تخمین بهینه هارمونیک ها با استفاده از الگوریتم IGHS

امیر موسی حدادی علیرضا جلیلیان احد کاظمی

۱- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران – ایران
haddadi@elec.iust.ac.ir
۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران – ایران
Jalilian@iust.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران – ایران
Kazemi@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای تخمین بهینه هارمونیک ها با استفاده از الگوریتم ترکیبی IGHS ارائه شده است. مساله تخمین بهینه هارمونیک ها یک مساله غیر خطی در تخمین فاز و فرکانس و یک مساله خطی در تخمین دامنه می باشد. در حالی که الگوریتم ترکیبی IGHS برای تخمین فاز و فرکانس مولفه های هارمونیکی سیگنال در حضور نویز مورد استفاده قرار می گیرد، برای تخمین دامنه، از روش حداقل مربعات استفاده می شود. بهبود زمان اجرای الگوریتم و درصد خطا در مقایسه با سایر روش های موجود برای تخمین هارمونیک ها، نظیر تبدیل فوریه، الگوریتم ژنتیک ، PSO و FBF نشان داده شده است. کارایی الگوریتم معرفی شده در تخمین میان هارمونیک ها، زیرهارمونیک ها و همچنین تشخیص وجود انحراف فرکانس نشان داده شده و عملکرد آن در صورت وجود مولفه DC میرا شونده نیز بررسی شده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم تکاملی، تخمین بهینه ، هارمونیک، جستجوی همساز

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۸/۸/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۷/۴
نام نویسنده‌ی مسئول: علیرضا جلیلیان
نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران – ایران

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۱- مقدمه

از بحث های مهم در کیفیت توان، بحث هارمونیک ها می باشد. با افزایش روزافزون استفاده از بارهای غیر خطی، نظیر رایانه ها، لامپ های کم مصرف، مدارهای الکترونیک قدرت و ... ، هارمونیک ها نیز در سیستم قدرت افزایش یافته است. مشکلاتی که هارمونیک ها در سیستم ایجاد می کنند روشن و مشخص است و راهکارهای کاهش هارمونیک ها نیز موجود است. آنچه که در اینجا مطرح است، بحث تشخیص هارمونیک ها می باشد. چه برای طراحی فیلتر ها و یا کنترل فیلترهای فعال و چه برای تعیین محل منابع هارمونیک زا و ... ابتدا باید مولفه های هارمونیکی سیگنال اندازه گیری شده، مشخص شود. امروزه استفاده از تبدیل فوریه برای یافتن مولفه های هارمونیکی بسیار رایج است. اما این روش در برخی موارد مانند وجود انحراف فرکانس یا نوسان ولتاژ، خطای قابل توجهی دارد. لذا روش های جدید بهینه سازی با استفاده از الگوریتم های تکاملی برای تخمین هارمونیک ها به کار گرفته شده اند، که در شرایط ذکر شده خطای به مراتب کمتری از تبدیل فوریه دارند. البته در کنار خطا، باید زمان تحلیل شکل موج توسط هر روش نیز مد نظر قرار گیرد.

در مرجع [۱] پس از اشاره به نقطه ضعف تبدیل فوریه رایج در تخمین هارمونیک ها، روشی برای تخمین بهینه هارمونیک ها (با مضرب صحیح یا غیر صحیحی از فرکانس اصلی)، مبتنی بر تبدیل فوریه و استفاده از پنجره نمونه برداری با عرض متغیر ارائه شده است. استفاده از این روش تا حد زیادی باعث بهبود عملکرد تبدیل فوریه می شود. در مرجع [۲] فرکانس مولفه های هارمونیکی موجود در سیگنال، با تخمین تابع چگالی طیفی توان شکل موج، تعیین می شوند. در این مقاله از تحلیل طیفی شکل موج برای تعیین میان هارمونیک ها و زیر هارمونیک ها نیز استفاده شده است. در مرجع [۳] مقایسه ای بین چهار روش تخمین فرکانس شبکه انجام شده است. این روش ها از لحاظ زمان اجرا و حساسیت به نویز و هارمونیک های با فرکانس بالا مقایسه شده اند و مبتنی بر فیلتر کردن، تبدیل فوریه و تشخیص عبور از صفر می باشند. در مرجع [۴] روشی برای تخمین هارمونیک های مضرب صحیح از فرکانس اصلی در حضور مولفه DC میرا شونده مبتنی بر الگوریتم Adaline و روش حداقل مربعات ارائه شده است. ویژگی این روش سرعت بسیار سریع آن است. در مرجع [۵] روشی برای تخمین هارمونیک ها ارائه شده که در آن ابتدا با استفاده از یک فیلتر شانه ای با پاسخ ضربه محدود، مولفه های هارمونیکی از هم جدا شده و سپس با یک روش ریاضی دامنه هر یک از آنها تخمین زده می شود. در مرجع [۶] از الگوریتم PSOPC و روش حداقل مربعات برای تخمین بهینه هارمونیک ها (با مضرب صحیح یا غیر صحیحی از فرکانس اصلی) در حضور نویز استفاده شده است. هم چنین اثر وجود انحراف فرکانس نیز بررسی شده است. در مرجع [۷] تخمین هارمونیک های مضرب صحیح فرکانس اصلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در مرجع [۸] تخمین بهینه هارمونیک های مضرب صحیح فرکانس اصلی با استفاده از الگوریتم FBF و به کار گیری روش حداقل مربعات برای تخمین دامنه ها انجام شده است. اثر مولفه DC میرا شونده نیز در این مقاله مد نظر قرار گرفته است. در مرجع [۹] پس از اشاره به نقاط ضعف تبدیل فوریه در تخمین هارمونیک‌ها، روشی مبتنی بر فیلتر کالمن جهت این کار معرفی شده است.

در مرجع [۱۰] الگوریتم HS به عنوان یک روش بهینه سازی موثر که بر مبنای عملکرد نوازنده های موسیقی برای بدست آوردن بهترین حالت هماهنگی بین نت ها ساخته شده است، معرفی شده است. در مرجع [۱۱] شکل بهبود یافته ای از الگوریتم HS معرفی شده است. در این مرجع با تغییر دینامیکی پارامترهای الگوریتم در حین بهینه سازی و استفاده از ایده‌ی هوشمندی و حافظه برای ذرات مانند روش PSO، عملکرد الگوریتم HS بهبود داده شده است.

