

جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک به منظور تخمین حالت هارمونیک با در نظر گرفتن عدم

قطعیت‌های دوگانه در سیستم قدرت

عباس کتابی^۱، محمدرضا شبیبانی^۲، سیدمصطفی نصرت‌آبادی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

aketabi@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی دوره دکترا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران

m.sheibani@ec.iut.ac.ir

۳- دانشجوی دوره دکترا، دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

sm.nosratabadi@eng.ui.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک روش برای جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک به منظور تخمین حالت هارمونیک پیشنهاد شده است. عدم قطعیت‌های هم‌زمان خارج‌شدن یک خط و یک اندازه‌گیر نیز در مسئله جایابی در نظر گرفته شده‌اند. به منظور تخمین حالت هارمونیک مورد نیاز در روش پیشنهادی، از حل یک مسئله بهینه‌سازی به منظور مینیمم‌سازی مجموع مربعات وزن‌دار تفاضل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی استفاده شده است. میانگین مربعات خطای (MSE) اعوجاج هارمونیک کل (THD) در شرایط نرمال سیستم با در نظر گرفتن امکان خارج‌شدن یک خط و یک اندازه‌گیر به عنوان تابع هدف چندهدفه جایابی اندازه‌گیرها انتخاب شده است. مسئله بهینه‌سازی پیش‌رو با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA) مبتنی بر روش پارتو حل شده است. به منظور نمایش توانایی روش پیشنهادی، این روش بر روی شبکه تست ۱۴ شین IEEE پیاده شده است که نتایج شبیه‌سازی، توانایی آن را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر، تخمین حالت هارمونیک، جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک، روش پارتو.

۱- مقدمه^۱

موجب ایجاد مشکلاتی از قبیل افزایش حرارت در تجهیزات، خرابی موتورها و تداخل با مدارهای مخابراتی می‌شوند. از این رو، امروزه تعیین میزان هارمونیک‌های موجود در سیستم‌های قدرت برای انجام مطالعات هارمونیک و جبران آن‌ها، یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در بحث کیفیت توان سیستم‌های قدرت است.

وجود بارهای غیر خطی همانند اینورترها، یک‌سوسازها و دیگر ادوات الکترونیک قدرت باعث تولید آلودگی‌های هارمونیک در سیستم قدرت می‌شود [۱،۲]. این آلودگی‌ها

به دلیل قیمت بالا و همچنین سختی استفاده از تعداد زیاد اندازه‌گیرهای هارمونیک، اندازه‌گیری مستقیم هارمونیک‌ها در تمام شین‌های سیستم قدرت، دشوار است. در واقع، در عمل، تنها تعداد محدودی اندازه‌گیر در سیستم

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

نام نویسنده مسئول: عباس کتابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی

دقیق در شین‌های رؤیت‌پذیر، در شین‌های رؤیت‌ناپذیر نیز با دقت قابل قبولی تخمین را انجام می‌دهد. پس از آن روشی برای جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیکی ارائه شده است. در این روش، عدم قطعیت‌های خارج‌شدن هم‌زمان یک خط و یک اندازه‌گیر نیز لحاظ شده است. به این معنی که الگوریتم پیشنهادی سعی دارد جایابی اندازه‌گیرها را به نحوی انجام دهد که حتی با وجود امکان خارج‌شدن یک اندازه‌گیر و یا یک خط از شبکه، HSE را با دقت خوبی انجام دهد. روش پیشنهادی براساس تکنیک پارتوی^۵ مبتنی بر الگوریتم SOA عمل می‌کند.

۲- تخمین حالت هارمونیکی

تخمین حالت هارمونیکی روشی مفید برای مشخص کردن اطلاعات کامل هارمونیکی شبکه با استفاده از اطلاعات محدود به دست آمده از اندازه‌گیرهای موجود است [۱۵-۱۶]. به دلیل کم بودن تعداد اندازه‌گیرهای هارمونیکی در شبکه، تعداد کمی از حالت‌های سیستم مربوط به کل مراتب هارمونیکی موجود در شبکه به طور مستقیم مشخص است. امروزه اندازه‌گیرهای کیفیت توان^۶ (PQ) به منظور اندازه‌گیری اندازه و فاز ولتاژ و جریان‌های تزریقی هارمونیکی در شین‌های رؤیت‌شده استفاده می‌شوند. در این مقاله، ولتاژ شین‌ها به عنوان حالت‌های سیستم در نظر گرفته می‌شوند.

