

تشخیص محل منابع فلیکر در شبکه‌های قدرت

هادی مقدم بنائم^۱، دانشجوی دکتری؛ مرتضی فرسادی^۲، استاد

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - moghadam.hadi@gmail.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - m.farsadi@yahoo.com

چکیده: فلیکر ولتاژ به نوسانات فرکانس پایین مدوله شده بر یک موج حامل ولتاژ گفته می‌شود. به منظور کاهش فلیکر، منابع فلیکری موجود در شبکه بایستی شناسایی گردند. در این پژوهش، روش جدیدی بر پایه تئوری توان فلیکری و تبدیل موجک و دمدولاسیون همدوس برای مشخص نمودن محل دقیق منبع فلیکر تکی یا چندتایی در شبکه‌های قدرت با چندین منبع فلیکر پیشنهاد شده است. دمدولاسیون همدوس و تبدیل موجک برای دمدولاسیون مؤلفه‌های فرکانسی فلیکری از موج اصلی شبکه به کاررفته‌اند. سپس با معرفی دو پارامتر "FPM" و "FPW"، اقدام به شناسایی محل دقیق منابع فلیکری در شبکه و تعیین میزان اثرات آن‌ها بر روی بینایی انسان و تجهیزات الکترونیکی شده است. همچنین روش فوق، میزان مشارکت تک‌تک منابع فلیکر را در سطح فلیکر ولتاژ کل در نقطه مشترک باس‌بار تعیین می‌نماید. برای ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۱۳ باسه IEEE در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده و روش فوق جهت تشخیص منابع فلیکر به کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی، دقت روش پیشنهادی را در شناسایی محل دقیق منابع فلیکر و همچنین تعیین میزان سهم هر یک از منابع در فلیکر ولتاژ هر یک از شینه‌ها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت توان، نوسانات ولتاژ، تشخیص منابع فلیکر، توان فلیکر، تبدیل موجک، سهم فلیکری.

Identification of the Flicker Sources Location on Power Network

H. Moghadam Banayem¹, PhD Student; M. Farsadi, Professor²

1- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: moghadam.hadi@gmail.com

2- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: m.farsadi@urmia.ac.ir

Abstract: Voltage flicker is referred to low frequency fluctuations modulated on the basis of voltage signal. Flicker mitigation needs identification of the flicker sources. In this paper a new method based on flicker power theory and wavelet transform and coherent phase demodulation is proposed to identify the locations of single and multiple flicker sources in a multiflicker source power network. The coherent phase demodulation and wavelet transform are utilized for demodulation flicker frequency components from main signal. Then by introducing of two parameters, "FPM" and "FPW", in order to identify the exact location of flicker sources on the network and evaluation of their effects on the human vision and electronic equipment. The method also evaluates the contributions of individual flicker source to global voltage flicker level of a common coupling bus bar. To examine the proposed method, the IEEE 13-Bus system is simulated in Matlab/Simulink and this method is used to identify flicker sources. The simulation results in indicating the accuracy of the proposed method to identify the exact location of flicker sources, and determine the contribution of each sources in voltage flicker of each bus bar.

Keywords: Power quality, voltage fluctuations, flicker source identification, flicker power, wavelet transform, flicker contributions.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۹ و ۱۳۹۵/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

نام نویسنده مسئول: مرتضی فرسادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ارومیه - جاده سرو - دانشگاه ارومیه - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های برق سعی دارند تا تغذیه‌ای با کیفیت بالا برای مشترکین خود فراهم آورند. گرچه بنا به دلایل مختلف، مشترکین برق با حوادث غیرقابل انتظار در تغذیه خود روبرو می‌شوند. این حوادث به دلایل گوناگون مانند قطع مدارها و یا عملکرد نادرست تجهیزات رخ می‌دهد. بدین ترتیب رویدادهای کیفیت توان هم برای شرکت‌های برق و هم برای مشترکین برق به یک مشکل در حال افزایش تبدیل شده است.

به دلایل شکایات مشترکین، پدیده نوسانات ولتاژ (فلیکر ولتاژ) دارای اهمیت بیشتری شده است [۱]. فلیکر ولتاژ در واقع تغییرات دوره‌ای یا تصادفی با دامنه کم ولتاژ است که از بارهای سنگینی مانند موتورها، کوره‌های قوس الکتریکی، کارخانه‌های فولاد و جوشکاری ناشی می‌شود [۲، ۳ و ۴]. مزارع بادی نیز مولد نوسان ولتاژ هستند [۵، ۶ و ۷].

مطابق استاندارد [IEC 61 000-4-15] وقتی دامنه نوسانات ولتاژ برای فرکانس معینی (۵/۰ تا ۳۵ هرتز) از مقدار مشخصی ($\pm 10\%$) فراتر رود این نوسانات توسط چشم انسان به‌عنوان یک اغتشاش، قابل تشخیص است و به چشم انسان آزار می‌رساند. این نوسانات، تأثیر مستقیمی بر روی فلیکر لامپ دارد. به‌علاوه، این پدیده سبب برخی اغتشاشات در سیستم‌های تلویزیونی و عملکرد نادرست تجهیزات بیمارستانی از جمله سیستم‌های ICU و CCU (این تجهیزات در دامنه‌های متفاوت منبع ولتاژ، گزارش‌های متفاوتی از حال بیماران ارائه می‌دهند) می‌شود.

