ارائهٔ یک مدل دینامیکی برای کوره قوس الکتریکی در حضورSVC به منظور کاهش مشکلات کیفیت انرژی و بهبود ولتاژ کوره در شبکهٔ توزیع

حسین عزیزی — دانشجوی کارشناسی ارشد
احد کاظمی — دانشیار گروه قدرت
ابوالفضل واحدی — استادیار گروه قدرت

دا نشکده برق دانشگاه علم وصنعت ایران

واژه های کلیدی: کورهٔ قوسی _ جبرانساز TCR/FC _ فلیکر _ میان هارمونیک

چکیده

امروزه کوره های قوس الکتریک به طور وسیعی در صنعت فولاد و ریخته گری مورد استفاده قرار می گیرند. در یک کورهٔ قوس الکتریک نوسانات لحظه ای با دامنه های زیاد توانهای اکتیو و راکتیو منشاء اغتشاشات در سیستم توزیع می باشد. این امر می توا ند هم برای تولید کننده های فولاد و هم برای شبکهٔ توزیع مشکل آفرین باشد. ایجاد نوسانات ولتاژ به صورت فلیکر، مشکلات هارمونیکی و میان هارمونیکی، از جمله مشکلاتی هستند که کوره ها ی قوسی ایجاد می کنند. بااستفاده از جبران کننده های توان راکتیو مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت مانند SVC و STATCOM می توان تا حد زیادی مشکلات کیفیت توان ناشی از کوره های قوس الکتریک در سطح سیستمهای توزیع را حل کرد. در این مقاله ابتدا یک کورهٔ قوس ا لکتریک مدلسازی و شبیه سازی شده است. سپس به منظور کاهش مشکلات کیفیت توان ناشی ازکورهٔ قوسی وبهبودولتاژ شین کوره، تاثیر یک جبران کنندهٔ توان راکتیو استاتیکی TCR/FC بر تغییرات ولتاژ و جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

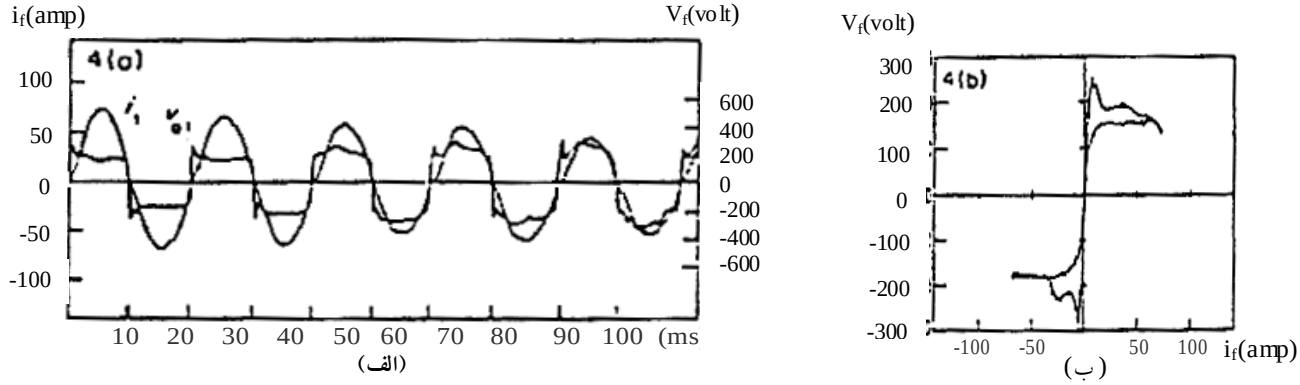
۱ – مقدمه

امروزه استفاده از توان الکتریکی در صنعت فولاد و ریخته گری بسیار معمول بوده به طوری که گرمای مورد نیازبرای ذوب کردن بار فلزی، گرم نگه داشتن مواد مذاب در یک دمای معین، انجام عملیلات بخصوص متا لوژیکی برروی مواد مذاب، به کمک روشهای متعددی بااستفاده از توان الکتریکی فراهم می شود. کوره های قوسی برای ذوب قطعات جامد فلزی به منظور اکسید اسیون، آلیاژسازی وتصفیه مورد استفاده قرار می گیرند. در این کوره ها به دلیل ماهیت قوس و نوسانهای لحظه ای با دامنه ها نسبتاً زیاد توانهای اکتیو و راکتیو مشکلات کیفیت توان را برای شبکه و مصرف کنندگان دیگروهمچنین خودتولیدکننده های فولادایجاد می کند. ایجاد فلیکر،مشکلات هارمونیکی و میان هارمونیکی، ایجاد نامتعادلی ولتاژ در شبکه از آن جمله هستند[۱]،[۲]،[۳]. به منظور کاهش اثرات نامطلوب کورهای قوس الکتریک روشهای مختلفی ارائه شده که استفاده از جبران کننده های توان راکتیو مانند SVCوSTATCOM از آن جمله هستند. اولین بار در سال ۱۹۷۳، جبران کنندهٔ توان راکتیو SVC به منظور کاهش فلیکر تولید شده توسط کورهٔ قوسی، بکار برده شده است. این جبران کننده ها با استفاده از خازنها و راکتورها و ادوات نیمه هادی با محدودهٔ توان بالا منبع تولید یا جذب توان راکتیو را تشکیل می دهند. کنترل ولتاژ به وسیلهٔ کنترل جریان راکتور جذب شده توسط مجموعهٔ خازن وسلف انجام می پذیرد. مزیت اصلی این جبران کننده ها سرعت بالای آنها می باشد به طوری که با کمک آنها می توان به میزان زیادی اثرات فلیکر مربوط به کوره های قوسی را کاهش داد[٤]،[٥]،[٦]. در این مقاله ابتدا رفتار قوس بررسی می شود و سپس با توجه به مشخصهٔ ولتاژ – جریان قوس یک مدار معادل برای آن ارائه می شود و با انجام شبیه سازی در محیط MATLAB رفتار قوس و مشکلات ناشی از آن بررسی می شود. به منظور بهبود عملکرد کورهٔ قوسی، یک جبران کنندهٔ توان راکتیو (TCR+FC) به صورت یک سیستم کنترلی حلقه بسته مورد استفاده قرار می گیردو با انجام شبیه سازی تاثیر آن روی مشخصه های کیفیت توان مورد بررسی قرار می گیرد.

