

بهبود روش شناسایی محل و تعیین اثر هر یک از منابع فلیکر در شبکه‌های توزیع

هادی مقدم بنائم^۱ بهروز طوسی^۲

۱- دانش آموخته دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران

moghadam.hadi@gmail.com

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران

b.tousi@urmia.ac.ir

چکیده: یکی از مسائل و مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های قدرت امروزی، پدیده فلیکر ولتاژ می‌باشد. قبل از هرگونه جبران- سازی این پدیده، بایستی محل تک تک منابع فلیکر شناسایی و اثر هر یک از آنها بر مقدار فلیکر شبکه تعیین گردد. با توجه به محدودیت‌های مانیتورینگ سیگنال‌های ولتاژ و جریان شبکه از جمله هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، روش‌هایی که به کمترین تعداد نقطه مانیتورینگ در طول شبکه نیاز دارند بیشتر مورد تقاضا می‌باشند. در یکی از آخرین پژوهش‌های انجام یافته در این خصوص، با معرفی روشی مبتنی بر استفاده از تبدیل موجک و مدل تقریبی خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ، محل منابع فلیکر با استفاده از کمترین نقاط مانیتورینگ، ردیابی می‌گردد و سهم هر یک از منابع فلیکر با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم فلیکر ولتاژ تعیین می‌شود. در این مقاله سعی بر آن شده که با اصلاح مدل تقریبی در نظر گرفته شده برای خط انتقال، دقت و حساسیت روش قبلی بهبود یابد تا حتی در صورت وجود نویز در شبکه بتواند محل دقیق منابع فلیکر را تشخیص دهد و با کمک همان نقاط مانیتورینگ استفاده شده در قسمت قبلی و بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم، اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار کلی فلیکر هر باسبار دلخواهی از شبکه تعیین شود.

واژه‌های کلیدی: فلیکر ولتاژ، تبدیل موجک، مدل تقریبی خط انتقال، کیفیت توان، محل منبع فلیکر، سهم هر منبع فلیکر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.277

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهروز طوسی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - ارومیه - دانشگاه ارومیه - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر - گروه برق - قدرت

۱- مقدمه

امروزه مشترکین صنعت برق خواستار تأمین برقی با کیفیت و عاری از هرگونه اغتشاش می‌باشند و شرکت‌های تولیدکننده انرژی در تلاشند با تأمین این خواسته مشترکین، اعتماد آنها را به خود جلب نمایند. بنابراین مسائل و اختلالات کیفیت برق همچون فلیکر ولتاژ به یکی از مشکلات اصلی و در حال رشد صنعت برق تبدیل شده است [۳-۵].

فلیکر ولتاژ نتیجه نوسانات پوش دامنه ولتاژ با فرکانس پایین است که به دلیل تعدد شکایت مشترکین، روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. از منابع اصلی فلیکر شبکه می‌توان به کوره‌های قوسی، ماشین‌آلات جوشکاری، کارخانه‌های فولاد، سلول‌های خورشیدی و مزارع بادی اشاره نمود [۱-۲] و [۶-۱۶].

بر اساس استاندارد IEC 61000-4-15، زمانیکه مقدار نوسانات دامنه ولتاژ با فرکانس‌های بین ۰/۵ هرتز تا ۳۵ هرتز از مقدار $\pm 10\%$ فراتر رود این نوسانات برای چشم انسان بصورت نوسان روشنایی لامپ، قابل درک و آزاردهنده خواهد بود [۱۷ و ۱۸]. همچنین تجهیزات بیمارستانی از جمله تجهیزات ICU و CCU در دامنه‌های متفاوت ولتاژ، گزارشات متفاوتی از وضعیت سلامت بیماران ارائه می‌دهند.

به دلیل چالش‌های زیست محیطی و انرژی، استفاده از منابع تجدیدپذیری همچون انرژی باد و خورشید در شبکه‌های الکتریکی، در حال رشد است و از سوی دیگر، با پیشرفت و رشد صنعت، مصرف‌کننده‌هایی که می‌توانند به شبکه، فلیکر تزریق نمایند در حال افزایش هستند؛ بنابراین در شبکه‌های قدرت بخصوص در شبکه‌های هوشمند، کاهش فلیکر ولتاژ به عنوان یکی از مهمترین مباحث کیفیت توان مطرح می‌گردد. با توجه به اینکه جبران‌سازی فلیکر شبکه، امری هزینه‌بر و وقت‌گیر است لذا اپراتور شبکه بایستی بتواند محل دقیق تک‌تک منابع فلیکر و سهم هر یک از منابع از مقدار کلی فلیکر شبکه را تعیین نماید چرا که هرگونه اختلاف نظری راجع به این موضوع، عملیات کاهش فلیکر را با مشکل مواجه خواهد ساخت.

یکی از جامعترین روش‌ها برای اندازه‌گیری فلیکر شبکه، روش ارائه شده در استاندارد IEC 61000-4-15 است که دو شاخص کوتاه مدت (P_{st}) و بلند مدت (P_{lt}) برای اندازه‌گیری مقدار فلیکر معرفی می‌کند اما این شاخص‌ها، هیچ اطلاعاتی راجع به محل منابع فلیکر در شبکه ارائه نمی‌دهند [۱۷].

در خصوص ردیابی محل منابع فلیکر، روش‌هایی در مراجع [۱۹-۲۲] ارائه شده که مبتنی بر استاندارد IEC 61000-4-15 نیستند. در [۲۳-۲۵] روشی برای شناسایی جهت شارش فلیکر در نقطه مانیتورینگ، ارائه گردیده که بر پایه استاندارد IEC و کمیته بنام "توان فلیکر" بنا شده‌اند. توان فلیکر از انتگرال‌گیری حاصل‌ضرب سیگنال‌های فلیکر ولتاژ و جریان در هم بدست می‌آید که از روی علامت آن می‌توان به جهت شارش فلیکر در نقطه مانیتورینگ پی برد. زمانیکه در شبکه، چندین منبع فلیکر (حتی با فرکانس‌های متفاوت)

وجود داشته باشد روش‌های [۲۳-۲۵] تنها یک مقدار برای توان فلیکر ارائه می‌دهند و قادر به شناسایی منبع فلیکر غالب شبکه هستند.

در [۲۶]، ابتدا با استفاده از تبدیل موجک، کلیه مؤلفه‌های فلیکری از سیگنال اصلی شبکه، دمدوله و بر اساس فرکانس‌هایشان از هم تفکیک می‌شوند و سپس توان فلیکری برای هر فرکانس، بصورت جداگانه محاسبه می‌گردد و محل تمامی منابع فلیکر از روی علامت توان‌های فلیکری شناسایی می‌شود. در این روش بایستی در سراسر شبکه و ورودی و خروجی کلیه باسبارها، مانیتورینگ اطلاعات انجام گیرد که اولاً مانیتورینگ به نوبه خود وقت‌گیر و هزینه‌بر است و ثانیاً، با توجه به اینکه در شبکه‌های واقعی، مانیتورینگ شکل موج‌های ولتاژ و جریان در برخی از خطوط و باسبارها، با برخی محدودیت‌ها روبه‌رو است؛ لذا اجرایی نمودن این روش در اکثر شرایط امکان‌پذیر نیست.

همچنین در [۲۶] برای مقایسه سهم منابع فلیکر با یکدیگر از مقایسه مقدار توان فلیکر محاسبه شده برای منابع با یکدیگر استفاده شده است. با توجه به اینکه توان فلیکر از حاصل‌ضرب سیگنال‌های فلیکری ولتاژ و جریان در یکدیگر بدست می‌آید؛ بسته به اینکه در کدام یک از شاخه‌های متصل به یک باسبار، مانیتورینگ داده‌ها انجام گیرد مقادیر مختلفی برای سهم منابع فلیکر بدست خواهد آمد.

در [۲۷] روش مشابه دیگری پیشنهاد شده که در آن با استفاده از ماتریس علامت توان فلیکر باسبارهای شبکه، گراف جهت‌داری تشکیل می‌شود و به کمک آن محل منابع فلیکر شبکه ردیابی می‌شود. می‌توان گفت معایب روش [۲۶] در مورد این روش نیز صادق است.

برای شناسایی محل و سهم هر یک از منابع فلیکر با استفاده از حداقل تعداد نقاط مانیتورینگ، روش جدیدی در [۲۸ و ۲۹] ارائه شده است؛ ابتدا، داده‌های مانیتور شده‌ی حداقل سه نقطه مانیتورینگ در طول خط اصلی شبکه، با استفاده از تبدیل موجک، آنالیز و مؤلفه‌های فلیکری ولتاژ و جریان استخراج می‌گردند. در قدم بعدی، برای هر مؤلفه فرکانسی فلیکر، مدار معادل تقریبی π خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ (بر حسب مدل متوسط خط انتقال) بدست می‌آید. با نوشتن رابطه مابین سیگنال‌های فلیکری ولتاژ و جریان نقاط مانیتورینگ و جایگذاری پارامترهای مدار معادل بدست آمده، معادله‌ای بر حسب فاصله تقریبی منبع فلیکر از ابتدای خط، تشکیل می‌شود که با حل آن می‌توان پی به محل منبع فلیکر برد. در ضمن، برای محاسبه سهم هر یک از منابع فلیکر از مقدار فلیکر کل شبکه، شاخصی بنام "فاکتور وزن‌دهی شده‌ی فلیکر ولتاژ" معرفی شده که از اندازه‌گیری مستقیم سیگنال فلیکر ولتاژ بدست می‌آید. این روش با وجود اینکه از آخرین و کاملترین روش‌ها در این زمینه است اما دارای چندین عیب اساسی می‌باشد:

➤ این روش‌ها در شناسایی محل منابع دارای تقریب می‌باشند و در برخی موارد مخصوصاً در صورت وجود نویز در شبکه و تجهیزات مانیتورینگ اطلاعات، خطای شناسایی منبع فلیکر، افزایش می‌یابد و محل دقیق منبع به درستی تعیین نمی‌گردد.