تاکنون روش‌های مختلفی جهت شناسایی پدیده فلیکر از دیگر اغتشاشات شبکه پیشنهاد گردیده که از آن جمله می‌توان به روش پیشنهاد شده در [۹] اشاره نمود که در آن از تبدیل S برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان بهره گرفته شده است. همچنین روش‌های اندازه‌گیری مختلفی برای تعیین سطح فلیکر پیشنهاد شده است که جامع‌ترین و رایج‌ترین روش در استاندارد IEC 61 000-4-15 آمده است. در این روش مقادیر شاخص‌های کوتاه‌مدت (P_{st}) و بلندمدت (P_{lt}) فلیکر اندازه‌گیری می‌شود. متأسفانه هر دوی این شاخص‌ها، مقدار فلیکر در نقطه مانیتورینگ را بدون هیچ‌گونه اطلاعی درباره جهت فلیکر در شبکه قدرت ارائه می‌دهند. به‌علاوه این مقادیر نمی‌توانند منبع فلیکر غالب را شناسایی نمایند. تشخیص منبع فلیکر، به‌خصوص منبع فلیکر غالب از مهم‌ترین عواملی است که هم برای شرکت‌های برق و هم برای مشترکین مورد توجه است. در حقیقت اولین گام در پروسه کاهش فلیکر، تشخیص منابع فلیکر موجود در شبکه است.

در این خصوص مقالات متعددی منتشر شده است که مبتنی بر استاندارد IEC نیستند [۱۰-۱۷]. روش پیشنهاد شده در [۱۸ و ۱۹] یک رویکرد تحلیلی برای تعیین جهت منبع فلیکر نسبت به نقطه مانیتورینگ ارائه می‌دهد که مشابه همان روش موجود در استاندارد IEC 61 000-4-15 است. هر دوی این مقالات بر پایه یک کمیت جدید

به نام «توان فلیکر» بنا شده‌اند. در روش پیشنهاد شده در این مقاله، به‌دلیل محاسبه دقیق دامنه و اندازه فاز، علاوه بر مکان‌یابی دقیق منابع فلیکر، تعیین میزان سهم مشارکت هر یک از منابع، نیز در نقطه مانیتورینگ، قابل دسترسی است. همچنین از آنجایی که روش پیشنهادی مبتنی بر استاندارد IEC 61 000-4-15 می‌باشد می‌توان میزان اثر تک‌تک منابع را بر روی سیستم بینایی انسان تشخیص داده و اقدام به جبران و بهبود شبکه با کم‌ترین هزینه نمود.

توان فلیکر با انتگرال‌گیری از حاصل‌ضرب پوش دامنه ولتاژ در دامنه جریان محاسبه می‌شود. پوش سیگنال مدوله‌شده با فرایند دمدولاسیون و با استفاده از چند فیلتر مناسب به‌دست می‌آید. برای تعیین جهت منبع فلیکر، از علامت توان فلیکر استفاده می‌شود. علامت مثبت نشان می‌دهد یک منبع فلیکر در بالادست نقطه مانیتورینگ قرار دارد و علامت منفی نشان‌دهنده وجود یک منبع فلیکر در پایین‌دست نقطه مانیتورینگ است. یکی از معایب این دو روش [۱۸ و ۱۹] تولید مؤلفه‌های فرکانسی پایین اضافی در پنجره فرکانسی فلیکر است که سبب می‌شود تا قانون جمع آثار برای دو سیگنال فلیکر صحت نداشته باشد.

از طرف دیگر زمانی که در یک شبکه قدرت چندین منبع فلیکر موجود باشد یافتن منبع فلیکر غالب از مهم‌ترین موضوعات می‌باشد. هر وقت مشکل فلیکر رخ دهد شرکت برق با شکایاتی از جانب مشترکین و حتی درخواست برای کاهش فلیکر روبرو خواهد شد. در نتیجه، شرکت برق بایستی منبع فلیکر غالب را به‌طور کامل و دقیق بیابد و مسئول ایجاد فلیکر را در شبکه شناسایی نماید. به‌علاوه مشترکین می‌خواهند از اینکه خود آن‌ها، منبع تولید فلیکر هستند اطمینان کامل داشته باشند. هرگونه چالش و ابهام در خصوص منشأ تولید فلیکر، فرآیند جبران‌سازی فلیکر را به تأخیر می‌اندازد. پس از آن که منبع فلیکر شناسایی شد امکان تعیین اینکه چه کسی (شرکت برق یا مشترکین) مسئول تولید فلیکر هستند، وجود خواهد داشت.

جهت بهبود روش‌های موجود در [۱۸ و ۱۹] در [۲۰] یک الگوریتم جدید بر پایه آشکارساز همدوس پیشنهاد شده است. اما روش‌های قبلی تنها یک مقدار برای توان فلیکر در نقطه مانیتورینگ ارائه می‌دهند. بنابراین، این روش‌ها فقط منبع فلیکر غالب و جهت فلیکر را شناسایی کرده و در شبکه‌های دارای چندین منبع فلیکر قادر به تعیین محل و سهم هر یک از منابع فلیکر موجود در شبکه قدرت نیستند. در [۲۱]، نواقص روش‌های قبلی برطرف گردیده ولی این روش نیز به‌دلیل اثر فیلتر IEC بر روی نوسانات فلیکر ولتاژ و جریان، در پاره‌ای اوقات، قادر به شناسایی منبع فلیکر در شبکه نمی‌باشد و ثانیاً هیچ اطلاعی از میزان اثر هر یک از منابع فلیکر بر مقدار فلیکر ولتاژ کل یک شینه خاص ارائه نمی‌دهد.

در این پژوهش، برای شناسایی تعداد و محل هر یک از منابع فلیکر موجود در شبکه قدرت، روش‌های قبلی شناسایی منابع فلیکر بهبود داده شده است؛ به‌گونه‌ای که روش جدید، قادر به ردیابی کامل

حال توان فلیکر به صورت زیر بیان می شود:

$$FP = \int_t^{t+T} m'_u(\tau) m'_i(\tau) d\tau \quad (3)$$

در آن T زمان انتگرال گیری است. علامت مثبت توان فلیکر FP نشان دهنده وجود منبع فلیکر در بالادست است و علامت منفی FP نشان می دهد که منبع فلیکری در پایین دست نقطه مانیتورینگ موجود است [۱۸ و ۱۹].