۲ – قوس الکتریکی و مشکلات ناشی از آن

رفتار دینامیکی قوس در کوره به متغیرهای زیادی بستگی دارد که تمامی آنها تا کنون مشخص نشده اند و هیچ مدل کاملاً دقیق از آن ارائه نگردیده است. عموماً رفتار الکتریکی قوسی توسط ولتاژ و جریان آن مشخص می شود. شکل ۱ مشخصهٔ یک کورهٔ قوسی ۸۰ تنی MVA ۳۰ را نشان می دهد. شکل۱(الف) نشانگر ولتاژ وجریان قوس بر حسب زمان($v_a(t),i_a(t)$)، وشکل۱(ب)نمودار ولتاژ بر حسب

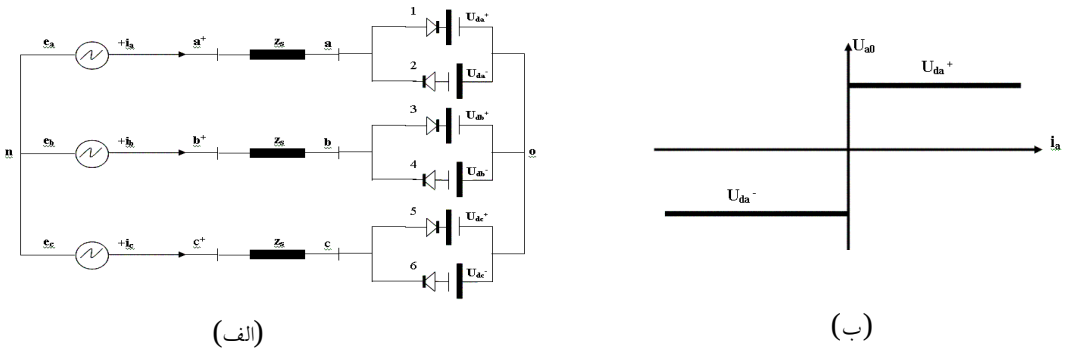
جریان $i_a(t)$ رانشان می دهد[۱]. قوس معمولاً ناپایدار و کا ملاً غیرخطی می باشد. این ناپایداری و غیرخطی بودن قوس بخصوص در هنگام ذوب قراضه های سرد شدیدتر می شود. با سپری شدن پریود ذوب پدیدهٔ جرقهٔ زدن پایدار می گردد ولی جریان همچنان حاوی نوسانات با فرکانس پایین است. شکل موج ولتاژ قوس تقریباً مربعی بوده و دامنهٔ آن بستگی به جریان دارد. همانطور که می دانیم یکی از شرایط مطلوب برای یک شبکهٔ قدرت تنظیم ولتاژ آن در محدودهٔ مجاز است. عموماً نوسانات ولتاژ در شبکه های قدرت یا ناشی از راه اندازی تجهیزات خاص موجود در کار خانجات، کارگاه ها و یا منازل نظیر موتورها، کوره های قوسی و یا نوسانات ولتاژ ناشی از اشکالات وخطا های گذرا در شبکه است. زمانی که تجهیزات و وسایل برقی نظیر موتورهای بزرگ دستگاهای جوش وکوره های قوسی به صورت تکی یا جمعی وارد شبکه می شوند، باعث تغییرات سریع جریان شبکه و در نتیجه ایجاد نوساناتی در ولتاژ می شوند که اثرات این نوسانات بصورت کم وزیاد شدن یا سوسوزدن نور لامپهای رشته ایی ظاهر می گردد که این پدیده را با نام فلیکر می شناسیم. تجربه نشان می دهد که در یک شبکه هر چه به شینی که بار آن کورهٔ قوسی باشد نزدیکتر شویم اثر فلیکر در آن شین مشهودتر است. همچنین تأثیر کورهٔ قوس الکتریک در شین هایی که ظرفیت اتصال کوتاه آنهانسبتاً پائین باشد، بیشتر است. علاوه بر ایجاد نوسانات در ولتاژ شبکه و ایجاد پددهٔ فلیکر کوره های قوسی باعث ایجاد مشکلات هارمونیکی ومیان هارمونیکی می شود، به طوری که به عنوان یکی از مهم ترین منابع هارمونیکی در فیدر های توزیع شناخته می شوند[۲]،[۳].



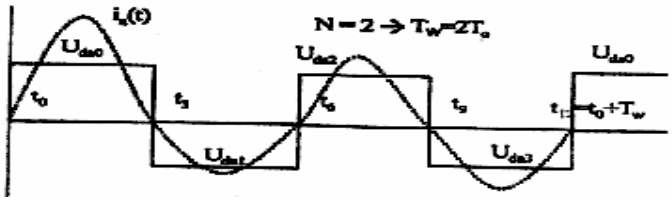
شکل ۱ موج ولتاژ و جریان و مشخصهٔ ولتاژ بر حسب جریان یک کورهٔ قوسی MVA ۳۰