هر یک از آنها بر مقدار کلی فلیکر، در شکل (۱) نشان داده شده است؛ فلوچارت پیشنهادی از ۴ بخش مختلف آنالیز داده‌ها، محاسبه امپدانس و ادمیتانس پریونیت خط انتقال، ردیابی محل منابع فلیکر و محاسبه سهم هر یک از منابع فلیکر تشکیل یافته که در ذیل به بررسی هر یک از این بخش‌ها پرداخته شده است:

۳-۱- آنالیز داده‌ها

ابتدا، یکی از شاخه‌های متصل به باسبار تغذیه شبکه (باسبار ژنراتور) یا باسبار رگولاتور ولتاژ انتخاب می‌گردد و در اولین باسبار این شاخه، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری و نمونه‌برداری می‌شوند. این سیگنال‌ها با استفاده از تبدیل موجک، دمدوله شده و مؤلفه‌های فلیکری از سیگنال‌های اصلی تفکیک و توان فلیکری محاسبه می‌گردد. علامت منفی توان فلیکر ($FP < 0$) نشانگر وجود منبع فلیکر در شاخه انتخابی بوده و بایستی سیگنال‌های ولتاژ و جریان در دومین و سومین نقطه مانیتورینگ نیز اندازه‌گیری شوند و مؤلفه‌های فلیکری در این دو نقطه بدست آیند. با توجه به شکل (۱)، بخش اول از ۳ بلوک اندازه‌گیری اطلاعات، پروسه دمدولاسیون و محاسبه توان فلیکر تشکیل یافته است:

مانیتورینگ داده‌ها (بلوک A): در این بلوک، سیگنال‌های آنالوگ ولتاژ و جریان در نقطه مانیتورینگ، اندازه‌گیری و نمونه‌برداری می‌شوند. مازول نمونه‌برداری از ۳ قسمت ترانس‌دیوسر سیگنال، فیلتر پایین‌گذر و مبدل آنالوگ به دیجیتال تشکیل یافته است. در شاخه انتخابی، به داده‌های حداقل ۳ نقطه مانیتورینگ نیاز می‌باشد: نقاط مانیتورینگ ۱، ۲ و ۳ (MP_1 ، MP_2 و MP_3) که بر روی اولین، دومین و آخرین باسبار بعد از باسبار تغذیه شبکه یا رگولاتور ولتاژ انتخاب می‌شوند.

پروسه دمدولاسیون (بلوک B): در مراجع مختلف، برای تحلیل پارامترهای کیفیت توان، توابع موجک مختلفی از جمله Daubechies، Symlet و Mayer پیشنهاد شده‌اند که بسته به پدیده یا پارامتر مورد بررسی، تابعی با قابلیت خاص انتخاب می‌شود [۳۱-۳۳]. در روش پیشنهادی، به دلیل انعطاف‌پذیری بالای تبدیل موجک گوسی در شناسایی فرکانس یک موج، از این تابع برای شناسایی سیگنال مدوله شده، استفاده می‌شود [۳۴].

➤ اگر چه برای شناسایی محل منبع فلیکر با استفاده از [۲۸] به تعداد نقاط مانیتورینگ کمتری نیاز است اما همچنان برای تعیین سهم هر منبع فلیکر از مقدار فلیکر باسبارهای شبکه، نیاز به اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ در باسبار مورد نظر می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه مقدار فلیکر لحظه‌ای با مربع ضرایب بینایی انسان نسبت به فلیکر (معرفی شده در فلیکر متر IEC) متناسب است لذا فاکتور معرفی شده در [۲۹] نیز برای مقایسه سهم هر منبع از مقدار فلیکر لحظه‌ای شبکه مناسب نمی‌باشد.

در این مقاله ابتدا به بررسی مدل‌های تقریبی خط انتقال میان نقاط مانیتورینگ پرداخته و سعی بر آن شده که روش [۲۹] به گونه‌ای اصلاح شود که بتوان در هر شرایطی محل دقیق منابع فلیکر را شناسایی و با استفاده از نقاط مانیتورینگ استفاده شده در قسمت قبلی و بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم، اثر هر یک از منابع بر میزان فلیکر هر باسبار دلخواهی از شبکه تعیین گردد.

در بخش دوم مقاله، به بررسی مدلسازی فلیکر پرداخته شده و روش پیشنهادی با جزئیات کامل در بخش سوم معرفی گردیده است. کارایی و دقت روش پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ذکر شده و در نهایت، در بخش پنجم به بررسی نتایج بدست آمده پرداخته شده است.

۲- مدلسازی فلیکر

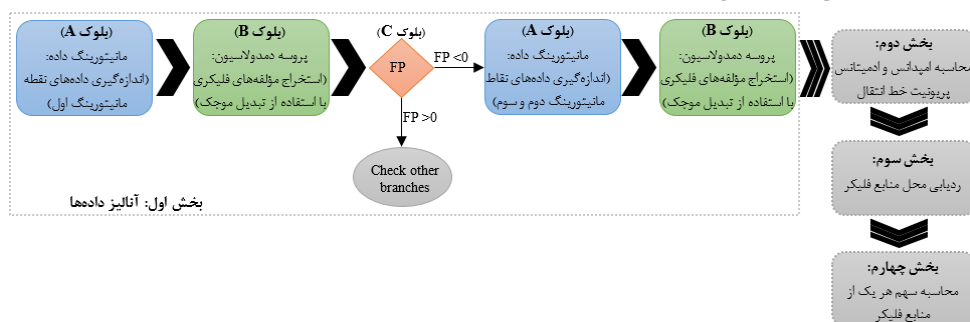
در پریودهای زمانی کوتاه از شکل موج ولتاژ، فلیکر ولتاژ را می‌توان با مدولاسیون دامنه مدل نمود. در این مدل، مؤلفه‌های فلیکری بر روی دامنه شکل موج اصلی ولتاژ مدوله می‌شوند [۳۰]. در حالت کلی فلیکر ولتاژ را می‌توان بصورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$v(t) = \sqrt{2} \left[V_m + \sum_{i=1}^n V_{fi} \cos(\omega_{fi} t + \theta_{fi}) \right] \times \cos(\omega_s t + \theta_v) \quad (1)$$

در رابطه فوق V_m ، ω_s و θ_v به ترتیب بیانگر بیشینه مقدار دامنه، فرکانس زاویه‌ای و اختلاف فاز اولیه سیگنال اصلی ولتاژ شبکه و همچنین V_{fi} ، ω_{fi} و θ_{fi} به ترتیب بیانگر بیشینه مقدار دامنه، فرکانس زاویه‌ای و اختلاف فاز اولیه i امین مؤلفه فلیکری ولتاژ هستند.

۳- روش پیشنهادی

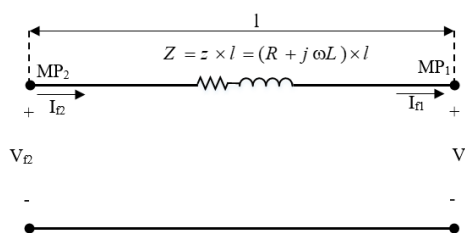
فلوچارت روش پیشنهادی برای ردیابی محل منابع فلیکر و تعیین اثر



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهاد شده در این مقاله (توان فلیکری = FP)

خط انتقال می‌توان در نظر گرفت عبارتند از: مدل کوتاه، مدل متوسط و مدل دقیق خط انتقال.

- **مدل کوتاه خط انتقال:** در این مدل، خط انتقال تنها شامل مقاومت و راکتانس سری بوده و در آن از ادمیتانس موازی چشم‌پوشی می‌شود. بنابراین مدار معادل شکل (۲) را برای خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ MP_1 (سمت گیرنده) و MP_2 (سمت فرستنده) به صورت شکل (۳) می‌توان اصلاح نمود که $z = (R + j\omega L)$ امپدانس پریونیت خط می‌باشد.

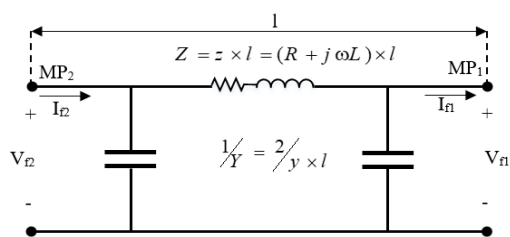


شکل (۳): مدل کوتاه خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ

به ترتیب سیگنال‌های فلیکری ولتاژ و جریان در یک فرکانس مشخص و در نقطه مانیتورینگ n می‌باشند. با نوشتن رابطه میان مؤلفه‌های فلیکری ولتاژ و جریان این دو نقطه مانیتورینگ، مقادیر پریونیت امپدانس (z) و ادمیتانس (y) خط انتقال بصورت رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود:

$$z = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{I_{f1} \times l} \text{ و } y = 0 \quad (4)$$

- **مدل متوسط خط انتقال:** همانطور که در شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود این مدل از خط انتقال، شامل هر سه پارامتر مقاومت، راکتانس سری و ادمیتانس موازی می‌باشد؛ در چنین مدلی، امپدانس و ادمیتانس معادل خط، رابطه مستقیمی با حاصل ضرب طول خط در مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط $(Y = y \times l/2 \text{ و } Z = z \times l)$ دارند.



