بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه مهندسی برق

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی برق قدرت

عنوان:

طراحی کنترل‌کننده غیرخطی برای بهبود دهنده یکپارچه کیفیت توان در سیستم‌های توزیع

استاد راهنما:

دکتر سید عباس طاهر

استاد مشاور:

دکتر علیرضا فرجی

بوسیله:

مجتبی یاوری

بهمن ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادرم که از نگاهشان صلابت از رفتارشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

تقدیم به

خواهرانم که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است.

قدردانی

بر خود وظیفه می‌دانم از زحمات بی شائبه استاد گرامی جناب آقای دکتر سید عباس طاهر و راهنمایی‌های جناب آقای دکتر علیرضا فرجی تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از زحمات اساتید محترم گروه برق دانشگاه کاشان بویژه جناب آقای دکتر حلوایی و دکتر رحیمی که زحمت داوری این پایان نامه را تقبل نمودند کمال تشکر را دارم.

چکیده

امروزه با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت و رشد روز افزون استفاده از بارهای غیرخطی در سیستم‌های توزیع و حساس بودن این بارها به سطح کیفیت توان، مسئله‌ی بهبود کیفیت توان در سیستم‌های توزیع روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. فیلترهای اکتیو سری و موازی از معمول‌ترین راه حل‌های مدرن ارائه شده برای حل مشکلات کیفیت ولتاژ و جریان هستند. لیکن نتایج آخرین تحقیقات در زمینه ارتقاء سطح کیفیت توان نشان داده است که UPQC در قیاس با سایر تجهیزات جبران‌ساز از توانمندی بالاتری برخوردار بوده و قادر است به طور همزمان تمامی مشکلات کیفیت ولتاژ و جریان را برطرف نماید. UPQC از دو فیلتر اکتیو سری و موازی تشکیل شده است که از طریق یک خازن مشترک باس DC به هم متصل شده‌اند. برای رسیدن به عملکرد بهینه در تمامی نقاط کار شبکه لازم است یک کنترل‌کننده با دقت و توانایی بالا و نیز مقاوم در برابر اعوجاج‌های شبکه برای UPQC طراحی شود. با توجه به این که معادلات حاکم بر UPQC از نوع غیرخطی می‌باشند لذا استفاده از تئوری‌های کنترل خطی، که بر مبنای خطی‌سازی سیستم در یک نقطه‌کار مشخص طراحی می‌شوند کارایی لازم را نخواهند داشت. زیرا از برخی از دینامیک‌های سیستم صرف نظر شده است و نقطه‌کار در شبکه با تغییر بار و تغییرات شبکه به طور مداوم تغییر می‌کند.

در همین راستا در این پایان نامه کنترل‌کننده غیر خطی بر مبنای تئوری کنترل مد لغزشی برای UPQC ارائه شده است. کنترل‌کننده غیرخطی ارائه شده بر مبنای تئوری کنترل مد لغزشی و تئوری توان لحظه‌ای طراحی شده است. طراحی کنترل‌کننده برای بخش موازی بر اساس کنترل جریان جبران‌ساز صورت گرفته است و برای کنترل بخش سری دو استراتژی مختلف مطرح شده، که شامل، روش معمول کنترل فیلتر اکتیو سری از طریق کنترل ولتاژ تزریق شده و روش دیگر بر مبنای کنترل جریان فیلتر اکتیو سری می‌باشد.

کنترل‌کننده طراحی شده برای UPQC و سیستم تحت مطالعه در نرم‌افزار Matlab شبیه-سازی و برای بررسی کارایی کنترل‌کننده ارائه شده، سناریوهای مختلفی مطرح شده است. نتایج شبیه‌سازی صحت عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده را در شرایط مختلف بار و اغتشاشات شبکه نشان می‌دهد و نیز تاییدکننده کارایی بالای کنترل‌کننده با شدت گرفتن اغتشاشات در شبکه قدرت می‌باشد. همچنین نتایج حاصله با نتایج مربوط به کنترل‌کننده PI بهینه شده مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: کنترل‌کننده غیرخطی، UPQC، مد لغزشی، فیلتر اکتیو، کنترل‌کننده PI

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه **۱**

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بهبود کیفیت توان ۳

۱-۳- بهبود دهنده یکپارچه کیفیت توان ۵

۱-۴- اهداف انجام پایان‌نامه ۷

۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۸

فصل دوم: بررسی ساختار ومدل‌سازی بهبود دهنده یکپارچه‌ی کیفیت توان **۹**

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- بهبود دهنده یکپارچه کیفیت توان ۱۰

