

الله أكبر



دانشگاه اصفهان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت

مدل سازی کوره قوس الکتریکی و جبران فلیکر ولتاژ ناشی از آن با
استفاده از جبران ساز استاتیکی توان راکتیو

استادان راهنما:

دکتر آرش کیومرثی

دکتر محمد عطایی

استاد مشاور:

دکتر رحمت الله هوشمند

پژوهشگر:

آرش دهستانی کلاگر



۱۳۸۷ / ۱۶ / ۱۰

بهمن ماه ۱۳۸۶

۹۷۳۱۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی برق

گروه مهندسی برق
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه اصفهان

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

تحت عنوان

مدل سازی کوره قوس الکتریکی و جبران فلیکر ولتاژ ناشی از آن با

استفاده از جبران ساز استاتیکی توان راکتیو

در تاریخ

توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه

به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه

دکتر آرش کیومرثی با مرتبه علمی استادیار

امضاء

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه

دکتر محمد عطائی با مرتبه علمی استادیار

امضاء

۳- استاد مشاور پایان نامه

دکتر رحمت الله هوشمند با مرتبه علمی دانشیار

امضاء

۴- استاد داور داخل گروه

دکتر سید محسن موسوی با مرتبه علمی دانشیار

امضاء

۵- استاد داور خارج گروه

دکتر عباس شولائی با مرتبه علمی استادی

امضاء

امضاء مدیر گروه

شکر و قدردانی

بدینوسیله از زحمات استاد راهنمای محترم این پایان نامه جناب آقای دکتر آرش کیومرثی که در تمام مراحل انجام تحقیق مرا مورد لطف و مرحمت خویش قرار دادند، شکر و سپاسگزاری نمایم. از جناب آقای دکتر محمد عطائی استاد راهنمای دوم و جناب آقای دکتر رحمت الله هوشمند استاد مشاور این جانب که در تمامی مراحل انجام این پایان نامه مرایاری نمودند نهایت سپاس و قدردانی را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر محسن موسوی و جناب آقای دکتر عباس شوالئی که زحمت مطالعه، تصحیح و ارزیابی نهایی این پایان نامه را انجام دادند، نیز شکر و قدردانی می نمایم. در خاتمه بر خود واجب می دانم که از اساتید محترم گروه مهندسی برق دانشگاه اصفهان که در طول دوره کارشناسی ارشد مرایاری نموده و یا کلمه ای به من آموختند، شکر و سپاسگزاری نمایم.

تقدیم ہے:

پدر، مادر عزیزم

کہ شفافیت نگاہشان، لطافت تبسم ہائیشان و زلالی دلشان گل امیدار
بخط بختی زندگی ام شکوفامی کند.

چکیده:

مدل سازی کوره های قوس الکتریکی سه فاز و جبران فلیکر ولتاژ ناشی از آن با استفاده از نرم افزارهای PSCAD/MATLAB، هدف این تحقیق می باشد.

جهت مدلسازی کوره قوس الکتریکی، ابتدا قوس الکتریکی را با نمونه های گرفته شده از جریان قوس و ولتاژ متناظر با آن، در مدار معادل کوره قوس مدل شده است. سپس سعی شده تا خصوصیت تصادفی بودن عملکرد قوس در قالب مدوله کردن ولتاژ قوس با یک نویز سفید با باند محدود شده، لحاظ شود.

جبران سازی کوره قوس الکتریکی با استفاده از جبران کننده های استاتیک توان راکتیو از نوع راکتور تریستور کنترل به همراه خازن ثابت که بر اساس اندازه گیری توان راکتیو بار کنترل می شوند، به دو روش کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته انجام شده و شدت فلیکر ولتاژ قبل و بعد از عمل جبران سازی بر اساس تئوری اندازه گیری فلیکر در استاندارد IEC، اندازه گیری شده و نتایج عمل جبران سازی بر روی کاهش شدت فلیکر موجود نشان داده شده است.

یک روش جدید برای کنترل جبران ساز راکتور تریستور کنترل به همراه خازن ثابت نیز پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر بکار گیری یک روش پیش بین در کنترل مدار بسته جبران ساز TCR/FC در عمل جبران سازی می باشد. در این روش از نمونه های قبلی توان راکتیو بار جهت پیش بینی مقادیر آتی آن به منظور جبران زمان تاخیر موجود در کنترل جبران ساز استفاده می شود.