شکل (۴): مدل متوسط خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ

بنابراین، مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط انتقال بصورت رابطه (۵) و (۶) قابل محاسبه است:

$$y = \frac{2 \times (I_{f2} - I_{f1})}{l \times (V_{f2} + V_{f1})} \quad (5)$$

$$z = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{[I_{f1} + (V_{f1} \times \frac{y \times l}{2})] \times l} \quad (6)$$

- **مدل دقیق خط انتقال:** در این مدل از خط انتقال، مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط بطور توزیع شده در طول خط

تابع موجک گوسی را می‌توان به شکل رابطه (۲) بیان نمود:

$$\lambda(t) = \exp(j2\pi F_0 t - 0.5t^2) \quad (2)$$

فرکانس نوسان موجک بوده که در این مقاله برابر با 25π در نظر گرفته شده و شکل گسسته‌ای از تبدیل موجک برای تشخیص مؤلفه‌های فلیکری، مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی این بلوک شامل کلیه مؤلفه‌های فلیکری است که بر روی دامنه سیگنال‌های اصلی ولتاژ و جریان شبکه مدوله شده‌اند که این سیگنال‌های فلیکری بر اساس فرکانس‌هایشان از یکدیگر تفکیک می‌شوند.

محاسبه توان فلیکری (بلوک C): در این بلوک برای هر یک از فرکانس‌های سیگنال فلیکری، توان فلیکری مجزایی به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

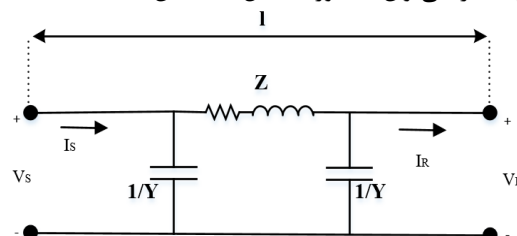
$$FP = \frac{1}{2} \sum_n V_n \times I_n \times \cos(\theta_{Vfn} - \theta_{Ifn}) \quad (3)$$

(V_n و θ_{Vfn}) و (I_n و θ_{Ifn}) به ترتیب مقادیر RMS و اختلاف فاز \ln امین مؤلفه فلیکری ولتاژ و جریان هستند. تئوری توان فلیکری (FP) مبتنی بر دو اصل می‌باشد:

۱. منابع فلیکری باعث ایجاد مدولاسیون دامنه در هر دو شکل موج ولتاژ و جریان شبکه (نوسانات پوش سیگنال‌ها) می‌شوند.
۲. زمانی که جهت شارش فلیکری در نقطه مانیتورینگ از سمت پایین‌دست (یا بالادست) باشد تغییرات دامنه سیگنال‌های ولتاژ و جریان نقطه مانیتورینگ دارای 180° درجه اختلاف فاز (یا فاز اولیه یکسان) می‌باشند. بنابراین علامت مثبت یا منفی توان فلیکری، بیانگر این نکته است که فلیکری از بارهای بالادست یا پایین‌دست نقطه مانیتورینگ منشأ می‌گیرد.

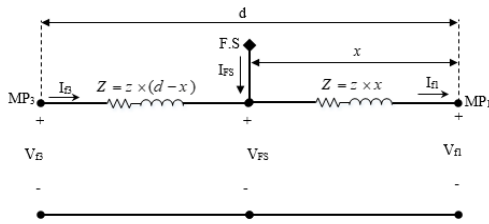
۳-۲- محاسبه مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط

مشخصه خطوط انتقال شامل مقادیر پریونیت امپدانس (z) و ادمیتانس (y) خط انتقال می‌باشد. مدار معادل π خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ را می‌توان به صورت شکل (۲) نشان داد.



شکل (۲): مدار معادل خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ

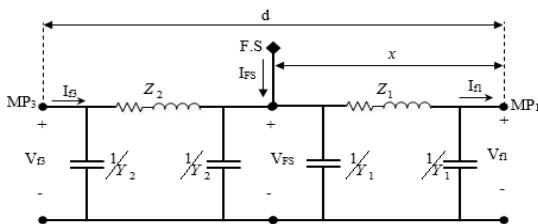
Z و Y برحسب مدلی که برای خط انتقال انتخاب می‌شود روابط مختلفی نسبت به مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط انتقال خواهند داشت. در این مدار معادل، V_s و I_s ولتاژ و جریان طرف فرستنده و V_R و I_R ولتاژ و جریان طرف گیرنده می‌باشند و l فاصله بین فرستنده و گیرنده خط انتقال است. رایج‌ترین مدلهایی که برای



شکل (۶): مدار معادل مدل کوتاه خط انتقال مابین نقاط

مانیتورینگ و منبع فلیکر

در صورتیکه، برای خط انتقال، مدل متوسط یا دقیق در نظر گرفته شود؛ مدار معادل خط انتقال مابین نقاط MP_1 و MP_3 و منبع فلیکر به شکل (۷) خواهد بود که در آن بر حسب نوع مدل انتخابی، Z و Y ها دارای روابط مختلفی بر حسب فاصله منبع فلیکر از ابتدای خط (x) و مقادیر پریونیت امپدانس (z) و ادمیتانس (y) می باشند.



شکل (۷): مدار معادل مدل متوسط و دقیق خط انتقال مابین

نقاط مانیتورینگ و منبع فلیکر

در این مدل نیز با نوشتن روابط میان مؤلفه های فلیکری ولتاژ و جریان نقاط MP_1 و MP_3 و منبع فلیکر، روابط (۱۳) و (۱۴) حاصل شده که با جایگذاری دو رابطه در یکدیگر، معادله ای تک مجهوله بر حسب x تشکیل خواهد شد و با حل آن، می توان فاصله منبع از ابتدای خط را محاسبه نمود.

$$V_{FS} = Vf_1 + Z_1 \times (If_1 + (Vf_1 \times Y_1)) \quad (13)$$

$$V_{FS} = Vf_3 - Z_2 \times (If_3 + (Vf_3 \times Y_2)) \quad (14)$$

۳-۴- محاسبه سهم هر یک از منابع فلیکر

در راستای کاهش فلیکر شبکه، بعد از شناسایی محل تک تک منابع فلیکر شبکه، بایستی سهم هر یک از این منابع از مقدار فلیکر شبکه تعیین شود. یکی از جامع ترین و متداول ترین روش ها برای محاسبه سطح فلیکر شبکه، روش ارائه شده در استاندارد IEC 61000-4-15:2010 است. فلیکرمتر ارائه شده در این استاندارد فقط می تواند سطح فلیکر شبکه را اندازه گیری نماید و هیچ اطلاعاتی راجع به سهم هر یک از مشترکین ارائه نمی دهد. بلوک دیاگرام فلیکرمتر استاندارد IEC در شکل (۸) نشان داده شده است.

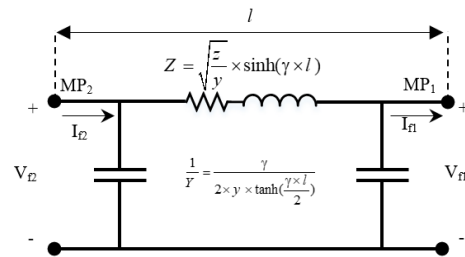
بلوک ۱ شامل یک مدار تطبیق ولتاژ است که وظیفه نمونه برداری از ولتاژ شبکه و مقیاس بندی این ولتاژ در یک مرجع داخلی را بر عهده دارد. در بلوک ۲ با استفاده از روش دمدولاسیون مربعی، نوسانات فرکانس پایین ولتاژ بازیابی می گردد.

انتقال، در نظر گرفته می شود. اگر بخواهیم این مدل از خط انتقال را به صورت شکل (۲) نشان دهیم؛ مقادیر Z و Y از معادلات (۷) و (۸) قابل محاسبه خواهند بود:

$$Z = \sqrt{\frac{z}{y}} \times \sinh(\gamma \times l) \quad (7)$$

$$Y = \frac{2 \times y \times \tanh(\frac{\gamma \times l}{2})}{\gamma} \quad (8)$$

در رابطه بالا γ (ثابت انتشار خط) برابر با $\sqrt{z \times y}$ است. زمانیکه مدل دقیق برای خط انتقال انتخاب شود؛ مدار معادل خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ به شکل (۵) خواهد بود.



شکل (۵): مدل دقیق خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ

با نوشتن روابط مداری میان مؤلفه های فلیکری ولتاژ و جریان این دو نقطه مانیتورینگ، دو معادله دو مجهولی بصورت روابط (۹) و (۱۰) بدست خواهد آمد که با حل آنها، مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط انتقال بدست می آیند:

$$Y = \frac{2 \times y \times \tanh(\frac{\gamma \times l}{2})}{\gamma} = \frac{If_2 - If_1}{V_{f2} + V_{f1}} \quad (9)$$

$$\sqrt{\frac{z}{y}} \times \sinh(\gamma \times l) = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{If_1 + [V_{f1} \times Y]} \quad (10)$$

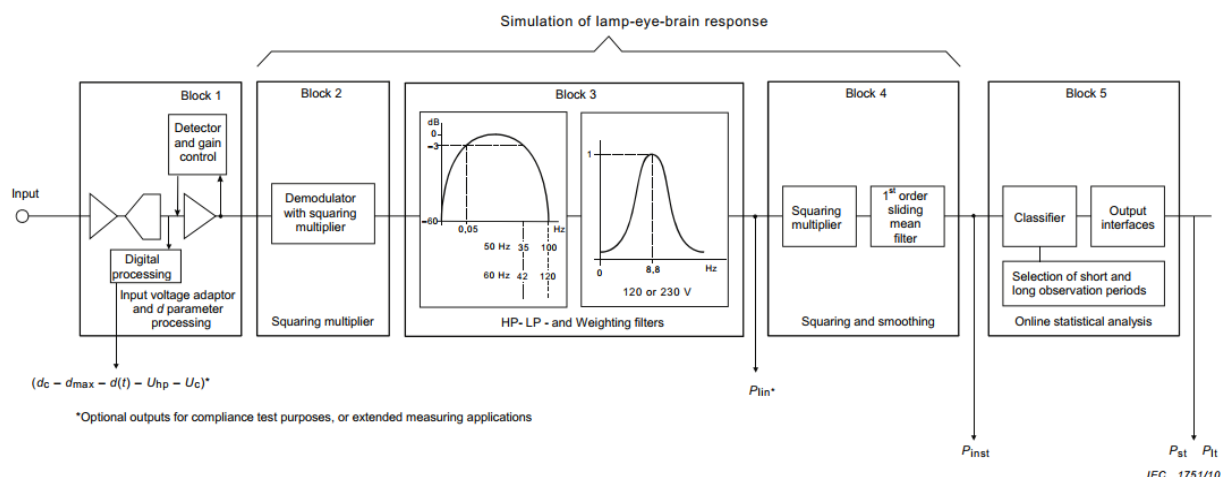
۳-۳- ردیابی محل منابع فلیکر

در این قسمت، فاصله منبع فلیکر از ابتدای خط (نقطه مانیتورینگ MP_1) محاسبه خواهد شد. زمانیکه برای خط انتقال، مدل کوتاه در نظر گرفته شود مدار معادل خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ MP_1 و MP_3 و منبع فلیکر (FS) به شکل (۶) خواهد بود.

