



دانشکده مهندسی برق

گروه قدرت

تشخیص و تفکیک منابع فلیکر در سیستم قدرت

دانشجو : عبدالمجید دژم خوی

استاد راهنما

دکتر علی دستفان

استاد مشاور

دکتر علیرضا احمدی فرد

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

بهار ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره ۱۲

باسمه تعالی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

شماره: ۰۰۰۱۱۷۴
تاریخ: ۹۳/۳/۳۱
ویرایش:

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم عبدالرحمن محمدی دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق قدرت به شماره دانشجویی ۸۸۸۸۴۶۵ ورودی سال ۸۸ در تاریخ 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.

| | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ | <input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷ |
| <input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵ | <input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد |
| <input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد | |

| ردیف | هیئت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|------|------------------------------|---|------------|-------|
| | دکتر علی دستمالچی | استاد/ اساتید راهنما | استاد | |
| | دکتر عرفان احمدی فرد دکتر | مشاور/ مشاورین | استاد | |
| | دکتر حمید طوسی شینر | استاد مدعو داخلی / خارجی | دانشیار | |
| | دکتر مصطفی محمدیان | استاد مدعو داخلی / خارجی | " | |
| | دکتر مهدی بانزاد | استاد مدعو داخلی / خارجی | استاد | |
| | دکتر مرتضی رحیمی | سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده | استاد | |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران: عرفان احمدی 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 دل‌گرمی من بودند

و به مادام 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 بی‌نصیب نگذاشته‌اند، سپاسگزاری می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب **بیژان حبیبی** در تم خواجی..... دانشجوی دوره دکتری رشته **برق**..... **مدرس**..... دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله دکتری با عنوان :

تشخیص و تکثیر نام نلگر در سیستم قدرت

تحت راهنمایی آقای دکتر **دیفان**..... 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: ۹۳/۴/۴

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 مصرف‌کنندگان 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 نایستان 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 نایستان باشد، با در نظر گرفتن سیگنال پوش گسسته به عنوان سری زمانی، شاخصی برای شدت نوسان معرفی می‌شود. همچنین پوش نایستان توسط روش‌های سری زمانی و مدل‌های خاکستری اصلاح شده پیش‌بینی می‌گردد. شبیه‌سازی‌های 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 پایان نامه

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

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۱ | فصل اول: مقدمه |
| ۳ | ۱-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق |
| ۴ | ۲-۱ اهداف پایان نامه |
| ۷ | فصل دوم: ارزیابی ولتاژ نوسانی، استخراج پوش و تشخیص منابع فلیکر (مروری بر کارهای انجام شده) |
| ۹ | ۱-۲ مقدمه |
| ۱۰ | ۲-۲ توصیف پدیده فلیکر |
| ۱۲ | ۱-۲-۲ اندازه‌گیری پارامترهای فلیکر توسط استاندارد IEC |
| ۱۳ | ۲-۲-۲ پارامتر مقدار معادل ده هرتز |
| ۱۵ | ۳-۲-۲ منابع فلیکر |
| ۱۹ | ۴-۲-۲ روشهای کاهش فلیکر |
| ۲۴ | ۳-۲ ارزیابی ولتاژ با دامنه نوسانی و استخراج پوش |
| ۲۵ | ۱-۳-۲ دمدولاسیون مربعی برای استخراج پوش |
| ۲۶ | ۲-۳-۲ دمدولاسیون نیم موج برای استخراج پوش |
| ۲۷ | ۳-۳-۲ الگوریتم شیفت فاز برای استخراج پوش |
| ۲۹ | ۴-۳-۲ روشهای مبتنی بر تبدیلات انتگرالی برای ارزیابی ولتاژ نوسانی |
| ۳۱ | ۵-۳-۲ کاربرد فیلتر کالمن برای ارزیابی ولتاژ نوسانی و استخراج پوش |
| ۳۱ | ۶-۳-۲ روش تطبیقی برای ارزیابی ولتاژ نوسانی و استخراج پوش |
| ۳۲ | ۷-۳-۲ استخراج پوش ولتاژ نوسانی توسط حلقه قفل فاز بهبود یافته (EPLL) |
| ۳۷ | ۴-۲ تشخیص منابع فلیکر در سیستم قدرت |
| ۳۷ | ۱-۴-۲ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به کمک مفهوم توان فلیکر |

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

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

فهرست اشکال

| صفحه | عنوان |
|---------|---|
| ۱۱..... | شکل (۱-۲) نمونه ای از ولتاژ با دامنه نوسانی به فرم مستطیلی |
| ۱۶..... | شکل (۲-۲) نوسانات توان یک کوره قوس الکتریک با توان نامی MVA ۸۰ در لحظات آغازین فرآیند ذوب |
| ۱۷..... | شکل (۳-۲) جریان کشیده شده توسط یک کوره قوس الکتریک با توان نامی MVA ۸۰ در لحظات آغازین فرآیند ذوب |
| ۲۱..... | شکل (۴-۲) ساختارهای SVC |
| ۳۲..... | شکل (۵-۲) ساختار کلی حلقه قفل فاز |
| ۳۳..... | شکل (۶-۲) بلوک دیاگرام EPLL |
| ۳۴..... | شکل (۷-۲) ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری |
| ۳۴..... | شکل (۸-۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری |
| ۳۵..... | شکل (۹-۲) ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری |
| ۳۵..... | شکل (۱۰-۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری |
| ۳۶..... | شکل (۱۱-۲) ولتاژ نوسانی با پوش نایستان |
| ۳۶..... | شکل (۱۲-۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با پوش نایستان |
| ۳۹..... | شکل (۱۳-۲) منبع فلیکر در بالادست نقطه مشاهده، توان فلیکر مثبت |
| ۳۹..... | شکل (۱۴-۲) منبع فلیکر در پایین دست نقطه مشاهده، توان فلیکر منفی |
| ۶۳..... | شکل (۱-۴) مراحل روش پیشنهادی برای تشخیص و تفکیک منابع فلیکر با فرکانس متفاوت |
| ۶۶..... | شکل (۲-۴) ورودی‌ها و خروجی فیلتر همبسته برای یک باس معین از شبکه |
| ۶۷..... | شکل (۳-۴) فیلتر همبسته‌ی پیشنهاد شده برای محاسبه تن‌های فلیکری |
| ۷۰..... | شکل (۴-۴) سیستم قدرت شش باسه مورد مطالعه |

- شکل (۴-۵) مدل منبع فلیکر متصل به باس شماره *z* 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) فلوجارت 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 (۷-۵) ارتباط بین خطای مدل و فرکانس نمونه برداری ۱۳۱
- شکل (۸-۵) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم ۱۳۲
- شکل (۹-۵) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم ۱۳۲
- شکل (۱۰-۵) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم ۱۳۳
- شکل (۱۱-۵) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم ۱۳۳
- شکل (۱۲-۵) سه مرحله از روش اصلاح شده $GM(1,1)$ به ازای $n = 5$ و $p = 1$ ۱۳۵
- شکل (۱۳-۵) سه مرحله از روش خاکستری لغزان به ازای $n = 5$ و $p = 1$ ۱۳۷
- شکل (۱۴-۵) ولتاژ نوسانی مورد بررسی و پوش استخراج شده آن ۱۳۹
- شکل (۱۵-۵) مقدار پارامتر a در هر کدام از $GM(1,1)$ ها ۱۳۹
- شکل (۱۶-۵) مقدار پارامتر b در هر کدام از $GM(1,1)$ ها ۱۴۰
- شکل (۱۷-۵) پوش واقعی و مدل های خاکستری اصلاح شده آن به ازای $n = 5$ ۱۴۰
- شکل (۱۸-۵) خطای مطلق در روش $GM(1,1)$ اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۱
- شکل (۱۹-۵) خطای مطلق در روش FGM اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۱
- شکل (۲۰-۵) خطای مطلق در روش خاکستری لغزان اصلاح شده به ازای $n = 5$ ۱۴۲
- شکل (۲۱-۵) پوش واقعی و مدل $GM(1,1)$ اصلاح شده آن به ازای $n = 5$ و $p = 6$ ۱۴۴
- شکل (۲۲-۵) خطای مطلق در روش $GM(1,1)$ اصلاح شده به ازای $n = 5$ و $p = 6$ ۱۴۴
- شکل (۲۳-۵) تغییرات MSE بر حسب n و p ۱۴۵
- شکل (۲۴-۵) تغییرات AME بر حسب n و p ۱۴۵
- شکل (۲۵-۵) تغییرات $ARPE$ بر حسب n و p ۱۴۶
- شکل (۲۶-۵) تغییرات زمان محاسبات بر حسب n و p ۱۴۷

فهرست جداول

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۵۳ | جدول (۱-۳) رفتار ACF و PACF در مدل‌های سری زمانی |
| ۷۲ | جدول (۱-۴) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش تشخیص منابع با فرکانس متفاوت |
| ۷۵ | جدول (۲-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول |
| ۷۶ | جدول (۳-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم |
| ۷۶ | جدول (۴-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی سوم |
| ۷۷ | جدول (۵-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی چهارم |
| ۷۸ | جدول (۶-۴) دامنه‌ی تن‌های فلیکری در باس‌های سیستم قدرت، سناریوی پنجم |
| ۸۶ | جدول (۷-۴) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی اول |
| ۸۷ | جدول (۸-۴) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی اول |
| ۸۸ | جدول (۹-۴) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی دوم |
| ۸۹ | جدول (۱۰-۴) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی دوم |
| ۹۰ | جدول (۱۱-۴) محل‌های تشخیص داده شده‌ی منابع فلیکر، سناریوی سوم |
| ۹۱ | جدول (۱۲-۴) عملکرد روش‌های پیشنهادی، سناریوی سوم |
| ۱۰۶ | جدول (۱۳-۴) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش تک نقطه برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس |
| ۱۰۷ | جدول (۱۴-۴) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی اول |
| ۱۰۸ | جدول (۱۵-۴) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی دوم |
| ۱۰۸ | جدول (۱۶-۴) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی سوم |
| ۱۰۹ | جدول (۱۷-۴) توان فلیکر در شاخه‌های باس‌های سیستم قدرت، سناریوی چهارم |

- 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 نمی‌کنند 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 نقطه‌ای^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 شبکه‌های الکتریکی اولین قدم در جهت کاهش اثر فلیکر و انجام امور اصلاحی مرتبط با آن است. شرکت‌های برق نیازمند روش‌هایی هستند که بتوانند محل اتصال منابع فلیکر در شبکه‌های 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 هر کدام از منابع در نوسان نهایی ولتاژ تفکیک شود. از آنجایی که در عمل نوسان دامنه ولتاژ به صورت نایستان^۱ اتفاق می‌افتد، 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 نایستان، 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 روش‌های استخراج پوش)^۲ مرور و مقایسه می‌شوند. همچنین گزارشی از کارهای انجام گرفته برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر ارائه می‌گردد.

با فرض متفاوت بودن فرکانس تن^۳های فلیکری، روشی برای تشخیص و تفکیک منابع فلیکر در یک شبکه قدرت با اندازه‌گیری ولتاژ لحظه‌ای^۴ باس‌ها پیشنهاد می‌شود. پوش ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط حلقه قفل فاز بهبود یافته^۵ استخراج می‌شود. این روش براساس طراحی یک فیلتر همبسته^۶ 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 تن‌ها 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 اندازه‌گیری‌های متمرکز شده‌ی سیستم قدرت (ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها و جریان لحظه‌ای خطوط انتقال) با استفاده از تئوری گراف جهت‌دار^۱ 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^۲. این روش‌ها می‌توانند محل اتصال منابع فلیکر هم‌فرکانس 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^۳ و سینوسی در نظر گرفته شده است، ولی اندازه‌گیری‌های عملی و تحقیقات میدانی این نوسانات را به صورت ناپایستان نشان می‌دهند. برای این شرایط و فرض ناپایستان بودن نوسان دامنه ولتاژ شبکه (ناپایستان 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^۴، این سری توسط مدل‌های میانگین متحرک^۵ (MA) و اتورگرسیو^۶ (AR) مدل و پیش‌بینی می‌شود. علاوه بر این دو روش، مدل‌های مبتنی بر تئوری سیستم‌های خاکستری^۷ نیز برای مدل‌سازی و پیش‌بینی ولتاژ نوسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب در این پایان‌نامه فلیکر ناپایستان پس از مدل‌سازی، 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

فصل‌های بعدی پایان‌نامه به صورت زیر سازمان یافته است: در فصل دوم پدیده، روش‌های ارزیابی ولتاژ نوسانی، روش‌های استخراج پوش و کارهای انجام گرفته برای تشخیص منابع فلیکر مرور می‌شود. در فصل سوم روش‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی معرفی می‌گردد. روش‌های پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی‌های مربوطه برای تشخیص منابع فلیکر ایستان (با فرکانس متفاوت یا هم فرکانس) و تفکیک سهم و اثر آنها در فصل چهارم می‌آید. در فصل پنجم نوسان نایستان دامنه ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد و شاخصی برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر و روش‌هایی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش دامنه ارائه و شبیه‌سازی می‌شود. سرانجام، در فصل ششم نتایج حاصل شده از این پایان‌نامه و هم‌چنین پیشنهاداتی برای ادامه یا بهبود آن بیان می‌گردد.

فصل دوم: ارزیابی ولتاژ نوسانی، استخراج پوش و تشخیص

منابع فلیکر (مروری بر کارهای انجام شده)

۲-۱ مقدمه

فلیکر زمانی رخ می‌دهد و موضوعیت پیدا می‌کند که چشم انسان با تغییرات در شدت روشنایی مواجه شود. یکی از پیچیدگی‌های پدیده فلیکر این است که در ارزیابی آن باید به مولفه‌های شخصیتی و فیزیولوژیکی انسان توجه شود. از منظر الکتریکی، فلیکر زمانی رخ می‌دهد که نوسانات در دامنه‌ی ولتاژ رخ دهد به طوری که دامنه این نوسانات کمتر از حد مجاز برای اختلال در عملکرد تجهیزات الکتریکی است. یعنی کاهش دامنه کمتر از آن است که تجهیزات الکتریکی با آن واکنش نشان دهند و یا برای آن‌ها مضر باشد. می‌توان گفت اثر عمده نوسانات سریع ولتاژ، فلیکر است. بارهای نوسانی نظیر کوره‌های قوس الکتریک و ماشین‌های جوش نقطه‌ای که تقاضای توان آنها سریع و در بازه گسترده‌ای تغییر می‌کند منابع اصلی فلیکر هستند. جهت کاهش تغییرات ولتاژ روش‌های متعددی ارائه شده است تا توسط این روش‌ها سطح فلیکر کاهش یابد.

ولتاژ با دامنه نوسانی به عنوان یک سیگنال در حوزه‌های زمانی و فرکانسی می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. این ارزیابی‌ها اطلاعات مفیدی درباره شدت نوسان دامنه و در نتیجه تشخیص محل اتصال منابع بیان می‌کنند. از جمله این بررسی‌ها که بر روی ولتاژ با دامنه نوسانی انجام می‌گیرد استخراج پوش دامنه است.

تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در یک سیستم قدرت اعم از شعاعی و غیر شعاعی از مهم‌ترین محورهای تحقیقات در زمینه نوسان ولتاژ و فلیکر است. در واقع هدف تمام تلاش‌ها در نهایت تشخیص منابع فلیکر و رفع این مشکل است.

۲-۲ توصیف پدیده فلیکر

اگرچه تغییرات ولتاژ^۱، نوسانات ولتاژ^۲ و فلیکر تعبیری مشابه هستند ولی این سه با هم متفاوت می-باشند. قبل از مطالعه عمیق تر باید تفاوت ها محدودیت های این سه مفهوم گفته شود [۱].

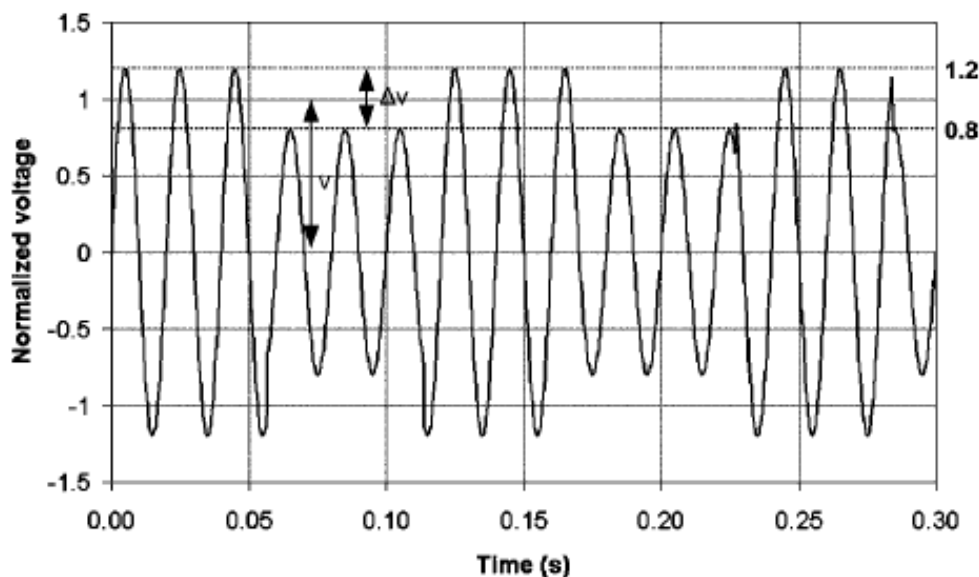
تغییرات ولتاژ : اگر متوسط مقدار موثر ولتاژ در دوره زمانی را داشته باشیم تغییرات ولتاژ، انحراف اندازه مقدار موثر از مقدار مورد نظر همیشگی آن است. این تغییر ولتاژ می تواند متناوب یا نامتناوب باشد. آنجا که تغییرات ولتاژ می تواند به راحتی اندازه گیری شود، به صورت متداول منحنی هایی برای تغییرات ولتاژ متناوب مستطیلی و میزان فلیکر ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته اند.

نوسانات ولتاژ : نوسانات ولتاژ، تغییرات ولتاژ متناوبی است که حداکثر نوسانات دامنه ولتاژ از ۱۰٪ دامنه بیشتر نباشد. پس نوسانات ولتاژ دو تفاوت عمده با تغییرات ولتاژ دارد اولاً حتماً متناوب است و ثانیاً دامنه نوساناتش از ۱۰٪ بیشتر نیست. این میزان کمتر از آن است که تجهیزات نسبت به آن حساس باشند بنابراین مشکلی در بهره برداری رخ نمی دهد. مهمترین مشکل در این زمینه تغییرات شدت روشنایی است. در شکل (۲-۱) نمونه ای از تغییر ولتاژ مستطیلی با درصد تغییر ولتاژ ۴۰٪ و فرکانس تغییرات ۸/۸ هرتز آمده است.

فلیکر : به احساس نامطلوبی که سیستم بینایی انسان در اثر تغییرات شدت روشنایی احساس می کند فلیکر گفته می شود. این تغییرات شدت روشنایی در اثر نوسانات ولتاژ و تغییرات ولتاژ رخ می دهد. بنابراین رابطه ای باید بین این دو اغتشاش یعنی فلیکر و نوسانات ولتاژ وجود داشته باشد. در کنار این نزدیکی تفاوت مهمی بین این دو مقوله وجود دارد و آن این است که در مقوله فلیکر جنبه های فیزیکی وجود دارد که باید در بررسی و تعریف آن مورد توجه قرار گیرد در حالی که نوسانات ولتاژ فقط جنبه الکتریکی دارد. به عبارت دیگر می توان گفت فلیکر پدیده ای است که جهت ترکیب دو-

¹ Voltage changes

² Voltage fluctuation



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

فاکتور و مولفه به کار می روند؛ اولاً نوسانات ولتاژی که باعث تغییر شدت روشنایی می شود و ثانیاً انسانی که در معرض این تغییرات روشنایی قرار دارد. از آنجایی که فلیکر تحت تاثیر احساس انسان و عکس العمل آن است بنابراین اطلاع از جنبه های فیزیولوژیکی برای اندازه گیری و بررسی فلیکر ضروری است.

میزان اذیت ناشی از فلیکر به مسایل گوناگونی بستگی دارد از جمله: دامنه نوسانات ولتاژ، فرکانس نوسانات ولتاژ، مدت زمان اغتشاش و حتی نوع وسیله روشنایی (لامپ) و رنگ آن. در حالت کلی حساسیت به فلیکر یک مقوله شخصی است که برای اکثریت افراد می توان یک حالت کلی در نظر گرفت. برای ارزیابی فلیکر دو روش مشهور وجود دارد. اولین روش که توسط IEC ارائه شده [۲] و دیگری روش مقدار معادل ده هرتز (روش آسیایی) [۳-۶]. در ادامه به مرور مختصر این روش ها و پارامترهای پیشنهادی آنها می پردازیم.

۲-۲-۱ اندازه‌گیری پارامترهای فلیکر توسط استاندارد IEC

استاندارد IEC 61000-4-15 توابع و ویژگی‌های طراحی برای اندازه‌گیری فلیکر به منظور دسترسی به سطح صحیح فلیکر احساس شده را بیان می‌کند [۲]. این کار برای یک ولتاژ نوسانی خاص بیان شده است. قبل از استاندارد سازی فلیکر متر، تجهیزات مختلفی در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گرفت. اگرچه این تجهیزات بر مبنای مقایسه بین نوسانات ولتاژ و اثر فلیکر بنا نهاده شده بودند، ولی نتایج خوبی نداشتند. نیاز به رسیدن به یک فلیکر متر مورد قبول بین الملل،^۱ UIE را وادار به ارائه فلیکر متر استاندارد کرد. لازم به ذکر است که فلیکر مترهای ابتدایی IEC برای ارزیابی نوسانات ولتاژی نبودند بلکه هدف احساس فلیکری بود که از نوسانات ناشی می‌شد. برای این منظور یعنی بررسی احساس فلیکر ناشی از نوسانات ولتاژ، باید تجهیزات، ورودی را یعنی نوسانات ولتاژ را به کمیتی که نشان دهنده و متناسب با شدت سطح فلیکر است، تبدیل می‌کردند. این ایده در نهایت منجر به پیشنهاد فلیکر متر استاندارد IEC شده است [۲]. توسط این فلیکر متر دو پارامتر P_{st} (شدت فلیکر کوتاه مدت^۲) و P_{lt} (شدت فلیکر بلند مدت^۳) محاسبه می‌شوند و شدت^۴ و سطح فلیکر^۵ به کمک این دو معین می‌شود.

P_{st} اندازه‌گیری کوتاه مدت شدت فلیکر برای مدت زمان ۱۰ دقیقه است. انتخاب زمان ۱۰ دقیقه برای مشاهده فلیکر، مصالحه خوبی است چرا که این مدت زمان کافی است برای جدا کردن فلیکر از تغییرات ولتاژ و اجازه می‌دهد که ماندگاری اغتشاش کاملاً مشاهده شود. از طرف دیگر این زمان برای تجهیزاتی که زمان عملکرد کوتاه دارند، به اندازه کافی است تا مشخصه‌های فلیکر به دست بیاید. P_{st} یک کمیت بدون بعد است. یک واحد P_{st} نشان دهنده آستانه ادیت است. به عبارت دیگر فلیکر نباید تا به این سطح رسیده باشد که بخواهد باعث آزار باشد [۱].

¹ Union for Electricity Application

² Flicker short-term severity

³ Flicker long-term severity

⁴ Flicker severity

⁵ Flicker level

پارامتر P_{It} شدت فلیکر بلند مدت است و برای مدت دو ساعت حساب می شود. P_{It} از روی دوازده P_{st} متوالی استخراج می شود با توجه به رابطه زیر:

$$P_{It} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3}{12}} \quad (1-2)$$

زمانی که چندین بار فلیکرها همزمان در شبکه باشند و یا منابع فلیکر دارای زمان متغیر یا طولانی باشند پارامتر P_{It} ملاک برای ارزیابی فلیکر خواهد بود. مقدار آستانه برای P_{It} برابر ۰/۸ است.

محدودیت های اعمال شده بر شدت فلیکر در نسبت با دو مرحله زمانی P_{st} و P_{It} برای اطمینان از بی-آزار بودن فلیکر کاملاً ضروری هستند. قابل ذکر است که اگر P_{st} کم باشد در این صورت P_{It} نیز کم خواهد بود گرچه عکس این درست نیست. انتقادات و تصحیحاتی برای روش رایج محاسبه P_{st} در [۳] ارائه شده است.

در بررسی شدت فلیکر علاوه بر دو پارامتر فوق، پارامتر دیگری که نشان دهنده تغییرات ولتاژ نسبی است، مورد توجه قرار می گیرد. همان طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است تغییرات ولتاژ نسبی به صورت درصد بیان می شود و با d نشان داده می شود. d برابر است با $\frac{\Delta V}{V}$ که در آن V پیک ولتاژ در حالت عادی است و ΔV تغییرات پیک در حالت رخ دادن نوسان می باشد. زمانی که هدف، بررسی محل اتصال منابع فلیکر در شبکه باشد و مباحث مربوط به روشنایی و دید انسان مورد توجه نباشد، همین شاخص (میزان انحراف دامنه از مقدار مورد انتظار که همان دامنه پوش است) کافی می باشد.

۲-۲-۲ پارامتر مقدار معادل ده هرتز

برای ارزیابی شدت فلیکر علاوه بر P_{st} ، پارامتر دیگری با عنوان مقدار معادل ده هرتز (ΔV_{10}) پیشنهاد شده است [۴]. این پارامتر هم به نوعی بیانگر شدت فلیکر ولتاژ است. این پارامتر را موسسه مرکزی

تحقیقات برق صنعتی ژاپن برای ارزیابی فلیکر پیشنهاد کرده است [۵]. لازم به ذکر است که این استاندارد در تایوان نیز مورد قبول و استفاده قرار گرفته است [۴].

زمانی که کوره قوس الکتریک بعد از نصب مورد بهره برداری قرار می‌گیرد، شرکت برق و کارخانه فولاد باید اثر آن را بر روی سیستم قدرت مورد بررسی مداوم قرار دهند. قبل از نصب این کوره‌ها، باید ظرفیت فلیکرزایی آن‌ها محاسبه و تخمین زده شود. طی این تخمین‌ها پارامترهایی از بار و شبکه در نظر گرفته نمی‌شود بنابراین این تخمین‌ها کاملاً صحیح نمی‌باشند. برای رفع این مشکل شرکت های فولاد علاوه بر پارامتر ΔV_{10} ، اقدام به محاسبه ضریب $\Delta V / \Delta V_{10}$ می‌کنند [۴].

جریان کشیده شده توسط کوره های قوس الکتریک معمولاً دارای تناوب مشخصی نبوده و باعث ایجاد نوسانات در ولتاژ ترمینال کوره می‌شود. این نوسانات نیز باعث ایجاد فلیکر و تغییر شدت روشنایی می‌شوند. با وجود این، مدولاسیون دامنه تقریب مناسب و قابل قبولی برای این نوسانات هستند به صورتی که چندین سیگنال سینوسی به عنوان تن فلیکری در دامنه ولتاژ مدوله می‌شود. اگر ΔV_n دامنه تن فلیکری در فرکانس n ام باشد، ΔV_{10} به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$\Delta V_{10} = \sqrt{\sum_n (\alpha_n \times \Delta V_n)^2} \quad (2-2)$$

در رابطه بالا α_n ضریب حساسیت بینایی برای فرکانس n ام است.

ضریب حساسیت بینایی تابعی از فرکانس فلیکر است که ادراک پذیری فلیکر توسط سیستم چشم- مغز انسان را توصیف می‌کند. سیستم بینایی انسان بیش از هر فرکانسی به فرکانس ده هرتز حساسیت دارد. ضریب حساسیت برای این فرکانس یک در نظر گرفته می‌شود. برای فرکانس های بین ۰/۱ تا ۳۵ هرتز این مقدار بسیار کمتر بوده و قابل صرف نظر نیست.

زمانی که فلیکر به علت کوره قوس الکتریک رخ می‌دهد، رابطه بین ΔV_n و f_n توسط رابطه تقریبی زیر قابل محاسبه است [۴]:

$$\Delta V_n = A \times f_n^{-x} \quad (3-2)$$

در این رابطه A مقدار ثابتی بوده و x بین ۰/۵ تا ۱ تغییر می‌کند. اگر از جبران سازهایی نظیر SVC استفاده شود این دو مقدار بسیار کوچک خواهند بود.

اندازه ΔV ناشی از فرکانس‌های بالاتر قابل چشم‌پوشی است. بنابراین ΔV توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta V = \sqrt{\sum_n (\Delta V_n)^2} \quad (4-2)$$

در کاربردهای عملی ΔV و ΔV_{10} برای منظورهای مختلف به کار می‌رود و ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. اما این دو در واقع با ضریبی (K) به هم مرتبط هستند. با توجه به رابطه (۳-۲) و (۲-۲) ، ارتباط ΔV و ΔV_{10} باید به α_n مربوط باشد. از آنجایی که طیف فرکانسی کوره‌های قوس الکتریک یکسان نیستند، ضریب K نیز برای کوره‌های قوس مختلف، متفاوت است.

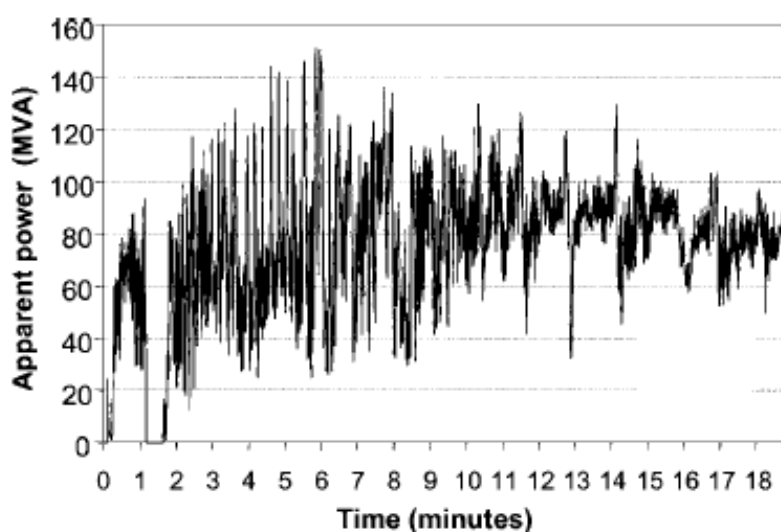
۳-۲-۲ منابع فلیکر

در حالت کلی می‌توان گفت که منشاء فلیکر بارهایی از شبکه الکتریکی است که نوسانات ولتاژ سریع ایجاد می‌کنند. معمولاً این نوسانات در ولتاژ، نوساناتی را در توان جذب شده به ویژه در توان راکتیو ایجاد می‌کنند. نوسانات توان ممکن است در اثر کلید زنی بارهای بزرگ خازنی و یا بارهایی مانند کوره‌ها، که ذاتاً خاصیت نوسانی دارند، ایجاد شده باشند. بنابراین می‌توان گفت که علت اصلی تغییرات ولتاژ بارهای صنعتی بزرگ هستند. این بارها به شبکه‌های ولتاژ بالا یا ولتاژ پایین متصل می‌شوند. در این حالت این بارها می‌توانند تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان دیگر را که به همان شبکه متصل هستند، دچار فلیکر کنند. در ادامه به بررسی چند بار که منابع عمده فلیکر هستند می‌پردازیم.

کوره‌های قوس الکتریک: کوره‌های قوسی الکتریک از بزرگترین بارهای صنعتی هستند که توان آنها از کسری از MVA تا ۱۰۰ MVA تغییر می‌کنند. کوره‌های قوس الکتریک از مهم‌ترین تولید فلیکر در

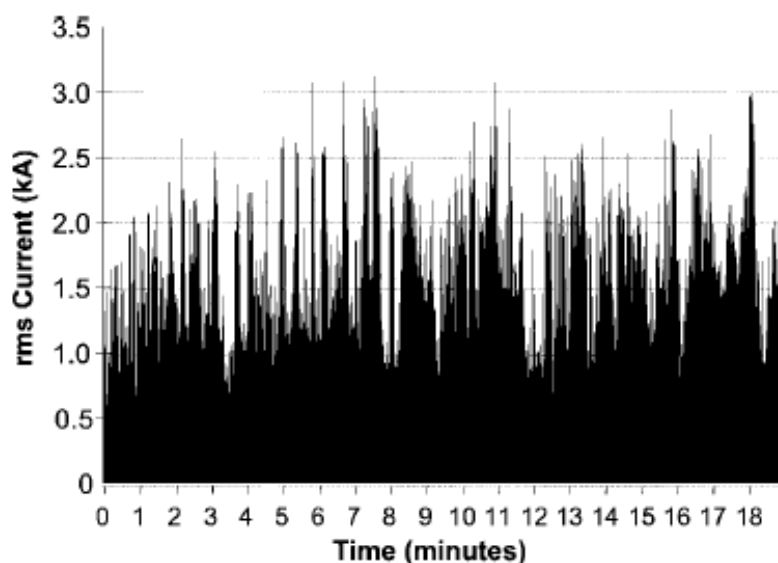
شبکه‌های ولتاژ بالا هستند. کوره‌های قوس الکتریک در صنایع فولاد برای تبدیل ضایعات بازیافتی به فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از متداول‌ترین کوره‌های قوس الکتریک مدل AC آن است. در این نوع کوره‌ها سه قوس الکتریک بین الکترودها و ضایعات به وجود می‌آید. گرمای ایجاد شده در این فرآیند که به علت قانون ژول ایجاد می‌شود باعث ذوب شدن فلز می‌شود. آغاز فرآیند گرما دادن با وارد کردن الکترودها در ضایعات شروع می‌شود. قوس ایجاد شده در این دو مرحله اولیه ناپایدار است. طول زمانی قوس بسیار متغیر است و جریان می‌تواند از جریان اتصال کوتاه تا صفر (مدار باز) نوسان کند. این تغییرات موثر و ناگهانی توان، باعث نوسانات بزرگ ولتاژ در نقطه اتصال مشترک^۱ می‌شود که این نوسانات می‌تواند منجر به فلیکر شود. در شکل (۲-۲) نوسانات توان مورد تقاضای یک کوره قوس الکتریک را در حین کار نشان می‌دهد. شکل (۲-۳) نیز جریان کوره قوس را در زمان ذوب کردن فلز نشان می‌دهد.

پیشرفت‌های چشم‌گیر در الکترونیک قدرت باعث گسترش کوره‌های قوس الکتریک DC نیز شده است. در این کوره‌ها از یکسوکننده‌های AC/DC استفاده شده است. یک الکتروود در سمت DC به عنوان کاتد عمل می‌کند. یکی از مزیت‌های کوره‌های قوس DC این است که مصرف در این روش به



شکل (۲-۲) نوسانات توان یک کوره قوس الکتریک با توان نامی ۸۰ MVA در لحظات آغازین فرآیند ذوب [۱]

^۱ Point of Common Coupling



شکل (۲-۳) جریان کشیده شده توسط یک کوره قوس الکتریک با توان نامی ۸۰ MVA در لحظات آغازین فرآیند ذوب [۱]

ازای هر تن فولاد کاهش پیدا می کند چرا که فقط یک الکتروود به کار می رود. در حالت کلی پذیرفته شده است که فلیکر تولید شده توسط کوره‌های قوس DC از کوره‌های مشابه، AC به مراتب کمتر است [۱].

کوره‌های قوس الکتریک توسط مقاومت‌های متغیر با زمان مدل شوند که بهره‌برداری از آنها باعث تولید میان‌هارمونیک^۱ (هارمونیک‌های با مضرب غیرصحیح از هارمونیک اصلی) در ولتاژ شبکه می‌شوند [۸]-[۱۰]. به عبارت دیگر بهره‌برداری از این واحدها باعث می‌شود که در دامنه ولتاژ شبکه سیگنال‌های سینوسی مدوله شوند.

ماشین‌های جوش نقطه‌ای: ماشین‌های جوش نقطه‌ای بر اساس قانون ژول کار می‌کنند که در آن از حرارتی که به علت جاری شدن جریان به وجود می‌آید استفاده می‌کنند تا دو فلز را ذوب کنند و به هم بچسبانند. این کار به جریان بسیار زیادی نیاز دارد. به همین علت است که در ماشین‌های جوش از ترانسفورماتور کاهنده استفاده می‌کنند تا ولتاژ را تا حد ممکن پایین بیاورد تا جریان بالا برود. این

^۱ Interharmonics

ماشین‌ها می‌توانند مستقیماً به شبکه ولتاژ بالا وصل شوند و یا با ترانسفورماتور از شبکه ولتاژ پایین تغذیه شوند. طی عمل جوشکاری، در مدت زمان کوتاه جوش، جریان زیادی کشیده می‌شود. در لحظه‌هایی که جریان وجود دارد و یا قطع است ولتاژ در دو سطح مختلف قرار می‌گیرد. این تغییرات ولتاژ باعث ایجاد نوسان دامنه ولتاژ و در نتیجه فلیکر در شبکه می‌شود [۱].

بویلرهای الکتریکی: بویلرهای الکتریکی در صنایع برای تولید بخار به کار می‌روند. بویلرها با گرم کردن محفظه هادی شامل آب باعث تبدیل آن به بخار می‌شوند. در روش‌های دیگر خود آب به عنوان هادی به کار می‌رود و بنابر قانون ژول گرما ایجاد می‌شود. در هر دو روش به توان الکتریکی زیادی نیاز هست. عملکرد بویلر باعث نوسان دامنه ولتاژ می‌شود [۱].

تجهیزات الکتریکی که از شبکه ولتاژ پایین تغذیه می‌شوند: وسایلی نظیر محرکه آسانسور، پمپ‌ها، پنکه‌ها، بویلرها، یخچال‌ها، کولرها و گرم‌کن‌های برقی که توان قابل ملاحظه‌ای دارند بنابراین اتصال آن‌ها به شبکه توانایی ایجاد فلیکر را دارد. بسیاری از این اغتشاش‌ها از نوع راه‌اندازی موتور هستند. افت ولتاژ را می‌توان توسط تفاوت جریان کشیده شده توسط بار در حالت استارت و جریان عادی حساب کرد. از دیگر منابع فلیکر در شبکه ولتاژ پایین می‌توان به تجهیزات اشعه X و دستگاه‌های بزرگ کپی اشاره کرد.

نیروگاه‌های توربین بادی: در سال‌های اخیر سیستم‌های قدرت با افزایش چشم‌گیری در بکارگیری انرژی بادی برای تولید برق مواجه بوده‌اند. در حال حاضر طرح‌های نیروگاه‌های بادی با ظرفیت تا چند صد MVA نیز وجود دارد. این میزان بالای استفاده از انرژی بادی باعث افزایش نگرانی‌ها درباره اثر این تجهیزات بر روی کیفیت ولتاژ در سیستم قدرت شده است. توربین‌های بادی در مدت عملکردشان نوساناتی را در توان ایجاد می‌کنند که منجر به نوسانات ولتاژ در نقطه اتصال مشترک می‌شود. با توجه به این نکته، توربین‌های سرعت متغیر مزیت‌های بیشتری را در زمینه آلودگی

فلیکری دارند. علاوه بر نگرانی‌ها در عملکرد حالت دائم توربین‌ها، ورود و یا خروج واحدهای بادی به شبکه نیز نگرانی‌هایی را درباره تغییرات ولتاژ ایجاد می‌کند.

استاندارد IEC61400-21 پروسه‌ای را ایجاد کرده و معرفی کرده که توسط آن می‌توان سطح فلیکر ناشی از نیروگاه‌های بادی که به شبکه متصل هستند را ارزیابی کرد [۱۱]. در این استاندارد دو ضریب برای فلیکر ناشی از نیروگاه بادی وجود دارد. یکی برای بهره‌برداری نیروگاه بادی، یعنی فلیکری که ناشی از بهره‌برداری پیوسته نیروگاه است و دیگری برای فلیکری که ناشی از وصل یا قطع شدن نیروگاه بادی به شبکه است. این ضرایب نیازی به اندازه‌گیری در سایت نیروگاه ندارند هر چند اندازه‌گیری‌های انجام شده در سایت می‌تواند برای پیش‌بینی به کار برود.

۲-۲-۴ روش‌های کاهش فلیکر

از آنجا که فلیکر در اثر نوسانات ولتاژ رخ می‌دهد بنابراین برای کاهش اثر فلیکر باید نوسانات ولتاژ را کاهش داد. دو روش اساسی برای این منظور وجود دارد [۱]:

۱. کاهش تغییرات توان (به ویژه توان راکتیو) در بارها

۲. افزایش سطح توان اتصال کوتاه شبکه

ادوات جبران‌کننده فلیکر اغلب مبتنی بر روش اول هستند. روش دوم در مرحله طراحی شبکه باید لحاظ شود. در برخی موارد برای حل مشکلات فلیکر، باید از ترکیبی از این دو روش استفاده کرد. در ادامه، روش‌های کاهش اثر فلیکر به صورت مختصر مرور می‌شود.

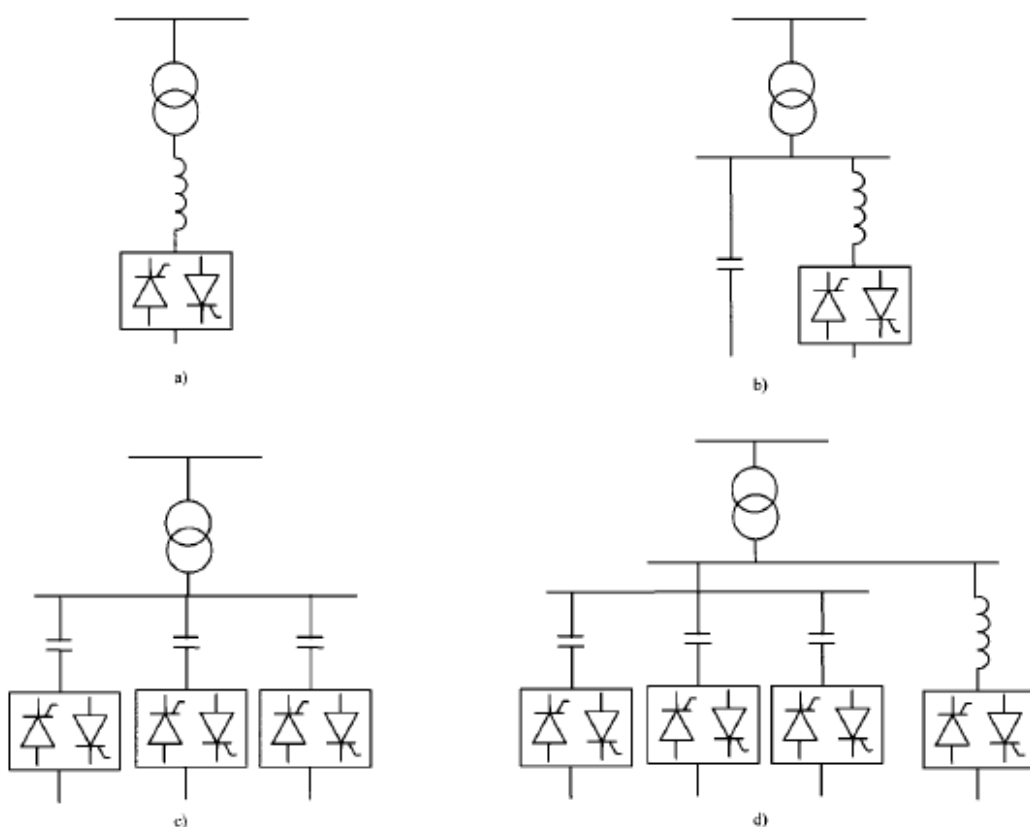
جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو^۱ (SVC): این جبران‌سازها از پایان دهه ۷۰ میلادی برای جبران فلیکر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امروزه این روش مهم‌ترین روش کاهش فلیکر ناشی از کوره‌های قوس الکتریک است و در کوره‌ها نصب می‌شود. این جبران‌ساز از ادوات موازی FACTS است که با

^۱ Static Var Compensators

استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، شارش توان راکتیو را کنترل می‌کند. عبارت استاتیک نشان دهنده این است که از ادوات دوار نظیر ژنراتور یا موتور سنکرون استفاده نمی‌شود. SVC با کنترل جذب و تزریق توان راکتیو در پایانه‌های خود می‌تواند توان راکتیو و ولتاژ را کنترل کند. به عبارت دیگر تقاضای توان راکتیو بار توسط SVC تامین می‌شود. در نتیجه افت ولتاژ کاهش یافته و ولتاژ در پایانه‌های بار بالا می‌رود. به روشی مشابه زمانی که ولتاژ بار بالا رفته باشد، SVC جذب توان راکتیو می‌کند. برای این منظور SVC از دو شاخه موازی که سمت ثانویه ترانسفورماتور بار متصل هستند، تشکیل می‌شود که در شکل (۲-۴-الف) نشان داده شده است. یکی از شاخه‌ها شامل راکتور کنترل شده با تریستور^۱ (TCR) بوده و در شاخه دیگر بانک خازنی یا یک فیلتر خازنی قرار دارد. این ساختار در شکل (۲-۴-ب) دیده می‌شود. با کنترل کردن زاویه آتش تریستور جریان راکتور و به طبع شارش توان راکتیو کنترل می‌شود. روش دیگر استفاده از خازن‌های سوئیچ شده با تریستور^۲ (TSC) می‌باشد. این ساختار در شکل (۲-۴-ج) آمده است. در این حالت اتصال هر خازن توسط تریستور برقرار یا قطع می‌شود. در این حالت تغییرات توان راکتیو به صورت ناپیوسته تغییر می‌کند در حالی که توسط TCR این تغییرات پیوسته بود. همان طور که در شکل (۲-۴-د) دیده می‌شود، در برخی موارد می‌توان از ترکیب TCR و TSC استفاده کرد. اساس کنترل SVC به این ترتیب است که با اندازه‌گیری مولفه راکتیو جریان بار، زاویه آتش تریستور به گونه‌ای تغییر می‌کند که با جذب یا تزریق توان راکتیو مناسب سطح ولتاژ بار در موقعیت مناسب بماند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های SVC سرعت پاسخدهی آن در برابر نوسانات سریع ولتاژ است. به عبارت دیگر SVC قادر نیست در برابر نوسانات سریع، زاویه آتش را تغییر داده و عکس‌العمل مناسب را بدهد. علاوه بر این هارمونیک‌های تولید شده توسط SVC نیز مسئله‌ای است که باید به آن توجه شود. برای این منظور فیلترهایی را برای حذف فلیکرهای ناشی از SVC نصب می‌کنند. معمولاً برای بارهای بالاتر از ۵۰ MVA نصب SVC به صرفه است [۱۲].