کلید واژه: کوره قوس الکتریکی، کاهش فلیکر ولتاژ، شدت فلیکر لحظه ای، کنترل جبران ساز TCR/FC، فیلترهای هارمونیک، توان راکتیو پایه، مشخصه امپدانسی، طیف فرکانسی، کنترل پیش بین، بلوک تقدم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کوره های قوس الکتریکی
۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱	روند ارائه مطالب
۳-۱	تاریخچه
۴-۱	دسته بندی های کلی EAF
۵-۱	اصول عملکرد کوره های قوس AC
۵-۱-۱	پایداری قوس - یک نقطه کار بهینه برای عملکرد موثر کوره قوس
۵-۱-۲	اندازه گیریهای الکتریکی بر روی کوره های قوس AC
۱۸	فصل دوم: شبیه سازی کوره قوس الکتریکی
۳۵	فصل سوم: فلیکر ولتاژ و روش اندازه گیری آن
۳-۱-۳	مبانی فلیکرمتر IEC
۳-۱-۱-۱	مقدمه
۳-۱-۲	درون یابی خطی
۳-۱-۳	درون یابی غیر خطی
۴۲	۲-۲- توصیف بلوکهای فلیکرمتر

- ۳-۳- مشخصات فنی مورد نیاز هر بلوک ۴۴
- ۳-۳-۱- تطبیق دهنده ولتاژ ۴۴
- ۳-۳-۲- مولد داخلی برای بازبینی کالیبراسیون دستگاه ۴۵
- ۳-۳-۳- دمولاتور مربع ساز ۴۵
- ۳-۳-۴- فیلترهای وزن دهی ۴۵
- ۳-۳-۵- پاسخ کلی از ورودی تا خروجی بلوک ۳: ۴۶
- ۳-۳-۶- سلکتور ۴۶
- ۳-۳-۷- ضرب کننده مربعی و فیلتر متوسط لغزان ۴۶
- ۳-۳-۸- الگوریتم تحلیل آماری بلادرنگ ۴۷
- ۳-۳-۴- به کار گیری فلیکر متر IEC در این تحقیق، برای کوره تکفاز ۴۷
- ۳-۴-۱- پیاده سازی فلیکرمتر توسط نرم افزار PSCAD ۴۸
- ۳-۵- به کار گیری فلیکر متر برای کوره سه فاز، قبل از جبران سازی ۶۰
- ۳-۶- مشخصه حساسیت فلیکر ولتاژ ۶۲
- ۶۷ فصل چهارم: کنترل مدار باز جبران ساز راکتور کنترل شده با تریستور
- ۴-۱- مقدمه ۶۷
- ۴-۲- راکتورهای کنترل شونده با تریستور (TCR) ۶۷

- ۳-۴- سیستم اندازه گیری توان راکتیو سه فاز در کوره قوس الکتریکی ۷۰
- ۴-۴- اصول جبران سازی کوره قوس الکتریکی ۷۴
- ۵-۴- طراحی فیلتر های هارمونیکی ۷۵
- ۵-۴-۱- ملاحظات لازم در طراحی فیلتر های پسیو ۷۶
- ۴-۶- به کار گیری جبران ساز راکتور تریستور کنترل (TCR) و کنترل حلقه باز آن ۸۸
- فصل پنجم: کنترل مدار بسته جبران ساز راکتور کنترل شده با تریستور ۱۰۴
- ۵-۱- مقدمه ۱۰۴
- ۵-۲- روش کنترل مدار بسته جبرانگر FC/TCR با رگولاتور ولتاژ ۱۰۴
- ۵-۳- به کارگیری فلیکرمتر IEC بعد از جبران به روش حلقه بسته: ۱۱۴
- ۵-۴- روش کنترل مدار بسته جبرانگر FC/TCR با رهیافت بهبود ضریب توان ۱۱۷
- ۵-۴-۱- ضریب توان در محیط های هارمونیکی ۱۱۸
- ۵-۴-۲- سیستم محاسبه ضریب توان در کوره قوس الکتریکی ۱۱۹
- ۵-۴-۳- کنترل حلقه بسته جبران ساز با رهیافت بهبود ضریب توان ۱۲۵
- فصل ششم: به کار گیری یک روش پیش بین در کنترل مدار بسته جبران ساز TCR/FC ۱۳۴
- ۶-۱- مقدمه ۱۳۴
- ۶-۲- بهبود کارایی جبران ساز استاتیکی با تخمین توان راکتیو بار در زمان های آتی ۱۳۴
- ۶-۳- تقریب بهینه ۱۳۵

