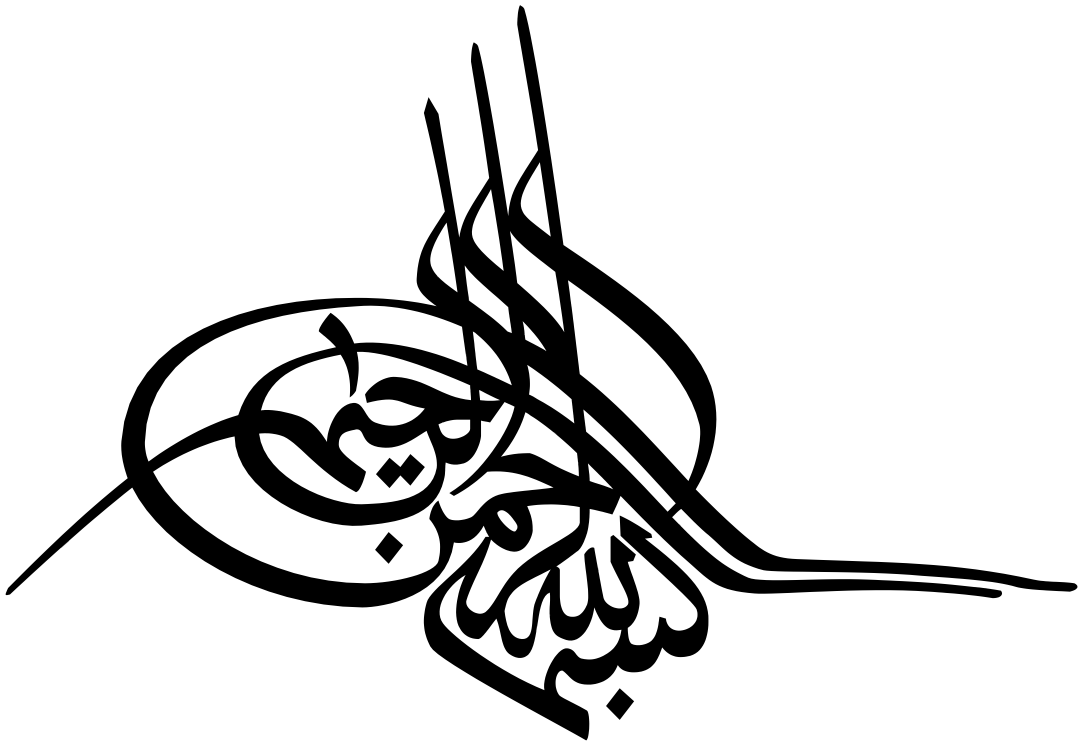
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق

گروه قدرت

تشخیص و تفکیک منابع فلیکر در سیستم قدرت

دانشجو : عبدالمجید دژم‌خوی

استاد راهنما

دکتر علی دستفان

استاد مشاور

دکتر علیرضا احمدی‌فرد

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

بهار ۱۳۹۳

شماره : ۱۱۷۴/ت/ب
تاریخ : ۹۳/۳/۳۱
ویرایش : —

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

فرم شماره ۱۲

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم عبدالمجید دهقانی دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق-قدرت به شماره دانشجویی ۸۸۱۸۴۶۵ ورودی سال ۸۸ درتاریخ ۹۳/۳/۲۷ از رساله خود با عنوان :

تشخیص و تفکیک منابع فلیکر در سیستم قدرت

دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۸۷ به درجه : بسیار خوب نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐	ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ ☑
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹– ۱۵ ☐	د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر علی دستفان	استاد/ اساتید راهنما	استادیار	
	دکتر علیرضا الهی فرد	مشاور/ مشاورین	استادیار	
	دکتر حمیدرضا صائینی	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
	دکتر مصطفی محمدیان	استاد مدعو داخلی / خارجی	"	
	دکتر مهدی بانژاد	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
	دکتر مرتضی رحیمیان	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران: علیرضا الهی فرد