^۱ Thyristor-controlled reactor

^۲ Thyristor-switched capacitor



شکل (۲-۴) ساختارهای SVC؛ الف) راکتور کنترل شده با تریستور، ب) راکتور کنترل شده با تریستور با خازن ثابت، ج) خازن سوئیچ شده با تریستور، د) ترکیب TCR و TSC [۱]

مبدل‌های منبع ولتاژ^۱ (VSC): مبدل‌های منبع ولتاژ یک ابزار الکترونیک قدرتی است که در واقع اینورتری است که می‌تواند ولتاژ AC با دامنه و فرکانس و فاز دلخواه تولید کند. با تنظیم ولتاژ خروجی اینورتر می‌توان توان راکتیو مبادله شده با شبکه را تنظیم کرد. با جذب یا تزریق توان راکتیو به میزان لازم، در نهایت نوسانات ولتاژ کاهش می‌یابد. برتری مبدل‌های اینورتری به SVC ها سرعت بالای آن است که در اینورترها کموتاسیون با فرکانس سیستم انجام نمی‌گیرد بلکه کموتاسیون اجباری می‌تواند سرعت عملکرد و پاسخ دهی اینورترها را بالا ببرد [۱۳]. مزیت دیگر اینورترها این است که این ادوات علاوه بر کنترل شارش توان راکتیو می‌توانند جهت حذف هارمونیک‌ها به عنوان فیلترها مورد استفاده قرار گیرند. عیب این ادوات به نسبت SVC ها این است که مبدل‌های منبع

^۱ Voltage Source Converter

ولتاژ پیچیده‌تر هستند و باید از نیمه هادی‌هایی استفاده می‌شود که توانایی عبور جریان های بالا را داشته باشند. این مسئله در مجموع هزینه‌ها را بالا می‌برد.

نصب سلف سری در کوره های قوس الکتریک: برای حل مشکل فلیکر در کوره های قوس الکتریک متداول‌ترین روش نصب یک سلف سری با کوره قوس الکتریک است. این کار فلیکر را کاهش می‌دهد زیرا امپدانس کل کوره را افزایش داده و در نتیجه تغییرات نسبی امپدانس کاهش می‌یابد [۱۴]. از دیگر فواید این روش این است که زاویه فاز بین جریان و ولتاژ را افزایش می‌دهد و جرقه و قوس بهتر ایجاد شده و تاثیر بیشتری دارند. همچنین این روش عیب‌هایی نیز دارد که از آن جمله کاهش ظرفیت منبع تغذیه و کاهش تولید کوره قوس است.

نصب سلف اشباع شونده در کوره های قوس الکتریک: اولین روش های حل مشکل فلیکر در صنایع نصب سلف‌های اشباع شونده بوده است که از دهه ۱۹۵۰ به کار می‌رود. ویژگی این سلف این است که یک سیم پیچ کنترل دارد که با عبور جریان DC از آن هسته به اشباع می‌رود. وقتی که هسته به اشباع می‌رود اندوکتانس و به طبع آن راکتانس کاهش می‌یابد. اگر تغییرات زیاد جریان از سلف تحریک شده عبور کند تغییرات ولتاژ کم خواهد بود. سلف‌های اشباع شونده تا ۱۵۰ MVA ساخته شده اند. امروزه این سلف‌ها با جبران سازه‌های الکترونیک قدرتی جایگزین شده‌اند که ادوات جدید ارزاتر و انعطاف پذیرترند [۱].

روش های مبتنی بر افزایش توان اتصال کوتاه: اغلب روش های مبتنی بر افزایش توان اتصال کوتاه، بسیار گران قیمت و غیرعملی هستند. در برخی موارد این نیاز به تجدید ساختار کلی شبکه موجود دارد. روش‌هایی به منظور افزایش توان اتصال کوتاه شبکه برای حل مشکل فلیکر توصیه شده است، شامل موارد زیر است:

- اضافه کردن خطوط که ساختار شبکه توزیع را تقویت کند.

- اتصال به یک شبکه در سطح ولتاژ بالا.
- اتصال موازی ترانسفورماتورهای اصلی، این کار توان اتصال کوتاه را در طرف ثانویه افزایش می‌دهد ولی عیب این روش این است که اغتشاشات به تمامی باس‌های متصل شده منتقل می‌شود [۱].

در نهایت در [۱] روش‌های متفرقه زیر را برای کاهش فلیکر توصیه شده است:

- جداسازی و ایزوله کردن توسط ترانسفورماتورهای جدا کننده. توسط این روش ترمینال تغذیه کننده بارهای نوسانی را از شبکه جدا می‌کنند. به ویژه اگر این شبکه بارهای روشنایی را نیز تغذیه کند.
- در مواردی که بارهای ایجاد کننده نوسانات، تک فاز هستند می‌توان بارهای روشنایی را از فاز دیگر انتخاب کرد. این کار برای بارهای متصل به شبکه‌های ولتاژ پایین (مانند ماشین کپی) و بارهای متصل به ولتاژ بالا (مانند دستگاه جوش) می‌توان بکار برود.
- برخی موارد تغییر در وضعیت بهره‌برداری تجهیزات می‌تواند نوسانات ولتاژ را کاهش دهد. برای مثال با تغییر تپ‌های ترانسفورماتور تغذیه کننده کوره‌های قوس الکتریک در حین ذوب، می‌توان از شدت فلیکر کاست چرا که تغییرات ولتاژ و در نتیجه P_{st} کاهش می‌یابد.
- راه کار دیگر این است که بارهای نوسان ساز را از منابع تغذیه مجزا تغذیه کرد که از کل شبکه جدا باشند مثلاً با یک دیزل ژنراتور یا گروهی از دیزل ژنراتورها.

۲-۳ ارزیابی ولتاژ با دامنه نوسانی و استخراج پوش

به صورت متداول نوسان دامنه ولتاژ که منجر به پدیده فلیکر می‌شود را به کمک روش مدولاسیون دامنه^۱ (AM) مدل می‌کنند [۱۵] - [۲۰]. به سیگنال‌های مدوله شده در دامنه ولتاژ، تن فلیکری یا مولفه‌های فلیکر می‌گویند. تعداد تن‌های فلیکری ممکن است یک سیگنال [۱۸] و یا چندین سیگنال [۱۹]، [۲۰] در نظر گرفته شود. بنابراین در حالت کلی می‌توان ولتاژ نوسانی را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V(t) = V_c \left[1 + \sum_{i=1}^M V_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \right] \cos(\omega_c t + \theta_c) \quad (۵-۲)$$

که در این رابطه V_c دامنه ولتاژ نامی شبکه و ω_c و θ_c به ترتیب فرکانس و زاویه فاز آن می‌باشند. همچنین V_i دامنه تن فلیکری با فرکانس ω_i و زاویه فاز θ_i می‌باشد. در این رابطه تعداد تن‌های فلیکری M در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در دامنه ولتاژ سیستم مورد نظر M فرکانس فلیکری متفاوت حضور دارد. به جمله $\sum_{i=1}^M V_i \cos(\omega_i t + \theta_i)$ در رابطه (۵-۲) پوش ولتاژ نوسانی اطلاق می‌شود.

برای ارزیابی و بررسی ولتاژ نوسانی خصوصاً استخراج پوش از ولتاژ لحظه‌ای (که مهم‌ترین اطلاعات در زمینه نوسان و در نتیجه فلیکر را در خود دارد) روش‌های گوناگونی ارائه شده است که در این بخش به مرور این روش‌ها خواهیم پرداخت. فلیکرمتر استاندارد ارائه شده توسط IEC که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت و دمدولاسیون مربعی^۲، دمدولاسیون نیم موج^۳ و روش شیف فاز^۴ از جمله روش‌های حوزه زمان جهت استخراج پوش و در نتیجه مولفه‌های فلیکری است. علاوه بر روش‌های حوزه زمان، ولتاژ نوسانی در حوزه فرکانس نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اساس روش‌های پیشنهاد شده

^۱ Amplitude Modulation

^۲ Square Demodulation

^۳ Half-wave Demodulation

^۴ Shifting Phase

در حوزه فرکانس استفاده از تبدیلات انتگرالی^۱ است. همچنین کاربردهای فیلتر کالمن^۲ و روش‌های تطبیقی^۳ برای این منظور نیز مرور خواهد شد. از آنجایی که حلقه قفل فاز بهبودیافته (EPLL) عملکرد بهتری در استخراج پوش سیگنال نوسانی دارد و در روش‌های پیشنهادی این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است، در انتهای این بخش به صورت مجزا مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۳-۱- مدولاسیون مربعی برای استخراج پوش

پدیده فلیکر را می‌توان به صورت مدولاسیون دامنه‌ای نمایش داد که سیگنال فلیکر $m(t)$ پوش سیگنال اصلی می‌باشد [۱۵]. سیگنال پوش سینوسی با دامنه E_m و فرکانس ω_m است. بیان کلی چنین سیگنال به صورت رابطه زیر است:

$$e(t) = E_c \cos(\omega_c t) + m(t) \cdot \cos(\omega_c t) = (E_c + m(t)) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (۶-۲)$$

قسمت اول در رابطه بالا، سیگنال حامل^۴ (سیگنال ولتاژ با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز) می‌باشد و قسمت دوم رابطه بالا شامل تغییرات فرکانس پایین بوده که پوش سیگنال حامل را ایجاد می‌کند. اطلاعات فلیکر در سیگنال $m(t)$ قرار دارد در نتیجه جداسازی این سیگنال از سیگنال اصلی امری ضروری است. با استفاده از روابط مثلثاتی، رابطه (۶-۲) را بازنویسی می‌کنیم:

$$\begin{aligned} e(t) &= E_c \cos(\omega_c t) + m(t) \cdot \cos(\omega_c t) = \\ &= E_c \cos(\omega_c t) + \frac{E_m}{2} \cos((\omega_c + \omega_m)t) + \frac{E_m}{2} \cos((\omega_c - \omega_m)t) \end{aligned} \quad (۷-۲)$$

سه قسمت آخر نشان داده شده در رابطه بالا، سه مولفه در طیف فرکانسی ایجاد می‌کنند. قسمت اول فرکانسی اصلی بوده که برای بحث کیفیت توان حائز اهمیت نیست و دو قسمت دیگر در حوزه فرکانس در دو طرف فرکانس حامل قرار می‌گیرند و فاصله فرکانسی آنها تا فرکانس حامل برابر با

^۱ Integral Transforms

^۲ Kalman Filter

^۳ Adaptive

^۴ Carrier Signal

فرکانس مدولاسیون می‌باشد. با استفاده از عملیات دمدولاسیون، می‌توان نوسانات فرکانس پایین را از سیگنال حامل جدا کرد. برای این منظور ابتدا سیگنال را به توان دو می‌رسانیم (مربع کردن سیگنال):

$$\begin{aligned} v^2(t) &= [V_c + m(t)]^2 \cos^2(\omega_c t + \theta_c) \\ &= [v_c^2 + 2V_c m(t) + m^2(t)] \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega_c t + 2\theta_c)) \\ &= \left\{ \frac{v_c^2}{2} + V_c m(t) + \frac{1}{2} m^2(t) \right\} + \left\{ \frac{v_c^2}{2} + V_c m(t) + \frac{1}{2} m^2(t) \right\} \cdot \cos(2\omega_c t + 2\theta_c) \end{aligned} \quad (۸-۲)$$

سپس با عبور سیگنال مربع شده از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر سیگنال پوش استخراج می‌شود. از آنجایی که فرکانس قطع این فیلترها معین نیستند پوش استخراج شده از دقت کافی برخوردار نیستند و نمی‌توانند برای کاربردهای دقیق مانند قضاوت درباره منبع فلیکر به کار گرفته شوند.

۲-۳-۲ دمدولاسیون نیم موج برای استخراج پوش

از آنجایی که آشکارساز مربعی رفتار غیر خطی دارد و مولفه‌های اضافی با فرکانس پایین ایجاد می‌کند در [۱۷] استفاده از آشکارساز نیم موج توصیه و ارائه شده است. خصوصاً اگر آشکارسازی برای سیگنال جریان انجام بگیرد، مولفه‌های فرکانس پایین اندازه به نسبت بزرگی خواهند داشت که برای بارهایی با توان بالا قابل نظر نخواهد بود. بر خلاف آشکارساز مربعی در این آشکارساز خروجی فقط مولفه DC وجود خواهد داشت. این آشکارساز پوش از دو قسمت اساسی تشکیل می‌شود، بلوک اول این آشکارساز، یک یکسو کننده نیم موج است که ورودی آن ولتاژ لحظه‌ای حامل پوش بوده و خروجی آن V_{rec} خواهد بود. بلوک دوم یک فیلتر پایین‌گذر است که خروجی آن سیگنال پوش است. خروجی یکسو کننده به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{rec} = \frac{1}{2} |(V_0 + m(t)) \cos(\omega_c t)| \quad (۹-۲)$$

سری فوریه این رابطه به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \cos(\omega_c t)_{rec} &= \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos(\omega_c t) \\ &+ \left(\frac{1}{1.3} \cos(2\omega_c t) - \frac{1}{3.5} \cos(4\omega_c t) + \frac{1}{5.7} \cos(6\omega_c t) - \dots \right) \end{aligned} \quad (10-2)$$

رابطه (۱۰-۲) نشان می‌دهد که خروجی یکسو کننده شامل مولفه DC و هارمونیکهای زوج است. بنابراین با کمک یک فیلتر پایین گذر می‌توان مولفه‌های فرکانس بالا و فرکانس موج حامل را حذف کرد. خروجی آشکارساز به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{de\ mod} = \frac{1}{\pi} (V_0 + m(t)) \quad (11-2)$$

در رابطه بالا چون V_0 معلوم است سیگنال پوش یعنی $m(t)$ به دست می‌آید. همانند روش مربعی این روش نیز به علت استفاده از فیلتر پایین گذر چندان دقیق نیست.

۳-۳-۲ الگوریتم شیفت فاز برای استخراج پوش

با استفاده از نظریه انرژی یک سیگنال، روشی برای استخراج پوش ولتاژ در [۲۱] و [۲۲] ارائه شده است. اگر سیگنال ولتاژ نوسانی را $u(t)$ در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$u(t) = A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^h m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (12-2)$$

در رابطه بالا A_0 دامنه سیگنال اصلی، f_0 فرکانس اصلی، φ_0 زاویه فاز اولیه و m_i نسبت دامنه فلیکر به دامنه سیگنال پایه است. f_i و φ_i مربوط به هر کدام از فلیکرها می‌باشد. رابطه (۱۲-۲) را می‌توان به صورت‌های زیر بازنویسی کرد:

$$u(t) = [A_0 + A_0 v(t)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (13-2)$$

و

$$u(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (14-2)$$

اگر ولتاژ توسط یک زاویه به اندازه β یکبار پیش فاز و بار دیگر پس فاز شیفت داده شود، با توجه به رابطه (۱۴-۲) دو سیگنال $u^+(t)$ و $u^-(t)$ به صورت زیر تولید می شوند:

$$u^+(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \beta) \quad (۱۵-۲)$$

و

$$u^-(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 - \beta) \quad (۱۶-۲)$$

اگر $y(t)$ را انرژی سیگنال تعریف کنیم، انرژی به صورت زیر به دست می آید:

$$y(t) = u^2(t) - u^+(t)u^-(t) \quad (۱۷-۲)$$

با توجه به روابط (۱۴-۲) تا (۱۶-۲) می توانیم رابطه انرژی را بازنویسی کنیم:

$$y(t) = u^2(t) - u^+(t)u^-(t) = A^2(t) \sin^2 \beta \quad (۱۸-۲)$$

و

$$A(t) = A_0(1 + v(t)) = \sqrt{\frac{y(t)}{\sin^2 \beta}} = \sqrt{\frac{u^2(t) - u^+(t)u^-(t)}{\sin^2 \beta}} \quad (۱۹-۲)$$

با توجه به رابطه (۱۹-۲)، پوش به صورت زیر باقی می ماند:

$$v(t) = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{u^2(t) - u^+(t)u^-(t)}{\sin^2 \beta}} - 1 \quad (۲۰-۲)$$

به این روش برای به دست آوردن سیگنال پوش ولتاژ نوسانی، الگوریتم شیفت فاز می گویند. هرچند برای استخراج پوش فلیکر فقط به $u(t)$ ، $u^+(t)$ ، $u^-(t)$ و β نیاز هست و هرچقدر β کوچکتر باشد، تاخیر دنبال کردن پوش فلیکر کمتر خواهد بود و نتایج از دقت بیشتری برخوردار خواهند بود. میزان شیفت فاز β به صورت جدی توانایی دنبال سازی بلادرنگ پوش فلیکر را تحت تاثیر قرار می دهد. اما مساله اصلی چگونگی به دست آوردن β و در نتیجه محاسبه سیگنال های شیفت یافته است.

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

مهم‌ترین این تبدیلات، تبدیل فوریه گسسته^۱ (DFT) است که دیگر تبدیلات انتگرالی در واقع با اعمال تغییراتی در آن به وجود آمده‌اند. تبدیل فوریه گسسته و روش‌های مختلف محاسبه آن از جمله تبدیل فوریه سریع^۲ (FFT) در [۲۳] به صورت مفصل آمده است. توسط تبدیل فوریه سریع می‌توان تمام هارمونیک‌ها و میان‌هارمونیک‌های یک سیگنال را معین کرد بنابراین این روش می‌تواند برای ارزیابی فلیکر به کار رود. در [۲۴] ابتدا توسط مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال از ولتاژ نوسانی با فرکانس ۴۸۰ هرتز نمونه برداری کرده‌اند. در این مرحله ولتاژ نوسانی زمان گسسته به دست آمده است. با اعمال روش تبدیل فوریه سریع بر روی این داده‌ها، محتوای هارمونیکی و میان‌هارمونیکی ولتاژ نوسانی استخراج شده است. در نهایت سطح فلیکر لحظه‌ای^۳ (IFL) به صورت پیوسته محاسبه شده است. سطح فلیکر لحظه‌ای همان سیگنال پوش مورد نظر است که توسط روش تبدیل فوریه سریع محاسبه شده و از سیگنال ولتاژ استخراج شده است. داشتن محاسبات طولانی و نیز نشتی اطلاعات سیگنال در صورت عدم نمونه برداری صحیح و انتخاب پنجره مناسب از مشکلات این روش ارزیابی فلیکر است. الگوریتمی برای اندازه‌گیری دیجیتال فلیکر ولتاژ به کمک تبدیل فوریه سریع در [۲۵] ارائه شده است. هدف این مقاله بهبود ضعف‌های رایج در ارزیابی دیجیتال فلیکر ولتاژ عنوان شده است. برای این منظور از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده شده است و فرکانس نمونه برداری مبدل آنالوگ به دیجیتال متناسب با فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر در نظر گرفته شده است.

دیگر تبدیل انتگرالی استفاده شده برای هدف مورد نظر، تبدیل هیلبرت^۴ است. جزئیات این تبدیل در [۲۳] آمده است. در [۲۶] برای ردگیری برخط پوش ولتاژ نوسانی از ترکیبی از عملگر انرژی و تبدیل هیلبرت استفاده کرده‌اند. عملگر انرژی به نوعی نمایش دهنده انرژی سیگنال است که در [۲۲] مورد بررسی قرار گرفته است و در بخش قبلی به آن اشاره شد. نتایج این تحقیق از دقت بالایی برخوردار

¹ Discrete Fourier Transform

² Fast Fourier Transform

³ Instantaneous Flicker Level

⁴ Hilbert Transform

هستند و نیز روش ارائه شده از محاسبات سنگین و پیچیده‌ای در مقایسه با روش تبدیل فوریه سریع برخوردار نیست.

شاید بتوان گفت پرکاربردترین تبدیل انتگرالی در مباحث مختلف کیفیت توان، تبدیل موجک^۱ است. تئوری و روابط این تبدیل در [۲۷] به صورت مشروح آمده است. کاربرد تبدیل موجک در سیستم قدرت از دهه ۹۰ میلادی شروع شده است [۲۸]، [۲۹]. در این تحقیقات از این تبدیل برای بررسی پدیده‌های گذرا در سیستم قدرت استفاده شده است. در [۳۰] از تبدیل موجک برای ارزیابی اغتشاشات کیفیت توانی^۲ استفاده شده است. پس از این کار، در تحقیقات متعددی با استفاده از تبدیل موجک اغتشاشات کیفیت توانی از هم جدا شده‌اند. در واقع از این تبدیل جهت دسته‌بندی^۳ اغتشاشات به کار رفته است [۳۱]–[۳۵]. در [۳۶] از تبدیل موجک فقط برای تشخیص وقوع افت ولتاژ^۴ در شبکه استفاده شده است. در [۳۷] نشان داده شد که تبدیل موجک علاوه بر بررسی پدیده‌های گذرا و سیگنال‌های حاوی هارمونیک‌ها می‌تواند برای تفسیر پدیده فلیکر نیز به کار رود و شاخصی برای فلیکر توسط تبدیل موجک ارائه شود. برای نوسانات و اغتشاشات ناپایستان نیز شاخص‌هایی برپایه‌ی تبدیل موجک پیشنهاد شده است [۳۸].

با اعمال تغییراتی در تبدیل موجک، تبدیل جدیدی با نام تبدیل S-ارائه شده است [۳۹]. در واقع این تبدیل، تبدیل موجک با عبارت تصحیح کننده فاز است. در [۴۰] برای تحلیل پدیده‌های کیفیت توان نظیر افت ولتاژ، برآمدگی ولتاژ^۵ و وقفه لحظه‌ای^۶ ولتاژ از تبدیل S-استفاده شده است. به این ترتیب که با تبدیل S-گرفتن از ولتاژ ویژگی‌های هرکدام از ولتاژها مشاهده شده است. در [۴۱] با ارائه الگوریتمی بر اساس تبدیل S، علاوه بر تحلیل به تشخیص و دسته بندی این اغتشاشات پرداخته شده

¹ Wavelet Transform

² Power quality disturbances

³ Classification

⁴ Voltage sag

⁵ Voltage Swell

⁶ Momentary Interruption

است. برای این منظور در الگوریتم ارائه شده، نویسندگان از شبکه های عصبی مصنوعی استفاده کرده- اند. کاربرد تبدیل-S برای تحلیل پدیده فلیکر و ولتاژ نوسانی در [۴۲] آمده است. در این روش زمان وقوع فلیکر، فرکانس و اندازه دامنه فلیکر قابل استخراج شده است.

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

در واقع فیلتر کالمن از ورودی های معلوم سیستم واقعی برای ساختن حالت های سیستم استفاده می- کند به نحوی که خروجی های سیستم تا جایی که امکان دارد دقیق پیش بینی شوند. اگر یک متغیر نامعلوم به عنوان حالت الحاقی سیستم در نظر گرفته شود، می توان آن را تخمین زد [۴۳].

در [۴۴] برای ارزیابی فلیکر در حوزه فرکانس از دو نوع فیلتر کالمن استفاده شده است. در مرحله اول از یک فیلتر کالمن توسعه یافته^۱ استفاده شده است که توسط آن پوش ولتاژ نوسانی استخراج شده است. فیلتر دوم استفاده شده یک فیلتر کالمن خطی است که دامنه طیف فرکانسی را نتیجه داده است. فیلتر کالمن خطی در واقع به جای تبدیل فوریه سریع استفاده شده است. برای افزایش دقت فیلتر کالمن در ردگیری و استخراج پوش ولتاژ نوسانی و کاهش اثر نویز در [۴۵] از روش فازی برای تنظیم کردن پارامترهای سیستم استفاده کرده اند.

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

از نرون های خطی تطبیقی^۲ (آدلاین) و الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی^۳ برای استخراج پوش ولتاژ نوسانی در [۴۶] و [۴۷] استفاده شده است. پارامتر آموزش^۴ در روش آدلاین و فاکتور فراموشی^۵ در روش حداقل مربعات، تاثیر زیادی در عملکرد این روش ها دارند که طریقه ی معینی برای انتخاب آنها پیشنهاد نشده است.

^۱ Extended Kalman Filter

^۲ Adaptive Linear Neuron (ADALINE)

^۳ Recursive Least square (RLS)

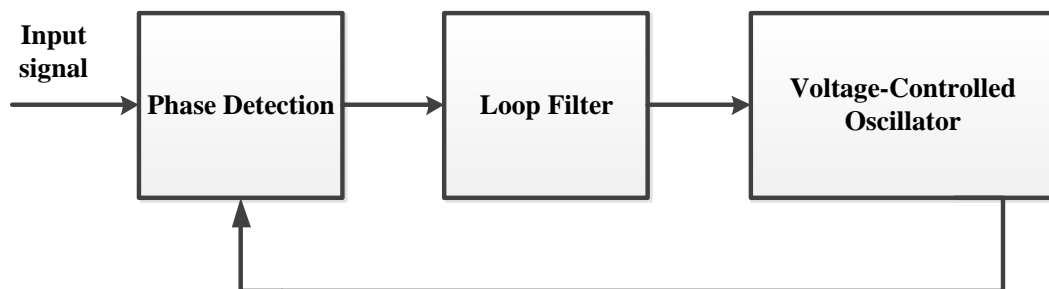
^۴ Learning Parameter

^۵ Forgetting Factor

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

یک حلقه قفل فاز^۱ (PLL) ابزاری است که توسط آن می‌توان فاز و فرکانس سیگنال ورودی را ردگیری^۲ کرد. در حلقه قفل فاز سیگنال خروجی به صورت سنکرون با سیگنال مرجع نگه داشته می‌شود. در اغلب موارد سیگنال فاز به عنوان سیگنال مرجع به کار می‌رود. به عبارت دیگر این وسیله جهت ردگیری فاز استفاده می‌شود [۴۸]. در حقیقت حلقه قفل فاز یک سیستم خودکار است که فاز سیگنال ورودی و خروجی‌اش را با حداقل خطا یکسان حفظ می‌کند. با پیشرفت تکنولوژی مدارات مجتمع، این روش کاربردهای وسیعی در تجهیزات مخابراتی و کنترل موتورها پیدا کرده است [۴۸]. ساختار کلی حلقه قفل فاز در شکل (۲-۵) نشان داده می‌شود. قسمت اول یک آشکارساز فاز^۳ است. قسمت دوم فیلتر حلقه^۴ می‌باشد که یک فیلتر پایین‌گذر است. بخش سوم، نوسان‌ساز کنترل شده^۵ با ولتاژ است. جزئیات این قسمت‌ها و توصیف ریاضی عملکرد آنها در [۴۸] آمده است.

حلقه قفل فازی که علاوه بر ردگیری سیگنال فاز، توانایی‌های دیگری را نیز داشته باشد در [۴۹] پیشنهاد شده است که به آن حلقه قفل فاز بهبود یافته (EPLL) گفته شده است. این حلقه قفل فاز پیشنهاد شده، می‌تواند برای ردگیری و استخراج پوش سیگنال، تحلیل و آشکارسازی هارمونیک، تجزیه سیگنال به مولفه‌های سازنده و استخراج مولفه راکتیو جریان و ... مورد استفاده قرار گیرد. بلوک



شکل (۲-۵) ساختار کلی حلقه قفل فاز [۴۹]

¹ Phased-Locked Loop

² Track

³ Phase Detector

⁴ Loop Filter

⁵ Voltage-Controlled Oscillator

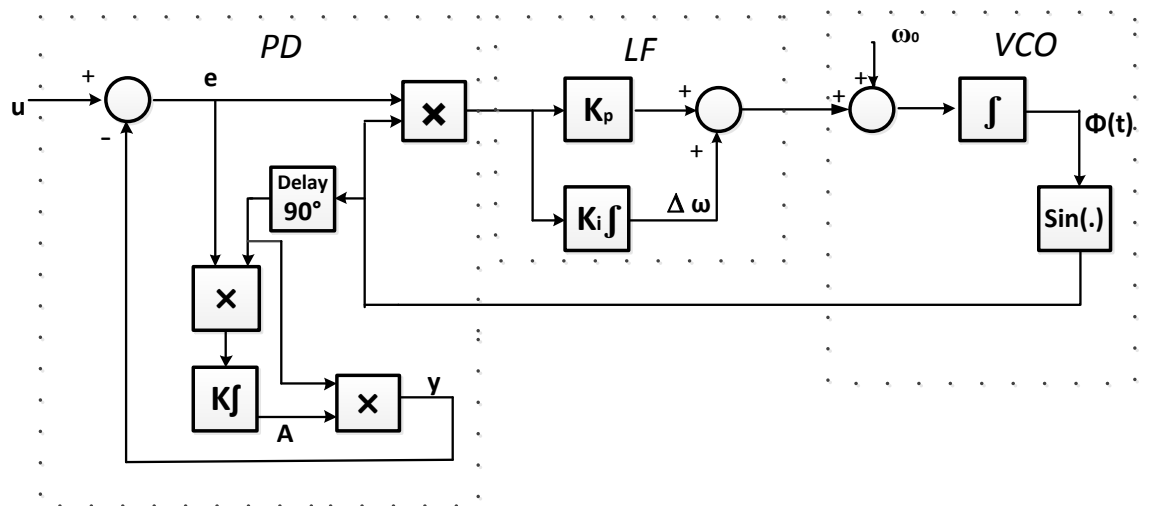
دیاگرام EPLL که در واقع یک فیلتر تطبیقی غیرخطی است در شکل (۶-۲) نشان داده می‌شود. در این شکل، u سیگنال ورودی EPLL و y خروجی آن است. خطا (e) به صورت تفاضل آن دو تعریف می‌شود، $e(t) = u(t) - y(t)$. فرکانس پایه سیگنال ورودی (ω_0) یکی از ورودی‌های EPLL است.

معادلات حاکم بر EPLL به صورت زیر است [۴۹]:

$$\begin{cases} \dot{A}(t) = K e(t) \sin(\varphi(t)) \\ \dot{\omega}(t) = K_i e(t) \cos(\varphi(t)) \\ \dot{\varphi}(t) = \omega(t) + \frac{K_p}{K_i} \dot{\omega}(t) \end{cases} \quad (۲۱-۲)$$

که در آن $A(t)$ دامنه، $\omega(t)$ فرکانس و $\varphi(t)$ فاز سیگنال ورودی EPLL است.

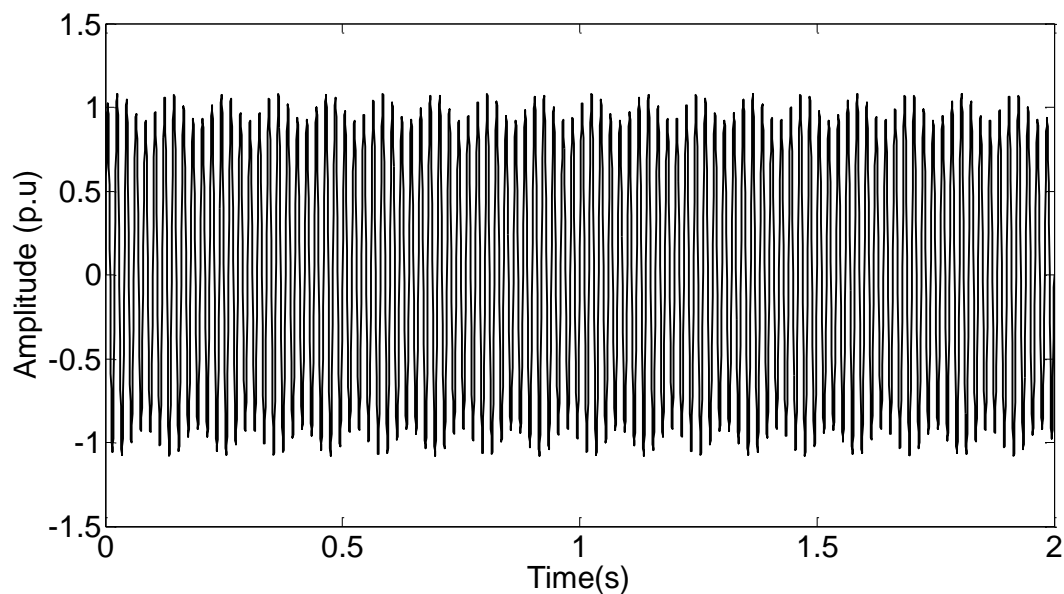
پارامترهای K ، K_p و K_i پارامترهای EPLL هستند که عملکرد EPLL توسط آنها کنترل می‌شود. سرعت پاسخ‌دهی و دقت ردگیری دو فاکتور اساسی در عملکرد EPLL هستند که با تنظیم این پارامترها کنترل می‌شوند. معمولاً سرعت و دقت به صورت معکوس تغییر می‌کنند و بنابراین مصالحه-ای^۱ بین این دو عامل با انتخاب بهینه‌ی پارامترها باید صورت بگیرد.



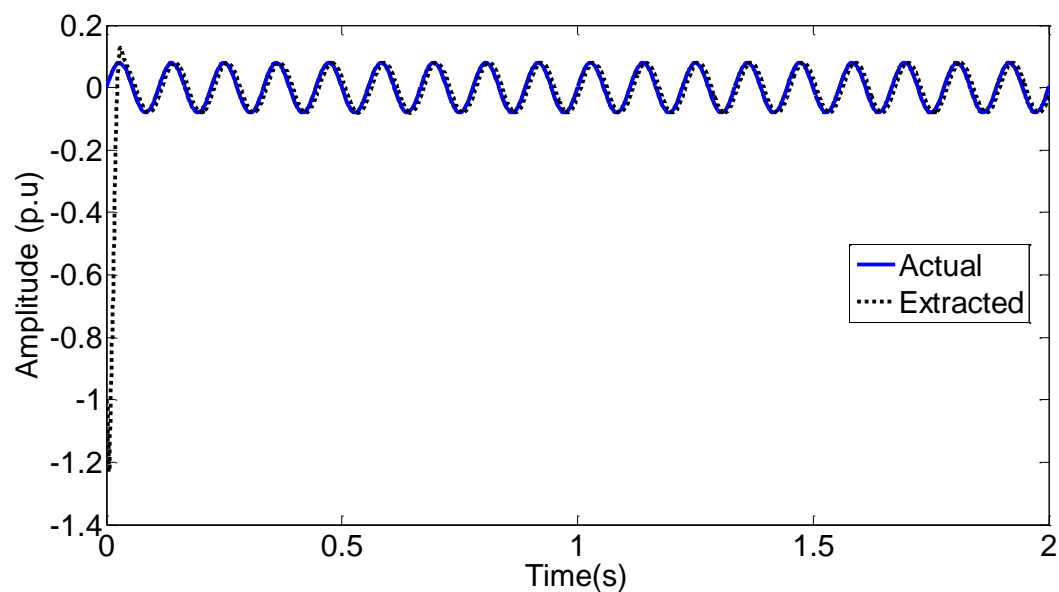
شکل (۶-۲) بلوک دیاگرام EPLL [۴۹]

^۱ Trade off

در این پایان‌نامه از EPLL جهت استخراج پوش دامنه سیگنال نوسانی (ولتاژ یا جریان) استفاده می‌شود. در شکل (۷-۲) ولتاژ نوسانی که پوش آن دارای یک تن فلیکری است نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر سیگنال پوش یک مولفه سینوسی دارد. پوش واقعی و پوش استخراج شده توسط EPLL (بدون offset) در شکل (۸-۲) آمده است.

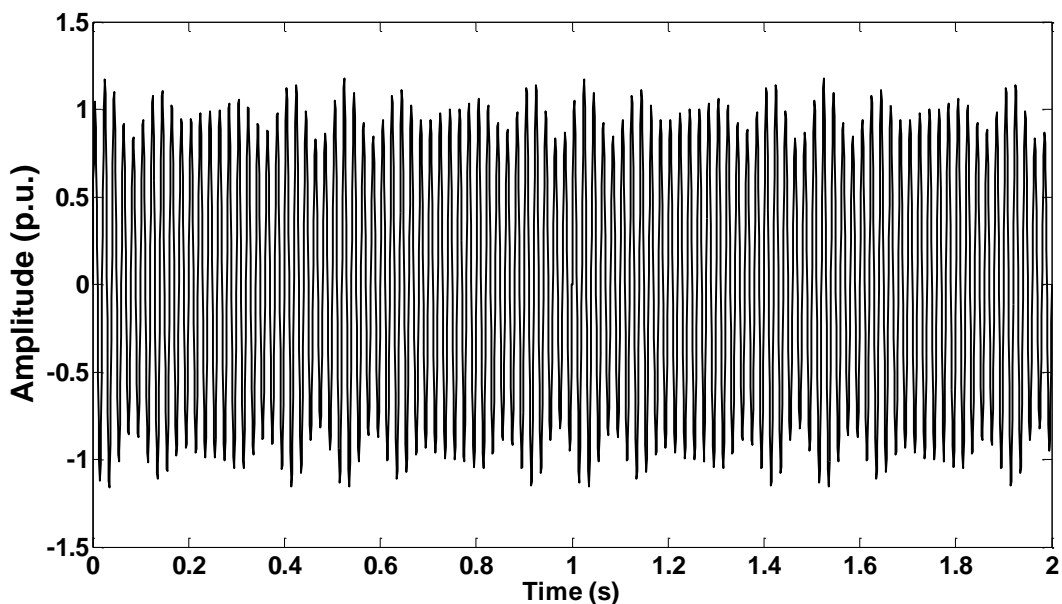


شکل (۷-۲) ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری

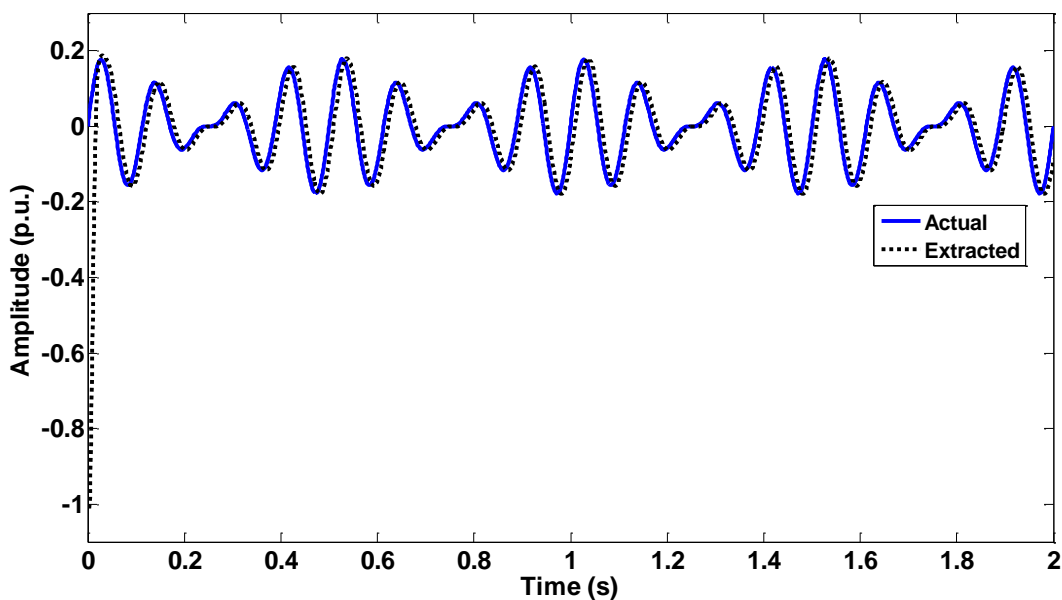


شکل (۸-۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با یک تن فلیکری

یک سیگنال ولتاژ نوسانی که پوش آن دارای دو مولفه سینوسی می‌باشد (بیش از یک تن فلیکری)، در شکل (۹-۲) و پوش استخراج شده‌ی آن در شکل (۱۰-۲) نشان داده می‌شود.

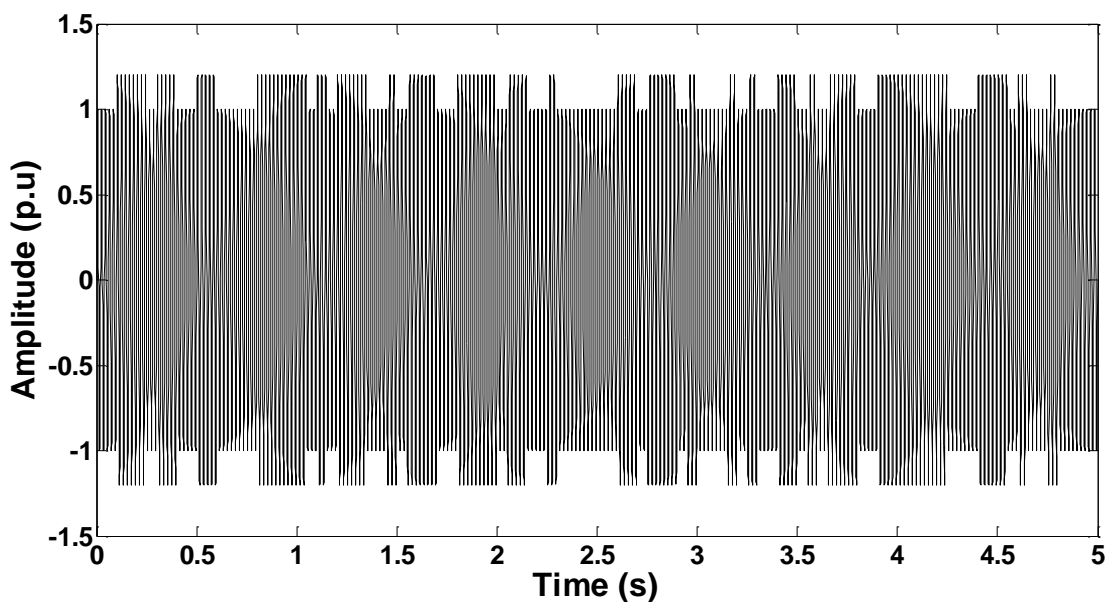


شکل (۹-۲) ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری

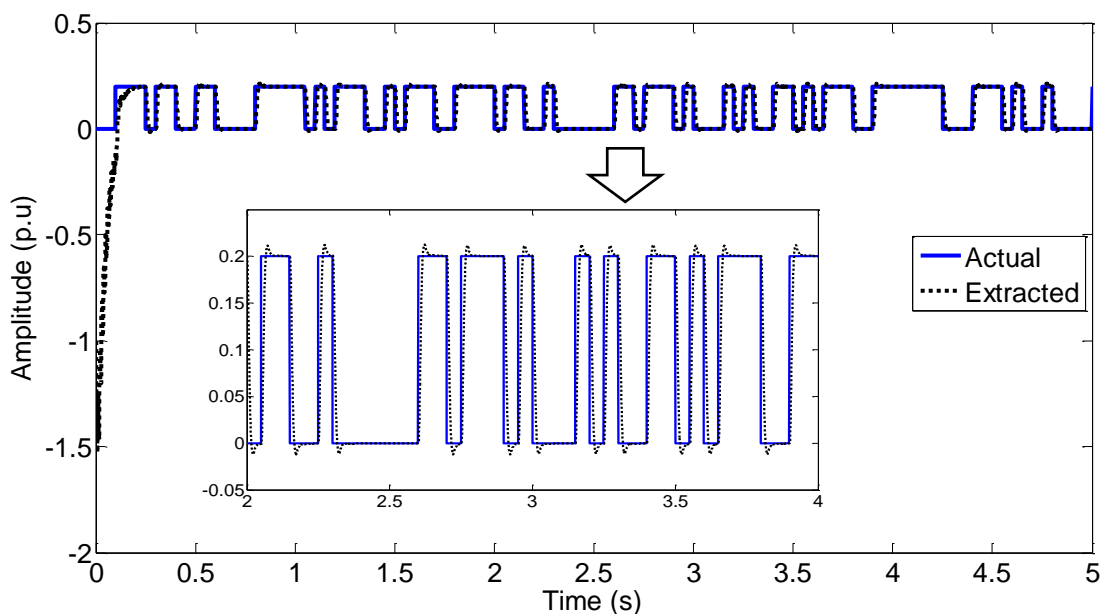


شکل (۱۰-۲) پوش استخراج شده توسط EPLL، ولتاژ نوسانی با دو تن فلیکری

علاوه بر نوسان سینوسی دامنه، پوش ولتاژ با دامنه نوسانی نایستان را نیز می‌توان به کمک EPLL استخراج کرد. در شکل (۱۱-۲) یک ولتاژ نوسانی با پوش مستطیلی نایستان و در شکل (۱۲-۲) پوش نظیر آن که توسط EPLL به دست آمده، نشان داده می‌شود.



شکل (۱۱-۲) ولتاژ نوسانی با پوش نایستان



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

در تمامی حالت‌های نوسان ولتاژ، سیگنال پوش توسط EPLL به خوبی استخراج شده است. از این ابزار در روش‌های مختلف ارائه شده در این پایان‌نامه استفاده شده است.

۲-۴ تشخیص منابع فلیکر در سیستم قدرت

در این بخش به مرور تحقیقات انجام گرفته به منظور تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در سیستم قدرت پرداخته می‌شود. این تحقیقات را از جنبه‌های مختلفی می‌توان بررسی کرد. اولین مورد سیستم قدرت مورد بررسی است که آیا یک سیستم شعاعی است یا غیرشعاعی از چندسو تغذیه شده می‌باشد. نکته‌ی دیگر تعداد منابع فلیکر در سیستم تحت بررسی و کیفیت توزیع شدن آنها در سیستم قدرت است که در مرور این کارها مورد توجه قرار می‌گیرد.

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

هرچند فلیکر نوسان دامنه ولتاژ تعریف شده است اما نوسان دامنه ولتاژ منجر به نوسان دامنه جریان می‌شود. توان فلیکر جهت بررسی متقابل و همزمان نوسان دامنه ولتاژ و جریان پیشنهاد شده است [۱۵] - [۱۷]. اگر $m_v(t)$ و $m_i(t)$ به ترتیب پوش دامنه ولتاژ نوسانی و جریان نوسانی نظیر آن باشد، در این صورت توان فلیکر لحظه‌ای به صورت زیر تعریف شده است:

$$fp(t) = m_v(t) \cdot m_i(t) \quad (2-22)$$

مقدار متوسط توان فلیکر لحظه‌ای به عنوان توان فلیکر در نظر می‌گیرند:

$$FP = \frac{1}{T} \int_0^T fp(t) dt \quad (2-23)$$

که در آن T دوره تناوب مشترک نوسان دامنه ولتاژ و جریان یا دوره تناوب فلیکر است.

^۱ Flicker Power

نکته‌ای در کاربرد توان فلیکر وجود دارد این است که بایستی دوره تناوب نوسان منابع فلیکر یکسان باشد و یا اینکه فقط یک منبع فلیکر در سیستم مورد بهره‌برداری قرار گرفته باشد. در غیر این صورت خصوصاً اگر منابع متعدد با فرکانس فلیکر متفاوت در شبکه حضور داشته باشند محاسبه توان فلیکر با مشکل مواجه می‌شود.

