

محاسبه آلودگی هارمونیک و میان‌هارمونیک ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه بادی با استفاده از یک روش ترکیبی

میلاذ دلالی^۱، کارشناسی ارشد، علیرضا جلیلیان^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران- dalali@elec.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری-دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران- jalilian@iust.ac.ir

چکیده: عملکرد ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه در شرایط نامساعد جوی، باعث تزریق مؤلفه‌های هارمونیک و میان‌هارمونیک به شبکه‌های قدرت می‌گردد. از آنجائیکه بازه فرکانسی این دو پدیده و تفکیک‌پذیری فرکانسی مورد نیاز برای این مؤلفه‌ها بسیار با هم متفاوت می‌باشد، در اکثریت موارد به‌طور مجزا مورد محاسبه قرار می‌گیرند. در این مقاله، یک روش ترکیبی برای اندازه‌گیری همزمان این مؤلفه‌ها ارائه می‌شود. برای این منظور در ابتدا با استفاده از یک فیلتر کالمن غیرخطی، پوش شکل‌موج ولتاژ و فرکانس اصلی آن تعیین شده، سپس مؤلفه‌های میان‌هارمونیک شکل‌موج توسط فیلتر کالمن خطی و هارمونیک‌های شکل‌موج، با تنظیم طول پنجره تبدیل فوریه، مورد محاسبه قرار می‌گیرند. مزیت اصلی این روش، امکان محاسبه همزمان مؤلفه‌ها، با دقت و حجم محاسباتی مناسب نسبت به استفاده مجزا از هر یک از دو روش تشکیل دهنده آن می‌باشد. در نهایت عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از شکل‌موج‌های ترکیبی و شکل‌موج‌های ولتاژ یک ژنراتور القائی دوسو تغذیه در یک شبکه ۳۴ شینه در کشور ایتالیا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از توانایی بالای روش پیشنهادی در تحلیل آلودگی هارمونیک و میان‌هارمونیک شبکه‌های قدرت، در حضور ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هارمونیک، طیف فرکانسی، فیلتر کالمن، تبدیل فوریه، انحراف فرکانس.

Calculation of Harmonic and Inter-Harmonic Pollution of Wind Doubly-Fed Induction Generators by a Hybrid Method

M. Dalali, A.R. Jalilian

Department of Electrical Engineering of Iran University of Science and Technology

Abstract: In bad weather condition, doubly-fed induction generators (DFIG) are injecting harmonic and inter-harmonic components into the power networks. Since frequency range and resolution needed for harmonic and inter-harmonic measurements are very different, measurement of these parameters are usually done separately. Therefore in this paper a hybrid method for simultaneous identifying of these components is presented. For this purpose, first the voltage envelope and real fundamental frequency of waveform are obtained by an extended kalman filter and then inter-harmonic and harmonic components are respectively calculated by a linear kalman filter and adjusted window DFT. The main advantage of this method is simultaneous measurement of harmonic and inter-harmonic components by a suitable accuracy and computational burden in compare to separated implementation of each of these methods. Finally, the performance of proposed method is evaluated by synthesized waveforms and the voltage waveforms of DFIG in a 34-bus Italy network. The results show that the proposed method is highly capable in analysis of harmonic and inter-harmonic pollution of power networks in presence of DFIGs.

Key Words: Harmonic Pollution, Frequency Spectrum, Kalman Filter, Fourier Transform, Frequency Deviation.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۰/۹/۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۱/۱۲/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- نارمک- دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

تکامل تولیدات پراکنده و تجدید ساختار در بازارهای برق، سبب افزایش نگرانی‌ها در خصوص مشکلات کیفیت توان (علی‌الخصوص هارمونیک‌ها و میان‌هارمونیک‌ها) در شبکه‌های قدرت شده‌است. در شبکه‌های قدرت، منابع مختلف آلودگی هارمونیکي و میان‌هارمونیکي یافت می‌گردند که از آن جمله می‌توان به بارهای غیرخطی و تولیدات پراکنده دارای مبدل اشاره کرد [۱-۳].

هارمونیک‌ها و میان‌هارمونیک‌ها می‌توانند سبب ایجاد مشکلاتی در شبکه‌های قدرت گردند، که از آن جمله می‌توان به گرم شدن بیش از حد هسته ماشین‌های گردان الکتریکی، نوسانات گذرا، فلیکر و اضافه بار شدن فیلترها اشاره کرد [۲]. به همین دلیل می‌بایست، سیگنال‌های شبکه‌های قدرت به دقت مورد پایش قرار گرفته و محتوای این مؤلفه‌ها مورد اندازه‌گیری دقیق قرار گیرند، تا در صورت لزوم اقدامات اصلاحی صورت پذیرفته و از این گونه اختلالات جلوگیری به عمل آید.

در میان روش‌های تحلیل طیف هارمونیکي و میان‌هارمونیکي، تبدیل فوریه سریع یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای پردازش سیگنال‌ها در حوزه کیفیت توان می‌باشد. بسیاری از اندازه‌گیرهای کاربردی در کیفیت توان و رله‌های دیجیتال از الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل فوریه سریع، برای اندازه‌گیری هارمونیک‌های موجود در شکل موج استفاده می‌نمایند. در این روش اگر شکل موج ایستا بوده و مؤلفه‌های فرکانسی موجود در آن مضربی از پنجره نمونه‌برداری باشند نتایج بدست آمده از این تحلیل دقیق خواهد بود. در غیر این صورت انرژی آن مؤلفه، در مجموعه طیف‌های نزدیک به هم پخش شده که با افزایش انحراف فرکانسی شبکه، خطای موجود در نتایج به حد غیر قابل قبولی خواهد رسید [۴].

امروزه استفاده از ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه نسبت به ژنراتورهای سرعت ثابت و ژنراتورهای سرعت متغیر سنکرون، در مزارع بادی به دلیل قابلیت‌های فنی و عملیاتی بالای آن‌ها رو به افزایش می‌باشد. از این مزایا می‌توان به عملکرد در فرکانس ثابت در سرعت متغیر، کاهش تولید مؤلفه‌های ایجادکننده فلیکر، قابلیت کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو، تلفات کم و هزینه پایین‌تر ادوات الکترونیک قدرت اشاره نمود [۵ و ۶]. این قابلیت‌های فوق‌العاده ژنراتورهای القائی دو سو تغذیه از طریق کنترل روتور توسط یک مبدل پشت به پشت ولتاژ به دست آمده که معمولاً با توانی در حدود ۳۰ تا ۳۵٪ توان نامی ژنراتور می‌تواند مزایای فوق را به ازای تغییرات ۲۵٪± سرعت نامی روتور در شرایط عادی شبکه فراهم آورد [۶ و ۵].

به همین دلیل نگرانی‌هایی پیرامون تأثیر عملکرد این مولدها بر روی کیفیت توان شبکه‌های قدرت، علی‌الخصوص در شرایط نامساعد جوی که ممکن است تغییرات سرعت روتور فراتر از

محدوده ۲۵٪± سرعت نامی آن باشد به وجود آمده، که با استفاده روزافزون از آن‌ها، شکل جدی‌تری به خود گرفته است. در این شرایط تغییرات سرعت روتور توسط مبدل ژنراتور به‌طور کامل خنثی نشده و نوسانات ناشی از آن در شکل موج خروجی ژنراتور ظاهر می‌گردد. به عبارت دیگر به دلیل ارتباط قوی بین پارامترهای الکتریکی و مکانیکی ژنراتورهای القائی که به سبب لغزش ایجاد می‌گردد، نوسانات سرعت روتور به خروجی ژنراتور منتقل شده که به صورت مؤلفه‌های هارمونیکي و میان‌هارمونیکي ایجادکننده فلیکر در توان الکتریکی ژنراتور مشاهده می‌گردند [۷].

از طرف دیگر، به دلیل نصب توربین‌های بادی مدرن در شبکه‌های توزیع ضعیف با نسبت X/R کوچک، وظایف جدیدی برای این ژنراتورها تعریف می‌گردد که از آن جمله می‌توان به تنظیم فرکانس و ولتاژ شبکه، عملکرد جزیره‌ای، هم‌چنین عملکرد غیر منقطع در شرایط غیر ایده‌آل ولتاژ شبکه (مانند کاهش دینامیکی ولتاژ و نامتعادلی ولتاژ) اشاره نمود [۶]. به تبع این ژنراتورها در چنین شرایط جوی امکان فراهم نمودن وظایف جدید خود به ویژه تنظیم ولتاژ و فرکانس شبکه را نداشته و امکان ایجاد انحراف فرکانس در مؤلفه اصلی شبکه نیز دور از واقعیت نخواهد بود. به طور خلاصه، مهم‌ترین مسئله در شرایط فوق، تزریق مؤلفه‌های هارمونیکي و میان‌هارمونیکي ایجاد شده توسط این مولدها به شبکه بوده که می‌تواند با انحراف فرکانس اصلی از مقدار نامی نیز همراه باشد. در چنین شرایطی اگر از روش‌های مرسوم (مانند تبدیل فوریه مجزا) برای تحلیل طیف هارمونیکي و میان‌هارمونیکي سیگنال‌ها استفاده گردد، خطای محاسباتی به دلیل نشتی طیف ایجاد شده در این روش‌ها بسیار بالا خواهد بود.

البته در مراجع مختلف، علاوه بر استفاده از تبدیل فوریه، روش‌های دیگری نیز بکار گرفته شده‌اند. در مرجع [۲] با استفاده از ضرب شکل موج در دو مؤلفه کمکی عمود برهم و انتگرال‌گیری در حوزه زمان، محاسبه این مؤلفه‌ها به انجام رسیده است. این روش با وجود سادگی در اجرا، در شرایط انحراف فرکانس پایه، جواب‌های غیر دقیقی را ارائه می‌دهد. در مرجع [۸] با وزن‌دهی به گروه‌های هارمونیکي و میان‌هارمونیکي، دامنه و فرکانس واقعی هر یک از مؤلفه‌ها بدست آمده است. اما در صورت وجود مؤلفه‌های میان‌هارمونیکي مجاور، این روش نیز دچار خطای نشتی بالائی می‌گردد. در مرجع [۹] از شبکه‌های عصبی برای این منظور استفاده شده است، که این روش‌ها نیز از دقت محاسباتی بالائی برخوردار نمی‌باشند. استفاده از تبدیل موجک پیوسته برای دستیابی مستقیم به مؤلفه‌های هارمونیکي و میان‌هارمونیکي نیز در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده، که با وجود برخورداری از دقت مناسب، دارای حجم محاسباتی سنگینی می‌باشد.