تاریخ و امضاء

این اثر ناچیز را تقدیم می‌کنم

به پدر دلسوز، فداکار و سخت‌کوشم، *ابوالفضل دژم‌خوی*

که بسیار بیشتر از وظیفه پدری بر گردن من حق دارند و در تمام دوران تحصیلم؛ دوست، همدم، مشوق و مایه دل گرمی من بودند

و به مادم مهربانم، *منیژه سیاهکوهی*

که پس از سی سال تدریس، کلاس و معلمی را برای من به امانت گذاشتند.

طول عمر و حیات با عزت را برای ایشان آرزومندم.

تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از همه کسانی که با راهنمایی و رهنمود، تشویق و ترغیب، تذکر و انتقاد، معرفی و یا تهیه منابع، بنده را در انجام این تحقیق یاری رسانیده‌اند، تشکر نمایم؛ به ویژه از استاد محترم راهنما جناب آقای دکتر علی دستفان و استاد محترم مشاور جناب آقای دکتر علیرضا احمدی-فرد که در طول انجام این تحقیق همواره مرا مرهون الطاف، راهنمایی‌ها و بزرگواری‌های خویش قرار داده‌اند، بسیار سپاسگزارم.

همچنین از خانواده عزیزم و به خصوص پدر و مادر گرانقدرم که همواره با دلگرمی‌های خویش مرا جانی تازه بخشیده‌اند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

و در نهایت از تمامی اساتید گروه قدرت دانشگاه صنعتی شاهرود که در طول دوران تحصیل، بنده را از راهنمایی‌های خویش بی نصیب نگذاشته‌اند، سپاسگزاری می‌کنم.

تعهـــد نامـــه

اینجانب سید ابوالحسن هاشمی دانشجوی دوره دکتری رشته برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله دکتری با عنوان :

تشخیص و تفکیک منابع نامی در سیستم قدرت

تحت راهنمائی آقای دکتر دیناوند متعهد می شوم :

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « **دانشگاه صنعتی شاهرود** » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۹۳/۶/۴

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* **متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده رساله وجود داشته باشد .**

چکیده

امروزه مسائل کیفیت توان، از جمله فلیکر، از دغدغه‌های عمده‌ی شرکت‌های برق و مصرف کنندگان می‌باشد. مهم‌ترین گام در راستای کاهش اثر فلیکر و انجام امور اصلاحی تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به خصوص در شبکه‌های غیرشعاعی است. در این پایان‌نامه روش‌هایی برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر، تفکیک سهم منابع فلیکر در نوسان دامنه هر کدام از باس‌ها و پیش‌بینی نوسان دامنه ناایستان ارائه می‌شود.

برای وضعیتی که منابع فلیکر با فرکانس‌های متفاوتی نوسان می‌کنند، روشی بر اساس طراحی فیلتر همبسته جهت تفکیک تُن‌های فلیکری در ولتاژ هر باس پیشنهاد شده است. در این روش با توجه به اندازه دامنه تُن‌ها، محل اتصال هر کدام از منابع تشخیص داده می‌شود. برای وضعیتی که منابع فلیکر به صورت هم فرکانس نوسان می‌کنند، دو روش اساسی در پیش گرفته می‌شود. در روش اول که از داده‌های آموزشی استفاده می‌شود از دو ابزار خوشه‌بندی میانگین k و ضریب همبستگی آماری استفاده می‌شود. در روش دوم یا روش تحلیلی با در نظر گرفتن منابع فلیکر به عنوان متغیرها و جریان‌ها و ولتاژها به عنوان توابع چند متغیره پس از تشکیل ماتریس ژاکوبین ملاکی برای تشخیص تک نقطه‌ای منابع فلیکر ارائه می‌شود. همچنین پس از تحلیل تئوریک علت غالب شدن یک منبع فلیکر، از گراف جهت‌دار برای نمایش نحوه انتشار فلیکر در شبکه و تشخیص محل منبع فلیکر غالب استفاده می‌شود. برای شرایطی که نوسان دامنه به صورت ناایستان باشد، با در نظر گرفتن سیگنال پوش گسسته به عنوان سری زمانی، شاخصی برای شدت نوسان معرفی می‌شود. همچنین پوش ناایستان توسط روش‌های سری زمانی و مدل‌های خاکستری اصلاح شده پیش‌بینی می‌گردد. شبیه-سازی‌های انجام شده توانایی روش‌های پیشنهادی برای اهداف مورد نظر را نشان می‌دهند.