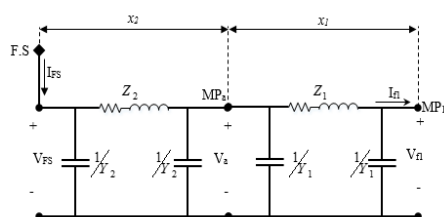
در این مدل، مؤلفه ای فلیکری ولتاژ و جریان در فرکانس مشخص و نقطه مانیتورینگ MP_3 به ترتیب با V_{f3} و If_3 و مؤلفه های مربوط به منبع فلیکر به ترتیب با V_{FS} و If_{FS} نشان داده شده است. همچنین طول کل خط (فاصله میان MP_1 و MP_3) برابر با d و فاصله منبع فلیکر از ابتدای خط برابر با x فرض شده است. با توجه به شکل (۶)، میان مؤلفه های فلیکری ولتاژ و جریان این دو نقطه مانیتورینگ و منبع فلیکر، روابط (۱۱) و (۱۲) برقرار است که با حل معادله ای متشکل از این دو روابط، فاصله منبع از ابتدای خط (x) بدست خواهد آمد.

$$V_{FS} = Vf_1 + (z \times x \times If_1) \quad (11)$$

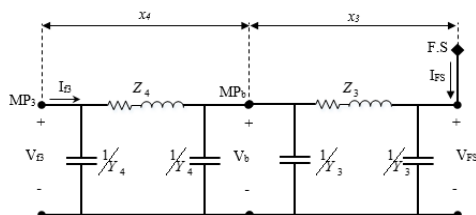
$$V_{FS} = Vf_3 - (z \times (d - x) \times If_3) \quad (12)$$



شکل (۸): بلوک دیاگرام فلیکرمتر استاندارد IEC



شکل (۹): مدار معادل خط مابین نقاط مانیتورینگ (زمانیکه باسبار مورد نظر a مابین ابتدای شبکه و منبع فلیکر باشد)



شکل (۱۰): مدار معادل خط مابین نقاط مانیتورینگ (زمانیکه باسبار مورد نظر b مابین منبع فلیکر و انتهای شبکه باشد)

در این مدل‌ها x_1 ، x_2 ، x_3 و x_4 به ترتیب فاصله مابین " MP_1 " و " a "، " FS " و " b "، " b " و " MP_3 " می‌باشند. با نوشتن روابط مداری حاکم میان نوسانات فرکانس پایین ولتاژ و جریان نقاط مانیتورینگ، منبع فلیکر و باسبار مورد نظر، سیگنال فلیکر ولتاژ ناشی از منبع فلیکر در باسبار مورد نظر به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه خواهد بود.

$$Vf_a = Vf_1 + Z_1 \times (If_1 + (Vf_1 \times Y_1)) \quad (15) \quad (a \text{ برای باسبار})$$

$$Vf_b = Vf_3 - Z_4 \times (If_3 + (Vf_3 \times Y_4)) \quad (16) \quad (b \text{ برای باسبار})$$

قسمت دوم: شبیه‌سازی فیلتر وزن‌دهی بلوک ۳:

تابع تبدیل فیلتر وزن‌دهی بلوک ۳ به صورت رابطه (۱۷) می‌باشد:

$$F(s) = \frac{1 + s/\omega_1}{\left(1 + s/\omega_2\right) \times \left(1 + s/\omega_3\right)} \times \frac{k \times \omega_4 \times s}{s^2 + 2 \times \lambda \times s + \omega_4^2} \quad (17)$$

در این رابطه پارامتر s مربوط به تبدیل لاپلاس بوده و متغیرهای

بلوک ۳ از دو فیلتر تشکیل یافته است: فیلتر اول برای حذف مؤلفه DC و ریبیل ولتاژ با فرکانس بیش از دو برابر فرکانس شبکه کاربرد دارد و فیلتر دوم که یک فیلتر وزن‌دهی است برای شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی سیستم بینایی چشم انسان نسبت به نوسانات ولتاژ سینوسی یک لامپ سیم پیچ رشته‌ای بکار رفته است. بلوک‌های دوم و سوم وظیفه دم‌دولاسیون ولتاژ ورودی و استخراج مؤلفه‌های فلیکری را بر عهده دارند.

بلوک ۴ از یک ضرب‌کننده مربعی به همراه یک فیلتر پایین‌گذر درجه یک تشکیل یافته است. درک انسان از فلیکر با ترکیبی از بلوک‌های ۲، ۳ و ۴ شبیه‌سازی شده است و خروجی بلوک ۴ احساس فلیکر لحظه‌ای (P_{inst}) می‌باشد. وظیفه تجزیه و تحلیل آماری از سطح فلیکر بر عهده بلوک ۵ است. در این مقاله، برای تعیین سهم هر یک از منابع فلیکر، وظایف بلوک‌های ۲، ۳ و ۴ بصورت نرم‌افزاری شبیه‌سازی شده و در انتها، سهم هر منبع فلیکر بصورت نسبتی از P_{inst} تعیین می‌شود:

قسمت اول: شبیه‌سازی بلوک ۲ به همراه اولین فیلتر بلوک ۳:

در این بخش، با استفاده از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در نقاط مانیتورینگ مورد استفاده در قسمت قبلی (MP_1 و MP_3) و بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم، مقدار نوسانات فرکانس پایین ولتاژ مربوط به هر فرکانس در هر باسبار دلخواهی بر روی خط، محاسبه خواهد شد. هر باسبار دلخواه در دو منطقه می‌تواند قرار داشته باشد: بین ابتدای خط (نقطه مانیتورینگ MP_1) و منبع فلیکر، یا مابین منبع فلیکر و انتهای خط (نقطه مانیتورینگ MP_3). مدار معادل خط انتقال برای این دو حالت در شکل‌های (۹) و (۱۰)، نشان داده شده است.

بکار رفته برای لامپی با توان نامی ۶۰ وات در دو حالت ولتاژ ۲۳۰ ولت و ۱۲۰ ولت در جدول (۱) تعریف شده است.

جدول (۱): پارامترهای معادله (۱۷)

متغیر	لامپ ۲۳۰ ولتی	لامپ ۱۲۰ ولتی
k	۱/۷۴۸۰۲	۱/۶۳۵۷
λ	$2\pi \times 405981$	$2\pi \times 4167375$
ω_1	$2\pi \times 27979$	$2\pi \times 2939902$
ω_2	$2\pi \times 122535$	$2\pi \times 1394468$
ω_3	$2\pi \times 21/9$	$2\pi \times 17/31512$
ω_4	$2\pi \times 9/15494$	$2\pi \times 9/7169$

خروجی قسمت دوم شامل کلیه نوسانات فرکانس پایین ولتاژ است که بر حسب حساسیت بینایی انسان نسبت به فلیکر وزن‌دهی شده‌اند.

قسمت سوم: شبیه‌سازی بلوک ۴:

در صورتیکه سیگنال ولتاژ دارای ۲ مؤلفه فلیکری با فرکانس‌های متفاوت باشد خروجی قسمت دوم (ورودی قسمت سوم) را می‌توان به صورت رابطه (۱۸) نمایش داد:

$$U(t) = U_{m1} \cos(\omega_{m1}t) + U_{m2} \cos(\omega_{m2}t) \quad (18)$$

همانطور که پیشتر نیز اشاره شد در بلوک ۴ فلیکرمتر IEC، ابتدا مربع سیگنال‌های فلیکری وزن‌دهی شده، محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر درجه یک، مؤلفه DC آنها جدا می‌شود. رابطه (۱۸) را بعد از مربع نمودن و ساده‌سازی می‌توان به صورت رابطه (۱۹) نشان داد.