روش پیشنهادی در این مقاله برای HSE، بر مبنای تخمین حداقل مربعات وزن‌دار است که هدف آن مینیمم کردن جمع مربعات اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی است که به وسیلهٔ واریانس خطاهای اندازه‌گیرهای مربوطه وزن‌دار شده‌اند [۱۷-۲۰]. بخش‌های حقیقی و موهومی ولتاژ مراتب هارمونیکی موجود در سیستم در شین‌های رؤیت‌نشده به عنوان متغیرهای حالت روش پیشنهادی برای HSE تعریف می‌شوند.

تعبیه شده است که با استفاده از اطلاعات حاصل از آن‌ها باید بقیه مقادیر را تخمین زد. به این تکنیک، تخمین حالت هارمونیکی^۱ (HSE) گفته می‌شود. HSE عکس عمل پخش بار هارمونیکی است. در این روش با معلوم بودن برخی از ولتاژ شین‌ها می‌توان ولتاژ بقیه شین‌ها را تعیین کرد [۳-۵]. کیفیت HSE به تعداد و مکان اندازه‌گیرها در سیستم بستگی دارد [۶-۱۰].

Heydt در [۱۱] روشی را برای تخمین حالت هارمونیکی براساس حداقل مربعات غیرخطی هیبرید پیشنهاد داد که به دلیل در نظر گرفتن هزینه در تابع هدف، کل هزینه‌های اندازه‌گیرها مقدار زیادی می‌شد. Farach و Grady در سال ۱۹۹۳ یک روش ترتیبی برای جایابی بهینه اندازه‌گیرها تحت شرایط زیرمعی^۲ برای HSE پیشنهاد دادند [۱۲]. مبنای روش پیشنهادی، تکنیک مینیمم واریانس خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقدار تخمین زده شده بود که به این منظور اطلاعات بار و تولید برای تمام شین‌ها و تمام مراتب هارمونیکی مورد نیاز بودند که این مقادیر همیشه در دسترس نیستند. با توسعه روش فیلتر کالمن یک روش جدید زمان‌بر برای جایابی اندازه‌گیرها برای HSE دینامیکی براساس آنالیز کواریانس خطای سیستم پیشنهاد شد [۱۳]. در [۱۴]، روشی بر مبنای مینیمم‌سازی عدد موقعیت^۳ برای HSE پیشنهاد شد؛ اما نتایج نشان می‌داد که کیفیت تخمین، بهبود نیافته بود. در سالیان اخیر مطالعاتی برای جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیکی صورت گرفته است؛ اما یکی از اشکالات عمده روش‌های پیشنهادی، در نظر گرفتن عدم قطعیت در جایابی اندازه‌گیرهاست.

از همه موارد فوق می‌توان به لزوم بهبود دادن روش‌های جایابی بهینه اندازه‌گیرها برای HSE به منظور تعیین حداقل تعداد اندازه‌گیرها و محل بهینه آن‌ها پی برد. برای افزایش کیفیت نتایج جایابی، یک روش مناسب برای انجام HSE با دقت بالا مورد نیاز است. در این مقاله یک روش بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر^۴ (SOA) برای HSE پیشنهاد شده است. این روش علاوه بر تخمین

می‌شود که تمام اندازه‌گیرهای PQ و خطوط سیستم طبق برنامه‌ریزی اولیه سیستم عمل کنند. در این شرایط، یک روش برای تعیین تعداد و مکان بهینه اندازه‌گیرهای هارمونیک برای انجام یک HSE دقیق پیشنهاد شده است. این روش بر مبنای مینیمم‌سازی میانگین مربعات خطای^۷ اعوجاج هارمونیک کل^۸ در سیستم است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۳-۲۴]:

$$THD_k = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} |V_{hk}|^2}}{|V_k|} \quad (2)$$

که در این رابطه، k تعداد شین، h مرتبه هارمونیک و $|V|$ دامنه ولتاژ است.