کلید واژه‌ها- فلیکر، ولتاژ نوسانی، فیلتر همبسته، خوشه‌بندی میانگین k، ضریب همبستگی، ماتریس ژاکوبین، گراف جهت‌دار، سری زمانی، مدل‌های خاکستری

مقالات مستخرج از پایان‌نامه

مقالات ژورنالی

- ✓ Abdolmajid Dejamkhooy, Ali Dastfan, Alireza Ahmadyfard, Source Detection and Propagation of Equal Frequency Voltage Flicker Sources in Non-Radial Power Systems, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1311-162
- ✓ Abdolmajid Dejamkhooy, Ali Dastfan, Alireza Ahmadyfard, Modeling and Forecasting of Non-Stationary Voltage Flicker and Its Source Detection in Power System, *Journal of Electrical Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 223-237, 2014.
- ✓ Abdolmajid Dejamkhooy, Ali Dastfan, Alireza Ahmadyfard, K-Means and Correlation Coefficient Based Methods for Detecting and Separating of Flicker Sources in Non-Radial Power System, *Russian Electrical Engineering*, Vol. 85, No. 4, pp. 251-259, 2014.

مقالات کنفرانسی

- ✓ Abdolmajid Dejamkhooy, Ali Dastfan, Alireza Ahmadyfard, Intelligent and Statistical Methods for Detecting Flicker Sources in Non-radial Power System, 2013 Smart Grids Conference, December 17-18, 2013, Tehran, Iran
- ✓ Abdolmajid Dejamkhooy, Ali Dastfan, Alireza Ahmadyfard, Automatic Scheme for Detecting and Separating Flicker Sources in Non-Radial Power Systems, دومین کنگره صنعت برق ایران، اصفهان، زمستان ۱۳۹۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۲ اهداف پایان نامه ۴

فصل دوم: ارزیابی ولتاژ نوسانی، استخراج پوش و تشخیص منابع فلیکر (مروری بر کارهای انجام شده) ۷

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ توصیف پدیده فلیکر ۱۰

۲-۲-۱ اندازه‌گیری پارامترهای فلیکر توسط استاندارد IEC ۱۲

۲-۲-۲ پارامتر مقدار معادل ده هرتز ۱۳

۲-۲-۳ منابع فلیکر ۱۵

۲-۲-۴ روشهای کاهش فلیکر ۱۹

۲-۳ ارزیابی ولتاژ با دامنه نوسانی و استخراج پوش ۲۴

۲-۳-۱ دمدولاسیون مربعی برای استخراج پوش ۲۵

۲-۳-۲ دمدولاسیون نیم موج برای استخراج پوش ۲۶

۲-۳-۳ الگوریتم شیفت فاز برای استخراج پوش ۲۷

۲-۳-۴ روشهای مبتنی بر تبدیلات انتگرالی برای ارزیابی ولتاژ نوسانی ۲۹

۲-۳-۵ کاربرد فیلتر کالمن برای ارزیابی ولتاژ نوسانی و استخراج پوش ۳۱

۲-۳-۶ روش تطبیقی برای ارزیابی ولتاژ نوسانی و استخراج پوش ۳۱

۲-۳-۷ استخراج پوش ولتاژ نوسانی توسط حلقه قفل فاز بهبود یافته (EPLL) ۳۲

۲-۴ تشخیص منابع فلیکر در سیستم قدرت ۳۷

۲-۴-۱ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به کمک مفهوم توان فلیکر ۳۷