در این مقاله تعیین دامنه، فاز و فرکانس مولفه های هارمونیکی (با فرکانس مضرب صحیح یا غیر صحیح فرکانس اصلی) در حضور نویز با استفاده از الگوریتم ترکیبی IGHS مورد بررسی قرار گرفته است. این الگوریتم جدید از ترکیب روش ارائه شده در مرجع [۱۱] با مفهومی از روش PSO بهینه سازی شده است. هم چنین اثر وجود مولفه DC میرا شونده و همچنین انحراف فرکانس روی کارایی الگوریتم نیز بررسی شده است. الگوریتم پیشنهادی به لحاظ خطا و زمان اجرا با الگوریتم های موجود مقایسه و برتری آن نشان داده شده است.

۲- روش تخمین هارمونیک ها

فرض کنید که سیگنال نمونه برداری شده Y(t) به صورت زیر بیان شود :

$$Y(t)=\sum_{n=1}^{N} A_n Sin(\omega_n t+\varphi_n)+G(t) \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، n مرتبه هارمونیک را مشخص می کند. A_n ، ω_n و φ_n به ترتیب دامنه، فرکانس زاویه ایی و فاز هارمونیک را مشخص می کنند. G(t) هم نویزی را مشخص می کند که در سیگنال نمونه برداری شده وجود دارد. برای تخمین دامنه و فاز هارمونیکها، سیگنال ساخته شده به صورت زیر بیان می شود :

$$Y(t)=\sum_{n=1}^{N} A_n' Sin(\omega_n' t+\varphi_n')+G(t) \qquad (۲)$$

در رابطه ۲، A_n' ، ω_n' و φ_n' به ترتیب دامنه، فرکانس زاویه ایی و فاز تخمین زده شده هستند. حال هدف این است که A_n' ، ω_n' و φ_n' به گونه ای پیدا شوند که اختلاف Y(t) و Y'(t) به حداقل برسد. آن چیزی که ما برای شروع در اختیار داریم M نمونه ای است که از

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

سیگنال Y(t) بدست آمده است. اگر زمان های نمونه برداری t_1، t_2، ... و t_M فرض شوند، برای نمونه ی i ام می توان نوشت :

$$Y(i) = H(i).A + G(i), i = 1,2,...,M \quad (۳)$$

در این رابطه، Y(i) بیان کننده نمونه i ام سیگنال Y(t) می باشد. ماتریس سیستم H به صورت زیر بیان می شود :

$$H = \begin{bmatrix} Sin(\omega_1 t_1 + \varphi_1) & \dots & Sin(\omega_N t_1 + \varphi_N) \\ Sin(\omega_1 t_2 + \varphi_1) & \dots & Sin(\omega_N t_2 + \varphi_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Sin(\omega_1 t_M + \varphi_1) & \dots & Sin(\omega_N t_M + \varphi_N) \end{bmatrix} \quad (۴)$$

ماتریس A نیز به صورت زیر قابل نمایش است :

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} \quad (۵)$$

همچنین می توان نوشت :

$$Y'(i) = H'(i).A', i = 1,2,...,M \quad (۶)$$

بعد از تخمین ω_n' و φ_n' ، ماتریس H' قابل محاسبه است. با استفاده از روش حداقل مربعات و با این فرض که ماتریس H' یک ماتریس مرتبه کامل است، A_n' به صورت زیر محاسبه می شود :

$$A' = [H'^T.H']^{-1} H'^T Y \quad (۷)$$

همانطور که ملاحظه می کنید، با این روش پیدا کردن فاز و فرکانس یک مساله غیر خطی و پیدا کردن دامنه یک مساله خطی می باشد. به طور اختصار در این روش در هر تکرار الگوریتم بهینه سازی، ابتدا ω_n' و φ_n' تعیین می شوند. سپس با استفاده از آنها و از رابطه ۴ ماتریس H محاسبه می شود. (زمان های نمونه برداری از سیگنال را می دانیم.) سپس با استفاده از رابطه ۷ ، دامنه ها محاسبه می شوند. استفاده از این رابطه ما را مطمئن می کند که با ω_n' و φ_n' استفاده شده، بهترین مقادیر دامنه تعیین می شوند، به گونه ای که اختلاف Y(t) و Y'(t) به حداقل برسد.

در اینجا تابع هدف را که می خواهیم حداقل شود، به صورت زیر فرض می کنیم :

$$J = \sum_{i=1}^{M} (Y(i) - Y'(i))^2 \quad (۸)$$

بنابراین در هر تکرار الگوریتم بهینه سازی مقادیر ω_n' و φ_n' را بر اساس تابع هدف مطابق رابطه ۸ تغییر می دهد.

۳- الگوریتم به کار رفته

الگوریتم HS مانند سایر الگوریتم ها تکاملی، مبتنی بر تشکیل گروهی از ذرات است، به طوری که هر ذره می تواند یک جواب قابل قبول مساله باشد. موقعیت هر ذره بر اساس یک تابع هدف تغییر داده می شود و در هر تکرار گروه جدیدی از ذرات تشکیل می شود که نسبت به ذرات تکرار قبل در موقعیت بهتری هستند. این عمل تا رسیدن به همگرایی ذرات ادامه می یابد.

۳-۱- الگوریتم HS

مراحل الگوریتم HS به شرح زیر است :

مرحله اول- مقدار دهی اولیه : در این مرحله تعدادی از جواب های قابل قبول به صورت تصادفی انتخاب می شوند. این جواب ها در ماتریسی به نام حافظه هارمونی ذخیره می شوند. هر یک از این جواب ها یک هارمونی نامیده می شوند. برای هر جواب تابع هدف محاسبه می شود. تعداد این جواب ها را اندازه حافظه هارمونی (HMS [۱]) می نامیم. پارامترهای نرخ انتخاب از حافظه هارمونی (HMCR [۲]) و نرخ تنظیم گام (PAR [۳]) نیز باید مقدار دهی شوند. این دو پارامتر به ترتیب جستجوی عمومی و جستجوی موضعی را تنظیم می کنند.