۱۳۸ ۴-۶ ایجاد بلوک تقدم

۱۴۵ ۵-۶ تحلیل عملکرد فیلترهای حذف هارمونیک

۱۴۸ ۶-۶ به کارگیری فلیکرمتر IEC، بعد از اعمال روش پیش بین درجبران به روش حلقه بسته

۱۵۳

فصل هفتم

۱۵۳ ۱-۷ نتیجه گیری

۱۵۳ ۲-۷ پیشنهاداتی برای ادامه کار

۱۵۴ پیوست الف:

۱۶۸ پیوست ب:

۱۸۲ پیوست ج:

۱۹۶ پیوست د:

۲۱۰ پیوست ه:

۲۱۲ پیوست و:

۲۲۰ پیوست ز:

۲۲۲ منابع و ماخذ

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۵.....	شکل (۱-۱): نمای کلی یک کوره DC
۵.....	شکل (۲-۱): شمای کلی کوره قوس الکتریکی سه فاز
۷.....	شکل (۳-۱): رابطه بین سطح سرباره ها و شدت تشعشع.....
۸.....	شکل (۴-۱): توان قوس (P_{arc}) و مقاومت قوس (R_{arc}) بر حسب زمان برای کوره های قوس AC
۸.....	شکل (۵-۱): ولتاژ قوس (U_{arc}) و جریان الکتروود (J) بر حسب زمان برای کوره های قوس AC
۹.....	شکل (۶-۱): اساس عملکرد قوس.....
۹.....	شکل (۷-۱): اساس قوس پایدار در عملکرد کوره های قوس AC
۱۰.....	شکل (۸-۱): حد پایداری قوس در عملکرد کوره های قوس AC
۱۰.....	شکل (۹-۱): اساس نصب تجهیزات اندازه گیری بر روی کوره های قوس
۱۱.....	شکل (۱۰-۱): دیاگرام برداری مورد نیاز در محاسبه پارامترهای کوره.....
۱۲.....	شکل (۱۱-۱): ولتاژ U و جریان الکتروود J و توان اکتیو P بر حسب زمان برای کوره های قوس AC
۱۳.....	شکل (۱۲-۱): راکتانس عملیاتی (X_{op}) بر حسب امپدانس Z
۱۴.....	شکل (۱۳-۱): دیاگرام دایره ای برای $\text{tap}=679$
۱۴.....	شکل (۱۴-۱): توان اکتیو بر حسب جریان الکتروود.....

- شکل (۱۵-۱): ضریب توان بر حسب جریان الکتروود..... ۱۵
- شکل (۱۶-۱): توان قوس بر حسب جریان الکتروود..... ۱۵
- شکل (۱۷-۱): ولتاژ قوس بر حسب جریان الکتروود..... ۱۶
- شکل (۱۸-۱): راکتانس عملیاتی (X_{op}) بر حسب جریان الکتروود..... ۱۶
- شکل (۱۹-۱): شاخص نسوز بر حسب جریان الکتروود..... ۱۷
- شکل (۱-۲): مکانیزم تولید نویز سفید با باند محدود شده..... ۲۰
- شکل (۲-۲): مدل مربوط به کوره تکفاز بدون اعمال نویز..... ۲۰
- شکل (۳-۲): شکل موج جریان قوس..... ۲۱
- شکل (۴-۲): شکل موج ولتاژ قوس..... ۲۱
- شکل (۵-۲): مشخصه ولتاژ قوس بر حسب جریان قوس..... ۲۱
- شکل (۶-۲): مدل مربوط به کوره تکفاز با اعمال نویز..... ۲۲
- شکل (۷-۲): شکل موج جریان قوس با حضور نویز..... ۲۲
- شکل (۸-۲): شکل موج ولتاژ قوس با حضور نویز..... ۲۲
- شکل (۹-۲): مشخصه ولتاژ قوس بر حسب جریان قوس با حضور نویز..... ۲۳
- شکل (۱۰-۲): تغییرات زمانی نویز سفید با باند محدود شده..... ۲۳