۲-۴-۲ روش شیب ولتاژ-جریان برای تشخیص محل منابع فلیکر ۴۰
۲-۴-۳ روش پخش بار میان‌هارمونیکی برای تشخیص منابع فلیکر ۴۰
۲-۴-۴ روش هوشمند برای تشخیص منابع فلیکر ۴۲
۲-۴-۵ استفاده از مولفه راکتیو جریان برای تشخیص منابع فلیکر ۴۲
۲-۴-۶ استفاده از پخش بار تصادفی برای تشخیص منابع فلیکر ۴۳
۲-۴-۷ انتشار فلیکر ناشی از نیروگاه‌های بادی ۴۳
فصل سوم: مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی ۴۵
۳-۱ مقدمه ۴۷
۳-۲ روش اتورگرسیو و میانگین متحرک برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی ۴۹
۳-۲-۱ مدل میانگین متحرک با مرتبه محدود ($MA(q)$) ۵۰
۳-۲-۲ مدل اتورگرسیو با مرتبه محدود ($AR(p)$) ۵۱
۳-۳ مدل‌های خاکستری برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی ۵۳
۳-۳-۱ مدل خاکستری مرتبه اول یک متغیره GM(1,1) ۵۴
۳-۳-۲ تصحیح خطای GM(1,1) توسط سری فوریه ۵۶
فصل چهارم: روش‌های پیشنهادی برای تشخیص و تفکیک منابع فلیکر ایستان ۵۹
۴-۱ مقدمه ۶۱
۴-۲ تشخیص و تفکیک منابع فلیکر با فرکانس متفاوت ۶۲
۴-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی ۶۹
۴-۳ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس به روش آماری ۷۸
۴-۳-۱ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به روش خوشه‌بندی میانگین k ۸۱
۴-۳-۲ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به کمک ضریب همبستگی آماری ۸۲
۴-۳-۳ نتایج شبیه سازی ۸۵
۴-۴ روش تحلیلی برای تشخیص منابع فلیکر هم فرکانس ۹۱

۴-۴-۱ روش تک نقطه‌ای برای تشخیص منابع فلیکر ۹۱
۴-۴-۲ انتشار فلیکر و تشخیص منبع فلیکر با گراف جهت‌دار ۹۷
۴-۴-۳ بررسی اثر محل اتصال منبع فلیکر و وضعیت بهره‌برداری آنها در غالب بودن ۱۰۱
۴-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی ۱۰۵
فصل پنجم: روش‌های پیشنهادی برای فلیکر ناایستان؛ تشخیص منبع، مدل‌سازی و پیش-بینی پوش ۹۹
۵-۱ مقدمه ۱۲۳
۵-۲ شاخص نوسان ناایستان دامنه و مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های سری زمانی ۱۲۳
۵-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی ۱۲۶
۵-۳ مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های خاکستری اصلاح شده ۱۳۴
۵-۳-۱ روش اصلاح شده‌ی GM(1,1) و FGM ۱۳۵
۵-۳-۲ مدل GM(1,1) لغزان ۱۳۶
۵-۳-۳ ملاک‌های ارزیابی مدل‌های خاکستری ۱۳۷
۵-۳-۴ نتایج شبیه‌سازی ۱۳۸
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۴۹
۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۵۱
۶-۲ پیشنهادات ۱۵۲
مراجع ۱۵۵
پیوست ۱۶۷

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) نمونه ای از ولتاژ با دامنه نوسانی به فرم مستطیلی ۱۱

شکل (۲-۲) نوسانات توان یک کوره قوس الکتریک با توان نامی MVA ۸۰ در لحظات آغازین فرآیند ذوب ۱۶