۳- مدلسازی کورهٔ قوسی

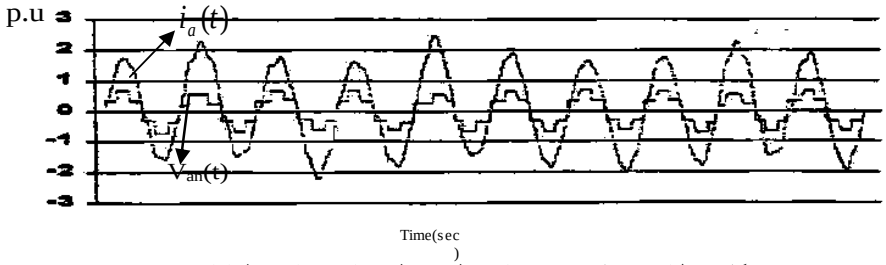
کوره های قوسی بارهای نا متعادل، غیر خطی و متغیر با زمان هستند که باعث ایجاد نامتعادلی واثرات هارمونیکی، میان هارمونیکی وبه همراه آن ایجاد فلیکر در فیدرهای توزیع می شوند. مدل کردن تمام موارد فوق مستلزم این است که یک مشخصهٔدینامیکی غیر خطی از کوره قوسی داشته باشیم[۷]. در اینجا فرض بر آن است که یک مدل غیر خطی، برای مشخصهٔ استاتیکیv-i کوره الکتریکی درشرایط متعادل استفاده می شود. مدار معادل ارائه شده شکل ۲ (الف) شامل دیود و منابع ولتاژ dc می تواند جایگزین مشخصهٔ ولتاژ _ جریان کوره شود. شکل ۲ (ب) مشخصهٔ v-i مربوط به فاز a را نشان می دهد[۸]. به منظور شبیه سازی تغییرات دینامیکی ولتاژ قوس مقادیر U_{da}^{+} و U_{da}^{-} را می توان با پریود دلخواهی تغییر داد. برای مثال در صورتی که ولتاژ U_{da}^{+}و U_{da}^{-} با دو برابر پریود اصلی، به ترتیب بین مقادیر $U_{da\,0}$,$U_{da\,2}$ و $U_{da\,1}$, $U_{da\,3}$ تغییرکند، شکل ولتاژ V_{ao} (ولتاژ قوس)، V_{a^+o} (ولتاژ شین کوره)وجریان $i_a(t)$ مطابق شکل۳ و٤بدست می آید.



شکل ۲مدار معادل غیرخطی قوس(الف) و مشخصهٔ ولتاژ_ جریان فازa(ب)



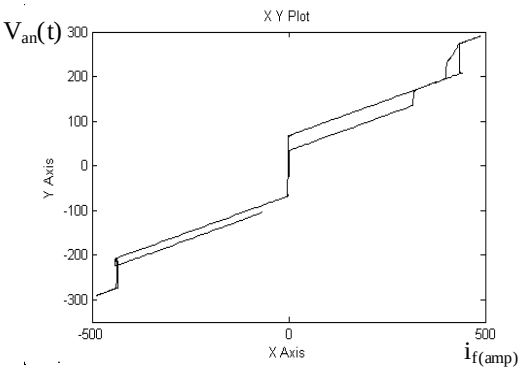
شکل ۳ مدلسازی تغییرات دینامیکی ولتاژ و جریان قوس با استفاده از مدار معادل کوره



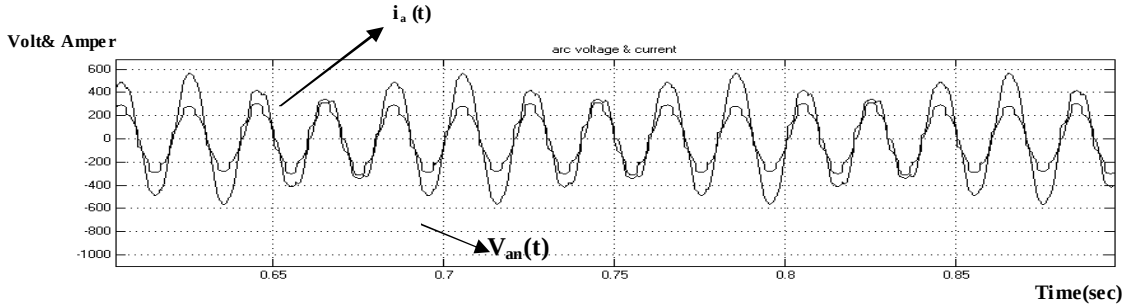
شکل ٤ ولتاژ شین کوره و جریان خط مربوط به فاز **a** برای مدل ارائه شده

۴- شبیه سازی کورهٔ قوسی

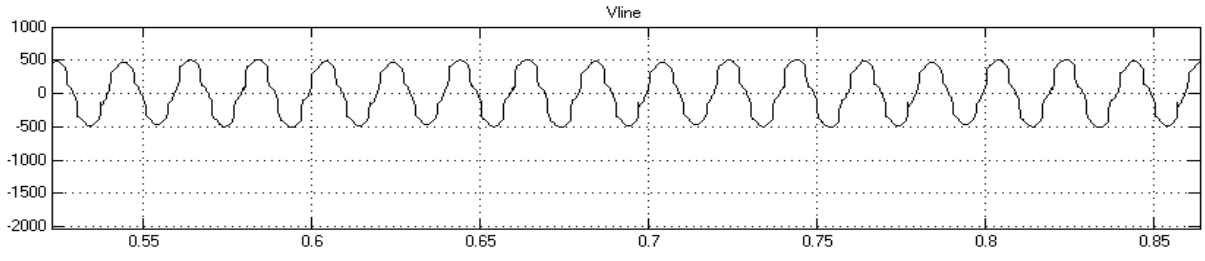
به منظور بررسی رفتار کورهٔ قوسی مدار معادل فوق در محیط SIMULINK/MATLAB شبیه سازی شده است. مشخصهٔ غیر خطی ولتاژ ـجریان قوس برای مدل ارائه شده مطابق شکل۵ بدست آمده است که یک مشخصهٔ غیر خطی می باشد. شکل۶ولتاژ و جریان $i_a(t)$ وV_{a^+o} برای یک فاز کوره را نشان می دهد. با توجه به نتایج شبیه سازی به علت عبور جریان هارمونیکی از خط، ولتاژ در شین کوره مطابق شکل۶ دارای هارمونیک خواهد بود. همچنین به علت نوسانی بودن این جریان، ولتاژ شین مشترک دارای تغییرات دینامیکی خواهد شد که این نوسانات می تواند منجربه ایجاد فلیکرواختلال در کاردستگاههای الکترونیکی که از این شین تغذیه می شوند، گردد. شکل۷ ولتاژ شین مشترک $V_{ab}(t)$ را نشان می دهد. نوسانات ولتاژ خط در این حالت ۱۲/۸۵٪ می باشد. شکل۸ توان اکتیو و راکتیو مصرفی کوره را نشان می دهد. باتوجه به این شکل توان های اکتیو و راکتیو دارای تغییرات سریع با دامنهٔ بالایی هستند و همین مساله منشاء اصلی ایجاد مشکلات کیفیت توان برای شبکه می باشد.