اصولاً به دلیل فرکانس نمونه‌برداری، بازه و تفکیک‌پذیری فرکانسی متفاوت مورد نیاز برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های هارمونیکي و

۲- مدل دینامیکی ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه

نمایش کلی مدل یک ژنراتور القائی دوسو تغذیه که با سرعت زاویه‌ای ω در یک مرجع دلخواه می‌چرخد در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۱) و با فرض انتخاب محور d قاب مرجع بر روی شار چرخان استاتور، شار استاتور (Ψ_s) و رتور (Ψ_r) و هم چنین ولتاژهای استاتور (V_s) و رتور (V_r) به ترتیب توسط روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند [۵].

$$\psi_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (1)$$

$$\psi_r = L_r I_r + L_m I_s \quad (2)$$

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \quad (3)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r \quad (4)$$

با محاسبه جریان استاتور و شار رتور بر حسب شار استاتور و جریان رتور (از روابط (۱) و (۲)) و هم چنین ثابت در نظر گرفتن شار استاتور (به دلیل ثابت بودن ولتاژ آن) می‌توان معادله ولتاژ رتور را به صورت رابطه (۵) ساده نمود [۵].

$$V_r = R_r I_r + \sigma L_r \frac{dI_r}{dt} + j\omega_{slip} (\sigma L_r I_r + \frac{L_m}{L_s} \psi_s) \quad (5)$$

که در آن $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ ضریب نشتی و ω_{slip} سرعت زاویه‌ای لغزش می‌باشند. با انتقال ولتاژ رتور در قاب مرجع dq و انجام پاره‌ای محاسبات، توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی استاتور به صورت زیر محاسبه می‌گردند [۵].

$$P_s = 1.5 \frac{\omega_s}{L_s} \psi_s L_m I_{rq} \quad (6)$$

$$Q_s = -1.5 \frac{\omega_s}{L_s} \psi_s (\psi_s - L_m I_{rd})$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان دریافت که با تنظیم جریان‌های محور q (I_{rq}) و d (I_{rd}) رتور می‌توان، توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور را به‌طور مستقل کنترل نمود. برای این منظور طبق رابطه (۷) با تعریف متغیرهای کمکی (U_{rq}, U_{rd}) جریان‌های محور d و q رتور با مقادیر مرجع (متغیرهای ستاره‌دار) مقایسه می‌گردند [۵].

$$U_{rd} = k_{pl} (I_{rd}^* - I_{rd}) + k_{il} \int (I_{rd}^* - I_{rd}) dt \quad (7)$$

$$U_{rq} = k_{pl} (I_{rq}^* - I_{rq}) + k_{il} \int (I_{rq}^* - I_{rq}) dt$$

که در این روابط k_{pl} و k_{il} به ترتیب بهره‌های تناسبی و انتگرال‌گیر کنترل‌کننده می‌باشند. در نهایت ولتاژهای کنترلی مورد نیاز رتور در قاب مرجع سنکرون به‌صورت رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \sigma L_r \begin{bmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} - \sigma L_r [A] \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} - \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ -\psi_{sd} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن ماتریس مربعی A به صورت زیر تعریف شده است:

$$[A] = \begin{bmatrix} -R_r / \sigma L_r & -\omega_{slip} \\ -\omega_{slip} & -R_r / \sigma L_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

میان هارمونیک، اندازه‌گیری آن‌ها به صورت مجزا توسط روش‌های مختلف صورت می‌پذیرد اما در این مقاله به دلیل ایجاد همزمان این مؤلفه‌ها توسط ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه می‌بایست اندازه‌گیری این مؤلفه‌ها به صورت هم زمان توسط یک روش صورت پذیرد. به همین منظور، یک روش ترکیبی برای شناسایی همزمان این مؤلفه‌ها ارائه شده است. در این روش در گام اول با استفاده از دو فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر مؤلفه اصلی و میان هارمونیک‌های مجاور آن از مؤلفه‌های هارمونیک جدا شده‌اند، بطوریکه خروجی فیلتر پایین‌گذر حاوی مؤلفه اصلی و میان هارمونیک‌ها و خروجی فیلتر بالاگذر مؤلفه‌های هارمونیک می‌باشد. در ادامه با استفاده از یک فیلتر کالمن غیرخطی، فرکانس اصلی و پوش شکل موج خروجی فیلتر پایین‌گذر بدست آمده‌است. سپس با استفاده از پوش حاصله، مؤلفه اصلی و میان هارمونیک‌های مجاور آن توسط یک فیلتر کالمن خطی مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، با تنظیم طول پنجره تبدیل فوری مطابق با فرکانس اصلی سیگنال که توسط فیلتر کالمن غیرخطی تعیین شده است، هارمونیک‌های موجود در شکل موج خروجی فیلتر بالاگذر اندازه‌گیری شده‌اند.

مزایای روش پیشنهادی عبارتند از: ۱- محاسبه همزمان مؤلفه‌های هارمونیک و میان هارمونیک. ۲- دقت بالا در محاسبه مؤلفه اصلی و میان هارمونیک‌ها در شرایط غیر ایستا و انحراف فرکانس اصلی، به دلیل استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی. ۳- امکان کاهش فرکانس نمونه‌برداری و در نتیجه حجم محاسبات به دلیل محاسبه مؤلفه‌های میان هارمونیک از پوش شکل موج به جای محاسبه مستقیم آن‌ها. ۴- استفاده از تحلیل فوری به پنجره تطبیقی برای اندازه‌گیری هارمونیک‌ها که علاوه بر کاهش حجم محاسبات، دقت آن نیز در شرایط انحراف فرکانسی، به دلیل تعیین طول پنجره متناسب با فرکانس اصلی شکل موج (که توسط فیلتر کالمن غیرخطی تعیین می‌گردد) افزایش یافته است. البته سه مزیت آخر به دلیل استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی (و نحوه تعریف متغیرهای حالت آن) به جای استفاده تنها از فیلتر کالمن خطی حاصل شده‌است.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم مدل دینامیکی ژنراتور القائی دوسو تغذیه معرفی شده است. در بخش سوم کلیاتی در باره محتوای فرکانسی مؤلفه‌های میان هارمونیک حول فرکانس اصلی ارائه شده است. در بخش چهارم، روش پیشنهادی معرفی شده و در بخش پنجم تنظیمات مورد نیاز برای بهره‌گیری از آن ارائه شده است. در بخش ششم، در ابتدا با استفاده از یک طیف فرکانسی جامع و در شرایط مختلف شبکه، روش پیشنهادی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس محتوای فرکانسی شکل موج ولتاژ یک ژنراتور القائی دو سو تغذیه در یک شبکه واقعی در کشور ایتالیا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در نهایت در بخش هفتم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

شکل موج) و هم چنین کاهش فرکانس نمونه برداری مورد نیاز و در نتیجه حجم محاسباتی روش می شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۴- تشریح روش پیشنهادی

همانطور که اشاره گردید روش ارائه شده در این مقاله یک روش ترکیبی مبتنی بر فیلتر کالمن و تبدیل فوریه مجزا می باشد که امکان تحلیل هم زمان مؤلفه های هارمونیکي و میان هارمونیکي را با تفکیک پذیری فرکانسی مورد نیاز هر یک فراهم می آورد. برای این منظور در ابتدا شکل موج اصلی از دو فیلتر پایین گذر و بالا گذر چپشفت نوع دوم عبور داده شده تا به ترتیب مؤلفه اصلی و میان هارمونیک های مجاور آن از مؤلفه های هارمونیکي جدا شده و امکان تحلیل مجزای آن ها فراهم گردد. این فیلتر دارای مشخصه نسبتاً تیزی در ناحیه قطع خود بوده و شیب منفی آن در مقایسه با فیلترهای باترورث که معمولاً برای تحلیل طیف میان هارمونیکي استفاده می شوند بیشتر می باشد. لذا این فیلتر با حذف مؤلفه های موجود در بیرون از فرکانس قطع می تواند از تاثیر متقابل مؤلفه های هارمونیکي و میان هارمونیکي در محاسبات یکدیگر جلوگیری نماید [۱۲].

در ادامه از یک مجموعه فیلتر کالمن برای تحلیل طیف میان هارمونیکي و از روش تبدیل فوریه با پنجره تطبیقی برای تحلیل طیف هارمونیکي استفاده می شود. هر یک از دو بخش روش پیشنهادی شامل روابط و الگوریتم های خاص خود بوده که به طور مجزا مورد بررسی قرار می گیرند.

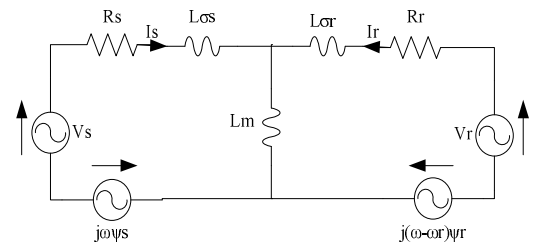
فیلترهای کالمن برای تخمین متغیرهای حالت ($x \in R^N$) در یک فرایند گسسته و کنترل شده زمانی استفاده می شود که با یک معادله خطی و تفاضلی به صورت زیر قابل نمایش می باشند:

$$x_k = A x_{k-1} + B u_{k-1} + w_{k-1} \quad (14)$$

در این روش کمیت مورد اندازه گیری ($z \in R^m$) به صورت زیر بدست می آید:

$$z_k = H x_k + v_k \quad (15)$$

در روابط فوق متغیر (w_k) نشان دهنده نویز فرایند و متغیر تصادفی (v_k) نشان دهنده نویز اندازه گیری می باشند [۱۳]. این نویزها مستقل از هم، سفید و با توزیع احتمالاتی نرمال فرض شده اند. هر چند هنگامی که فرایند مورد تخمین یا تناسب اندازه گیری مرتبط با آن غیرخطی باشد از فیلتر کالمن غیرخطی استفاده می شود. از این رو به فیلتر کالمنی که فرایند را حول میانگین و کوواریانس موجود خطی می سازد، فیلتر کالمن غیرخطی اطلاق می گردد [۱۴]. همان طور که در قسمت قبل اشاره شد، سیگنال ارائه شده توسط رابطه (۱۰) به صورت یک شکل موج سینوسی با دامنه متغیر با زمان $A(t)$ نیز قابل مدل سازی می باشد (رابطه (۱۱)). به عبارت دیگر می توان نشان داد:



شکل (۱): مدار معادل ژنراتور القایی دوسو تغذیه [۵].