مرحله دوم- ایجاد ماتریس هارمونی جدید : ماتریس هارمونی جدید بر اساس قوانین زیر تشکیل می شود :

- به احتمال HMCR هارمونی جدید از حافظه هارمونی به صورت تصادفی انتخاب می شود.
- به احتمال HMCR × PAR هارمونی جدید از حافظه هارمونی با کمی تغییر انتخاب می شود.
- به احتمال 1-HMCR هارمونی جدید به صورت تصادفی از فضای جستجو انتخاب می شود.

مرحله سوم- نوسازی حافظه هارمونی : تابع هدف برای هارمونی های تولید شده در مرحله قبل محاسبه می شود. این هارمونی های جدید در صورتی که از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی بهتر باشند، جایگزین آن می شوند.

مرحله چهارم- در صورت رسیدن به شرط خاتمه پایان و در غیر این صورت پرش به مرحله دوم .

۳-۲- الگوریتم IHS

در این الگوریتم پارامتر PAR به صورت دینامیکی از معادله زیر تغییر داده می شود :

$$PAR(k) = PAR_{\min} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{k_{\max}} k \quad (۹)$$

در این رابطه k اندیس تکرار را مشخص می کند.

۳-۳- الگوریتم ترکیبی IGHS

بر اساس روش به کار گرفته شده در الگوریتم PSO، که در آن هر ذره که یک جواب ممکن مساله می باشد، موقعیت خود را بر اساس یک بردار سرعت و بهترین موقعیت خودش و بهترین موقعیت کل ذرات

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

تغییر می دهد، در الگوریتم IHS تغییراتی داده شده است. این تغییرات به این شرح است:

- به احتمال HMCR × PAR هارمونی جدید برابر بهترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی قرار داده می شود.
- به احتمال 1-HMCR هارمونی جدید بر اساس یک بردار سرعت و موقعیت بهترین هارمونی در حافظه هارمونی انتخاب می شود. مطابق رابطه زیر :

$$NH = C_1 V + C_2 r(BH - OH) \quad (۱۰)$$

در این رابطه NH، BH و OH به ترتیب نشان دهنده هارمونی جدید، بهترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی و هارمونی انتخابی از حافظه هارمونی می باشد. V بردار سرعت، C_1 و C_2 ضرایب ثابت و r عدد تصادفی بین صفر و یک می باشد.

در حقیقت دو مفهوم از الگوریتم PSO در اینجا مورد استفاده قرار گرفته اند : یکی GBest (ذره ای که بهترین موقعیت را بین تمام ذرات دارد) و دیگری هم نحوه حرکت ذرات در فضای جستجو .

فلوچارت الگوریتم ترکیبی IGHS در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل U(0,1) بیان کننده عدد تصادفی تولید شده بین صفر و یک است.

عملکرد روش ارائه شده تقریبا مستقل از حدس اولیه می‌باشد (که مزیت این روش است). بدین معنی که در شروع می توان هر مقدار دلخواهی برای فاز،دامنه و فرکانس هارمونیک‌ها را انتخاب کرد. اگر این مقادیر از مقادیر واقعی فاصله‌ی زیادی داشته باشند، الگوریتم در ابتدا با سرعت و طول گام زیاد به جواب‌های واقعی نزدیک می‌شود و پس از نزدیک شدن به جواب‌های واقعی با کوچک کردن سرعت و گام جواب‌های دقیق را پیدا می‌کند. در واقع سرعت و میزان جابجایی ذرات در فضای جستجو، تابعی از اختلاف جواب بدست آمده و جواب واقعی است. هرچه این اختلاف بیشتر باشد، سرعت و میزان جابجایی بیشتر است. لذا عملا سرعت و دقت با نقاط اولیه‌ی مختلف، تفاوت چندانی نمی‌کند. بعلاوه در این مقاله نتایج ارائه شده میانگین نتایج ۱۰ بار اجرای برنامه با نقاط اولیه‌ی مختلف (که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند) می‌باشد و لذا می‌توان مطمئن بود که نتایج ارائه شده تقریبا مستقل از نقطه کار هستند. محاسبه‌ی ریاضی حساسیت روش به نقطه‌ی شروع به دلیل وجود مولد اعداد تصادفی دشوار است.

الگوریتم فوق به راحتی با استفاده از یک رایانه‌ی معمولی و یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (که می تواند مشابه مرجع [۹] با میکروکنترلر ATMega32 پیاده سازی شود) قابل پیاده‌سازی است. میزان حافظه و پردازش مورد نیاز نیز به تعداد ذرات، فرکانس بالاترین هارمونیکی که می‌خواهیم تخمین بزنیم و تعداد تکرارها بستگی دارد. لذا در کاربردهای مختلف حجم حافظه و پردازش مورد نیاز متفاوت است. ولی با وجود ریزپردازنده‌ها و FPGAهای پیشرفته‌ی امروزی به در پیاده‌سازی این الگوریتم مشکلی وجود نخواهد داشت.

۴- نتایج شبیه سازی

۴-۱- تخمین هارمونیک های مضرب صحیح

با معلوم بودن فرکانس اصلی سیستم، برای تخمین هارمونیک های مضرب صحیح از فرکانس اصلی، تنها موردی که باید تخمین زده شود دامنه و فاز است و فرکانس هر مولفه برای ما مشخص است. در این حالت هر هارمونی از تعدادی فاز تشکیل شده است. مطابق آنچه در مراجع [۶- ۸] بیان شده است، در اینجا نیز ۵۰ هارمونی در نظر می گیریم. در این مراجع تعداد تکرارها ۱۰۰ می باشد. ولی با الگوریتم پیشنهادی ۵۰ تکرار در نظر می گیریم، چرا که می خواهیم زمان اجرا را نیز بهینه کنیم.