در [۱۵] - [۱۷] برای یک شبکه قدرت شعاعی که جهت شارش توان اکتیو در آن همواره ثابت و معین است، درباره محل منبع فلیکر نسبت به نقطه مشاهده^۱ برحسب علامت توان فلیکر قضاوت کرده‌اند. به عبارت دیگر ابتدا در نقاط مشاهده توان فلیکر محاسبه می‌شود، سپس برحسب علامت توان فلیکر محل اتصال منبع فلیکر در بالادست^۲ و یا پایین‌دست^۳ نقطه مشاهده تشخیص داده می‌شود. بالادست یعنی از محل تغذیه شبکه تا نقطه مشاهده و پایین‌دست یعنی از نقطه مشاهده تا انتهای شبکه. برای تعیین علامت توان فلیکر دو وضعیت را در نظر گرفته‌اند.

در وضعیت اول فرض شده که منبع فلیکر در بالادست نقطه مشاهده باشد. شکل (۲-۱۳) چنین وضعیتی را نشان می‌دهد. در این حالت کاهش ولتاژ در منبع فلیکر (بار فلیکرزا) با کاهش ولتاژ در نقطه مشاهده همراه است. از طرف دیگر کاهش ولتاژ در منبع فلیکر باعث افزایش جریان کشیده شده توسط بار فلیکرزا می‌شود. در نتیجه جریان در نقطه مشاهده کاهش می‌یابد. پس کاهش ولتاژ در نقطه مشاهده با کاهش جریان همراه است و توان فلیکر در چنین وضعیتی در نقطه مشاهده مثبت خواهد بود. در این حالت برای رسیدن به منبع فلیکر از نقطه مشاهده، باید خلاف جهت شارش توان اکتیو حرکت کرد.

در وضعیت دوم فرض شده است که منبع فلیکر در پایین‌دست نقطه مشاهده باشد. شکل (۲-۱۴) چنین وضعیتی را نشان می‌دهد. در این حالت کاهش ولتاژ در منبع فلیکر (بار فلیکرزا) با کاهش ولتاژ

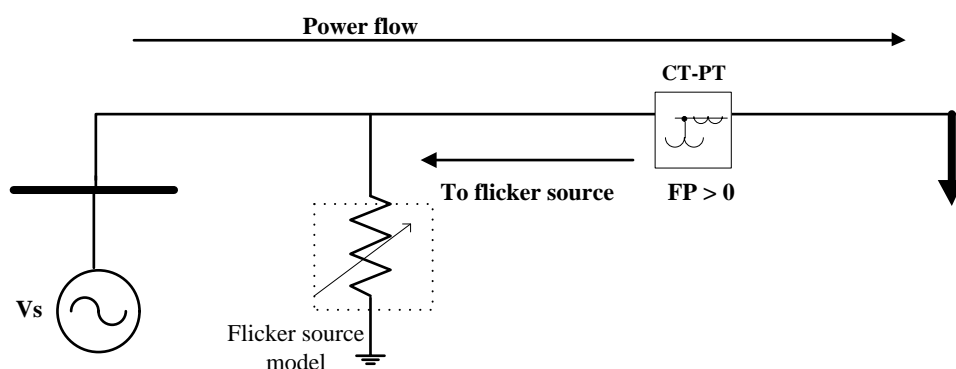
^۱ Monitoring Point

^۲ Upstream

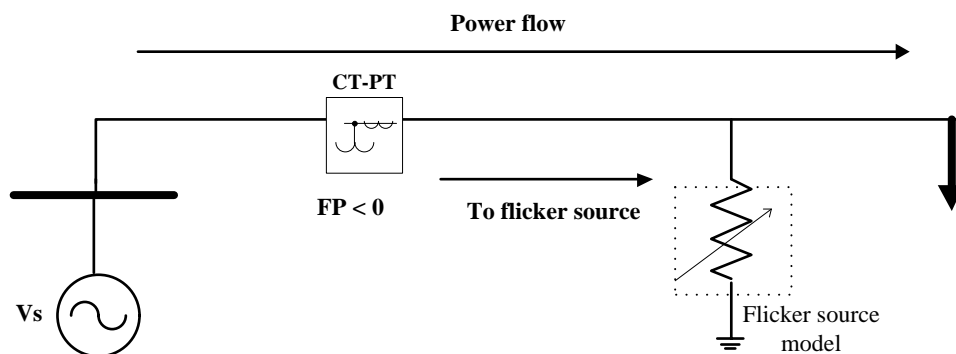
^۳ Downstream

در نقطه مشاهده همراه است. از طرف دیگر کاهش ولتاژ در منبع فلیکر باعث افزایش جریان کشیده شده توسط بار فلیکرزا می‌شود. در نتیجه جریان در نقطه مشاهده افزایش می‌یابد (دو جریان سری هستند). پس کاهش ولتاژ در نقطه مشاهده با افزایش جریان همراه است و توان فلیکر در چنین وضعیتی در نقطه مشاهده منفی خواهد بود. در این حالت برای رسیدن به منبع فلیکر از نقطه مشاهده، باید در جهت شارش توان اکتیو حرکت کرد.

در نهایت این روش به این صورت جمع‌بندی می‌شود که اگر توان فلیکر در نقطه مشاهده مثبت باشد آنگاه منبع فلیکر در بالادست نقطه مشاهده است و اگر توان فلیکر در نقطه مشاهده منفی باشد آنگاه منبع فلیکر در پایین‌دست نقطه مشاهده است.



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



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

بدین ترتیب این روش محل اتصال منبع فلایکر را نسبت به نقطه مشاهده در یک سیستم شعاعی معین می‌کند. تعیین محل دقیق اتصال منبع فلایکر و نیز شرایطی که سیستم از چندسو تغذیه شود مواردی هستند که در این روش پرداخته نشده است.

۲-۴-۲ روش شیب ولتاژ-جریان^۱ برای تشخیص محل منابع فلایکر

توان فلایکر در واقع بیان کننده ارتباط بین جریان و ولتاژ نوسانی است. علامت این کمیت برای یافتن منابع فلایکر در بخش قبلی مورد بررسی قرار گرفت. در [۵۰] به طرق دیگر ولی در واقع بر اساس چگونگی نوسان جریان و ولتاژ به تشخیص محل منابع فلایکر پرداخته‌اند. در [۵۰] برای یک سیستم شعاعی با یک منبع فلایکر که ساده ترین حالت ممکن است با به دست آوردن رابطه dV/dI بر حسب پارامترهای شبکه، درباره جهت شارش فلایکر تصمیم گیری شده است. این رابطه در واقع شیب ولتاژ-جریان است بنابراین این روش به روش شیب ولتاژ-جریان معروف شده است. در واقع این روش به لحاظ روش تشخیص منابع فلایکرزا به روش توان فلایکر بسیار نزدیک بوده و در مواردی به همان نام مورد استفاده قرار می‌گیرد. نشان داده شده است که زمانی که منبع فلایکرزا در بالادست نقطه مشاهده باشد، dV/dI مثبت و زمانی که منبع در پایین دست نقطه مشاهده باشد، dV/dI منفی است.

۲-۴-۳ روش پخش بار میان‌هارمونیک برای تشخیص منابع فلایکر

همان طور که پیشتر اشاره شد، ولتاژ نوسانی که منجر به پدیده فلایکر می‌شود را می‌توان به عنوان یک سیگنال ولتاژ با میان‌هارمونیکهایی معمولاً محدود در نظر گرفت [۱۹]. در [۱۹] برای محاسبه P_{st} به جای مراحل پیشنهادی در استاندارد IEC از محتویات میان‌هارمونیک ولتاژ نوسانی استفاده شده است. به طوری که به رابطه‌ای جدید برای تابع احساس لحظه‌ای فلایکر^۲ یعنی $s(t)$ رسیده‌اند.

¹ V-I Slope

² Instantaneous Flicker Sensation

در ادامه این پژوهشگران در [۵۱] روشی کاملاً منظم و سیستماتیک برای به دست آوردن سطح فلیکر در هر باس از سیستم قدرت و به طبع برای تشخیص منابع فلیکر ارائه کرده‌اند. در این کار هم ولتاژ نوسانی به عنوان سیگنالی با میان‌هارمونیک‌ها در نظر گرفته شده و برای محاسبه سطح فلیکر از روش پیشنهادی خودشان در [۱۹] که نتایج بسیار نزدیکی با نتایج فلیکر متر استاندارد IEC دارد استفاده کرده‌اند. در این کار تحقیقاتی برای به دست آوردن فلیکر ناشی از منابع فلیکرزا در باس‌های مختلف سیستم قدرت از روش پخش بار میان‌هارمونیکی استفاده کرده‌اند. هدف این الگوریتم محاسبه سطح فلیکر در هر کدام از باس‌های شبکه است. این فلیکر ممکن است به خاطر نوسان یک بار اغتشاشی یا عملکرد همزمان چندین بار نوسانی رخ داده باشد.

معمولاً در بررسی فلیکر، فلیکر را به صورت نوساناتی با دامنه و فرکانس ثابت فرض می‌کنند که به این نوع فلیکر، فلیکر متناوب می‌گویند. در عمل منابع فلیکر خصوصاً کوره‌های قوس الکتریک رفتار غیر متناوب از خود نشان می‌دهند و به عبارت دیگر محتویات میان‌هارمونیکی به سرعت تغییر می‌کند. از مزایای روش [۵۱] در نظر گرفتن فلیکرهای غیر متناوب است.

برای محاسبه P_{st} به یک دوره مشاهده نسبتاً طولانی حدود ده دقیقه نیاز است که به این دوره زمانی T_0 می‌گویند. برای رصد و دنبال کردن فلیکر غیر متناوب این بازه را به n بازه کوچکتر با عرض T_W تقسیم می‌کنند. اگر $T_W = 0.2s$ باشد آنگاه ۳۰۰۰ پنجره ایجاد خواهد شد و اگر فقط هشت زیرهارمونیک در نظر گرفته شود، بایستی ۲۴۰۰۰ بار برنامه پخش بار اجرا شود تا ولتاژ باس‌ها به دست آیند. حجم بالای محاسبات از مهم‌ترین مشکلات این روش است که حتی نویسندگان نیز به این نکته اشاره کرده‌اند.

۲-۴-۴ روش هوشمند^۱ برای تشخیص منابع فلیکر

در [۲۰] روشی هوشمند به کمک شبکه های عصبی مصنوعی برای تشخیص نقاط اتصال منابع فلیکر ارائه شده است. در این مقاله برای ارزیابی فلیکر از تبدیل S- استفاده شده و از نتایج حاصل از این تبدیل شاخصی برای فلیکر معرفی شده است. سپس به کمک شبکه پرسپترون چند لایه^۲ به تشخیص منابع فلیکر در سیستم قدرت پرداخته اند. در این مقاله در هر وضعیت شبیه سازی شده تنها یک منبع فلیکر با فرکانس معین در نظر گرفته شده است و شرایطی که چندین منبع فلیکر همزمان در شبکه باشند مورد بررسی قرار نگرفته است.

همچنین در این مقاله به کمک شبکه های عصبی الگوریتمی برای کاهش تعداد نقاط اندازه گیری های لازم، ارائه و به کار گرفته شده است.

۲-۴-۵ استفاده از مولفه راکتیو جریان برای تشخیص منابع فلیکر

در [۵۲] روشی برای تفکیک اثر فلیکری هر کدام از منابع فلیکر در سیستم هایی شامل چندین منبع فلیکر متصل به یک PCC مطرح شده است. در این وضعیت پس از تخمین یک مدار معادل تونن برای کل سیستم از دید PCC، با توجه به جریان هر کدام از بارها اثر جداگانه فلیکر منابع به دست آمده است. در این مقاله این نکته نشان داده شده است که سهم هر کدام از منابع فلیکر به نسبت مولفه راکتیو جریان هر کدام از این منابع است. به عبارت دیگر نوسان مولفه راکتیو جریان هر منبع باعث ایجاد فلیکر می شود. از آنجا که محاسبات این روش بسیار ساده است می توان از آن برای محاسبات برخط استفاده کرد. این روش در حقیقت از این نکته استفاده کرده است که نوسانات ولتاژ که به صورت نوسان در دامنه رخ می دهد به علت نوسان در توان بارها است. بیشتر این نوسان بار در توان راکتیو است. این مقاله همچنین نشان داده است که فلیکر اندازه گیری شده در PCC فقط به علت بارهای متصل به آن نقطه از شبکه نیست، بلکه خطوط انتقالی که PCC را به شبکه متصل می کنند

¹ Intelligent

² Multi-layer Perceptron

می توانند فلیکر منابع دور دست را به PCC مورد نظر حمل کنند. به فلیکر موجود در PCC که ناشی از بارهای متصل به PCC نیست و توسط خطوط انتقال از سایر منابع شبکه نتیجه شده، فلیکر پس زمینه^۱ می گویند. فرض اساسی این مقاله این است که منابع فلیکر در یک محدوده خاص قرار دارند که می توان آنها را در یک باس در نظر گرفت. به عبارت دیگر منابع فلیکر به صورت کامل در سیستم قدرت توزیع نشده اند.

۲-۴-۶ استفاده از پخش بار تصادفی^۲ برای تشخیص منابع فلیکر

در [۵۳] با استفاده از روش حل معادلات آماری و پخش بار تصادفی برای تشخیص منابع فلیکر استفاده شده است. برای یک سیستم شعاعی با یک منبع فلیکر این روش پیاده شده است. در این کار برای ارزیابی فلیکر از شاخص ΔV_{10} استفاده شده است. با اعمال روش ارائه شده بالاترین شاخص فلیکر، در باسی که منبع فلیکر به آن متصل است دیده می شود.

۲-۴-۷ انتشار فلیکر ناشی از نیروگاه های بادی

از آنجایی که نیروگاه های بادی از منابع عمده فلیکر در شبکه هستند تحقیقات زیادی در زمینه صورت گرفته که در اینجا به سه مورد اشاره می کنیم. در [۵۴] برای یک سیستم قدرت حلقوی شامل یک واحد نیروگاه بادی به عنوان منبع فلیکر، روشی برای توصیف چگونگی انتشار فلیکر در شبکه ارائه شده است. در این کار با محاسبه P_{st} به صورت تقریبی در حوزه فرکانس، در هر باس شبکه منبع فلیکر (باس شامل واحد بادی) مشخص شده است. همچنین این مقاله نشان داده است که هرچه ظرفیت تولید واحد بادی بیشتر باشد، فلیکر تولیدی آن نیز بیشتر خواهد بود. علاوه بر این به ازای سطح معین نوسان ولتاژ تولید شده توسط واحد بادی، فلیکر احساس شده در بخش های ضعیف شبکه بیشتر خواهد بود.

¹ Background Flicker

² Stochastic Load Flow

در [۵۵] اثر توان راکتیو تولید شده توسط نیروگاه بادی بر فلیکر ناشی از آن بررسی شده است. مولفان این مقاله پیشنهاد داده‌اند که با کنترل میزان توان راکتیو تولیدی توسط واحد بادی می‌توان میزان فلیکر تولیدی را کنترل کرد. این روش در یک سیستم از چندسو تغذیه و شامل یک باس متصل به توربین‌های بادی شبیه‌سازی شده است. تحت شرایط مختلف طرح کنترل ولتاژ پیشنهادی، میزان توان راکتیو مبادله شده بین واحد بادی و شبکه را طوری تنظیم کرده است که فلیکر کاهش یابد.

تحقیق مشابهی در [۵۶] انجام گرفته است که انتشار فلیکر از سمت مصرف‌کننده‌ها به واحد بادی و نیز فلیکر ناشی از واحد بادی را به پایین‌دست را به صورت تحلیلی بررسی کرده است. این مقاله نشان داده است که علاوه بر ضریب توان نیروگاه بادی (اثر کنترل ولتاژ)، امپدانس شبکه نیز در انتقال فلیکر نقش دارد. در این مقاله برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی از یک سیستم ساده شعاعی استفاده کرده‌اند.

فصل سوم: مدل سازی و پیش بینی سری های زمانی

۳-۱ مقدمه

هرچند مدل کردن نوسان دامنه با مدوله شدن یک یا چند تن سینوسی (تن‌های فلیکری) روش مورد قبول در تحقیقات انجام شده است (چنانچه در فصل قبل دیدیم)، اما اندازه‌گیری‌های میدانی و داده‌های عملی نشان داده‌اند که نوسان دامنه در ولتاژ نوسانی فلیکر به صورت ناپیستان و تا حدودی تصادفی است [۵۲] و [۵۷]. چنانچه نوسان دامنه‌ی ولتاژ به صورت ناپیستان باشد، پوش دامنه یک سیگنال ناپیستان خواهد بود. با در نظر گرفتن رفتار ناپیستان ولتاژ نوسانی، روش‌های مبتنی بر تئوری آشوب^۱ جهت مدل کردن نوسان ولتاژ کوره‌های قوس پیشنهاد شده است [۵۸] و [۵۹]. در [۵۹] علاوه بر مدل کردن سیگنال ولتاژ آشوبی، به پیش‌بینی مقدارهای آتی P_{st} نیز پرداخته شده است. اما سیگنال پوش که دارای اطلاعات فلیکری است پیش‌بینی نشده است.

اگر نوسان دامنه ولتاژ به صورت ناپیستان باشد، ارائه مدل دقیق برای سیگنال پوش و نیز پیش‌بینی آن برای ارتقای کیفیت توان و کنترل تجهیزات جبران‌ساز ضروری است. با در نظر گرفتن گسسته شده‌ی این سیگنال ناپیستان به عنوان یک سری زمانی، می‌توان پوش دامنه را مدل‌سازی و پیش‌بینی کرد. برای این منظور در این پایان‌نامه از دو روش استفاده شده است. اولین روش، روش اتورگرسیو (AR) و میانگین متحرک (MA) است. دومین روش، مدل‌سازی و پیش‌بینی توسط مدل‌های مبتنی بر تئوری سیستم‌های خاکستری می‌باشد. در این فصل ضمن معرفی این روش‌ها به مرور کاربردهای آنها می‌پردازیم.

سری زمانی یک دنباله^۲ مرتب شده بر اساس زمان، از مشاهدات، داده‌ها یا متغیرها است [۶۰]. تحلیل سری‌های زمانی شامل روش‌هایی برای واکاوی داده‌ها جهت استخراج مشخصه‌های آماری آنها می‌باشد [۶۱]. مدل‌های سری زمانی نظیر MA و AR برای مدل‌سازی، تخمین و پیش‌بینی داده‌های سری

^۱ Chaos Theory

^۲ Sequence

زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶۰]. این دو روش در زمینه‌های گوناگونی مانند پیش‌بینی قیمت در حوزه اقتصاد، پیش‌بینی هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مهندسی برق، مدل AR جهت پردازش و تخمین سیگنال [۶۲]، [۶۳]، پردازش تصویر [۶۴] و در مهندسی قدرت جهت پیش‌بینی بار و قیمت برق [۶۵]، [۶۶] بکار گرفته شده است.

روش‌های بی‌نیاز به مدل^۱ نیز به عنوان روش‌های جایگزین برای بررسی سری‌های زمانی پیشنهاد شده‌اند. برای این منظور سیستم‌های فازی [۶۷]، [۶۸] و شبکه‌های عصبی مصنوعی [۶۹]، [۷۰] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در کاربرد سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی برای بررسی سری‌های زمانی، از همه داده‌های در دسترس به عنوان داده‌های آموزش^۲ استفاده می‌کنند تا بتوانند سری زمانی را مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند. از این جهت به این پیش‌بین‌ها، پیش‌بین‌های کلی^۳ می‌گویند. این در حالی است که اگر هدف پیش‌بینی یک سری زمانی باشد، آخرین داده‌ها ممکن است بیشترین اطلاعات را در باره آینده در خود داشته باشند. به این گونه از پیش‌بین‌ها، پیش‌بین‌های محلی^۴ می‌گویند. مدل‌های مبتنی بر تئوری سیستم‌های خاکستری^۵ [۷۱] یا اصطلاحاً مدل‌های خاکستری^۶ از این دسته هستند. این پیش‌بین محلی ابتدا منحنی‌ای بر آخرین داده‌ها برازش^۷ کرده و سپس پیش‌بینی را انجام می‌دهد. نشان داده شده است که یک پیش‌بین محلی اگر درست طراحی شود عملکرد بهتر و نتایج دقیق‌تری از پیش‌بین‌های کلی خواهد داشت [۷۲]. همچنین در [۷۲] تاکید شده است که هرچه تعداد داده‌های کمتری (معمولاً تا ۲۰ داده) برای مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده شود (از آخرین داده‌ها استفاده شود)، پیش‌بینی دقیق‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر عملکرد روش‌های پیش‌بین محلی نظیر مدل‌های خاکستری برای تعداد داده‌های زیاد دچار مشکل می‌شود. مدل‌های مختلف خاکستری برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی در [۷۳] جمع‌بندی شده است. هرچند در

¹ Model-Free

² Trane Data

³ Global Predictor

⁴ Local Predictor

⁵ Grey System Theories

⁶ Grey Models

⁷ Fitting

اغلب کاربردهای مدل های خاکستری از جمله در [۷۲] و [۷۳] گام پیش بینی^۱ را یک داده در نظر گرفته اند (فقط یک داده بعدی را پیش بینی کرده اند)، اما از نظر تئوری منعی برای افزایش گام پیش بینی وجود ندارد و در [۷۴] این مقدار تا ۳۰ داده انتخاب شده است.

در [۷۵] برای پیش بینی مقدار روزانه ی شاخص ΔV_{10} ، از یکی از مدل های خاکستری استفاده کرده اند. این کار در واقع پیش بینی میان مدت فلیکر است. ولی سیگنال پوش و نوسانات لحظه ای مدل سازی و پیش بینی نشده اند.

۳-۲ روش اتورگرسیو و میانگین متحرک برای مدل سازی و پیش بینی سری های

زمانی

سری زمانی y_t را به ازای $t = 1, 2, \dots, T$ در نظر بگیرید. کوواریانس^۲ بین y_t و مقادیر آن به ازای دوره ی زمانی دیگر یعنی y_{t+k} را اتوکوواریانس^۳ (کوواریانس خودی) سری زمانی y_t به ازای تاخیر k می گویند و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\gamma_k = Cov(y_t, y_{t+k}) = E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)] \quad (۱-۳)$$

که در آن μ میانگین داده ها و $E[.]$ عملگر امید ریاضی است. اگر به ازای $k = 1, 2, \dots$ مقادیر γ_k محاسبه شود، به مجموعه γ_k ها، تابع اتوکوواریانس^۴ می گویند. واضح است که به ازای $k = 0$ اتوکوواریانس با واریانس داده ها برابر است، یعنی $\gamma_0 = \sigma_y^2$. برای یک سری زمانی با تعداد محدود داده، اتوکوواریانس به صورت زیر محاسبه می شود [۶۰]:

$$\gamma_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} (y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu) \quad (۲-۳)$$

^۱ Prediction Step Size

^۲ Covariance

^۳ Autocovariance

^۴ Autocovariance Function

همچنین ضریب خودهمبستگی^۱ به ازای تاخیر k به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho_k = \frac{E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)]}{\sqrt{E[(y_t - \mu)^2] E[(y_{t+k} - \mu)^2]}} = \frac{Cov(y_t, y_{t+k})}{Var(y_t)} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (3-3)$$

مجموعه ای مقادیر ρ_k برای $k = 1, 2, \dots$ تابع خودهمبستگی^۲ (ACF) گفته می شود. با توجه به تعریف $\rho_0 = 1$. همچنین، ACF از اندازه داده ها مستقل است و یک کمیت بدون بُعد محسوب می شود. از طرف دیگر چون تابع خودهمبستگی نسبت به مبداء متقارن است بنابراین کافی است فقط به ازای مقادیر مثبت محاسبه شود. برای سری های زمانی ایستاد^۳ مقدار خودهمبستگی بعد از چند تاخیر بریده^۴ می شود. به عبارت دیگر پس از تعداد کمی از k مقدار خودهمبستگی ناچیز می شود (معمولاً تا $k = 5$ به صفر). اما برای سری زمانی نایستاد مقدار خودهمبستگی به ازای k های زیادی قابل توجه است و به صورت بسیار آرام میرا می شود (معمولاً تا $k = 20$ هم مقدار قابل توجه دارد). از این ویژگی برای تشخیص نایستاد بودن سری زمانی استفاده شده است [۶۰]. اندازه خودهمبستگی برای سری زمانی ایستاد از یک کمتر و برای سری زمانی نایستاد از یک بزرگ تر است [۷۶]. این یک ملاک کمی (علاوه بر ملاک توصیفی برحسب میرایی خودهمبستگی) برای تشخیص نایستاد بودن یک سری زمانی است.

۳-۲-۱ مدل میانگین متحرک با مرتبه محدود^۵ (MA(q))

مدل میانگین متحرک از مرتبه q به صورت زیر بیان می شود:

$$y_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4-3)$$

که در آن ε_t نویز سفید و θ_1 تا θ_q ضرایب مدل میانگین متحرک هستند. مقدار میانگین فرآیند میانگین متحرک به صورت زیر محاسبه می شود:

¹ Autocorrelation Coefficient

² Autocorrelation Function

³ Stationary

⁴ Cut off

⁵ Finite order

$$E(y_t) = E(\mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}) = \mu \quad (5-3)$$

و واریانس به صورت زیر:

$$\text{var}(y_t) = \gamma_y(0) = \sigma^2(1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2) \quad (6-3)$$

طبق تعریف اتوکوواریانس به ازای تاخیر k به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\gamma_y(k) = \text{cov}(y_t, y_{t+k}) = \begin{cases} \sigma^2(1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2), & k = 1, 2, \dots, q \\ 0, & k > q \end{cases} \quad (7-3)$$

با توجه به روابط (6-3) و (7-3) و تعریف رابطه (3-3)، تابع خود همبستگی مدل $MA(q)$ به دست می آید:

$$\rho_y(k) = \frac{\gamma_y(k)}{\gamma_y(0)} = \begin{cases} \frac{-\theta_k + \theta_1 \theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q}{1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2}, & k = 1, 2, \dots, q \\ 0, & k > q \end{cases} \quad (8-3)$$

ضرایب مدل توسط روابط (6-3) و (7-3) محاسبه می شوند. تابع خودهمبستگی نتیجه شده در رابطه (8-3) برای انتخاب مرتبه مناسب مدل MA استفاده می شود. به ترتیب اگر ACF بعد از تاخیر q قطع شود (میرا شود)، مدل مرتبه q ام، یعنی $MA(q)$ می تواند مورد استفاده قرار گیرد [60].

۲-۲-۲ مدل اتورگرسیو با مرتبه محدود ($AR(p)$)

مدل اتورگرسیو از مرتبه p به صورت زیر بیان می شود:

$$y_t = \delta + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (9-3)$$

برای این مدل خواهیم داشت:

$$E(y_t) = \mu = \frac{\delta}{1 - \varphi_1 - \varphi_2 - \dots - \varphi_p} \quad (10-3)$$

و

$$\gamma(k) = cov(y_t, y_{t-k}) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \gamma(k-i) + \begin{cases} \sigma^2 & \text{if } k = 0 \\ 0 & \text{if } k > 0 \end{cases} \quad (11-3)$$

با تقسیم معادله (11-3) بر $\gamma(0)$ به ازای $k > 0$ ، معادلات یول-واکر¹ به دست می آید:

$$\rho(k) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \rho(k-i), \quad k = 1, 2, \dots \quad (12-3)$$

معادلات یول-واکر در واقع مجموعه ای از معادلات تفاضلی خطی² است که با حل آنها ضرایب مدل اتورگرسیو حاصل می شود. به منظور تشخیص مرتبه مدل اتورگرسیو، ابتدا تابع خودهمبستگی جزئی³ (PACF) تعریف می شود. به ازای مقدار معین k ، معادلات یول-واکر به صورت زیر می توانند نوشته شوند:

$$\rho(j) = \sum_{i=1}^k \varphi_{ik} \rho(j-i), \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (13-3)$$

اگر رابطه (13-3) به فرم ماتریسی بازنویسی شود خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho(1) & \rho(2) & \dots & \rho(k-1) \\ \rho(1) & 1 & \rho(1) & \dots & \rho(k-2) \\ \rho(2) & \rho(1) & 1 & \dots & \rho(k-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(k-1) & \rho(k-2) & \rho(k-3) & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{1k} \\ \varphi_{2k} \\ \varphi_{3k} \\ \vdots \\ \varphi_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho(1) \\ \rho(2) \\ \rho(3) \\ \vdots \\ \rho(k) \end{bmatrix} \quad (14-3)$$

یا

$$\mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}_k = \boldsymbol{\rho}_k \quad (15-3)$$

با حل کردن رابطه (15-3) خواهیم داشت:

¹ Yule-Walker

² Linear Difference Equation

³ Partial Autocorrelation Function

$$\varphi_k = P_k^{-1} \rho_k \quad (16-3)$$

به ازای هر k دلخواه φ_{kk} تابع خودهمبستگی جزئی نامیده می شود. با این شرط که در $AR(p)$ خواهیم داشت $\varphi_{kk} = 0$ برای $k > p$. بنابراین PACF در مدل $AR(p)$ بعد از تاخیر p ام میرا می شود. این ویژگی برای تعیین مرتبه مدل اتورگرسیو بکار می رود همان طور که از روی ACF مرتبه مدل میانگین متحرک تشخیص داده می شد [۶۰]. نحوه تشخیص مرتبه ی مدل های میانگین متحرک و اتورگرسیو در جدول (۱-۳) خلاصه شده است.

جدول (۱-۳) رفتار ACF و PACF در مدل های سری زمانی [۶۰]

| Model | ACF | PACF |
|-------|------------------------|------------------------|
| MA(q) | میرا شدن پس از تاخیر q | میرایی نمایی |
| AR(p) | میرایی نمایی | میرا شدن پس از تاخیر p |

۳-۳ مدل های خاکستری برای مدل سازی و پیش بینی سری های زمانی

به یک سیستم که به طور کامل شناخته نشده باشد، سیستم خاکستری گفته می شود. در این وضعیت معمولاً به علت محدود بودن اطلاعات درباره آن سیستم، فقط بخشی از ساختار سیستم مورد شناسایی قرار می گیرد. برای غلبه بر این مشکل تئوری سیستم های خاکستری پیشنهاد شده است [۷۱]. روش های مبتنی بر این تئوری برای مدل سازی و پیش بینی سری های زمانی بکار رفته اند [۷۳]. همان طور که در مقدمه هم گفته شده است پیش بین های خاکستری بر اساس منحنی برازش شده بر آخرین داده های سری زمانی، اقدام به پیش بینی می کند. در ادامه به معرفی مشهورترین و ساده ترین مدل خاکستری (که اساس روش های خاکستری دیگر هم است) یعنی مدل خاکستری مرتبه اول یک متغیره $(GM(1,1))$ می پردازیم.

همچنین با استفاده از مقادیر خطای مدل GM(1,1) و مدل کردن دوباره این خطاها روش هایی برای کاهش خطا و بهبود دقت GM(1,1) ارائه شده است [۷۲]. یکی از این روش ها استفاده از سری فوریه بوده است که GM(1,1) تصحیح شده با فوریه^۱ (FGM) را نتیجه داده است [۷۲].

۳-۳-۱ مدل خاکستری مرتبه اول یک متغیره GM(1,1)

مدل خاکستری مرتبه اول یک متغیره، پرکاربردترین مدل خاکستری است و در کاربردهای گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش برای مدل سازی تعداد محدود سری زمانی بکار گرفته می شود و با آمدن داده های جدید مدل جدید ساخته می شود [۷۳].

یک سری زمانی به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)], \quad n \geq 4, \quad (17-3)$$

که در آن $X^{(0)}$ یک دنباله نامنفی بوده و $x^{(0)}(i)$ داده ی زمان i ام است. همچنین n تعداد داده های این سری می باشد. اگر داده ها نامنفی نباشند، می توان همه داده ها را با منفی کمترین داده جمع کرد تا همه داده ها نامنفی شوند. بعد از مدل سازی و پیش بینی می توان داده ها را دوباره نرمالیزه کرد. در این مرحله، هدف مدل سازی این داده ها و پیش بینی داده بعدی یعنی $x^{(0)}(n+1)$ است. با اعمال عملگر انباشته ساز^۲ (AGO)، به سری $X^{(0)}$ یک سری دیگری به صورت زیر تولید می شود:

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)], \quad n \geq 4, \quad (18-3)$$

که در آن

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19-3)$$

¹ Fourier corrected Grey Model

² Accumulating Generation Operator

از آنجایی که تمام داده‌های $X^{(0)}$ نامنفی هستند بنابراین سری $X^{(1)}$ یک سری صعودی^۱ خواهد بود. به عبارت دیگر نمودار $X^{(1)}$ یک نمودار بالا رونده^۲ است. بر اساس تعریف GM(1,1) فرض می‌شود که می‌توان $X^{(1)}$ را با یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول مدل کرد:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (20-3)$$

که در آن a و b پارامترهایی هستند که باید مشخص شوند. از آنجایی که رابطه $x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = x^{(0)}(k+1)$ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۷۲]:

$$x^{(0)}(k+1) + a \frac{x^{(1)}(k+1) + x^{(1)}(k)}{2} = b \quad (21-3)$$

با استفاده از روش حداقل مربعات خطا^۳ برای پارامترها a و b داریم:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_n \quad (22-3)$$

که در رابطه بالا

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (23-3)$$

و

$$\mathbf{Y}_n = [x^{(0)}(2) \quad x^{(0)}(3) \quad \dots \quad x^{(0)}(n)]^T \quad (24-3)$$

¹ Upward Sequence

² Increasing Curve

³ Least Square Error

جواب معادله دیفرانسیل رابطه (۳-۲۰) یک تابع نمایی است که جواب اولیه آن $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$ است. بنابراین به ازای $k = 1, 2, \dots, n$ برای $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ خواهیم داشت:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (۳-۲۵)$$

برای به دست آوردن مقادیر مدل شده و یا پیش بینی شده عملگر معکوس انباشته ساز^۱ (IAGO) استفاده می شود. در نهایت مدل خاکستری سری زمانی حاصل می شود:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} (1 - e^a), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (۳-۲۶)$$

رابطه (۳-۲۶) یک مدل برای داده ها از $x^{(0)}(2)$ تا $x^{(0)}(n)$ ایجاد کرده و داده بعدی یعنی $x^{(0)}(n+1)$ را پیش بینی می کند.

۳-۳-۲ تصحیح خطای GM(1,1) توسط سری فوریه

یکی از روش های تصحیح خطای GM(1,1) استفاده از سری فوریه است. با اعمال این روش \hat{X} که مدل خاکستری داده ها است به مقادیر واقعی (X) نزدیک تر می شود. به عبارت دیگر دقت مدل افزایش پیدا کرده و \hat{X} حاصل می شود. به این روش مدل خاکستری تصحیح شده با فوریه (FGM) می گویند [۷۲].

بردار باقی مانده ها^۲ (E_r) را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\mathbf{E}_r = [E_r(2) \quad E_r(3) \quad \dots \quad E_r(n)]^T \quad (۳-۲۷)$$

که در آن

$$E_r(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (۳-۲۸)$$

^۱ Inverse Accumulative Generation Operator

^۲ Residual

سری فوریه می‌تواند باقی‌مانده را به صورت زیر تقریب بزند:

$$E(k) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{i=1}^{k_a} \left[a_i \cos\left(\frac{i \cdot 2\pi}{T} k\right) + b_i \sin\left(\frac{i \cdot 2\pi}{T} k\right) \right], \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (29-3)$$

که در آن $T = n - 1$ و $k_a = \lfloor (n - 1)/2 \rfloor - 1$ توجه شود که $\lfloor (n - 1)/2 \rfloor$ جزء صحیح $(n - 1)/2$ است.

پارامترهای a_0, a_i و b_i در رابطه (29-3) توسط روش حداقل مربعات خطا تخمین زده می‌شود:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{E}_r \quad (30-3)$$

که در آن

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 2}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \cdot 2}{T}\right) & \cos\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot 2}{T}\right) & \sin\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot 2}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot 2}{T}\right) & \sin\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot 2}{T}\right) \\ \frac{1}{2} & \cos\left(\frac{2\pi \cdot 3}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \cdot 3}{T}\right) & \cos\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot 3}{T}\right) & \sin\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot 3}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot 3}{T}\right) & \sin\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot 3}{T}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{2} & \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{T}\right) & \sin\left(\frac{2\pi \cdot n}{T}\right) & \cos\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot n}{T}\right) & \sin\left(\frac{2 \cdot 2\pi \cdot n}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot n}{T}\right) & \sin\left(\frac{k_a \cdot 2\pi \cdot n}{T}\right) \end{bmatrix} \quad (31-3)$$

و

$$\mathbf{C} = [a_0 \quad a_1 \quad b_1 \quad a_2 \quad b_2 \quad \dots \quad a_{k_a} \quad b_{k_a}]^T \quad (32-3)$$

با جایگذاری مقادیر حاصل شده در \mathbf{C} در رابطه (29-3)، در نهایت مقادیر مدل شده و پیش‌بینی شده به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) + E(k), \quad k = 2, 3, \dots, n, n+1 \quad (33-3)$$

مقادیر \hat{x} به مقادیر واقعی نزدیکتر از \hat{x} خواهند بود.

فصل چهارم: روش‌های پیشنهادی برای تشخیص و تفکیک
منابع فلیکر ایستان

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا روش پیشنهادی برای تشخیص محل منابع فلیکر و تفکیک اثر منابع برای وضعیت‌هایی که چندین منبع فلیکر با فرکانس‌های متفاوت در شبکه حضور داشته باشند ارائه می‌شود. روش پیشنهادی می‌تواند برای شبکه‌های شعاعی و غیر شعاعی بکار رود و از این جهت محدودیتی وجود ندارد. تبدیل فوریه گسسته و EPLL به عنوان ابزارهای استفاده شده در این روش، قبلاً در فصل دوم معرفی شده است. اساس روش پیشنهادی طراحی یک فیلتر همبسته چند لایه برای تفکیک تن‌های فلیکری در ولتاژهای اندازه‌گیری شده، می‌باشد. پس از اعمال این فیلتر هم اثر منابع فلیکر از هم جدا شده‌اند و هم می‌توان محل اتصال منابع را تشخیص داد.

در صورت حضور چندین منبع در شبکه، هم فرکانس بودن نوسان منابع فلیکر یک وضعیت احتمالی است که روش‌های موجود در این وضعیت قابل استفاده نیستند. در این پایان‌نامه دو روش، روش آماری و روش تحلیلی، برای این حالت پیشنهاد شده است.

با فرض اطلاع از تعداد منابع هم فرکانس فلیکر در شبکه، در روش آماری ابتدا شبکه با حضور منابع فلیکر دلخواه به ازای تمامی وضعیت‌های اتصالی ممکن شبیه‌سازی می‌شود تا یک سری داده به نام داده‌های آموزش به دست آید. با استفاده از این داده‌های آموزش، دو روش پیشنهاد شده است. استفاده از الگوریتم خوشه بندی میانگین k ، و استفاده از ضریب همبستگی آماری.

در روش تحلیلی منابع فلیکر (بارهای غیرخطی نوسانی) به عنوان متغیرهای شبکه‌ی حالت پایدار در نظر گرفته می‌شوند. سپس با نوشتن معادلات حاکم بر شبکه، ماتریس ژاکوبین سیستم تشکیل می‌شود. در نهایت یک معیار برای تشخیص منابع فلیکر بر حسب علامت درایه‌های این ماتریس ارائه شده است. در این روش از جریان و ولتاژ بارها استفاده می‌شود. علاوه بر این، با استفاده از ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط انتقال، الگوریتمی جهت تشخیص محل اتصال منبع یا منابع غالب فلیکر در شبکه ارائه

شده است. در این الگوریتم پیشنهادی از گراف جهت‌دار، که به صورت خاص این منظور تعریف می‌شود، استفاده شده است.

برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی برای هر کدام از روش‌های ارائه شده انجام گرفته است. برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در هر بخش، پس از ارائه تئوری روش، نتایج شبیه‌سازی‌های مربوطه ارائه شده است.

۴-۲ تشخیص و تفکیک منابع فلیکر با فرکانس متفاوت

چنانچه در فصل دوم به صورت مفصل آمده است چنانچه منابع متعدد فلیکر در شبکه به صورت هم‌زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند و فرکانس نوسان آنها با هم متفاوت باشد، ولتاژ نوسانی اندازه‌گیری شده در هر باس دلخواه از شبکه را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$V(t) = V_c \left[1 + \sum_{i=1}^M V_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \right] \cos(\omega_c t + \theta_c) \quad (1-4)$$

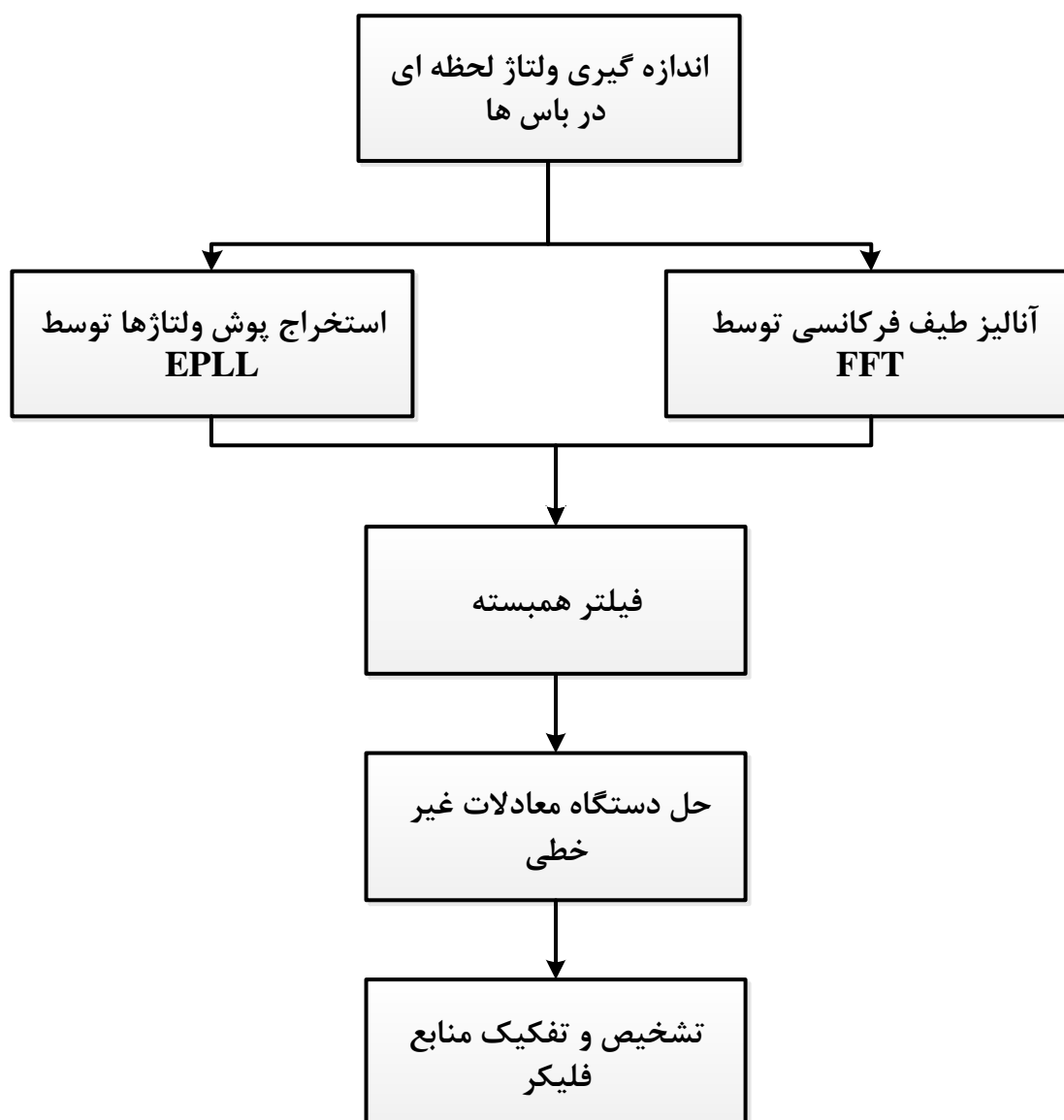
رابطه (۱-۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} V(t) = & V_c \cos(\omega_c t + \theta_c) \\ & + \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} V_c V_i \cos((\omega_c + \omega_i)t + \theta_c + \theta_i) \\ & + \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} V_c V_i \cos((\omega_c - \omega_i)t + \theta_c + \theta_i) \end{aligned} \quad (2-4)$$

چنانچه چندین منبع فلیکر هم‌زمان در شبکه مورد بهره‌برداری قرار گیرند، ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۲-۴) در نظر گرفت. برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به شبکه و تفکیک اثر هر کدام از آنها در میزان نوسان دامنه ولتاژ در هر کدام از باس‌ها، ابتدا ولتاژ لحظه‌ای باس-

ها اندازه‌گیری می‌شود. مراحل این روش در شکل (۴-۱) نشان داده می‌شود. در ادامه هر بخش توضیح داده می‌شود.

رابطه (۴-۲) نشان می‌دهد که به ازای هر تن فلیکری دو مولفه سینوسی با فرکانس‌های $\omega_c \pm \omega_i$ علاوه بر مولفه سیگنال اصلی در سیگنال ولتاژ ظاهر می‌شوند. با توجه به این ویژگی مدل مدولاسیون دامنه، می‌توان تعداد تن‌های فلیکری و فرکانس این تن‌ها را با تحلیل طیف فرکانسی ولتاژ شبکه به دست آورد. از طرف دیگر چون هر منبع فلیکر با فرکانس متفاوت با دیگری نوسان می‌کند، در واقع با



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

این تحلیل تعداد منابع فلیکر متصل به شبکه نیز به دست می‌آید. در این روش از DFT برای تحلیل طیف فرکانسی ولتاژ نوسانی استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی سریع این الگوریتم از نسخه‌ی FFT که رایج‌ترین آنهاست استفاده می‌کنیم. برای این منظور باید ولتاژ لحظه‌ای در پنجره زمانی مناسب (طول مناسب زمانی) نمونه برداری شده و ولتاژ گسسته شده به دست بیاید. اگر ولتاژ لحظه‌ای $(V(t))$ به تعداد N در هر دوره تناوب نمونه برداری شود، پس $T_s = T/N$ و در این صورت DFT نظیر این ولتاژ به صورت زیر خواهد بود:

$$V(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n) e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} ; k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-4)$$

که در آن $\omega_k = (2\pi / (T_s N))k = (2\pi / T)k$ است. اگر فرض می‌شود که $v(n)$ یک دوره تناوب از ولتاژ گسسته باشد در آن صورت $V(\omega_k)$ طیف $v(n)$ است. اگر T به عنوان یک دوره تناوب از $v(n)$ انتخاب شود، طیف خروجی تنها شامل مولفه‌هایی هستند که مضرب صحیح فرکانس پایه هستند. به عبارت دیگر اگر طول بازه (تعداد داده‌ها) تغییر کند، رزولوشن فرکانسی طیف نیز تغییر خواهد کرد.