۲-۳- ساختارهای مختلف UPQC ۱۲

۲-۴- مدل دینامیکی UPQC ۱۶

فصل سوم: بررسی روش‌های مختلف طراحی کنترل‌کننده‌های UPQC **۲۲**

۳-۱- مقدمه ۲۳

۳-۲- روش‌های کنترل UPQC ۲۴

۳-۳- روش‌های کلاسیک ۲۵

۳-۳-۱- روش‌های حوزه‌ی زمان ۲۵

۳-۳-۱-۱- روش تئوری توان لحظه‌ای ۲۵

۳-۳-۱-۲- روش تئوری توان لحظه‌ای بهبود یافته ۳۰

۳-۳-۱-۳- روش تئوری قاب مرجع سنکرون ۳۲

۳-۳-۱-۴- کنترل به روش تولید بردار الگوی واحد ۳۵

۳-۳-۱-۵- کنترل زاویه توان بار ۳۶

۳-۳-۱-۶- کنترل فازی ۳۹

۳-۳-۱-۷- کنترل فازی بهینه با الگوریتم پرندگان ۴۰

۳-۳-۲- روش‌های حوزه‌ی فرکانس ۴۰

۳-۳-۲-۱- روش تئوری تبدیل فوریه ۴۰

۳-۳-۲-۲- کنترل با استفاده از تبدیل موجک ۴۱

۳-۴- روش‌های مبتنی بر مدل دینامیکی سیستم ۴۲
۳-۴-۱- کنترل با استفاده از مدل پیش‌بین ۴۳
۳-۴-۲- کنترل با استفاده از تنظیم کننده مرتبه دوم خطی ۴۵
۳-۴-۳- کنترل به روش Dead Beat ۴۶
۳-۴-۴- کنترل پسخورد و پیشخور (Feedback & Feedforward) ۴۶
۳-۴-۵- کنترل غیرخطی به روش خطی‌سازی فیدبک ۴۸
۳-۵- روش‌های کنترل هوشمند ۵۰
۳-۶- روش‌های تنظیم ولتاژ لینک DC در UPQC ۵۲
۳-۶-۱- کنترل‌کننده PI ۵۲
۳-۶-۲- کنترل‌کننده PID ۵۴
۳-۶-۳- کنترل‌کننده فازی ۵۴
۳-۶-۴- Fuzzy – PID ۵۵
۳-۶-۵- کنترل‌کننده شبکه عصبی ۵۵

فصل چهارم: اصول طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ۵۷
۴-۱- مقدمه ۵۸
۴-۲- کنترل مد لغزشی ۶۰
۴-۳- انتخاب سطح لغزش ۶۲
۴-۳-۱- سطح لغزشی انتگرالی ۶۳
۴-۴- طراحی کنترل کننده ۶۴
۴-۵- پدیده‌ی چترینگ ۶۶
۴-۶- بررسی یک مثال پایه ۶۷

فصل پنجم:طراحی کنترل کننده مد لغزشی برای بهبود دهنده‌ی یکپارچه کیفیت توان **۷۰**

۵-۱- مقدمه ۷۱

۵-۲- استراتژی کنترلی ۷۲

۵-۳- انتخاب سطوح لغزش و ورودی کنترلی ۷۲

۵-۳-۱- کنترل بخش موازی ۷۳

۵-۳-۲- کنترل مبدل سری از طریق کنترل جریان ۷۸

۵-۳-۳- کنترل مبدل سری از طریق کنترل ولتاژ ۸۱

۵-۴- از بین بردن پدیده‌ی چترینگ ۸۳

فصل ششم: بررسی نتایج شبیه‌سازی **۸۴**

۶-۱- مقدمه ۸۵

۶-۲ UPQC همراه با کنترل کننده مد لغزشی ۸۵

۶-۳- بررسی عملکرد UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۸۸

۶-۳-۱- مطالعه موردی ۱، بررسی توانایی UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی در جبران هارمونیک‌های جریان بار ۸۸

۶-۳-۲- مطالعه موردی ۲، بررسی توانایی UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی در جبران هارمونیک‌های جریان بار با تغییر نقطه کار شبکه ۹۳

۶-۳-۳- مطالعه موردی ۳، بررسی توانایی UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی در شبکه با بار متغیر و بار نامتعادل ۹۹