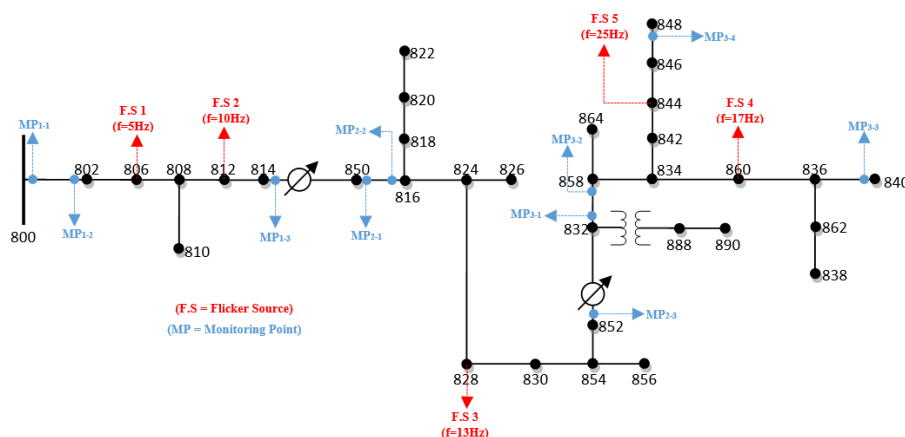
با عبور رابطه (۱۹) از فیلتر پایین‌گذر، مؤلفه‌های باقیمانده، مقدار احساس فلیکر لحظه‌ای P_{inst} (رابطه (۲۰)) خواهد بود.

$$P_{inst} = \frac{U_{m1}^2}{2} + \frac{U_{m2}^2}{2} \quad (20)$$

قسمت چهارم: نرمالیزه نمودن مقدار P_{inst} :

در این قسمت با نرمالیزه نمودن رابطه (۲۰) فاکتور FC (Flicker Contribution) به عنوان سهم هر منبع فلیکر از مقدار فلیکر لحظه‌ای باسبار مورد نظر تعریف می‌گردد:

$$U(t) = \frac{U_{m1}^2}{2} + \frac{U_{m2}^2}{2} + \frac{U_{m1}^2}{2} \cos(2\omega_{m1}t) + \frac{U_{m2}^2}{2} \cos(2\omega_{m2}t) + U_{m1}U_{m2} \cos((\omega_{m1} - \omega_{m2})t) + U_{m1}U_{m2} \cos((\omega_{m1} + \omega_{m2})t) \quad (19)$$



شکل (۱۱): شبکه ۳۴ باس IEEE به همراه منابع فلیکر

$$FC_1 = \frac{U_{m1}^2/2}{(U_{m1}^2/2) + (U_{m2}^2/2)} = \frac{U_{m1}^2/2}{P_{inst}} \quad (21)$$

$$FC_2 = \frac{U_{m2}^2/2}{(U_{m1}^2/2) + (U_{m2}^2/2)} = \frac{U_{m2}^2/2}{P_{inst}} \quad (22)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارایی و دقت روش پیشنهادی، از شبکه ۳۴ باس IEEE (شکل ۱۱) به عنوان سیستم پایه، استفاده شده و شبیه‌سازی‌های مربوطه در محیط سیمولینک نرم افزار متلب انجام یافته است. چنانچه در شکل (۱۱) نشان داده شده است برای ارزیابی دقیق و کامل روش پیشنهادی و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ، تعداد ۵ منبع با فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۲۵ دامنه‌های متفاوت به ترتیب بر روی باسبارهای ۸۰۶، ۸۱۲، ۸۲۸، ۸۴۰ و ۸۴۴ در نظر گرفته شده که همه منابع بطور همزمان در شبکه فعال بوده و به شبکه فلیکر تزریق می‌نمایند.

۴-۱- شناسایی محل منابع فلیکر

شبکه فوق شامل یک عدد ژنراتور و دو عدد رگولاتور ولتاژ است بنابراین می‌توان سه ناحیه را در نظر گرفت: شبکه میان باسبارهای ۸۰۰ و ۸۱۴ (ناحیه ۱)، شبکه میان باسبارهای ۸۵۰ و ۸۵۲ (ناحیه ۲) و شبکه مابین باسبارهای ۸۳۲ و ۸۴۰ (ناحیه ۳). ابتدا بایستی تعیین گردد در هر ناحیه کدام منبع فلیکر قرار دارد؛ بدین منظور در نقاط مانیتورینگ MP_{1-1} (باسبار ۸۰۰)، MP_{2-1} (باسبار ۸۵۰) و MP_{3-1} (باسبار ۸۳۲) سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری و مؤلفه‌های فلیکری آنها استخراج می‌شود و در قدم بعدی، توان فلیکری مربوط به هر فرکانس محاسبه شده که نتایج علامت توان فلیکر محاسبه شده در این نقاط مانیتورینگ در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): علامت توان فلیکر محاسبه شده برای مؤلفه‌های فلیکر

نقطه مانیتورینگ فرکانس (Hz)	MP ₁₋₁					MP ₂₋₁					MP ₃₋₁				
	۵	۱۰	۱۳	۱۷	۲۵	۵	۱۰	۱۳	۱۷	۲۵	۵	۱۰	۱۳	۱۷	۲۵
علامت توان فلیکر	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-

ابتدای خط نخواهد بود بلکه محل شناسایی شده، نقطه‌ای مابین باسبار منبع فلیکر و باسبارهای مجاورش است. در صورتیکه محل شناسایی شده، در داخل فاصله l باشد باسبار شناسایی شده برای محل منبع فلیکر، باسبار n در نظر گرفته خواهد شد و در غیر اینصورت، این باسبار بر روی یکی از باسبارهای مجاور قرار خواهد گرفت. x و y فاصله باسبار n از دو باسبار مجاورش می‌باشد.

ناحیه دوم: همانگونه که در قسمت اول جدول (۳) نیز مشاهده می‌شود با استفاده از هر سه مدل خط انتقال، محل منبع مؤلفه فلیکری با فرکانس ۱۳ هرتز بر روی باسبار ۸۲۸ شناسایی گردیده که محل دقیق این منبع نیز همین باسبار می‌باشد.

ناحیه سوم: با استفاده از هر سه مدل خط انتقال، باسبار ۸۳۴ به عنوان محل منبع فلیکر با فرکانس ۲۵ هرتز شناسایی شده است. با توجه به اینکه شاخه دیگری نیز به این باسبار وصل می‌باشد لذا محل دقیق این منبع یا بر روی باسبار ۸۳۴ است و یا بر روی یکی از باسبارهای شاخه متصل به این باسبار قرار دارد. برای تعیین محل دقیق این منبع، بایستی بار دیگر با استفاده از نقطه مانیتورینگ MP₃₋₄ به جای نقطه MP₃₋₃، این منبع ردیابی گردد. با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال، باسبار ۸۶۰ به عنوان محل منبع مؤلفه فلیکری با فرکانس ۱۷ هرتز شناسایی شده که محل دقیق این منبع نیز می‌باشد. اما با استفاده از دو مدل دیگر خط انتقال، باسبار اشتباهی شناسایی شده است.

تکرار ناحیه سوم: همانطور که در قسمت قبلی نیز اشاره شد برای ردیابی محل منبع فلیکر با فرکانس ۲۵ هرتز، بایستی مجدداً با استفاده از نقاط MP₃₋₁، MP₃₋₂ و MP₃₋₄، محل منبع شناسایی گردد. با توجه به نتایج انتهایی قسمت اول جدول (۳)، روش پیشنهادی فقط با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال توانست محل دقیق این منبع را نیز شناسایی کند.

بنابراین، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال و با کمک ۱۰ نقطه مانیتورینگ، محل تمامی منابع فلیکر را با دقت کافی شناسایی نمود. یکی از آخرین روش‌های ردیابی منابع فلیکر، روش ارائه شده در [۲۷] است. در این روش، گراف جهت‌داری معرفی شده که در آن باسبارهای سیستم قدرت به عنوان رأس‌های گراف و خطوط انتقال مابین باسبارها به عنوان یال‌های جهت‌دار (یا پیکان) در نظر گرفته شده‌اند که جهت یال‌ها اشاره به محل منبع فلیکر دارد. قسمتی از سیستم قدرت مانند شکل (۱۳) فرض می‌گردد که در آن باسبارهای i و j دو باسبار مجاور هم هستند.

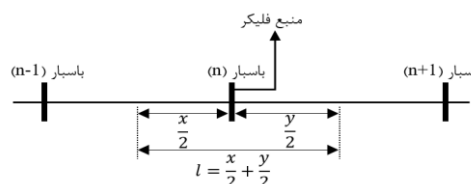
از نتایج جدول (۲) می‌توان استنباط نمود در شبکه فوق، پنج منبع فلیکر با فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۲۵ هرتز وجود دارد که نسبت به نقطه MP₁₋₁ هر ۵ منبع در پایین‌دست، نسبت به نقطه MP₂₋₁، منابع با فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز در بالادست و بقیه منابع در پایین‌دست و نسبت به نقطه MP₃₋₁ منابع با فرکانس‌های ۵، ۱۰ و ۱۳ هرتز در بالادست و دو منبع دیگر در پایین‌دست قرار دارند. بنابراین در ناحیه ۱، احتمال وجود منابع فلیکر با فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۲۵ هرتز، در ناحیه ۲ احتمال وجود منابع فلیکر با فرکانس‌های ۱۳، ۱۷ و ۲۵ هرتز و در ناحیه ۳ دو منبع با فرکانس‌های ۱۷ و ۲۵ هرتز وجود دارند. ردیابی محل منابع فلیکر شبکه در دو حالت انجام یافته است؛ زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان بدون نویز باشد و زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان همراه با نویز انجام گیرد.

۴-۱-۱- زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان

بدون نویز باشد

برای ردیابی محل منابع موجود در هر سه ناحیه اول، دوم و سوم به ترتیب به اطلاعات مانیتور شده ولتاژ و جریان در نقاط MP₁₋₁، MP₁₋₂، MP₁₋₃ و ۲ و ۳ نیاز می‌باشد. نتایج شناسایی محل منابع فلیکر با استفاده از روش پیشنهادی و با استفاده از هر سه مدل مختلف در نظر گرفته شده برای خط انتقال، در قسمت اول جدول (۳) نشان داده شده است.

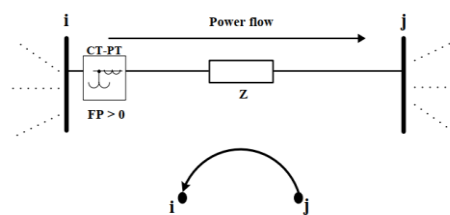
ناحیه اول: با استفاده از هر سه مدل خط در روش پیشنهادی، محل دقیق منابع مؤلفه‌های فلیکری با فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز بر روی باسبارهای ۸۰۶ و ۸۱۲ شناسایی شده است. برای درک بهتر نحوه شناسایی محل منبع فلیکر از روی فاصله محاسبه شده، قسمتی از شبکه را بصورت شکل (۱۲) فرض می‌کنیم.