- شکل (۱۱-۲): مدل مربوط به کوره سه فاز بدون اعمال نویز..... ۲۴
- شکل (۱۲-۲): شکل موج جریان فازها..... ۲۵
- شکل (۱۳-۲): شکل موج ولتاژ دو سر قوس..... ۲۵
- شکل (۱۴-۲): شکل موج ولتاژ نقاط اتصال مشترک نسبت به نقطه شناور..... ۲۶
- شکل (۱۵-۲): مشخصه ولتاژ دو سر قوس فاز a نسبت به جریان این فاز..... ۲۶
- شکل (۱۶-۲): مدل مربوط به کوره سه فاز با اعمال نویز..... ۲۷
- شکل (۱۷-۲): شکل موج جریان فازها با حضور نویز..... ۲۷
- شکل (۱۸-۲): شکل موج ولتاژ دو سر قوس با حضور نویز..... ۲۸
- شکل (۱۹-۲): شکل موج ولتاژ نقاط اتصال مشترک نسبت به نقطه شناور یا حضور نویز..... ۲۸
- شکل (۲۰-۲): مشخصه ولتاژ دو سر قوس فاز a نسبت به جریان این فاز با حضور نویز..... ۲۹
- شکل (۱-۳): درون یابی خطی..... ۳۹
- شکل (۲-۳): درون یابی غیر خطی..... ۴۰
- شکل (۳-۳): ساختار فلیکرمتر IEC..... ۴۲
- شکل (۴-۳): ساختار ۴ بلوک اول فلیکرمتر IEC..... ۴۸
- شکل (۵-۳): شکل موج منحنی IFL به دست آمده..... ۴۸
- شکل (۶-۳): سیستم نمونه برداری از منحنی IFL و ارجاع آن به بلوک تحلیل آماری..... ۴۸

- شکل (۷-۳): شکل موج منحنی IFL نمونه برداری شده: ۴۹.....
- شکل (۸-۳): قسمت ۱ بلوک STATISTICAL-EVA ۵۰.....
- شکل (۹-۳): قسمت ۲ بلوک STATISTICAL-EVAL ۵۵.....
- شکل (۱۰-۳): قسمت ۳ بلوک STATISTICAL-EVAL ۵۶.....
- شکل (۱۱-۳): منحنی تابع احتمال تجمعی مربوط به ثانیه ۱ ۵۷.....
- شکل (۱۲-۳): منحنی شدت فلیکر لحظه ای مربوط به حالت تکفاز: ۵۹.....
- شکل (۱۳-۳): شکل موج منحنی IFL نمونه برداری شده در طی ثانیه ۱ ۶۰.....
- شکل (۱۴-۳): منحنی تابع احتمال تجمعی مربوط به ثانیه ۱ ۶۰.....
- شکل (۱۵-۳): منحنی شدت فلیکر لحظه ای مربوط به حالت سه فاز، قبل از جبران: ۶۱.....
- شکل (۱۶-۳): مشخصه حساسیت فلیکر ولتاژ: ۶۳.....
- شکل (۱۷-۳): مشخصه حساسیت فلیکر ولتاژ: ۶۴.....
- شکل (۱۸-۳): مقایسه منحنی های فلیکر ولتاژ ناشی از منابع مختلف: ۶۵.....
- شکل (۱-۴): شمای کلی یک TCR ۶۸.....
- شکل (۲-۴): چگونگی تغییرات جریان و ولتاژهای TCR برای زوایای مختلف آتش α : ۶۸.....