تابع هدف جایابی اندازه‌گیرها در حالت نرمال به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$OF_{normal} = \frac{\sum_{k=1}^N (THD_k^{actual} - THD_k^{estimated})^2}{N} \quad (3)$$

که N تعداد شین‌هایی است که اندازه‌گیر PQ روی آن‌ها نصب شده است و THD^{actual} و $THD^{estimated}$ به ترتیب THD ولتاژهای اندازه‌گیری شده هستند. OF تعریف شده در رابطه (۳) متناظر با محل بهینه اندازه‌گیرها در حالت نرمال سیستم است.

۴-۱- جایابی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

تخمین حالت هارمونیک باید توانایی سازگاری با عدم قطعیت‌های محتمل در سیستم، مثل خارج شدن یک خط یا یک اندازه‌گیر در شبکه را داشته باشد [۲۵-۲۶]. در غیر این صورت در اثر بروز این اتفاقات، نتایج تخمین، درخور استفاده نخواهند بود؛ بنابراین در تابع هدف به‌کاررفته در این قسمت، حالت نرمال و حالت دارای عدم قطعیت هم‌زمان به‌منظور جایابی استفاده شده‌اند.

تابع هدف پیشنهادی به صورت زیر در نظر گرفته شده

تابع هدف پیشنهادی برای هر مرتبه هارمونیک به صورت زیر است:

$$J_h = \sum_{i=1}^m \frac{(\text{Real}(A))^2 + (\text{Imag}(A))^2}{\sigma_{hi}^2} \quad (1)$$

که در این رابطه

$$A = I_{hi} - \sum_{j=1}^n y_{h(i,j)} V_{hj}$$

و h مرتبه هارمونیک، m تعداد اندازه‌گیرهای PQ مورد استفاده، n تعداد شین‌ها، I_{hi} بردار جریان تزریقی اندازه‌گیری شده، V_{hi} بردار ولتاژ در شین‌های اندازه‌گیری شده و نامعین، $y_{h(i,j)}$ عناصر ماتریس ادمیتانس مربوط به هارمونیک h و σ_{hi}^2 واریانس آامین اندازه‌گیری است. در رابطه (۱)، σ انحراف استاندارد است که نمایش گر دقت متناظر با اندازه‌گیر استفاده شده مربوطه است. مقدار σ بزرگ نشان‌دهنده دقت نسبتاً پایین اندازه‌گیر متناظر است [۲۱]. قسمت‌های حقیقی و موهومی ولتاژهای هارمونیک در شین‌های رؤیت نشده به وسیله رابطه (۱) و الگوریتم SOA بهبودیافته، تخمین زده می‌شوند.

۳- جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک

هزینه نصب اندازه‌گیرهای PQ در کل سیستم قدرت هنگفت است؛ بنابراین تعداد این اندازه‌گیرها در سیستم و در نتیجه تعداد شین‌های رؤیت شده محدود است [۲۲]. از طرف دیگر، کیفیت تخمین‌های حاصل از HSE، تابعی از تعداد و موقعیت اندازه‌گیرهای PQ مورد استفاده در سیستم است؛ بنابراین باید یک روش بهینه برای جایابی این اندازه‌گیرها در سیستم پیشنهاد کرد. در این مقاله جایابی اندازه‌گیرهای PQ در حالت نرمال سیستم و با وجود عدم قطعیت به صورت زیر انجام گرفته است:

۴- جایابی در حالت نرمال

در این مقاله حالت نرمال سیستم به حالتی از آن اطلاق

است:

$$\begin{aligned} f_1 &= OF_{Normal} \\ \min f_2 &= OF_{s.m.c} \\ f_3 &= OF_{s.l.c} \end{aligned} \quad (4)$$

نامیده می‌شوند عمل می‌کند. اعضای این جمعیت، جستجوگر نامیده می‌شوند. به منظور اضافه کردن یک جزء اجتماعی برای اشتراک اجتماعی اطلاعات، برای هر جستجوگر یک همسایه تعریف می‌شود [۲۹-۲۷].