شکل (۱۲): قسمتی از شبکه ۳۴ باسه IEEE متشکل از سه

باسبار

همانگونه که در شکل (۱۲) نیز نشان داده شده منبع فلیکر بر روی باسبار n قرار دارد و دو باسبار $(n-1)$ و $(n+1)$ ، باسبارهای مجاور باسبار منبع فلیکر می‌باشند. با توجه به وجود خطای محاسباتی، فاصله محاسبه شده برای منبع فلیکر دقیقاً برابر با فاصله باسبار منبع فلیکر از



شکل (۱۳): تعیین جهت یال بین دو رأس (توان فلیکر مثبت)

در نقطه مانیتورینگ نشان داده شده، بعد از عملیات دمدولاسیون و استخراج مؤلفه‌های فلیکری ولتاژ و جریان، توان فلیکر محاسبه می‌شود. در صورت مثبت بودن توان جهت یال مابین این دو رأس به سمت باسبار i است و در صورت منفی بودن توان، جهت یال به سمت باسبار j می‌باشد. در ادامه کار، همین روش را مجدداً با معرفی ماتریس مجاورت تکرار نموده است. با توجه به نحوه عملکرد این روش، برای شناسایی هر پنج منبع فلیکر با استفاده از روش [۲۷] به حداقل تعداد ۳۳ نقطه مانیتورینگ در طول خط نیاز می‌باشد. علاوه بر تعداد زیاد نقاط مانیتورینگ، در صورتیکه در بعضی از نقاط، امکان مانیتورینگ وجود نداشته باشد این روش پاسخگو نخواهد بود.

۴-۱-۲- زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان همراه با نویز باشد:

در این قسمت از پژوهش فرض شده که تمامی اندازه‌گیری‌های انجام شده، همراه با نویز باشد؛ به همین خاطر بر روی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان، نویز سفید اضافه شده است. در این حالت نیز مانند حالت قبل، برای ردیابی همه منابع فلیکر موجود در شبکه به اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان در نقاط مانیتورینگ بخش قبلی، نیاز می‌باشد. نتایج تعیین محل منابع فلیکر با استفاده از هر سه مدل مختلف خط انتقال، در قسمت دوم جدول (۳) نشان داده شده است.

ناحیه اول: با استفاده از هر سه مدل خط، باسبار ۸۱۲ به عنوان محل دقیق منبع فلیکر با فرکانس ۱۰ هرتز، شناسایی شده است که این باسبار محل واقعی این منبع نیز می‌باشد. محل واقعی منبع فلیکر با فرکانس ۵ هرتز، باسبار ۸۰۶ می‌باشد در حالیکه، تنها با استفاده از مدل کوتاه و متوسط خط انتقال، این باسبار به عنوان محل منبع، شناسایی شده و با استفاده از مدل دقیق، باسبار ۸۰۲ به عنوان محل منبع فلیکر شناسایی گردیده است.

ناحیه دوم: با توجه به قسمت دوم جدول (۳)، با استفاده از مدل‌های کوتاه و دقیق خط انتقال، باسبار ۸۲۸ و با استفاده از مدل متوسط، باسبار ۸۲۴ به عنوان محل منبع فلیکر با فرکانس ۱۳ هرتز شناسایی شده است در حالیکه محل اصلی این منبع، باسبار ۸۲۸ است.

ناحیه سوم: با استفاده از هر سه مدل خط انتقال، محل منبع فلیکر با فرکانس ۲۵ هرتز بر روی باسبار ۸۳۴ شناسایی شده است.

همانطور که در حالت بدون نویز نیز اشاره شد؛ علاوه بر خط اصلی، شاخه دیگری نیز به این باسبار وصل می‌باشد لذا برای تعیین محل دقیق این منبع بایستی با استفاده از نقطه مانیتورینگ MP_{3-4} به جای نقطه MP_{3-3} ، این منبع بار دیگر ردیابی گردد اما برای منبع فلیکر با فرکانس ۱۷ هرتز، فقط با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال، محل دقیق منبع (باسبار ۸۶۰) شناسایی گردیده است.

تکرار ناحیه سوم: بایستی با استفاده از نقاط MP_{3-1} ، MP_{3-2} و MP_{3-4} محل دقیق منبع فلیکر با فرکانس ۲۵ هرتز، مجدداً شناسایی شود. با توجه به نتایج انتهایی جدول (۳)، روش پیشنهادی تنها با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال توانسته محل دقیق این منبع را شناسایی نماید و با استفاده از دیگر مدل‌ها، محل اشتباهی را به عنوان محل منبع ارائه می‌دهد.

بنابراین روش پیشنهادی، تنها با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال، توانست محل همه منابع فلیکر را در هر موقعیتی و با هر وضعیتی (هم در شرایط با نویز و هم بدون نویز) شناسایی نماید و با استفاده از مدل متوسط (روش ارائه شده در مقاله [۲۸]) و مدل دقیق خط انتقال دارای خطای بیشتری (نسبت به حالت استفاده از مدل کوتاه) می‌باشند و در برخی موارد مخصوصاً در صورت وجود نویز در شبکه و تجهیزات مانیتورینگ اطلاعات و همراه بودن اندازه‌گیری داده‌ها با نویز، خطای شناسایی منبع فلیکر افزایش می‌یابد و قادر به شناسایی محل دقیق منابع نمی‌باشند.

۴-۲- تعیین اثر هر یک از منابع فلیکر بر میزان فلیکر ولتاژ هر باسبار دلخواه

در این قسمت به بررسی نتایج روش پیشنهادی درخصوص تعیین اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار فلیکر ولتاژ هر باسبار دلخواهی از شبکه پرداخته شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی در تعیین اثر هر یک از منابع فلیکر، دو باسبار ۸۰۶ و ۸۰۸ از ناحیه اول، دو باسبار ۸۲۴ و ۸۳۰ از ناحیه دوم و دو باسبار ۸۳۶ و ۸۴۲ از ناحیه سوم به عنوان باسبارهای نمونه انتخاب شده است.

در روش پیشنهادی برای تشخیص اثر هر منبع فلیکر، نیازی به اندازه‌گیری اطلاعات در نقطه مانیتورینگ جدیدی نمی‌باشد و اطاعات همان نقاط مانیتورینگ استفاده شده در قسمت قبلی، کافی است. همانگونه که در قسمت اول جدول (۴) می‌توان مشاهده نمود مقادیر بدست آمده از طریق اندازه‌گیری مستقیم و روش پیشنهادی، برای مقدار نوسان ایجاد شده در دامنه ولتاژ باسبارها، تقریباً یکسان بوده و خطای ایجاد شده، قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین برای هر باسبار دلخواهی از شبکه، روش پیشنهادی بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم و با دقت کافی توانست مقدار فلیکر ولتاژ ایجاد شده توسط هر یک از منابع را تعیین نماید.

جدول (۳): نتایج شناسایی محل منابع فلیکر با استفاده از مدل‌های مختلف خط انتقال (d بیانگر فاصله حقیقی منبع از ابتدای خط و busbar بیانگر شماره باسباری است که منبع در اصل بر روی آن قرار دارد)