از آنجایی که محدوده فرکانسی تن‌های فلیکری بین ۰/۱ تا ۳۵ هرتز در نظر گرفته می‌شود، در تحلیل فرکانسی ولتاژ لحظه‌ای باید دو معیار مهم زیر مورد توجه قرار گیرد:

۱. به منظور حفظ اطلاعات فرکانسی باید فرکانس نمونه برداری مناسب مطابق با قضیه نمونه-

برداری نایکوئیست انتخاب شود.

۲. باید طول زمانی مناسبی برای ولتاژ لحظه‌ای انتخاب شود که بتوانیم به رزولوشن^۱ فرکانسی

دلخواه دست پیدا کنیم.

این دو معیار به صورت زیر عملی شده است: اولاً اگر فرض کنیم که تفاوت فرکانس نوسان منابع فلیکر در حد ۰/۱ هرتز باشد، یعنی رزولوشن فرکانسی ۰/۱ باشد، در این صورت به ۱۰ ثانیه از ولتاژ

^۱ Resolution

لحظه‌ای برای تحلیل فرکانسی نیاز داریم. ثانیاً از آنجایی که بیشترین فرکانس میان‌هارمونیک ممکن به علت پدیده فلیکر ۸۵ هرتز است (۳۵ + ۵۰)، بنابراین فرکانس نمونه برداری باید بیشتر از ۱۷۰ هرتز باشد ($f_s > 2 \times 85$).

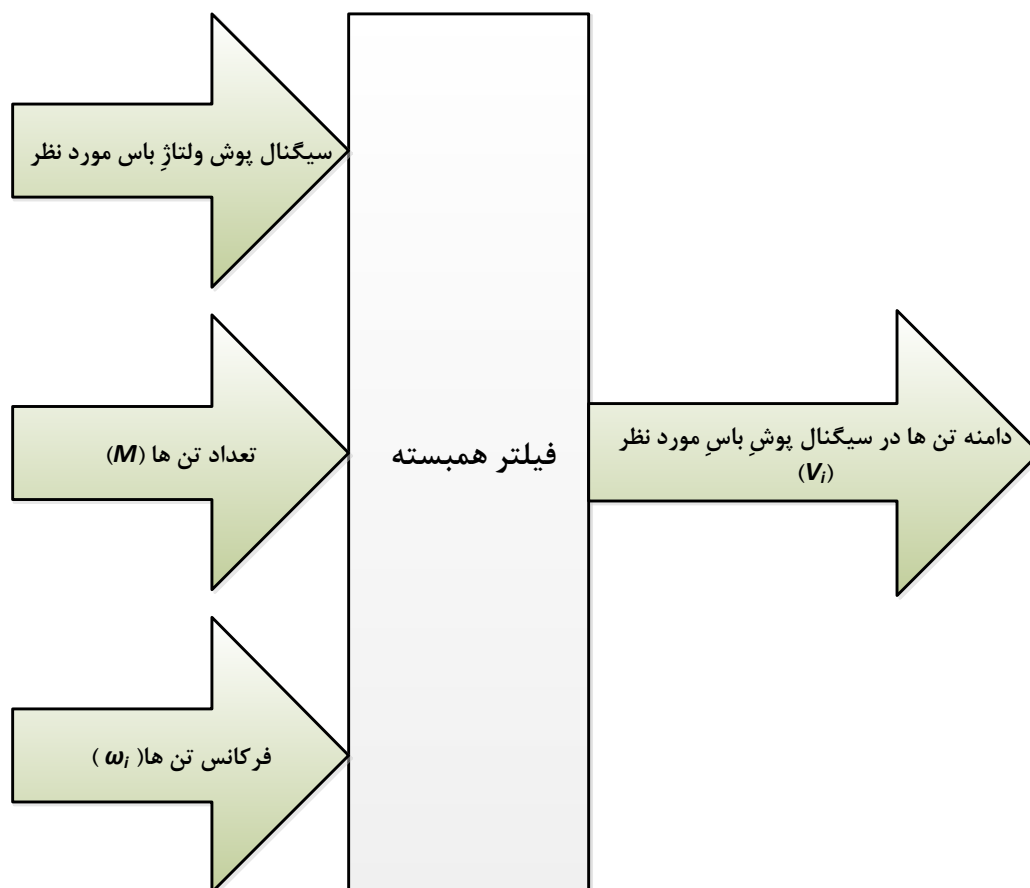
محتویات میان‌هارمونیکی ولتاژ همه‌ی باس‌ها باهم برابر است هرچند میزان آن در باس‌های مختلف یکسان نیست. چون هدف به دست آوردن تعداد و اندازه‌ی این فرکانس‌ها است، انجام تحلیل طیفی فقط در یکی از باس‌ها کافی است.

مرحله دیگر، استخراج پوش ولتاژ باس‌ها است. پوش دامنه ولتاژ تمامی باس‌ها توسط EPLL استخراج می‌شود. ساختار و نحوه عملکرد EPLL در فصل دو توضیح داده شده است. خروجی EPLL در هر باس، سیگنالی است که مجموع چندین سیگنال سینوسی (تن‌های فلیکری) است. در یک باس دلخواه پوش دامنه ($V_e(t)$) به صورت زیر خواهد بود:

$$V_e(t) = \sum_i^M V_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (4-4)$$

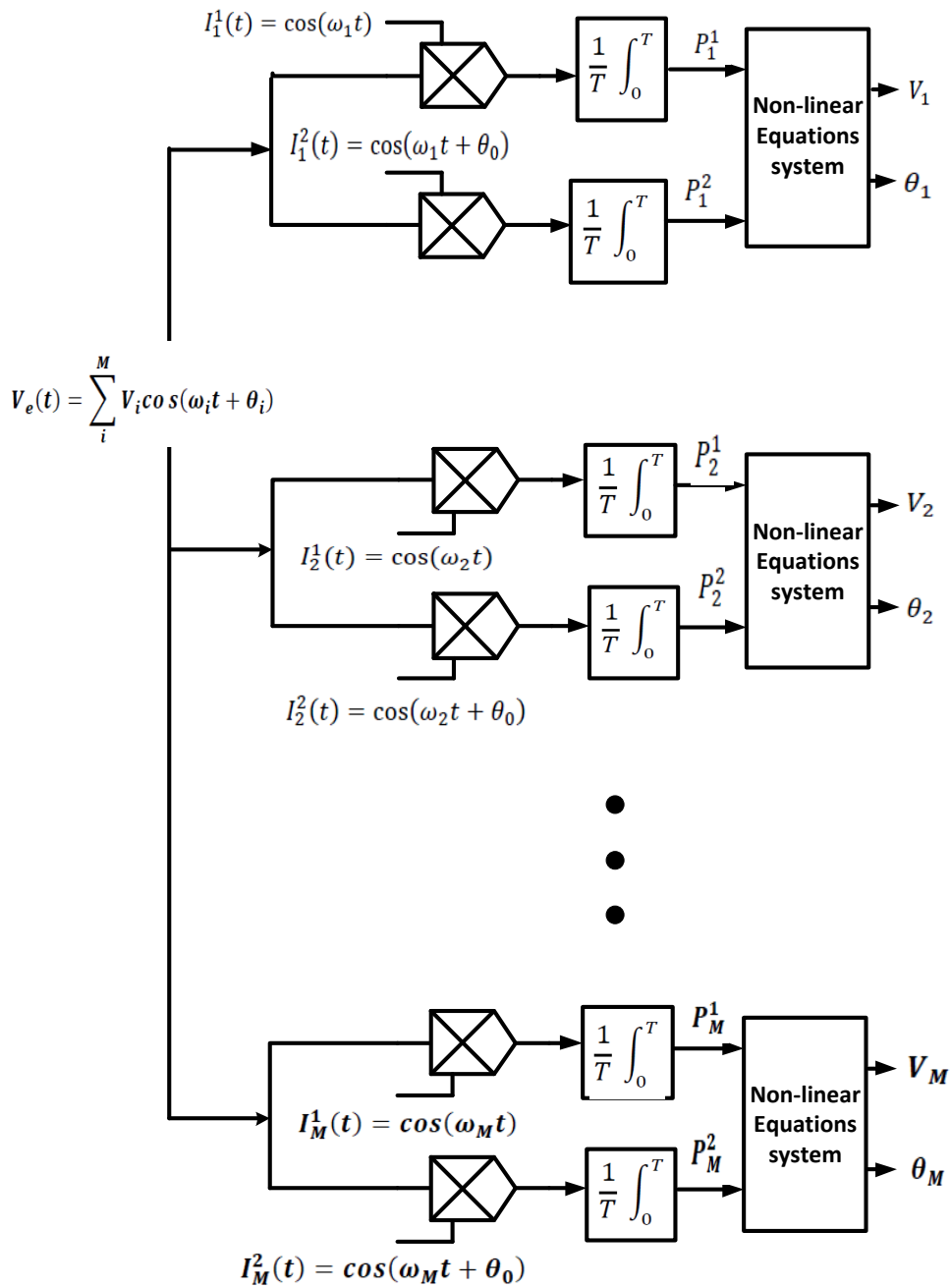
در رابطه (۴-۴) مقدار M (تعداد تن‌ها) و ω_i به ازای $i = 1, 2, \dots, M$ توسط تحلیل فرکانسی معلوم شده است.

برای محاسبه‌ی دامنه‌ی تن‌های فلیکری هر باس، به ازای هر باس شبکه یک فیلتر همبسته نیاز است. ورودی فیلتر همبسته یک باس معین عبارت است از سیگنال پوش دامنه ولتاژ آن باس، تعداد تن‌ها (M) و ω_i به ازای $i = 1, 2, \dots, M$. این نکته در شکل (۴-۲) نشان داده می‌شود. توجه شود که هرچند سیگنال پوش هر باس با سیگنال پوش باس دیگر متفاوت است اما تعداد تن‌ها و فرکانس تن‌ها در کل باس‌های شبکه ثابت است.



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

فیلتر همبسته‌ی پیشنهاد شده در واقع الگوریتمی برای تعیین دامنه‌ی تن‌های فلیکری است که در ساختار یک فیلتر همبسته نشان داده می‌شود. در شکل (۴-۳) شمای کلی فیلتر همبسته پیشنهاد شده، نشان داده می‌شود. تعداد لایه‌های فیلتر پیشنهادی برابر تعداد مولفه‌های سینوسی در سیگنال پوش (ورودی فیلتر) است. برای حالت کلی در شکل (۴-۳) فیلتر M لایه‌ای نشان داده شده است. برای مثال چنانچه پوش شامل دو مولفه سینوسی باشد (دو تن فلیکری در ولتاژ شبکه حضور داشته باشد)، فیلتر همبسته دو لایه خواهد بود.



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

در هر لایه از فیلتر یک جفت شکل موج پایه^۱ مورد نیاز است. در لایه‌ی M ام، این دو شکل موج، دو سیگنال سینوسی با دامنه واحد هستند که فرکانس هر دو آنها برابر ω_i است. اما این دو سیگنال باید نسبت به هم اختلاف فاز داشته باشند. شکل موج‌های پایه در لایه‌ی M ام به صورت زیر تعریف می‌شوند:

^۱ Basic Waveform

$$\begin{cases} I_i^1(t) = \cos(\omega_i t) \\ I_i^2(t) = \cos(\omega_i t + \theta_0) \end{cases} \quad (5-4)$$

که در آن θ_0 نشان دهنده اختلاف فاز غیر صفر است. توجه شود که در رابطه بالا اندیس پایین نشان دهنده‌ی شماره لایه و اندیس بالا شماره هرکدام از شکل موج‌های پایه است که لزوماً اختلاف فاز دارند.

در هر لایه از فیلتر، سیگنال پوش ($V_e(t)$) به هرکدام از شکل موج‌های پایه ضرب می‌شود. سپس برای اندازه‌گیری میزان همبستگی میان سیگنال ورودی (پوش) و سیگنال پایه، از خروجی ضرب‌کننده‌ها در دوره تناوب مشترک میانگین گرفته می‌شود. هرچند سیگنال پوش شامل مولفه‌های فرکانسی متفاوتی است اما مقدار میانگین فقط برای مولفه‌ای که هم فرکانس سیگنال پایه است غیر صفر خواهد شد. به عبارت دیگر اثر آن مولفه از سیگنال پوش که فرکانس آن ω_i است در خروجی میانگین‌گیر ظاهر می‌شود. در واقع در این مرحله از این واقعیت استفاده شده است که توان متوسط دو سیگنال زمانی غیر صفر است که آن دو هم فرکانس باشند.

پس از میانگین‌گیری، دو کمیت اسکالر حاصل می‌شود. برای لایه i ام، این اسکالرها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} P_i^1 = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} V_e(t) \cdot I_i^1(t) dt \\ P_i^2 = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} V_e(t) \cdot I_i^2(t) dt \end{cases} \quad (6-4)$$

مقادیر P_i^1 و P_i^2 از رابطه (6-4) به دست آمده‌اند. از طرف دیگر به صورت تحلیلی می‌توان نشان داد که رابطه (6-4) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

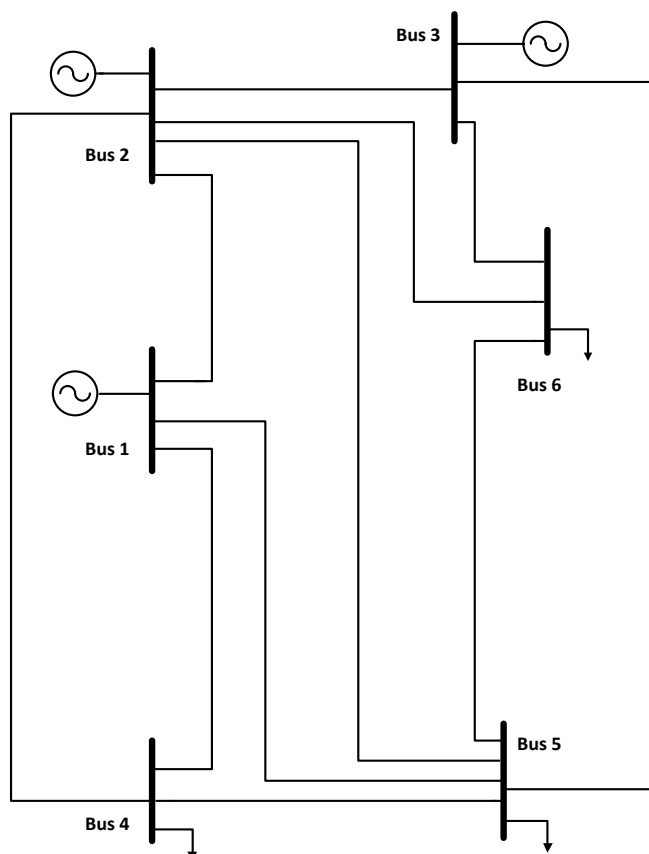
$$\begin{cases} P_i^1 = \frac{1}{2} V_i \cos(\theta_i) \\ P_i^2 = \frac{1}{2} V_i \cos(\theta_i - \theta_0) \end{cases} \quad (7-4)$$

رابطه (7-4) یک دستگاه معادله غیر خطی است که در آن V_i و θ_i مجهول‌های دستگاه می‌باشند. برای هر لایه از فیلتر یک دستگاه مشابه این حاصل می‌شود. اگر سیستم قدرت دارای n باس بوده و M تن فلیکری در ولتاژ لحظه‌ای آن وجود داشته باشد، به تعداد $n \times M$ دستگاه غیر خطی خواهیم داشت که با حل آنها دامنه تک تک تن‌ها در تمامی باس‌ها معلوم خواهد شد. برای حل این دستگاه از روش‌های عددی مانند روش نیوتن-رافسون می‌توان استفاده کرد.

با معلوم شدن دامنه هر تن فلیکری در هر باس، در واقع میزان اثر آن تن فلیکری در نوسان دامنه ولتاژ هر باس مشخص می‌شود. از آنجایی که هر تن فلیکری مرتبط با یک منبع فلیکر در شبکه است، بدین ترتیب سهم هر کدام از منابع فلیکر در میزان نوسان دامنه ولتاژ یک باس، از هم تفکیک می‌شود. از طرف دیگر به ازای تن فلیکری معین، هر باسی که بیشترین دامنه تن را داشته باشد محل اتصال منبع فلیکر نظیر آن تن خواهد بود. به این ترتیب محل اتصال هر کدام از منابع فلیکر به شبکه تشخیص داده می‌شود.

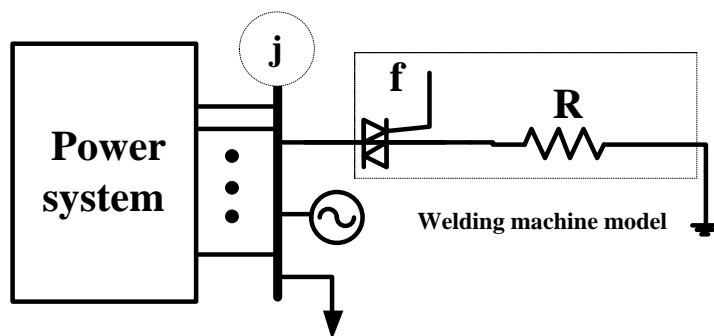
۴-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی روش‌های تشخیص محل اتصال منبع فلیکر از یک سیستم قدرت شش باسه غیر شعاعی از چندسو تغذیه شده استفاده می‌شود. این شبکه در شکل (4-4) نشان داده می‌شود و اطلاعات آن در پیوست آمده است. فرکانس نامی این شبکه ۵۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود.



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

این سیستم همان طور که در پیوست آمده است از منابع و بارهای خطی تشکیل شده است. برای مدل کردن منابع فلیکر که علاوه بر این بارها به شبکه متصل خواهند شد، از یک بار که به دوره‌ای قطع و وصل می‌شود، استفاده می‌گردد. بهره‌برداری از این بارها باعث ایجاد نوسان در دامنه ولتاژ سیستم قدرت می‌گردد. باسی که این بار (منبع فلیکر) را تغذیه می‌کند علاوه بر این بار، ممکن است به منبع یا به بار خطی متصل باشد. برای مدل کردن منبع فلیکر از یک مقاومت که با یک سوئیچ به باس دلخواه وصل می‌شود، استفاده خواهد شد. در شکل (۴-۵) مدل منبع فلیکر و اتصال آن به یک باس سیستم قدرت آمده است.



شکل (۴-۵) مدل منبع فلیکر متصل به باس شماره j

در این مدل اندازه دامنه نوسان (دامنه تن فلیکری) با اندازه مقاومت و فرکانس نوسان دامنه با فرکانس سوئیچینگ کلید تنظیم می‌شود. به عبارت دیگر اندازه این مقاومت با توان مصرفی واحد ایجاد کننده فلیکر در ارتباط است. از این سیستم قدرت و مدل منبع فلیکر در دیگر بخش‌های پایان نامه نیز استفاده خواهد شد.

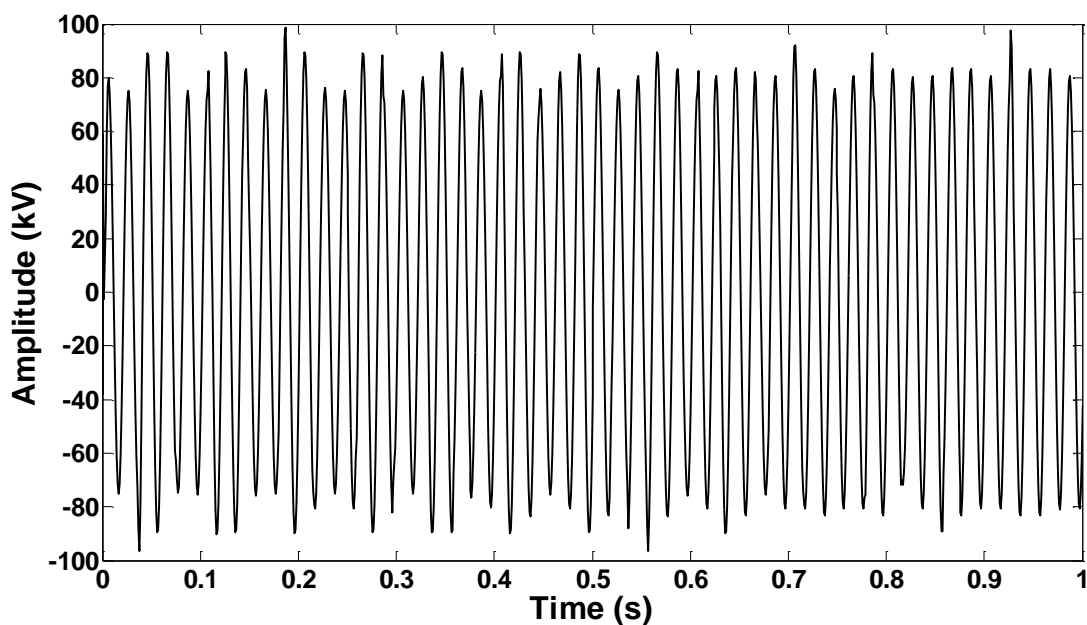
برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی و به منظور تشخیص محل اتصال منابع فلیکر با فرکانس متفاوت و تفکیک اثر آنها، پنج سناریوی مختلف برای سیستم قدرت پیشنهاد می‌گردد. جزئیات این سناریوها در جدول (۴-۱) آمده است.

در سناریوهای اول تا سوم شبکه در حضور دو منبع فلیکر با فرکانس متفاوت فرض می‌شود. در سناریوهای چهارم و پنجم سه منبع فلیکر با فرکانس متفاوت در سیستم متصل هستند. با این تفاوت که در سناریوی چهارم منابع در باس‌های متفاوتی نصب شده‌اند در حالی که در سناریوی پنجم دو منبع فلیکر از یک باس (باس دوم) تغذیه می‌شوند.

در سناریوی اول یک منبع فلیکر با فرکانس $13/5$ هرتز در باس ۶ و منبع فلیکر دیگر با فرکانس ۱۴ هرتز در باس ۵ به شبکه متصل هستند. دامنه ولتاژ در کل شبکه به علت حضور این بارها دچار نوسان خواهد شد. ولتاژ لحظه‌ای باس دوم در حضور این منابع فلیکر در شکل (۴-۶) آمده است.

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

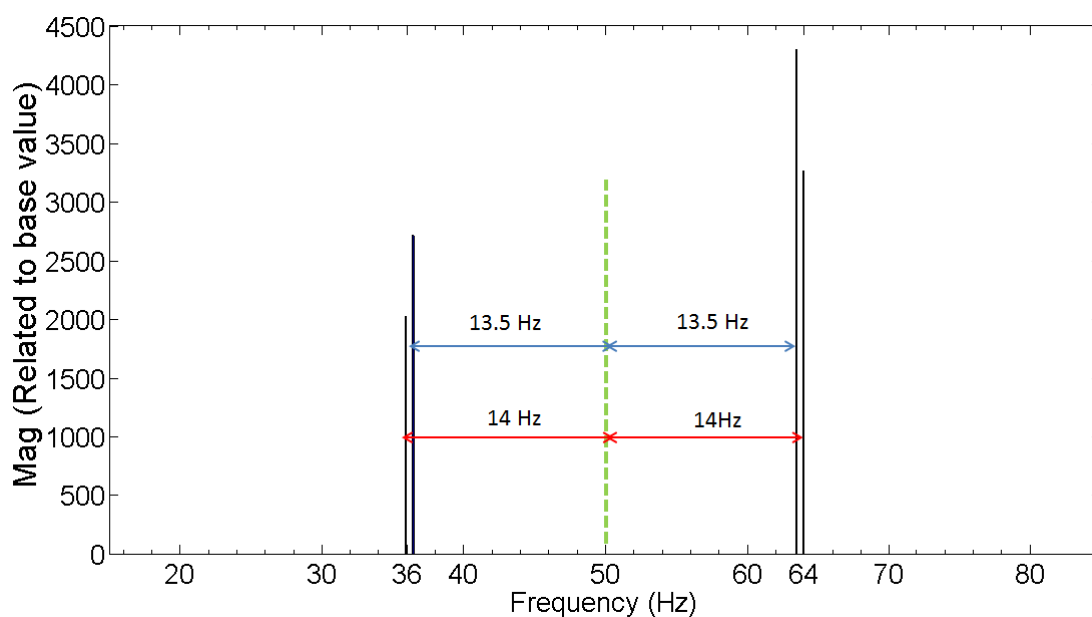
| سناریو | باسی که منبع فلیکر در آن قرار می‌گیرد | پارامترهای مدل فلیکر | |
|--------|---------------------------------------|----------------------|-------------|
| | | مقاومت (p.u) | فرکانس (Hz) |
| ۱ | ۶ | ۱/۳۲ | ۱۳/۵ |
| | ۵ | ۱/۸۹ | ۱۴ |
| ۲ | ۲ | ۱/۸۹ | ۸/۸ |
| | ۳ | ۱/۳۲ | ۱۵ |
| ۳ | ۴ | ۱/۸۹ | ۹/۵ |
| | ۳ | ۱/۳۲ | ۲۰ |
| ۴ | ۲ | ۱/۸۹ | ۸/۸ |
| | ۶ | ۱/۳۲ | ۲۰ |
| | ۵ | ۱/۸۹ | ۰/۵ |
| ۵ | ۲ | ۱/۸۹ | ۸/۸ |
| | ۲ | ۱/۳۲ | ۲۰ |
| | ۵ | ۱/۸۹ | ۰/۵ |



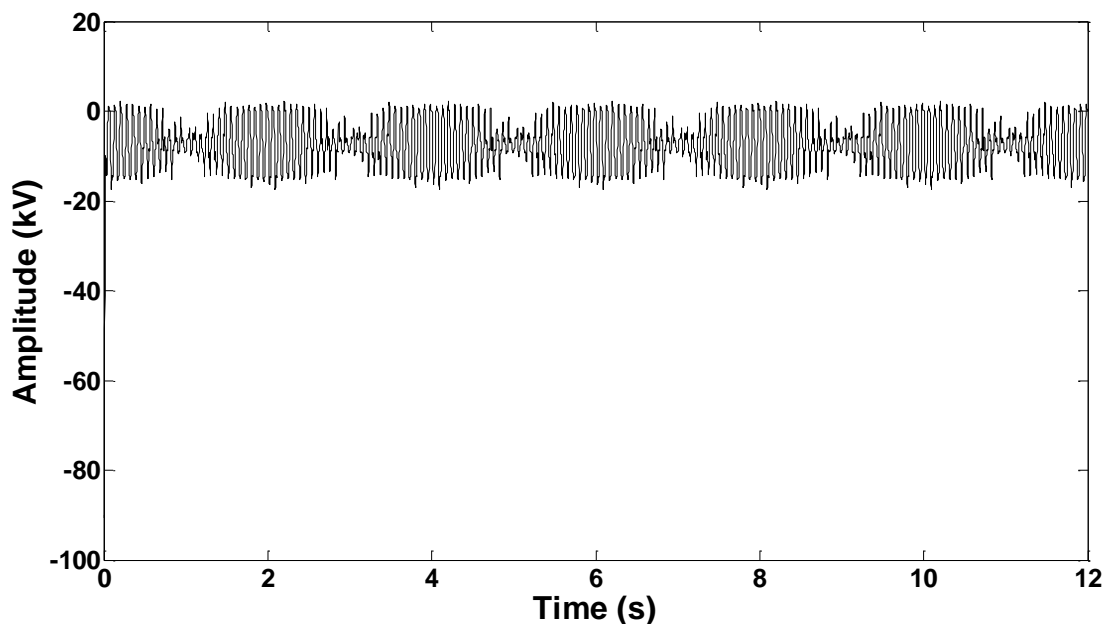
شکل (۴-۶) ولتاژ نوسانی باس دوم، سناریوی اول

برای ادامه بررسی یعنی شناسایی میان‌هارمونیک‌ها و فیلتر همبسته نیاز به ۱۰ ثانیه نمونه‌برداری از ولتاژ باس‌ها هستیم. محتویات میان‌هارمونیکی ولتاژ سیستم در این سناریو در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. در این بررسی از میان‌هارمونیک‌هایی که دامنه آنها از ۱٪ دامنه هارمونیک اصلی (۵۰ هرتز) کمتر است صرف نظر می‌شود. جفت میان‌هارمونیک ۳۶ هرتز و ۶۴ هرتز (50 ± 14) دلالت بر وجود یک منبع فلیکر با فرکانس ۱۴ هرتز می‌کنند. در عین حال جفت دیگر یعنی ۳۶/۵ هرتز و ۶۴/۵ هرتز (50 ± 13.5) نشان دهنده‌ی منبع فلیکر ۱۳/۵ هرتزی هستند. بدین ترتیب تعداد منابع فلیکر در شبکه و فرکانس نوسان آنها به درستی تشخیص داده می‌شود.

همزمان با تحلیل طیفی، برای تکمیل ورودی‌های فیلتر همبسته، سیگنال پوش دامنه ولتاژ در تمامی باس‌ها با EPLL استخراج می‌شود. برای مثال سیگنال پوش دامنه ولتاژ باس دوم در شکل (۴-۸) نشان داده می‌شود.



شکل (۴-۷) محتویات میان‌هارمونیکی ولتاژ شبکه در سناریوی اول



شکل (۸-۴) پوش دامنه ولتاژ باس دوم، سناریوی اول

این سیگنال پوش به صورت حاصل جمع دو مولفه سینوسی در نظر گرفته می‌شود که فرکانس آن دو 13.5 و 14 هرتز است. اما دامنه هیچکدام معلوم نیست. فیلتر همبسته برای محاسبه دامنه تن‌ها در پوش ولتاژ باس‌ها استفاده می‌شود. چون دو مولفه سینوسی در پوش‌ها وجود دارد فیلتر همبسته دو لایه خواهد بود. در لایه اول که متناظر تن با فرکانس 13.5 هرتز است شکل موج‌های پایه به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{cases} I_1^1(t) = \cos(2 \pi 13.5 t) \\ I_1^2(t) = \cos(2 \pi 13.5 t + 30^\circ) \end{cases} \quad (8-4)$$

در دومین لایه که متناظر با تن 14 هرتزی است، شکل موج‌های پایه به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$\begin{cases} I_2^1(t) = \cos(2 \pi 14 t) \\ I_2^2(t) = \cos(2 \pi 14 t + 30^\circ) \end{cases} \quad (9-4)$$

پس از محاسبه مقادیر متوسط برای 10 ثانیه، در هر باس یک دستگاه معادله غیرخطی دومجهوله به دست می‌آید. با حل این دستگاه‌ها به روش عددی مجهول‌ها یعنی دامنه و فاز تن‌ها محاسبه می‌شوند.

به این ترتیب عملاً در هر باس، نوسان ناشی از هرکدام از منابع از هم تفکیک می‌شود. چراکه هر تن ناشی از یک منبع فلیکر مجزا در دامنه ولتاژ باس وجود دارد. از طرف دیگر واضح است که برای یک تن فلیکری، بیشتر مقدار دامنه آن تن در باسی دیده می‌شود که منبع فلیکر نظیر آن تن، در آن باس واقع شده است.

برای سناریوی اول مقادیر دامنه تن‌ها در باس‌های شبکه در جدول (۲-۴) آمده است. در هر باس دامنه تن‌ها به تفکیک آمده است و نیز این نتایج نشان می‌دهد که منبع فلیکری که با فرکانس ۱۳/۵ هرتزی نوسان می‌کند در باس ششم و منبع دیگر که با فرکانس ۱۴ هرتزی نوسان می‌کند در باس پنجم است. البته تشخیص کاملاً درست است.

در سناریوهای دوم و سوم مانند سناریوی اول پس از تعیین محتویات میان‌هارمونیکی و استخراج پوش در باس‌ها، فیلتر همبسته مناسب (دو لایه‌ای) جهت محاسبه دامنه تن‌ها ساخته می‌شود. نتایج مربوط به این سناریوها به ترتیب در جدول (۳-۴) و (۴-۴) بیان شده است. در هر دو سناریو روش پیشنهادی در تشخیص محل اتصال منابع فلیکر و تفکیک اثر آنها موفق عمل کرده است.

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

| باس | دامنه تن فلیکری (%) | |
|-----|------------------------|----------------------|
| | تن با فرکانس ۱۳/۵ هرتز | تن با فرکانس ۱۴ هرتز |
| ۱ | ۲/۳۰۰۰ | ۱/۶۸۲۶ |
| ۲ | ۲/۴۳۴۸ | ۱/۶۶۵۲ |
| ۳ | ۲/۵۹۱۳ | ۱/۶۵۶۵ |
| ۴ | ۲/۲۴۳۵ | ۱/۶۰۴۳ |
| ۵ | ۲/۳۳۴۸ | ۱/۸۳۹۱ |
| ۶ | ۲/۶۵۲۲ | ۱/۶۰۰۰ |

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

| باس | دامنه تن فلیکری (%) | |
|-----|--------------------------|-------------------------|
| | تن با فرکانس ۸/۸ هرتز | تن با فرکانس ۱۵ هرتز |
| ۱ | ۱/۷۰۴۳ | ۲/۳۵۲۲ |
| ۲ | ۱/۸۴۳۵ | ۲/۴۶۰۹ |
| ۳ | ۱/۶۹۵۷ | ۲/۷۵۶۵ |
| ۴ | ۱/۶۶۹۶ | ۲/۲۶۹۶ |
| ۵ | ۱/۶۳۰۴ | ۲/۳۶۰۹ |
| ۶ | ۱/۶۳۹۱ | ۲/۵۲۱۷ |

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

| باس | دامنه تن فلیکری (%) | |
|-----|--------------------------|-------------------------|
| | تن با فرکانس ۹/۵ هرتز | تن با فرکانس ۲۰ هرتز |
| ۱ | ۱/۷۸۷۰ | ۲/۳۳۰۴ |
| ۲ | ۱/۷۳۴۸ | ۲/۴۸۲۶ |
| ۳ | ۱/۶۴۳۵ | ۲/۸۱۷۴ |
| ۴ | ۱/۹۲۶۱ | ۲/۲۵۲۲ |
| ۵ | ۱/۶۳۰۴ | ۲/۳۶۹۶ |
| ۶ | ۱/۵۸۲۶ | ۲/۵۵۲۲ |

در سناریوهای چهارم و پنجم چون سه تن فلیکری تشخیص داده خواهد شد بنابراین فیلتر همبسته سه لایه مورد نیاز خواهد بود. نتایج مربوط به این سناریوها در جدول‌های (۴-۵) و (۴-۶) آمده است. در جدول شماره (۴-۵) دیده می‌شود که در صورتی که تعداد منابع بیش از دو باشد نیز روش پیشنهادی در تشخیص محل اتصال منابع موفق است. مطابق نتیجه سناریوی پنجم، حتی اگر دو

منبع با فرکانس متفاوت در یک باس قرار گرفته باشند، محل آنها به درستی تشخیص داده می‌شود و اثرشان تفکیک می‌گردد.

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

| باس | دامنه تن فلیکری (%) | | |
|-----|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | تن با فرکانس ۰/۵ هرتز | تن با فرکانس ۸/۸ هرتز | تن با فرکانس ۲۰ هرتز |
| ۱ | ۱/۶۷۳۹ | ۱/۶۹۱۳ | ۲/۱۶۵۲ |
| ۲ | ۱/۶۶۰۹ | ۱/۸۳۰۴ | ۲/۲۸۷۰ |
| ۳ | ۱/۶۶۵۲ | ۱/۷۰۰۰ | ۲/۴۷۳۹ |
| ۴ | ۱/۶۰۰۰ | ۱/۶۵۲۲ | ۲/۱۰۸۷ |
| ۵ | ۱/۸۲۶۱ | ۱/۶۱۳۰ | ۲/۲۰۸۷ |
| ۶ | ۱/۶۲۶۱ | ۱/۶۴۳۵ | ۲/۵۳۹۱ |

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

| باس | دامنه تن فلیکری (%) | | |
|-----|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | تن با فرکانس ۰/۵ هرتز | تن با فرکانس ۸/۸ هرتز | تن با فرکانس ۲۰ هرتز |
| ۱ | ۱/۶۸۲۶ | ۱/۷۳۴۸ | ۲/۳۷۳۹ |
| ۲ | ۱/۶۶۵۲ | ۱/۷۴۰۰ | ۲/۵۶۵۲ |
| ۳ | ۱/۶۶۹۶ | ۱/۷۳۹۶ | ۲/۳۷۳۹ |
| ۴ | ۱/۶۰۴۳ | ۱/۷۰۰۰ | ۲/۳۰۸۷ |
| ۵ | ۱/۸۳۴۸ | ۱/۶۵۲۲ | ۲/۲۵۶۵ |
| ۶ | ۱/۶۲۱۷ | ۱/۶۷۳۹ | ۲/۲۷۸۳ |

۴-۳ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس به روش آماری

در شرایطی که فرکانس منابع فلیکر متفاوت می‌باشد، فرکانس منابع فلیکر به عنوان یک مشخصه برای شناسایی محل اتصال آنها بکار گرفته می‌شود. ولی در شرایطی که منابع فلیکر توزیع شده در شبکه قدرت به صورت هم فرکانس نوسان کنند، تشخیص محل اتصال آنها به سادگی وضعیت فرکانس متفاوت نیست.

در شرایط فلیکر هم فرکانس، چون حاصل جمع سینوسی‌های هم فرکانس یک سینوسی با همان فرکانس خواهد بود، بنابراین در دامنه ولتاژ شبکه تنها یک تن فلیکری وجود خواهد داشت و رابطه (۴-۱) در این شرایط به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$V(t) = V_c [1 + V \cos(\omega t + \theta)] \cos(\omega_c t + \theta_c) \quad (۴-۱۰)$$

که در آن V دامنه تن فلیکری و ω فرکانس فلیکر در ولتاژ لحظه‌ای مورد نظر است. همانند روشی که برای فرکانس متفاوت ارائه شده، ω توسط تحلیل طیفی قابل محاسبه است. با فرض معلوم بودن تعداد منابع فلیکر روش پیشنهادی از چهار بخش کلی تشکیل می‌شود که به صورت شماتیک در شکل (۴-۹) نشان داده می‌شود.

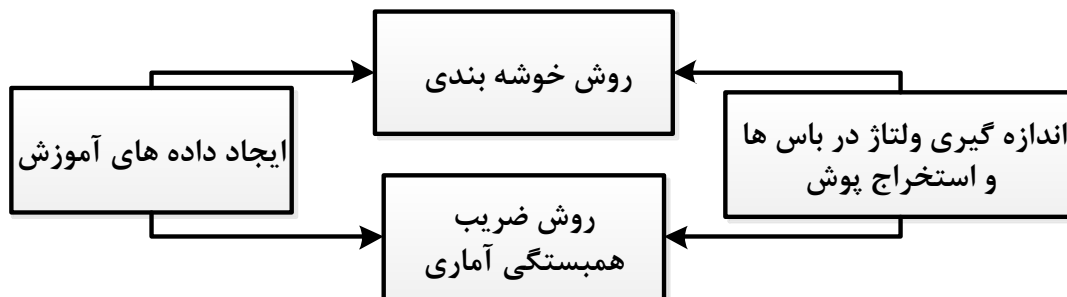
برای ایجاد داده‌های آموزش فرض می‌شود که اطلاعات سیستم قدرت مورد مطالعه از جمله تعداد باس‌ها و تعداد منابع فلیکر معلوم است. قدم اول در ایجاد داده‌های آموزش، تعیین تعداد حالت‌های ممکن برای نحوه اتصال منابع فلیکر به باس‌های سیستم قدرت است. فرض کنید n تعداد باس‌های سیستم قدرت و k تعداد منابع فلیکر در آن شبکه باشد، L تعداد حالت‌های ممکن برای نحوه اتصال منابع فلیکر به باس‌های مختلف شبکه است که برابر با تعداد جواب‌های صحیح و نامنفی معادله زیر است:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = k \quad (4-11)$$

که در آن x_i تعداد منابع فلیکری است که به باس i متصل شده است.

مطابق تئوری ترکیبات^۱، L به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L = \binom{k+n-1}{n-1} = c(k+n-1, n-1) \quad (4-12)$$



شکل (۴-۹) ساختار کلی روش پیشنهادی برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس

^۱ Combination

سپس با انتخاب k منبع فلیکری که همه‌ی آنها فرکانس دلخواه ولی یکسانی دارند، شبکه را در حضور این منابع فلیکر در L حالت شبیه‌سازی می‌شود. به عبارت دیگر برای هر وضعیت ممکن برای اتصال k منبع فلیکر یکبار شبیه‌سازی انجام می‌شود.

بردار دامنه نوسان (V) در هر وضعیت سیستم (هر کدام از شبیه‌سازی‌ها) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \quad (۱۳-۴)$$

که در آن V_i دامنه تن فلیکری ولتاژ باس i ام است.

در هر شبیه‌سازی یک بردار دامنه نوسان (V) متفاوت حاصل می‌شود و با نام c_j ذخیره می‌شود. اندیس j نشان دهنده یکی از وضعیت‌های محتمل برای نحوه اتصال است. بنابراین در نهایت پس از شبیه‌سازی تمام L حالت ممکن، بردارهای c_1, c_2, \dots, c_L ایجاد می‌شود. مجموعه‌ای را که شامل همه-ی این بردارها است، به نام مجموعه C تعریف می‌کنیم:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\} \quad (۱۴-۴)$$

مجموعه C همان داده‌های آموزش است. هر عضو این مجموعه از نحوه اتصال متفاوت منابع فلیکر به شبکه حاصل شده‌اند. به عبارت دیگر هر عضو این مجموعه متناظر با یک وضعیت اتصال منابع فلیکر به شبکه هستند. اگرچه این داده‌ها برای منابع فلیکر هم فرکانس دلخواهی ایجاد می‌شود اما از این داده‌ها برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکری استفاده می‌شود که فرکانس و توان مصرفی آنها لزوماً برابر فرکانس و توان مصرفی منابع فلیکر شبیه‌سازی شده برای تولید مجموعه‌ی آموزشی نمی‌باشد.

اکنون که داده‌های آموزش ایجاد شده است، اگر در سیستم منابع فلیکر هم فرکانس به صورت هم-زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند برای تشخیص محل اتصال آنها باید ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها اندازه-

گیری شده و پوش آنها توسط EPLL استخراج شود. در این مرحله برای سیستم واقعی بردار دامنه نوسان (V) را تشکیل می‌دهیم.

با داشتن داده‌های آموزش (مجموعه‌ی C) و بردار نوسان دامنه شبکه (V) دو روش برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر ارائه می‌شود.

۴-۳-۱ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به خوشه‌بندی میانگین k

هدف از خوشه‌بندی قرار دادن داده‌ها در دسته‌هایی است که اعضای هر دسته بیشترین شباهت را دارند. الگوریتم خوشه‌بندی میانگین k ، یکی از رایج‌ترین روش‌های خوشه‌بندی بوده و به علت سادگی و کارایی بالایی که دارد در حوزه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم با انتخاب تصادفی مراکز خوشه‌ها شروع می‌کند. هر داده‌ی جدید در خوشه‌ای قرار می‌گیرد که فاصله داده‌ی جدید با مرکز آن خوشه کمترین باشد. سپس مرکز خوشه‌ها مجدداً محاسبه می‌شوند. به طوری که میانگین داده‌های قرار گرفته در یک خوشه مرکز خوشه را تعیین می‌کند.

برای m داده به صورت $x_1, x_2, \dots, x_m \in R^n$ ، الگوریتم خوشه‌بندی میانگین k به صورت زیر بیان می‌شود [۷۷]:

گام ۱: انتخاب تعداد خوشه‌ها (l) به شرطی که $l < m$.

گام ۲: انتخاب l داده از بین m داده موجود به عنوان مراکز خوشه‌ها، یعنی برای $z = 1, 2, \dots, l$ خواهیم داشت $c_j = x_j$. که مرکز خوشه‌ی z ام است.

گام ۳: هر کدام از داده‌ها یعنی x_i بر اساس ملاک کمترین فاصله از مرکز در یکی از خوشه قرار می‌-

$$\|x_i - c_j^*\| = \min_j \|x_i - c_j\|, \quad 1 \leq j \leq l; \text{ اگر } j^* \text{ قرار خواهد گرفت اگر}$$

گام ۴: مراکز خوشه‌ها براساس میانگین اعضای خوشه دوباره محاسبه می‌شود، یعنی $c_j = \frac{1}{m_j} \sum_{i \in C_j} x_j$; $1 \leq j \leq l$ که در آن m_j تعداد داده‌های خوشه j ام بوده و C_j مرکز آن خوشه است.

در این روش برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به این ترتیب از الگوریتم خوشه‌بندی استفاده می‌شود که اعضای مجموعه‌ی داده‌های آموزش (C) که قبلاً ایجاد شده است به عنوان مراکز خوشه‌ها در نظر گرفته می‌شود. یعنی مراکز خوشه‌ها بردارهایی با بُعد n هستند (n تعداد باس‌های سیستم است). بردار دامنه نوسان سیستم (V) به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. اگر V در خوشه i ام به مرکزیت C_i قرار بگیرد، در این صورت نحوه اتصال منابع فلیکر به شبکه (باس‌هایی که بار فلیکرها در آنها قرار دارند) مانند وضعیت i ام در فرایند ایجاد داده‌های آموزش است. به عبارت دیگر از آنجایی که C_i دلالت به یک وضعیت خاص اتصال منابع به شبکه دارد و V در خوشه‌ی مربوط به آن قرار گرفته است، نتیجه گرفته می‌شود که منابع فلیکر به همان باس‌هایی متصل هستند در ایجاد C_i متصل بودند.

۴-۳-۲ تشخیص محل اتصال منابع فلیکر به کمک ضریب همبستگی آماری

ضریب همبستگی آماری برای نشان دادن میزان ارتباط دو متغیر تصادفی یا دو بردار بکار می‌رود. میانگین بردار n بعدی X یعنی μ_X و واریانس آن یعنی σ_X^2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_X = E[X] = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (۴-۱۵)$$

و

$$\sigma_X^2 = E[X^2] - \mu_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \mu_X^2 \quad (۴-۱۶)$$

کوواریانس دو بردار هم بُعد X و Y یعنی σ_{XY} به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\sigma_{XY} = E[XY] - \mu_X \mu_Y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2}{n} - \mu_X \mu_Y \quad (17-4)$$

در نهایت، ضریب همبستگی دو بردار X و Y به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (18-4)$$

که در آن σ_{XY} کوواریانس دو بردار X و Y ، σ_X و σ_Y به ترتیب جذر واریانس یا انحراف معیار¹ عناصر بردار X و Y هستند.

اندازه‌ی ضریب همبستگی مقدار محدودی دارد به صورتی که:

$$-1 \leq \rho \leq 1 \quad (19-4)$$

این ویژگی ضریب همبستگی به صورت زیر توضیح داده می‌شود:

- اگر تغییرات دو بردار کاملاً مستقل از هم باشند، $\sigma_{XY} = 0$. بنابراین $\rho = 0$.
- اگر تغییرات دو بردار کاملاً مشابه هم باشند، در این صورت $\rho = 1$.
- اگر تغییرات دو بردار کاملاً معکوس هم باشند، در این صورت $\rho = -1$.