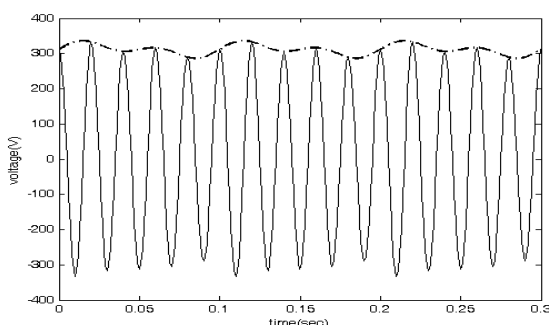
۳- مدل نمودن فلیکر

نوسانات ولتاژ (فلیکر) در اثر بارهای نوسانی سنگین ایجاد می شود. با توجه به مشخصات بار، رفتار آن می تواند متفاوت باشد. با وجود این، در یک دوره کوتاه، فلیکر ولتاژ را می توان توسط یک فرمول مدولاسیون دامنه تقریب زد [۲۲]. با فرض فوق، فلیکر ولتاژ را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$u(t) = \sqrt{2} [U_s + \sum_m U_m \sin(2\pi f_m t + \alpha_m)] \cdot \cos(2\pi f t + \alpha) + \sum_m \frac{U}{\sqrt{2}} \sin [2\pi(f - f_m)t + \alpha_m^-] + \sum_m \frac{U}{\sqrt{2}} \sin [2\pi(f + f_m)t + \alpha_m^+] \quad (4)$$

که در آن U_s مقدار متوسط مرجع سیگنال شبکه بدون فلیکر، f_m فرکانس شبکه، f_m فرکانس مؤلفه m فلیکر، U_m دامنه مؤلفه m فلیکر، α_m و α به ترتیب اختلاف فاز سیگنال اصلی و مؤلفه m فلیکر می باشند.

شکل موج ساده فلیکر و پوش مربوط به آن در شکل ۲ نشان داده شده است (شکل موج فلیکری دارای دو مؤلفه با دامنه ۱۰V و فرکانس های ۱۰ و ۲۰ هرتز می باشد و فرکانس شبکه ۵۰ هرتز است).



شکل ۲: شکل موج ساده فلیکر ولتاژ

۴- روش پیشنهادی

در شبکه هایی با چند منبع فلیکر، تشخیص منابع فلیکر، یکی از مهم ترین چالش ها می باشد. در روش های قبلی تنها منبع فلیکر غالب

هر یک از منابع فلیکر در شبکه می باشد و همچنین، روش فوق سهم هر یک از منابع فلیکر را در سطح کل فلیکر ولتاژ شینه ارزیابی می کند. تبدیل موجک برای استخراج چندین مؤلفه فرکانسی فلیکر به همراه دامنه و اختلاف فاز آن ها از سیگنال اصلی فلیکر مورد استفاده قرار گرفته است.

این روش قادر به محاسبه توان فلیکر هر یک از مؤلفه های فرکانسی به طور جداگانه خواهد بود که به کمک آن ها می توان محل دقیق منابع فلیکر را شناسایی نمود. علاوه بر شناسایی محل دقیق منابع فلیکر، روش پیشنهاد شده، مقدار دامنه فلیکر ولتاژ را به همراه اختلاف فاز به ازای فرکانس های مجزا تعیین می نماید که به کمک این روش قادر خواهیم بود اطلاع دقیقی از تأثیر هر یک از منابع بر فلیکر ولتاژ هر یک از باس بارها داشته باشیم.

۲- تئوری توان فلیکر

تئوری توان فلیکر بر دو اصل زیر استوار می باشد [۱۸]:

- یک منبع فلیکر سبب ایجاد تغییراتی در پوش سیگنال های ولتاژ و جریان (مدولاسیون دامنه) در نقطه مانیتورینگ می شود.
- اگر جهت شارش فلیکر به سمت بالادست باشد، تغییرات در ولتاژ و جریان هم فاز و اگر منبع فلیکر در پایین دست نقطه مانیتورینگ باشد، اختلاف فاز تغییرات ولتاژ و جریان ۱۸۰ درجه است.

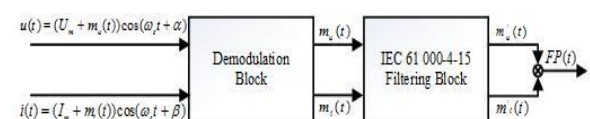
اگر سیگنال های ولتاژ و جریان مدولاسیون دامنه (AM) باشند می توان آن ها را به صورت زیر بیان نمود:

$$u(t) = (U_m + m_u(t)) \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (1)$$

$$i(t) = (I_m + m_i(t)) \cos(\omega_s t + \beta)$$

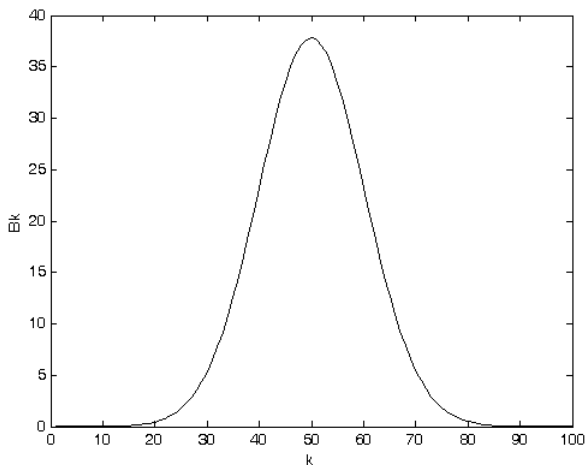
در معادلات فوق $U_m \cos(\omega_s t + \alpha)$ و $I_m \cos(\omega_s t + \beta)$ به ترتیب مؤلفه های اصلی سیگنال های حامل ولتاژ و جریان هستند. همچنین $m_u(t)$ و $m_i(t)$ مؤلفه های فلیکری ولتاژ و جریان (نوسانات فرکانس پایین) هستند که بعد از دمدولاسیون معادلات (۱) و حذف موج های اصلی، در دسترس خواهند بود. حال اگر فیلتر حساسیت موجود در استاندارد IEC 61 000-4-15 را مانند شکل ۱ بر روی $m_u(t)$ و $m_i(t)$ اعمال گردد نتیجه تولید مؤلفه های $m'_u(t)$ و $m'_i(t)$ می شود که از روی آن ها، توان فلیکر لحظه ای $FP(t)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$FP(t) = m'_u(t) \cdot m'_i(t) \quad (2)$$



شکل ۱: بلوک دیاگرام محاسبه توان فلیکر لحظه ای

نمود. B_k به دست آمده جهت نرمال سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با مقایسه این B_k و B_k فرکانس واقعی شبکه، مقدار دامنه فرکانس شبکه، به دست می آید.