نتیجه شناسایی محل منبع	محل شناسایی شده	فاصله شناسایی شده	روش استفاده شده (مدل در نظر گرفته شده برای خط انتقال)	فرکانس مؤلفه فلیکر	منطقه مورد نظر (نقاط مانیتورینگ مورد نیاز)
قسمت اول: زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان، بدون نویز باشد					
ناحیه اول (MP ₁₋₁ , MP ₁₋₂ و MP ₁₋₃)	تایید	۸۰۶	۱/۰۸۲۸	مدل کوتاه خط انتقال	۵ Hz (d=۱/۱۳۳۷) (busbar=۸۰۶)
	تایید	۸۰۶	۱/۱۳۶۸	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۰۶	۱/۰۸۱۴	مدل دقیق خط انتقال	
	تایید	۸۱۲	۲۲/۶۸۶۲	مدل کوتاه خط انتقال	۱۰ Hz (d=۲۲/۵۶۷۴) (busbar=۸۱۲)
	تایید	۸۱۲	۲۲/۷۲۶۷	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۱۲	۲۲/۷۲۹۵	مدل دقیق خط انتقال	
ناحیه دوم (MP ₂₋₁ , MP ₂₋₂ و MP ₂₋₃)	تایید	۸۲۸	۳/۸۶۳۵	مدل کوتاه خط انتقال	۱۳ Hz (d=۳/۴۶۲۵) (busbar=۸۲۸)
	تایید	۸۲۸	۳/۸۸۸۳	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۲۸	۳/۸۶۳۷	مدل دقیق خط انتقال	
ناحیه سوم (MP ₃₋₁ , MP ₃₋₂ و MP ₃₋₃)	تایید	۸۶۰	۳/۹۴۴۳	مدل کوتاه خط انتقال	۱۷ Hz (d=۳/۸۸۶۲) (busbar=۸۶۰)
	عدم تایید	۸۳۴	۳/۴۱۸۴	مدل متوسط خط انتقال	
	عدم تایید	۸۳۴	۳/۵۱۹۰	مدل دقیق خط انتقال	
	تایید	۸۳۴	۳/۱۷۶۹	مدل کوتاه خط انتقال	۲۵ Hz (d=۳/۲۷۰۵) (busbar=۸۳۴)
	تایید	۸۳۴	۲/۶۸۲۱	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۳۴	۲/۹۳۳۲	مدل دقیق خط انتقال	
تکرار ناحیه سوم (MP ₃₋₁ , MP ₃₋₂ و MP ₃₋₄)	تایید	۸۴۴	۳/۸۳۳۰	مدل کوتاه خط انتقال	۲۵ Hz (d=۳/۷۶۷۳) (busbar=۸۴۴)
	عدم تایید	۸۴۲	۳/۳۱۸۷	مدل متوسط خط انتقال	
	عدم تایید	۸۴۲	۳/۴۴۴۹	مدل دقیق خط انتقال	
قسمت دوم: زمانیکه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان، همراه با نویز باشد					
ناحیه اول (MP ₁₋₁ , MP ₁₋₂ و MP ₁₋₃)	تایید	۸۰۶	۱/۰۷۹۴	مدل کوتاه خط انتقال	۵ Hz (d=۱/۱۳۳۷) (busbar=۸۰۶)
	تایید	۸۰۶	۱/۹۷۶۷	مدل متوسط خط انتقال	
	عدم تایید	۸۰۲	۱/۰۳۶۶	مدل دقیق خط انتقال	
	تایید	۸۱۲	۲۲/۶۶۲۶	مدل کوتاه خط انتقال	۱۰ Hz (d=۲۲/۵۶۷۴) (busbar=۸۱۲)
	تایید	۸۱۲	۲۱/۷۲۳۹	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۱۲	۲۱/۵۷۷۳	مدل دقیق خط انتقال	
ناحیه دوم (MP ₂₋₁ , MP ₂₋₂ و MP ₂₋₃)	تایید	۸۲۸	۳/۸۲۵۰	مدل کوتاه خط انتقال	۱۳ Hz (d=۳/۴۶۲۵) (busbar=۸۲۸)
	عدم تایید	۸۲۴	۲/۳۱۸۸	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۲۸	۳/۸۳۷۸	مدل دقیق خط انتقال	
ناحیه سوم (MP ₃₋₁ , MP ₃₋₂ و MP ₃₋₃)	تایید	۸۶۰	۳/۹۵۱۹	مدل کوتاه خط انتقال	۱۷ Hz (d=۳/۸۸۶۲) (busbar=۸۶۰)
	عدم تایید	۸۳۴	۳/۴۳۴۴	مدل متوسط خط انتقال	
	عدم تایید	۸۳۴	۳/۵۳۰۶	مدل دقیق خط انتقال	
	تایید	۸۳۴	۳/۱۷۵۲	مدل کوتاه خط انتقال	۲۵ Hz (d=۳/۲۷۰۵) (busbar=۸۳۴)
	تایید	۸۳۴	۲/۶۸۲۸	مدل متوسط خط انتقال	
	تایید	۸۳۴	۲/۹۲۸۳	مدل دقیق خط انتقال	
تکرار ناحیه سوم (MP ₃₋₁ , MP ₃₋₂ و MP ₃₋₄)	تایید	۸۴۴	۳/۸۳۲۶	مدل کوتاه خط انتقال	۲۵ Hz (d=۳/۷۶۷۳) (busbar=۸۴۴)
	عدم تایید	۸۴۲	۳/۳۱۶۳	مدل متوسط خط انتقال	
	عدم تایید	۸۴۲	۳/۴۴۲۶	مدل دقیق خط انتقال	

جدول (۴): تعیین اثر هر یک از منابع فلیکر بر روی هر باسبار دلخواهی از شبکه

مقدار نوسانات فرکانس پایین ولتاژ ایجاد شده توسط هر یک از منابع فلیکر						
باسبار مورد نظر	فرکانس روش مورد استفاده	5Hz	10Hz	13Hz	17Hz	25Hz
۸۰۶	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۵۴/۵۵۱۴	۳۶/۹۸۴۲	۵۳/۴۲۱۷	۳۹/۱۲۱۸	۵۲/۹۱۶۲
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۵۴/۵۴۹۳	۳۶/۹۸۲۷	۵۳/۴۱۹۴	۳۹/۱۲۰۰	۵۲/۹۱۳۷
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۵
۸۰۸	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۵۱/۷۱۵۴	۵۹/۵۳۸۹	۸۳/۱۱۱۹	۵۹/۴۷۵۰	۸۰/۲۰۹۷
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۵۱/۲۲۸۷	۵۹/۳۱۵۸	۸۲/۷۷۱۲	۵۹/۲۱۸۲	۷۹/۸۵۸۷
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۴۸۶۷	۰/۲۲۳۱	۰/۳۴۰۷	۰/۲۵۶۸	۰/۳۵۱۰
۸۲۴	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۴۴/۵۹۲۱	۷۹/۸۹۱۸	۱۵۴/۶۶۵۴	۱۱۵/۴۲۲۲	۱۵۸/۷۷۵۹
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۴۴/۶۳۴۵	۷۹/۹۷۰۷	۱۵۴/۹۲۳۷	۱۱۵/۵۹۲۰	۱۵۹/۰۰۱۰
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۰۴۲۴	۰/۰۷۸۹	۰/۲۵۸۳	۰/۱۶۹۸	۰/۲۲۵۱
۸۳۰	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۴۲/۶۸۰۹	۷۶/۵۲۱۳	۱۴۹/۰۰۶۸	۱۳۳/۱۲۶۶	۱۸۲/۳۵۱۲
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۴۲/۵۴۰۴	۷۶/۳۱۵۵	۱۵۰/۴۵۵۶	۱۳۳/۰۰۰۶	۱۸۲/۱۴۵۸
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۱۴۰۵	۰/۲۰۵۸	۱/۴۴۸۸	۰/۱۲۶۰	۰/۲۰۵۴
۸۳۶	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۳۹/۱۹۳۲	۷۰/۹۰۵۶	۱۴۵/۶۴۴۵	۱۹۱/۴۴۱۵	۲۵۹/۳۸۷۷
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۳۹/۱۹۱۲	۷۰/۹۰۲۰	۱۴۵/۶۳۶۰	۱۹۱/۴۳۲۲	۲۵۹/۳۷۵۰
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۲۷
۸۴۲	اندازه‌گیری مستقیم ($V_{d.m}$)	۳۹/۲۵۶۱	۷۱/۰۱۵۸	۱۴۵/۸۸۳۷	۱۸۹/۴۰۵۱	۲۶۰/۲۴۸۵
	روش پیشنهادی ($V_{p.m}$)	۳۹/۲۰۳۷	۷۰/۹۲۳۶	۱۴۵/۷۰۲۲	۱۸۹/۲۵۸۹	۲۶۰/۱۴۱۳
	خطا ($ V_{d.m} - V_{p.m} $)	۰/۰۵۲۴	۰/۰۹۲۲	۰/۱۸۱۵	۰/۱۴۶۲	۰/۱۰۷۲
تفکیک اثر هر یک از منابع فلیکر (FC)						
فرکانس منبع فلیکر	باسبار مورد نظر					
	۸۰۶	۸۰۸	۸۲۴	۸۳۰	۸۳۶	۸۴۲
۵ Hz	۲۴/۵۰	۱۶/۳۸	۹/۰۴	۸/۴۵	۷/۰۰	۷/۰۱
۱۰ Hz	۲۵/۵۲	۲۹/۱۳	۲۴/۸۷	۲۳/۳۰	۱۹/۴۴	۱۹/۴۹
۱۳ Hz	۲۷/۴۵	۳۰/۲۷	۳۵/۸۹	۳۴/۲۱	۲۹/۷۴	۲۹/۸۲
۱۷ Hz	۱۳/۱۹	۱۴/۲۱	۱۷/۵۷	۱۹/۸۴	۲۵/۶۵	۲۵/۴۱
۲۵ Hz	۹/۳۳	۱۰/۰۲	۱۲/۶۴	۱۴/۲۱	۱۸/۱۸	۱۸/۲۷

زمان بر بودن، در برخی از باسبارهای شبکه امکان‌پذیر نمی‌باشد می‌توان استنباط نمود که روش پیشنهاد شده در این مقاله، بصورت روز افزونی در شبکه‌های قدرت بویژه در شبکه‌های هوشمند مورد نیاز می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

[۲۹] یکی از آخرین تحقیق‌ها در رابطه با ردیابی محل منابع فلیکر و تعیین سهم هر یک از آنها با استفاده از کمترین تعداد نقطه مانیتورینگ می‌باشد که در این روش، با استفاده از داده‌های حداقل سه نقطه مانیتورینگ در طول خط انتقال، ابتدا مقادیر پریونیت امپدانس و ادمیتانس خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ، محاسبه می‌گردد و با تشکیل معادله‌ای بر حسب فاصله منبع فلیکر از ابتدای خط و حل آن، محل منبع شناسایی شده و سهم هر یک از منابع فلیکر از مقدار فلیکر شبکه بدست می‌آید. تخمین فاصله منبع با استفاده از روش فوق با تقریب همراه می‌باشد و در برخی موارد مخصوصاً زمانی که اندازه‌گیری

با توجه به مطالب بخش ۳-۴ مقاله (محاسبه سهم هر یک از منابع فلیکر)، فاکتور FC با مقدار فلیکر لحظه‌ای P_{inst} رابطه مستقیمی دارد پس می‌توان استنباط نمود که این فاکتور برای ارزیابی اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار فلیکر هر باسبار دلخواهی از شبکه مناسب می‌باشد که تنها از نقاط مانیتورینگ قبلی بهره می‌برد و نیازی به اندازه‌گیری مستقیم نمی‌باشد.

بنابراین با کمک روش پیشنهادی و تنها با استفاده از داده‌های ۱۰ نقطه مانیتورینگ در طول خط، محل هر پنج منبع فلیکر، در هر شرایطی و با دقت کافی تشخیص داده شد و اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار فلیکر ولتاژ هر باسبار دلخواهی بر روی خط انتخاب شده، تعیین گردید. در حالیکه با استفاده از روش‌های ارائه شده در دیگر مقالات و بویژه مقاله‌های [۲۶ و ۲۷]، برای شناسایی محل و محاسبه اثر هر یک از منابع فلیکر، حداقل به تعداد ۳۳ نقطه مانیتورینگ نیاز می‌باشد. با توجه به اینکه عملیات مانیتورینگ علاوه بر هزینه‌بر و

۱۳۹۷، مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران، ۲/۳، سال پانزدهم، شماره سوم.

