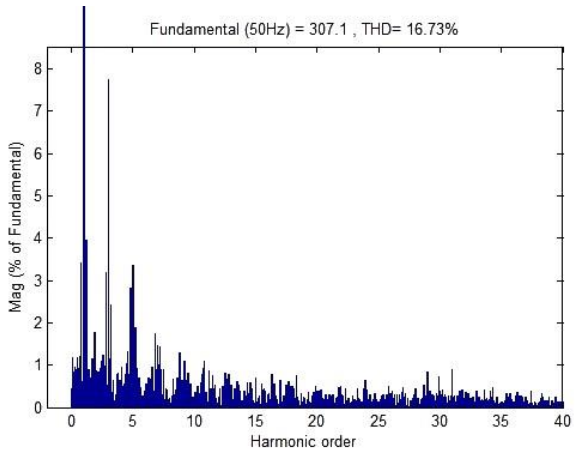
شکل (۹): پاسخ ولتاژ کوره قوس الکتریکی با پارامترهای تخمینی و **SVC**



شکل (۱۰): پاسخ جریان کوره قوس الکتریکی با پارامترهای تخمینی و **SVC**

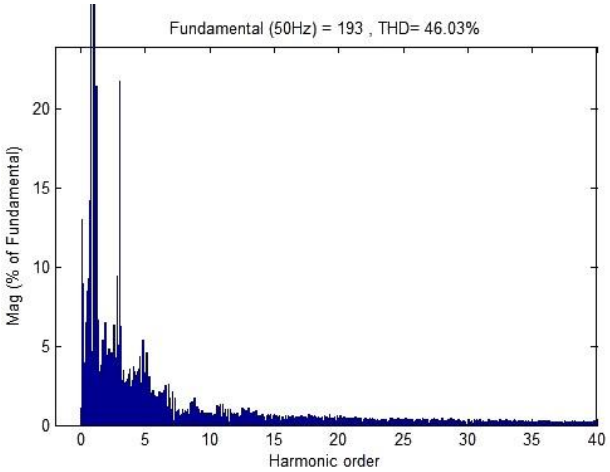
با دقت در پاسخ شکل موج ولتاژ کوره قوس با به‌کارگیری پارامترهای تخمینی و SVC، شکل موج حاصل به حالت سینوسی ایده‌آل نزدیک تر بوده و در نتیجه ضریب اعوجاج هارمونیکی کمتری دارد. با دقت در شکل ۸ مشاهده می‌شود که پاسخ جریان تغییر چندانی نسبت به پاسخ‌های جریان قبلی از حیث ضریب اعوجاج هارمونیکی ندارد و تنها اندازه‌ی این جریان هارمونیکی کاهش یافته است.

طیف فرکانسی ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی برای حالتی که پارامترهای تخمینی اعمال شده است و همچنین جبران‌ساز SVC نیز به‌کار گرفته شده است، به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. با دقت در طیف فرکانسی ولتاژ مشاهده می‌شود که ضریب اعوجاج هارمونیکی در این حالت نسبت به دو حالت قبلی کمتر است.



شکل (۱۱): طیف فرکانسی پاسخ ولتاژ کوره قوس الکتریکی با پارامترهای تخمینی در حضور **SVC**

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



شکل (۱۲): طیف فرکانسی پاسخ جریان کوره قوس الکتریکی با پارامترهای تخمینی در حضور **SVC**

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه کوره قوس یکی از مهم ترین عوامل ایجاد فلیکر و هارمونیک و تغییرات ولتاژ در شبکه می باشد باید با نصب تجهیزات مناسب با توجه به ظرفیت کوره میزان این اغتشاشات را تا حد امکان کاهش داد. با نصب ادوات جبران ساز می توان میزان اختلالات ناشی از کوره قوس بر روی شبکه را تا حد زیادی کاهش داد. و به منظور مطالعه رفتار کوره قوس و طراحی جبران ساز مناسب برای آن نیاز به شبیه سازی کوره قوس در محیط نرم افزار می باشد که برای این منظور نیاز به یک مدل تا حد امکان دقیق برای کوره قوس می باشد. نمونه برداری در یک سیکل ذوب کامل کوره قوس انجام گردید. با مشاهده نتایج نمونه برداری مشاهده شد که شکل موج ولتاژ و جریان کوره در ابتدای سیکل ذوب دارای اعوجاج بسیار زیادی نسبت به شکل موج ولتاژ و جریان انتهای سیکل ذوب می باشد. در نتیجه اکثر اختلالات ناشی از عملکرد کوره قوس بر روی شبکه مربوط به مرحله ابتدایی ذوب می باشد. در ادامه با استفاده از اطلاعات نمونه برداری شده از کوره قوس شرکت فولاد خوزستان و با کمک الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه مدل های مختلف برای مطابقت با اطلاعات نمونه برداری شده از کوره، مشخص گردید. در الگوریتم ژنتیک جذر مجموع مقادیر پریونت شده تفاضل ولتاژ کوره و ولتاژ مدل به توان دو و تفاضل‌های مقاومت کوره و مقاومت مدل به توان دو به عنوان تابع هدف انتخاب شده است. سپس میزان تابع هدف برای مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک که مقدار ۲/۱ می‌باشد، نیز بیان گردید. با در نظر گرفتن طیف هارمونیکی ولتاژ و جریان مدل های مختلف و میزان تابع هدف خروجی آنها، مدل بهینه‌ی مبتنی بر ژنتیک به عنوان مدل مناسبت تر انتخاب گردید. در انتها سیکل های مختلف از شکل موج ولتاژ و جریان کوره قوس انتخاب شده و در الگوریتم ژنتیک پارامترهای بهینه مدل به منظور مطابقت با سیکل‌های انتخابی به دست آمد.