شکل (۲-۳) جریان کشیده شده توسط یک کوره قوس الکتریک با توان نامی MVA ۸۰ در لحظات آغازین فرآیند ذوب ۱۷

شکل (۲-۴) ساختارهای SVC ۲۱

شکل(۲-۵) ساختار کلی حلقه قفل فاز ۳۲

شکل (۲-۶) بلوک دیاگرام EPLL ۳۳

شکل (۲-۷) ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری ۳۴

شکل (۲-۸) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری ۳۴

شکل (۲-۹) ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری ۳۵

شکل (۲-۱۰) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری ۳۵

شکل (۲-۱۱) ولتاژ نوسانی با پوش ناایستان ۳۶

شکل (۲-۱۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با پوش ناایستان ۳۶

شکل (۲-۱۳) منبع فلیکر در بالادست نقطه مشاهده، توان فلیکر مثبت ۳۹

شکل (۲-۱۴) منبع فلیکر در پایین‌دست نقطه مشاهده، توان فلیکر منفی ۳۹

شکل (۴-۱) مراحل روش پیشنهادی برای تشخیص و تفکیک منابع فلیکر با فرکانس متفاوت ۶۳

شکل(۴-۲) ورودی‌ها و خروجیِ فیلتر همبسته برای یک باس معین از شبکه ۶۶

شکل (۴-۳) فیلتر همبسته‌ی پیشنهاد شده برای محاسبه تن‌های فلیکری ۶۷

شکل(۴-۴) سیستم قدرت شش باسه مورد مطالعه ۷۰

شکل (۴-۵) مدل منبع فلیکر متصل به باس شماره j ۷۱
شکل(۴-۶) ولتاژ نوسانی باس دوم، سناریوی اول ۷۲
شکل (۴-۷) محتویات میان‌هارمونیکی ولتاژ شبکه در سناریوی اول ۷۳
شکل (۴-۸) پوش دامنه ولتاژ باس دوم، سناریوی اول ۷۴
شکل (۴-۹) ساختار کلی روش پیشنهادی برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس ۷۹
شکل (۴-۱۰) فلوچارت روش‌های مبتنی بر آموزش برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس ۸۴
شکل (۴-۱۱) سیستم قدرت با منابع فلیکر ۹۲
شکل (۴-۱۲) تعیین جهت پیکانِ گراف جهت‌دار بین دو راس (دو باس)، توان فلیکر مثبت ۹۸
شکل (۴-۱۳) تعیین جهت پیکانِ گراف جهت‌دار بین دو راس (دو باس)، توان فلیکر منفی ۹۹
شکل (۴-۱۴) الگوریتم تشخیص محل منبع فلیکر از روی ماتریس مجاورت گراف جهت‌دار ۱۰۱
شکل (۴-۱۵) اتصال دو منبع فلیکر به دو باس از سیستم قدرت ۱۰۲
شکل (۴-۱۶) سیستم معادل شکل (۴-۱۵) ۱۰۲
شکل (۴-۱۷) گراف جهت‌دار نظیر تمام وضعیت‌های سناریوی اول ۱۱۴
شکل (۴-۱۸) گراف جهت‌دار متناظر با سناریوی دوم ۱۱۶
شکل (۴-۱۹) گراف جهت‌دار متناظر با سناریوی سوم ۱۱۹
شکل (۵-۱) طرح کلی تشخیص منبع و مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های سری زمانی ۱۲۴
شکل (۵-۲) پالس سوئچینگ ۱۲۷
شکل (۵-۳) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول ۱۲۷
شکل (۵-۴) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول ۱۲۸
شکل (۵-۵) پوش ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول ۱۳۰
شکل (۵-۶) خطای مطلق بین پوش واقعی و مدل شده/پیشبینی شده ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول ۱۳۰