بر اساس آنچه گفته شد، ضریب همبستگی می‌تواند نشان دهنده‌ی میزان تشابه دو بردار باشد.

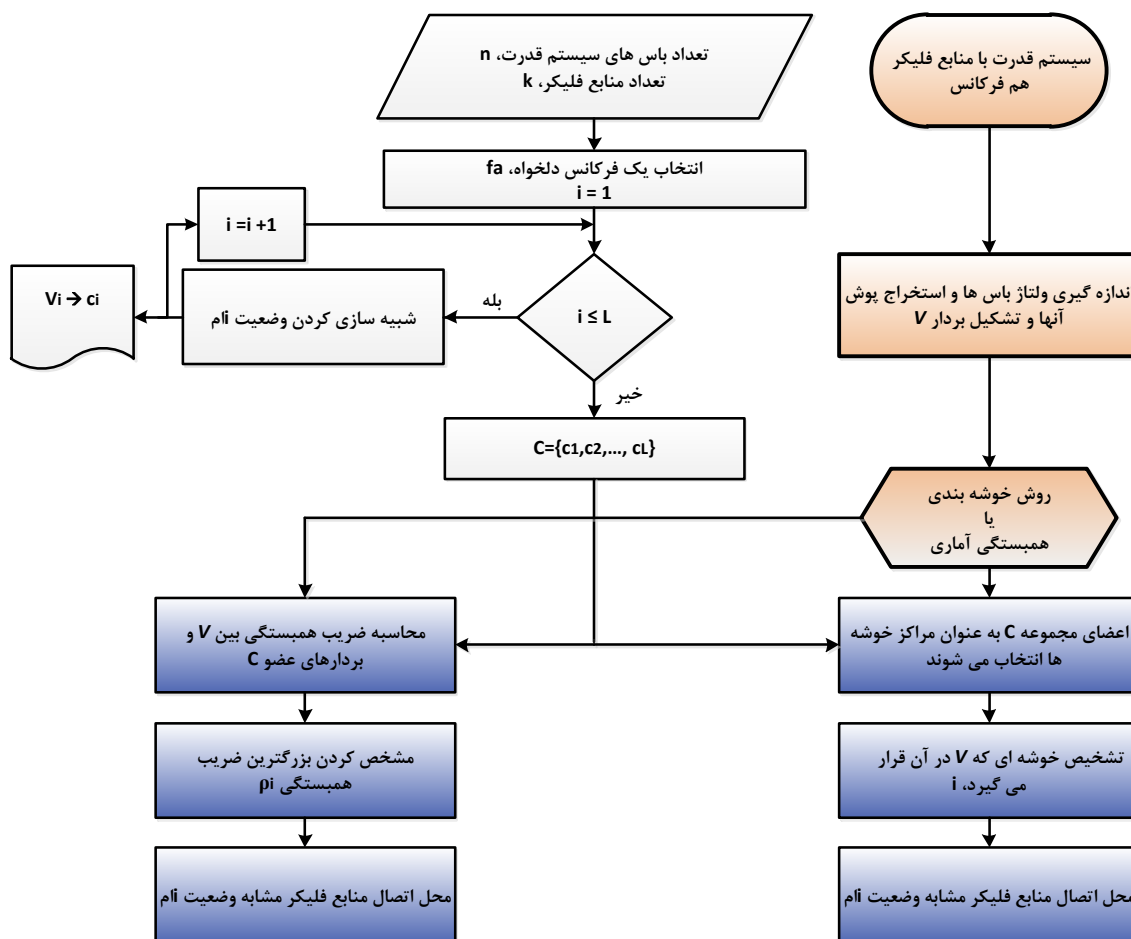
برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس به روش ضریب همبستگی آماری، پس از اندازه‌گیری ولتاژ در باس‌ها و استخراج پوش آنها توسط EPLL، بردار V را تشکیل می‌دهیم. سپس ضریب همبستگی بردار V را با تک تک بردارهای عضو C محاسبه می‌شود. فرض کنید بیشترین مقدار ضریب همبستگی‌های محاسبه شده بین V با بردار c_i به دست بیاید، یعنی:

$$\rho_{V,c_i} > \rho_{V,c_j} \quad j = 1, 2, \dots, L ; j \neq i \quad (20-4)$$

¹ Standard Deviation

در این صورت نتیجه گرفته می‌شود که محل اتصال منابع فلیکر در شبکه همانند وضعیت λ است که در مرحله ایجاد داده‌های آموزش در نظر گرفته شده است. این نتیجه بدلیل آن است که بردار V که نشان دهنده چگونگی نوسان کردن دامنه ولتاژ در باس‌های شبکه است، بیشترین تشابه را به وضعیت نوسان ولتاژ باس‌ها در وضعیت λ فرایند آموزش دارد.

فلوچارت دو روش پیشنهادی برای تشخیص محل منابع فلیکر هم فرکانس در شبکه، که از داده‌های آموزش استفاده می‌کنند در شکل (۴-۱۰) آمده است.



شکل (۴-۱۰) فلوچارت روش‌های مبتنی بر آموزش برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس

۳-۳-۴ نتایج شبیه سازی

در این روش قدم اول ایجاد داده‌های آموزش است. برای این منظور از دو منبع فلیکر مشابه با مقاومت $1/89$ پریونیت و فرکانس 10 هرتز استفاده کرده‌ایم. این دو منبع در 21 حالت مختلف می‌تواند به سیستم متصل شود. پس از شبیه‌سازی کردن تمام این 21 حالت، و ایجاد بردار V در هر کدام از حالت‌ها، در نهایت مجموعه C ایجاد شده است. در ادامه سه سناریو برای سیستم پیشنهاد می‌شود و هر دو روش پیشنهادی (خوشه بندی با الگوریتم میانگین k و ضریب همبستگی آماری) به کمک داده‌های آموزش ایجاد شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

سناریوی اول

در این سناریو شبکه در حضور دو منبع فلیکر هم فرکانس فرض می‌شود. مقاومت این منابع $1/32$ پریونیت و فرکانس آنها 8 هرتز است. تمام جایگشت‌های^۱ ممکن (21 حالت مختلف) برای نحوه اتصال این دو منبع به شبکه جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد که توانایی روش‌های پیشنهادی مورد سنجش قرار گیرد. محل اتصال واقعی این دو منبع و محل اتصال تشخیص داده شده توسط روش‌های پیشنهادی در جدول (۷-۴) آمده است. مقایسه عملکرد دو روش نیز در جدول (۸-۴) خلاصه شده است. از این جدول مشاهده می‌شود که در روش خوشه‌بندی برای بیش از 76% حالت‌ها و در روش ضریب همبستگی برای بیش از 90% حالت‌ها، محل اتصال منابع فلیکر به درستی تشخیص داده شده است. همچنین تعداد حالت‌هایی که این دو روش محل اتصال هر دو منبع را اشتباه تشخیص داده باشند صفر است. به عبارت دیگر در تمامی حالت‌های ممکن برای محل اتصال منابع، دست‌کم محل یکی از منابع به درستی تشخیص داده شده است.

¹ Permutation

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

| باس محل اتصال منابع فلیکر | باس‌های تشخیص داده شده به عنوان محل اتصال منابع فلیکر | |
|---------------------------|---|-------------|
| | روش خوشه‌بندی | روش همبستگی |
| ۱و۱ | ۱و۱ | ۱و۱ |
| ۱و۲ | ۱و۴ | ۱و۴ |
| ۱و۳ | ۱و۳ | ۱و۳ |
| ۱و۴ | ۱و۴ | ۱و۴ |
| ۱و۵ | ۱و۵ | ۱و۵ |
| ۱و۶ | ۱و۳ | ۱و۶ |
| ۲و۲ | ۲و۲ | ۲و۲ |
| ۲و۳ | ۲و۳ | ۲و۳ |
| ۲و۴ | ۲و۴ | ۴و۴ |
| ۲و۵ | ۲و۵ | ۲و۵ |
| ۲و۶ | ۲و۶ | ۲و۶ |
| ۳و۳ | ۳و۳ | ۳و۳ |
| ۳و۴ | ۳و۴ | ۳و۴ |
| ۳و۵ | ۳و۵ | ۳و۵ |
| ۳و۶ | ۶و۶ | ۳و۶ |
| ۴و۴ | ۴و۴ | ۴و۴ |
| ۴و۵ | ۴و۵ | ۴و۵ |
| ۴و۶ | ۳و۴ | ۴و۶ |
| ۵و۵ | ۵و۵ | ۵و۵ |
| ۵و۶ | ۵و۶ | ۵و۶ |
| ۶و۶ | ۳و۶ | ۶و۶ |

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

| روش | تعداد تشخیص‌های درست | تشخیص محل یکی از منابع | تعداد تشخیص‌های غلط | تعداد کل جایگشت‌ها |
|-----------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| خوشه بندی | ۱۶ | ۵ | ۰ | ۲۱ |
| همبستگی | ۱۹ | ۲ | ۰ | ۲۱ |

سناریوی دوم

در این سناریو هم شبکه در حضور دو منبع فلیکر هم فرکانس فرض می‌شود. مقاومت این منابع $1/6$ پریونیت و فرکانس آنها ۱۳ هرتز است. تمام جایگشت‌های ممکن برای نحوه اتصال این دو منبع به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. محل اتصال این دو منبع و محل تشخیص داده شده توسط روش-های پیشنهادی در جدول (۴-۹) آمده است. مقایسه عملکرد دو روش نیز در جدول (۴-۱۰) خلاصه شده است. در روش خوشه‌بندی برای بیش از ۸۰٪ حالت‌ها و در روش همبستگی آماری برای بیش از ۷۶٪ حالت‌های شبیه‌سازی شده محل اتصال منابع به درستی تشخیص داده شده است. تعداد وضعیت‌های اتصالی منابع که کلاً اشتباه تشخیص داده شده‌اند در روش خوشه‌بندی کمتر از ۵٪ بوده و روش همبستگی صفر است.

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

| باس محل اتصال منابع فلیکر | باس‌های تشخیص داده شده به عنوان محل اتصال منابع فلیکر | |
|---------------------------|---|-------------|
| | روش خوشه‌بندی | روش همبستگی |
| ۱و۱ | ۱و۲ | ۱و۱ |
| ۱و۲ | ۱و۲ | ۱و۱ |
| ۱و۳ | ۱و۳ | ۱و۳ |
| ۱و۴ | ۱و۴ | ۱و۴ |
| ۱و۵ | ۱و۵ | ۱و۵ |
| ۱و۶ | ۱و۶ | ۱و۶ |
| ۲و۲ | ۲و۲ | ۲و۲ |
| ۲و۳ | ۲و۳ | ۲و۳ |
| ۲و۴ | ۲و۴ | ۲و۴ |
| ۲و۵ | ۲و۵ | ۵و۶ |
| ۲و۶ | ۲و۶ | ۲و۶ |
| ۳و۳ | ۶و۶ | ۳و۶ |
| ۳و۴ | ۳و۴ | ۳و۴ |
| ۳و۵ | ۳و۵ | ۳و۵ |
| ۳و۶ | ۳و۶ | ۳و۶ |
| ۴و۴ | ۴و۴ | ۴و۴ |
| ۴و۵ | ۳و۴ | ۵و۶ |
| ۴و۶ | ۴و۶ | ۴و۶ |
| ۵و۵ | ۵و۵ | ۵و۵ |
| ۵و۶ | ۵و۶ | ۳و۵ |
| ۶و۶ | ۳و۶ | ۶و۶ |

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

| روش | تعداد تشخیص‌های درست | تشخیص محل یکی از منابع | تعداد تشخیص‌های غلط | تعداد کل جایگشت‌ها |
|-----------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| خوشه بندی | ۱۷ | ۳ | ۱ | ۲۱ |
| همبستگی | ۱۶ | ۵ | ۰ | ۲۱ |

سناریوی سوم

در این سناریو دو منبع فلیکر حاضر در شبکه اندازه متفاوت دارند. به عبارت دیگر با وجود یکسان بودن فرکانس نوسان این دو منبع، توان مصرفی آنها (مقدار مقاومت در مدل منبع فلیکر) برابر نیست. به همین علت تعداد جایگشت‌های از سناریوهای قبلی بیشتر بوده و برابر ۳۶ است. منبع فلیکر شماره یک دارای مقاومت $1/6$ پریونیت و منبع فلیکر شماره دو دارای مقاومت $1/32$ پریونیت است. فرکانس نوسان هر دو برابر ۱۰ هرتز می‌باشد. نتایج حاصله از روش‌های پیشنهادی برای تشخیص محل اتصال منابع در جدول (۴-۱۱) آمده است. عملکرد روش‌ها در جدول (۴-۱۲) مقایسه شده است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که در روش خوشه‌بندی در بیش از ۷۷٪ موارد و در روش همبستگی آماری در بیش از ۸۳٪ موارد محل اتصال منابع فلیکر به درستی تشخیص داده شده است. همچنین روش همبستگی بدون تشخیص غلط و روش خوشه‌بندی در کمتر از ۳٪ موارد تشخیص غلط داده است.

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

| باس محل اتصال منابع فلیکر | | باس‌های تشخیص داده شده به عنوان محل اتصال منابع فلیکر | |
|---------------------------|--------------|---|-------------|
| منبع شماره ۱ | منبع شماره ۲ | روش خوشه‌بندی | روش همبستگی |
| ۱ | ۱ | ۱و۱ | ۱و۱ |
| ۱ | ۲ | ۱و۲ | ۱و۲ |
| ۲ | ۱ | ۱و۲ | ۱و۱ |
| ۱ | ۳ | ۱و۳ | ۱و۳ |
| ۳ | ۱ | ۱و۳ | ۱و۳ |
| ۱ | ۴ | ۱و۴ | ۱و۴ |
| ۴ | ۱ | ۴و۴ | ۴و۴ |
| ۱ | ۵ | ۱و۵ | ۱و۵ |
| ۵ | ۱ | ۱و۵ | ۱و۵ |
| ۱ | ۶ | ۱و۳ | ۱و۶ |
| ۶ | ۱ | ۱و۶ | ۱و۶ |
| ۲ | ۲ | ۲و۲ | ۲و۲ |
| ۲ | ۳ | ۲و۳ | ۲و۳ |
| ۳ | ۲ | ۲و۶ | ۲و۳ |
| ۲ | ۴ | ۲و۴ | ۴و۴ |
| ۴ | ۲ | ۲و۲ | ۲و۲ |
| ۲ | ۵ | ۲و۵ | ۲و۵ |
| ۵ | ۲ | ۲و۵ | ۲و۵ |
| ۲ | ۶ | ۲و۶ | ۲و۶ |
| ۶ | ۲ | ۲و۶ | ۲و۶ |
| ۳ | ۳ | ۳و۳ | ۳و۳ |
| ۳ | ۴ | ۴و۶ | ۴و۶ |
| ۴ | ۳ | ۴و۶ | ۳و۴ |
| ۳ | ۵ | ۳و۵ | ۳و۵ |
| ۵ | ۳ | ۳و۵ | ۳و۵ |
| ۳ | ۶ | ۳و۶ | ۳و۶ |
| ۶ | ۳ | ۳و۶ | ۳و۶ |
| ۴ | ۴ | ۴و۴ | ۴و۴ |
| ۴ | ۵ | ۱و۲ | ۴و۵ |
| ۵ | ۴ | ۴و۵ | ۴و۵ |
| ۴ | ۶ | ۴و۶ | ۴و۶ |
| ۶ | ۴ | ۴و۶ | ۴و۶ |
| ۵ | ۵ | ۵و۵ | ۵و۵ |
| ۵ | ۶ | ۵و۶ | ۵و۶ |
| ۶ | ۵ | ۵و۶ | ۳و۵ |
| ۶ | ۶ | ۳و۶ | ۶و۶ |

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

| روش | تعداد تشخیص‌های درست | تشخیص محل یکی از منابع | تعداد تشخیص‌های غلط | تعداد کل جایگشت‌ها |
|-----------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| خوشه بندی | ۲۸ | ۷ | ۱ | ۳۶ |
| همبستگی | ۳۰ | ۶ | ۰ | ۳۶ |

۴-۴ روش تحلیلی برای تشخیص منابع فلیکر هم فرکانس

در این بخش ابتدا با در نظر گرفتن بارهای فلیکرزا (منابع فلیکر) به عنوان متغیرهای شبکه و تشکیل ماتریس ژاکوبین^۱ سیستم، ملاکی برای تشخیص منابع فلیکر ارائه می‌شود. در این روش تک نقطه^۲ که از جریان و ولتاژ بارها استفاده می‌شود، براساس علامت توان فلیکر بارها درباره منبع فلیکر بودن آنها قضاوت می‌شود. برخلاف کارهای قبلی که در فصل دوم به آنها اشاره شده است، این روش برای هر نوع شبکه اعم از شعاعی و غیر شعاعی کاربرد دارد.

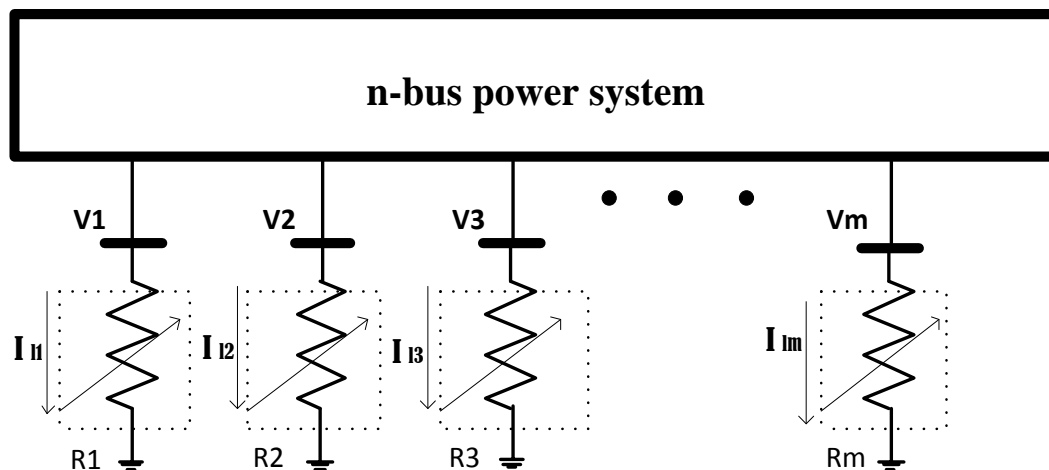
همچنین با استفاده از ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط انتقال نحوه انتقال فلیکر در شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به کمک گراف‌های جهت‌دار که به صورت خاصی تعریف می‌شوند، از روی این داده‌ها به تشخیص منابع فلیکر شبکه یا منبع غالب در شبکه پرداخته می‌شود.

۴-۴-۱ روش تک نقطه‌ای برای تشخیص منابع فلیکر

یک سیستم قدرت n باسه که m منبع فلیکر هم فرکانس به صورت هم‌زمان در آن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند را به صورت شکل (۴-۱۱) در نظر بگیرید که در آن $m \leq n$ می‌باشد.

^۱ Jacobian Matrix

^۲ Single point



شکل (۱۱-۴) سیستم قدرت با منابع فلیکر

در این سیستم به علت تغییر امپدانس و توان مصرفی بارهای فلیکرزا، دامنه ولتاژ و جریان این بارها دچار نوسان می‌شوند. معادلات حاکم بر این سیستم در حالت پایدار می‌تواند از روش‌های مختلفی مانند تحلیل گره به دست آید. تاثیر ساختار شبکه، اندازه پارامترهای سیستم و مقدار بارهای آن در این معادلات ظاهر می‌شوند. در سیستم شکل (۱۱-۴) نوسان دامنه ولتاژ و جریان بارها تابعی از متغیرهای R_1, R_2, \dots, R_m هستند. به عبارت دیگر ولتاژها و جریان‌ها تابع‌های چند متغیره هستند و این مقاومت‌های متغیر، متغیرهای آن توابع هستند.

برای تعیین علامت توان فلیکر در بارها، باید چگونگی تغییر نسبی ولتاژ بارها $(V_i(R_1, R_2, \dots, R_m))$ $i = 1, 2, \dots, m$ و جریان بارها $(I_{ii}(R_1, R_2, \dots, R_m))$ $i = 1, 2, \dots, m$ بررسی شود. از آنجایی که این ولتاژها و جریان‌ها توابع چند متغیره هستند، گرادیان این توابع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$dV_i = \frac{\partial V_i}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial V_i}{\partial R_2} dR_2 + \dots + \frac{\partial V_i}{\partial R_m} dR_m ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (۲۱-۴)$$

$$dI_{Li} = \frac{\partial I_{Li}}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial I_{Li}}{\partial R_2} dR_2 + \dots + \frac{\partial I_{Li}}{\partial R_m} dR_m; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (22-4)$$

دو رابطه (۲۱-۴) و (۲۲-۴) را می‌توان به صورت ماتریسی به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta I_{11} \\ \Delta I_{12} \\ \vdots \\ \Delta I_{lm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial R_1} & \frac{\partial V_1}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial R_m} \\ \frac{\partial V_2}{\partial R_1} & \frac{\partial V_2}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial R_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial V_m}{\partial R_1} & \frac{\partial V_m}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial V_m}{\partial R_m} \\ \frac{\partial I_{11}}{\partial R_1} & \frac{\partial I_{11}}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial I_{11}}{\partial R_m} \\ \frac{\partial I_{12}}{\partial R_1} & \frac{\partial I_{12}}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial I_{12}}{\partial R_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial I_{lm}}{\partial R_1} & \frac{\partial I_{lm}}{\partial R_2} & \dots & \frac{\partial I_{lm}}{\partial R_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \\ \vdots \\ \Delta R_m \end{bmatrix} \quad (23-4)$$

و یا

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ - \\ \Delta I_L \end{bmatrix} = [J] [\Delta R] \quad (24-4)$$

که در آن J ماتریس ژاکوبین سیستم است.

با توجه به نامنفی بودن مقادیر امپدانس‌های منابع فلیکر، برای $i = 1, 2, \dots, m$ و $j = 1, 2, \dots, m$ عناصر

ماتریس ژاکوبین دارای ویژگی‌های زیر هستند:

$$\frac{\partial V_i}{\partial R_j} > 0 \quad (25-4)$$

$$\frac{\partial I_{li}}{\partial R_j} > 0; \quad i \neq j \quad (26-4)$$

$$\frac{\partial I_{li}}{\partial R_j} < 0; \quad i = j \quad (27-4)$$

$$\left| \frac{\partial I_{li}}{\partial R_i} \right| \geq \left| \frac{\partial I_{li}}{\partial R_j} \right| \quad (۲۸-۴)$$

امپدانس منابع فلیکر در 2^m حالت مختلف می‌توانند نسبت به هم تغییر کنند. بدون اینکه تغییری در کلیت مسئله ایجاد شود، برای تعیین علامت توان فلیکر در وضعیت‌های مختلف فرض می‌کنیم که شبکه دارای دو منبع فلیکر است یعنی $m = 2$ در هر لحظه تغییرات R_1 و R_2 می‌تواند در یکی از چهار حالت باشد:

$$\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 > 0 \quad \text{حالت اول:}$$

$$\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 < 0 \quad \text{حالت دوم:}$$

$$\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 < 0 \quad \text{حالت سوم:}$$

$$\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 > 0 \quad \text{حالت چهارم:}$$

این چهار حالت در واقع نشان دهنده وضعیت بهره‌برداری^۱ از منابع فلیکر هستند. این وضعیت‌ها خود را در زاویه فاز تن فلیکری نشان می‌دهد. در واقع در این بخش به علت یکسان بودن فرکانس منابع فلیکر، فاز سیگنال تن مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه به بررسی هر کدام از این چهار حالت می‌پردازیم.

حالت اول:

• چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ و

$$\left| \frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} \right| \geq \left| \frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} \right| \text{ پس } \Delta I_{L1} < 0 \text{ است. در نتیجه توان فلیکر در بار } R_1 \text{ منفی است.}$$

• چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ و

$$\left| \frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} \right| \geq \left| \frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} \right| \text{ پس } \Delta I_{L2} < 0 \text{ است. در نتیجه توان فلیکر در بار } R_2 \text{ نیز منفی است.}$$

^۱ Operation Mode

حالت دوم:

- چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ و $\left| \frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} \right| \geq \left| \frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} \right|$ پس $\Delta I_{L1} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_1 منفی است.
- چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ و $\left| \frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} \right| \geq \left| \frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} \right|$ پس $\Delta I_{L2} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_2 نیز منفی است.

حالت سوم:

- اگر $\left| \frac{\partial V_1}{\partial R_1} \right| > \left| \frac{\partial V_1}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ و $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta I_{L1} < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_1 منفی است.
- اگر $\left| \frac{\partial V_1}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial V_1}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ و $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta I_{L1} < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_1 مثبت است.
- اگر $\left| \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \right| > \left| \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ است پس $\Delta I_{L2} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_2 مثبت است.
- اگر $\left| \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ است پس $\Delta I_{L2} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_2 منفی است.

حالت چهارم:

اگر $\left| \frac{\partial V_1}{\partial R_1} \right| > \left| \frac{\partial V_1}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر اگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} > 0$ و $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ است پس $\Delta I_{L1} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_1 منفی است.

اگر $\left| \frac{\partial V_1}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial V_1}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_1}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_1}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_1 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر اگر $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_2} > 0$ و $\frac{\partial I_{L1}}{\partial R_1} < 0$ است پس $\Delta I_{L1} > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_1 مثبت است.

اگر $\left| \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \right| > \left| \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر اگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ و $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} > 0$ است پس $\Delta I_{L2} < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_2 مثبت است.

اگر $\left| \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \right|$ باشد چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر اگر $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_2} < 0$ و $\frac{\partial I_{L2}}{\partial R_1} > 0$ است پس $\Delta I_{L2} < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در بار R_2 منفی است.

نتایج مربوط به چهار حالت را می‌توان به این صورت جمع‌بندی کرد که اگر منابع فلیکر مانند هم نوسان کنند (حالت اول و دوم)، یعنی اندازه امپدانس آنها همزمان با هم کم و یا زیاد شود، علامت توان فلیکر در بار فلیکرزا منفی است. به عبارت دیگر اگر منابع فلیکر دارای وضعیت بهره‌برداری مشابه باشند یعنی به صورت هم‌فاز مورد بهره‌برداری قرار گیرند علامت توان فلیکر در آن بارها منفی است.

اگر اندازه امپدانس منابع فلیکر به صورت متقابل تغییر کند (حالت‌های سوم و چهارم)، یعنی بارهای فلیکرزا در فاز مقابل هم مورد بهره‌برداری قرار گیرند و $\left| \frac{\partial V_1}{\partial R_1} \right| > \left| \frac{\partial V_1}{\partial R_2} \right|$ و $\left| \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \right|$ ، در این صورت علامت توان فلیکر در این بارها منفی است. معمولاً در شبکه‌های واقعی این دو شرط برقرار است چرا که حساسیت ولتاژ یک باس به بار همان باس بسیار بیشتر از حساسیتش به تغییرات بار در باس دیگر است و این شرط برآورده می‌شود. از آنجا که هدف تحلیل کامل وضعیت‌های محتمل بود این شرط قید شده است.

بنابراین در نهایت می‌توان گفت که علامت توان فلیکر در بارهای فلیکرزا (منابع فلیکر) منفی است در حالی که علامت توان فلیکر در یک بار خطی همواره مثبت می‌باشد. این نتیجه را به عنوان ملاکی جهت تشخیص منابع فلیکر می‌توان در شبکه‌ها، اعم از شعاعی و غیرشعاعی، مورد استفاده قرار داد. هرچند این نتیجه با استفاده از بارها با امیدانس متغیر به دست آمده، اما می‌توان آن را برای شناسایی منابع فلیکری که تولید کننده‌ی توان هستند، مانند نیروگاه‌های بادی، بکار گرفت.

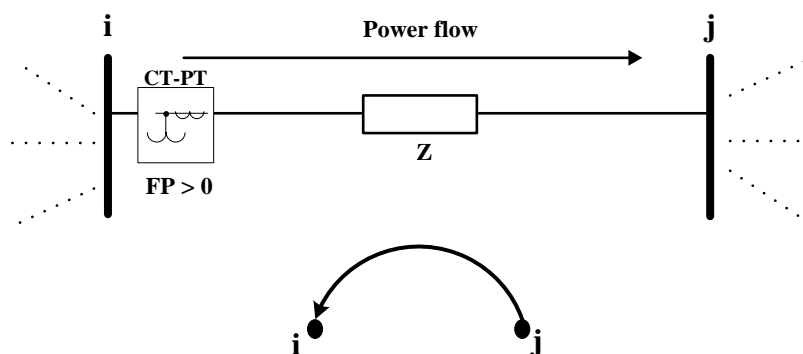
۴-۴-۲ انتشار فلیکر و تشخیص منبع فلیکر با گراف جهت‌دار

در این بخش به بررسی انتشار فلیکر در شبکه پرداخته می‌شود. برای این منظور جریان لحظه‌ای خطوط انتقال و ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها مورد نیاز است. فرض می‌شود جهت شارش توان اکتیو در خطوط انتقال معلوم باشد تا از آن به عنوان مبنای تعیین جهت انتشار استفاده شود. با توجه به شکل-های (۲-۱۳) و (۲-۱۴)، محل اتصال منبع فلیکر نسبت به نقطه مشاهده (محلی که ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شوند و توان فلیکر محاسبه می‌شود) دو وضعیت می‌تواند داشته باشد، منبع فلیکر یا در بالادست قرار دارد یا پایین‌دست نقطه مشاهده است. دقت شود که بین دو باس در شبکه غیرشعاعی مفهوم بالادست بودن و پایین‌دست بودن با توجه به جهت شارش توان اکتیو تعیین می‌شود و ممکن است تغییر کند برخلاف شبکه‌های شعاعی که بالادستی و پایین‌دست بودن برای یک نقطه، ثابت است.

همان‌طور که در فصل دوم به صورت مفصل توضیح داده شده است، اگر منبع فلیکر در بالادست نقطه مشاهده باشد توان فلیکر در آن نقطه مثبت بوده و برای رسیدن به منبع فلیکر از نقطه مشاهده باید خلاف جهت شارش توان اکتیو حرکت کرد. (شکل (۲-۱۳)). به همین ترتیب اگر منبع فلیکر در پایین‌دست نقطه مشاهده باشد توان فلیکر محاسبه شده در نقطه مشاهده منفی بوده و برای رسیدن به منبع فلیکر باید در جهت شارش توان اکتیو حرکت کرد (شکل (۲-۱۴)).

با توجه به این دو وضعیت نتیجه گرفته می‌شود که علامت توان فلیکر بسته به محل نسبی منبع فلیکر و نقطه مشاهده عوض خواهد شد. بنابراین الگوریتمی پیشنهاد گردیده تا علامت توان فلیکر در خطوط انتقال و جهت شارش توان اکتیو در آنها، جهت پیدا کردن محل منبع فلیکر استفاده شود.

در این مرحله گراف جهت‌داری را به صورتی خاص برای این منظور تعریف خواهیم کرد که این گراف جهت انتشار فلیکر بین باس‌ها را نشان داده و منبع فلیکر یا منابع فلیکر غالب را معین کند. در این مدل باس‌های سیستم قدرت به عنوان راس‌های^۱ گراف و خطوط انتقال به عنوان یال‌های^۲ جهت دار (که به آنها پیکان^۳ گفته می‌شود) در نظر گرفته می‌شود. هدف این الگوریتم تعیین جهت پیکان‌ها و تشکیل ماتریس مجاورت^۴ این گراف است. جهت پیکان‌ها اشاره به منبع فلیکر دارند. برای دو باس مجاور از سیستم قدرت یعنی باس i و باس j دو وضعیت ممکن در شکل (۴-۱۲) و (۴-۱۳) نشان داده می‌شود.



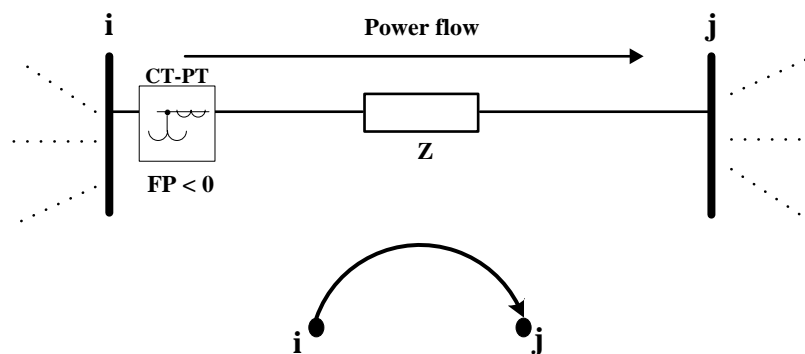
شکل (۴-۱۲) تعیین جهت پیکان گراف جهت‌دار بین دو راس (دو باس)، توان فلیکر مثبت

¹ Vertex

² Edge

³ Arc

⁴ Adjacency Matrix



شکل (۴-۱۳) تعیین جهت پیکانِ گراف جهت‌دار بین دو راس (دو باس)، توان فلیکر منفی

در وضعیت اول (شکل (۴-۱۲)) توان فلیکر در نقطه مشاهده که در باس i قرار دارد مثبت است. با توجه به جهت شارش توان اکتیو که از باس i به باس j است، می‌توان گفت که جهت انتشار فلیکر از باس i به باس j می‌باشد. از طرفی از آنجایی که جهت پیکان گراف نشان دهنده منبع فلیکر است، پس پیکانِ نظیرِ این خط انتقال، از راس j به راس i خواهد بود.

در وضعیت دوم (شکل (۴-۱۳)) توان فلیکر در باس i منفی است ولی جهت شارش توان اکتیو مانند وضعیت قبلی می‌باشد. بنابراین فلیکر از باس j به باس i منتشر شده است پس جهت پیکان که نشان دهنده منبع فلیکر است از راس i به راس j خواهد بود.

برای سیستم قدرت n باسه پس از محاسبه توان فلیکر در هر خط انتقال و تعیین جهت پیکان‌های گراف جهت‌دار، ماتریس مجاورتِ نظیرِ گراف جهت‌دار یعنی $A[a_{ij}]$ که یک ماتریس $n \times n$ است به صورت زیر تشکیل می‌شود:

- اگر دو باس مانند باس‌های i و j با خط انتقال به هم متصل باشند، یک پیکان در گراف جهت‌دار بین راس‌های i و j وجود خواهد داشت که نحوه تعیین جهت این پیکان توضیح داده شده است. حال اگر جهت پیکان از راس i به راس j باشد در این صورت $a_{ij} = -a_{ji} = 1$ است. اگر جهت پیکان از راس j به راس i نگاه $a_{ij} = -a_{ji} = -1$ می‌باشد.

- اگر دو باس مانند باس‌های i و j مستقیماً از طریق خط انتقالی به هم متصل نباشند، در گراف جهت‌دار نظیر سیستم، پیکانی بین راس‌های i و j وجود نخواهد داشت و $a_{ij} = a_{ji} = 0$ می‌باشد.

- قطر اصلی ماتریس مجاورت یک در نظر گرفته می‌شود، $a_{ii} = 1; i = 1, 2, \dots, n$ می‌باشد.

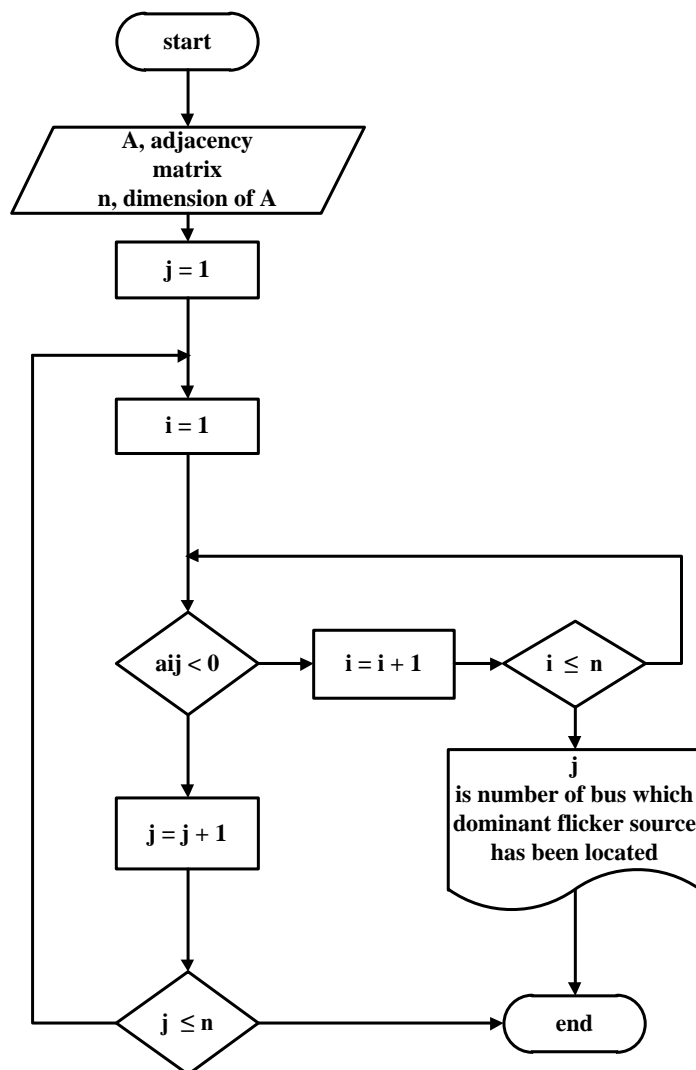
تشخیص محل اتصال منابع فلیکر از روی گراف جهت‌دار

با ازای یک راس مشخص از گراف جهت‌دار مانند راس i ، جهت تمام پیکان‌های متصل به این راس به سمت این راس باشند، راس i به عنوان محل منبع فلیکر تشخیص داده می‌شود. به عبارت دیگر راسی که تمام پیکان‌های متصله واردشونده باشند، باس نظیر آن راس محل منبع فلیکر است.

تشخیص محل اتصال منابع فلیکر از روی ماتریس مجاورت گراف جهت‌دار

اگر تمام درایه‌های ستون i ام ماتریس مجاورت نامنفی باشند، در این صورت باس i ام به عنوان محل منبع فلیکر تشخیص داده می‌شود. در شکل (۴-۱۴) فلوچارت الگوریتم تشخیص منبع فلیکر از روی ماتریس مجاورت نشان داده می‌شود.

در این روش با استفاده از مقادیر لحظه‌ای جریان خطوط انتقال و ولتاژ باس‌ها محل اتصال منبع فلیکر یا منابع غالب فلیکر در شبکه شناسایی می‌شود. در صورتی که چندین منبع در شبکه حضور داشته باشند، غالب بودن یک منبع فلیکر به معنی تاثیر بر نحوه انتشار فلیکر در شبکه است. منابع فلیکر در واقع بارهای مصرف کننده توان هستند و هرچه اندازه بار بزرگتر باشد فلیکر تولیدی آن نیز بیشتر است. علاوه بر این عامل، محل اتصال منابع فلیکر و وضعیت بهره‌برداری از آنها عوامل موثر در غالب بودن آنها می‌باشند. توجیه اثر این دو عامل به سادگی حالت قبل (اندازه بار فلیکرزا) نیست. در ادامه برای منابع فلیکر هم اندازه (توان برابر)، اثر محل اتصال و وضعیت بهره‌برداری در غالب بودن یک منبع فلیکر به صورت تحلیلی بررسی می‌شود.



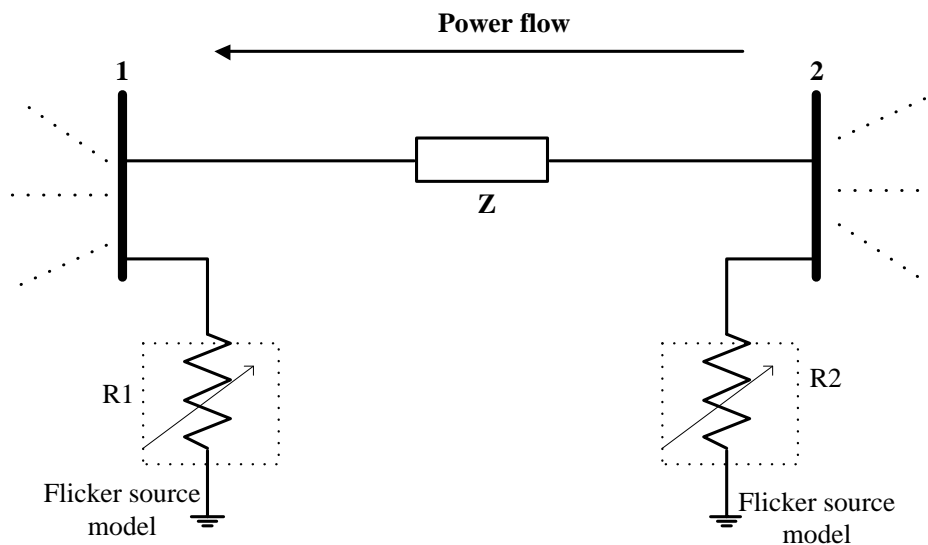
شکل (۴-۱۴) الگوریتم تشخیص محل منبع فلیکر از روی ماتریس مجاورت گراف جهت‌دار

۴-۴-۳ بررسی اثر محل اتصال منبع فلیکر و وضعیت بهره‌برداری آنها در غالب بودن

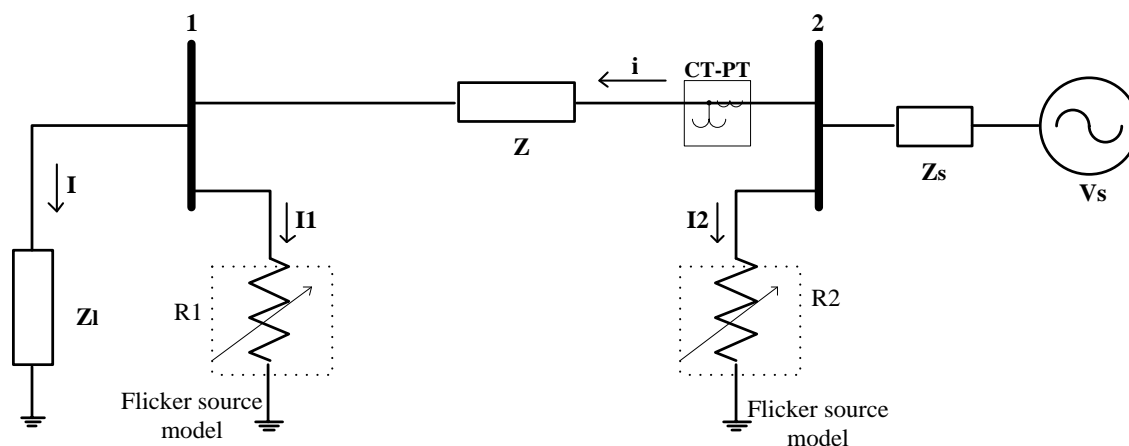
دو باس از یک سیستم قدرت که دو بار فلیکرزای هم اندازه (توان مصرفی برابر) را به عنوان منبع

فلیکر در هر کدام از باس‌ها تغذیه می‌کنند به صورت شکل (۴-۱۵) در نظر می‌گیریم. مدار معادل

سیستم شکل (۴-۱۵) در شکل (۴-۱۶) آمده است.



شکل (۴-۱۵) اتصال دو منبع فلیکر به دو باس از سیستم قدرت



شکل (۴-۱۶) سیستم معادل شکل (۴-۱۵)

مطابق شکل (۴-۱۶)، Z_s ، Z و امپدانس‌های سیستم بوده و R_1 و R_2 امپدانس‌های متغیر منابع فلیکر هستند. جریان‌های I_1 و I_2 جریان منابع فلیکر و I جریان بار خطی باس شماره یک است. در نقطه مشاهده در خط انتقال، جریان خط i و ولتاژ باس شماره دو V_2 اندازه‌گیری شده و توان فلیکر محاسبه می‌شود.

برای بررسی تغییرات دامنه ولتاژ و جریان با تغییر امپدانس منابع فلیکر، گرادیان آنها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$dV_2 = \frac{\partial V_2}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial V_2}{\partial R_2} dR_2 \quad (۲۹-۴)$$

و

$$di = \frac{\partial i}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial i}{\partial R_2} dR_2 \quad (۳۰-۴)$$

این معادلات را می‌توان به فرم ماتریسی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_2}{\partial R_1} & \frac{\partial V_2}{\partial R_2} \\ \frac{\partial i}{\partial R_1} & \frac{\partial i}{\partial R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \end{bmatrix} \quad (۳۱-۴)$$

چون مقادیر امپدانس‌ها نامنفی است، ماتریس ژاکوبین این سیستم دارای ویژگی‌های زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0 \quad (۳۲-۴)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0 \quad (۳۳-۴)$$

$$\frac{\partial i}{\partial R_2} > 0 \quad (۳۴-۴)$$

$$\frac{\partial i}{\partial R_1} < 0 \quad (۳۵-۴)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > \frac{\partial V_2}{\partial R_1} \quad (۳۶-۴)$$

از لحاظ ریاضی اندازه $\frac{\partial i}{\partial R_1}$ می‌تواند کوچکتر یا بزرگتر از $\frac{\partial i}{\partial R_2}$ باشد. اگر $Z_L \ll R_1$ باشد آنگاه

$$\left| \frac{\partial i}{\partial R_1} \right| < \left| \frac{\partial i}{\partial R_2} \right| \text{ معمولاً و برقرار نیست}$$

در هر لحظه تغییرات R_1 و R_2 به چهار حالت مختلف می‌تواند اتفاق بیفتد، این حالت‌ها در ادامه مورد

بررسی قرار می‌گیرد.

حالت اول: $\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 > 0$

حالت دوم: $\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 < 0$

حالت سوم: $\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 < 0$

حالت چهارم: $\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 > 0$

حالت اول:

- چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial i}{\partial R_1} < 0$ و $\left| \frac{\partial i}{\partial R_1} \right| \geq \left| \frac{\partial i}{\partial R_2} \right|$ پس $\Delta i < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در محل اندازه‌گیری منفی است. یعنی بار R_1 منبع فلیکر غالب است.

حالت دوم:

- چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است پس $\Delta V_2 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial i}{\partial R_1} < 0$ و $\left| \frac{\partial i}{\partial R_1} \right| \geq \left| \frac{\partial i}{\partial R_2} \right|$ پس $\Delta i > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در محل اندازه‌گیری منفی است. یعنی بار R_1 منبع فلیکر غالب است.

حالت سوم:

- چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > \frac{\partial V_2}{\partial R_1}$ پس $\Delta V_2 < 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial i}{\partial R_1} < 0$ و $\frac{\partial i}{\partial R_2} > 0$ پس $\Delta i < 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در محل اندازه‌گیری مثبت است. یعنی بار R_2 منبع فلیکر غالب است.