- ؛
- شکل (۳-۴): جبران ساز خازن ثابت- TCR (الف) ۶ پالس- (ب) ۱۲ پالس..... ۶۹
- شکل (۴-۴): مدار معادل کوره قوس الکتریکی سه فاز..... ۷۱
- شکل (۵-۴): سیستم تولید نویز سفید با باند محدود شده..... ۷۱
- شکل (۶-۴): مولفه های اصلی ولتاژ و جریان قوس..... ۷۲
- شکل (۷-۴): سیستم اندازه گیری توان راکتیو سه فاز در کوره قوس الکتریکی..... ۷۳
- شکل (۸-۴): نتایج اندازه گیری توان راکتیو سه فاز پایه در کوره قوس الکتریکی..... ۷۴
- شکل (۹-۴): مشخصه فرکانسی امپدانس فیلترها..... ۷۸
- شکل (۱۰-۴): یک نمونه از مشخصه فرکانسی امپدانس فیلترها همراه با خط بار سیستم..... ۷۸
- شکل (۱۱-۴): مشخصه فرکانسی امپدانس فیلترها با خط بار سیستم بدون وجود فیلتر هارمونیک سوم..... ۷۹
- شکل (۱۲-۴): فیلترهای هارمونیک طراحی شده..... ۸۱
- شکل (۱۳-۴): مشخصه امپدانس فیلترهای هارمونیک طراحی شده..... ۸۲
- شکل (۱۴-۴): مدار معادل کوره قوس الکتریکی سه فاز با حضور خازن فیلترها..... ۸۲
- شکل (۱۵-۴): توان راکتیو اندازه گیری شده در نقطه کوپلاژ مشترک، بعد از به کار گیری فیلترها..... ۸۳
- شکل (۱۶-۴): شکل موج جریان های قوس الکتریکی با حضور فیلترها..... ۸۴
- شکل (۱۷-۴): شکل موج جریان ها در نقطه کوپلاژ مشترک با حضور فیلترها..... ۸۴
- شکل (۱۸-۴): شکل موج ولتاژهای دو سر قوس الکتریکی با حضور فیلترها..... ۸۵

- شکل (۴-۱۹): شکل موج ولتاژهای نقطه کویلاژ مشترک نسبت به زمین، با حضور فیلترها..... ۸۵
- شکل (۴-۲۰): شکل موج ولتاژهای خطی در نقطه کویلاژ مشترک، با حضور فیلترها..... ۸۶
- شکل (۴-۲۱): شکل موج جریان فیلترها..... ۸۶
- شکل (۴-۲۲): مشخصه ولتاژ قوس بر حسب جریان قوس با حضور خازن فیلترها..... ۸۷
- شکل (۴-۲۳): مدار شامل جبران ساز FC/TCR..... ۸۸
- شکل (۴-۲۴): سیستم محاسبه سوسپتانس مطلوب بازوهای TCR..... ۹۰
- شکل (۴-۲۵-الف): سوسپتانس مطلوب بازوی ab جبران ساز TCR..... ۹۰
- شکل (۴-۲۵-ب): ولتاژ و جریان بازوی ab جبران ساز TCR..... ۹۱
- شکل (۴-۲۶-الف): سوسپتانس مطلوب بازوی bc جبران ساز TCR..... ۹۱
- شکل (۴-۲۶-ب): ولتاژ و جریان بازوی bc جبران ساز TCR..... ۹۱
- شکل (۴-۲۷-الف): سوسپتانس مطلوب بازوی ca جبران ساز TCR..... ۹۲
- شکل (۴-۲۷-ب): ولتاژ و جریان بازوی ca جبران ساز TCR..... ۹۲
- شکل (۴-۲۸): بلوک تبدیل سوسپتانس به زاویه آتش..... ۹۲
- شکل (۴-۲۹): زوایای آتش مربوط به بازوهای TCR..... ۹۶
- شکل (۴-۳۰): توان راکتیو اندازه گیری شده در نقطه کویلاژ مشترک، بعد از به کار گیری جبران ساز..... ۹۷
- FC/TCR..... ۹۷

- شکل (۴-۳۱): شکل موج جریان های قوس الکتریکی بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR ۹۸
- شکل (۴-۳۲): شکل موج جریان ها در نقطه کوپلاژ مشترک بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR ۹۸
- شکل (۴-۳۳): شکل موج ولتاژهای دو سر قوس الکتریکی بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR ۹۸
- شکل (۴-۳۴): شکل موج ولتاژهای نقطه کوپلاژ مشترک نسبت به زمین، بعد از به کار گیری جبران ساز
FC/TCR ۹۹
- شکل (۴-۳۵): شکل موج ولتاژهای خطی در نقطه کوپلاژ مشترک، بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR
..... ۱۰۰
- شکل (۴-۳۶): شکل موج جریان فیلترها بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR ۱۰۰
- شکل (۴-۳۷): مشخصه ولتاژ قوس بر حسب جریان قوس بعد از به کار گیری جبران ساز FC/TCR ۱۰۱
- شکل (۴-۳۸): ارتباط بین شکل های آورده شده ۱۰۱
- شکل (۵-۱): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی حلقه بسته جبرانگر با رگولاتور ولتاژ ۱۰۵
- شکل (۵-۲): مدار کوره قوس الکتریکی ۱۰۵
- شکل (۵-۳): سیستم محاسبه ولتاژهای مستقیم ۱۰۶
- شکل (۵-۴): سیستم محاسبه تغییرات زاویه آتش ۱۰۷
- شکل (۵-۵): تغییرات سوسپتانس به دست آمده در روش حلقه بسته ۱۰۸
- شکل (۵-۶): ارتباط میان شکل های آورده شده در روش کنترل حلقه بسته ۱۰۹