شکل (۵-۷) ارتباط بین خطای مدل و فرکانس نمونه‌برداری ۱۳۱
شکل (۵-۸) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم ۱۳۲
شکل (۵-۹) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم ۱۳۲
شکل (۵-۱۰) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم ۱۳۳
شکل (۵-۱۱) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم ۱۳۳
شکل (۵-۱۲) سه مرحله از روش اصلاح شده‌ی GM(1,1) به ازای $n = 5$ و $p = 1$ ۱۳۵
شکل (۵-۱۳) سه مرحله از روش خاکستری لغزان به ازای $n = 5$ و $p = 1$ ۱۳۷
شکل (۵-۱۴) ولتاژ نوسانی مورد بررسی و پوش استخراج شده‌ی آن ۱۳۹
شکل (۵-۱۵) مقدار پارامتر a در هرکدام از GM(1,1)ها ۱۳۹
شکل (۵-۱۶) مقدار پارامتر b در هرکدام از GM(1,1)ها ۱۴۰
شکل (۵-۱۷) پوش واقعی و مدل‌های خاکستری اصلاح شده آن به ازای $n = 5$ ۱۴۰
شکل (۵-۱۸) خطای مطلق در روش GM(1,1) اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۱
شکل (۵-۱۹) خطای مطلق در روش FGM اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۱
شکل (۵-۲۰) خطای مطلق در روش خاکستری لغزان اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۲
شکل (۵-۲۱) پوش واقعی و مدل GM(1,1) اصلاح شده آن به ازای $n = 5$ و $p = 6$ ۱۴۴
شکل (۵-۲۲) خطای مطلق در روش GM(1,1) اصلاح شده به ازای $n = 5$ و $p = 6$ ۱۴۴
شکل (۵-۲۳) تغییرات MSE برحسب n و p ۱۴۵
شکل (۵-۲۴) تغییرات AME برحسب n و p ۱۴۵
شکل (۵-۲۵) تغییرات ARPE برحسب n و p ۱۴۶
شکل (۵-۲۶) تغییرات زمان محاسبات بر حسب n و p ۱۴۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱) رفتار ACF و PACF در مدلهای سری زمانی **۵۳**

جدول (۴-۱) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش تشخیص منابع با فرکانس متفاوت **۷۲**

جدول (۴-۲) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول..... **۷۵**

جدول (۴-۳) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم **۷۶**

جدول (۴-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی سوم **۷۶**

جدول (۴-۵) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی چهارم **۷۷**

جدول (۴-۶) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی پنجم..... **۷۸**

جدول (۴-۷) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی اول **۸۶**

جدول (۴-۸) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی اول..... **۸۷**

جدول (۴-۹) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی دوم..... **۸۸**

جدول (۴-۱۰) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی دوم **۸۹**

جدول (۴-۱۱) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی سوم..... **۹۰**

جدول (۴-۱۲) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی سوم **۹۱**

جدول (۴-۱۳) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش تک نقطه برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس **۱۰۶**

جدول (۴-۱۴) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول **۱۰۷**

جدول (۴-۱۵) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم..... **۱۰۸**

جدول (۴-۱۶) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی سوم **۱۰۸**

جدول (۴-۱۷) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی چهارم **۱۰۹**

جدول (۴-۱۸) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی پنجم **۱۱۰**

جدول (۴-۱۹) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول با بار هارمونیکی ... **۱۱۱**

جدول (۴-۲۰) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم با بار هارمونیکی.. **۱۱۲**

جدول (۴-۲۱) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش گراف جهت‌دار برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس **۱۱۳**

جدول (۴-۲۲) توان فلیکر در خطوط انتقال سیستم قدرت، سناریوی اول..... **۱۱۴**

جدول (۴-۲۳) توان فلیکر در خطوط انتقال سیستم قدرت، سناریوی دوم **۱۱۶**

جدول (۴-۲۴) توان فلیکر در خطوط انتقال سیستم قدرت، سناریوی سوم **۱۱۸**

جدول (۵-۱) پارامترهای مدل‌های سری زمانی برای پوش و شاخص نوسان در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول..... **۱۲۹**