۳- مطالعه اجمالی بر فلیکر ایجاد شده توسط میان هارمونیک های حول فرکانس اصلی

از دید ریاضی، دو عامل عمده در ایجاد فلیکر در شبکه های قدرت وجود دارد. ۱- مؤلفه های میان هارمونیکي اضافه شده به ولتاژ شبکه و ۲- مدولاسیون ولتاژ شبکه، به دلیل نوسانات ولتاژ. در شرایط خاصی می توان این دو ناهنجاری ولتاژ را از لحاظ ریاضی معادل دانست. برای درک بهتر این موضوع، سیگنال $v(t)$ ، به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می شود. این سیگنال حاوی مؤلفه اصلی و یک فرکانس میان هارمونیکي می باشد. در این رابطه V_0 و ω_0 دامنه و فرکانس مؤلفه اصلی و V_1 و $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$ دامنه و فرکانس مؤلفه میان هارمونیکي می باشند.

$$v(t) = V_0 \sin(\omega_0 t) + V_1 \sin(\omega_1 t) \quad (10)$$

با انجام عملیات ریاضی بر روی رابطه (۱۰) می توان آن را به صورت رابطه (۱۱) تغییر داد [۱۱].

$$v(t) = A(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (11)$$

که در آن

$$A = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + 2V_0 V_1 \cos(\Delta\omega t)} \quad (12)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{V_1 \sin(\Delta\omega t)}{V_0 + V_1 \cos(\Delta\omega t)}$$

حال اگر $V_1 \ll V_0$ باشد (که در عمل نیز چنین می باشد) می توان با صرف نظر کردن از V_1^2 و با در نظر گرفتن $V_1/V_0 \ll 1$ ، رابطه (۱۲) را به صورت زیر ساده نمود [۱۱]:

$$A(t) = V_0 + V_1 \cos(\Delta\omega t) \quad (13)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{V_1}{V_0} \sin(\Delta\omega t) - 0.5 \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 \sin(2\Delta\omega t) \cong 0$$

با توجه به روابط فوق، رفتار این نوع خاص از جمع آثار، مشابه با مدولاسیون دامنه سیگنال، با فرکانسی برابر با تفاوت فرکانسی دو مؤلفه ($\Delta\omega$) می باشد [۱۱]. بنابراین می توان به جای اندازه گیری مستقیم طیف میان هارمونیک ها، از اندازه گیری دامنه مؤلفه های موجود در پوش مؤلفه اصلی برای تحلیل طیفی استفاده نمود. از این ایده در روش پیشنهادی برای تحلیل طیف مؤلفه های میان هارمونیکي استفاده شده که مزیت اصلی آن از بین رفتن حساسیت روش نسبت به تغییرات فرکانس مؤلفه اصلی (به دلیل حذف و یا به عبارت دیگر صفر شدن فرکانس مؤلفه اصلی در پوش

بدین ترتیب فیلتر کالمن غیرخطی با استفاده از ماتریس خطی شده انتقال حالت (A) و بردار خطی شده اندازه‌گیری (H) تشکیل می‌یابد. با استفاده از مقادیر محاسبه شده متغیرهای حالت برای فیلتر کالمن غیرخطی، پوش شکل موج خروجی فیلتر پایین‌گذر و تغییرات فرکانس اصلی بدست خواهند آمد. پوش شکل موج با استفاده از متغیرهای حالت x_1 و x_2 به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$(20)$$

$$A(t) = \sqrt{\hat{x}_1(t)^2 + \hat{x}_2(t)^2}$$

بعد از فیلتر کالمن غیرخطی، نوبت به فیلتر کالمن خطی می‌رسد، به طوری که تجزیه طیفی شکل موج ولتاژ با استفاده از این فیلتر به انجام خواهد رسید. ورودی این فیلتر پوش شکل موج خروجی فیلتر پایین‌گذر بوده که از خروجی فیلتر کالمن غیرخطی بدست می‌آید و حاوی تمامی مؤلفه‌های فرکانسی میان هارمونیک حول فرکانس اصلی می‌باشد. با تجزیه طیفی پوش این شکل موج توسط فیلتر کالمن خطی، دامنه‌های طیفی در فرکانس‌های مختلف (f_i) بدست می‌آیند. به‌طور مشابه بسط هر یک از این نوسانات سینوسی با فرکانس f_i نیز به‌صورت رابطه (۱۶) قابل نمایش بوده، که حاوی مؤلفه‌های با ۹۰ درجه اختلاف فاز و هم‌فاز با شکل موج سینوسی می‌باشد. این مؤلفه‌ها به عنوان متغیرهای حالت متناظر با این نوسانات در مدل فیلتر کالمن خطی تعیین می‌گردند. در رابطه (۲۱) متغیرهای حالت به صورت x_1 : مؤلفه هم‌فاز با نوسان سینوسی ($\Delta V/2 \cos(\varphi_i)$) و x_2 : مؤلفه با ۹۰ درجه اختلاف فاز با نوسان سینوسی ($\Delta V/2 \sin(\varphi_i)$) تعریف شده‌اند.

$$\frac{\Delta V_i}{2} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) =$$

$$(21)$$

$$\frac{\Delta V_i}{2} (\cos(2\pi f_i t) \cos(\varphi_i) - \sin(2\pi f_i t) \sin(\varphi_i))$$

بردار حالت فیلتر کالمن خطی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\bar{x}_k = [x_{1,1} \ x_{2,1} \ x_{1,2} \ x_{2,2} \ \dots \ x_{1,i} \ x_{2,i}]_k^T \quad (22)$$

که در آن بالانویس (T) معرف ترانسپوز بردار داخل پرانتز بوده و $x_{1,i}$ و $x_{2,i}$ به ترتیب مؤلفه‌های هم‌فاز و با ۹۰ درجه اختلاف فاز با شکل موج سینوسی در فرکانس (f_i) می‌باشند. بدین ترتیب معادله انتقال حالت برای مدل 2^*i حالتی فیلتر کالمن به صورت رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$\bar{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{2i \times 2i} \bar{x}_k + \bar{w}_k \quad (23)$$

$$v(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) = A(t) (\cos(2\pi f_0 t) \cos(\varphi_0) - \sin(2\pi f_0 t) \sin(\varphi_0)) \quad (16)$$

برای بدست آوردن تجزیه طیفی سیگنال خروجی فیلتر پایین‌گذر، $v(t)$ باید پوش سیگنال $(A(t))$ ، با استفاده از یک فیلتر کالمن غیرخطی بدست آید. برای این منظور فرض شده که $A(t)$ حاوی N مؤلفه فرکانسی بوده که میان هارمونیک‌هایی را حول فرکانس اصلی پدید می‌آورند. از آنجائیکه فرکانس اصلی مشاهده شده در شبکه‌های قدرت عملاً ثابت نمی‌باشد می‌توان آن را به عنوان یک متغیر حالت در نظر گرفت. از این رو متغیرهای حالت برای فیلتر کالمن غیرخطی، به صورت زیر تعیین می‌گردند: x_1 : مؤلفه هم‌فاز با سیگنال $(A(t) \cos(\varphi_0))$ ، x_2 : مؤلفه با اختلاف فاز ۹۰ درجه با سیگنال $(-A(t) \sin(\varphi_0))$ و x_3 : فرکانس اصلی سیگنال (f_0).

از آنجائی که سیگنال ولتاژ یک تابع غیر خطی از فرکانس می‌باشد، معادلات اندازه‌گیری و انتقال حالت نیز تابع غیر خطی از x_3 در نظر گرفته شده‌اند. مطابق با رابطه (۱۷) معادله غیر خطی انتقال حالت به صورت زیر قابل نمایش می‌باشد [۱۴]:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(k) \cos(2\pi x_3 k \Delta t) - x_2(k) \sin(2\pi x_3 k \Delta t) \\ x_1(k) \sin(2\pi x_3 k \Delta t) + x_2(k) \cos(2\pi x_3 k \Delta t) \\ x_3(k) \end{bmatrix}$$

$$(17)$$

با انجام پاره‌ای عملیات ریاضی، ماتریس خطی شده انتقال حالت و بردار خطی شده مقادیر اندازه‌گیری، به صورت زیر تعیین می‌شوند [۱۴]:

$$A = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) & -\sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \\ \sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) & \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 2\pi \Delta t \left(-\hat{x}_1^- \sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) - \hat{x}_2^- \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \right) \\ 2\pi \Delta t \left(\hat{x}_1^- \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) - \hat{x}_2^- \sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$H = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) & \sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$2\pi \Delta t \left(-\hat{x}_1^- \sin(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) + \hat{x}_2^- \cos(2\pi \hat{x}_3^- \Delta t) \right)$$

که در روابط فوق \hat{x}_i^- مقدار اولیه متغیر حالت نام می‌باشد. با دقت در روابط (۱۸) و (۱۹) می‌توان دریافت که در فیلتر کالمن غیرخطی آرایه‌های دو ماتریس A و H ثابت نبوده و در هر مرحله با استفاده از متغیرهای حالت قبلی بدست می‌آیند.

متغیرهای حالت $x_{1,i}$ و $x_{2,i}$ نشان دهنده مؤلفه‌های هم‌فاز و با ۹۰ درجه اختلاف فاز در فازور ولتاژ (f_i) بوده، که بردار اندازه‌گیری متناظر آن‌ها (H) مطابق با رابطه زیر است [۱۴]:

$$H = [\cos(2\pi f_1 t) - \sin(2\pi f_1 t) \dots \cos(2\pi f_i t) - \sin(2\pi f_i t)]$$

دامنه طیفی در هر یک از فرکانس‌های f_i با استفاده از متغیرهای حالت $x_{2,i}$ و $x_{1,i}$ در هر پنجره داده محاسبه خواهد شد. مقدار این دامنه مطابق با رابطه زیر است:

$$\frac{\Delta V_i}{2} = \sqrt{\hat{x}_{1,i}(t)^2 + \hat{x}_{2,i}(t)^2}$$

پس از تعیین مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن، می‌بایست مؤلفه‌های هارمونیک‌ها که خروجی فیلتر بالاگذر می‌باشند نیز محاسبه گردند. عموماً در شبکه‌های واقعی دامنه این مؤلفه‌ها نسبت به دامنه مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن کوچکتر بوده، به طوری که با افزایش فاصله از فرکانس اصلی، دامنه و تعداد آنها کاهش چشمگیری به خود می‌گیرد. از این رو استفاده از ترکیب فیلتر کالمن ارائه شده، برای تعیین هارمونیک‌های شکل‌موج به صرفه نبوده و حجم محاسباتی بالایی را طلب می‌نماید.