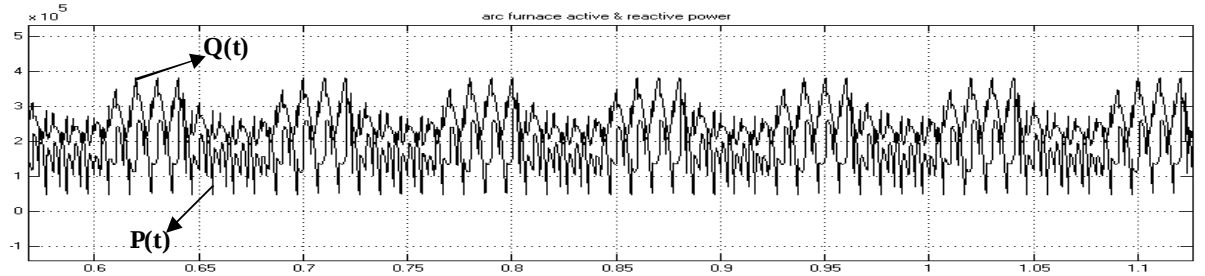
شکل۵ مشخصهٔ ولتاژ-جریان کورهٔ قوسی شبیه سازی شده



شکل۶ ولتاژ و جریان قوس به ازای ولتاژ (ولت) ۳۸۰ = V_{an}

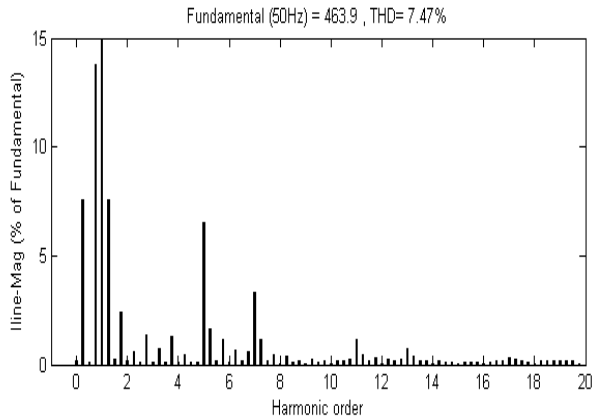


شکل۷ تغییرات دینامیکی ولتاژ شین کوره V_{ab}

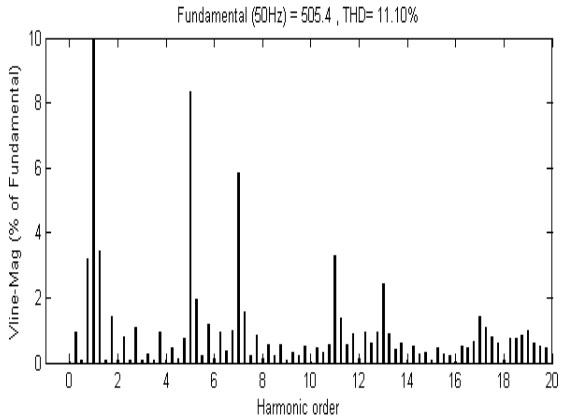


شکل۸ تغییرات سریع توان اکتیو راکتیو عامل ایجاد مشکلات کیفیت توان

همانطور که اشاره شد یکی از معایب کوره های قوسی ایجاد مشکلات هارمونیکی وتولید هارمونیکهای مضارب غیر صحیح از مولفهٔ اصلی برای شبکه می باشد. شکل۹ و۱۰ طیف فرکانسی (بر حسب درصد مولفهٔ اصلی)مربوط به جریان خط و ولتاژ شین مشترک را برای این شبیه سازی نشان می دهد. وجود هارمونیکهای مرتبه پایین با دامنهٔ بالا، هارمونیکهای زوج ،میان هارمونیکها و هارمونیکهای کسری از فرکانس اصلی در طیف فرکانسی ولتاژ و جریان کا ملاً مشهود میباشد که می تواند درسیستم توزیع مشکلات زیادی را ایجاد کند. مقدار THDدر هر مورد محاسبه شده و در شکل های ۹و۱۰ نشان داده شده است.