شکل ۴: نمودار B_k بر حسب k برای تعیین فرکانس اصلی شبکه

۴-۱-۲- محاسبه اجزای فلیکر

بعد از این که فرکانس شبکه به دست آمد، اجزای فلیکر را می توان یک به یک محاسبه نمود. این عمل با کم کردن شکل موج سینوسی خالص با فرکانس شبکه از شکل موج اصلی به دست می آید. خروجی، تنها شامل اجزای مابین بیشترین و کمترین فرکانس ها خواهد بود که با محدوده زیر فرکانسی تداخل نخواهد داشت. گام بعدی جداسازی یک به یک اجزای فلیکر می باشد. WT را می توان دوباره جهت یکی از حدود فرکانسی بکار برد (برای مثال $(F_b + F_m)$). شبیه معادله ۱۰ مقدار ابتدا باید از رابطه (۱۲) محاسبه شود.

$$b_k = \frac{F_0}{f_b + kf_{if}} \quad (12)$$

که در آن f_{if} مقیاس فلیکر فرکانس بوده و در این مطالعه ۰/۱ هرتز در نظر گرفته شده است. این بدین معنی می باشد که k از ۱ تا ۳۵۰ به طور کامل، فلیکر فرکانسی از ۰/۵ تا ۳۵ هرتز را پوشش خواهد داد. بعد از آن که مقادیر مختلف b_k محاسبه شد، می توان معادله ۹ را جهت تفکیک یک به یک مؤلفه فلیکری سیگنال مدوله شده مورد نظر به کار برد. شکل ۵ مقادیر B_k بر اساس k را برای سیگنال شکل ۱ نشان می دهد. همان طور که انتظار می رفت ماکزیمم مقدار B_k در دونقطه با $k=100$ و $k=200$ به دست آمده است (فرکانس ۶۰ و ۷۰ هرتز) که این مقادیر متناظر با فرکانس فلیکری ۱۰ و ۲۰ هرتز می باشند. در گام بعدی، دامنه و زاویه فاز اجزای فلیکر بعد از دمدولاسیون همدوس، همانند فرکانس اصلی به دست خواهد آمد.

در اندازه گیری های سیگنال، غالباً فرکانس نمونه برداری و پنجره فرکانسی آن ثابت در نظر گرفته می شود. برای چنین سناریویی، $CWT(b, iT_s)$ می تواند عملاً با $CWT(b)$ تلقی گردد.

۴-۱-۱- محاسبات مشخصات سیگنال شبکه

محاسبه فرکانس شبکه به عنوان پیش نیازی در ارزیابی اجزای فرکانس فلیکر، مورد نیاز می باشد. برای هر فرکانس دلخواه از شبکه، ابتدا باید دامنه موجک، در اطراف فرکانس مورد نظر به وسیله جاروب نمودن محدوده فرکانسی ممکن، محاسبه شود. ماکزیمم مقدار ضریب موجک، مربوط به فرکانس مورد نظر خواهد بود. لذا برای هر فرکانس دلخواه، دامنه موجک مربوط به آن (B_k) را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$B_k = \frac{1}{T_{dw}} |CWT(b_k)| \quad (9)$$

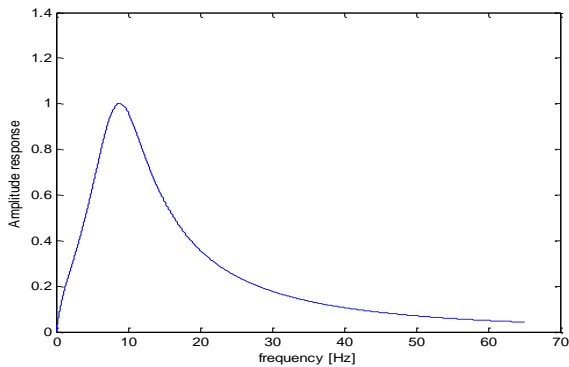
ابتدا باید عریض ترین رنج فرکانسی ممکن از فرکانس شبکه محاسبه گردد. سپس مقدار b_k از معادله ۱۰ برای مقادیر مختلف k به دست می آید که در آن k یک عدد صحیح می باشد که ماکزیمم مقدار آن برابر $\frac{(f_h - f_l)}{f_m}$ خواهد بود. f_l و f_h به ترتیب برابر بیشینه و کمینه مقدار فرکانس شبکه خواهند بود و f_m مقیاس فرکانسی می باشد. بر اساس تغییرات منظم فرکانس شبکه، $f_l = 49/5$ و $f_h = 50/5$ و $f_m = 0/1$ انتخاب شده است و تغییرات k از ۱ تا ۱۰۰ خواهد بود.