برای ارزیابی کارایی الگوریتم، مطابق مراجع [۶- ۸] از شکل موج ولتاژ یک یکسوساز سه فاز تمام موج استفاده شده است. مولفه های هارمونیکی موجود در این شکل موج در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول (۱): محتوای هارمونیکی سیگنال مورد بررسی

مرتبه هارمونیکی	دامنه (پریونیت)	فاز (درجه)
۱ (۵۰ هرتز)	۰,۹۵	-۲,۰۲
۵ (۲۵۰ هرتز)	۰,۰۹	۸۲,۱
۷ (۳۵۰ هرتز)	۰,۰۴۳	۷,۹
۱۱ (۵۵۰ هرتز)	۰,۰۳	-۱۴۷,۱
۱۳ (۶۵۰ هرتز)	۰,۰۳۳	۱۶۲,۶

نرخ نمونه برداری مطابق مراجع [۶- ۸] برابر ۶۴ نمونه در هر دوره تناوب انتخاب شده است. به سیگنال نمونه برداری شده نویز گاوسی و نویز یکنواخت نیز با نسبت سیگنال به نویز (SNR) ۰، ۱۰ و ۲۰ دسی بل اضافه شده تا تخمین هارمونیک ها به واقعیت نزدیکتر باشد.

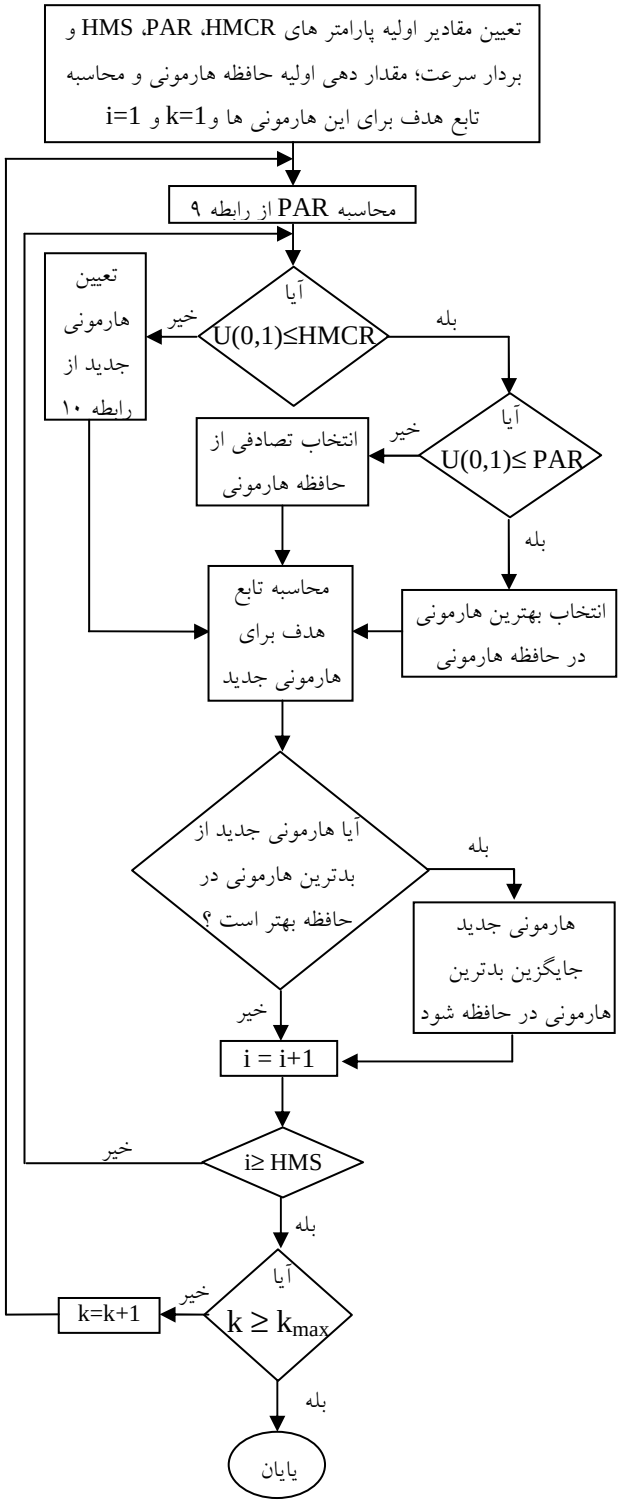
پارامترهای HMCR، PAR_{min}، PAR_{max}، C_1 و C_2 به ترتیب ۰,۸۵، ۰,۱، ۰,۶، ۰,۸ و ۰,۶ انتخاب شده اند. انتخاب این پارامترها با آزمون و خطا انجام شده است. به این ترتیب که همگی پارامترها ثابت و فقط یکی تغییر داده شده است و مقداری از پارامتر که کمترین خطا را ایجاد کرد انتخاب شده است. درصد خطا در کلیه حالت ها از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{64} (Y(i) - Y'(i))^2}{\sum_{i=1}^{64} (Y(i))^2} \times 100 \quad (۱۱)$$

در این رابطه Y(i) و Y'(i) بیان کننده نمونه i ام از سیگنال واقعی و سیگنال تخمین زده شده می باشند.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم ترکیبی IGHS

ابتدا فقط بحث تخمین مولفه اصلی مد نظر قرار گرفته است. نتایج تخمین مولفه اصلی توسط الگوریتم ارائه شده، در جدول ۲ در کنار جواب های ارائه شده در مراجع دیگر آمده است. در این جدول درصد خطای هر روش در حالت های مختلف و زمان اجرا قابل مشاهده است.