به عبارت دقیق‌تر برای استفاده از این روش در اندازه‌گیری مؤلفه‌های هارمونیک می‌بایست در ابتدا هر یک از گروه‌های هارمونیک مطابق با تعریف استاندارد IEC 61000-4-7 [۱۵] توسط فیلترهای میان‌گذر چبیشف از یکدیگر مجزا شده سپس برای هر یک از گروه‌ها سه متغیر حالت در فیلتر کالمن غیرخطی برای بدست آوردن پوش شکل‌موج و فرکانس مرکزی طیف هر گروه در نظر گرفته شود. به ازای هر مؤلفه‌ی فرکانسی موجود در هر یک از گروه‌ها نیز، دو متغیر حالت در فیلتر کالمن خطی تعریف می‌گردد. به عنوان مثال اگر تفکیک‌پذیری فرکانسی برابر با $\Delta f = 50 \text{ Hz}$ در نظر گرفته شده و تعداد گروه‌های هارمونیک برابر با $n = 15$ انتخاب گردد، تعداد متغیرهای حالت برابر با ۷۵ متغیر خواهد بود و اگر تفکیک‌پذیری فرکانسی مطابق استاندارد IEC برابر با $\Delta f = 5 \text{ Hz}$ در نظر گرفته شود تعداد متغیرهای حالت به ۲۲۵ متغیر خواهد رسید که نیازمند حجم محاسباتی بالایی را طلب است. برای حل این مشکل می‌توان از روش تبدیل فوریه مجزا برای محاسبه مؤلفه‌های هارمونیک استفاده نمود. اما همانطور که قبلاً نیز ذکر گردید، اگر طول پنجره نمونه‌برداری این روش با مؤلفه‌های موجود در شکل‌موج تطابق نداشته باشد، این روش دچار نشتی طیف شده و نتایج با خطای بالایی محاسبه می‌گردند. از این‌رو در ابتدا می‌بایست، طول پنجره نمونه‌برداری مطابق با مؤلفه‌های موجود در آن تعیین گردد [۱۶]. برای این منظور، در این مقاله از فرکانس اصلی بدست آمده از فیلتر کالمن غیرخطی، برای تنظیم طول پنجره نمونه‌برداری استفاده می‌شود. مطابق با رابطه (۲۶)، با تقسیم

فرکانس نمونه برداری (f_s) بر فرکانس اصلی بدست آمده از فیلتر کالمن غیرخطی (f)، تعداد نمونه‌ها (N) در هر تناوب تعیین می‌شود که در صورت اعشاری بودن آن، با ساده‌سازی نسبت حاصله به صورت دو عدد (p_1 و p_2)، طول پنجره در کوچک‌ترین عددی (p_2) که آن را به یک عدد صحیح تبدیل می‌کند ضرب می‌گردد. از این تعداد نمونه (N_i)، به عنوان طول پنجره در محاسبات تبدیل فوریه استفاده می‌گردد. بدین ترتیب از ایجاد نشتی طیف در اندازه‌گیری هارمونیک‌ها جلوگیری شده و یا میزان آن تا حد زیادی تقلیل خواهد یافت.

$$N = \frac{f_s}{f} = \frac{p_1}{p_2} \quad (26)$$

$$N_i = p_2 N$$

به طور خلاصه الگوریتم استفاده شده در این مقاله به صورت زیر است: در ابتدا با استفاده از دو فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر چبیشف نوع دوم، مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن از مؤلفه‌های هارمونیک موجود در شکل‌موج جدا شده تا از ایجاد خطا در عملکرد فیلتر کالمن غیرخطی جلوگیری به عمل آید. سپس با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی، پوش شکل‌موج فیلتر پایین‌گذر و فرکانس اصلی آن به دست می‌آیند. در ادامه مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن، با اعمال یک فیلتر کالمن خطی بر پوش بدست‌آمده از فیلتر کالمن غیرخطی محاسبه می‌گردند. هم‌چنین با استفاده از مقدار بدست آمده برای فرکانس اصلی توسط فیلتر کالمن غیرخطی پنجره تبدیل فوریه متناسب با فرکانس اصلی (و هارمونیک‌های) شکل‌موج تنظیم شده و با اعمال تبدیل فوریه مجزا با پنجره تطبیقی بر خروجی فیلتر بالاگذر مؤلفه‌های هارمونیک شکل‌موج نیز تعیین می‌گردند. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. از روش پیشنهادی می‌توان برای اندازه‌گیری همزمان هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های ایجاد کننده فلیکر نیز استفاده نمود [۱۷].

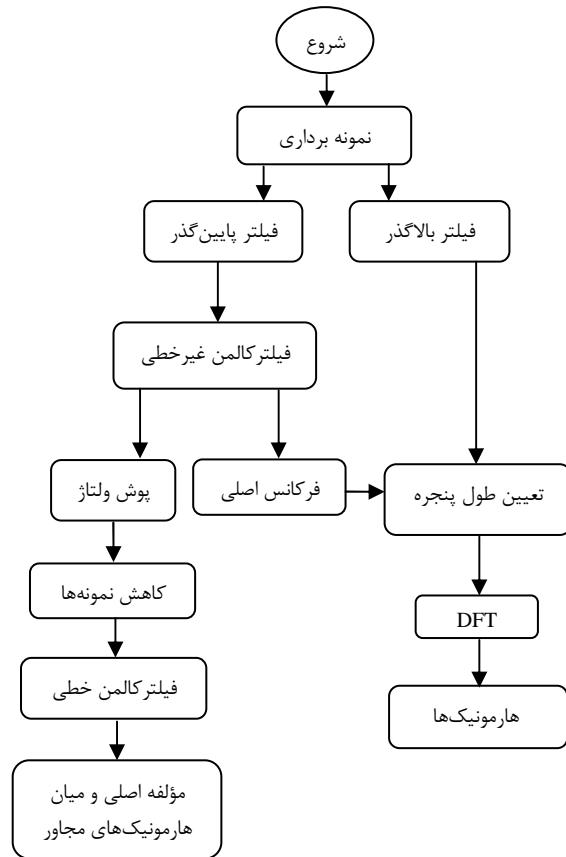
انحراف فرکانس در مؤلفه اصلی تعداد نمونه‌ها (طول پنجره نمونه‌برداری) در تناوب اصلی برابر با ۶۴ نمونه خواهد بود.

اما در مورد مؤلفه‌های میان هارمونیک می‌بایست تفکیک پذیری فرکانسی با توجه به بازه فرکانسی آن‌ها که معادل ۳۰-۰/۱ Hz در حول فرکانس اصلی می‌باشد، تعیین گردد [۱۲]. با توجه به این بازه، دقیق‌ترین تفکیک پذیری فرکانسی می‌تواند معادل با ۰/۱ Hz (فرکانس کوچک‌ترین مؤلفه) تلقی گشته که حجم محاسباتی روش‌ها را بالا خواهد برد. همچنین ضعیف‌ترین تفکیک پذیری فرکانسی می‌تواند مطابق با پیشنهاد استاندارد IEC [۱۵] برابر با ۵ Hz در نظر گرفته شود. این تفکیک پذیری برای تحلیل مؤلفه‌های میان هارمونیک نامناسب بوده و سبب ادغام و به عبارت دیگر دیده نشدن بسیاری از مؤلفه‌های میان هارمونیک می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به فرکانس مؤلفه‌های هارمونیک (مضرب ۵۰ Hz) تحلیل مؤلفه‌های هارمونیک با این تفکیک پذیری فرکانسی مورد نیاز نمی‌باشد.

اما در این مقاله برای برقراری توازن بین دقت و حجم محاسباتی روش‌ها تفکیک پذیری ۰/۵ Hz در نظر گرفته شده است. میزان تفکیک فرکانسی در خروجی روش‌ها، متناسب با طول پنجره نمونه‌برداری تعیین می‌گردد. بدین ترتیب برای دستیابی به تفکیک فرکانسی ۰/۵ Hz، در محاسبه مؤلفه‌های اصلی و میان هارمونیک‌های مجاور آن، به پنجره نمونه‌برداری با طول ۱۰۰ سیکل از تناوب اصلی (۲ Sec) نیاز می‌باشد. از این رو پوش ولتاژ (A(t))، به صورت مجموعی از نوسانات سینوسی با فاصله فرکانسی ۰/۵ Hz در نظر گرفته شده است.

از طرف دیگر، با توجه به بازه فرکانسی ۳۰-۰/۱ Hz مؤلفه‌های میان هارمونیک ایجادکننده فلیکر می‌توان با داشتن پوش مؤلفه اصلی و مجزاسازی مؤلفه‌های هارمونیک از شکل موج، فرکانس نمونه‌برداری را برای اندازه‌گیری میان هارمونیک‌ها کاهش داد. طبق قاعده نایکوئیست حداقل فرکانس نمونه‌برداری مورد نیاز در شرایط فوق ۶۰ Hz می‌باشد، که بدین ترتیب حجم محاسباتی روش تا حد زیادی تقلیل خواهد یافت. به این ترتیب در این مقاله به سبب یافتن پوش شکل موج خروجی فیلتر پایین‌گذر توسط فیلتر کالمن غیرخطی، امکان تقلیل فرکانس نمونه‌برداری فراهم شده که با استفاده از تکنیک کاهش نمونه‌ها در پنج مرحله فرکانس نمونه‌برداری به ۱۰۰ Hz کاهش یافته که این خود سبب کاهش چشمگیر حجم محاسبات خواهد شد.

در نهایت برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج آن با نتایج تبدیل فوریه مجزا با فرکانس نمونه‌برداری ۳۲۰۰ Hz و تفکیک‌پذیری فرکانسی ۵۰ و ۰/۵ Hz در تحلیل هارمونیک‌ها و میان هارمونیک‌ها مقایسه خواهد شد.