۶-۳-۴- مطالعه موردی ۴، بررسی عملکرد UPQC با کنترل‌کننده مدلغزشی در شبکه با بار غیرخطی و در حضور هارمونیک‌های ولتاژ ۱۰۵

۶-۳-۵- مطالعه موردی ۵، بررسی عملکرد UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی در شبکه نامتعادل با بار غیرخطی ۱۱۰

۶-۳-۶- مطالعه موردی ۶، بررسی عملکرد UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی در جبران‌سازی کمبود و بیشبود ولتاژ و کارایی کنترل‌کننده با شدت گرفتن اعوجاج‌ها در شبکه ۱۱۵

۶-۳-۶-۱- بررسی جبران‌سازی کمبود و بیشبود ولتاژ ۱۱۵

۶-۳-۶-۲- بررسی کارایی کنترل‌کننده در حضور هارمونیک‌های ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ شبکه، بار غیرخطی و رخ دادن کمبود و بیشبود ولتاژ ۱۱۷

۶-۳-۶-۳- بررسی کارایی کنترل‌کننده در حضور هارمونیک‌های ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ شبکه، بار غیرخطی و افزایش مدت زمان کمبود و بیشبود ولتاژ ۱۲۴
۶-۳-۷- مطالعه موردی ۷، بررسی جبران‌سازی فیلیکر ولتاژ در شبکه با بار کوره قوس الکتریکی ۱۲۸

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۰
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۱
۷-۲- پیشنهادات ۱۳۲

مراجع و مآخذ ۱۳۳

پیوست‌ها ۱۳۸
پیوست الف: مولفه‌های کنترلی معادل بخش موازی ۱۳۸

فهرست جدول‌ها

جدول (۶-۱): پارامترهای الکتریکی UPQC ۸۷
جدول (۶-۲): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۱ ۸۸
جدول (۶-۳): مقایسه THD جریان بار و جریان شبکه ۹۳
جدول (۶-۴): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۲ ۹۳
جدول (۶-۵): جریان بار و جریان شبکه (مطالعه موردی ۲) ۹۸
جدول (۶-۶): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۳ ۹۹
جدول (۶-۷): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۴ ۱۰۵
جدول (۶-۸): مقایسه THD جریان و ولتاژ بار و شبکه ۱۱۰
جدول (۶-۹): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۵ ۱۱۱
جدول (۶-۱۰): مقایسه مقدار موثر ولتاژ فاز a بار (مطالعه موردی ۵) ۱۱۴
جدول (۶-۱۱): مقایسه مقادیر درصد عدم تعادل ولتاژ (مطالعه موردی ۵) ۱۱۴
جدول (۶-۱۲) :مشخصات شبکه و باردر مطالعه موردی ۶ ۱۱۵
جدول (۶-۱۳): مشخصات شبکه و بار در مطالعه موردی ۶ ۱۱۷

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱): ساختار عمومی فیلتر اکتیو موازی ٤

شکل (۱-۲): ساختار عمومی فیلتر اکتیو سری ٥

شکل (۱-۳): ساختار عمومی UPQC ٦

شکل (۲-۱): ساختار کلی بهبود دهنده یکپارچه کیفیت توان ۱۱

شکل (۲-۲): ساختارهای مختلف مدار قدرت UPQC ۱۲

شکل (۲-۳): UPQC سه فاز چهار سیمه با خازن دو بخشی ۱۳

شکل (۲-۴): UPQC تکفاز با دو مبدل نیم پل ۱۳

شکل (۲-۵): UPQC تکفاز با پل H ۱٤

شکل (۲-۶): UPQC تکفاز تکفاز سه پایه ۱٤

شکل (۲-۷): UPQC چند مبدله ۱٥

شکل (۲-۸): ساختار UPQC با خازن دو بخشی در شبکه قدرت مورد مطالعه ۱٦

شکل (۲-۹): ساختار UPQC با خازن یک بخشی در شبکه قدرت مورد مطالعه ۱۹

شکل (۳-۱): دسته بندی انواع روش‌های کنترل ارائه شده برای UPQC ۲٤

شکل (۳-۲): بلوک دیاگرام کنترل مبدل موازی با استراتژی توان منبع ثابت ۲۷

شکل (۳-۳): آشکارساز توالی مثبت ولتاژ ۲۷

شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام کنترل بخش موازی با استراتژی جریان سینوسی منبع ۲۸