مراجع

[1] Kovačič, Miha, Klemen Stopar, Robert Vertnik, and Božidar Šarler. "Comprehensive electric arc furnace electric energy consumption modeling: A pilot study." *Energies* 12, no. 11 (2019): 2142.

[2] Fathi, Amirhossein, Yadollah Saboohi, Igor Škrjanc, and Vito Logar. "Comprehensive Electric Arc Furnace Model for Simulation Purposes and Model-Based Control." *steel research international* 88, no. 3 (2017): 1600083.

[3] D. Solati Alkaran, M. Vatani, M. Sanjari, and G. Gharehpetian, "Parameters estimation of electric arc furnace based on an analytical solution of power balance equation," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, p. e2295, 2017.

[4] A. T. Teklić, B. Filipović-Grčić, and I. Pavić, "Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network," *Electric Power Systems Research*, vol. 146, pp. 218-227, 2017.

[5] G. W. Chang, S.-J. Lin ,Y.-Y. Chen, H.-J. Lu, H.-H. Chen, and Y.-R. Chang, "An advanced EAF model for voltage fluctuation propagation study," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, pp. 980-988, 2017.

[6] B. Sakhaee, D. F. Sheilkholeslami, M. Esmailee, and D. Nazeri, "Modeling Electrical Arc Furnace (EAF) and Simulating STATCOM Devices for Adjusting Network Power Quality," in *Fundamental Research in Electrical Engineering*, ed: Springer, 2019, pp. 639-654.

[7] A. K. Fard, W. Su, J. Tao, A. S. Al-Sumaiti, H. Samet, and A. Khosravi, "A Predictive KH-Based Model to Enhance the Performance of Industrial Electric Arc Furnaces," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018.

[8] H. Samet, A. Mojallal, T. Ghanbari, and M. R. Farhadi, "Enhancement of SVC performance in electric arc furnace for flicker suppression using a Gray-ANN based prediction method," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, p. e2811, 2018.

[9] M. T. Esfahani and B. Vahidi, "A New Dynamic Intelligent Time Domain Arc Furnace Modeling based on Combination Adaptive Neuro-fuzzy Inference System and Chain Code," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, pp. 1261-1275, 2016.

[10] S. M. Agah, S. Hosseinian, H. A. Abyaneh, and N. Moaddabi, "Parameter identification of arc furnace based on stochastic nature of arc length using two-step optimization technique," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 25, pp. 2859-2867, 2010.

[11] M. T. Esfahani and B. Vahidi, "A new stochastic model of electric arc furnace based on hidden Markov model: a study of its effects on the power system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1893-1901, 2012.

[12] Khoshkhoo, H., Seyed H. Hesamedin Sadeghi, Rouzbeh Moini, and Heidar Ali Talebi. "An efficient power control scheme for electric arc furnaces using online estimation of flexible cable inductance." *Computers & Mathematics with Applications* 62, no. 12 (2011): 4391-4401.

[13] Illahi, Fazal, Ibrahim El-Amin, and Muhammad Usman Mukhtiar. "The application of multiobjective optimization technique to the estimation of electric arc furnace parameters." *IEEE Transactions on Power Delivery* 33, no. 4 (2017): 1727-1734.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Estimation of electric arc furnace parameters using multi-objective optimization method and genetic algorithm (Case study: Khuzestan Steel Plant)

Iman Rezaeinasab[1], Seyed Mohsen Seyed Mosavi[2]
1-MSc student, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, iman_rezayi@yahoo.com

2-Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, mohsenmoosavi2000@yahoo.com

Abstract: Electric arc furnace is one of the major loads in the power grid and which, due to the fact that it is a non-linear and random load, causes many disturbances in the grid. The arc furnace causes problems such as harmonic, sub-harmonic, voltage imbalance, flicker voltage and voltage fluctuation and current on the power grid. Therefore, in order to reduce the problems caused by electric arc furnaces, it is necessary to install compensating equipment such as SVC next to them. In order to analyze the effects of electric arc furnace on the network, calculate the capacity and type of compensator required for each arc furnace, first the appropriate furnace model must be extracted and performed in the simulation software environment. After performing the simulation in the software environment and studying the furnace behavior, a suitable compensator will be designed for the arc furnace. Given that the arc furnace has a nonlinear and random behavior, it is difficult to provide a suitable and accurate model for studying the power quality phenomena caused by the furnace on the network. The purpose of this article is to obtain a suitable model for the electric arc furnace of Khuzestan Steel Company. For this purpose, the voltage and current of the furnace transformer are first taken. Then, the genetic algorithm is used to adapt the desired models and obtain the optimal model parameters and the best model is selected.

Keywords: Arc furnace, optimization, genetic algorithm, voltage, current, SVC

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.3.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021