$$b_k = \frac{F_0}{f_l + kf_m} \quad (10)$$

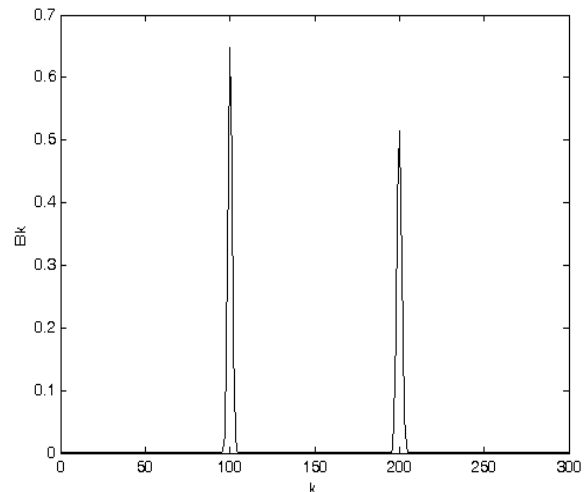
در ادامه با به دست آوردن مقادیر مختلف b_k ، می توان مقادیر CWT و B_k را از رابطه های (۸) و (۹) به دست آورد. بعد از محاسبه تمامی مقادیر B_k ها، برای ماکزیمم فرکانس f_b به دست آمده، همان فرکانس شبکه خواهد بود. شکل شماره ۴ مقادیر B_k را بر اساس k برای سیگنال شکل ۱ نشان می دهد. همان طور که انتظار می رفت ماکزیمم مقدار B_k به ازای $k=50$ (متناظر با فرکانس ۵۰ هرتز) بوده و مقدار B_k در هر دو طرف مقدار ماکزیمم، صفر خواهد شد. زمانی که تابع موجک مختلط انتخاب شود، زاویه فاز سیگنال شبکه را می توان از معادله زیر محاسبه نمود:

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Im}[CWT(b_{k(\text{max})})]}{\text{Re}[CWT(b_{k(\text{max})})]} \right) \quad (11)$$

برای محاسبه دامنه سیگنال شبکه، بایستی یک گام فراتر گذاشته و مقدار B_k را دوباره برای یک سیگنال مجازی به عنوان فرکانس شبکه با دامنه مشخص، به عنوان مثال $\sqrt{2} \cos(2\pi * f_b t + \alpha)$ محاسبه



شکل ۶- پاسخ فرکانسی فیلتر میان گذر



شکل ۵: مقدار B_k بر حسب k برای تعیین فرکانس مؤلفه‌های فلیکری

۳-۴- بلوک ۳A/۳B- توان‌های فلیکری مؤلفه‌های فرکانسی فلیکری

در بلوک ۳ توان‌های فلیکری برای تک‌تک فرکانس‌های فلیکری، توسط رابطه زیر به دست آمده است:

$$FP = \frac{1}{2} \sum_m U_m I_m \cos(\alpha_{mv} - \alpha_{mi}) \quad (14)$$

در رابطه فوق $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$ ($\frac{I_m}{\sqrt{2}}$) و α_{mv} (α_{mi}) دامنه‌ها و زاویه‌های

فاز فلیکر ولتاژ (جریان) می‌باشند.

توان فلیکری وزن داده شده (FPW) جهت شناسایی منبع فلیکری که بیش‌ترین اثر را بر روی سیستم بینایی انسان در نقطه مانیتورینگ می‌گذارد مورد استفاده قرار می‌گیرد و توان فلیکری اصلی (FPM) جهت شناسایی کلیه منابع فلیکری موجود در شبکه به کار می‌رود. از آنجایی که FPW توسط منحنی استاندارد IEC 61 000-4-15 وزن‌دهی می‌شود، ممکن است برای فرکانس‌هایی (مانند ۳۰ هرتز) مقدار توان آن قابل چشم‌پوشی باشد در حالی که آن فرکانس‌ها باعث ایجاد اختلال در عملکرد تجهیزات الکترونیکی شوند. از این‌رو FPM معیار مناسب‌تری جهت ردیابی منابع فلیکر در شبکه خواهد بود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی و تصدیق الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. شبکه مورد آزمایش، سیستم ۱۳ باسه IEEE می‌باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است. جهت ارزیابی الگوریتم فوق شبیه‌سازی‌ها در دو حالت انجام گرفته است:

- حالت اول زمانی که تنها یک منبع فلیکر در شینه ۶۳۳ داریم.
- حالت دوم زمانی که ۲ منبع فلیکر در شینه‌های ۶۳۳ و ۶۷۵ داریم. الگوریتم فوق در هر دو حالت پیاده‌سازی شده و نتایج در زیر آمده است:

۲-۴- بلوک‌های ۲A/۲B- فیلتر میان‌گذر

در بلوک‌های ۲A/۲B سیگنال‌های فرکانسی فلیکر بر اساس چگونگی پاسخ چشم انسان به فلیکر وزن‌دهی می‌شود. فیلتر میان‌گذر موجود در این بلوک‌ها، عیناً مشابه فیلتر میان‌گذر تعریف شده در استاندارد IEC 61 000-4-15 است. این استاندارد، منحنی حساسیت چشم انسان را به سیگنال فلیکر اعمال می‌نماید. تابع تبدیل فیلتر این استاندارد به صورت زیر می‌باشد:

$$F(s) = \frac{k \omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{(1 + \frac{s}{\omega_3})(1 + \frac{s}{\omega_4})} \quad (13)$$

پارامترهای رابطه (۱۳) برای لامپی با مقادیر نامی ۶۰ وات/۲۳۰ ولت در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ضرایب تابع انتقال رابطه فیلتر حساسیت استاندارد IEC 61 000-4-15

$k=1/748.02$	$\lambda=\pi^2 \times 4/0.5981$
$\omega_1 = \pi^2 \times 9/15494$	$\omega_2 = \pi^2 \times 1/22535$
$\omega_3 = \pi^2 \times 2/27979$	$\omega_4 = \pi^2 \times 2/9$

پاسخ فرکانسی این فیلتر در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود پیک منحنی در فرکانس ۸/۸ هرتز رخ می‌دهد. تضعیف فلیکر با منحنی حساسیت چشم انسان تطابق دارد.

به ردیابی منبع فلیکر در این نقطه نخواهند بود. با توجه به مقدار قابل چشم‌پوشی FPW در این نقطه می‌توان به این نکته پی برد که در نقطه فوق، اثری از فلیکر مؤثر بر چشم انسان وجود ندارد. حال آن‌که از روی مقدار FPM این مطلب اثبات می‌شود که ممکن است فلیکر در این نقطه بر چشم انسان اثر نگذارد ولی می‌تواند اثرات مخربی بر روی تجهیزات الکترونیکی داشته باشد.