شکل (۳-۵): بلوک دیاگرام کنترل UPQC به روش تئوری توان لحظه ای ۳۰

شکل (۳-۶): مختصات p-q-r ۳۰

شکل (۳-۷): بلوک دیاگرام کنترل بخش موازی در روش قاب مرجع سنکرون ۳۳

شکل (۳-۸): بلوک دیاگرام کنترل بخش سری در روش dq ۳٤

شکل (۳-۹): بلوک دیاگرام کنترل بخش سری به روش dq و روش pq برای بخش موازی ۳٤

شکل (۳-۱۰) : بلوک دیاگرام کنترل بخش سری به روش UVTG ۳٥

شکل (۳-۱۱): بلوک دیاگرام کنترل بخش موازی به روش UVTG ۳٦

شکل (۳-۱۲): زاویه توان بار ۳۷

شکل (۳-۱۳): مشخص کردن زاویه δ لحظه ای با استفاده از تئوری توان لحظه ای ۳۷

شکل (۳-۱۴): تولید سیگنال های مرجع با استفاده از δ برای قسمت سری ۳۸

شکل (۳-۱۵): تولید سیگنال های مرجع برای قسمت موازی ۳۸

شکل (۳-۱۶): بلوک دیاگرام کنترل به روش فازی بهینه شده با الگوریتم پرندگان ٤٠

شکل (۳-۱۷): بلوک دیاگرام کنترل بخش سری با استفاده از تئوری تبدیل فوری ٤١
شکل (۳-۱۸): ساختار داخلی تبدیل موجک ٤٢
شکل (۳-۱۸): کنترل قسمت سری با استفاده از تبدیل موجک ٤٢
شکل (۳-۱۹): مدار معادل تکفاز UPQC ٤٣
شکل (۳-۲۰): بلوک دیاگرام کنترل UPQC با کنترل پیشخورد و پسخورد ٤٧
شکل (۳-۲۱): ساختار عمومی UPQC ٤٨
شکل (۳-۲۲): کنترل به روش شبکه عصبی مصنوعی ٥١
شکل (۳-۲۳): بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ لینک dc با کنترلر PI ٥٤
شکل (۳-۲۴): کنترل ولتاژ لینک dc با کنترلر PID ٥٤
شکل (۳-۲۵): کنترل ولتاژ لینک dc به روش فازی ٥٥
شکل (۳-۲۶): کنترل ولتاژ لینک dc با استفاده از کنترلر FPI ٥٥
شکل (۴-۱): مسیر حالت سیستم پس از رسیدن به سطح لغزش ٦١
شکل (۴-۲): مسیر حالت سیستم تحت کنترل مد لغزشی با دو ورودی کنترلی ٦١
شکل (۴-۳): مرحله رسیدن حالت سیستم به سطح لغزش در صورت برآورده شدن شرط لغزش ٦٢
شکل (۶-۱): مدار قدرت UPQC ٨٦
شکل (۶-۲): بلوک دیاگرام کنترل کننده مد لغزشی بخش موازی UPQC ٨٦
شکل (۶-۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده مد لغزشی بخش سری UPQC با کنترل جریان ٨٧
شکل (۶-۴): بلوک دیاگرام کنترل کننده مد لغزشی بخش سری UPQC با کنترل ولتاژ ٨٧
شکل (۶-۵): مدل شبیه‌سازی شده UPQC (مطالعه موردی ۱) ٨٨
شکل (۶-۶): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ٨٩
شکل (۶-۷): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ٨٩
شکل (۶-۸): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ٩٠
شکل (۶-۹): شکل موج جریان تزریق شده توسط قسمت موازی UPQC با کنترل‌کننده PI ٩٠
شکل (۶-۱۰): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با ٩١