شکل (۲). فلوجارت روش پیشنهادی

۵- تعیین فرکانس و طول پنجره نمونه‌برداری

برای دستیابی به اندازه‌گیری‌های دقیق، باید دو عامل مهم را مدنظر قرار داد: ۱- فرکانس نمونه‌برداری ۲- میزان تفکیک فرکانسی در خروجی. در این مقاله اندازه‌گیری هم زمان مؤلفه‌های هارمونیک و میان هارمونیک مد نظر بوده که فرکانس نمونه‌برداری و تفکیک‌پذیری فرکانسی مورد نیاز هر یک از این مؤلفه‌ها متفاوت می‌باشد. برای این منظور می‌بایست تنظیمات مورد نیاز هر یک از تحلیل‌ها متناسب با مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده توسط آن تحلیل صورت پذیرد.

در این مقاله محتوای هارمونیک سیگنال تا هارمونیک مرتبه پانزدهم (برابر با فرکانس ۷۵۰ Hz) توسط تبدیل فوریه مجزا محاسبه می‌گردد. بنابراین طبق قاعده نایکوئیست حداقل فرکانس نمونه‌برداری می‌بایست برابر با ۱۵۰۰ Hz باشد که با انتخاب فرکانس نمونه‌برداری برابر با $f_s = 3200 \text{ Hz}$ این شرط برآورده می‌گردد. برای تعیین طول پنجره نمونه‌برداری نیز از فرکانس مؤلفه اصلی که توسط فیلتر کالمن غیرخطی محاسبه می‌گردد، استفاده می‌شود و به این ترتیب طول پنجره نمونه‌برداری علاوه بر شرایط نامی به ازای وقوع انحراف فرکانسی نیز به صورت مضرب صحیحی از دوره تناوب مؤلفه‌های هارمونیک تنظیم شده و از ایجاد نشتی طیف در نتایج تبدیل فوریه جلوگیری می‌گردد. به این ترتیب در صورت عدم وقوع

۶- نتایج شبیه‌سازی

در قسمت اول این بخش با استفاده از شکل موج‌های ترکیبی، عملکرد روش پیشنهادی در تخمین مؤلفه‌های هارمونیک و میان‌هارمونیک با روش تبدیل فوریه مقایسه شده است. در بخش دوم، یک شبکه واقعی در کشور ایتالیا مورد مطالعه قرار گرفته و در شرایط مختلف شبکه و همچنین وزش بادهای مختلف، شکل موج ولتاژ یک ژنراتور القائی دوسو تغذیه، توسط روش‌های فوق مورد تحلیل طیفی قرار گرفته است. از بسته نرم‌افزاری PSCAD/EMTDC برای دستیابی به شکل موج‌های لحظه‌ای ولتاژ در شینه‌های مختلف سیستم استفاده شده و سپس ولتاژها در برنامه‌ای که در محیط MATLAB نوشته شده است، مورد تحلیل و پردازش قرار گرفته‌اند.

۶-۱- شکل موج‌های ترکیبی

در این قسمت عملکرد روش پیشنهادی در اندازه‌گیری هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های میان‌هارمونیک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه (۲۷) در نظر گرفته می‌شود:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (27)$$

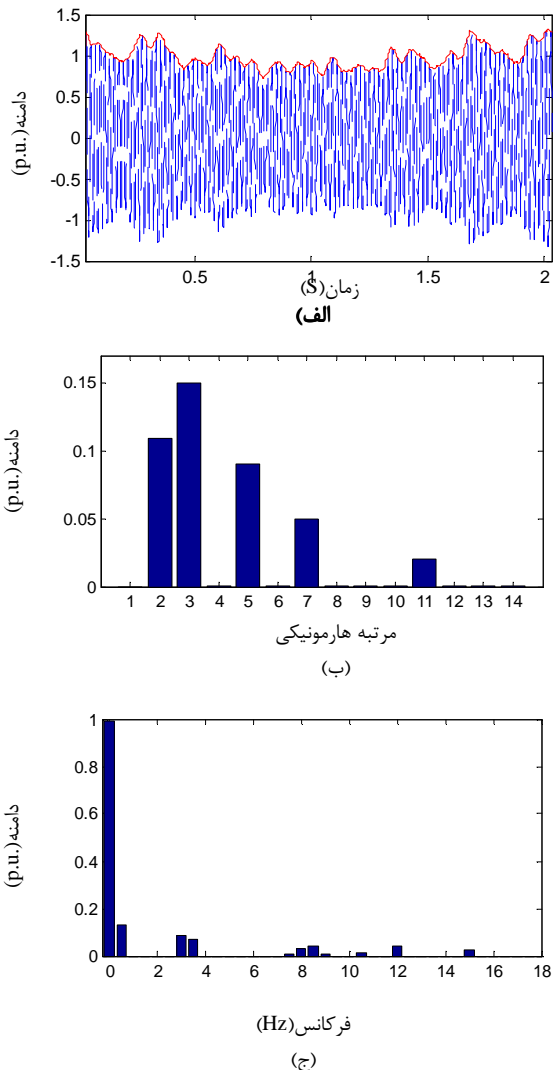
که در آن A_n ، f_n و φ_n به ترتیب دامنه، فرکانس و فاز مؤلفه‌های موجود در شکل موج می‌باشد. فرکانس مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های حول آن به ترتیب برابر با $50/5$ ، 53 ، $53/5$ ، $58/3$ و 62 Hz در نظر گرفته شده و مرتبه‌های هارمونیک دوم، سوم، پنجم، هفتم و یازدهم نیز به شکل موج اضافه شده‌اند. این مؤلفه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نشان دهنده شرایط جامعی از مؤلفه‌های موجود در شکل موج‌های واقعی باشند. به عبارت دقیق‌تر مؤلفه $50/5$ Hz بسیار نزدیک به فرکانس اصلی انتخاب شده و مؤلفه‌های 53 و $53/5$ Hz نمایانگر دو مؤلفه میان‌هارمونیک مجاور، مؤلفه $58/3$ Hz مؤلفه غیر سنکرون با پنجره نمونه‌برداری و مؤلفه‌های 62 و 65 Hz میان‌هارمونیک با دامنه کوچک و فاصله زیاد از فرکانس اصلی در نظر گرفته شده‌اند. دامنه این مؤلفه‌ها به ترتیب برابر با $0/14$ ، $0/09$ ، $0/075$ ، $0/06$ ، $0/045$ و $0/03$ p.u. تعیین شده است. دامنه مؤلفه اصلی و مرتبه‌های هارمونیک نیز به ترتیب برابر با 1 ، $0/11$ ، $0/15$ ، $0/09$ و $0/05$ p.u. می‌باشد.

از طرف دیگر با تغییر فرکانس اصلی با پله‌های $0/1$ و $0/2$ Hz از مقدار نامی، سعی شده شرایط انحراف فرکانس اصلی نیز مد نظر قرار گیرد. در جدول (۱) نتایج روش پیشنهادی با روش تبدیل فوریه مجزا (با دقت فرکانسی 50 Hz برای هارمونیک‌ها و $0/5$ Hz برای محاسبات مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن) مقایسه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌گردد جواب‌های بدست

آمده از تبدیل فوریه، در صورتی که فرکانس اصلی برابر با 50 Hz باشد، از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار بوده، اما با فاصله گرفتن فرکانس اصلی از مقدار نامی روش پیشنهادی جواب‌های دقیق‌تری را نسبت به روش تبدیل فوریه ارائه می‌دهد. هر چند که در شرایط عادی نیز پاسخ‌های روش پیشنهادی دارای خطای ناچیزی می‌باشد. در توجیه این پدیده باید گفت که در حالت اول به دلیل تطابق مؤلفه‌های فرکانسی موجود در طیف با پنجره نمونه‌برداری، خطای بوجود آمده در روش تبدیل فوریه ناچیز بوده و این روش با دقت بالایی، مؤلفه‌ها را اندازه‌گیری خواهد نمود. اما در روش پیشنهادی به دلیل استفاده از فیلتر کالمن غیر خطی از یکسو و کاهش تعداد نمونه‌ها (کاهش فرکانس نمونه‌برداری) در محاسبه مؤلفه‌های میان‌هارمونیک از سوی دیگر، دقت پاسخ‌ها اندکی کاهش یافته، اما همچنان در سطح قابل قبولی قرار دارند. به عبارت دیگر، همان‌طور که در بخش پنجم نیز توضیح داده شد به دلیل محاسبه پوش شکل موج در روش پیشنهادی، امکان تقلیل فرکانس نمونه‌برداری در تحلیل مؤلفه‌های میان‌هارمونیک فراهم شده و فرکانس نمونه‌برداری از 3200 به 100 Hz کاهش یافته است. این در حالی است که در جدول (۱) نتایج تبدیل فوریه مجزا در تحلیل مؤلفه‌های هارمونیک و میان‌هارمونیک یکسان و برابر با 3200 Hz می‌باشد. با در نظر گرفتن این مطلب، اگر فرکانس نمونه‌برداری روش پیشنهادی در تعیین مؤلفه‌های میان‌هارمونیک کاهش نیافته و یا به میزان کمتری کاهش یابد، نتایج این روش نیز در شرایط نامی با خطای کمتری محاسبه شده و بسیار نزدیک به نتایج تبدیل فوریه خواهد بود.

البته بخشی از خطای دیده شده در هر دو روش ناشی از فیلتر کردن سیگنال برای جداسازی هارمونیک‌ها از مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن می‌باشد. از آنجائی که تأثیر این خطا بر روی هر دو روش یکسان می‌باشد، می‌توان از آن صرف نظر نمود. با انحراف فرکانس اصلی از مقدار نامی، روش پیشنهادی پاسخ‌های مناسب‌تری را نسبت به تبدیل فوریه مجزا از خود نشان می‌دهد. در توجیه این موضوع باید گفت که در روش تبدیل فوریه، با انحراف فرکانس اصلی از مقدار نامی و به تبع آن عدم تطابق فرکانس اصلی با پنجره نمونه‌برداری، بخشی از انرژی مؤلفه اصلی و هارمونیک‌ها در سایر مؤلفه‌های طیف فرکانسی پخش شده و یا به عبارت دیگر این روش دچار نشتی طیف می‌گردد. اما در روش پیشنهادی به دلیل تعیین پوش شکل موج با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی، میزان نشتی طیف حداقل بوده و پاسخ‌ها از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود.