در SOA، یک مسیر جستجوی $d_{ij}(t)$ و یک طول گام $\alpha_{ij}(t)$ جداگانه برای هر جستجوگر i در هر بعد j برای هر گام زمانی t محاسبه می‌شود که $\alpha_{ij}(t) \geq 0$ و $d_{ij}(t) \in \{-1, 0, 1\}$ است. $d_{ij}(t) = 1$ به این معنی است که i امین جستجوگر به سمت مسیر مثبت محور مختصات روی بعد j پیش می‌رود. $d_{ij}(t) = -1$ به این معنی است که جستجوگر به سمت مسیر منفی می‌رود و $d_{ij}(t) = 0$ نشان‌دهنده آن است که جستجوگر در موقعیت قبلی باقی می‌ماند. برای هر جستجوگر i ($1 \leq i \leq s$) که s اندازه جمعیت است) موقعیت روی هر بعد j ($1 \leq j \leq D$) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \alpha_{ij}(t)d_{ij}(t) \quad (5)$$

به این دلیل که زیر جمعیت‌ها به وسیله اطلاعات خودشان جستجو می‌کنند و ممکن است به سادگی به نقاط بهینه محلی همگرا شوند. برای جلوگیری از این شرایط، موقعیت بدترین جستجوگرهای $k-1$ هر زیرجمعیت با بهترین آن‌ها، در هر $k-1$ زیرجمعیت دیگر با استفاده از اپراتور تقاطع دوجمله‌ای مربوط ترکیب می‌شوند. در این صورت:

$$x_{k_n j, worst} = \begin{cases} x_{l_j, best}, & \text{if } R_j \leq 0.5 \\ x_{k_n j, worst}, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

که R_j یک عدد حقیقی تصادفی یکنواخت در بازه $[0, 1]$ ، $x_{k_n j, worst}$ مربوط به z امین بعد n امین بدترین موقعیت در k امین زیرجمعیت است. $x_{l_j, best}$ ، z امین بعد بهترین موقعیت در l امین زیرجمعیت با $k \neq l$ ، $k = 1, 2, \dots, K-1$ ، $n, l, k = 1, 2, \dots, K-1$ است [۲۸].

که در این رابطه

$$OF_{s.m.c} = \left(\frac{\sum_{K=1}^{N_{meter}} OF_{Normal}^{k^{th} lost meter}}{N_{meter}} \right)$$

و

$$OF_{s.l.c} = \left(\frac{\sum_{K=1}^{N_{Line}} OF_{Normal}^{K^{th} lost line}}{N_{Line}} \right)$$

N_{meter} تعداد اندازه‌گیرهای PQ شبکه،

$OF_{normal}^{k^{th} lost meter}$ مقدار OF_{normal} زمان ازدست‌رفتن

k امین اندازه‌گیر است. برای به دست آوردن f_2 با

از دست رفتن یک اندازه‌گیر، OF_{normal} با استفاده از

اندازه‌گیرهای باقیمانده تعیین می‌شود. همچنین N_{line} تعداد

خطوط سیستم، $OF_{normal}^{K^{th} lost line}$ مقدار OF_{normal} در زمان

خارج شدن k امین خط است. برای به دست آوردن f_3 با

از دست رفتن یک خط، OF_{normal} با استفاده از توپولوژی

جدید تعیین می‌شود. تابع هدف آورده شده در رابطه (۴)

چند هدفه^۹ است. در این مقاله از روش پارتوی مبتنی بر

الگوریتم SOA برای مینیمم‌سازی این تابع هدف استفاده

شده است.

۵- الگوریتم بهینه‌سازی SOA

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA) یک الگوریتم

هوشمند نسبتاً جدید است که برای یافتن پاسخ‌های بهینه

مسائل عددی و کیفی پیچیده استفاده می‌شود. مبنای عملکرد

این روش شبیه‌سازی، عمل جستجو توسط انسان است

[۲۷].

این الگوریتم روی یک تعداد پاسخ که جمعیت جستجو

۱-۵- مسیر جستجو

در SOA، مسیر جستجوی هر جستجوگر براساس یک درجه‌بندی تجربی به وسیله مقایسه موقعیت‌های کنونی جستجوگر با موقعیت قبلی آن یا همسایه‌ها مشخص می‌شود.