کنترل‌کننده مد لغزشی
شکل (۶-۱۱): شکل موج جریان تزریق شده توسط قسمت موازی UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹۱
شکل (۶-۱۲): محتوای هارمونیکی جریان بار ۹۲
شکل (۶-۱۳): محتوای هارمونیکی جریان شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۹۲
شکل (۶-۱۴): محتوای هارمونیکی جریان شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹۲
شکل (۶-۱۵): مدل شبیه‌سازی شده UPQC (مطالعه موردی ۲) ۹۳
شکل (۶-۱۶): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۹٤
شکل (۶-۱۷): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹۵
شکل (۶-۱۸): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۹۵
شکل (۶-۱۹): شکل موج جریان تزریق شده توسط قسمت موازی UPQC با کنترل‌کننده PI ۹٦
شکل (۶-۲۰): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹٦
شکل (۶-۲۱): شکل موج جریان تزریق شده توسط قسمت موازی UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹۷
شکل (۶-۲۲): محتوای هارمونیکی جریان بار ۹۷
شکل (۶-۲۳): محتوای هارمونیکی جریان شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۹۸
شکل (۶-۲۴): محتوای هارمونیکی جریان شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۹۸
شکل (۶-۲۵): مدل شبیه‌سازی شده UPQC (مطالعه موردی ۳) ۱۰۰
شکل (۶-۲۶): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۰۰
شکل (۶-۲۷): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۰۱
شکل (۶-۲۸): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۰۱

شکل (۶-۲۹): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۰۲
شکل (۶-۳۰): مقادیر موثر جریان‌های سه‌فاز ترمینال بار (مطالعه موردی ۳) ۱۰۲
شکل (۶-۳۱): مقادیر موثر جریان‌های سه‌فاز شبکه جبران شده با UPQC با کنترل‌کننده PI (مطالعه موردی ۳) ۱۰۳
شکل (۶-۳۲): مقادیر موثر جریان‌های سه‌فاز شبکه جبران شده با UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی ۳) ۱۰۳
شکل (۶-۳۳): توان اکتیو و راکتیو مصرف شده توسط بار (مطالعه موردی ۳) ۱۰٤
شکل (۶-۳۴): توان اکتیو و راکتیو تزریق شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی ۳) ۱۰٤
شکل (۶-۳۵): توان اکتیو و راکتیو تزریق شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI (مطالعه موردی ۳) ۱۰٤
شکل (۶-۳۶): UPQC و شبکه مورد نظر در مطالعه موردی ۴ ۱۰۵
شکل (۶-۳۷): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۰٦
شکل (۶-۳۸): شکل موج ولتاژ شبکه و ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۰٦
شکل (۶-۳۹): محتوای هارمونیکی ولتاژ شبکه (مطالعه موردی ۴) ۱۰۷
شکل (۶-۴۰): محتوای هارمونیکی ولتاژ بار در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۰۷
شکل (۶-۴۱): محتوای هارمونیکی ولتاژ بار در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۰۷
شکل (۶-۴۲): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI. ۱۰۸
شکل (۶-۴۳): شکل موج جریان بار و جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی. ۱۰۸
شکل (۶-۴۴): محتوای هارمونیکی جریان بار (مطالعه موردی ۴) ۱۰۹
شکل (۶-۴۵): محتوای هارمونیکی ولتاژ بار در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۰۹

شکل (۶-۴۶): محتوای هارمونیکی ولتاژ بار در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۰۹
شکل (۶-۴۷): UPQC و شبکه مورد نظر در مطالعه موردی ۵ ۱۱۰
شکل (۶-۴۸): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران نشده ۱۱۱
شکل (۶-۴۹): شکل موج ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۱۱
شکل (۶-۵۰): شکل موج ولتاژ در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده مد لغزشی ۱۱۲
شکل (۶-۵۱): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز شبکه جبران نشده ۱۱۲
شکل (۶-۵۲): مقدار موثر ولتاژ فاز a در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۱۲
شکل (۶-۵۳): مقدار موثر ولتاژ فاز a در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی ۵) ۱۱۳
شکل (۶-۵۴): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران نشده ۱۱۳
شکل (۶-۵۵): شکل موج ولتاژ بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۱۳
شکل (۶-۵۶): شکل موج ولتاژ در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده مد لغزشی ۱۱٤
شکل (۶-۵۷): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران نشده ۱۱٦
شکل (۶-۵۸): شکل موج ولتاژ در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده مد لغزشی ۱۱٦
شکل (۶-۵۹): تغییرات مقدار موثر ولتاژ شبکه ۱۱٦
شکل (۶-۶۰): تغییرات مقدار موثر ولتاژ بار جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده مد لغزشی ۱۱۷
شکل (۶-۶۱): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران نشده (مطالعه موردی۶). ۱۱۸
شکل (۶-۶۲): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI (مطالعه موردی۶). ۱۱۸
شکل (۶-۶۳): شکل موج ولتاژ شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی۶). ۱۱۹
شکل (۶-۶۴): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز شبکه جبران نشده (مطالعه موردی ۶) ۱۱۹