دلیل تفاوت جواب های الگوریتم ژنتیک در دو مقاله احتمالا به دلیل استفاده از دو شکل متفاوت از الگوریتم ژنتیک می باشد. و همچنین این طور به نظر می رسد که دو مقاله باید اطلاعات بیشتری راجع به مشخصات نویزهای اضافه شده به سیگنال ارائه دهند. چرا که در یکی نتایج با نویز گاوسی خطای کمتری نسبت به نویز یکنواخت دارد و در دیگری بالعکس. این امکان هم وجود دارد که در یکی از مقالات جابجایی در جدول رخ داده است. در هر صورت هدف ما در اینجا معرفی یک الگوریتم جدید و اثبات کارایی آن در تخمین هارمونیک ها می باشد. این موضوع نیز از جدول ۲ به راحتی استنباط می شود. همان طور که از جدول ۲ پیداست الگوریتم پیشنهادی به لحاظ زمان اجرا در حد چند دهم میلی ثانیه از روش FBF کندتر است ، ولی از طرفی خطای کمتری نسبت به آن دارد. و از طرفی، هم از لحاظ زمان و هم از لحاظ دقت نسبت به نتایج الگوریتم ژنتیک ارائه شده در دو مقاله و همچنین در حالت نویز گاوسی نسبت به روش PSOPC برتری دارد. در شکل های ۲ و ۳ مولفه اصلی سیگنال واقعی و تخمین شده در دو حالت نویز گاوسی و یکنواخت با SNR برابر db ۰ نمایش داده شده است. این شکل ها حاکی از دقت قابل قبول الگوریتم پیشنهادی حتی در حضور نویز db ۰ می باشد.

برای اینکه مقایسه زمان ها ممکن باشد لازم به ذکر است که رایانه استفاده شده در این مقاله با رایانه استفاده شده در مرجع [۸] یکی هستند، ولی رایانه استفاده شده در مرجع [۶] بسیار قویتر از رایانه استفاده شده در اینجا می باشد.

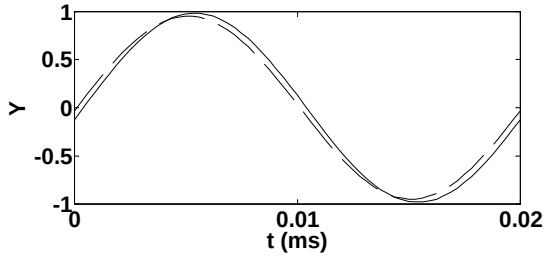
حال تمام مولفه های هارمونیکی را با هم تخمین می زنیم؛ که شامل مولفه اصلی، هارمونی پنجم، هفتم، یازدهم و سیزدهم می باشد. مانند حالت قبل با دو نوع نویز و سه SNR مختلف تخمین سیگنال انجام شده است و نتایج بدست آمده و ارائه شده در سایر مراجع در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است، الگوریتم IGHS در حالت بدون نویز دقت بیشتری از روش FBF دارد ولی در سایر حالات دقت آن کمتر است. نسبت به روش PSOPC در حالت نویز گاوسی برتری کامل و در حالت نویز یکنواخت برتری نسبی دارد. در شکل های ۴ و ۵ مولفه اصلی سیگنال واقعی و تخمین شده در دو حالت نویز گاوسی و یکنواخت با SNR برابر db ۰ نمایش داده شده است. این شکل ها حاکی از دقت قابل قبول الگوریتم پیشنهادی حتی در حضور نویز db ۰ می باشد. در مراجع [۶-۸] با فرض معلوم بودن مولفه های هارمونیکی موجود تخمین فاز و فرکانس انجام شده است. در حالی که در واقع ما نمی دانیم چه مولفه های هارمونیکی در سیگنال وجود دارند. در این مراجع سیگنال حاوی پنج مولفه است و دقیقا پنج مولفه هم تخمین زده می شود. در اینجا برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی برای سیگنال های ناشناخته، ما هارمونیک سوم را هم تخمین می زنیم، در حالی که این هارمونیک در سیگنال وجود ندارد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

جدول (۲): مقایسه خطا و زمان برای تخمین مولفه اصلی

نویز	SNR (db)	GA[8]		GA[6]		FBF[8]		PSOPC [6]		IGHS	
		خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)
بدون نویز	-	۰,۰۱۸۵	۰,۲۳۴	۰,۰۵۷۰	بیشتر از ۴	$۲,۲۸۱\times۱۰^{-۴}$	۰,۰۹۳	$۱,۲۸۱۶\times۱۰^{-۱۷}$	بیشتر از ۳	$۱,۴۹۸۷\times۱۰^{-۱۷}$	۰,۱۰۹۴
یکنواخت	۲۰	۰,۱۲۴۶	۰,۲۳۴	۰,۱۷۰۶	بیشتر از ۴	۰,۲۰۳۹	۰,۰۹۴	۰,۰۰۴۵	بیشتر از ۳	۰,۰۱۰۴	۰,۱۰۹۴
	۱۰	۰,۹۵۴۲	۰,۲۳۴	۰,۲۰۶۸	بیشتر از ۴	۰,۸۷۶۳	۰,۰۹۴	۰,۰۲۶۳	بیشتر از ۳	۰,۱۱۰۵	۰,۱۰۹۴
	۰	۶,۶۱۰۴	۰,۲۳۴	۰,۵۲۰۶	بیشتر از ۴	۶,۶۶۱۷	۰,۱۰۹	۰,۴۵۵۰	بیشتر از ۳	۱,۱۶۰۶	۰,۱۰۹۴
گاوسی	۲۰	۰,۰۲۸۱	۰,۲۳۵	۰,۳۹۹۵	بیشتر از ۴	۰,۰۶۹۵	۰,۱۰۹	۰,۰۵۰۴	بیشتر از ۳	۰,۰۵۱۰	۰,۱۰۹۴
	۱۰	۰,۱۱۴۷	۰,۲۳۵	۲,۳۹۶۲	بیشتر از ۴	۰,۲۹۷۰	۰,۱۰۹	۱,۱۳۱۹	بیشتر از ۳	۰,۲۷۳۸	۰,۱۰۹۴
	۰	۱,۱۴۶۰	۰,۲۱۸	۲,۸۹۱۳	بیشتر از ۴	۱,۱۳۹۴	۰,۱۰۹	۲,۶۳۱۶	بیشتر از ۳	۱,۱۲۹۵	۰,۱۰۹۴

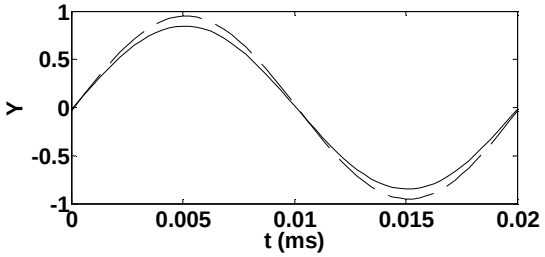
در شرایط بدون نویز، خطا $۸,۱۰۰۲\times۱۰^{-۶}$ و دامنه هارمونیک سوم، $۱,۷۳۱۸\times۱۰^{-۶}$ تخمین زده شده است. همانطور که دیده می شود خطا نسبت به عدد داده شده در جدول ۳ تفاوت زیادی ندارد و دامنه هارمونیک سوم هم بسیار کوچک است.