شکل۹ طیف هارمونیکی جریان خط که شامل هارمونیکها،میان هارمونیکها و زیر هارمونیکها می باشد.در این حالت مقدار ٪۷٫۴۷ = THD می باشد



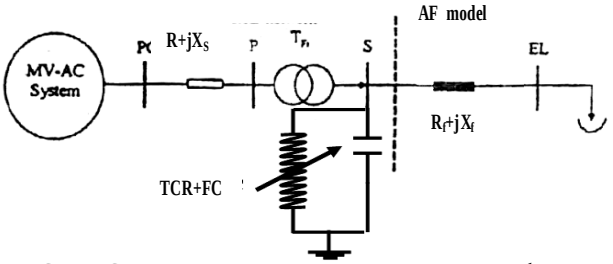
شکل ۱۰ طیف هارمونیکی ولتاژ شین کوره که شامل هارمونیکها، اینتر هارمونیکها و زیر هارمونیکها می باشد. (مقدار ٪۱۱٫۱۰= THD)

۵- شبیه سازی کورهٔ قوسی با نصب جبرانساز TCR+FC

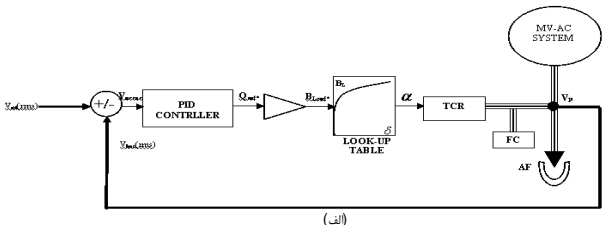
دیاگرام تک خطی کوره و جبرا نساز TCR/FC در شکل ۱۱ آورده شده است. در این مدار معادل R_SوX_Sبه ترتیب مقاومت و راکتانس خط و همچنین مقاومت Rs و راکتانس X_S مربوط به سیمهای رابط و الکترودها وترانسفورماتور کوره می باشد. تمام کمیتها به طرف ثانویهٔ ترانسفورماتور انتقال داده شده اند.شکل ۱۲ ساختار کلی سیستم کنترلی و شکل ۱۳نمایش بلاک دیاگرامی سیستم سیستم کنترلی شبیه سازی

شده را در محیط SIMULINK/MATLAB نشان می دهد. نحوهٔ عملکرد سیستم کنترلی به این صورت است که ابتدا خطای ولتاژ به کنترل کنندهٔ PID فرستاده شده و کنترل کننده مقدار Q_{ref*} را برای جبران کننده محاسبه می کند.سپس با داشتن مقدار Q_{ref*} سوسپتانس متناظر محاسبه می شود. به منظور محاسبهٔ زاویهٔ آتش برای TCR مقدار سوسپتانس بر حسب زاویهٔ هدایت به صورت یک جدول جستجوی داده مورد استفاده قرار می گیرد.

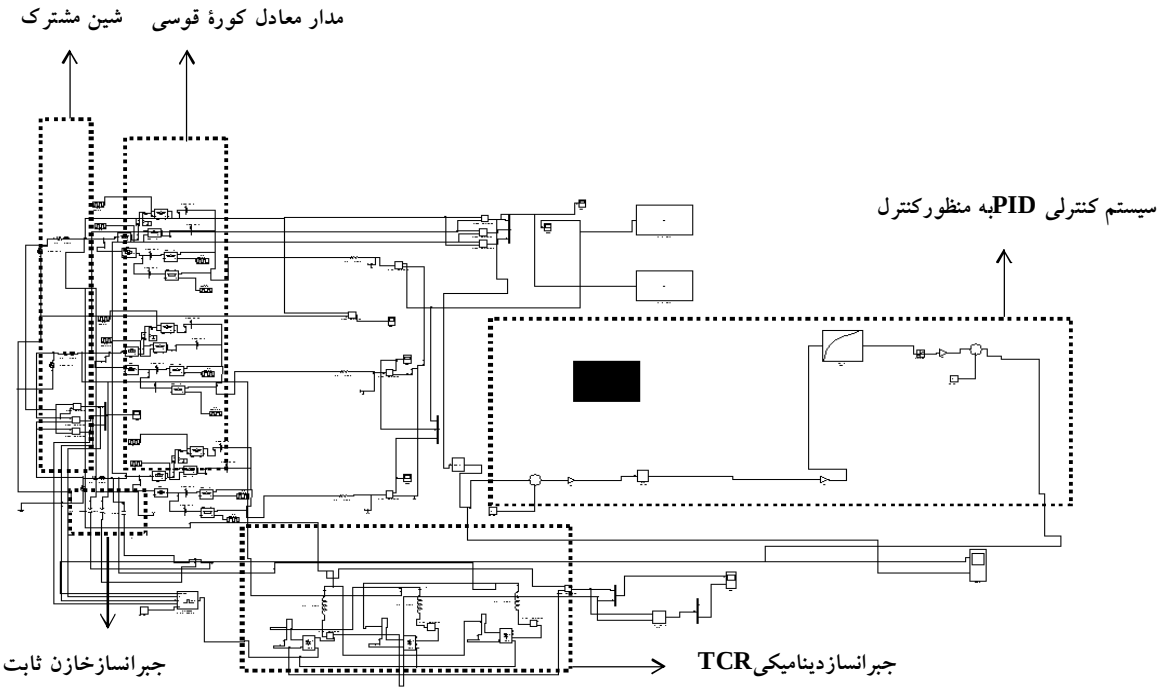
در هر لحظه مقدار خطای ولتاژ و سوسپتانس مورد نیاز محاسبه شده و با کمک جدول جستجوی داده زاویهٔ آتش به تریستورها اعمال می شود. با توجه به سرعت بالایی که این جبران کننده دارد تولید و مصرف توان راکتیو با سرعت بالا امکان پذیر است. همانطور که در نتایج شبیه سازی (شکل ۸) نشان داده شد، توان راکتیو دارای تغییرات بسیار سریعی است و سیستم کنترلی باید بتواند به این تغییرات دینامیکی به سرعت پاسخ دهد. نتایج شبیه سازی با نصب جبرانساز TCR+FC در شکلهای ۱۴ تا ۱۷ آورده شده است. شکل۱۴(الف)،(ب) و(ج) به ترتیب ولتاژ دو سر راکتور ،توان راکتیو مصرفی راکتور و جریان عبوری از آن را نشان می دهد.