در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی و روش تبدیل فوریه مجزا در شرایط انحراف فرکانس اصلی (به اندازه $0/2$ Hz) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌گردد روش پیشنهادی حتی با وجود



شکل (۳). نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با فرض انحراف فرکانس اصلی به اندازه $0/2\text{Hz}$ ، الف) شکل موج سیگنال مورد تحلیل به همراه ب) طیف هارمونیک شکل موج، ج) طیف مؤلفه‌های میان-هارمونیک

۶-۲- طیف فرکانسی ژنراتور القائی دوسو تغذیه

دامنه متغیر باد در شرایط نامساعد جوی، می‌تواند سبب خروج سرعت روتور از محدوده $\pm 25\%$ نامی شده و در نتیجه سبب ایجاد نوساناتی در دامنه ولتاژ خروجی ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه گردد [۵ و ۶]. این نوسانات که به صورت مجموعی از مؤلفه‌های میان‌هارمونیک می‌باشند سبب کاهش مشخصه‌های مرتبط با کیفیت توان شبکه می‌گردند. از این رو نیاز به پایش دقیق خروجی این مولدها بوده، تا در صورت لزوم اقدامات اصلاحی و یا حتی جداسازی مولد از شبکه صورت پذیرد. برای این منظور می‌بایست از یک روش دقیق و با حجم محاسباتی مناسب برای پردازش داده‌ها استفاده شود، تا علاوه بر دستیابی به نتایجی با دقت بالا، حجم و زمان محاسبات نیز تا حد ممکن کاهش یابد. در چنین شرایطی، اگر فرکانس اصلی شبکه نیز از مقدار نامی فاصله گرفته باشد، (که در

انحراف فرکانس اصلی نیز پوش شکل موج را بدرستی تعیین نموده است. در این حالت فرکانس اصلی توسط فیلتر کالمن غیر خطی برابر با $50/2\text{Hz}$ اندازه‌گیری شده، که کاملاً صحیح می‌باشد. در شکل‌های (۳-ب) و (۴-الف) به ترتیب طیف مؤلفه‌های هارمونیک با استفاده از روش پیشنهادی و روش تبدیل فوریه مجزا ارائه شده است. در روش تبدیل فوریه، به دلیل استفاده از پنجره ثابت، مقداری نشتی طیف در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که این نشتی در مرتبه‌های هارمونیک چهارم و ششم سبب ایجاد دامنه‌های کاذب شده است. اما در روش پیشنهادی به دلیل استفاده از پنجره نمونه‌برداری تطبیقی، میزان نشتی طیف بسیار کم بوده و دامنه تمامی مؤلفه‌ها به درستی محاسبه شده‌اند.

در شکل‌های (۳-ج) و (۴-ب) نیز به ترتیب طیف مؤلفه اصلی و میان‌هارمونیک‌های مجاور آن با استفاده از روش پیشنهادی و روش تبدیل فوریه مجزا ارائه شده است. همان طور که در این شکل‌ها نیز مشاهده می‌گردد، نتایج بدست آمده از تبدیل فوریه شامل نشتی طیف بالائی می‌باشد. میزان این نشتی بحدی است که مؤلفه‌های غیر واقعی بسیاری نیز حول فرکانس اصلی به عنوان مؤلفه‌های میان‌هارمونیک شناخته خواهند شد. اما روش پیشنهادی همچنان از دقت مناسبی برخوردار بوده و طیف‌های نشتی مشاهده شده در آن، چه از لحاظ تعداد و چه از لحاظ اندازه در حد قابل قبولی می‌باشد.

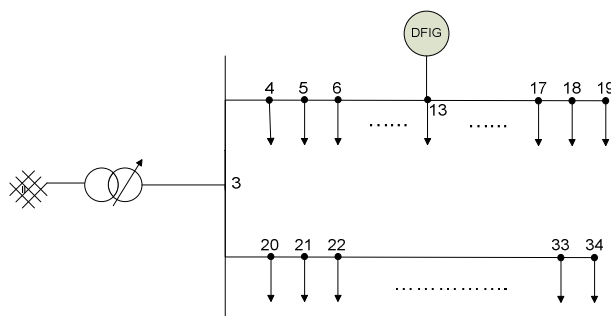
از طرف دیگر، در هر دو روش، به دلیل عدم تطابق مؤلفه $58/2\text{Hz}$ با پنجره نمونه‌برداری، امکان شناسائی دقیق این مؤلفه فرکانسی وجود نداشته و بخشی از انرژی آن در مؤلفه‌های فرکانس‌های مجاورش پخش خواهد شد. البته در این حالت نیز، میزان نشتی طیف در روش پیشنهادی کمتر از روش تبدیل فوریه مجزا می‌باشد.

ولتاژ و سطح اتصال کوتاه فیدر اصلی به ترتیب برابر با ۱۳۲kV و ۱۰۰۰MVA بوده، که توسط یک ترانسفورماتور Δ/Y_g ، ۱۳۲/۲۰kV با نسبت $X/R=30/73$ به انشعابات اصلی بارها متصل شده است. ولتاژ و توان ظاهری ژنراتور القائی دوسو تغذیه نیز به ترتیب برابر با ۰/۶۹kV و ۱/۸۷۵MVA بوده [۵] و توسط یک ترانسفورماتور Δ/Y_g ، ۲۰/۰/۶۹kV به شینه شماره سیزده این شبکه اتصال یافته است.

شبکه‌های توزیع ضعیف محتمل می‌باشد) پیچیدگی محاسبات بالاتر رفته و در صورت استفاده از روش‌های مرسوم (مبتنی بر تبدیل فوریه) میزان خطای محاسبات تا حد بسیار بالائی افزایش خواهد یافت. به همین سبب به نظر می‌رسد روش پیشنهادی در چنین شرایطی بتواند نیازهای محاسباتی مورد نیاز را برآورده سازد. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مذکور، از شبکه ارائه شده در مرجع [۱۸] استفاده شده است. این شبکه که یک شبکه ۳۴ شینه‌ای در کشور ایتالیا می‌باشد در شکل (۵) نشان داده شده است .

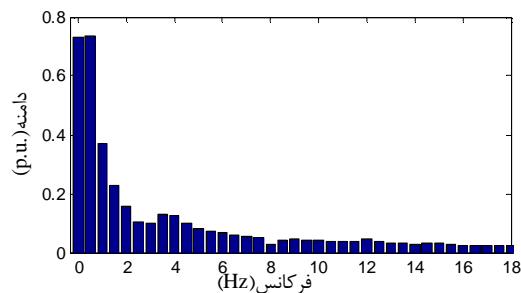
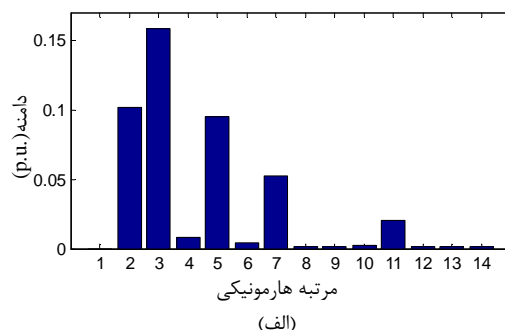
جدول(۱): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش تبدیل فوریه مجزا در شرایط مختلف

f=50.2Hz				f=50.1Hz				f=50 Hz				f(Hz)
روش پیشنهادی		DFT		روش پیشنهادی		DFT		روش پیشنهادی		DFT		
خطا (%)	$A_n(p.u.)$	خطا (%)	$A_n(p.u.)$	خطا (%)	$A_n(p.u.)$	خطا (%)	$A_n(p.u.)$	خطا (%)	$A_n(p.u.)$	خطا (%)	$A_n(p.u.)$	
۱	۰/۱۳	۵۹/۴	۰/۷۳۴	۰/۴	۰/۱۴۴	۲۵/۸	۰/۳۹۸	۰/۶	۰/۱۳۴	۰/۳	۰/۱۳۷	۰/۵
۰/۴	۰/۰۸۶	۰/۹	۰/۰۹۹	۰/۲	۰/۰۸۸	۰/۳	۰/۰۸۷	۰/۰	۰/۰۹	۰/۳	۰/۰۸۷	۳
۰/۳	۰/۰۷۲	۵/۸	۰/۱۳۳	۰/۳	۰/۰۷۲	۱/۱	۰/۰۸۶	۰/۳	۰/۰۷۲	۰/۳	۰/۰۷۲	۳/۵
۱/۶	۰/۰۴۴	۱/۹	۰/۰۴۱	۱/۹	۰/۰۴۱	۱/۷	۰/۰۴۳	۱/۷	۰/۰۴۳	۱/۶	۰/۰۴۴	۸/۳
۰/۶	۰/۰۳۹	۰/۰	۰/۰۴۵	۰/۵	۰/۰۴	۰/۲	۰/۰۴۳	۰/۲	۰/۰۴۳	۰/۲	۰/۰۴۳	۱۲
۰/۴	۰/۰۲۶	۰/۲	۰/۰۳۲	۰/۴	۰/۰۲۶	۰/۲	۰/۰۲۸	۰/۴	۰/۰۲۶	۰/۳	۰/۰۲۷	۱۵
۱	۰/۹۹	۲۶/۹	۰/۷۳۱	۱	۰/۹۹	۷/۷	۰/۹۲۳	۰/۹	۰/۹۹۱	۰/۹	۰/۹۹۱	۵۰
۰/۱	۰/۱۰۹	۰/۹	۰/۱۰۱	۰/۰	۰/۱۱	۱	۰/۱	۰/۰	۰/۱۱	۰/۰	۰/۱۱	۱۰۰
۰/۰	۰/۱۵	۰/۹	۰/۱۵۹	۰/۰	۰/۱۵	۰/۸	۰/۱۵۸	۰/۰	۰/۱۵	۰/۰	۰/۱۵	۱۵۰
۰/۰	۰/۰۹	۰/۴	۰/۰۹۴	۰/۰	۰/۰۹	۰/۴	۰/۰۹۴	۰/۰	۰/۰۹	۰/۰	۰/۰۹	۲۵۰
۰/۰	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۵۲	۰/۰	۰/۰۵	۰/۳	۰/۰۵۳	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰	۰/۰۵	۳۵۰
۰/۰	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۲۱	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰۲	۵۵۰



شکل(۵): شبکه واقعی مورد مطالعه [۱۸].