حالت دوم - زمانی که در شبکه دو منبع فلیکر، یکی متصل به شینه ۶۳۳ و دیگری متصل به شینه ۶۷۵ باشد. نحوه شناسایی و نتایج شبیه‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

ابتدا الگوریتم را بایستی بر روی داده‌های نقاط مانیتورینگ a و b و c و d پیاده‌سازی نمود که نتایج به شرح جدول ۳ خواهد بود.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی در حالت دوم (در صورت وجود بیش از یک منبع فلیکر در شبکه)

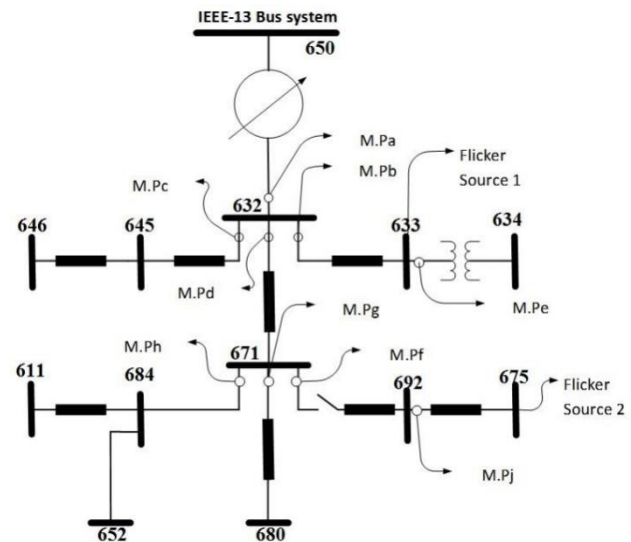
نقطه	نقطه	نقطه	نقطه	-
مانیتورینگ d	مانیتورینگ c	مانیتورینگ b	مانیتورینگ a	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	فرکانس (f1)
۰/۰۵۸۹	۰/۱۲۹۴	-۵/۴۲۸۲	-۵/۱۱۷۴	FPW-f1
۰/۰۶۴۶	۰/۱۳۹۸	-۵/۸۶۴۶	-۵/۵۲۸۸	FPM-f1
۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	فرکانس (f2)
-۰/۴۹۶۲	۰/۰۲۴۸	۰/۰۰۳۸	-۰/۷۵۴۹	FPW-f2
-۳/۸۴۹۸	۰/۱۹۲۱	۰/۰۲۹۷	-۵/۸۵۷۰	FPM-f2

همان‌گونه که از نتایج مشخص است در شبکه، دو منبع فلیکر با فرکانس‌های ۱۰ و ۲۰ هرتز وجود دارد که منبع فلیکری ۱۰ هرتز در پایین‌دست نقطه مانیتورینگ b و منبع فلیکری ۲۰ هرتز در پایین‌دست نقطه مانیتورینگ d قرار دارند. حال بایستی به سراغ نقاط مانیتورینگ e و f و g و h رفت که نتایج این نقاط مانیتورینگ نیز در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی در حالت دوم (در صورت وجود بیش از یک منبع فلیکر در شبکه)

نقطه	نقطه	نقطه	نقطه	
مانیتورینگ h	مانیتورینگ g	مانیتورینگ f	مانیتورینگ e	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	فرکانس (f1)
۰/۱۲۲۰	۰/۰۰۹۳	۰/۰۲۲۸	۰/۰۴۳۹	FPW-f1
۰/۱۳۱۸	۰/۰۱۰۰	۰/۰۲۴۶	۰/۰۴۷۴	FPM-f1
۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	فرکانس (f2)
۰/۰۸۰۵	۰/۰۰۶۵	-۰/۱۹۸۴	۰/۰۰۳۹	FPW-f2
۰/۶۲۴۹	۰/۰۵۰۸	-۱/۵۳۹۶	۰/۰۳۰۳	FPM-f2

از نتایج کاملاً مشخص است که منبع فلیکر ۱۰ هرتزی در شینه شماره ۶۳۳ و منبع فلیکر ۲۰ هرتزی در پایین‌دست نقطه f قرار دارد. حال بایستی نتایج نقطه مانیتورینگ z را تحلیل نمود.



شکل ۷: دیاگرام تک خطی شبکه ۱۳ باسه IEEE جهت ارزیابی روش پیشنهادی

حالت اول - زمانی که فقط یک منبع فلیکر در شینه شماره ۶۳۳ قرار داشته باشد. نتایج الگوریتم پیشنهادی در این مقاله و مقاله‌های [۱۹ و ۲۱] در جدول زیر آمده است:

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی در حالت اول (در صورت وجود تنها یک منبع فلیکر در شبکه)

روش‌ها	مانیتورینگ گ	مانیتورینگ a	مانیتورینگ b	مانیتورینگ c	مانیتورینگ d
مقاله [۱۹]	-۴/۰۸۰۶	-۴/۹۶۹۰	-۰/۱۰۲۱	۰/۰۵۸۹	
مقاله [۲۱]	-۴/۹۰۲۸	-۵/۵۰۴۴	-۰/۱۳۳۵	۰/۰۹۹۸	
پیشنهادی	Freq.	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
	FPW	-۴/۹۰۲۸	-۵/۵۰۴۴	-۰/۱۳۳۵	۰/۰۹۹۸
	FP M	-۵/۲۹۷۰	-۵/۹۴۶۸	-۰/۱۴۴۲	۰/۱۱۳۸

همان‌گونه که از نتایج نیز پیداست توان FPW به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی با توان‌های فلیکری به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های پیشنهادشده در مقاله‌های [۱۹ و ۲۱] تقریباً نتایج مشابهی دارند. همان‌گونه که از نتایج پیداست منبع فلیکری با فرکانس ۱۰ هرتز در پایین‌دست نقطه‌های مانیتورینگ a و b و در بالای‌دست نقطه‌های مانیتورینگ c و d قرار دارند. پس در این مرحله به نتیجه الگوریتم در نقطه e مراجعه می‌نماییم که برابر است با: $FPW=۰/۰۴۴۱$ و $FPM=۰/۰۴۷۶$ پس مشخص می‌گردد منبع فلیکر در بالای‌دست نقطه مانیتورینگ e قرار دارد. از روی نتایج می‌توان پی برد که منبع فلیکر به‌طور حتم متصل به شینه ۶۳۳ می‌باشد.