درجه‌بندی تجربی به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\bar{d}_{i,ego}(t) = \text{sign}(\bar{p}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (7)$$

$$\bar{d}_{i,alt_1}(t) = \text{sign}(\bar{g}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (8)$$

$$\bar{d}_{i,alt_2}(t) = \text{sign}(\bar{l}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (9)$$

که $\bar{d}_{i,ego}(t)$ جهت خودپسندانه، $\bar{d}_{i,alt_1}(t)$ و $\bar{d}_{i,alt_2}(t)$ جهات نوع دوستانه هر جستجوگر i ، $\bar{p}_{i,best}(t)$ ، $\bar{g}_{i,best}(t)$ و $\bar{l}_{i,best}(t)$ به ترتیب بهترین موقعیت قبلی شخصی، بهترین موقعیت قبلی همسایه‌ها و بهترین موقعیت کنونی همسایه‌ها هستند. $\text{sign}(\cdot)$ تابع علامت هر بعد از بردار ورودی و $\bar{x}_i(t) = [\bar{x}_{i1}, \bar{x}_{i2}, \dots, \bar{x}_{iD}]$ موقعیت نامین جستجوگر در زمان t را نشان می‌دهد [۲۷].

۲-۵- طول گام

در SOA از یک سیستم فازی برای شبیه‌سازی رفتار جستجوی انسان استفاده می‌شود. در این الگوریتم، مقادیر هدف همه جستجوگرها به صورت کاهشی مرتب شده است و رشته‌ای از اعداد از ۱ تا s به عنوان ورودی منطق فازی استفاده می‌شوند.

برای به دست آوردن طول گام در ابتدا:

$$\mu_i = \mu_{\max} - \frac{s - I_i}{s - 1} (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \quad (10)$$

محاسبه می‌شود، که I_i تعداد توالی $\bar{x}_i(t)$ پس از مرتب کردن مقادیر هدف و μ_{\max} ماکزیم مقدار درجه عضویت است که باید کوچک‌تر یا مساوی یک باشد. تابع عضویت Bell با $\mu(x) = e^{-x^2/2\delta^2}$ به عنوان قسمت کنش

منطق فازی استفاده می‌شود. $\bar{\delta}$ پارامتر تابع عضویت Bell

است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\delta} = \omega \cdot \text{abs}(\bar{x}_{best} - \bar{x}_{rand}) \quad (11)$$

پارامتر ω به این منظور استفاده می‌شود که طول گام با گذر زمان کاهش یابد؛ بدین معنی که دقت جستجو افزایش پیدا کند.

در نهایت طول گام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{ij} = \delta_j \sqrt{-\ln(\mu_{ij})} \quad (12)$$

که در این رابطه

$$\mu_{ij} = \text{RAND}(\mu_i, 1)$$

است [۲۷].

۶- روش پارتو

بسیاری از مسائل دنیای واقعی با بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف مواجه هستند که این توابع در بیشتر موارد، هم واحد نبوده‌اند و با یکدیگر در تضاد هستند. بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف متضاد، به جای رسیدن به یک جواب منحصر به فرد منجر به ایجاد یک مجموعه جواب بهینه می‌شود. دلیل پذیرفتنی بودن تمامی نقاط مجموعه جواب، آن است که با در نظر گرفتن همه توابع هدف، هیچ‌یک نمی‌توانند بر دیگری برتری داشته باشند. این جواب‌های بهینه با عنوان مجموعه جواب بهینه پارتو^{۱۰} شناخته می‌شوند [۳۰-۳۲].

به منظور تشریح کامل این روش، فرض شده است که هدف، برآورده کردن هم‌زمان دو تابع هدف f_1 و f_2 است. این روش، بهینه‌سازی را هم‌زمان به صورت جداگانه برای دو تابع هدف انجام می‌دهد و در هر مرحله بین جواب‌های به دست آمده از نتایج دو مسئله بهینه‌سازی مقایسه می‌شود و تعدادی از جواب‌ها را حذف می‌کنند. این کار به این صورت انجام می‌شود که به تمام جواب‌های به دست آمده، یک نقطه در دستگاه مختصات مجموعه پاسخ‌ها طبق شکل

جمعیت SOA، به روز می‌شوند. این فرآیند به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. در نهایت بهترین پاسخ‌ها در میان مجموعه پاسخ‌های پارتو انتخاب می‌شوند.