سایر مشخصات شبکه شامل مشخصات تکمیلی فیدر اصلی، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و بارها در مرجع [۱۸] ارائه شده است. در ادامه، شکل موج ولتاژ مولد در شرایط مختلف عملکردی مانند نحوه وزش باد و انحراف فرکانس اصلی به دست آمده و توسط روش پیشنهادی و تبدیل فوریه، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل (۴): نتایج به دست آمده از روش تبدیل فوریه مجزا با فرض انحراف فرکانس اصلی به اندازه ۰/۲Hz، الف) طیف هارمونیکی شکل موج، ب) طیف مؤلفه‌های میان هارمونیکی

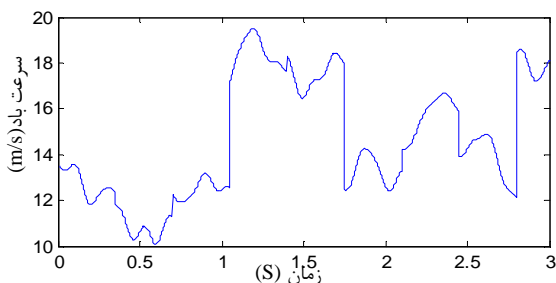
۶-۲-۱- باد با سرعت ثابت و عدم انحراف فرکانس اصلی

در شرایطی که ژنراتور القائی دوسو تغذیه در مقادیر نامی خود در حال کار باشد، تجهیزات کنترلی آن از عهده این اغتشاش بر نیامده و مطابق با شکل (۸) این پدیده سبب پیدایش نوساناتی در دامنه ولتاژ می‌گردد. این نوسانات معرف مؤلفه‌های میان‌هارمونیک در شکل موج ولتاژ می‌باشند که به درستی توسط روش پیشنهادی در پوش ولتاژ مورد شناسائی قرار گرفته‌اند.

بدین ترتیب باید توجه داشت که شکل موج از شرایط ایستا خارج شده و تغییراتی در پوش آن مشاهده می‌گردد. در چنین شرایطی نتایج تبدیل فوریه آنچنان معتبر نبوده که با افزایش شدت تغییرات از دقت این روش کاسته خواهد شد. اما در این بررسی به دلیل دامنه کوچک نوسانات شکل موج، نتایج این روش همچنان قابل استفاده می‌باشد. از طرف دیگر روش پیشنهادی به دلیل استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی به خوبی قادر به تعیین پوش شکل موج و تحلیل طیفی آن می‌باشد. در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) به ترتیب تجزیه طیفی میان‌هارمونیک ولتاژ توسط روش پیشنهادی و روش تبدیل فوریه نشان داده شده است. از آنجائی که انحراف فرکانس در مؤلفه اصلی وجود نداشته و تغییرات شکل موج نیز ناچیز می‌باشد طیف به دست آمده از هر دو روش تقریباً یکسان است.

۶-۲-۳- باد نویزی و انحراف در فرکانس اصلی

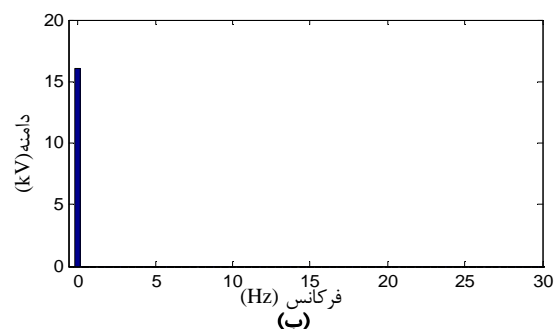
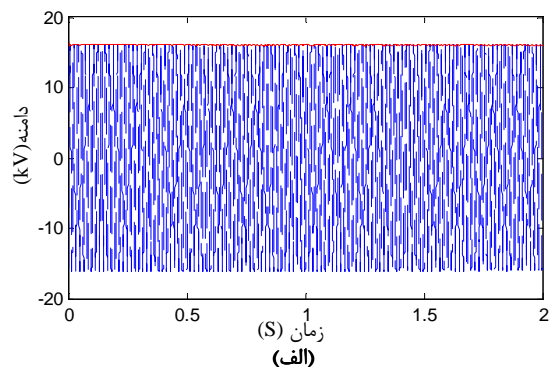
در این قسمت علاوه بر وزش باد نویزی، فرض می‌شود که تعادل بین بار و تولید به هم خورده و فرکانس اصلی به اندازه 0.2Hz انحراف پیدا کرده باشد. در چنین شرایطی، به دلیل انحراف زیاد در فرکانس اصلی (0.2Hz) نسبت به تفکیک فرکانسی استفاده شده در هر دو روش (0.5Hz)، امکان بالا رفتن خطا در محاسبات افزایش یافته و دامنه مؤلفه اصلی روی طیف میان‌هارمونیکي اثرگذار خواهد بود. مقدار این اثرگذاری وابسته به روش استفاده شده در تجزیه طیفی شکل موج می‌باشد. در شکل (۱۰)، شکل موج ولتاژ ژنراتور به همراه پوش آن نشان داده شده است. از روی این شکل می‌توان به وجود مؤلفه‌های میان‌هارمونیکي در ولتاژ ژنراتور پی برد.



شکل (۷): منحنی تغییرات وزش باد

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب طیف‌های میان‌هارمونیکي و هارمونیکي هر دو روش نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی اثرپذیری چندانی از

در ابتدا فرض شده که بادی با سرعت ثابت 15m/s توربین‌های این مولد را به حرکت در آورده و فرکانس اصلی شبکه نیز از مقدار نامی انحرافی نداشته باشد. از آنجائی که منبع استفاده شده در فیدر اصلی ایده‌آل بوده و هم چنین تمامی بارهای این شبکه خطی فرض شده‌اند تنها منبع آلودگی هارمونیکي و میان‌هارمونیکي در این شبکه ژنراتور القائی دوسو تغذیه می‌باشد. بدین ترتیب در شرایطی که باد ثابت بوده و فرکانس اصلی نیز برابر مقدار نامی باشد، انتظار می‌رود تنها مؤلفه موجود در طیف فرکانسی همان مؤلفه اصلی شکل موج باشد. در شکل (۶-الف) شکل موج ولتاژ ژنراتور به همراه پوش آن و در شکل (۶-ب) طیف فرکانسی میان‌هارمونیکي این شکل موج، با استفاده از روش پیشنهادی نشان داده شده است. به دلیل تشابه طیف خروجی روش تبدیل فوریه با طیف روش پیشنهادی، از نمایش مجدد آن خودداری شده است. همان طور که از شکل (۶-الف) مشاهده می‌گردد، دامنه ولتاژ خروجی ثابت و برابر مقدار نامی می‌باشد. بدین ترتیب، مطابق با شکل (۶-ب) طیف خروجی فقط شامل مؤلفه اصلی بوده و هیچگونه مؤلفه میان‌هارمونیکي در آن وجود ندارد. این مطلب دقیقاً مطابق با نظریه اولیه ارائه شده در ابتدای این قسمت می‌باشد.



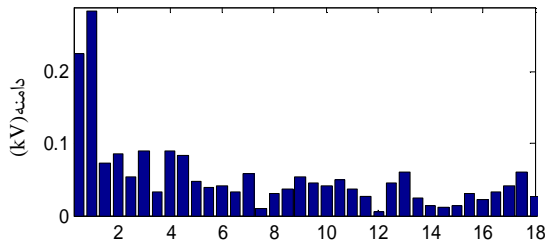
شکل (۶): نتایج روش پیشنهادی با فرض عدم انحراف فرکانس اصلی و وزش باد ثابت، (الف) شکل موج ولتاژ و پوش حاصله (ب) طیف فرکانسی شکل موج

۶-۲-۲- باد نویزی و عدم انحراف در فرکانس اصلی

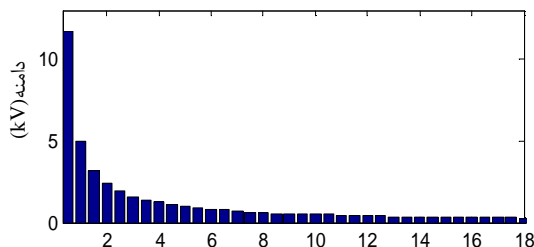
در این قسمت باد نویزی شدیدی با متوسط سرعت 15m/s با منحنی تغییرات نشان داده شده در شکل (۷) نشان در نظر گرفته می‌شود. در اثر وزش این باد، گشتاور مکانیکي توربین دائماً دچار تغییر شده، اما به دلیل ثابت بودن بارها، گشتاور الکتریکی تقریباً ثابت باقی خواهد ماند.

خطای محاسباتی در روش پیشنهادی نسبت به روش تبدیل فوریه دارد.

طیف هارمونیک روش پیشنهادی و تبدیل فوریه نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) نشان داده شده است که در روش پیشنهادی به دلیل استفاده از پنجره تطبیقی میزان نشتی طیف به شدت کاهش یافته است. این نتایج نشان دهنده دقت بالای روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مرسوم (مانند تبدیل فوریه) می‌باشد که در استانداردهای آلودگی هارمونیک و میان هارمونیک (مانند استاندارد IEC 61000 4-7 [۱۵]) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

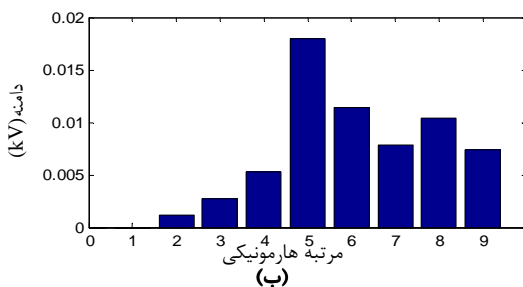
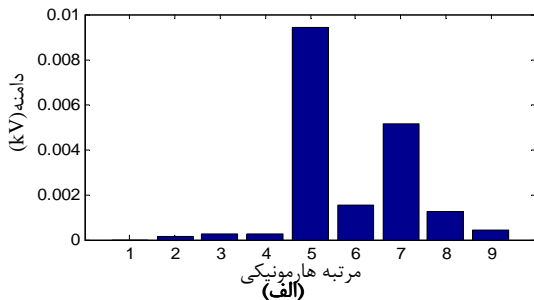


فرکانس (Hz)
(الف)



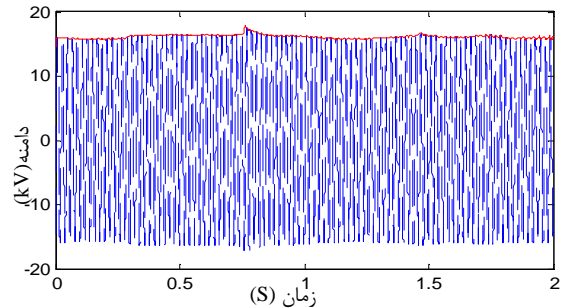
فرکانس (Hz)
(ب)