حال اگر فرکانس منبع فلیکر را به ۳۴ هرتز تغییر دهیم در نقطه مانیتورینگ z نتایج به‌صورت $FPW=۰/۰۰۰۳$ و $FPM=۰/۰۲۸۱$ خواهند بود. در ضمن الگوریتم‌های پیشنهادشده در مقاله‌های [۱۹ و ۲۱] قادر

جدول ۶: نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۴ باسه IEEE (در صورت وجود بیش از یک منبع فلیکر در شبکه)

نقطه	نقطه	نقطه	نقطه	
مانیتورینگ	مانیتورینگ	مانیتورینگ	مانیتورینگ	
a	b	c	d	
۷/۰۰۰۰	۷/۰۰۰۰	۷/۰۰۰۰	۷/۰۰۰۰	فرکانس (f_1)
-۴۱/۸۹۲۴	-۴/۲۰۹۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۱۷۴	FPW- f_1
-۵۲/۷۲۱۸	-۵/۲۶۷۸	۰/۰۰۷۵	۰/۰۵۲۵	FPM- f_1
۱۵/۰۰۰۰	۱۵/۰۰۰۰	۱۵/۰۰۰۰	۱۵/۰۰۰۰	فرکانس (f_2)
۶/۱۲۳×۴-۱۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۶	-۱/۱۱۱	FPW- f_2
۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۱۲	-۳/۳۵۴۵	FPM- f_2

با افزایش نقاط مانیتورینگ در شبکه ۳۴ باسه می‌توان به محل دقیق هر دو منبع فلیکر در شبکه پی برد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش جدیدی مبتنی بر تبدیل موجک و دمدولاسیون همدوس برای شناسایی منابع فلیکر در شبکه‌های قدرت پیشنهاد گردید. روش فوق علاوه بر اینکه قادر به شناسایی دقیق منابع فلیکر در شبکه می‌باشد می‌تواند مقدار تأثیر هر یک از منابع فلیکر را در شینه خاصی هم بر اساس استاندارد IEC 61 000-4-15 جهت تعیین میزان اثر آن‌ها بر سیستم بینایی انسان و هم به صورت مجزا جهت تعیین میزان تأثیرات آن‌ها بر روی تجهیزات الکترونیکی، کاملاً مشخص نماید. در روش فوق برای دمدولاسیون مؤلفه‌های فلیکری از سیگنال اصلی شبکه، از تبدیل موجک گوسی به همراه روش دمدولاسیون همدوس بهره گرفته شده است که به کمک آن‌ها قادر خواهیم بود تک تک مؤلفه‌های فرکانسی را استخراج کرده و تعداد و محل دقیق منابع تولیدکننده آن‌ها را در شبکه شناسایی نموده و میزان تأثیرات آن‌ها را بر روی سیستم تعیین کرد.

مراجع

- [1] M. Halpin, R. Cai and X. yang, "A review of Flicker Objectives Related to Complaints, Measurements, and Analysis techniques", 20th International Conference on electricity Distribution (CIRED 2009), Paper No 0755, Prague, June 2009.
- [2] S. Mendis, M. Bishop and J. Witte. "Investigations of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power Systems", IEEE Industry Applications Magazine, Jan./ Feb. 1996.
- [3] علیرضا حسنی اصل، مهدی معلم و محمد کیوان فرد، «بهبود عملکرد فیلترهای هارمونیک جبران کننده استاتیکی توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی با آنالیز حساسیت و استفاده از نتایج عملی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [4] Payman Moallema, Abalfazli Zargarib & Arash Kiyomarsi, "A practical framework for applying effects of various lamps on IEC flicker meter and evaluating results in a welding system", Electrical Power Components and

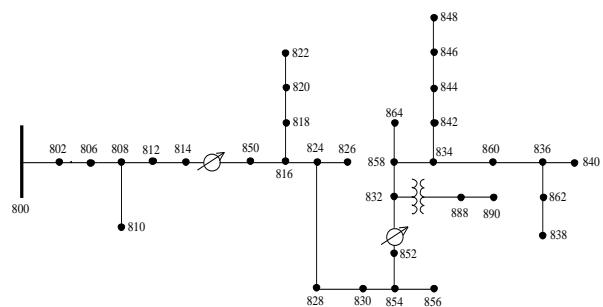
در نقطه z: $FPM_{20\text{HZ}} = -1/5415$ و $FPW_{20\text{HZ}} = -0/1987$
 پس نتیجه می‌گیریم منبع فلیکر ۲۰ هر تزی نیز متصل به شینه ۶۷۵ می‌باشد.

در جدول ۵ مقدار تأثیر منابع فلیکر در فلیکر ولتاژ شینه‌های شبکه به تفکیک هر شینه آمده است:

جدول ۵: میزان اثر هر یک از منابع فلیکر بر میزان فلیکر ولتاژ هر یک از شینه‌ها

شماره شینه	۶۵۰		۶۳۲	
مقادیر فلیکر	V.F-IEC		V.F-IEC	
ولتاژ	۱	۲	۱	۲
	۱/۰۱۹۱	۰/۴۴۹۸	۲/۱۶۹۲	۰/۹۴۳۹
شماره شینه	۶۳۳		۶۴۵	
مقادیر فلیکر	V.F-IEC		V.F-IEC	
ولتاژ	۱	۲	۱	۲
	۳/۱۶۲۸	۰/۹۴۱۵	۲/۱۱۴۹	۰/۹۱۹۶
شماره شینه	۶۷۱		۶۹۲	
مقادیر فلیکر	V.F-IEC		V.F-IEC	
ولتاژ	۱	۲	۱	۲
	۲/۲۰۸۶	۱/۷۵۳۶	۲/۲۲۲۴	۱/۷۶۹۶
شماره شینه	۶۸۴			
مقادیر فلیکر	V.F-IEC			
ولتاژ	۱	۲	شماره	مشخصات تابع فلیکر
	۲/۷۸۷۶	۲/۱۴۳۱	۲	Freq.
			۱	۱۰-HZ
			۲	۲۰-HZ