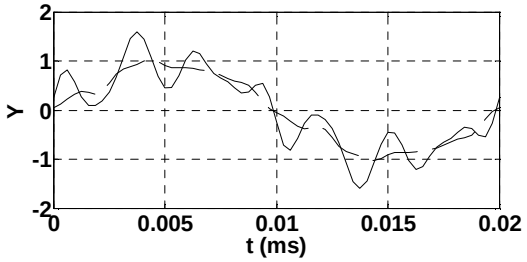
شکل (۲): مولفه اصلی سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور نویز گاوسی db ۰

۴-۲- تخمین هارمونیک میانی و زیر هارمونیک ها

در این حالت به سیگنال معرفی شده در جدول ۱، یک مولفه ۲۰ هرتز با دامنه ۰,۵۰۵ p.u. مطابق مرجع [۶] اضافه می کنیم و در شرایط حضور ۰,۵٪ نویز گاوسی، خطای الگوریتم را محاسبه و با مراجع مقایسه می کنیم. زاویه فاز ۷۵,۶ درجه فرض می شود. تفاوت این حالت با بخش قبل در این است که باید فرکانس مولفه ۲۰ هرتز نیز تخمین زده شود. پس در حقیقت هر هارمونی از ۶ فاز و یک فرکانس تشکیل شده است. نتایج تخمین در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل (۳): مولفه اصلی سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور نویز یکنواخت db ۰



شکل (۴): سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور نویز گاوسی db

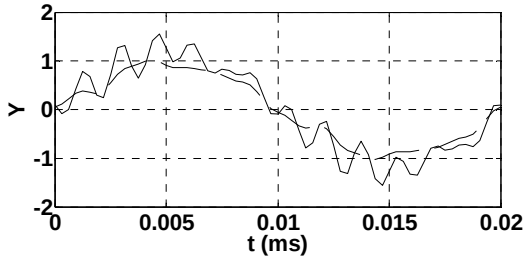
همانطور که از جدول ۴ مشخص است الگوریتم IGHS نسبت به PSOPC ضعیفتر عمل کرده است. در اینجا توجه به دو نکته ضروری است. اول اینکه در مرجع [۶] قبل از تخمین مولفه ۲۰ هرتز، با انجام تبدیل فوریه حدود فرکانس آنرا مشخص می کند و سپس در آن

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

جدول (۳): مقایسه خطا و زمان برای تخمین تمام مولفه های شکل موج

نویز	SNR (db)	GA[8]		GA[6]	DFT[8]	FBF[8]		PSOPC [6]	DFT[6]	IGHS	
		خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	خطا(٪)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)	خطا(٪)	خطا(٪)	خطا(٪)	زمان (ثانیه)
بدون نویز	-	۰,۳۲۰۴	۰,۶۵۷	۰,۰۳۸۹	$۲,۲۸\times۱۰^{-۲۹}$	۰,۱۲۰۷	۰,۳۷۵	$۹,۶۳۵۴\times۱۰^{-۶}$	$۲,۶۴۸۲\times۱۰^{-۲۹}$	$۷,۷۰۳۵\times۱۰^{-۶}$	۰,۳۹۰۶
یکنواخت	۲۰	-	-	۰,۶۸۸۸	-	-	-	۰,۶۳۱۵	۰,۶۳۱۰	۰,۶۰۶۹	۰,۳۹۰۶
	۱۰	۲,۰۲۴۶	۰,۶۴۱	۵,۸۱۰۷	۱۰,۱۰۲۴	۲,۵۵۲۰	۰,۳۷۵	۵,۷۹۸۱	۵,۸۰۱۰	۶,۳۳۵۳	۰,۳۹۰۶
	۰	۲۹,۲۶۸۳	۰,۶۵۶	۴۹,۰۲۷۳	۱۰۱,۰۲۴۲	۱۳,۱۴۰۸	۰,۳۷۵	۴۸,۹۹۰۰	۴۹,۱۶۷۰	۳۰,۵۵۹۳	۰,۳۹۰۶
گاوسی	۲۰	-	-	۱,۷۳۷۵	-	-	-	۱,۶۶۵۳	۱,۶۶۴۸	۰,۶۲۷۵	۰,۳۹۰۶
	۱۰	۱,۰۴۵۹	۰,۶۲۵	۱۲,۱۴۴۳	۴,۵۱۰۹	۰,۵۸۰۳	۰,۳۷۵	۱۱,۸۹۲۸	۱۱,۷۵۵۸	۸,۲۳۵۷	۰,۳۹۰۶
	۰	۷,۵۷۶۲	۰,۶۱۰	۵۴,۹۵۱۴	۴۵,۱۰۸۵	۹,۵۱۸۹	۰,۳۹۰	۵۴,۸۵۰۸	۵۶,۲۸۳۵	۳۲,۱۱۷۶	۰,۳۹۰۶



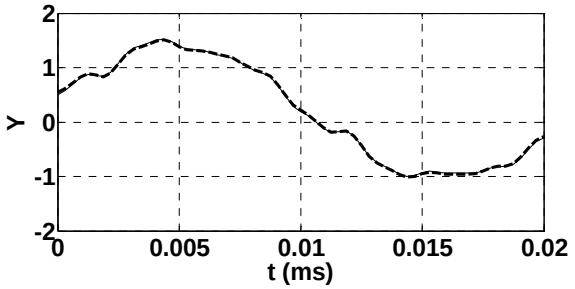
شکل (۵): سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور نویز یکنواخت db ۰