حالت چهارم:

- چون $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > 0$ و $\frac{\partial V_2}{\partial R_2} > 0$ است و $\frac{\partial V_2}{\partial R_1} > \frac{\partial V_2}{\partial R_2}$ پس $\Delta V_2 > 0$ می‌باشد. از طرف دیگر $\frac{\partial i}{\partial R_1} < 0$ و $\frac{\partial i}{\partial R_2} > 0$ پس $\Delta i > 0$ است. در نتیجه توان فلیکر در محل اندازه‌گیری مثبت است. یعنی بار R_2 منبع فلیکر غالب است.

این نتایج را می‌توان بدین صورت جمع‌بندی کرد که اگر منابع فلیکر به صورت هم‌فاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (حالت‌های اول و دوم)، منبع فلیکری که در پایین دست قرار گرفته است منبع غالب خواهد بود. به طریق مشابه اگر بهره‌برداری از منابع فلیکر در فاز مخالف باشد (حالت‌های سوم و چهارم)، در این صورت منبعی که در بالادست نقطه مشاهده قرار دارد به عنوان منبع غالب تشخیص داده خواهد شد.

۴-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا ملاک ارائه شده برای روش تک‌نقطه طی سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش از ولتاژ و جریان بارها و شاخه‌های متصل شده به باس‌ها استفاده می‌شود. سپس روش پیشنهادی مبتنی بر گراف جهت‌دار برای تشخیص منبع فلیکر در شبکه و توصیف انتشار فلیکر در شبکه شبیه‌سازی می‌شود.

روش تک نقطه

چنانچه در بخش قبل نشان داده شد با تعیین علامت توان فلیکر هر شاخه‌ی متصل به باس در یک شبکه، می‌توان نسبت به منبع فلیکر بودن آن بار قضاوت کرد. پنج سناریو برای سیستم قدرت مورد مطالعه که شامل منابع فلیکر باشد پیشنهاد شده است. جزئیات این سناریوها در جدول (۴-۱۳) آمده است. در هر سناریو چندین منبع فلیکر هم فرکانس اما با توان‌های متفاوت در باس‌های مختلف شبکه در نظر گرفته شده است.

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

| سناریو | باس محل اتصال منبع فلیکر | پارامترهای مدل فلیکر | |
|--------|-----------------------------|----------------------|-------------|
| | | مقاومت (p.u) | فرکانس (Hz) |
| ۱ | ۲ | ۶/۶۱ | ۱۰ |
| | ۴ | ۱/۶ | ۱۰ |
| ۲ | ۱ | ۱/۶ | ۸ |
| | ۶ | ۱/۸۹ | ۸ |
| ۳ | ۳ | ۶/۶۱ | ۱۳ |
| | ۵ | ۱/۸۹ | ۱۳ |
| ۴ | ۵ | ۶/۶۱ | ۹ |
| | ۶ | ۱/۸۹ | ۹ |
| ۵ | ۳ | ۶/۶۱ | ۱۱ |
| | ۴ | ۱/۶ | ۱۱ |
| | ۶ | ۱/۸۹ | ۱۱ |

با توجه به مباحث بخش‌های قبل در شرایطی که فرکانس منابع فلیکر یکسان باشند، فاز سیگنال تن فلیکری یا به اصطلاح وضعیت بهره‌برداری از اهمیت برخوردار هستند. به عبارت دیگر هرچند فرکانس قطع و وصل شدن بارهای فلیکرزا یکسان است اما زمان شروع این قطع و وصل شدگی یکسان نیست. این امر خود را در زاویه فاز سیگنال پوش نشان می‌دهد. در این سناریوها منابع فلیکر را در وضعیت‌های بهره‌برداری متفاوتی بررسی می‌کنیم تا استقلال ملاک پیشنهادی را از زاویه فاز سیگنال پوش نشان داده باشیم.

به ازای شرایط سناریوی اول، توان فلیکر محاسبه شده در شاخه‌های باس‌های شبکه در جدول (۴-۱۴) آمده است. این سناریو برای سه وضعیت بهره‌برداری مختلف شبیه‌سازی شده است (θ_i نشان دهنده زاویه فاز پوش منبع فلیکری است که در باس λ ام نصب شده است). در تمامی وضعیت‌های

بهره‌برداری علامت توان فلیکر نشان دهنده منبع فلیکر است. به این ترتیب که علامت توان فلیکر (همچنان که در جدول مشاهده می‌شود) در بارهای فلیکرزا منفی و در بقیه شاخه‌ها (اعم از بارهای خطی و منابع شبکه) مثبت است. توجه شود که توان نامی و ولتاژ نامی برای شبکه به ترتیب ۱۰۰ MW و ۲۳۰ kV در نظر گرفته شده است و توان‌های فلیکر بر حسب kW هستند.

جدول‌های (۴-۱۵)، (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نتایج مربوط به سناریوهای دوم، سوم و چهارم هستند. در این سناریوها هم به ازای وضعیت‌های بهره‌برداری متفاوت از منابع فلیکر (زمان روشن خاموش شدن متفاوت)، توان فلیکر در منابع فلیکر منفی و در سایر شاخه‌ها مثبت است. بنابراین ملاک پیشنهادی در تشخیص منابع فلیکر موفق عمل کرده است.

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_2° | θ_4° | θ_2° | θ_4° | θ_2° | θ_4° |
| | | . | . | ۶۰ | . | ۲۸۵ | . |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۴۷/۴ | | ۴۰/۸ | | ۳۶/۶ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۲۴/۴ | | ۲۱/۱ | | ۱۸/۳ | |
| | منبع فلیکر | -۴۲/۹ | | -۲۹/۸ | | -۱۶/۴ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۲۳/۷ | | ۲۰/۳ | | ۱۷/۹ | |
| ۴ | بار خطی | ۳۸/۸ | | ۳۵/۳ | | ۱۷/۹ | |
| | منبع فلیکر | -۱۸۲ | | -۱۷۱ | | -۱۶۰ | |
| ۵ | بار خطی | ۲۹/۵ | | ۲۶/۴ | | ۲۲/۵ | |
| ۶ | بار خطی | ۲۸/۲ | | ۲۵/۲ | | ۲۱/۲ | |

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_1° | θ_6° | θ_1° | θ_6° | θ_1° | θ_6° |
| | | ۰ | ۰ | ۳۰ | ۰ | ۲۱۰ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۱۱۰ | | ۱۰۴ | | ۱۱/۸ | |
| | منبع فلیکر | -۲۷۱ | | -۲۵۲ | | -۶۹/۵ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۴۶/۸ | | ۴۳/۱ | | ۳/۷۹ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۵۴/۴ | | ۴۹/۶ | | ۴/۴۶۵ | |
| ۴ | بار خطی | ۶۵ | | ۶۰/۴ | | ۵/۰۱۶ | |
| ۵ | بار خطی | ۶۴/۸ | | ۵۹/۶ | | ۴/۹۴۸ | |
| ۶ | بار خطی | ۶۹/۶ | | ۶۲/۶ | | ۶/۲۱۱ | |
| | منبع فلیکر | -۱۹۲ | | -۱۸۱ | | -۱۶/۱ | |

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_3° | θ_5° | θ_3° | θ_5° | θ_3° | θ_5° |
| | | ۰ | ۰ | ۴۵ | ۰ | ۲۷۰ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۳۴/۶ | | ۳۰/۵ | | ۲۳/۸ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۱۸ | | ۱۵/۸ | | ۱۲/۱ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۲/۷ | | ۱۹/۸ | | ۱۴/۶ | |
| | منبع فلیکر | -۳۸/۷ | | -۲۸ | | -۱۱/۱ | |
| ۴ | بار خطی | ۲۳/۹ | | ۲۱/۲ | | ۱۶/۶ | |
| ۵ | بار خطی | ۳۰/۱ | | ۲۶/۹ | | ۲۱/۶ | |
| | منبع فلیکر | -۱۳۶ | | -۱۲۸ | | -۱۱۲ | |
| ۶ | بار خطی | ۲۵/۵ | | ۲۲/۶ | | ۱۷/۲ | |

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_5° | θ_6° | θ_5° | θ_6° | θ_5° | θ_6° |
| | | ۰ | ۰ | ۹۰ | ۰ | ۳۰۰ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۲۹/۳ | | ۱۹/۱ | | ۲۴/۲ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۱۶/۵ | | ۱۱ | | ۱۳/۸ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۲۱/۶ | | ۱۴/۶ | | ۱۸/۲ | |
| ۴ | بار خطی | ۲۱/۲ | | ۱۴/۱ | | ۱۷/۶ | |
| ۵ | بار خطی | ۲۴/۱ | | ۱۵/۸ | | ۱۹/۶ | |
| | منبع فلیکر | -۳۳/۶ | | -۷/۰۴۹ | | -۲۲/۴ | |
| ۶ | بار خطی | ۲۷/۶ | | ۱۸/۹ | | ۲۳/۵ | |
| | منبع فلیکر | -۱۲۸ | | -۱۰۵ | | -۱۱۵ | |

در سناریوی پنجم سه منبع فلیکر در شبکه در نظر گرفته شده است و شبکه برای چهار وضعیت مختلف زاویه فاز منابع فلیکر شبیه‌سازی شده است. اندازه توان فلیکر در شاخه‌های سیستم در جدول (۴-۱۸) نشان داده می‌شود. در این سناریو نیز در تمام وضعیت‌ها علامت توان فلیکر در منابع فلیکر منفی و در سایر شاخه‌ها مثبت می‌باشد.

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | | ۲ | | | ۳ | | | ۴ | | |
| | | θ_3° | θ_4° | θ_6° | θ_3° | θ_4° | θ_6° | θ_3° | θ_4° | θ_6° | θ_3° | θ_4° | θ_6° |
| | | ۰ | ۰ | ۰ | ۶۰ | ۳۰ | ۰ | ۳۰۰ | ۶۰ | ۰ | ۴۵ | ۱۸۰ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۱۰۵ | | | ۹۳/۶ | | | ۶۳/۵ | | | ۰/۹۸۶ | | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۵۶ | | | ۴۹/۷ | | | ۳۳/۲ | | | ۰/۳۸۴ | | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۶۶/۷ | | | ۵۸/۵ | | | ۳۷/۷ | | | ۱/۰۴ | | |
| | منبع فلیکر | -۶۰/۸ | | | -۴۴/۹ | | | -۷/۹۹۶ | | | -۷/۶۲۶ | | |
| ۴ | بار خطی | ۸۴/۷ | | | ۷۸/۶ | | | ۵۴/۳ | | | ۱/۴۲۳ | | |
| | منبع فلیکر | -۲۴۶ | | | -۲۳۱ | | | -۱۶۶ | | | -۲۰/۴ | | |
| ۵ | بار خطی | ۷۵/۴ | | | ۶۸/۲ | | | ۴۵/۸ | | | ۰/۶۱۱ | | |
| ۶ | بار خطی | ۸۲ | | | ۷۳/۶ | | | ۴۹/۲ | | | ۱/۲۰۷ | | |
| | منبع فلیکر | -۲۰۲ | | | -۱۸۰ | | | -۱۵۱ | | | -۲۲/۷ | | |

برای بررسی اثر حضور بارهای هارمونیک در عملکرد ملاک پیشنهاد شده برای تشخیص منابع فلیکر سناریوهای اول و دوم با حضور بار هارمونیک اصلاح و دوباره شبیه‌سازی می‌شود. در سناریوی اول، برای این منظور بار خطی باس پنجم به یک بار هارمونیک تبدیل می‌شود. برای این هدف در باس پنجم جریان‌های هارمونیک ۵، ۷ و ۱۱ به شبکه تزریق می‌شود. دامنه این جریان‌ها به ترتیب ۱۰٪، ۸٪ و ۵٪ دامنه جریان هارمونیک اصلی بار باس پنجم فرض می‌شود. برای این وضعیت، توان فلیکر در شاخه‌های سیستم در جدول (۴-۱۹) آمده است. در این جدول هم دیده می‌شود که حضور بار هارمونیک تأثیری در شناسایی بار فلیکر توسط روش پیشنهادی ندارد. به عبارت دیگر منبع فلیکر به درستی تشخیص داده می‌شود و همچنین بار هارمونیک به عنوان منبع فلیکر شناخته نمی‌شود.

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|---------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_2° | θ_4° | θ_2° | θ_4° | θ_2° | θ_4° |
| | | ۰ | ۰ | ۶۰ | ۰ | ۲۸۵ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۴۵/۸ | | ۳۹/۸ | | ۳۵/۶ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۲۳/۲ | | ۲۰/۶ | | ۱۷/۷ | |
| | منبع فلیکر | -۴۱/۳ | | -۲۹ | | -۱۵/۸ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۲۲/۸ | | ۱۹/۷ | | ۱۷/۳ | |
| ۴ | بار خطی | ۳۷/۸ | | ۳۴/۶ | | ۲۹/۸ | |
| | منبع فلیکر | -۱۷۷ | | -۱۶۷ | | -۱۵۶ | |
| ۵ | بار هارمونیکی | ۲۸/۵ | | ۲۵/۷ | | ۲۱/۸ | |
| ۶ | بار خطی | ۲۷/۲ | | ۲۴/۶ | | ۲۰/۶ | |

در سناریوی دوم هم بار خطی باس چهارم به همان روش گفته شده به بار هارمونیکی تبدیل می‌شود. نتایج مربوط به این وضعیت در جدول (۴-۲۰) بیان شده است. در این حالت هم منابع فلیکر به درستی شناسایی شده‌اند و بار هارمونیکی به عنوان منبع فلیکر دیده نشده است.

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

| باس و شاخه‌های آن | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | |
|-------------------|---------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | ۱ | | ۲ | | ۳ | |
| | | θ_1° | θ_6° | θ_1° | θ_6° | θ_1° | θ_6° |
| | | ۰ | ۰ | ۳۰ | ۰ | ۲۱۰ | ۰ |
| ۱ | منبع ولتاژ | ۱۰۸ | | ۱۰۸ | | ۱۱/۷ | |
| | منبع فلیکر | -۲۶۵ | | -۲۴۶ | | -۶۱/۹ | |
| ۲ | منبع ولتاژ | ۴۵/۷ | | ۴۲/۲ | | ۳/۷۱۲ | |
| ۳ | منبع ولتاژ | ۵۳/۲ | | ۴۸/۵ | | ۴/۳۸۱ | |
| ۴ | بار هارمونیکی | ۶۳/۴ | | ۵۹ | | ۴/۹۰۲ | |
| ۵ | بار خطی | ۶۳/۱ | | ۵۸/۱ | | ۴/۸۵۳ | |
| ۶ | بار خطی | ۶۸ | | ۶۱/۱ | | ۶/۱۱۹ | |
| | منبع فلیکر | -۱۸۸ | | -۱۷۷ | | -۱۵/۵ | |

روش گراف جهت‌دار

در این روش از جریان خطوط انتقال و ولتاژ باس‌ها برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در شبکه استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی روش گراف جهت‌دار سه سناریو برای سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شود که در آنها شبکه دارای منابع فلیکر هستند. جزئیات این سناریوها در جدول (۴-۲۱) آمده است. برای بررسی اثر محل اتصال منبع فلیکر در غالب شدن آن منبع، در این بخش در هر سناریو، منابع فلیکر که در سرتاسر شبکه پخش هستند علاوه بر هم فرکانس بودن، هم اندازه نیز در نظر گرفته می‌شوند.

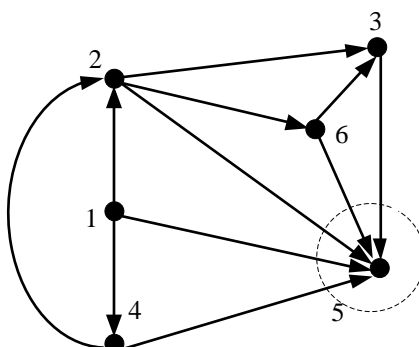
جدول (۴-۲۱) جزئیات سناریوهای پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش گراف جهت‌دار برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر هم فرکانس

| سناریو | باس محل اتصال منبع فلیکر | پارامترهای مدل فلیکر | |
|--------|-----------------------------|----------------------|-------------|
| | | مقاومت (p.u) | فرکانس (Hz) |
| ۱ | ۵ | ۱/۳۲ | ۱۵ |
| ۲ | ۲ | ۱/۳۲ | ۱۲ |
| | ۵ | | |
| ۳ | ۱ | ۱/۸۸ | ۱۰ |
| | ۴ | | |
| | ۶ | | |

در سناریوی اول یک منبع فلیکر در باس پنجم تغذیه می‌شود. این سناریو برای چهار وضعیت بهره‌برداری از منبع فلیکر شبیه‌سازی می‌شود. هر وضعیت بهره‌برداری به یک زاویه فاز پوش دلالت می‌کند. توان فلیکرهای محاسبه شده در هر خط انتقال در جدول (۴-۲۲) آمده است. همچنین جهت انتقال توان در هر خط نیز در این جدول بیان شده است. توجه شود که زمان شروع قطع و وصل بار فلیکرزا (وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر) تاثیری بر جهت توان اکتیو خطوط انتقال ندارد. با توجه به توان فلیکرهای محاسبه شده، در یک نقطه مشاهده مشخص به ازای تمامی وضعیت‌های بهره‌برداری علامت یکسانی دارند. چراکه در شبکه فقط یک منبع فلیکر وجود دارد و جهت انتشار فلیکر وابستگی به وضعیت بهره‌برداری منبع فلیکر (زاویه فاز پوش) ندارد. بنابراین گراف جهت‌دار برای همه‌ی وضعیت‌های بهره‌برداری یکسان بوده و در شکل (۴-۱۷) نشان داده می‌شود. با توجه به این شکل راس پنجم گراف، راسی است که تمام پیکان‌های متصل به آن، وارد شونده هستند و گراف طبق تعریف راس پنجم (باس پنجم) را به عنوان محل اتصال منبع فلیکر نشان می‌دهد.

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

| خط | جهت شارش توان اکتیو | | وضعیت بهره‌برداری از منبع فلیکر | | | |
|-----|---------------------|----|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | از | به | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |
| | | | θ_5° | θ_5° | θ_5° | θ_5° |
| باس | باس | ۰ | ۶۰ | ۱۸۰ | ۲۱۰ | |
| ۱ | ۱ | ۲ | -۵/۸۳۳ | -۵/۶۱۹ | -۵/۷۴۲ | -۵/۷۲۷ |
| ۲ | ۱ | ۴ | -۱/۱۷۱ | -۱/۲۰۹ | -۱/۲۹۳ | -۰/۹۱۳ |
| ۳ | ۱ | ۵ | -۳۲/۷ | -۳۱/۸ | -۳۱/۶ | -۳۲/۶ |
| ۴ | ۲ | ۳ | -۳/۰۵۴ | -۲/۸۳۴ | -۳/۰۴۸ | -۳/۲۶۹ |
| ۵ | ۲ | ۴ | ۹/۵۲۲ | ۹/۳۱۴ | ۸/۹۹۶ | ۹/۵۲۵ |
| ۶ | ۲ | ۵ | -۲۷/۳ | -۲۶/۶ | -۲۶ | -۲۷/۱ |
| ۷ | ۲ | ۶ | -۲/۰۰۸ | -۱/۹۰۸ | -۲/۰۶۰ | -۱/۹۸۵ |
| ۸ | ۳ | ۵ | -۲۹/۴ | -۲۸/۸ | -۲۸/۱ | -۲۸/۹ |
| ۹ | ۳ | ۶ | ۰/۷۵۰ | ۰/۷۶۸ | ۰/۵۹۳ | ۰/۹۶۱ |
| ۱۰ | ۴ | ۵ | -۲۵/۴ | -۲۴/۶ | -۲۴/۴ | -۲۵/۲ |
| ۱۱ | ۶ | ۵ | -۲۲/۱ | -۲۱/۷ | -۲۰/۴ | -۲۱/۶ |



شکل (۴-۱۷) گراف جهت‌دار نظیر تمام وضعیت‌های سناریوی اول

ماتریس مجاورت این گراف جهت‌دار هم می‌تواند نشان دهنده‌ی باس محل منبع فلیکر باشد. ماتریس مجاورت این گراف هم طبق تعریف به صورت زیر تشکیل شده است:

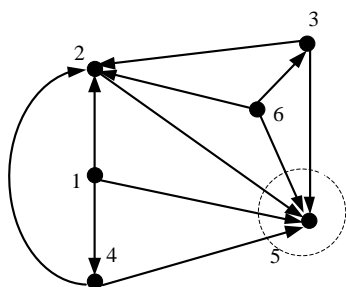
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

در این ماتریس تنها ستون پنجم ماتریس هست که تمام درایه‌های آن نامنفی است. بنابراین ماتریس مجاورت هم به درستی محل منبع فلیکر را، باس پنجم نشان می‌دهد.

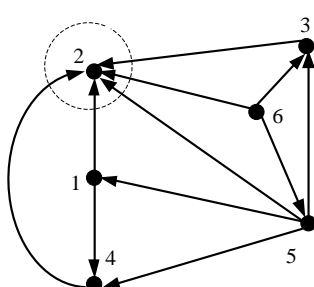
در سناریوی دوم شبکه در حضور دو منبع فلیکر هم فرکانس که در باس‌های دوم و پنجم قرار دارند فرض می‌شود. شبکه برای چهار وضعیت بهره‌برداری شبیه‌سازی شده و مقادیر توان فلیکر در نقاط مشاهده‌ی واقع در خطوط انتقال و جهت شارش توان اکتیو در خطوط انتقال در جدول (۴-۲۳) آمده است. گراف جهت‌دار نظیر این شبکه در شکل (۴-۱۸) نشان داده می‌شود. از آنجایی که در وضعیت بهره‌برداری‌های مختلف علامت توان فلیکر در نقاط مشاهده متفاوت است بنابراین برای هر وضعیت گراف جهت‌دار و به طبع منبع فلیکر غالب متفاوت خواهد بود. بر اساس تئوری پیشنهادی غالب بودن هر کدام از منابع را توجیه خواهیم کرد.

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

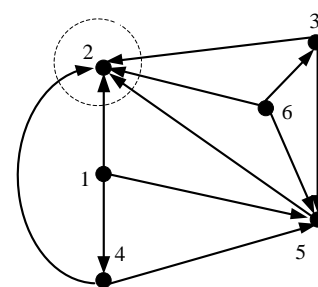
| خط | جهت شارش توان اکتیو | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | | | |
|----|---------------------|----|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | ۱ | | ۲ | | ۳ | | ۴ | |
| | از | به | θ_2° | θ_5° | θ_2° | θ_5° | θ_2° | θ_5° | θ_2° | θ_5° |
| | | | باس | باس | ۰ | ۰ | ۰ | ۶۰ | ۰ | ۱۸۰ |
| ۱ | ۱ | ۲ | -۶۶/۹ | -۴۹/۷ | -۰/۰۹۰ | -۲/۵۰۶ | | | | |
| ۲ | ۱ | ۴ | -۱۸/۲ | -۱۴/۱ | -۰/۰۱۲ | -۰/۴۰۵ | | | | |
| ۳ | ۱ | ۵ | -۶۰/۲ | -۴۵/۹ | ۰/۰۵۴ | -۳/۶۲۰ | | | | |
| ۴ | ۳ | ۲ | -۳۵/۷ | -۲۶/۹ | -۲/۵۷۵ | -۳/۷۸۵ | | | | |
| ۵ | ۲ | ۴ | ۸۶/۱ | ۶۳/۸ | ۲/۳۲۶ | ۵/۳۷۲ | | | | |
| ۶ | ۲ | ۵ | -۱۴/۳ | -۸/۶۱۱ | ۳/۵۹۲ | ۰/۴۴۴ | | | | |
| ۷ | ۲ | ۶ | ۳۶/۶ | ۲۷/۵ | ۱/۷۵۸ | ۲/۲۴۶ | | | | |
| ۸ | ۳ | ۵ | -۴۸/۴ | -۳۷/۱ | ۰/۳۹۱ | -۲/۶۲۵ | | | | |
| ۹ | ۳ | ۶ | ۵/۹۷۸ | ۲/۴۸۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۷۸۹ | | | | |
| ۱۰ | ۴ | ۵ | -۳۶/۱ | -۲۸/۲ | ۰/۷۷۴ | -۱/۰۷۱ | | | | |
| ۱۱ | ۶ | ۵ | -۲۷/۵ | -۲۳/۱ | -۲/۸۶۱ | -۴/۵۴۷ | | | | |



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴-۱۸) گراف جهت‌دار متناظر با سناریوی دوم، (الف) وضعیت بهره‌برداری ۱ و ۲، (ب) وضعیت بهره‌برداری ۳، (ج) وضعیت بهره‌برداری ۴

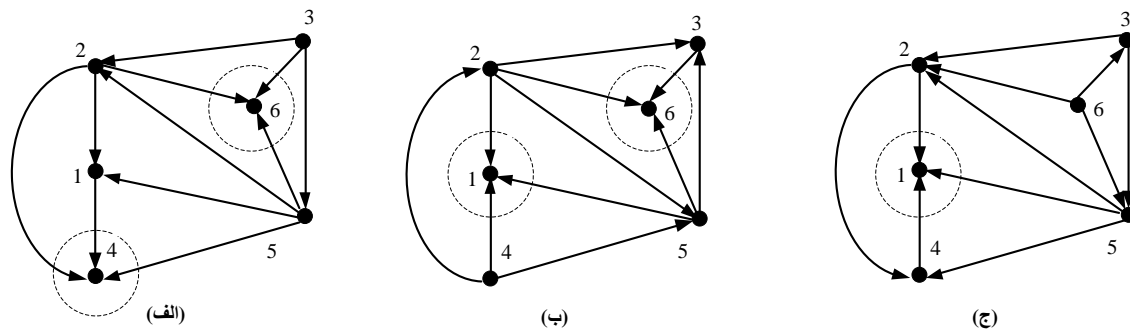
در وضعیت‌های بهره‌برداری اول و دوم منبع فلیکر واقع در باس پنجم و در وضعیت‌های سوم و چهارم منبع فلیکر واقع در باس دوم به عنوان منبع غالب تشخیص داده شده است. این نتیجه با تحلیل تئوری مطابقت دارد. در وضعیت‌های اول و دوم منابع فلیکر به صورت هم‌فاز هستند، بنابراین منبعی که در پایین‌دست قرار می‌گیرد باید منبع غالب باشد. باس پنجم نسبت به باس دوم پایین‌دست است (جهت شارش توان اکتیو در خط ششم را ببینید) و به درستی منبع غالب شناخته شده است. در وضعیت‌های سوم و چهارم منابع فلیکر در فاز مقابل هستند و طبق تئوری تحلیلی باید منبع واقع در بالادست (منبع واقع در باس دوم) به عنوان منبع غالب شناخته شود که نتایج نشان دهنده صحت آن است.

در سناریوی سوم، شبکه با سه منبع فلیکر فرض می‌شود. این منابع فلیکر در باس‌های اول، چهارم و ششم قرار دارند. برای مدل کردن اختلاف زمانی عملکرد منابع فلیکر (وضعیت بهره‌برداری) برای چهار حالت مختلف سیستم قدرت شبیه‌سازی شده و مقادیر توان فلیکر در نقاط مشاهده‌ی واقع در خطوط انتقال در جدول (۴-۲۴) آمده است. گراف‌های جهت‌دار برای وضعیت‌های مختلف عملکردی منابع فلیکر در شکل (۴-۱۹) نشان داده می‌شود.

برای وضعیت‌های اول و دوم منابع فلیکر واقع در باس‌های چهارم و ششم منابع فلیکر غالب تشخیص داده شده‌اند. در این دو وضعیت دلیل غالب بودن منبع فلیکر باس چهارم بر منبع فلیکر باس اول این است که توان اکتیو از باس اول به باس چهارم بوده و چون منابع هم‌فازند منبع پایین‌دست باید منبع غالب باشد که همین‌طور هم شده است. در وضعیت سوم منابع فلیکر واقع در باس‌های اول و ششم به عنوان منابع غالب دیده شده‌اند. در این وضعیت منابع واقع در باس‌های اول و چهارم در فاز مقابل هم عمل می‌کنند و چون باس اول بالادستِ باس چهارم است، منبع فلیکر باس اول غالب شده است. در نهایت در وضعیت چهارم منبع فلیکر واقع در باس اول به عنوان منبع غالب شبکه تشخیص داده شده است.

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

| خط | جهت شارش توان اکتیو | | وضعیت بهره‌برداری از منابع فلیکر | | | | | | | | | | | |
|----|---------------------|--------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | ۱ | | | ۲ | | | ۳ | | | ۴ | | |
| | | | θ_1° | θ_4° | θ_6° | θ_1° | θ_4° | θ_6° | θ_1° | θ_4° | θ_6° | θ_1° | θ_4° | θ_6° |
| | از باس | به باس | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰ | ۶۰ | ۰ | ۱۸۰ | ۴۵ | ۰ | ۳۰ | ۲۱۰ |
| ۱ | ۱ | ۲ | ۲۴/۸ | | | ۲۲/۲ | | | ۸/۴۲۲ | | | ۲۹/۹ | | |
| ۲ | ۱ | ۴ | -۸/۷۷۸ | | | -۶/۶۴۷ | | | ۳۱/۲ | | | ۵/۱۸۸ | | |
| ۳ | ۱ | ۵ | ۳۰/۳ | | | ۲۸/۶ | | | ۴/۶۱۷ | | | ۲۵/۴ | | |
| ۴ | ۳ | ۲ | -۸/۲۱۸ | | | -۸/۹۷۱ | | | ۹/۲۰۸ | | | -۱۳/۶ | | |
| ۵ | ۲ | ۴ | -۷۰/۱ | | | -۶۴/۶ | | | ۳۵/۳ | | | -۴۴/۲ | | |
| ۶ | ۲ | ۵ | ۷/۹۰۴ | | | ۷/۲۱۳ | | | -۱/۸۱۷ | | | ۲/۲۷۴ | | |
| ۷ | ۲ | ۶ | -۱۳/۸ | | | -۶/۶۱۵ | | | -۲۰/۱ | | | ۲۹/۵ | | |
| ۸ | ۳ | ۵ | -۳/۲۹۷ | | | -۳/۶۷۱ | | | ۵/۲۳۳ | | | -۱۰ | | |
| ۹ | ۳ | ۶ | -۶۳/۳ | | | -۴۸/۶ | | | -۲۶/۱ | | | ۱۸/۲ | | |
| ۱۰ | ۴ | ۵ | ۲۴/۹ | | | ۲۴/۳ | | | -۵/۷۳۷ | | | ۱۳/۲ | | |
| ۱۱ | ۵ | ۶ | -۲۱/۸ | | | -۱۵/۴ | | | -۱۳/۳ | | | ۱۷/۸ | | |



شکل (۴-۱۹) گراف جهت‌دار متناظر با سناریوی سوم، الف) وضعیت بهره‌برداری ۱ و ۲، ب) وضعیت بهره‌برداری ۳، ج) وضعیت بهره‌برداری ۴

فصل پنجم: روش‌های پیشنهادی برای فلیکر نایستان؛ تشخیص

منبع، مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش

۵-۱ مقدمه

در شرایطی که دامنه ولتاژ به صورت نایستان نوسان کند نوسانات فرکانس مشخصی نخواهند داشت و روش‌های ارائه شده در فصل قبل برای تشخیص محل اتصال که به فرکانس پوش نیاز داشتند کاربرد نخواهند داشت. در این فصل ابتدا شاخصی برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر نایستان معرفی می‌شود. همچنین برای نوسان ولتاژ نایستان، سیگنال پوش با روش‌های سری زمانی (AR و MA) و مدل‌های خاکستری مدل و پیش‌بینی می‌شود. از آنجایی که مدل‌های خاکستری پیش‌بین‌های محلی هستند در این پایان‌نامه این مدل‌ها برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سیگنال پوش اصلاح^۱ می‌شوند.

برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی برای هر کدام از روش‌های ارائه شده انجام گرفته و به تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۵-۲ شاخص نوسان نایستان دامنه و مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های

سری زمانی

در این بخش با در نظر گرفتن نایستان بودن نوسان دامنه شاخصی برای شدت نوسان دامنه معرفی می‌شود. این شاخص بر اساس شدت طیف توان^۲ سیگنال است. سپس به مدل‌سازی و پیش‌بینی سیگنال پوش توسط مدل‌های سری زمانی نظیر AR و MA پرداخته می‌شود.

چنانچه نوسان دامنه ولتاژ به صورت نایستان باشد، رابطه ولتاژ لحظه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V(t) = V_c[1 + m(t)]\cos(\omega_c t + \theta_c) \quad (۱-۵)$$

^۱ Modify

^۲ Power Spectral Density

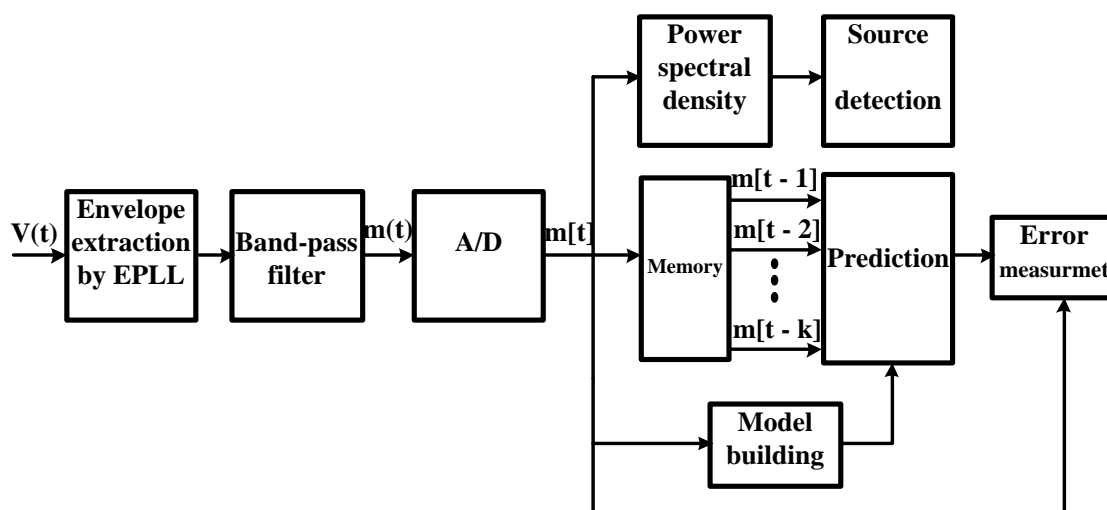
که در آن پوش دامنه ولتاژ بوده و یک سیگنال نایستان است. مطابق تعریف فلیکر، برای این سیگنال خواهیم داشت:

$$|m(t)| \leq 0.1 V_c \quad (2-5)$$

طرح کلی پیشنهادی برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر نایستان و مدل‌سازی و پیش‌بینی آن در شکل (۱-۵) آمده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۲-۱۱) و (۲-۱۲) نشان داده شد، در حالت نوسان دامنه نیز EPLL می‌تواند به خوبی برای استخراج سیگنال پوش دامنه بکارگرفته شود. سیگنال پوش به علت نایستان بودن محتویات فرکانسی مختلفی دارد ولی از آنجایی که برای بررسی فلیکر محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۳۵ هرتز در نظر گرفته می‌شود، سیگنال پوش استخراج شده فیلتر می‌شود تا فرکانس‌هایی از آن باقی بماند که در محدوده مورد نظر ماست.

اگر پوش فیلتر شده به صورت یکنواخت نمونه برداری و گسسته‌سازی شود، پوش گسسته ($m[t]$) به دست می‌آید. از آنجایی که برای ارزیابی فلیکر اندازه محدودی از ولتاژ لحظه‌ای در دسترس است بنابراین تعداد نمونه‌های $m[t]$ محدود خواهد بود. با محاسبه شدت طیف توان برای سیگنال پوش-



شکل (۱-۵) طرح کلی تشخیص منبع و مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های سری زمانی

گسسته، شاخصی برای میزان نوسان نایستان دامنه ولتاژ به دست می‌آید که از آن می‌توان برای تشخیص محل اتصال منبع فلیکر در سیستم قدرت استفاده کرد.

خودهمبستگی^۱ سیگنال گسسته $m[t]$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_{mm}[k] = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} m[n+k] m[n] \quad (3-5)$$

که در آن M تعداد نمونه‌های سیگنال $m[t]$ است. اگر $P_{mm}(\omega)$ را تبدیل فوریه‌ی سیگنال $\varphi_{mm}[k]$ بدانیم، چون $\varphi_{mm}[k]$ یک سیگنال گسسته است بنابراین $P_{mm}(\omega)$ متناوب با دوره تناوب 2π خواهد بود. انتگرال $P_{mm}(\omega)$ در یک دوره تناوب نشان دهنده‌ی توان سیگنال است. به این علت است که تابع $P_{mm}(\omega)$ را طیف شدت توان^۲ و یا به اختصار طیف توان^۳ می‌نامند. برای محاسبه‌ی انتگرال $P_{mm}(\omega)$ داریم:

$$E\{|m[t]|^2\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_{mm}(\omega) d\omega \quad (4-5)$$

که در آن $E\{\cdot\}$ عملگر میانگین‌گیر است. بنابراین مساحت زیر $P_{mm}(\omega)$ در محدوده‌ی $-\pi \leq \omega \leq \pi$ متناسب با توان متوسط در سیگنال $m[t]$ می‌باشد [۲۳].

با انتخاب توان طیفی سیگنال $m[t]$ به عنوان شاخص نوسان^۴ دامنه، می‌توان میزان و شدت نوسان نایستان دامنه در باس‌های مختلف سیستم قدرت را سنجید و محل اتصال منبع فلیکر را تشخیص داد. این شاخص به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$FI = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_{mm}(\omega) d\omega = E\{|m[t]|^2\} \quad (5-5)$$

¹ Autocorrelation

² Power Density Spectrum

³ Power Spectrum

⁴ Fluctuation Index (FI)

در مرحله بعد با در نظر گرفتن $m[t]$ به عنوان سری زمانی، ACF و PACF آن محاسبه می‌شود. براساس این دو تابع، مرتبه مدل‌های MA و AR معین می‌شود. برای مرتبه مناسب، مدل‌های MA و AR برای سیگنال پوش ساخته می‌شوند. به عبارت دیگر پارامترهای این دو مدل برای $m[t]$ محاسبه می‌شود. مدل AR می‌تواند $m[t]$ را، در محدوده اندازه‌گیری شده که شامل M داده است، به صورت بازگشتی^۱ مدل کند. این مدل بازگشتی می‌تواند پوش دامنه را برای زمان‌های بعدی پیش‌بینی کند.

اگر مدل AR از مرتبه p برای $m[t]$ ساخته شده باشد، برای پیش‌بینی پوش (محاسبه‌ی داده‌های بعد از M) به صورت زیر خواهد بود:

$$m[M + 1] = \delta + \varphi_1 m[M] + \varphi_2 m[M - 1] + \dots + \varphi_p m[M - p + 1] \quad (۵-۶)$$

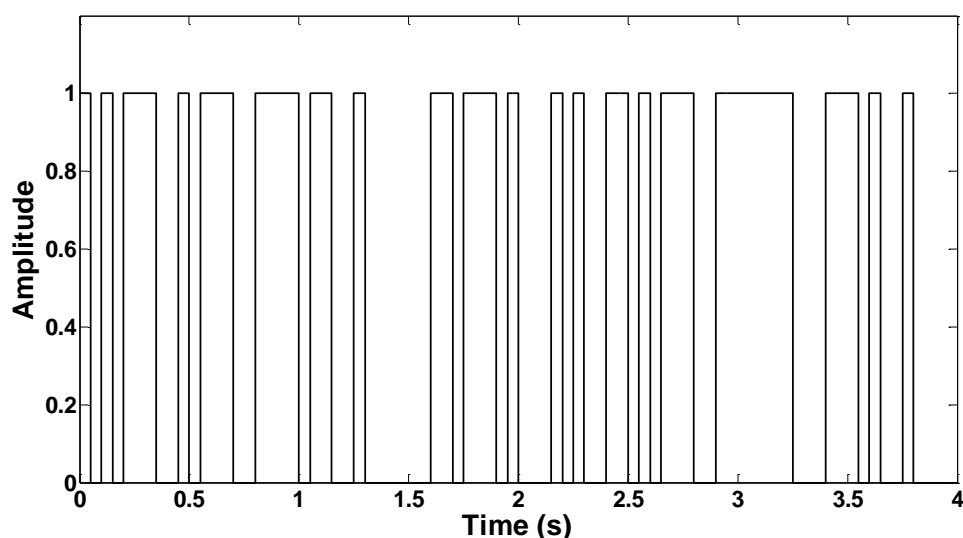
۵-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به تشخیص محل اتصال منبع فلیکر نایستان در سیستم و مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش نایستان توسط روش‌های MA و AR ارائه می‌شود. برای ایجاد پوش نایستان در دامنه ولتاژ شبکه در مدل منبع فلیکر (مقاومت متصل با سوئیچ به باس) سوئیچینگ مقاومت با یک پالس تصادفی کنترل می‌شود. شکل موج پالس کنترل سوئیچ منبع فلیکر در شکل (۵-۲) نشان داده می‌شود. توجه شود که زمانی که مقدار پالس یک است کلید وصل و زمانی که پالس صفر است کلید مدل منبع فلیکر قطع خواهد بود. با قطع و وصل تصادفی کلید، پوش نایستان در دامنه ظاهر می‌شود.

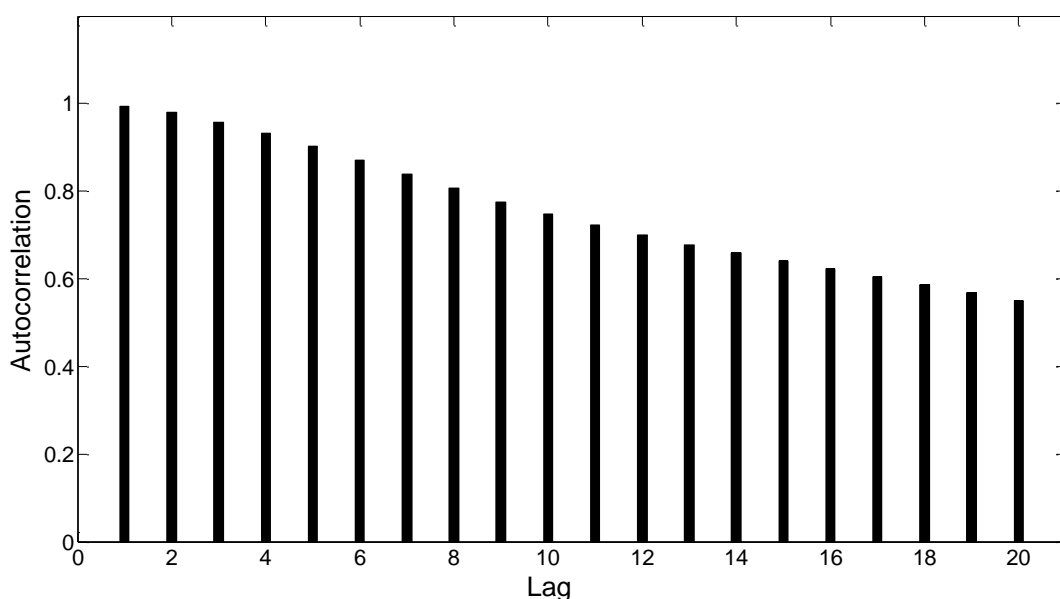
سه سناریو در این بخش برای سیستم قدرت پیشنهاد و شبیه‌سازی می‌شود. طی این سناریوها محل منبع فلیکر در شبکه و اندازه آن (توان بار فلیکرزا) تغییر می‌کند. در سناریوی اول یک منبع فلیکر در باس چهارم در نظر گرفته می‌شود. اندازه مقاومت این منبع فلیکر $۱/۸۹$ پریونیت است. پس از اندازه-

^۱ Recursive

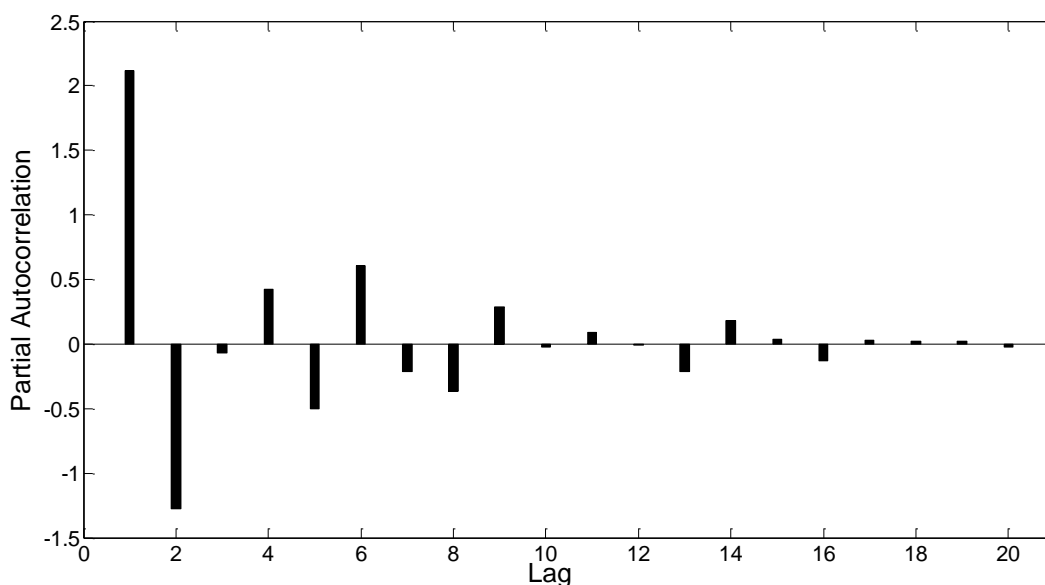
گیری ولتاژ باس‌ها و استخراج پوش آنها توسط EPLL، سیگنال پوش با فرکانس ۱ kHz نمونه‌برداری می‌شود. با در نظر گرفتن پوش گسسته به عنوان سری زمانی ACF و PACF برای هر پوش (برای پوش هر کدام از باس‌ها) محاسبه می‌شود. مرتبه مناسب مدل‌های MA و AR توسط ACF و PACF تعیین می‌شوند. برای مثال ACF و PACF برای پوش گسسته باس چهارم ($m_4[t]$) در شکل‌های (۵-۳) و (۴-۵) آمده است.



شکل (۵-۲) پالس سوئیچینگ



شکل (۵-۳) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول



شکل (۴-۵) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول

برای پوش‌های گسسته، همان‌طور که در دو شکل قبل مشاهده شد، تغییرات ACF به صورت نمایی بوده و PACF بعد از تاخیر دوم cut off می‌شود. بنابراین مدل‌های مرتبه دوم برای MA و AR مناسب می‌باشند. از طرف دیگر میرایی آرام ACF و بزرگتر بودن مقادیر PACF از یک (در تاخیر اول و دوم مقدار تابع خودهمبستگی جزئی از یک بیشتر است)، نشان دهنده‌ی نایستان بودن سیگنال پوش هستند.