شکل ۱۱ دیاگرام تک خطی شامل کورهٔ قوسی و جبران کنندهٔ TCR+FC



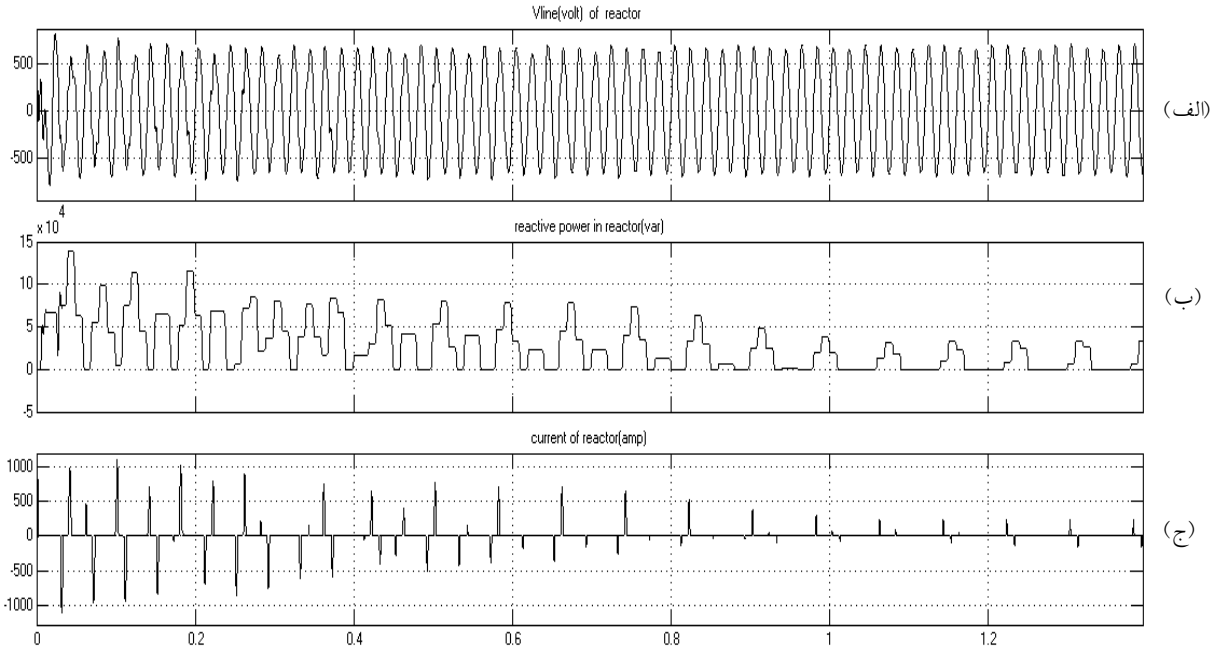
شکل۱۲ ساختار کلی سیستم کنترلی



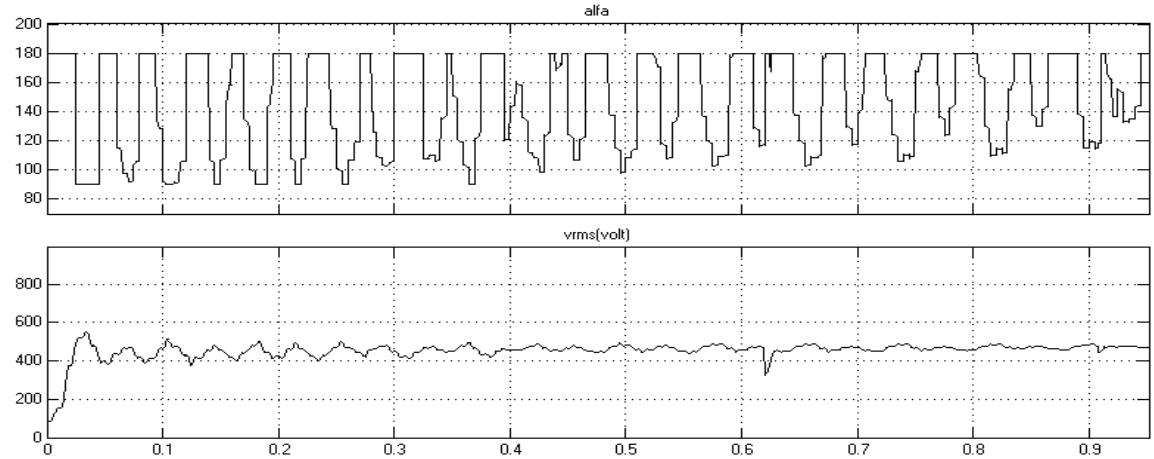
شکل ۱۳ ساختار کلی سیستم کنترلی نمایش بلوک دیاگرام شبیه سازی شده در محیط MATLAB ساختار کلی

با توجه به شکل جریان عبوری از راکتور به شدت هارمونیکی است و عبور این جریان از TCR باعث افزایش هارمونیکهای جریان خط می شود. البته در اینجا به منظور حذف هارمونیکهای مرتبهٔ سوم(ناشی از TCR) از اتصال مثلث استفاده شده است. تغییرات توان راکتیو جذب شده توسط راکتور در شکل۱۴ (ب) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود با تغییرات سریع توان راکتیو مصرفی TCR، نوسانات