محدوده برای فرکانس جستجو انجام می دهد. و نیاز به تبدیل فوریه خود یک عیب محسوب می شود. و در حقیقت بازه جستجوی فرکانس را بین ۰ تا ۵۰ هرتز محدود می کند. در حالی که در روش معرفی شده در این گزارش در بازه بین ۰ تا ۵۰۰ هرتز برای فرکانس جستجو می شود و نیازی به تبدیل فوریه ندارد. دومین نکته اینکه اگر فرض کنیم سیگنال تخمین زده شده از دید دامنه و فاز هیچ خطایی ندارد و عینا همان دامنه و فازهای سیگنال اصلی تخمین زده شده است و فقط فرکانس ۲۰ هرتز، ۱۹,۹ هرتز تخمین زده شده باشد، در آن صورت واضح است که این تخمین باید خطای به مراتب کمتری ار خطای روش PSOPC داشته باشد (چرا که در روش PSOPC مطابق اعداد مرجع [۶] دامنه ها نیز دارای خطا هستند و فرکانس هم ۱۹,۸۷۹۱ تخمین زده شده است)، در حالی که با محاسبه خطا از رابطه ۱۱ عدد ۰,۰۰۱۲٪ بدست می آید. لذا نحوه محاسبه خطا در این مرجع مبهم است. در شکل ۶ سیگنال واقعی و تخمین زده شده با وجود مولفه ۲۰ هرتز نشان داده شده اند. این دو شکل موج تا حد زیادی بر هم منطبق هستند.

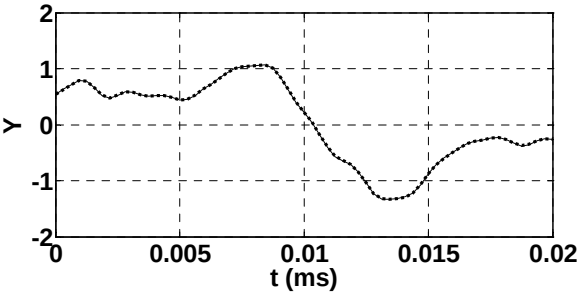
حال فرکانس مولفه ۲۰ هرتز را به ۱۲۰ هرتز تغییر می دهیم و بار دیگر الگوریتم تخمین هارمونیک IGHS را اجرا می کنیم. در این حالت فرکانس تخمین زده شده و خطا به ترتیب ۱۱۹,۹۸۴۶ هرتز و ۰,۰۰۱۵٪ می باشند. در شکل ۷ سیگنال واقعی و تخمین زده شده با وجود مولفه ۱۲۰ هرتز نشان داده شده اند. این دو شکل موج تا حد زیادی بر هم منطبق هستند.

جدول (۴): نتایج تخمین هارمونیک ها با وجود مولفه ۲۰ هرتز

	GA[6]	DFT[6]	PSOPC[6]	IGHS
خطا (٪)	۰,۰۱۴۰	۷,۲۶۰۷	$۱,۴۹۲۷\times۱۰^{-۴}$	۰,۰۰۴۵
فرکانس تخمین زده شده	۲۵,۵۵۸۱	-	۱۹,۸۷۹۱	۱۹,۸۰۱۹



شکل (۶): سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور مولفه ۲۰ هرتز



شکل (۷): سیگنال واقعی (خط چین) و سیگنال تخمین زده شده (خط پر) در حضور مولفه ۱۲۰ هرتز

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۴-۳- بررسی اثر انحراف فرکانس

در این بخش مطابق مرجع [۶]، ابتدا سیگنالی با فرکانس اصلی ۶۰ هرتز و دارای هارمونیک های مرتبه ۲، ۳، ۵، ۷، ۲۳، ۲۵، ۴۷، ۴۹، ۵۹، ۶۱، ۶۴ بعلاوه ۰٫۵٪ نویز گاوسی در نظر گرفته شده است. فرکانس به ۵۹٫۵ هرتز تغییر داده شده است و با نرخ نمونه برداری ۱۲۸ نمونه در هر سیکل از سیگنال نمونه گرفته شده است. سپس با استفاده از این نمونه ها و به کار گیری الگوریتم IGHS مقدار فرکانس و دامنه ها تخمین زده شده است. در مرجع [۶] فرکانس ۵۹٫۵۰۳۲ هرتز تخمین زده شده است و میزان خطا $۳٫۸۱۵۰\times۱۰^{-۴}$ می باشد. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی فرکانس ۵۹٫۵۰۱۰ هرتز تخمین زده شده است و خطا نیز $۶٫۹۶۰۴\times۱۰^{-۴}$ می باشد، که حاکی از دقت بیشتر الگوریتم پیشنهادی در تخمین انحراف فرکانس است. در جدول ۵ مقادیر واقعی دامنه و مقادیر تخمین زده شده رائه شده است.

در حالت دوم سیگنالی با طیف نشان داده شده در جدول ۶ مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت فرکانس معادل ۶۰٫۵ هرتز می باشد. فرکانس نمونه برداری ۹۶۰ هرتز بوده و یک نویز گاوسی مانند قبل به سیگنال اضافه شده است. نتایج تخمین دامنه توسط الگوریتم مرجع [۶] و الگوریتم IGHS در جدول ۶ ارائه شده است. در مرجع [۶] فرکانس ۶۰٫۵۱۱۵ هرتز تخمین زده شده است. با الگوریتم پیشنهادی فرکانس ۶۰٫۴۹۵۶ هرتز تخمین زده شده است. در این حالت چون فرکانس نمونه برداری شرط نایکوئیست را ارضا نمی کند (هارمونیک هشتم دارای فرکانس بیش از دو برابر فرکانس نمونه برداری است)، در تخمین هارمونیک هشتم مشکلاتی وجود دارد. از اعداد جدول های ۵ و ۶ این طور به نظر می رسد که روش پیشنهادی در تخمین دامنه ها در شرایط انحراف فرکانس نسبت به PSOPC دقت کمتری دارد. ولی در تخمین فرکانس دقیقتر است.