با استفاده از دو ثانیه از سیگنال پوش، پارامترهای مدل‌های $MA(2)$ و $AR(2)$ محاسبه شده است که در جدول (۱-۵) آمده است. مدل AR سیگنال پوش را به صورت بازگشتی و به کمک دو نمونه قبل مدل می‌کنند.

همچنین شاخص پیشنهادی برای شدت نوسان دامنه، در تمامی باس‌ها محاسبه و مقادیر آن در جدول (۱-۵) آورده شده است. بیشترین مقدار این شاخص همان‌طور که انتظار می‌رود در باس چهارم دیده می‌شود. به عبارت دیگر شاخص پیشنهادی به درستی محل اتصال منبع فلیکر را نشان داده است.

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

| باس | مدل MA | | | مدل AR | | | شاخص نوسان |
|-----|--------|------------|------------|----------|-------------|-------------|--------------------|
| | μ | θ_1 | θ_2 | δ | φ_1 | φ_2 | |
| ۱ | ۱۹۵/۲۴ | -۰/۵۰۲۴ | -۰/۹۷۹۲ | ۲/۰۳۴۹ | ۱/۸۱۷۶ | -۰/۸۲۸۰ | $۱/۰۳ \times ۱۰^۷$ |
| ۲ | ۱۸۶/۵۲ | -۰/۵۰۲۴ | -۰/۹۷۹۲ | ۱/۹۴۴۶ | ۱/۸۵۹۳ | -۰/۸۶۹۶ | $۰/۹۸ \times ۱۰^۷$ |
| ۳ | ۱۸۳ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۴ | ۱/۷۹۳۶ | ۱/۸۷۵۶ | -۰/۸۸۵۴ | $۰/۸۷ \times ۱۰^۷$ |
| ۴ | ۱۸۹/۵۹ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۲ | ۱/۸۷۸۷ | ۱/۸۶۴۸ | -۰/۸۷۴۸ | $۱/۲ \times ۱۰^۷$ |
| ۵ | ۱۷۶/۴۶ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۵ | ۱/۷۲۳۶ | ۱/۸۸۴۰ | -۰/۸۹۳۷ | $۰/۸۶ \times ۱۰^۷$ |
| ۶ | ۱۷۴/۳۵ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۶ | ۱/۶۹۳۲ | ۱/۸۸۲۴ | -۰/۸۹۲۱ | $۰/۸۱ \times ۱۰^۷$ |

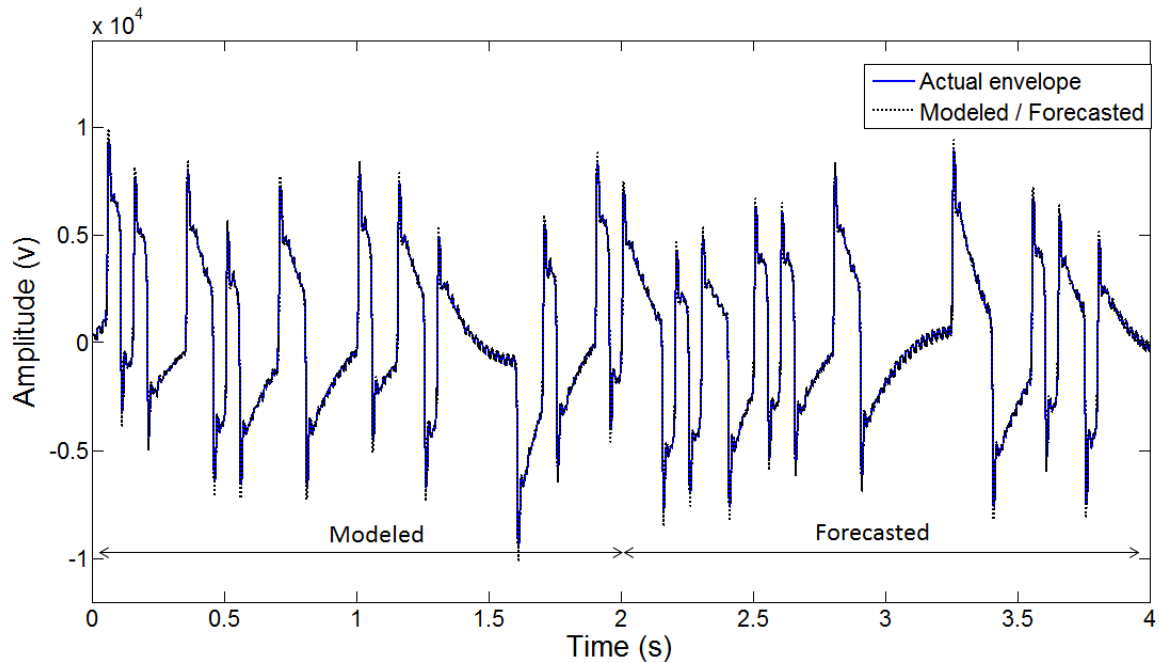
با توجه به جدول فوق در شرایط بدون نویز سیگنال پوش توسط مدل AR مدل‌سازی و پیش‌بینی می‌شود. برای مثال پوش ولتاژ باس چهارم به صورت زیر خواهد بود:

$$m_4[t] = 1.87 + 1.86 m_4[t - 1] - 0.87 m_4[t - 2] \quad (۷-۵)$$

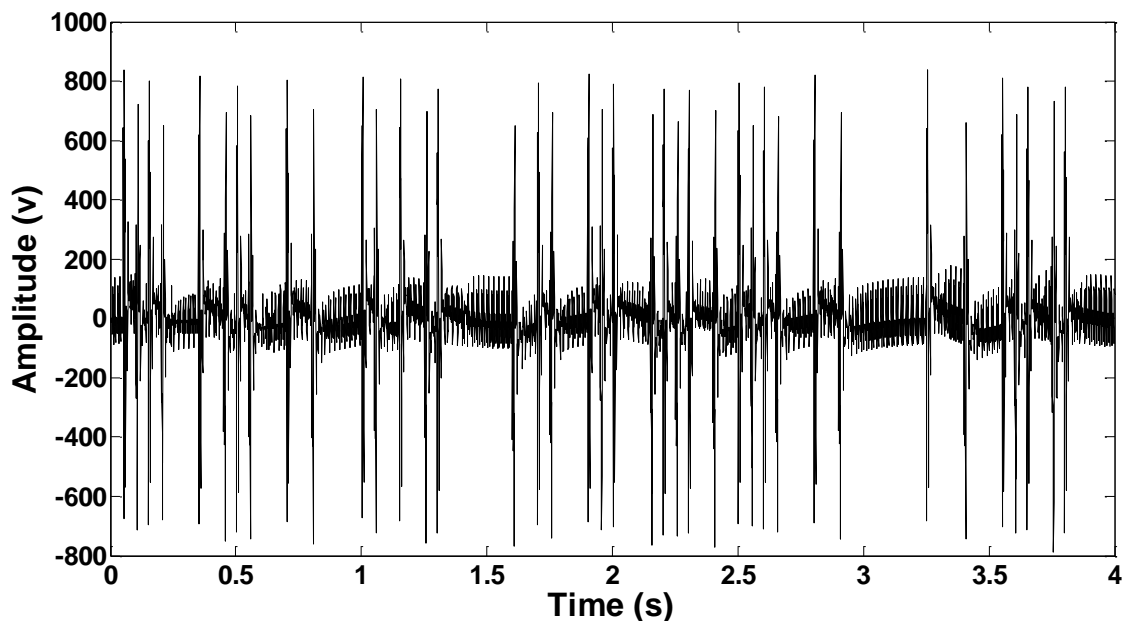
این مدل با استفاده از دو ثانیه از پوش واقعی به دست می‌آید و این دو ثانیه را مدل می‌کند. این مدل می‌تواند برای زمان‌های آتی پوش را پیش‌بینی کند. در شکل (۵-۵) سیگنال پوش باس چهارم برای چهار ثانیه نشان داده شده است. با استفاده از دو ثانیه اول این سیگنال، مدل ساخته شده و این مدل توانسته پوش را ردگیری کند. برای ثانیه دوم تا ثانیه چهارم مدل با استفاده از دو نمونه قبل پوش را پیش‌بینی کرده است. مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش هم در شکل (۵-۵) نشان داده می‌شود. خطای مطلق بین پوش واقعی و پوش مدل شده / پیش‌بینی شده در شکل (۵-۶) دیده می‌شود. این خطا در بدترین حالت از ۰/۳۴٪ ولتاژ نامی تجاوز نمی‌کند. برای کمی کردن بررسی خطا، مقدار جذر مربعات خطا را به عنوان معیار ارزیابی به صورت زیر بکار می‌بریم:

$$error_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum e[t]^2} \quad (۸-۵)$$

که در آن N تعداد نمونه‌ها و $e[t]$ اختلاف مقدار واقعی و مقدار مدل شده / پیش‌بینی شده‌ی هر نمونه از پوش است.



شکل (۵-۵) پوش ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول

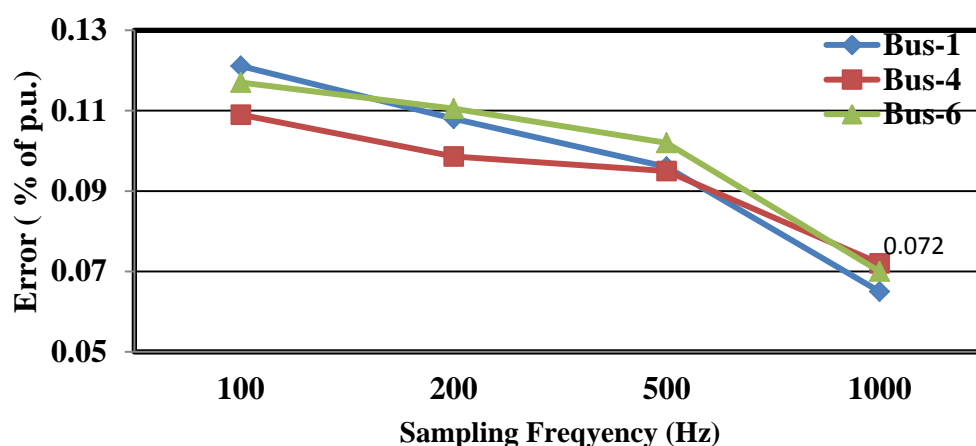


شکل (۵-۶) خطای مطلق بین پوش واقعی و مدل شده/پیش‌بینی شده ولتاژ باس چهارم، سناریوی اول

برای باس چهارم مقدار مجذور مربعات خطا برابر $10^{-3} \times 0.72$ پریونیت است. این مقدار در باس‌های دیگر بسیار نزدیک به این مقدار می‌باشد مثلاً در باس‌های اول و ششم این مقدار به ترتیب برابر $10^{-3} \times 0.65$ پریونیت و $10^{-3} \times 0.7$ پریونیت است.

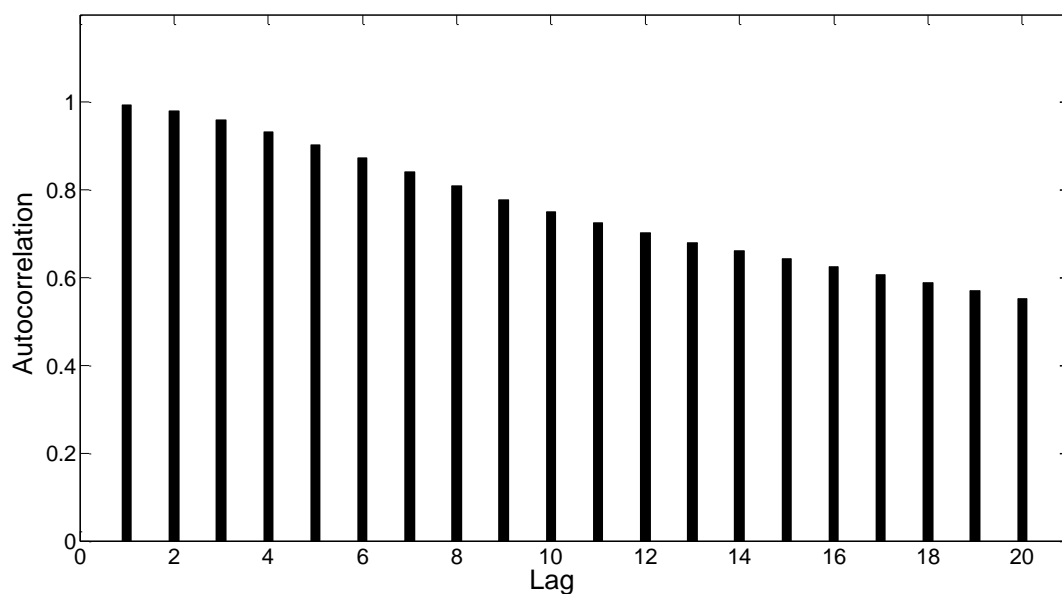
از آنجایی که مدل بازگشتی با استفاده از نمونه‌های قبلی ساخته می‌شود، هرچه فاصله‌ی بین داده‌ها کوچکتر باشد خطای مدل‌سازی کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر فرکانس نمونه‌برداری از سیگنال نسبت عکس با خطا دارد. از طرف دیگر فرکانس نمونه‌برداری بالا باعث می‌شود که تعداد داده‌ها زیاد شده و محاسبات سنگین‌تر شود. بنابراین باید بین این دو عامل مصالحه صورت گیرد. اثر فرکانس نمونه‌برداری بر روی خطا در تعدادی از باس‌ها در شکل (۷-۵) آمده است.

در سناریوی دوم منبع فلیکر در باس ششم با مقاومت $1/32$ پریونیت و در سناریوی سوم منبع فلیکر در باس پنجم با مقاومت $4/72$ پریونیت در نظر گرفته شده است. مقادیر ACF و PACF برای پوش یکی از باس‌ها برای این دو سناریو در شکل‌های (۵-۸) تا (۵-۱۱) نشان داده شده است. این مقادیر علاوه بر این که بر نایستان بودن این پوش‌ها دلالت می‌کنند، مانند سناریوی اول مدل‌های MA و AR مرتبه دو را پیشنهاد می‌دهند. مقادیر پارامترهای این مدل‌ها برای پوش ولتاژ تک تک باس‌ها و شاخص نوسان دامنه در تمام باس‌ها در جدول‌های (۵-۲) و (۵-۳) برای سناریوهای دوم و سوم آمده

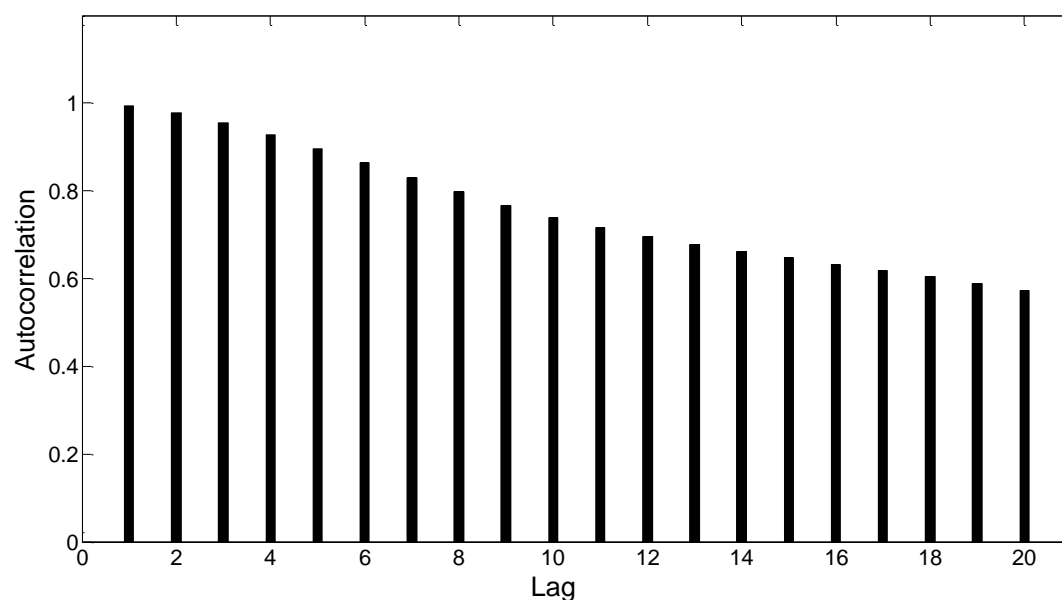


شکل (۷-۵) ارتباط بین خطای مدل و فرکانس نمونه‌برداری

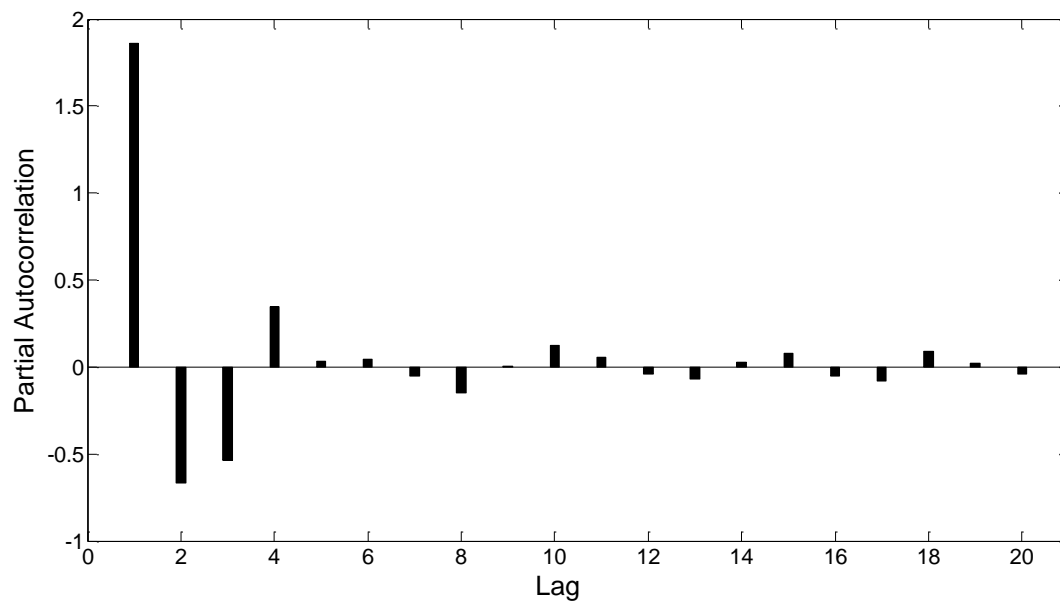
است. مطابق این نتایج بیش‌ترین مقدار شاخص در باسی است که منبع فلیکر در آن قرار گرفته است. به عبارت دیگر محل اتصال منبع به درستی شناسایی می‌شود.



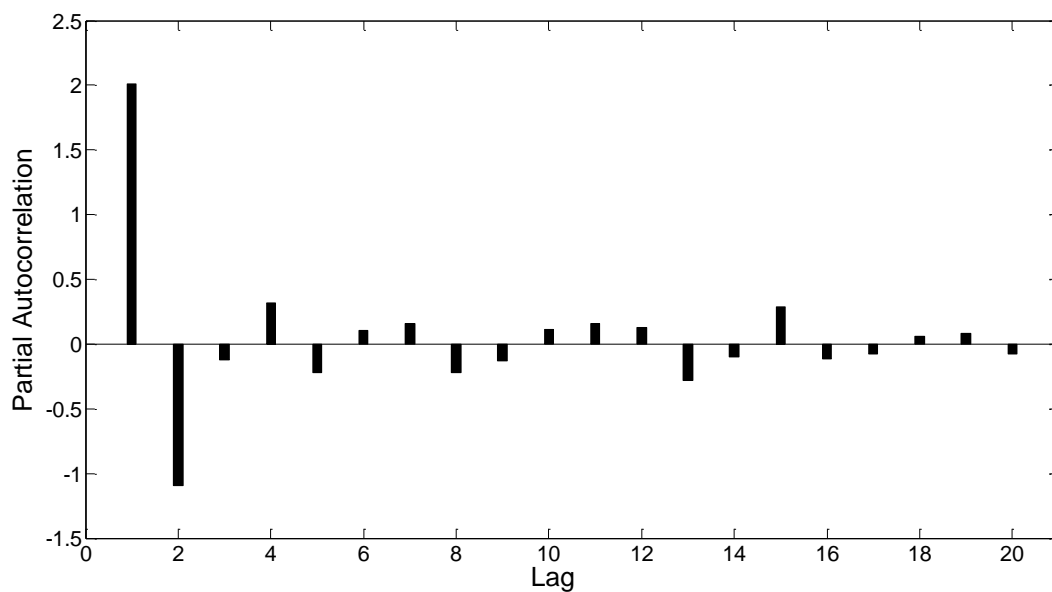
شکل (۸-۵) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم



شکل (۹-۵) تابع خودهمبستگی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم



شکل (۵-۱۰) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس ششم، سناریوی دوم



شکل (۵-۱۱) تابع خودهمبستگی جزئی برای پوش گسسته ولتاژ باس پنجم، سناریوی سوم

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

| باس | مدل MA | | | مدل AR | | | شاخص نوسان |
|-----|--------|------------|------------|----------|-------------|-------------|--------------------|
| | μ | θ_1 | θ_2 | δ | φ_1 | φ_2 | |
| ۱ | ۲۱۶/۹۴ | -۰/۵۰۲۵ | -۰/۹۷۹۱ | ۲/۲۷۳۱ | ۱/۸۷۹۹ | -۰/۸۹۰۴ | $۱/۷۸ \times ۱۰^۷$ |
| ۲ | ۲۱۸/۵۹ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۱ | ۲/۱۸۲۸ | ۱/۸۶۲۶ | -۰/۸۷۲۶ | $۱/۹۸ \times ۱۰^۷$ |
| ۳ | ۲۲۲/۰۵ | -۰/۵۰۲۴ | -۰/۹۷۹۳ | ۲/۳۰۸۷ | ۱/۸۲۰۸ | -۰/۸۳۱۲ | $۲/۲۵ \times ۱۰^۷$ |
| ۴ | ۲۰۴/۵۱ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۵ | ۲/۰۰۰۴ | ۱/۸۷۹۷ | -۰/۸۸۹۵ | $۱/۶۸ \times ۱۰^۷$ |
| ۵ | ۲۰۷/۸۷ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۷ | ۲/۰۱۳۳ | ۱/۸۷۶۶ | -۰/۸۸۶۳ | $۱/۸۴ \times ۱۰^۷$ |
| ۶ | ۲۱۸/۶۰ | -۰/۵۰۲۳ | -۰/۹۸۰۴ | ۲/۱۵۳۳ | ۱/۸۲۹۸ | -۰/۸۳۹۷ | $۲/۳۴ \times ۱۰^۷$ |

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

| باس | مدل MA | | | مدل AR | | | شاخص نوسان |
|-----|--------|------------|------------|----------|-------------|-------------|--------------------|
| | μ | θ_1 | θ_2 | δ | φ_1 | φ_2 | |
| ۱ | ۱۵۱/۱۸ | -۰/۵۰۲۶ | -۰/۹۷۷۲ | ۱/۷۲۷۲ | ۱/۸۲۴۷ | -۰/۸۳۶۱ | $۱/۶۵ \times ۱۰^۶$ |
| ۲ | ۱۴۴/۸۸ | -۰/۵۰۲۶ | -۰/۹۷۷۵ | ۱/۶۳۸۳ | ۱/۸۳۴۲ | -۰/۸۴۵۵ | $۱/۶۲ \times ۱۰^۶$ |
| ۳ | ۱۴۴/۳۰ | -۰/۵۰۲۶ | -۰/۹۷۷۶ | ۱/۶۱۸۲ | ۱/۸۳۳۸ | -۰/۸۴۵۰ | $۱/۶۲ \times ۱۰^۶$ |
| ۴ | ۱۳۸/۸۸ | -۰/۵۰۲۶ | -۰/۹۷۸۰ | ۱/۵۳۵۰ | ۱/۸۴۰۸ | -۰/۸۵۱۹ | $۱/۴۹ \times ۱۰^۶$ |
| ۵ | ۱۴۱/۱۱ | -۰/۵۰۲۵ | -۰/۹۷۸۲ | ۱/۵۴۵۸ | ۱/۸۳۳۹ | -۰/۸۴۴۸ | $۱/۹۴ \times ۱۰^۶$ |
| ۶ | ۱۳۷/۶۴ | -۰/۵۰۲۵ | -۰/۹۷۸۱ | ۱/۵۱۰۱ | ۱/۸۴۰۸ | -۰/۸۵۱۸ | $۱/۵۲ \times ۱۰^۶$ |

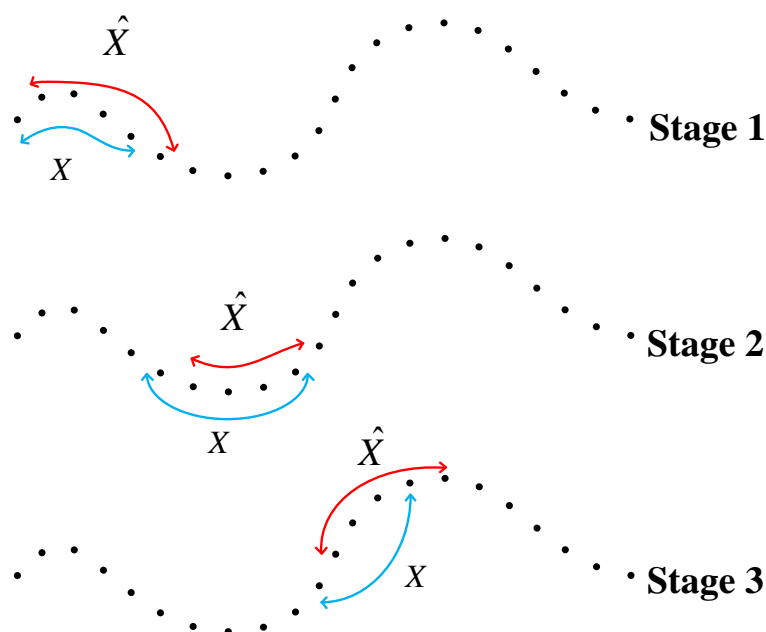
۳-۵ مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش با مدل‌های خاکستری اصلاح شده

همان‌طور که در فصل سوم بحث شده است مدل‌های خاکستری پیش‌بین‌های محلی هستند. با توجه به این واقعیت دقت آنها در برازش کردن (مدل کردن) داده‌های زیاد، بالا نیست. بنابراین برای مدل کردن و پیش‌بینی کردن پوش دامنه ولتاژ که یک سیگنال نایستان است، در مدل‌های خاکستری باید اصلاحاتی صورت گیرد. در این بخش برای تبدیل مدل‌های خاکستری به پیش‌بین‌های کلی استراتژی

مبتنی بر تکرار^۱ پیشنهاد می‌شود. توسط این روش تکراری این مدل‌ها می‌توانند برای سیگنال پوش بکار روند.

۵-۳-۱ روش اصلاح شدهی GM(1,1) و FGM

اگر $m[t]$ سیگنال پوش گسسته شده باشد که شامل M نمونه است، در روش پیشنهادی این داده‌ها طی q مرحله (تکرار) توسط GM(1,1) مدل می‌شود. اگر n تعداد داده‌ها در هر GM(1,1) باشد (معمولاً ۵، ۸، ۱۰ یا ۲۰)، در این صورت q خارج قسمت صحیح تقسیم M بر n است. در هر مرحله که n داده استفاده می‌شود، از دومین داده تا آخرین آنها مدل می‌شوند. همچنین p داده بعد، یعنی از داده $n+1$ تا داده $n+p$ پیش‌بینی می‌شود. که به p گام پیش‌بینی گفته می‌شود. سه مرحله از روش پیشنهادی برای مدل‌کردن و پیش‌بینی توسط GM(1,1) اصلاح شده برای یک سیگنال فرضی گسسته در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. در این شکل تعداد داده‌های هر GM(1,1) پنج ($n=5$) و $p=1$ گام پیش‌بینی یک ($p=1$) فرض شده است.



شکل (۵-۱۲) سه مرحله از روش اصلاح شدهی GM(1,1) به ازای $n=5$ و $p=1$ ؛ X نشان دهندهی داده‌های استفاده شده در هر مدل و \hat{X} نشان دهندهی داده‌های مدل شده یا پیش‌بینی شده است.

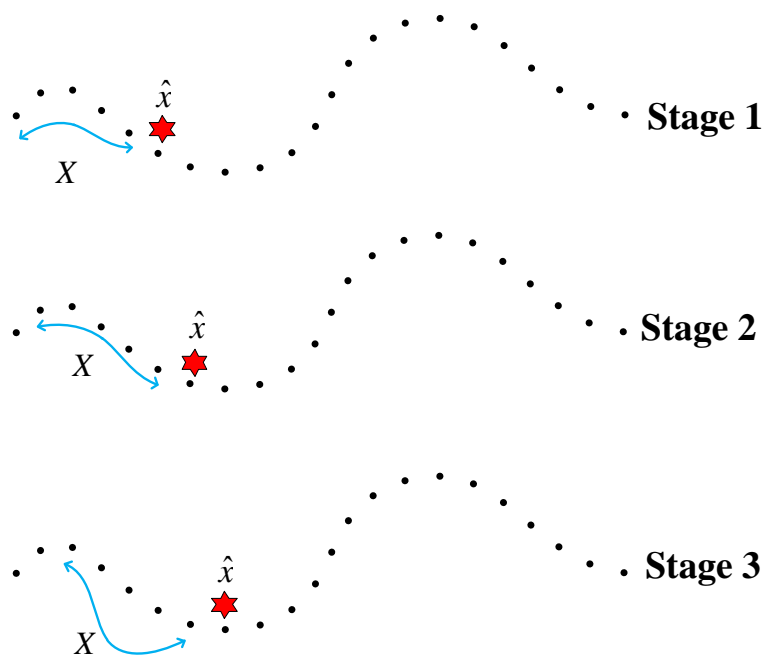
^۱ Iteration

روش FGM هم مانند GM(1,1) با روش تکرار می‌تواند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش بکار رود. به این ترتیب که در هر تکرار، خطای GM(1,1) ساخته شده توسط سری فوریه بهبود داده می‌شود. باید توجه شود که در روش FGM گام پیش‌بینی فقط یک می‌تواند باشد.

۵-۳-۲ مدل GM(1,1) لغزان^۱

در این مدل خاکستری، داده‌های ورودی مدل GM(1,1) در هر مرحله یک داده جلو می‌رود و فقط یک داده پیش‌بینی می‌شود. برای مثال با استفاده از داده‌های $x(k)$ تا $x(k+n)$ مدل داده‌ی $x(k+n+1)$ را پیش‌بینی می‌کند. در مرحله بعدی اولین داده یک داده به جلو کشیده می‌شود. به این ترتیب از داده‌های $x(k+1)$ تا $x(k+n+1)$ استفاده می‌شود تا داده‌ی $x(k+n+2)$ پیش‌بینی شود. این روند تا پایان داده‌ها ادامه پیدا می‌کند. به ازای مقادیر مختلف n این روش می‌تواند برای مدل کردن و یا پیش‌بینی پوش دامنه بکار رود. طبق تعریف گام پیش‌بینی برای این مدل همواره یک است. سه مرحله از روش خاکستری لغزان برای یک سیگنال فرضی گسسته در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. در این شکل تعداد داده‌های هر مدل پنج ($n=5$) و گام پیش‌بینی یک ($p=1$) فرض شده است.

^۱ Rolling Grey



شکل (۵-۱۳) سه مرحله از روش خاکستری لغزان به ازای $n = 5$ و $p = 1$ ؛ X نشان دهنده‌ی داده‌های استفاده شده در هر مدل و \hat{x} نشان دهنده‌ی داده‌ی پیش‌بینی شده است.

۵-۳-۳ ملاک‌های ارزیابی مدل‌های خاکستری

برای ارزیابی دقت مدل‌های خاکستری در مدل‌سازی یا پیش‌بینی داده‌ها، شاخص‌های خطایی معرفی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شاخص‌ها مقادیر واقعی $(m^{(0)}(k))$ و مقادیر مدل‌شده یا پیش‌بینی شده $(\hat{m}^{(0)}(k))$ را مقایسه می‌کنند. توجه شود در FGM به جای $\hat{m}^{(0)}(k)$ از $\tilde{m}^{(0)}(k)$ استفاده می‌شود. اولین شاخص خطای میانگین مربعات^۱ (MSE) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{M-1} \sum_{k=2}^M (m(k) - \hat{m}(k))^2 \quad (۹-۵)$$

دومین شاخص خطای میانگین مطلق^۲ (AME) است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$AME = \frac{1}{M-1} \sum_{k=2}^M |m(k) - \hat{m}(k)| \quad (۱۰-۵)$$

^۱ Mean Square Error

^۲ Absolute Mean Error

همچنین شاخص سوم، میانگین درصد خطای نسبی^۱ (ARPE) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ARPE = \frac{1}{M-1} \sum_{k=2}^M \frac{|m(k) - \hat{m}(k)|}{m(k)} \quad (11-5)$$

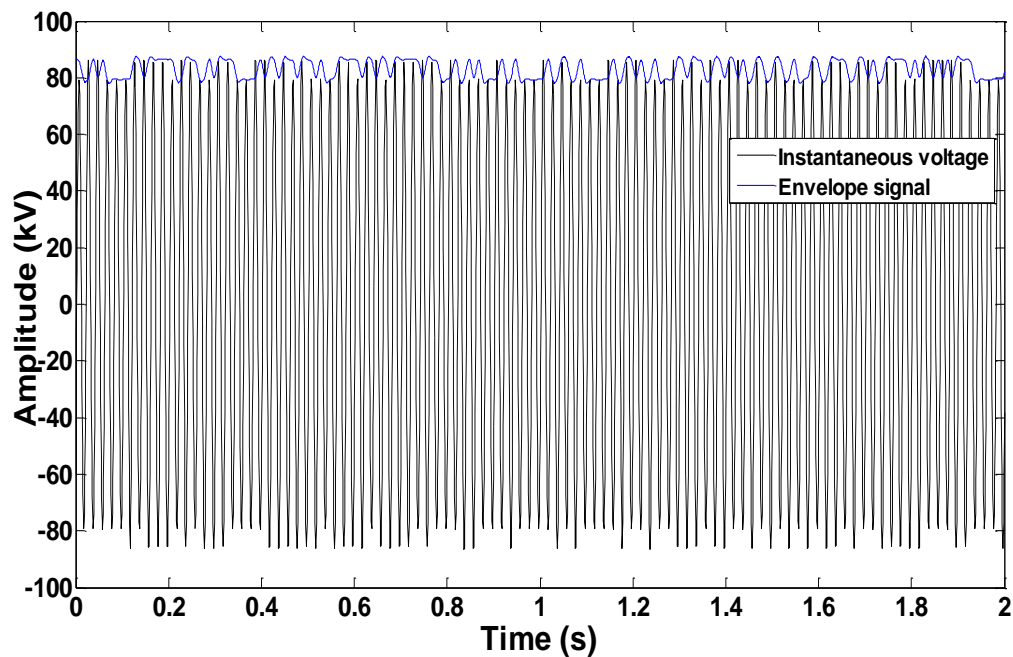
در این روابط M تعداد نمونه‌های سیگنال پوش است.

۵-۳-۴ نتایج شبیه‌سازی

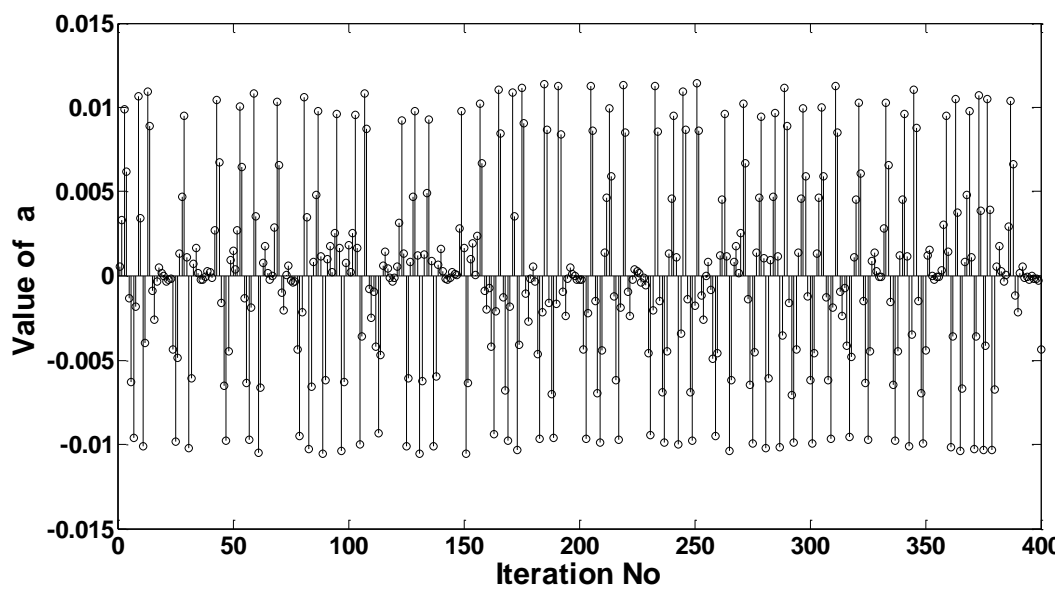
در این بخش برای یک ولتاژ نمونه که دامنه‌اش دارای نوسان نایستان است از روش‌های مبتنی بر تئوری خاکستری برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پوش استفاده می‌کنیم. پس از استخراج پوش توسط EPLL و گسسته‌سازی آن با فرکانس ۱ kHz پوش گسسته حاصل می‌شود. هرچند محدوده فرکانسی فلیکر بین ۰/۱ تا ۳۵ هرتز است ولی چون پوش و در نتیجه سیگنال ولتاژ فرکانس‌های بالاتری هم ممکن است داشته باشند بنابراین فرکانس نمونه برداری مقدار ذکر شده انتخاب شده که بازیابی سیگنال ممکن باشد. در شکل (۵-۱۴) شکل موج ولتاژ نوسانی مورد بررسی و پوش استخراج شده‌ی آن توسط EPLL نشان داده می‌شود.

سیگنال پوش گسسته شده $(m[t])$ دارای ۲۰۰۰ داده است. برای عملکرد مناسب $GM(1,1)$ در هر تکرار ۵ داده به عنوان ورودی مدل استفاده می‌شود ($n = 5$). در این شرایط ۴۰۰ مدل $GM(1,1)$ برای پوشش دادن کل سیگنال پوش لازم خواهد بود. توجه شود که در هر تکرار یک $GM(1,1)$ متفاوت ساخته خواهد شد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شده است هر $GM(1,1)$ با دو پارامتر a و b شناخته می‌شود. مقادیر این دو پارامتر در تمامی تکرارها در شکل‌های (۵-۱۵) و (۵-۱۶) نشان داده شده است.

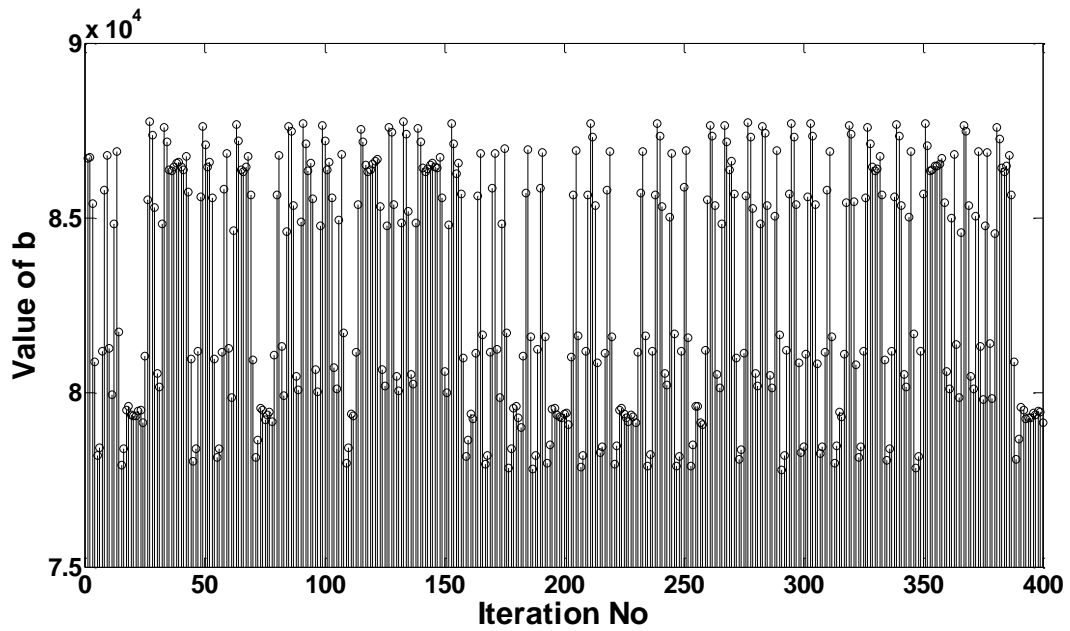
^۱ Average Relative Percentage Error



شکل (۵-۱۴) ولتاژ نوسانی مورد بررسی و پوش استخراج شده‌ی آن

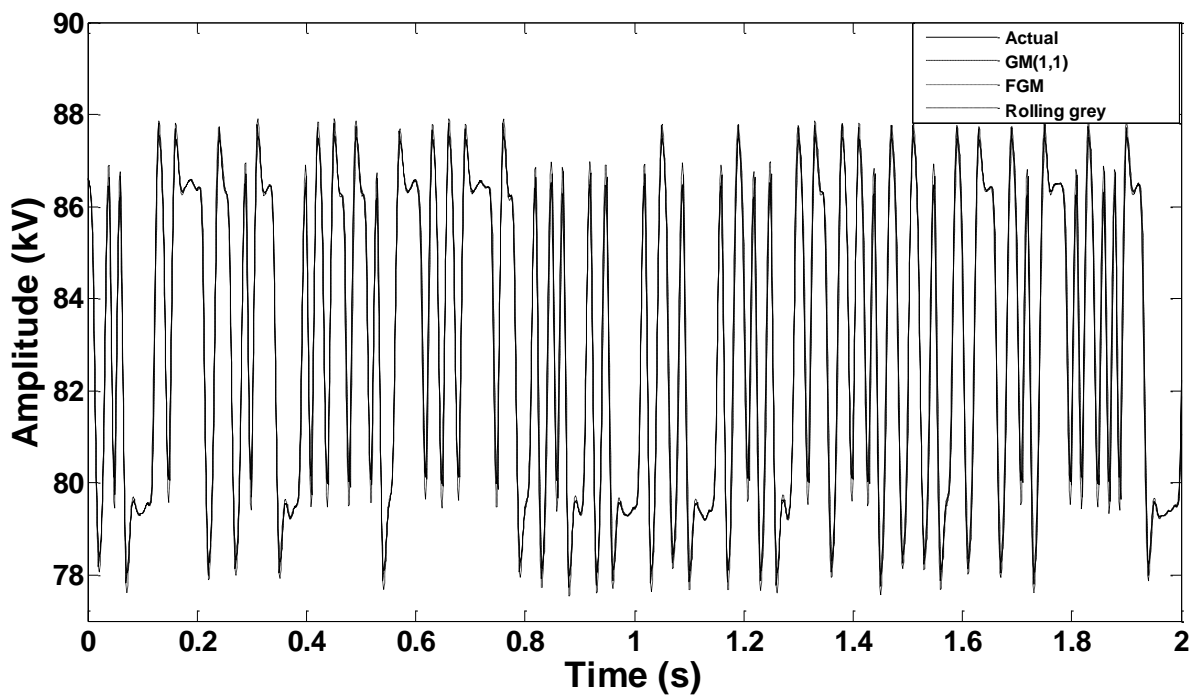


شکل (۵-۱۵) مقدار پارامتر a در هرکدام از $GM(1,1)$ ها

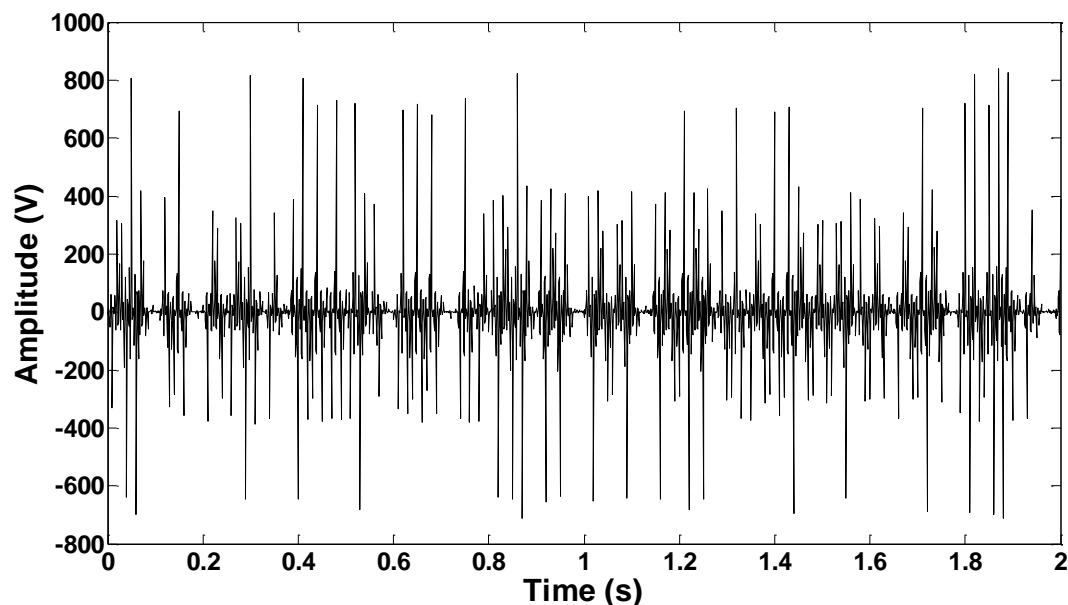


شکل (۵-۱۶) مقدار پارامتر b در هر کدام از $GM(1,1)$ ‌ها

با انباشت همگی $GM(1,1)$ ‌های ایجاد شده کل پوش ولتاژ مدل و پیش‌بینی می‌شود. پوش واقعی و مدل $GM(1,1)$ اصلاح شده در شکل (۵-۱۷) و خطای مطلق این مدل‌ها در (۵-۱۸) نشان داده می‌شوند. مقادیر MSE ، AME و $ARPE$ به ترتیب $2/09 \times 10^4$ ، $76/97$ و $0/093\%$ است.