در خاتمه جهت ارزیابی دقیق‌تر روش پیشنهادشده، شبکه ۳۴ باسه IEEE (شکل ۸) شبیه‌سازی گردید و به ترتیب دو منبع فلیکر در شینه‌های ۸۴۲ و ۸۲۴ قرار داده شد و الگوریتم پیشنهادشده پیاده‌سازی گردید که نتیجه آن برای چندین نقطه مانیتورینگ (به عنوان نمونه) به صورت جدول ۶ می‌باشد.



شکل ۸: دیاگرام تک خطی شبکه 34 باسه IEEE جهت ارزیابی روش پیشنهادی

نقطه مانیتورینگ a در خط خروجی شینه ۸۳۴ به سمت شینه ۸۶۰ و نقطه مانیتورینگ b در خط خروجی شینه ۸۵۸ به سمت شینه ۸۳۴ نقطه مانیتورینگ c در خط خروجی شینه ۸۳۲ به سمت شینه ۸۸۸ نقطه مانیتورینگ d در خط خروجی شینه ۸۵۴ به سمت شینه ۸۳۰ قرار دارند.

- [17] A. Hernandez, J. Mayordomo, R. Asensi and L. Beites. "A method based on inter-harmonics for flicker propagation applied to arc furnaces". IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 20, pp. 2334-2342, July 2005.
- [18] P. G. V. Axelberg and M. H. J. Bollen, "An algorithm for determining the direction to a flicker source," IEEE Trans. on PWRD, vol. 21, No.2, pp. 755-760, Apr. 2006.
- [19] Peter G. V. Axelberg, Math H. J. Bollen, "Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power" IEEE Trans. On PWRD, vol. 23, No. 1, JANUARY 2008.
- [20] M. Poormonfaredazimi, H. Moghadam, A. Doroudi. "A Novel method to Trace Flicker Sources", 17th Electric Power Distribution Conference (PDC), 2008.
- [21] H. Moghadam Banayem, A. Doroudi & M. Poormonfared, "Flicker Source Tracing by Wavelet Transform", Electric Power Components and Systems, 2015, vol. 43 (4), pp. 412-421 Taylor & Francis
- [22] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks", Cambridge, MA: Wellesley-Cambridge, 1997.
- [23] Nicolae, I.-D. "Using Discrete Wavelet Transform to evaluate power quality at highly distorted three-phase systems", IEEE Conference on EPQU, Oct. 2011.
- [24] Jinfeng Ren, "Real-Time Power System Frequency and Phasor Estimation Using Recursive Wavelet Transform", IEEE Trans. On PWRD, vol. 26, No. 3, July 2011.
- [25] U. D. Dwivedi & S. N. Singh "A wavelet-based Denoising Technique for Improved Monitoring and Characterization of power Quality disturbances", Electrical Power Components and Systems Journal, vol. 37, Iss. 7, June 2009, p.p. 753-769.
- [26] S. Huang and C. Lu, "Enhancement of Digital Equivalent Voltage Flicker Measurement via Continuous Wavelet Transform", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 19, No. 2, 2004.
- [27] X. P. Zhang, Y. N. Peng, "Orthogonal complex filter banks and wavelets: some properties and design", IEEE Trans. on Signal processing, vol. 47, No.4, Apr. 1999, p.p. 1039-1048.
- [28] C. Torrence and G. P. Compo, "A Practical Guide to Wavelet Analysis," Bull. Amer. Meteor. Soc, vol. 79, pp. 61-78, 1998.
- Systems Journal, vol. 27, Iss. 7, Mar. 2011, p.p. 1047-1054.
- [5] Y. Yi Hong and J. Jie Wang, "Calculation of Voltage Fluctuation Caused by Intermittent Loads", Electrical Power Components and Systems Journal, vol. 35, Iss. 4, Mar. 2012, p.p. 421-429.
- [6] Å. Larsson. "Flicker Emission of Wind Turbines during Continuous Operation". IEEE Trans. on Energy Conversion. vol. 17, pp. 114-118, Mar. 2002.
- [7] J. Tande and K. Uhlen. "Wind Turbines in Weak Grids - Constraints and Solutions". 16th Int. Conf. on Electricity Distribution, CIRED 2001, June 2001.
- [8] IEC Flicker meter—Functional and Design Specifications, IEC Std. 61000-4-15.
- [۹] علی انشایی و رحمت‌الله هوشمند، «یک روش جدید برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان با استفاده از تبدیل S»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴.
- [10] Farhang G. Afshar, "Light Flicker factor as a Diagnostic Quantity for the Evaluation of Discharge Instabilities in HID Lamps", Electrical Power Components and Systems Journal, vol. 3, Iss. 1, July 2006, p.p. 35-50.
- [11] K. Srinivasan. "RMS fluctuations Attributable to a Single Customer" Power Quality Solutions, Sept. 1995.
- [12] A. Dan. "Identification of Flicker Sources", Int. Conf. On Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece, Oct. 1998.
- [13] B. Hughes, "Source Identification for Voltage Sag and Flicker". IEEE, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- [14] N. Egtedarpour and E. Farjah "Intelligent Identification of Flicker Source in Distribution System", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 4, Iss. 9, p. 1016-1027, 2010.
- [15] M. Simoes and S. Deckmann. "Flicker propagation and attenuation". Int. Conf. On Harmonics and Quality of Power. Oct. 1998.
- [16] D. Zhang, W. Xu and A. Nassif. "Flicker Source Identification by Interharmonic Power Direction". IEEE Canadian Conf. On Computer Engineering, May 2005.