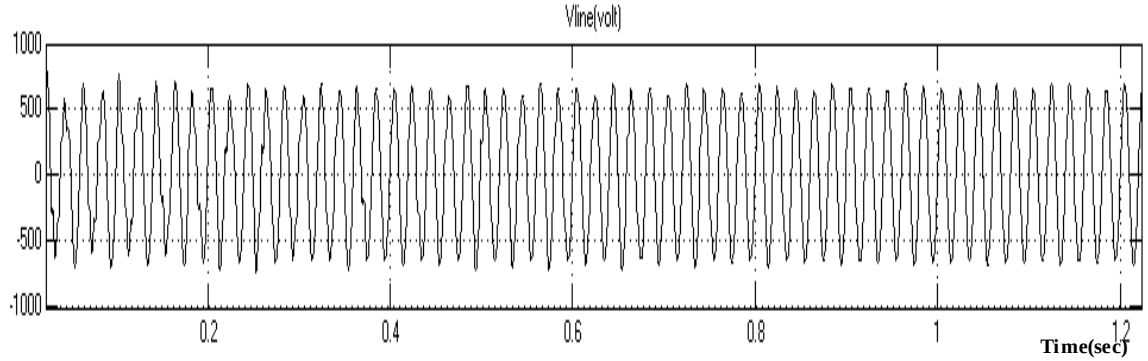
ولتاژ ناشی از کورهٔ قوسی پس از چند سیکل تا حد مطلوبی کاهش می یابد به طوری که پس از نصب جبرانساز TCR+FC نوسانات ولتاژ از ۱۲٫۸۵٪ به ۳٫۸۷٪ کاهش پیدا می کند. شکل۱۵تغییرات زاویهٔ آتش و نوسانات دینامیکی مقدار ولتاژ موثر شین کوره را نشان می دهد.
همانطور که اشاره شد به دلیل هارمونیکهایی که جبران کنندهٔ TCR تولید می کند مقدار دامنه های هارمونیکی جریان خط تا حدود زیادی افزایش پیدا خواهد کرد. شکل۱۶و۱۷ به ترتیب ولتاژ خط و جریان خط فاز a را پس از نصب جبرانساز نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود ولتاژ خط از نظر هارمونیکی بهتر شده و نوسانات آن نیز تا حد مطلوبی کاهش پیدا کرده است، ولی جریان خط نسبت به حالت قبل از نظر هارمونیکی بدتر شده که این مساله با توجه به شکل موج جریان خط نیز قابل مشاهده است. شکل۱۸ (الف) و(ب) طیف فرکانسی ولتاژ و جریان خط را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در مورد ولتاژ خط مقدارTHD درحالت با جبرانساز از مقدار ۱۱٫۱۰٪ به ۲٫۷۵٪ کاهش پیدا می کند و در مقایسه با شکل ۹و۱۰ دامنهٔ هارمونیکی کاهش چشمگیری پیدا کرده ا ست. همچنین مشاهده می شود به علت کاهش نوسانات ولتاژ، دامنهٔ میان هارمونیکها نیز کاهش پیدا می کند. شکل ۱۷(ب) طیف فرکا نسی مربوط به جریان خط را نشان می دهد. به علت مولفه های هارمونیکی ۵ و۷ که جبرانساز TCR تولید می کند، دامنهٔ این مولفه ها در جریان خط زیاد بوده ولی دامنهٔ هارمونیک سوم به دلیل استفاده از اتصال مثلث درTCR، بسیار کم می باشد. در این حالت مقدار THD جریان خط از مقدار ۷٫۴۷٪ به ۱۱٫۶۲٪ افزایش پیدا می کند.
همانطور که اشاره شد به دلیل هارمونیکهایی که جبران کنندهٔ TCR تولید می کند مقدار دامنه های هارمونیکی جریان خط تا حدود زیادی افزایش پیدا خواهد کرد.



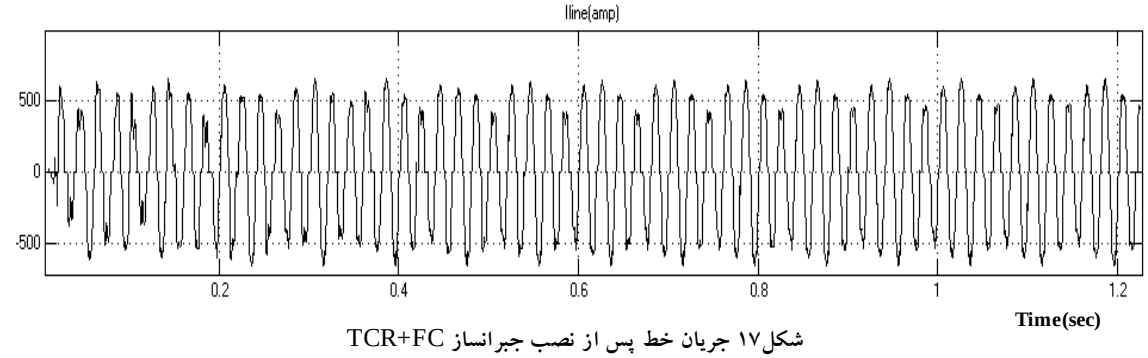
شکل۱۴ ولتاژ دو سر راکتور ،توان راکتیو مصرفی و جریان عبوری از آن



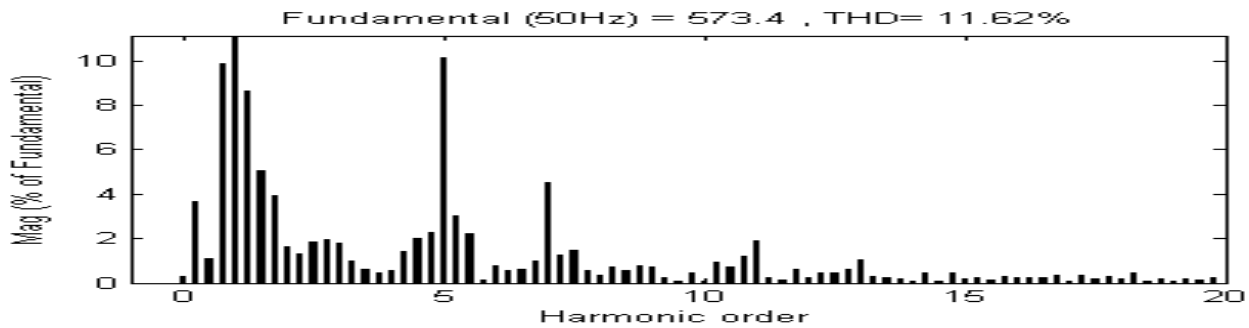
شکل۱۵ تغییرات دینامیکی زاویهٔ آتش و مقدار موثر ولتاژ شین کوره