جدول (۵): سیگنال مورد استفاده و نتایج در فرکانس ۵۹٫۵ هرتز

مرتبه هارمونیکی	دامنه	نتایج مرجع [۶]	نتایج بدست آمده
۱	۱	۱٫۰۰۰۲	۱٫۰۰۰۶
۲	۰٫۰۷	۰٫۰۷۰۱	۰٫۰۶۹۹
۳	۰٫۰۵	۰٫۰۵۰۱	۰٫۰۴۹۲
۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴۰۲	۰٫۰۳۹۷
۷	۰٫۰۳	۰٫۰۲۹۸	۰٫۰۳۰۱
۲۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱۹۶	۰٫۰۱۹۵
۲۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴۰۱	۰٫۰۳۹۱
۴۷	۰٫۰۳	۰٫۰۳۰۱	۰٫۰۲۹۶
۴۹	۰٫۰۵	۰٫۰۴۹۸	۰٫۰۴۹۹
۵۹	۰٫۰۲	۰٫۰۲۰۲	۰٫۰۱۹۸
۶۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱۱۴	۰٫۰۰۹۳
۶۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰۸۹	۰٫۰۱۰۳

جدول(۶): سیگنال مورد استفاده و نتایج در فرکانس ۶۰٫۵ هرتز

مرتبه هارمونیکی	دامنه	نتایج مرجع [۸]	نتایج بدست آمده
۱	۱	۱٫۰۰۰۱	۱٫۰۰۱
۲	۰٫۰۷	۰٫۰۷۰۰	۰٫۰۶۹۳
۳	۰٫۰۵	۰٫۰۴۹۸	۰٫۰۵۰۰
۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴۰۰	۰٫۰۳۹۱
۷	۰٫۰۳	۰٫۰۳۰۱	۰٫۰۲۹۱
۸	۰٫۰۱	۰٫۰۰۹۹	۰٫۰۱۲۴

۴-۴- بررسی اثر وجود مولفه DC میرا شونده

در این حالت یک مولفه DC میرا شونده به شکل $Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ به سیگنال معرفی شده در جدول ۱ اضافه شده است. ثابت زمانی این مولفه ۰٫۲ ثانیه و مقدار A برابر ۰٫۵، ۱ و ۲ پریونیت فرض شده است. در هر حالت درصد خطای بدست آمده و اعداد ارائه شده در مرجع [۸]، در جدول ۷ آورده شده است.

جدول (۷): درصد خطا در حضور مولفه DC میرا شونده

A	۰٫۵	۱	۲
FBF[8]	۱٫۵۵۰۳	۰٫۶۳۲۱	۳٫۰۱۷۰
IGHS	۰٫۱۳۳۴	۰٫۵۳۳۵	۲٫۱۳۴۴

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای تخمین بهینه هارمونیک ها در سیستم قدرت معرفی گردید. در مقایسه این الگوریتم با سایر روش های موجود مبتنی بر الگوریتم های تکاملی، برتری های روش پیشنهادی نشان داده شد. همچنین حفظ دقت روش پیشنهادی در تخمین هارمونیک ها در شرایط مختلف از جمله وجود انواع نویز، وجود انحراف فرکانس و وجود مولفه DC میرا شونده بررسی شد. هم چنین نشان داده شد که روش مطروحه در تخمین زیرهارمونیک ها و میان هارمونیک ها نیز موثر است.

برای تخمین دامنه هارمونیک ها از روش حداقل مربعات استفاده شد. با این عمل مساله به دو بخش خطی و غیر خطی تفکیک شد. بخش خطی مربوط به تخمین فاز و فرکانس بود که توسط الگوریتم بهینه سازی صورت گرفت و بخش خطی هم شامل پیدا کردن دامنه ها بود.

الگوریتم تکاملی پیشنهادی بر پایه الگوریتم HS ساخته شد. با استفاده از شکل بهبود یافته این الگوریتم و ترکیب آن با دو مفهوم از روش PSO عملکرد آن بهبود داده شد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

زیرنویس‌ها

[1] Harmony memory size
[2] Harmony Memory Considering Rate
[3] Pitch Adjusting Rate

مراجع

[1] X. Zhu, “Exact harmonics and inter-harmonics calculation using adaptive window width,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, October 2007.

[2] A. S. Yilmaz, A. Alkan, and M. H. Asyali, “Applications of parametric spectral estimation methods on detection of power system harmonics,” *Electric Power Systems Research* 78 (2008), pp. 683–693.

[3] M. Sedlacek, and J. Blaska, “Low uncertainty power-line frequency estimation for distorted and noisy harmonic signals,” *Measurement* 35 (2004), pp. 97–107.

[4] M. Joorabian, S. S. Mortazavi, and A. A. Khayyami, “Harmonic estimation in a power system using a novel hybrid Least Squares-Adaline algorithm,” *Electric Power Systems Research* 79 (2009), pp. 107–116.

[5] J. Z. Yang, C. S. Yu, and C. W. Liu, “A new method for power signal harmonic analysis,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, April 2005.

[6] Z. Lu, T. Y. Ji, W. H. Tang, and Q. H. Wu, “Optimal harmonic estimation using a particle swarm optimizer,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, April 2008.

[7] M. Bettayeb and U. Qidwai, “A Hybrid Least Squares-GA-Based Algorithm for Harmonic Estimation,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, April 2003.

[8] S. Mishra, “A Hybrid Least Square-Fuzzy Bacterial Foraging Strategy for Harmonic Estimation,” *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 9, No. 1, February 2005.

[9] S. H. Hosseini and K. Mohammadi, " Design and Implementation of a Kalman Filter-Based Time-Varying Harmonics Analyzer," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (IAEEE)* - Vol.3- No.2- Fall and Winter 2006, pp. 35-42.

[10] K. S. Lee, Z. W. Geem, “A new structural optimization method based on the harmony search algorithm,” *Computers and Structures* 82 (2004), pp. 781–798.

[11] M. G. H. Omran, M. Mahdavi, “Global-best harmony search,” *Applied Mathematics and Computation* 198 (2008), pp. 643–656.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]