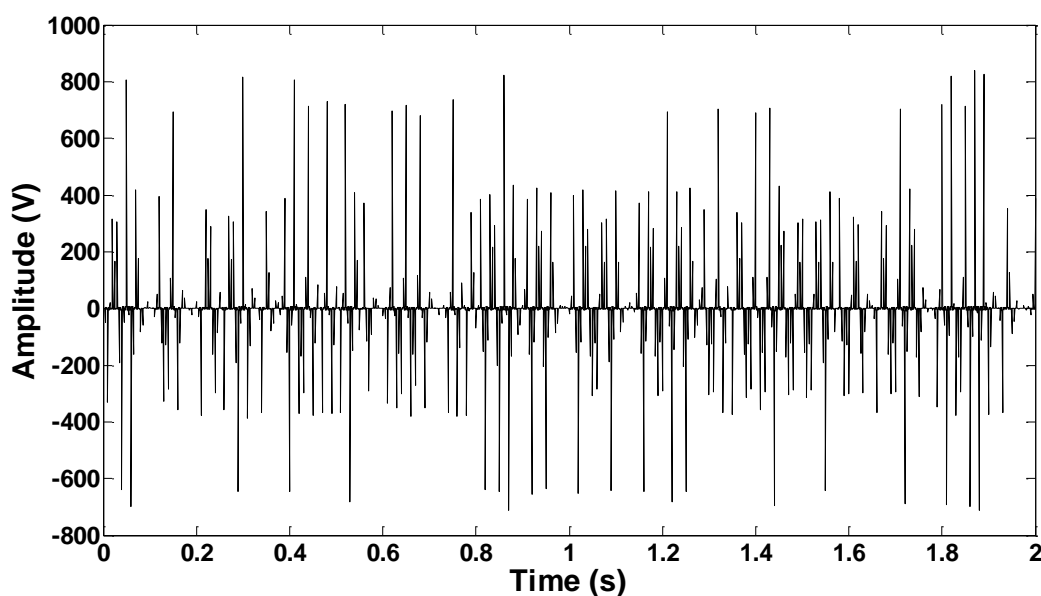


شکل (۵-۱۷) پوش واقعی و مدل‌های خاکستری اصلاح شده آن به ازای $n = 5$



شکل (۱۸-۵) خطای مطلق در روش GM(1,1) اصلاح شده به ازای $n = 5$

برای افزایش دقت مدل GM(1,1) اصلاح شده از روش FGM در هر تکرار استفاده می‌کنیم و خطاها تصحیح می‌شوند. مدل FGM پوش و خطای مطلق به ترتیب در شکل‌های (۱۷-۵) و (۱۹-۵) نشان داده می‌شود. مقادیر MSE، AME و ARPE به ترتیب $10^4 \times 1/83$ ، $45/61$ و $0/055\%$ است. این نتایج نشان می‌دهد که استراتژی تصحیح باقی‌مانده در افزایش دقت موفق بوده است و خطا کاهش یافته است. برای مثال خطای نسبی تقریباً 40% بهبود یافته است.

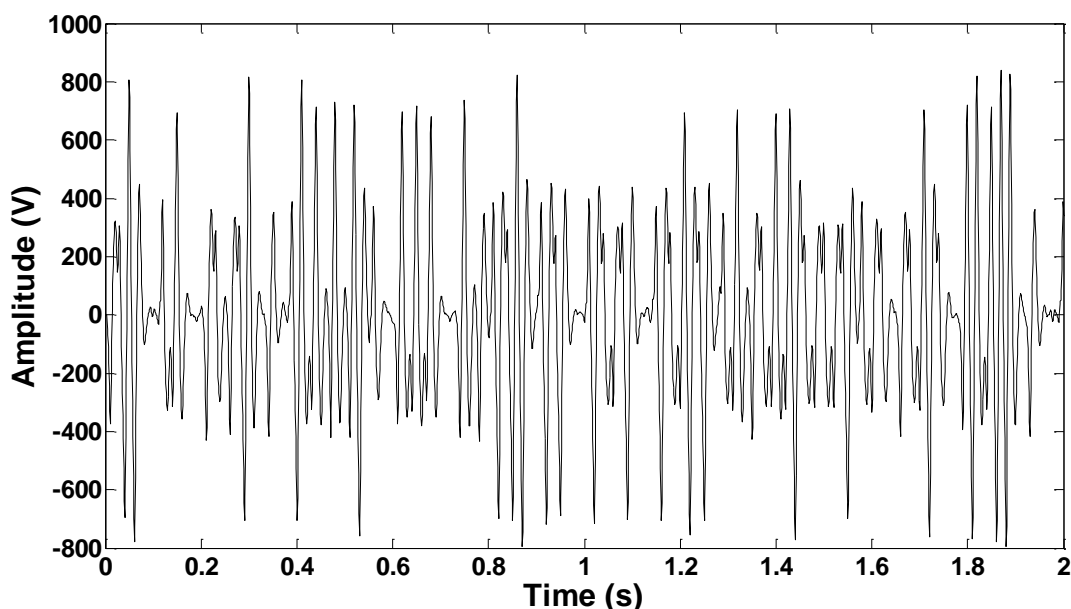


شکل (۱۹-۵) خطای مطلق در روش FGM اصلاح شده به ازای $n = 5$

برای مقایسه با عملکرد روش‌های اصلاح شده‌ی $GM(1,1)$ و FGM سیگنال پوش به روش خاکستری لغزان هم مدل می‌شود. مدل خاکستری لغزان پوش و خطای مطلق به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۲۰) نشان داده می‌شود. مقادیر MSE ، AME و $ARPE$ به ترتیب $۸/۲۷ \times ۱۰^۴$ ، $۲۱۷/۲۹$ و $۰/۲۶\%$ است. دقت این مدل کمتر از مدل $GM(1,1)$ اصلاح شده بوده و در نتیجه کمتر از روش FGM می‌باشد. خطای نسبی در این روش تقریباً $۲/۷۹$ برابر روش $GM(1,1)$ است.

تا کنون مدل‌های مختلف اصلاح شده‌ی خاکستری را برای $n = 5$ شبیه‌سازی کرده‌ایم. خطای نسبی در بدترین حالت $۰/۲۶\%$ است که در مدل خاکستری لغزان دیده شد. این میزان خطای نشان دهنده‌ی دقت بسیار بالای روش‌های خاکستری در مدل کردن و پیش‌بینی سیگنال پوش است. در این سه روش، همانطور که انتظار می‌رفت روش FGM بهترین دقت را دارد.

برای بررسی اثر تعداد داده‌های هر بار مدل کردن (n) شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر ۸، ۱۰ و ۲۰ تکرار می‌شود. مقادیر خطاها تحت این شرایط در جدول (۵-۴) آمده است.



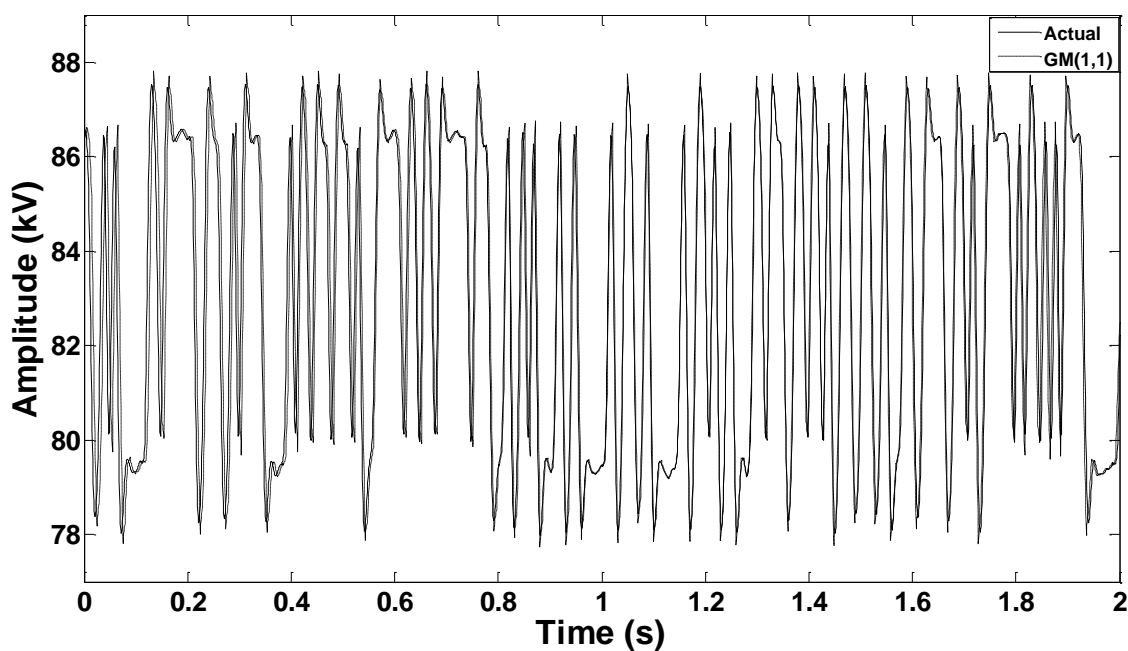
شکل (۵-۲۰) خطای مطلق در روش خاکستری لغزان اصلاح شده به ازای $n = 5$

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

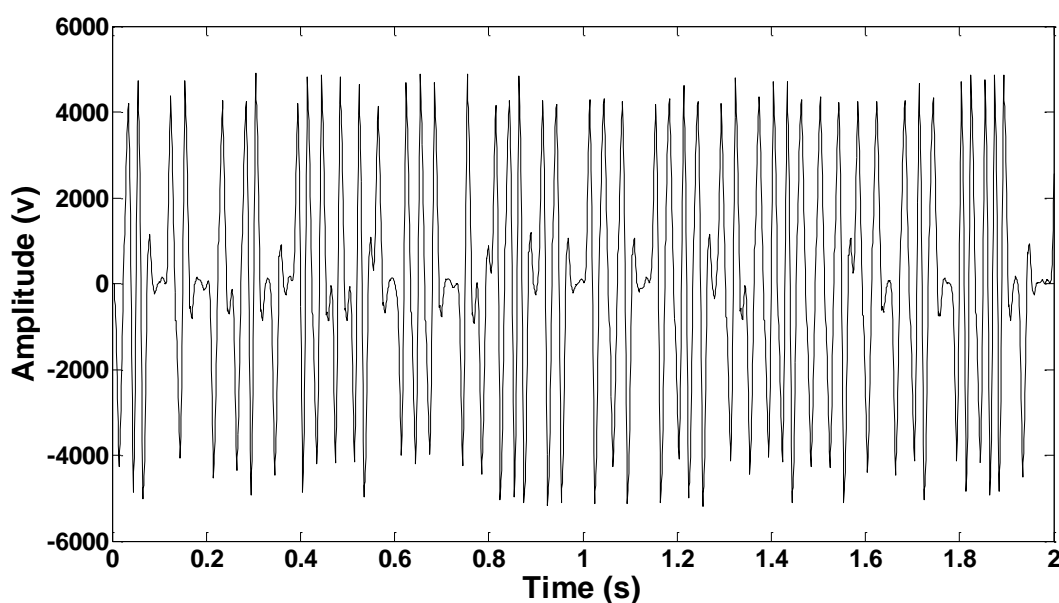
| مدل | خطا | تعداد داده‌ها در هر مرحله (n) | | | |
|--------------|---------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | ۵ | ۸ | ۱۰ | ۲۰ |
| GM(1,1) | MSE | $۲/۰۹ \times ۱۰^۴$ | $۸/۴۶ \times ۱۰^۴$ | $۱/۴۷ \times ۱۰^۵$ | $۱/۵۳ \times ۱۰^۶$ |
| | AME | ۷۶/۹۷ | ۱۷۵/۹۹ | ۲۳۰/۵۲ | ۹۱۲/۲ |
| | ARPE(%) | ۰/۰۹۳ | ۰/۲۱۲ | ۰/۲۸ | ۱/۱ |
| FGM | MSE | $۱/۸۳ \times ۱۰^۴$ | $۵/۲۴ \times ۱۰^۴$ | ۱×۱۰^۵ | $۲/۱۴ \times ۱۰^۵$ |
| | AME | ۴۵/۶۱ | ۷۴/۷ | ۱۰۰/۸۲ | ۱۱۹/۹۴ |
| | ARPE(%) | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۹ | ۰/۱۲ | ۰/۱۴۴ |
| Rolling Grey | MSE | $۸/۲۷ \times ۱۰^۴$ | $۴/۱۹ \times ۱۰^۵$ | $۸/۷۵ \times ۱۰^۵$ | $۵/۶۵ \times ۱۰^۶$ |
| | AME | ۲۱۷/۲۹ | ۴۹۷/۱۵ | ۷۲۴/۳۸ | ۱۹۰۶ |
| | ARPE(%) | ۰/۲۶ | ۰/۶ | ۰/۸۷۴ | ۲/۲۹ |

با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که به ازای یک مدل مشخص هرچه تعداد داده‌ها بیشتر شود دقت مدل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر باید تا حد ممکن تعداد داده‌های مدل کمتر شود تا دقت افزایش یابد. از طرف دیگر به ازای تعداد داده معین روش اصلاح شده‌ی FGM بیشترین دقت و بهترین عملکرد را دارد.

در عمل برای کاربردهای کیفیت توانی مانند کاهش فلیکر مایل هستیم که بیش از یک داده بعدی را پیش‌بینی نماییم. به عبارت دیگر ما نیاز به پیش‌بینی بیش از یک میلی‌ثانیه داریم. برای این منظور گام پیش‌بینی باید بیشتر از یک باشد ($p > 1$) که در مدل GM(1,1) اصلاح شده امکان پذیر است. برای مثال پیش‌بینی سیگنال پوش در هر مرحله برای شش میلی‌ثانیه آینده ($p = 6$) با فرض پنج داده در هر مدل ($n = 5$) در شکل (۵-۲۱) نشان داده می‌شود. خطای مطلق این مدل در شکل (۵-۲۲) آمده است. مقادیر MSE، AME و ARPE به ترتیب $۵/۷۶ \times ۱۰^۶$ ، $۱/۸۴ \times ۱۰^۳$ و $۲/۲۳\%$ است.

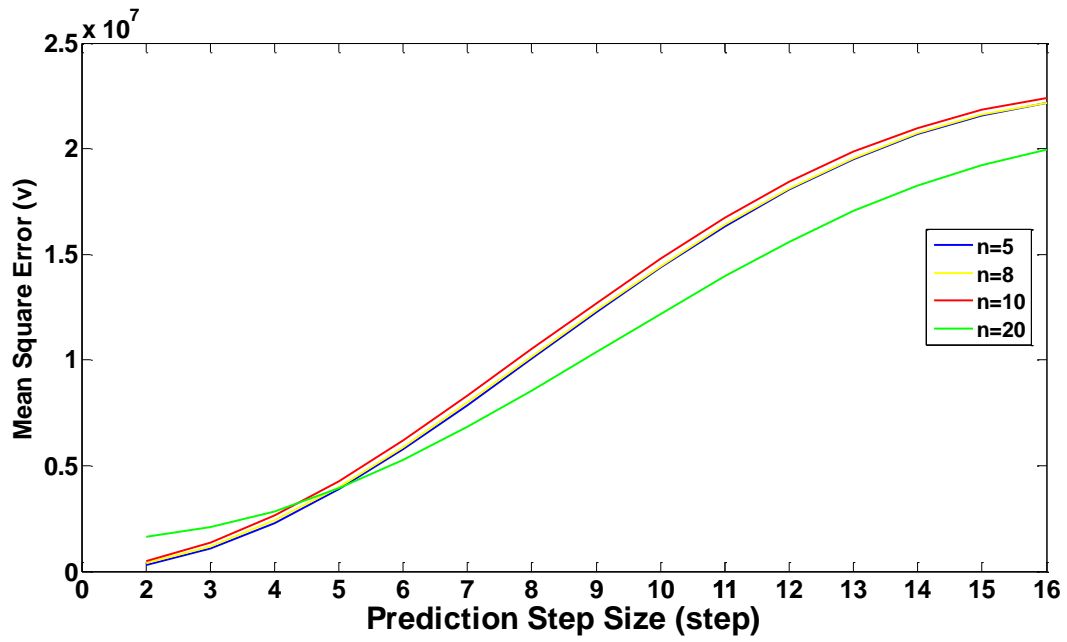


شکل (۲۱-۵) پوش واقعی و مدل $GM(1,1)$ اصلاح شده آن به ازای $n = 5$ و $p = 6$

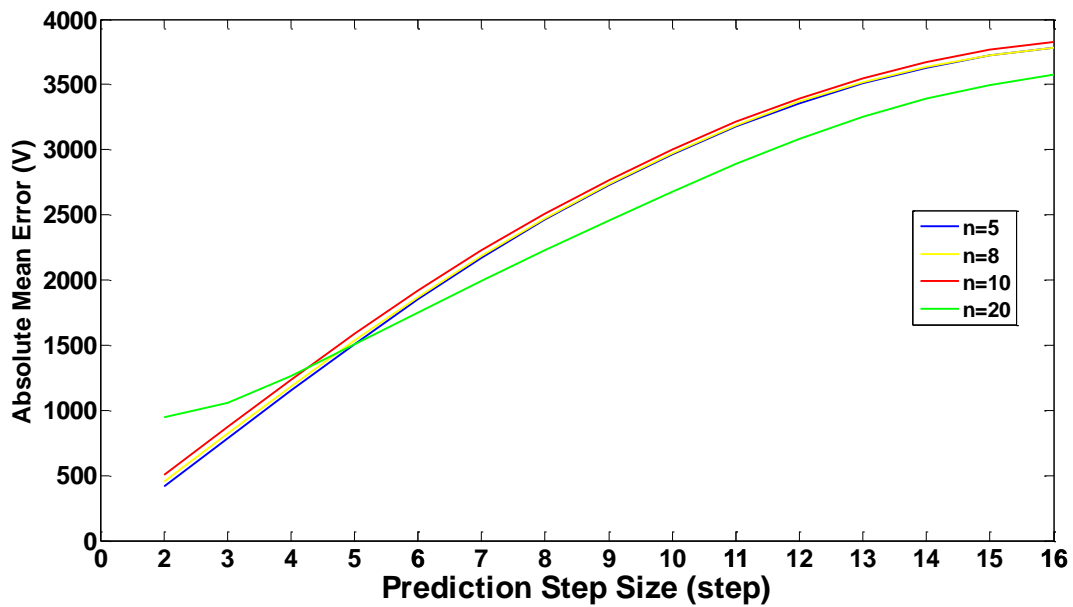


شکل (۲۲-۵) خطای مطلق در روش $GM(1,1)$ اصلاح شده به ازای $n = 5$ و $p = 6$

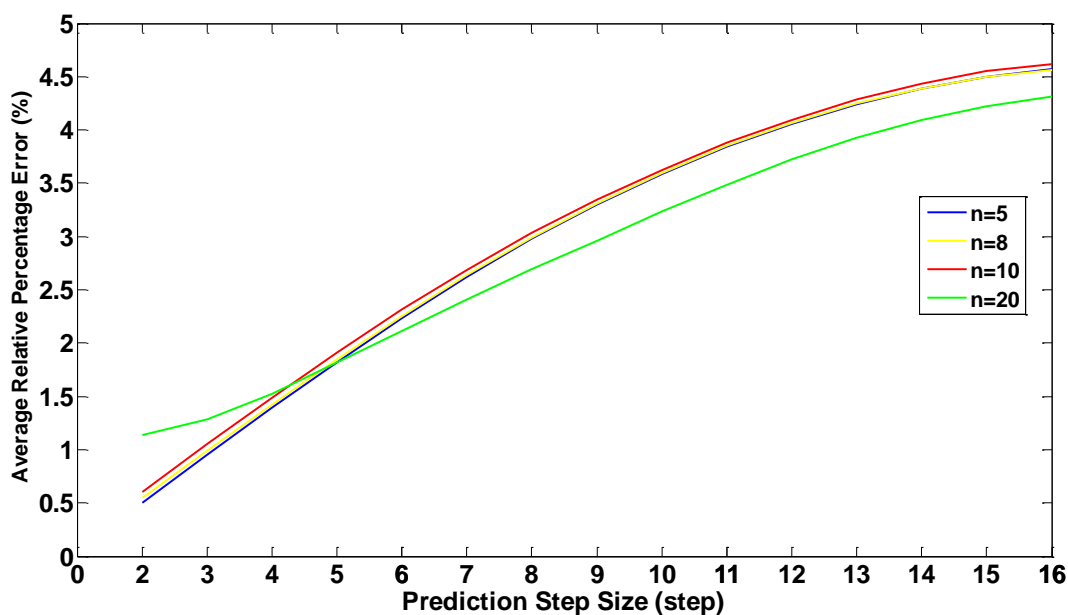
مقایسه این مقادیر خطا با مقادیر جدول (۳-۵) نشان می‌دهد که با افزایش گام پیش‌بینی از یک به شش، ARPE از ۰/۰۹۳٪ به ۲/۲۳٪ افزایش پیدا می‌کند. نحوه تغییرات پارامترهای خطا (MSE)، AME و ARPE بر حسب گام پیش‌بینی و تعداد داده‌های مدل در شکل‌های (۲۳-۵) تا (۲۵-۵) نشان داده می‌شوند.



شکل (۵-۲۳) تغییرات MSE بر حسب n و p



شکل (۵-۲۴) تغییرات AME بر حسب n و p



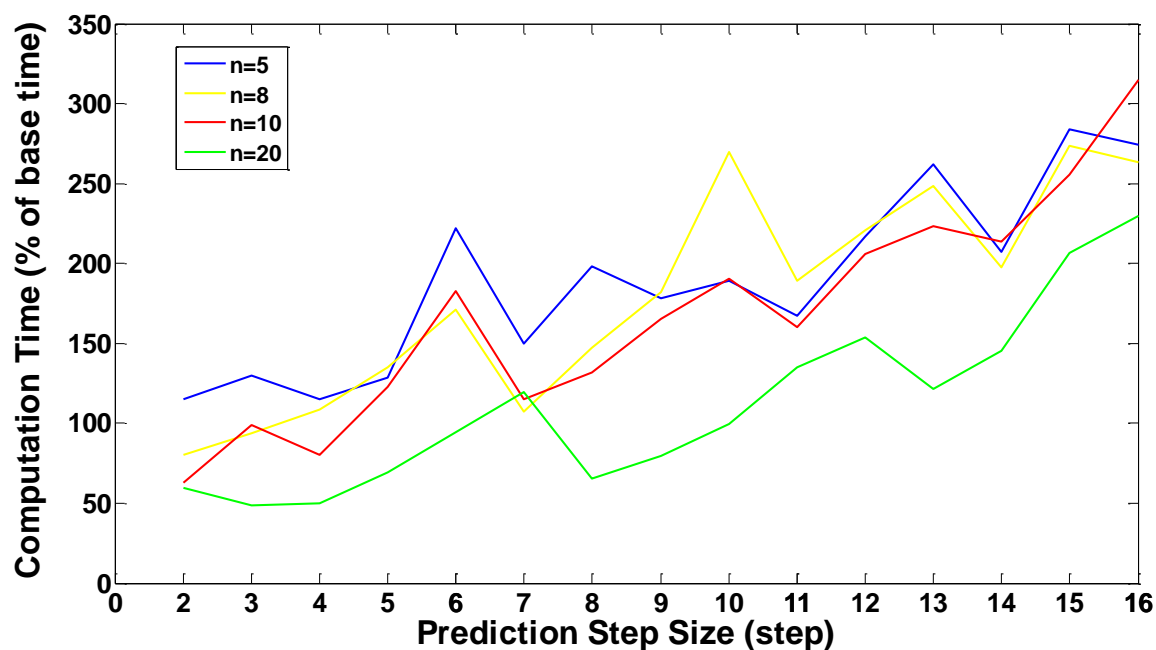
شکل (۵-۲۵) تغییرات ARPE برحسب n و p

به ازای تمامی مقادیر n ، نتایج نشان می‌دهد که افزایش گام پیش‌بینی خطا را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، برای یک n مشخص، افزایش گام پیش‌بینی دقت مدل را کاهش می‌دهد. همچنین برای گام پیش‌بینی کمتر از پنج ($p < 5$) هرچه تعداد داده‌های مدل کمتر باشد خطا کمتر است اما برای گام‌های بزرگتر از پنج ($p > 5$) بیشترین مقدار برای n ، کمترین خطا را نتیجه می‌دهد. از طرف دیگر پیش‌بینی سیگنال پوش در همه‌ی حالت‌ها خطای کمتر از ۵٪ دارد که قابل قبول است.

در مسائل مربوط به پیش‌بینی، زمان لازم برای محاسبات از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین با انتخاب کردن زمان لازم برای محاسبه‌ی وضعیت پنج داده در مدل و گام یک ($n = 5$ و $p = 1$) به عنوان زمان پایه، زمان لازم برای انجام محاسبات دیگر بر حسب این زمان در شکل (۵-۲۶) ارائه شده است. علت استفاده از زمان پایه نرمال کردن و مقایسه‌ی نسبی زمان‌ها است چرا که عوامل متعددی نظیر نحوه برنامه‌نویسی و میزان مشغولیت CPU در مقدار این زمان‌ها تاثیر می‌گذارد. این محاسبات در یک کامپیوتر همراه با مشخصات زیر انجام گرفته است:

- processor: Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T9550 2.66 GHz
- Installed memory (RAM): 4.00 GB

با توجه به این شکل می‌توان گفت که به ازای تعداد داده‌ی مدل شونده‌ی معین (n معین)، زمان محاسبات با افزایش گام پیش‌بینی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر نمودارهای زمان-گام پیش‌بینی صعودی هستند. از طرف دیگر اگر کل داده‌های سری زمانی (M داده) در دسته‌های بزرگتری مدل شوند (n بزرگ انتخاب شود) زمان محاسبه کمتر خواهد بود. این به دلیل کمتر بودن تعداد دفعات ساختن مدل $GM(1,1)$ (کمتر بودن تعداد تکرارها) است.



شکل (۵-۲۶) تغییرات زمان محاسبات بر حسب n و p

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه ولتاژ نوسانی، که منجر به پدیده فلیکر در سیستم قدرت می‌شود، مورد توجه قرار گرفته شد و روش‌هایی برای تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در شبکه، تفکیک اثر منابع در صورت متفاوت بودن فرکانس نوسان آنها و مدل‌سازی و پیش‌بینی نوسان دامنه نایستان ارائه شد.

برای سیستم قدرت اعم از شعاعی و غیر شعاعی چنانچه منابع فلیکر متعدد با فرکانس متفاوت در آن حضور داشته باشند، با فرض رزولوشن فرکانسی ۰/۱ هرتز، روش پیشنهادی فیلتر همبسته، با استفاده از ولتاژ لحظه‌ای در باس‌های سیستم قدرت، محل اتصال منابع فلیکر را در شبکه تشخیص داد و سهم هرکدام از منابع را در نوسان دامنه باسِ دلخواه تفکیک نمود. نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف، عملکرد روش پیشنهادی را تایید می‌کند. این روش پیشنهادی می‌تواند علاوه بر تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در شبکه به تفکیک اثر آنها نیز پردازد، کاری که فلیکر متر استاندارد قادر به انجام آن نیست.

برای وضعیتی که منابع فلیکر در شبکه به صورت هم فرکانس نوسان کنند دو روش در این پایان‌نامه ارائه گردید. روش اول به داده‌های آموزشی و اطلاعات قبلی از شبکه نیاز دارد، هر دو ابزار اساسی یعنی خوشه‌بندی و ضریب همبستگی آماری توانستند در بیش از ۹۵٪ موارد موفق به تشخیص محل اتصال منابع فلیکر در شبکه شوند. در روش تحلیلی ملاک منتهی از تئوری تحلیلی توانست به صورت تک‌نقطه محل اتصال منابع را نشان دهد. این ملاک طی سناریوهای مختلف قابلیت خود را نشان داده و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این ملاک نسبت به وضعیت بهره‌برداری منابع فلیکر و حضور بار هارمونیک حساس نیست. همچنین روش پیشنهادی گراف جهت‌دار که از جریان خطوط و ولتاژ باس‌ها استفاده می‌کند توانست محل اتصال منبع فلیکر غالب را تعیین کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها تئوری ارائه شده برای علت غالب شدن یک منبع فلیکر در نحوه انتشار فلیکر را تایید نمود.

بنابراین چنانچه ولتاژ و جریان بارها در اختیار باشد توسط معیار پیشنهادی و اگر ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط در دسترس باشد توسط روش گراف جهت‌دار می‌توان محل اتصال منابع فلیکر را تشخیص داد.

برای نوسان دامنه ولتاژ با پوش نایستان، شاخص پیشنهادی برای نشان دادن شدت نوسان نایستان که بر اساس طیف توان سیگنال پوش تعریف شده است، توانست محل اتصال منبع فلیکر را نشان دهد. همچنین مدل‌های مرتبه دو MA و AR توانستند با خطای کمتر از ۱٪ سیگنال پوش را مدل و پیش‌بینی کنند. همچنین مدل‌های خاکستری اصلاح شده توانستند با خطای بین ۰/۰۵٪ تا ۱/۱٪ برای یک گام پیش‌بینی و حداکثر تا ۵٪ برای تعداد گام‌های بیشتر، پوش را پیش‌بینی نمایند. ضمناً نشان داده شد که تعداد داده‌ها در هر مدل با دقت مدل نسبت عکس دارد ولی زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت که این روش‌ها می‌توانند در کاربردهای عملی برای تشخیص محل اتصال انواع مختلف منابع فلیکر و پیش‌بینی پوش نایستان جهت کنترل تجهیزات کاهش فلیکر بکار روند. همچنین مدل‌های ارائه شده برای سیگنال پوش در تفکیک اثر منابع فلیکر نایستان می‌توانند بکار گرفته شوند.

۶-۲ پیشنهادات

در راستای ادامه تحقیق در این زمینه پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی در یک شبکه قدرت پیشنهاد می‌شود. از آنجایی که معمولاً فرکانس نوسانات منابع فلیکر متفاوت است روش فیلتر همبسته برای این منظور مناسب‌تر است.

- از آنجایی که اطلاع دقیق از نوع توزیع آماری یک سیگنال تصادفی برای پردازش آماری آن ضروری است، تحقیق درباره نوع توزیع آماری سیگنال پوش تصادفی با استفاده از ولتاژ نوسانی ثبت شده از یک منبع فلیکر واقعی پیشنهاد می‌گردد.
- با در اختیار داشتن اطلاعات آماری در خصوص سیگنال پوش تصادفی، به کمک روش‌های تفکیک منابع کور^۱ و مخلوط‌های محدود^۲، می‌توان اقدام به تشخیص محل اتصال منابع فلیکر تصادفی و تفکیک اثر آنها کرد.

^۱ Blind Source Separation

^۲ Finite Mixture

مراجع

-
- [1]. A. Baghini, "Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons Press, 2008.
- [2]. IEC Standard 61000-4-15, "Flickermeter—Functional and Design Specifications", 2003.
- [3]. G. Wiczynski, "Inaccuracy of Short-Term Light Flicker Pst Indicator Measuring With a Flickermeter", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 4, pp. 2428 – 2430, 2012 .
- [4]. J. L. Guan, J. C. Gu, and C. J. Wu, "Real-time measurement approach for tracking the actual coefficient of $\Delta V/\Delta V_{10}$ of electric arc furnaces," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, pp. 309–315, Jan. 2004.
- [5]. New Trend in Supply Problems of Arc Furnace for Steel Plants, Japanese: Electrical Engineering Society, Vol. 2, pp. 3–26, 1978.
- [6]. Y. Y. Hong and L. H. Lee, "Analysis of equivalent 10 Hz voltage flicker in power systems," in Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist., Vol. 146, pp. 447–452, July 1999.
- [7]. Jin-Lung Guan, Jyh-Cherng Gu, and Chi-Jui Wu, "A Novel Method for Estimating Voltage Flicker", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 242-247, Jan 2005.
- [8]. Srinivas Varadan, Elham B. Makram, and Adly A. Girgis, "A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 11, No. 3, pp. 1685-1691, July 1996.
- [9]. Omer Ozgun and Ali Abur, "Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 1158-1163, October 2002.
- [10]. Mario Fabiano Alves, Zelia Myriam Assis Peixoto, Celso Peixoto Garcia, Deilton Goncalves Gomes, "An integrated model for the study of flicker compensation in electrical networks", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80 pp. 1299–1305, 2010.

- [11]. IEC Standard 61400-21, "Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", 2001.
- [12]. P. Ashmole, "Quality of supply – voltage fluctuations. Part II", *Power Engineering Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 108–117, April 2001.
- [13]. A. Garcia-Cerrada, P. Garcia-Gonzalez, R. Collantes, T. Gomez, J. Anzola, "Comparison of thyristor-controlled reactors and voltage-source inverters for compensation of flicker caused by arc furnaces", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, pp. 1225–1231, 2000.
- [14]. Montanari G. C., Loggini M., Pitti L., Tironi E., Zarinelli D., "The effects of series inductors for flicker measurement in electric power systems supplying arc furnaces" Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 2, pp. 1496–1503, 2–8 October 1993.
- [15]. P. Axelberg, "On tracing flicker sources and classification of voltage distribution", Thesis for the degree of Philosophy, Chalmers University of Technology, 2007.
- [16]. Peter G. V. Axelberg, Math H. J. Bollen, "An Algorithm for Determining the Direction to a Flicker Source", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 2, pp. 755-760, April 2006.
- [17]. Peter G. V. Axelberg, Math H. J. Bollen, and Irene Yu-Hua Gu, "Trace of Flicker Source by Using the Quantity of Flicker Power", *IEEE Transaction on Power delivery*, Vol. 23, No. 1, pp. 465-471, January 2008.
- [18]. M. Mazadi, S. H. Hosseinian, W. Rosehart, "Instantaneous Voltage Estimation for Assessment and Monitoring of Flicker Indices in Power System", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, July 2007.

- [19]. Hernández, J. G. Mayordomo, L. F. Beites, and R. Asensi, “A new frequency domain approach for flicker evaluation of arc furnaces,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, pp. 631–638, Apr. 2003.
- [20]. N. Eghtedarpour, E. Farjah, A. Khayatian, “Intelligent identification of flicker source in distribution systems”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, No. 9, pp.1016-1027, 2010.
- [21]. X. Jia, Q. Chen, “A Method of Tracking Voltage Flicker Envelope Real-Time”, *Proc. Power & Energy Society General Meeting*, 1-6 Jul. 2009.
- [22]. Mohamed Amin Eldery, Ehab F. El-Saadany, and Magdy M. A. Salama, “A Simple Energy Operator Computational Method for Voltage Flicker Assessment”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1743-1750, July 2006.
- [23]. A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, J.R. Buck, “Discrete-time signal processing”, 3rd Edition, Prentice Hall Press, 2010.
- [24]. K. Srinivasan, “Digital Measurement of the Voltage Flicker”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6, No.4, pp.1593-1598, 1991.
- [25]. M. T. Chen, “Digital algorithms for measurement of voltage flicker,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 144, No. 2, pp. 175–180, Mar. 1997.
- [26]. T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, “Online Tracking of Voltage Flicker Utilizing Energy Operator and Hilbert Transform”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 861-867, 2004.
- [27]. Stephane Mallat “A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way”, edition 3, Academic press, 2008.
- [28]. W. A. Wilkinson and M. D. Cox, “Discrete wavelet analysis of power system transients,” *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 11, No. 4, pp. 2038–2044, Nov. 1996.

- [29]. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, "Wavelet and electromagnetic power system transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, pp. 1050–1058, Apr. 1996.
- [30]. S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2 pp. 924–930, Apr. 1996.
- [31]. D. Borrás *et al.*, "Wavelet and neural structure: A new tool for diagnostic of power system disturbances," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 37, No. 1, pp. 184–190, Jan./Feb. 2001.
- [32]. Murat Uyar, Selcuk Yildirim, Muhsin Tunay Gencoglu, "An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals", *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 10, pp. 1747–1755, 2008.
- [33]. M.A.S. Masoum, S. Jamali, N. Ghaffarzadeh, "Detection and classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and wavelet networks", *IET Science Measurement Technology*, Vol. 4, No. 4, pp.193-205, 2010.
- [34]. U. D. Dwivedi and S. N. Singh, "Enhanced Detection of Power-Quality Events Using Intra and Interscale Dependencies of Wavelet Coefficients", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 1, pp. 358–366, Jan. 2010.
- [35]. M. Wang and Y. Tseng, "A novel analytic method of power quality using extension genetic algorithm and wavelet transform", *Expert systems with Applications*, Vol. 38, No. 10, pp. 12491-12496, 2011.
- [36]. Ozgur Gener, Semra Ozturk, Tarik Efidan, "A new approach to voltage sag detection based on wavelet transform", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 2, pp. 133-140, 2010.

- [37]. T. Zhang, E.B. Makram, “Wavelet Representation of Voltage Flicker”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 48, No. 2, pp.133-140, 1998.
- [38]. W.G. Morsi and M.E. El-Hawary, “Novel power quality indices based on wavelet packet transform for non-stationary sinusoidal and non-sinusoidal disturbances”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, No. 7, pp. 753-759, 2010.
- [39]. R. G. Stockwell, L. Mansinha, and R. P Lowe, “Localization of the complex spectrum: The S-transform,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 44, No. 4, pp. 998–1001, Apr. 1996.
- [40]. P.K. Dash, B.K. Panigrahi, G. Panda, “Power quality analysis using S-transform”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No.2, pp. 406–411, 2003.
- [41]. I.W.C. Lee, P. K. Dash, “S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 4, pp. 800–805, 2003.
- [42]. N. Eghtedarpour, E. Farjah and A. Khayatian, “Effective Voltage Flicker Calculation Based on Multiresolution S-Transform”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 2, pp. 521-530, 2012.
- [43]. Mohinder S. Grewal, “Kalman filtering : theory and practice using MATLAB”, 3rd ed, John Wiley & Sons, 2008.
- [44]. N. Kose, O. Salor K, Leblebiciog lu, “Kalman filtering based approach for light flicker evaluation of power systems, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 1, pp.57-69, 2011.
- [45]. H.M. Al-Hamadi, “Fuzzy logic voltage flicker estimation using Kalman filter”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 36, No. 1, pp. 60–67, 2012.
- [46]. Mostafa I. Marei, Ehab F. El-Saadany, and Magdy M. A. Salama, “Envelope Tracking Techniques for Flicker Mitigation and Voltage Regulation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No.4, pp.1854-1860, 2004.

- [47]. M.I. Marei, E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, “Estimation techniques for voltage flicker envelope tracking”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 30–37, 2004.
- [48]. G. C. Hsieh and J. C. Hung, “Phase-locked loop techniques—A survey”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No.6, pp. 609–615, 1996.
- [49]. M. Karimi-Ghartemani and M. R. Iravani, “A Nonlinear Adaptive Filter for Online Signal Analysis in Power Systems: Applications”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No.2, pp. 617–622, 2002.
- [50]. B. Nassif, E. E. Nino and W. Xu, “A V-I Slope-Based Method for Flicker Source Detection”, *Proceeding of the 37th Power Symposium Annual North American*, PP. 755-760, 2005.
- [51]. A. Hernández, J. G. Mayordomo, R. Asensi, and L. F. Beites, “A method based on interharmonics for flicker propagation applied to arc furnaces”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 2334–2342, 2005.
- [52]. E. Altıntaş, O. Salor, I. Çadırcı, and M. Ermis, “A new flicker contribution tracing method based on individual reactive current components of multiple EAFs at PCC”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 5, pp. 1746-1754, 2010.
- [53]. Y. Y. Hong and L. H. Lee, “Stochastic voltage-flicker power flow,” , *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 407–411, Jan. 2000.
- [54]. Carolina Vilar Moreno, Hortensia Amarís Duarte, and Julio Usaola Garcia, “Propagation of Flicker in Electric Power Networks Due to Wind Energy Conversions Systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 2, pp. 267-272, June 2002

- [55]. M. Ammar and G. Joos, "Impact of Distributed Wind Generators Reactive Power Behavior on Flicker Severity", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 2, pp. 425-433, 2013.
- [56]. D. Perera, L. Meegahapola, S. Perera, and P. Ciufo, "Characterization of flicker emission and propagation in distribution networks with bi-directional power flows", *Renewable Energy*, Vol. 63, No. , pp. 172-180, 2014.
- [57]. M. Göl, Ö. Salor, B. Alboyacı, B. Mutluer, I. Çadırcı, and M. Ermis, "A new field-data-based EAF model for power quality studies", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 3, pp. 1230-1242, May/Jun. 2010.
- [58]. G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, and P. Varilone, "Chaos-based modeling of DC arc furnaces for power quality issues," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 4, pp. 1869 – 1876, Oct. 2004.
- [59]. Y. J. Hsu, K. H. Chen, P. Y. Huang, and C. N. Lu, "Electric arc furnace voltage flicker analysis and prediction, " *IEEE Transactions on Instrument and Measurement*, Vol. 60, No. 10, pp. 3360 – 3368, Oct. 2011.
- [60]. C. M. Douglas, C. L. Jennings, M. Kulahci, "Introduction to time series analysis and forecasting", John Wiley & Sons Press, New York, 2008.
- [61]. E. R. Dagum, "Time series modeling and decomposition", *Statistica*, Vol. 70, No. 4, pp. 433-457, 2010.
- [62]. M. Athineos, D.P.W. Ellis, "Autoregressive modeling of temporal envelopes", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 55, No. 11, pp. 5237-5245, 2007.
- [63]. H. W. Hsu, C. M. Liu, "Autoregressive modeling of temporal/spectral envelopes with finite-length discrete trigonometric transforms", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 58, No. 7, pp. 3692 – 3705, 2010.
- [64]. W. Dong, L. Zhang, R. Lukac, G. Shi, "Sparse representation based image interpolation with nonlocal autoregressive modeling", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 22, No. 4, pp.1382 – 1394, 2013.

- [65]. N. Amjady, "Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 16, No. 4, pp. 798 – 805, 2001.
- [66]. V. Gonzalez, J. Contreras, D. W. Bunn, "Forecasting power prices using a hybrid fundamental-econometric model", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 27, No. 1, pp. 363 – 372, 2012.
- [67]. L. X. Wang, and J. M. Mendel, "Generating fuzzy rules by learning from examples," *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1414–1427, Nov./Dec. 1992.
- [68]. J. A. Dickerson, and B. Kosko, "Fuzzy function approximation with ellipsoidal Rules," *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics Part B: Cybernetics*, Vol. 26, No. 4, pp. 542 – 560, Aug. 1996.
- [69]. T. H. K. Yu, and K. H. Huarng, "A neural network-based fuzzy time series model to improve forecasting," *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 4, pp. 3366–3372, Apr. 2010.
- [70]. N. Ko, C. M. Lee, "Short-term load forecasting using SVR (support vector regression)-based radial basis function neural network with dual extended Kalman filter," *Energy*, Vol. 49, No. 1, pp. 413-422, Jan. 2013.
- [71]. S. Liu, and Y. Liu, "Grey Systems: Theory and Applications", Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010.
- [72]. S. F. Su, C. B. Lin, and Y. T. Hsu, "A high precision global prediction approach based on local prediction approaches," *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, Vol. 32, No. 4, pp. 416-425, Nov. 2002.
- [73]. E. Kayacan, B. Ulutas, O. Kaynak, "Grey system theory-based models in time series prediction," *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 2, pp. 1784–1789, Mar. 2010.

-
- [74]. Q. Truong, and K. K. Ahn, "Wave prediction based on a modified grey model MGM(1,1) for real-time control of wave energy converters in irregular waves," *Renewable Energy*, Vol. 43, pp. 242-255, Jul. 2012.
- [75]. G. W. Cheng, H. J. Lu., "Forecasting flicker severity by grey predictor", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 4, pp. 2428-2430, 2012.
- [76]. New York University tutorial on time series, Time Series Models , available online: <https://files.nyu.edu/mrg217/public/timeseries.pdf>
- [77]. M. Gupta. Madan, Jin. Liang, Homma. Noriyasu, "Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory", Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2003.

پیوست

اطلاعات مربوط به سیستم قدرت مورد استفاده در این پایان نامه در جدول های (پ-۱) و (پ-۲) آمده است. توجه شوند مقادیر به پریونیت می باشند.

جدول (پ-۱) داده های خطوط انتقال

| شماره خط | از باس | به باس | مقاومت | راکتانس | سوسپتانس |
|----------|--------|--------|--------|---------|----------|
| ۱ | ۱ | ۲ | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۰۲۰۰ |
| ۲ | ۱ | ۴ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۰۲۰۰ |
| ۳ | ۱ | ۵ | ۰/۰۸۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۰۳۰۰ |
| ۴ | ۲ | ۳ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۲۵۰۰ | ۰/۰۳۰۰ |
| ۵ | ۲ | ۴ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۰۱۰۰ |
| ۶ | ۲ | ۵ | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۰۲۰۰ |
| ۷ | ۲ | ۶ | ۰/۰۷۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۰۲۵۰ |
| ۸ | ۳ | ۵ | ۰/۱۲۰۰ | ۰/۲۶۰۰ | ۰/۰۲۵۰ |
| ۹ | ۳ | ۶ | ۰/۰۲۰۰ | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۰۱۰۰ |
| ۱۰ | ۴ | ۵ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۰۴۰۰ |
| ۱۱ | ۵ | ۶ | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۰۳۰۰ |

جدول (پ-۲) داده های باس های سیستم قدرت

| شماره باس | توان ژنراتور | ولتاژ | توان اکتیو بار | توان راکتیو بار |
|-----------|--------------|-------|----------------|-----------------|
| ۱ | ۱/۰۰ | ۱/۰۵۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| ۲ | ۰/۵۰ | ۱/۰۵۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| ۳ | ۰/۶۰ | ۱/۰۷۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| ۴ | ۰/۰۰ | ۱/۰۰۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۰ |
| ۵ | ۰/۰۰ | ۱/۰۰۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۰ |
| ۶ | ۰/۰۰ | ۱/۰۰۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۰ |

Abstract

Power quality problems such as flicker (voltage fluctuation) are major concerns of electric companies and consumers. Identification of flicker source locations especially in non-radial power systems is important stage in flicker reduction process. In this thesis, some methods are proposed to determine coupling point of flicker sources, separate share of each source in final flicker, and predict non-stationary fluctuation of amplitude.

For condition that frequencies of flicker sources are different, a method based on designing especial correlation filter is presented. For condition that flicker sources fluctuate with similar frequency, two approaches are developed. In the first, which needs to train data, k-mean clustering and statistical correlation coefficient are utilized. In the second, which is an analytical one, by assuming flicker sources as independent variable and constructing Jacobian matrix, the criterion is extracted to single point detection. Also, a directed graph is defined to describe propagation of flicker through network and identify dominant source(s), whose dominancy is analytically interpreted. Since the amplitude fluctuation may be non-stationary, a fluctuation index is proposed to determine flicker source location in such condition. Also, by considering discretized envelope signal as a time series, it is modeled and predicted by time series classic models. In addition to these models, grey theory based modes are modified to our purpose.

The proposed methods during several scenarios are simulated in a typical non-radial power system. The simulation results show ability and high performance of them in the expected purposes.

Key words- flicker, fluctuated voltage, correlation filter, K-means clustering, correlation coefficient, Jacobian matrix, directed graph, time series, grey model



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering

Detection and Separation of Flicker Sources in Power System

Abdolmajid Dejamkhooy

Supervisor:

Dr. Ali Dastfan

Spring 2014