شکل (۱۱): مقایسه طیف میان هارمونیک دو روش با انحراف $0.2/Hz$ در فرکانس اصلی، الف) روش پیشنهادی، ب) روش تبدیل فوریه

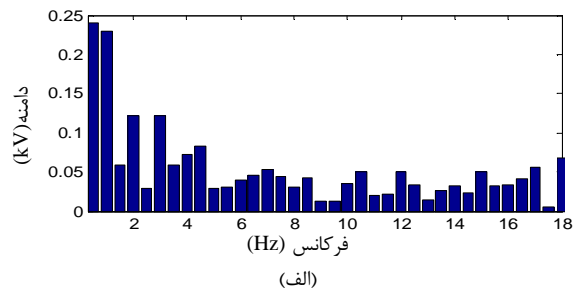


شکل (۱۲): مقایسه طیف هارمونیک دو روش با فرض انحراف $0.2/Hz$ در فرکانس اصلی، الف) روش پیشنهادی، ب) روش تبدیل فوریه

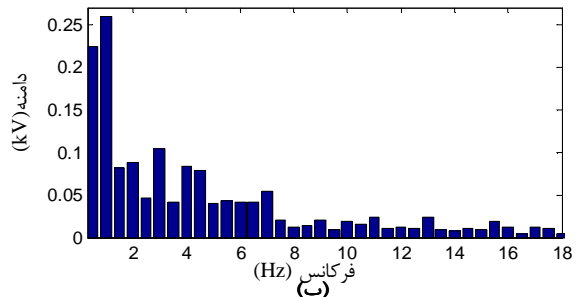
انحراف فرکانس اصلی نداشته و نتایج آن تقریباً مشابه با حالت قبل (عدم انحراف فرکانس اصلی) می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱-ب)، در این شرایط روش تبدیل فوریه به شدت دچار نشتی طیف شده و میان هارمونیک‌های مجاور با فرکانس اصلی با خطای بسیار زیادی محاسبه شده‌اند. بدین ترتیب این طیف دیگر قابل استفاده در تجزیه و تحلیل‌های مرتبط با مشخصه‌های کیفیت توان شبکه نمی‌باشد.



شکل (۸): شکل موج ولتاژ و پوش حاصله از روش پیشنهادی

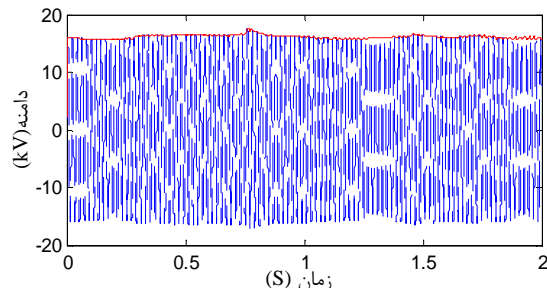


فرکانس (Hz)
(الف)



فرکانس (Hz)
(ب)

شکل (۹): مقایسه طیف میان هارمونیک دو روش با فرض عدم انحراف فرکانس اصلی، الف) روش پیشنهادی، ب) روش تبدیل فوریه



شکل (۱۰): شکل موج ولتاژ و پوش حاصله از روش پیشنهادی

برای بررسی بیشتر، نتایج روش پیشنهادی و روش تبدیل فوریه در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج جدول (۲) نیز دلالت بر کاهش

- [3] G.W. Chang, C.I. Chen, Y.J. Liu, "Measuring Power System Harmonics and Inter-harmonics by an Improved Fast Fourier Transform-Based Algorithm", IET Gen. Transaction. on Dist. Vol. 2, No. 2, pp.192-201, 2008.
- [4] O. Salor, "Spectral Correction Based Method for Inter-harmonics Analysis of Power Signals with Fundamental Frequency Deviation", Electric Power Systems Research, Vol.47, pp.1025-1031, Apr. 2009.
- [5] L. Xu, Y. Wang, "Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions", IEEE Transaction. on Power System., Vol. 22, No. 1, pp. 314-323, Feb. 2007.
- [6] J. Hu, H. Xu, "Dynamic Modeling and Improved Control of DFIG under Distorted Grid Voltage Conditions", IEEE Transaction. on Energy Conv., Vol. 26, No. 1, pp. 163-175, Mar. 2011.
- [7] A. Hansen, F. Blaabjerg, "Dynamic Modeling of Wind Farm Grid Interaction", Journal of Wind Engineering Vol. 26, No. 4, pp. 191-208, Apr. 2002.
- [8] H. C. Lin, "Inter-Harmonic Identification Using Group-Harmonic Weighting Approach Based on the FFT", IEEE Transaction. on Power Electronic., Vol. 23, No. 3, pp. 1309-1319, May 2008.
- [9] H. C. Lin, "Intelligent Neural Network Based Fast Power System Harmonic Detection", IEEE Transaction. on Ind. Electron., Vol. 54, No. 1, pp. 43-52, Feb. 2007.
- [10] V.L. Pham, K.R. Wong, "Wavelet-Transform-Based Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Waveforms", IEE Proc.-Gen. Transm. Dist. ,Vol. 146, No. 3, pp. 249-254, May 1999.
- [11] A.G. Phadke, J.S. Thorp, *Digital Signal Processing Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, International Editions, Springer, 2008.
- [12] S. M. Halpin, V. Singhvi, "Limits for Interharmonics in the 1-100-Hz Range Based on Lamp Flicker Considerations", IEEE Transaction. on Power Del., Vol. 22, No. 1, pp. 270-276, Jan. 2007.
- [13] J. A. Macias, A. Gomez, "Self-Tuning of Kalman Filters for Harmonic Computation", IEEE Transaction. on Power Del., Vol. 21, No. 1, pp.501-503, Jan. 2006.
- [14] N. Kose, O. Salor, "Inter-Harmonics Analysis of Power Signals with Fundamental Frequency Deviation Using Kalman Filtering", Electric Power Systems Research, Vol.80, pp.1145-1153, May 2010.
- [15] Testing and Measurement Techniques—Section 7: *General Guide on Harmonics and Inter-Harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*, IEC Std.61000-4-7, 2002.
- [16] T. X. Zhu, "Exact Harmonics/Inter-harmonics Calculation Using Adaptive Window Width", IEEE Transaction. on Power Del. ,Vol. 22, No.4, pp. 2279-2288, Oct. 2007.

[۱۷] میلاد دلالی، علیرضا جلیلیان، "اندازه‌گیری هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های

ایجادکننده فلیکر با استفاده از یک روش ترکیبی"، مجموعه مقالات

بیست و ششمین دوره کنفرانس بین المللی برق، تهران، آبان ۱۳۹۰.

- [18] V. Calderaro, J.V. Milanovic, M. Kayikci, A. Piccolo, "The Impact of Distributed Synchronous Generators on Quality of Electricity Supply and Transient Stability of Real Distribution Network", Electric Power Systems Research, Vol.79, pp.134-143, May 2008.

جدول (۲): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش تبدیل فوری در تعیین

مؤلفه‌های میان‌هارمونیک

DFT		روش پیشنهادی		فرکانس مؤلفه (Hz)	n
دامنه میان‌هارمونیک (kV)		دامنه میان‌هارمونیک (kV)			
f ₁ =50.2Hz	f ₁ =50Hz	f ₁ =50.2Hz	f ₁ =50Hz		
۱۱/۶۸	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۵	۱
۵/۰۱	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۶	۱	۲
۳/۱۹	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۱/۵	۳
۲/۳۸	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۹	۲	۴
۱/۹۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۲/۵	۵
۱/۵۹	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۱	۳	۶
۱/۳۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۳/۵	۷

۷- نتیجه‌گیری

در بسیاری از تجهیزات اندازه‌گیری از روش‌های مبتنی بر تبدیل فوری مجزا برای اندازه‌گیری و تحلیل هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های میان‌هارمونیک استفاده می‌گردد. اما دقت این تحلیل در زمانی که فرکانس و یا طول پنجره نمونه‌برداری ثابت و طول داده‌های نمونه‌برداری شده متناهی باشد، به شدت تحت تأثیر مؤلفه‌های موجود در سیگنال قرار دارد. به طوری که با کوچک‌ترین عدم تطابق بین فرکانس این مؤلفه‌ها با پنجره نمونه‌برداری این تحلیل دچار نشتی طیف می‌گردد. از طرف دیگر، در شبکه‌های واقعی فرکانس اصلی ثابت نبوده، که با انحراف فرکانس شبکه از مقدار نامی بر شدت نشتی طیف در نتایج این تحلیل افزوده می‌گردد. از طرف دیگر، با وجود سطح نشتی کمتر و دقت بالای فیلتر کالمن، امکان محاسبه هم‌زمان هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های میان‌هارمونیک به دلیل حجم محاسباتی بالای آن وجود ندارد.

در این مقاله از ترکیب دو روش فوق برای اندازه‌گیری هم‌زمان هارمونیک‌ها و مؤلفه‌های میان‌هارمونیک استفاده گردید. ابتدا توسط فیلتر کالمن غیرخطی، پوش شکل‌موج ولتاژ و فرکانس اصلی آن به دست آمده و سپس با استفاده از مقادیر فوق مؤلفه‌های میان‌هارمونیک و هارمونیک‌های موجود در شکل‌موج به ترتیب توسط فیلتر کالمن خطی و تبدیل فوری مجزا مورد محاسبه قرار گرفتند. از نتایج به دست آمده این گونه می‌توان استنباط کرد که روش مذکور با وجود حفظ دقت پاسخ‌ها در سطح مناسب، از حجم محاسباتی معقولی نیز برخوردار بوده، به طوری که می‌توان در کاربردهای عملی از آن استفاده نمود.

مراجع

- [1] W. M. Grady, S. Santoso, "Understanding Power System Harmonics", IEEE Power Eng. Rev., Vol. 21, No. 11, p.c2, Nov. 2001.
- [2] W. A. Omran, H. S. K. El-Goharey, M. Kazerani, M. M. A. Salama, "Identification and Measurement of Harmonic Pollution for Radial and Non-radial Systems", IEEE Transaction. on Power Del., Vol. 24, No. 3, pp. 1642-1650, Jul. 2009.