جدول (۵-۲) پارامترهای مدل‌های سری زمانی برای پوش و شاخص نوسان در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم **۱۳۴**

جدول (۵-۳) پارامترهای مدل‌های سری زمانی برای پوش و شاخص نوسان در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی سوم **۱۳۴**

جدول (۵-۴) مقادیر خطاها با تغییر n در مدل‌های خاکستری **۱۴۳**

جدول (پ-۱) داده‌های خطوط انتقال..... **۱۶۹**

جدول (پ-۲) داده‌های باس‌های سیستم قدرت **۱۶۹**

فصل اول: مقدمه

۱-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

علاوه بر مسائل سنتی سیستم‌های قدرت، امروزه به صورت وسیعی توجه مشترکان و شرکت‌های برق به کیفیت توان[۱] تحویلی و پایایی[۲] آن معطوف شده است. مشترکین مانند گذشته فقط به داشتن برق اکتفا نمی کنند بلکه برقی با کیفیت بالا را توقع دارند. از جمله دلایل این توجه، استفاده روزافزون از تجهیزات الکتریکی جدیدتر نسبت به گذشته و حساسیت این تجهیزات نسبت به کیفیت برق تحویل داده شده است. از جمله مسائل کیفیت توان، نوسان دامنه ولتاژ[۳] شبکه است. چنانچه این نوسان با دامنه محدود و در محدوده فرکانسی معینی رخ دهد، باعث پدیده فلیکر روشنایی[۴] یا به اختصار فلیکر[۵] می‌شود. بارهایی که توان مصرفی آنها به صورت قطع و وصلی است و یا مقدار موثر جریان آنها نوسان شدید دارد، منشاء اصلی پدیده فلیکر هستند. به این بارها که عموماً غیرخطی هستند، منابع فلیکر[۶] می‌گویند. در سطح ولتاژ پایین و متوسط، راه‌اندازی موتورها و ماشین‌های جوش نقطه ای[۷] از منابع رایج فلیکر هستند. همچنین بهره‌برداری از کوره‌های قوس الکتریک[۸] و واحدهای نورد فولاد[۹] در ولتاژهای بالا باعث وقوع پدیده فلیکر می‌شوند. علاوه بر بارهای مذکور که مصرف کننده توان الکتریکی هستند، نیروگاه‌های بادی نیز می‌توانند منبع فلیکر باشند [۱].

تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در شبکه های الکتریکی اولین قدم در جهت کاهش اثر فلیکر و انجام امور اصلاحی مرتبط با آن است. شرکت‌های برق نیازمند روش‌هایی هستندکه بتوانند محل اتصال منابع فلیکر در شبکه های الکتریکی را با دقت کافی معین کنند. تشخیص منابع باید با دلایل کافی جهت متقاعد کردن واحدها برای امور اصلاحی و یا پرداخت جریمه همراه باشد. همچنین اگر

[1] Power quality
[2] Sustainability
[3] Fluctuation of voltage amplitude
[4] Light flicker
[5] Flicker
[6] Flicker sources
[7] Spot welding machines
[8] Arc furnace
[9] Rolling mill plants

چندین منبع فلیکر به صورت هم زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند، در صورت امکان، مطلوب است که سهم هرکدام از منابع در نوسان نهایی ولتاژ تفکیک شود. از آنجایی که در عمل نوسان دامنه ولتاژ به صورت ناایستان[1] اتفاق می افتد، علاوه بر تشخیص و تفکیک منابع فلیکر، مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسان ولتاژ جهت بهبود کیفیت توان و کنترل تجهیزات جبران‌ساز ضروری است. همچنین برای تفکیک اثر منابع فلیکر ناایستان، داشتن مدل سیگنال پوش ضروری می‌باشد.