شکل (۶-۶۵): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۰
شکل (۶-۶۶): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۰
شکل (۶-۶۷): شکل موج جریان بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۱
شکل (۶-۶۸): شکل موج جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۱
شکل (۶-۶۹): شکل موج جریان بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۲
شکل (۶-۷۰): شکل موج جریان شبکه در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۲
شکل (۶-۷۱): مقدار موثر جریان بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۳
شکل (۶-۷۲): مقدار موثر جریان بار در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۳
شکل (۶-۷۳): شکل موج ولتاژ شبکه با افزایش مدت کمبود ولتاژ در شبکه‌ی جبران نشده ۱۲٤
شکل (۶-۷۴): شکل موج ولتاژ بار با افزایش مدت کمبود ولتاژ در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده PI . ۱۲٤
شکل (۶-۷۵): شکل موج ولتاژ بار با افزایش مدت کمبود ولتاژ در شبکه‌ی جبران شده توسط UPQC با کنترل کننده مد لغزشی ۱۲۵
شکل (۶-۷۶): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز با افزایش مدت کمبود ولتاژ شبکه جبران نشده (مطالعه موردی ۶) ۱۲۵
شکل (۶-۷۷): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز با افزایش مدت کمبود ولتاژ در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI (مطالعه موردی ۶) ۱۲٦
شکل (۶-۷۸): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز با افزایش مدت کمبود ولتاژ در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی ۶) ۱۲٦
شکل (۶-۷۹): ولتاژ خازن C1 در UPQC با کنترل‌کننده PI (مطالعه موردی ۶) ۱۲۷
شکل (۶-۸۰): ولتاژ خازن C1 در UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی (مطالعه موردی ۶) ۱۲۷
شکل (۶-۸۱): شکل موج ولتاژ در شبکه جبران نشده و در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۸

شکل (۶-۸۲): شکل موج ولتاژ در شبکه جبران نشده و در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۸
شکل (۶-۸۳): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده PI ۱۲۹
شکل (۶-۸۴): مقادیر موثر ولتاژ سه‌فاز در شبکه جبران شده توسط UPQC با کنترل‌کننده مد لغزشی ۱۲۹

فهرست علائم و اختصارات

خازن باس DC	C
خازن دو بخشی باس DC	C_1
خازن دو بخشی باس DC	C_2
خازن فیلتر هارمونیکی بخش سری	c_s
خازن باس DC	C_{se}
خطای ردیابی	e
فرکانس	f
بردار جریان	$\vec{\imath}$
جریان فاز x (x=a,b,c,α,β)	i_x
جریان مرجع فاز x (x=a,b,c)	I_{x^*}
جریان مرجع فاز x فیلتر اکتیو موازی (x=a,b,c,α,β)	i_{c^*x}
جریان در راستای d مختصات سنکرون	i_d
جریان تزریق شده توسط فیلتر اکتیو موازی	i_{f}
جریان هارمونیکی	i_{h}
جریان هارمونیکی فاز x (x=a,b,c,α,β)	i_{hx}
جریان تزریق شده توسط فیلتر اکتیو موازی	i_{inj}
جریان بار	i_L
جریان فاز x بار (x=a,b,c,α,β,d,q,0)	i_{Lx}
مولفه dc جریان بار در راستای d	$\bar{\imath}_{Ld}$
مولفه ac جریان بار در راستای d	$\tilde{\imath}_{Ld}$
مولفه dc جریان بار در راستای q	$\bar{\imath}_{Lq}$
مولفه ac جریان بار در راستای q	$\tilde{\imath}_{Lq}$
دامنه جریان مرجع	I_m
جریان فیلتر اکتیو موازی	i_p
جریان فاز x فیلتر اکتیو موازی (x=a,b,c)	i_{px}
جریان راکتیو	i_q
جریان در راستای r	i_r
جریان فیلتر اکتیو سری	i_s
جریان فاز x فیلتر اکتیو سری (x=a,b,c,α,β,d,q,0)	i_{sx}
جریان فیلتر اکتیو سری	i_{se}
جریان مرجع فیلتر اکتیو سری در راستای x (x=d,q)	i^*_{sx}
جریان فاز x ترانسفورماتور سری	i'_{sx}
ضریب انتگرال در سطح لغزشی انتگرالی x ام	I_{sx}
بهره کنترلر PI	K_{is}
بهره کنترلر PI	K_{pa}