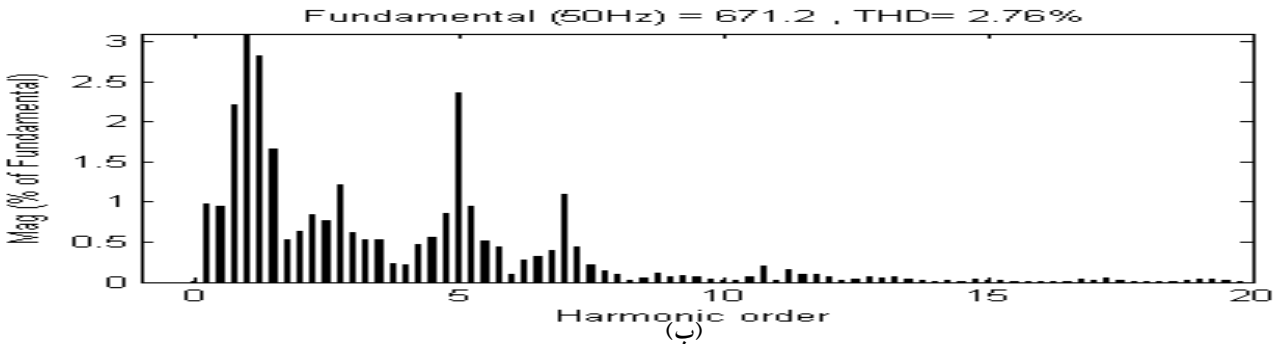
شکل۱۶ ولتاژ خط مربوط به شین کوره بعد از نصب جبرانساز



شکل۱۷ جریان خط پس از نصب جبرانساز TCR+FC



(الف)



(ب)

شکل۱۸ (الف) افزایش دامنهٔ هارمونیکی جریان خط با مقدار ٪۱۱/۶۲ = THD(ب) کاهش دامنهٔ میان هارمونیکها در طیف فرکانسی ولتاژ خط با ٪۲/۷۶ = THD

در این شبیه سازی از اتصال مثلث استفاده شده که موجب حذف هارمونیک سه در طرف خط خواهد شد. همچنین برای حذف کامل هارمونیکهای ۵و۷ می توان از TCR/FC دوازده پالسه شامل یک ترانس با ثانویه های اتصال مثلث و ستاره می باشد، استفاده کرد. البته در این حالت نیز مقداری هارمونیک۱۱و۱۳ هم وجودخواهد داشت که با طراحی و نصب یک فیلتر پسیو (LC) می توان این هارمونیکها را حذف کرد.

نتیجه گیری :

نتایج بدست آمده از مدلسازی و شبیه سازی کورهٔ قوسی نشان می دهد که کورهٔ قوسی به دلیل تغییرات سریع توان اکتیو و راکتیو با دامنه های بالا عامل ایجاد نوسانات دائمی ولتاژ و جریان، مشکلات هارمونیکی و میان هارمونیکی در شبکهٔ توزیع می باشند. به منظور بهبود مشکلات کیفیت توان ناشی از کورهٔ قوسی یک سیستم کنترل حلقه بسته با استفاده از جبرانساز TCR/FC در شین کورهٔ قوسی نصب شده است. پس از انجام شبیه سازی و مقایسه نتایج بدست آمده، می توان نتیجه گرفت که نصب این جبرانساز ها با توجه به سرعت پاسخ بالایی که دارند، نوسانات پیک ولتاژ شین مشترک را تا حد مطلوبی کاهش می دهد. همچنین بررسی طیف فرکانسی ولتاژ و جریان نشان می دهد که نصب این جبرانساز مقدار THD ولتاژ شین کوره را کاهش می دهد و با عث کاهش اثر فلیکر می شود. با این وجود به دلیل هارمونیکهای جریانی که خود TCR به خط تزریق می کند. مقدار THD جریان بیشتر از حالت بدون نصب جبرانساز می شود که با طراحی و نصب فیلترهای مناسب می توان هارمونیکهای جریان را کاهش داد.

مراجع:

[1] Sundberg,Y.,''the ARC furnace as a load on the network'',ASEA journal,VOL.49,NO.4,75-87,1976

[2] Tang.,L and Kollari,s. and McGraaghan,M.F.,"Voltage Fliker prediction for Two Simulaneusly operated AC Arc Furnaces",IEEE Trans.on,vol.12.NO.,pp.985-992,APRIL 1997

[3]T.ZHeng,E.B.Makram ,and A,.A.Girgis,"effect of different arc furnace model on voltage distribution,"in proceeding of the eight international conference on harmonics and quality of power (ICPHQ) ,Oct.1998,pp.1097-1085.

[4]grunbaum,r.svc light"a powerful means fordynamic voltage and power quality control in industry anddistribution power electronics and variable speed drive" ,2000.eight intermnational conference on (IEE conf.pub1.no.475),2000. page(s) :404-409

[5]kemerer ,R.S.:Berkebile ,L."Directly connected static VAR compensation in distribution system application" 3,July 2000

[6]Cox,M.D.,Mirbod,A.,"A New Static VAR Compensator for an Arc Furnace",IEEE Trans. On power systems,VOL.PWRRS-1,NO.3,110-119,Aug.198

[7] Montanari,G.C.,et al., ''Arce Furnace Model for the Study of Fliker Compensation in Electrical networks'', IEEE Trans. On power Del.,vol.9,NO.4,2026-2034, oct. 1994.

[8] Luis F. Beites, Julio G. Mayordomo",Harmonics, Interharmonics and Unbalances of ArcFurnaces: A New Frequency Domain Approach" IEEE Transactions on power delivery,vol.16,no. 4, October 2001