۱-۲ اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه ابتدا مروری بر پدیده فلیکر و روش‌های ارزیابی ولتاژ با دامنه نوسانی انجام می‌گیرد. برای این منظور، روش‌های ارائه شده برای بررسی ولتاژ نوسانی به عنوان یک سیگنال (خصوصاً روش-های استخراج پوش[2]) مرور و مقایسه می‌شوند. همچنین گزارشی از کارهای انجام گرفته برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر ارائه می‌گردد.

با فرض متفاوت بودن فرکانس تن[3]های فلیکری، روشی برای تشخیص و تفکیک منابع فلیکر در یک شبکه قدرت با اندازه‌گیری ولتاژ لحظه‌ای[4] باس‌ها پیشنهاد می‌شود. پوش ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط حلقه قفل فاز بهبود یافته[5] استخراج می‌شود. این روش براساس طراحی یک فیلتر همبسته[6] استوار است. بدین ترتیب محل اتصال منابع فلیکر در یک سیستم قدرت غیرشعاعی تشخیص داده شده و اثر آنها تفکیک می‌گردد.

هرچند فرض متفاوت بودن فرکانس تُن‌ها در بسیاری از موارد قابل قبول است اما شرایطی که منابع فلیکر به صورت هم فرکانس نوسان کنند نیز بررسی می‌شود. بدین منظور دو روش تحلیلی و آماری

[1] Non-stationary
[2] Envelope
[3] Tone
[4] Instantaneous voltage
[5] Enhanced Phase-Locked Loop (EPLL)
[6] Correlation filter

در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است. در روش تحلیلی با در نظر گرفتن منابع فلیکر به عنوان متغیر مستقل و محاسبه ماتریس ژاکوبین سیستم قدرت، یک معیار برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر بر اساس عناصر این ماتریس ارائه شده است. همچنین اندازه گیری‌های متمرکز شده‌ی سیستم قدرت (ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها و جریان لحظه‌ای خطوط انتقال) با استفاده از تئوری گراف جهت‌دار[1] برای تشخیص منبع فلیکر غالب به کار رفته است. در روش آماری پس از تولید داده‌های آموزش برای سیستم قدرت مورد مطالعه، محل اتصال منابع فلیکر به دو روش معین می‌شود: روش خوشه‌بندی میانگین k و ضریب همبستگی[2]. این روش‌ها می‌توانند محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس را در سیستم قدرت غیرشعاعی تشخیص دهند و نحوه انتشار فلیکر در شبکه را توصیف نمایند.

با وجود این که در اغلب مطالعات مربوط به فلیکر نوسان دامنه ولتاژ به صورت معین[3] و سینوسی در نظر گرفته شده است، ولی اندازه‌گیری‌های عملی و تحقیقات میدانی این نوسانات را به صورت ناایستان نشان می‌دهند. برای این شرایط و فرض ناایستان بودن نوسان دامنه ولتاژ شبکه (ناایستان بودن سیگنال پوش)، شاخص نوسان ولتاژ معرفی شده و توسط آن محل اتصال منبع فلیکر تشخیص داده می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن سیگنال پوش گسسته شده به عنوان یک سری زمانی[4]، این سری توسط مدل‌های میانگین متحرک[5] (MA) و اتورگرسیو[6] (AR) مدل و پیش‌بینی می‌شود. علاوه بر این دو روش، مدل‌های مبتنی بر تئوری سیستم‌های خاکستری[7] نیز برای مدل سازی و پیش‌بینی ولتاژ نوسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب در این پایان‌نامه فلیکر ناایستان پس از مدل-سازی، پیش‌بینی شده و محل اتصال آن مشخص می‌شود.

[1] Directed graph
[2] Correlation coefficient
[3] Deterministic
[4] Time Series
[5] Moving Average
[6] Autoregressive
[7] Grey systems