- [4] Chen, X., Li, K., et al.: 'Classification of power quality disturbances using dual strong tracking filters and rule- based extreme learning machine', *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, 2018, pp. 1-29.
- [5] Al-Shetwi, A.Q., Hannan, M.A., et al.: 'Power Quality Assessment of Grid-Connected PV System in Compliance with the Recent Integration Requirements', *Electronics*, 2020, 9, 366, pp.1-22.
- [6] González, M., Cárdenas, V., et al.: 'Generation of new harmonics caused by the processing of DQ transformation in power quality compensators', *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, 2019, 29, e2717.
- [7] Spasojević, L., Papić, I., et al.: 'A new approach to the modelling of electric arc furnaces with representative voltage samples', *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, 2015, 25(7), PP.1173- 1186.
- [8] Łukasik, Z., Olczykowski, Z.: 'Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems', *Energies*, 2020, 13, 1462, pp. 1-30.
- [9] Samet, H., Farjah, E., et al.: 'A dynamic, nonlinear and time- varying model for electric arc furnace', *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, 2014, 25, pp. 2165- 2180.
- [10] Moallem, P., Zargari, A., et al.: 'A practical framework for applying effects of various lamps on IEC flickermeter and evaluating results in a welding system', *J. Chinese Inst. Eng.*, 2012, 35, pp. 421- 429.
- [11] Hong, Y.Y., Wang, J.J.: 'Calculation of voltage fluctuation caused by intermittent loads', *J. Chinese Inst. Eng.*, 2004, 27, (7), pp. 1047-1054.
- [12] Saini, M.K., Beniwal, R.K.: 'Detection and classification of power quality disturbances in wind- grid integrated system using fast time- time transform and small residual- extreme learning machine', *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, 2018, 28, (4), e2519.
- [13] Rahman, S., Moghaddami, M., et al.: 'Flicker Estimation Associated with PV Integrated Distribution Network', *conf., SoutheastCon*, Petersburg, FL, USA, 2018.
- [14] Arshad, A., Lehtonen, M.: 'A comprehensive voltage control strategy with voltage flicker compensation for highly PV penetrated distribution networks', *Elect. Power Sys. Research*, 2019, 172, pp.105-113.
- [15] Brinkela, N.B.G., Gerritsma, M.K., et al.: 'Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles', *Elect. Power and Energy Sys.* 2020, 118.
- [16] Čerňan, M., Müller, Z., et al.: 'An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129.
- [17] Olczykowski, Z., Łukasik, Z.: 'Evaluation of Flicker of Light Generated by Arc Furnaces', *Energies* 2021, 14.
- [18] IEC, 'flicker meter-functional and design specifications', *IEC Std. 61000- 4- 15*, 2010.
- [19] Afshar, F. G.: 'Light flicker factor as a diagnostic quantity for the evaluation of discharge instabilities in HID lamps', *The Jour. of the Illuminating Engineering Society of North America*, 2006, 3, (1), pp. 35-50.
- [20] Hernandez, A., Mayordomo, et al.: 'A method based on interharmonics for flicker propagation applied to arc furnaces', *IEEE Trans Power Deliver*, 2005, 20, (3), pp. 2334- 2342.

سیگنال‌های ولتاژ و جریان همراه با نویز باشد تخمین فاصله، افزایش یافته و محل اشتباهی به عنوان محل منبع فلیکر ارائه می‌دهد. همچنین، با توجه به رابطه مقدار فلیکر لحظه‌ای با توان دوم نوسانات فلیکری، فاکتور معرفی شده برای مقایسه سهم منابع فلیکر از مقدار فلیکر شبکه، فاکتور مناسبی نمی‌باشد. برای حل این مشکل، در این مقاله انواع مدل‌های رایج برای خط انتقال بررسی شده و به کمک نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده که اگر در روش [۲۹]، به جای استفاده از مدل متوسط و دقیق خط انتقال، از مدل کوتاه خط انتقال استفاده شود دقت تخمین فاصله منبع، افزایش یافته و در هر شرایطی می‌توان محل دقیق منبع فلیکر را تشخیص داد. در ضمن با توسعه روش [۲۹] فاکتور FC (Flicker Contribution) به عنوان سهم هر منبع فلیکر از مقدار فلیکر لحظه‌ای باسبار مورد نظر معرفی شده است که شامل کلیه نوسانات فرکانس پایین ولتاژ است که بر حسب حساسیت بینایی انسان نسبت به فلیکر (استاندارد IEC 61 000 4-15) وزن دهی شده و همچنین رابطه مستقیمی با مقدار احساس فلیکر لحظه‌ای P_{inst} دارد. در ضمن، این امکان فراهم شده که بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم و تنها با استفاده از داده‌های همان نقاط مانیتورینگ استفاده شده در قسمت قبلی، اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار فلیکر ولتاژ هر باسبار دلخواهی از شبکه، با دقت کافی تعیین شود.

مزایای روش پیشنهادی را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ با استفاده از مدل کوتاه خط انتقال مابین نقاط مانیتورینگ، محل دقیق هر منبع فلیکر شبکه حتی در صورت وجود نویز در شبکه، شناسایی می‌شود.
- ✓ روش پیشنهادی با همان نقاط مانیتورینگ استفاده شده در شناسایی محل منابع فلیکر، قادر به محاسبه سهم هر منبع فلیکر از مقدار کلی فلیکر هر باسبار دلخواهی از شبکه می‌باشد.
- ✓ با توجه به اینکه فاکتور معرفی شده برای تعیین سهم هر منبع فلیکر، رابطه مستقیمی با مقدار فلیکر لحظه‌ای P_{inst} دارد لذا برای تعیین سهم هر منبع از شدت فلیکر شبکه، بسیار مناسب و قابل اطمینان می‌باشد.
- ✓ روش پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی موجود، به کمترین تعداد نقطه مانیتورینگ نیاز دارد.
- ✓ اجرایی نمودن روش پیشنهادی ساده و دارای قابلیت اطمینان بالایی می‌باشد و قابلیت پیاده‌سازی بر روی تجهیزات اندازه‌گیری فعلی را دارا است.

مراجع:

- ۱/ ژنراتور سنکرون درایو شده توسط توربین انبساطی در شبکه توزیع، مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران، ۱۳۸۹، سال هفتم، شماره اول.
- ۲/ تودجی، حمید رضا: 'ارتقای کیفیت توان و بهبود فرآیند کنترل کوره قوس الکتریکی با استفاده بابائی ترکمانی، مهدی، رستگار، حسن: 'ارزیابی فلیکر ایجاد شده از

- [21] Eghtedarpour, N., Farjah, E., et al.: 'Intelligent identification of flicker source in distribution systems', IET Gen. Transm. Dis., 2010, 4, (9), pp. 1016- 1027.
- [22] Wiczyński, G.: 'Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid', Elect. Power Sys. Research, 2020, 180.
- [23] Doustmohammadi, H., Foroud, A.A.: 'A novel flicker detection method for vertical axis wind turbine using two- dimensional discrete wavelet transform', Int. Trans. Elect. Energy Syst., 2020, PP.1-20.
- [24] Axelberg, P.G.V., Bollen, M.H.J.: 'An algorithm for determining the direction to a flicker source', IEEE Trans. Power Delivery, 2006, 21, (2), pp.755- 760.
- [25] Axelberg, P.G.V., Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.: 'Trace of flicker sources by using the quantity of flicker power', IEEE Trans. Power Delivery, 2008, 23, (1), pp. 465- 471.
- [26] Poormonfaredazimi, M., Moghadam, H., Doroudi, A.: 'A novel method to trace flicker sources', In IEEE Proceedings of 17th Conference on Elect. Power Distribution Networks (EPDC), Tehran, Iran, 2012.
- [27] Moghadam Banayem, H., Doroudi, A., et al.: 'Flicker source tracing by wavelet transform'. Elect. Power Comp. Syst., 2015, 43, (4), pp. 412- 421.
- [28] Dejamkhooy, A., Dastfan, A., Ahmadyfard, A.: 'Source detection and propagation of equal frequency voltage flicker in nonradial power system', Turk. Jour. of Elect. Eng. & Comp. Sciences, 2016, 24, pp.1351- 1370.
- [29] Moghadam Banaem, H., Abbasi, M., Tousi, B.: 'A new method with minimum number of monitoring points for flicker source tracing by wavelet transform', Int. Trans. Elect. Energy Syst., 2019.
- [30] Moghadam Banaem, H., Tousi, B.: 'A new approach for the simultaneous identification of the location and individual contribution of multiple flicker sources using the least number of monitoring points', Int. Trans. Elect. Energy Syst., 2020.
- [31] Poisson, O., Riual, P., et al.: 'New signal processing tools applied to power quality analysis', IEEE Trans. Power Delivery, 1999, 14, (2), pp. 561–566.
- [32] Nicolae, I.D., Nicolae, P.M.: 'Using discrete wavelet transform to evaluate power quality at highly distorted three- phase systems'. In IEEE 11th Int. Conf. on Elect. Power Quality and Utilisation (EPQU), Lisbon, Portugal, 2011.
- [33] Eristi, B., Yildirim, O., et al.: 'A new embedded power quality event classification system based on the wavelet transform', Int. Trans. Elect. Energy Syst., 2018, pp. 1- 15.
- [34] Gupta, N., K, S., Datta, S.: 'Wavelet based real-time monitoring of electrical signals in Distributed Generation (DG) integrated system', Engineering Science and Technology, an In. Jour., 2020.
- [35] Huang, S.J., Lu, C.W.: 'Enhancement of digital equivalent voltage flicker measurement via continuous wavelet transform', IEEE Trans. Power Delivery, 2004, 19, (2), pp. 663- 670.