- شکل (۷-۵): زاویه آتش های نهایی تریستورهای TCR..... ۱۰۹
- شکل (۸-۵): شکل موج جریان های قوس الکتریکی..... ۱۱۰
- شکل (۹-۵): شکل موج جریان ها در نقطه کوپلاژ مشترک..... ۱۱۰
- شکل (۱۰-۵): شکل موج ولتاژهای دو سر قوس الکتریکی..... ۱۱۱
- شکل (۱۱-۵): شکل موج ولتاژهای نقطه کوپلاژ مشترک نسبت به زمین..... ۱۱۱
- شکل (۱۲-۵): شکل موج ولتاژهای خطی در نقطه کوپلاژ مشترک..... ۱۱۲
- شکل (۱۳-۵): شکل موج جریان فیلترها..... ۱۱۳
- شکل (۱۴-۵): شکل موج توان راکتیو در نقطه کوپلاژ مشترک..... ۱۱۴
- شکل (۱۵-۵): شکل موج منحنی IFI نمونه برداری شده در طی ثانیه ۱..... ۱۱۵
- شکل (۱۶-۵): منحنی تابع احتمال تجمعی مربوط به ثانیه ۱..... ۱۱۵
- شکل (۱۷-۵): منحنی شدت فلیکر لحظه ای بعد از جبران به روش حلقه بسته..... ۱۱۶
- شکل (۱۸-۵): منحنی شدت فلیکر لحظه ای، قبل از جبران..... ۱۱۶
- شکل (۱۹-۵): مقایسه منحنی شدت فلیکر لحظه ای قبل از جبران و بعد از جبران به روش حلقه بسته..... ۱۱۷
- شکل (۲۰-۵): مدار کوره قوس الکتریکی به همراه جبران سازها..... ۱۱۹
- شکل (۲۱-۵): فیلتر نمودن سیگنال ها..... ۱۲۰
- شکل (۲۲-۵): پیاده سازی مجموعه روابط (۷-۵)..... ۱۲۱

- شکل (۲۳-۵): بلوک حاوی مدار شکل (۴۵-۵)..... ۱۲۱
- شکل (۲۴-۵): سیستم محاسبه توان اکتیو توالی مثبت..... ۱۲۱
- شکل (۲۵-۵): سیستم محاسبه S_e ۱۲۳
- شکل (۲۶-۵): شکل موج به دست آمده از V_e ۱۲۳
- شکل (۲۷-۵): شکل موج به دست آمده از I_e ۱۲۳
- شکل (۲۸-۵): شکل موج به دست آمده از S_e ۱۲۴
- شکل (۲۹-۵): شکل موج به دست آمده از ولتاژ توالی مثبت V_1^+ ۱۲۴
- شکل (۳۰-۵): شکل موج به دست آمده از جریان توالی مثبت I_1^+ ۱۲۴
- شکل (۳۱-۵): شکل موج به دست آمده توان اکتیو توالی مثبت P_1^+ ۱۲۵
- شکل (۳۲-۵): شکل موج به دست آمده از ضریب توان..... ۱۲۵
- شکل (۳۳-۵): شکل موج جریان لحظه ای TCR..... ۱۲۶
- شکل (۳۴-۵): سیستم محاسبه $\Delta\alpha$ برای فاز ab جبران ساز TCR..... ۱۲۷
- شکل (۳۵-۵): سیستم محاسبه $\Delta\alpha$ برای فاز bc جبران ساز TCR..... ۱۲۸
- شکل (۳۶-۵): سیستم محاسبه $\Delta\alpha$ برای فاز ca جبران ساز TCR..... ۱۲۹
- شکل (۳۷-۵): ارتباط بین شکل های مختلف آورده شده در روش کنترل حلقه بسته با رهیافت بهبود ضریب توان..... ۱۲۹