۶-۲- تعیین پارامترهای SOA استفاده شده در

روش پیشنهادی

برای جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک به منظور HSE، با فرض آنکه M مرتبه هارمونیک در سیستم وجود دارد، $M+1$ الگوریتم SOA استفاده می‌شود. M الگوریتم SOA به تخمین حالت هارمونیک و یک الگوریتم به جایابی اندازه‌گیرهای PQ می‌پردازند. در مسئله HSE، تعداد متغیرهای حالت، دو برابر تعداد شین‌های رؤیت نشده است؛ زیرا که در روش پیشنهادی به این منظور، هر دو بخش حقیقی و موهومی ولتاژ شین‌های رؤیت نشده تخمین زده می‌شوند. برای مشخص کردن حضور و یا عدم حضور اندازه‌گیر در هر شین، به ترتیب، مقادیر یک و صفر به عنوان متغیرهای حالت در الگوریتم جایابی انتخاب می‌شوند. به منظور جستجوی مناسب‌تر، جمعیت به صورت تصادفی به $k=3$ زیرجمعیت تقسیم‌بندی شده است.

برای مقادردهی اولیه موقعیت جستجوگرها، در الگوریتم HSE، حدود بالا و پایین متغیرهای حالت، مورد نیاز است که به صورت زیر مقادردهی شده‌اند:

$$V^{\max} = 1.05 \times V^{\text{nominal}}$$

$$V^{\min} = 0.95 \times V^{\text{nominal}}$$

انحراف معیار (σ) اندازه‌گیرهای PQ، مورد استفاده

برابر 0.01 pu در نظر گرفته شده است. تنظیمات دیگر

الگوریتم SOA مورد استفاده به صورت $\omega = 0.9$ ، $\mu = 0.97$ ، $\mu_{\min} = 0.0111$ و $\mu_{\max} = 0.97$ در نظر

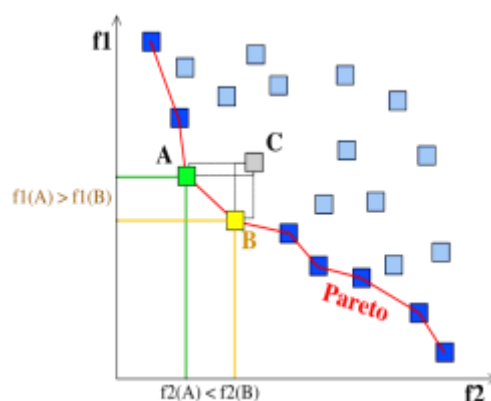
گرفته شده‌اند. همان‌گونه که در فلوچارت نیز نشان داده

شده است، در هر تکرار، تعدادی شین با استفاده از

الگوریتم جایابی پیشنهاد می‌شود و پس از آن، HSE برای

مکان‌های پیشنهادی انجام می‌گیرد.

(۱) تعلق می‌گیرد. به این ترتیب که برای هر کدام از جواب‌های مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف f_1 ، f_2 مربوط به آن نقطه و برای هر کدام از جواب‌های مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف f_1 ، f_2 مربوطه محاسبه می‌شود. پس از آن، مقایسه‌ای بین جواب‌های مسائل هم‌زمان (نقاط به دست آمده در صفحه مختصات $f_1 - f_2$) انجام می‌شود و تعدادی از پاسخ‌ها حذف می‌شوند. طبق این روش، شرط حذف شدن نقطه C توسط نقطه A آن است که $f_1(A) < f_1(C)$ و $f_2(A) < f_2(C)$. در این صورت نقطه A نسبت به نقطه C هم به منظور برآورده کردن f_1 و هم f_2 مناسب‌تر است؛ اما همان‌گونه که از شکل نیز مشخص است نقاط A و B یکدیگر را حذف نمی‌کنند؛ زیرا نقطه A تابع f_2 و نقطه B تابع f_1 را بهتر برآورده می‌کنند؛ بنابراین منحنی حاصل، پاسخ‌های باقیمانده و حذف نشده را نشان می‌دهد که دسته جواب‌های حاصل از روش پارتو نامیده می‌شوند. بسته به نظر کاربر مبنی بر میزان اهمیت بیشتر هر کدام از توابع f_1 و یا f_2 می‌توان بهترین پاسخ را بین این نقاط انتخاب کرد.



شکل (۱): دسته پاسخ‌های پارتو

۶-۱- الگوریتم SOA مبتنی بر روش پارتو

فلوچارت روش پیشنهادی به منظور جایابی اندازه‌گیرها

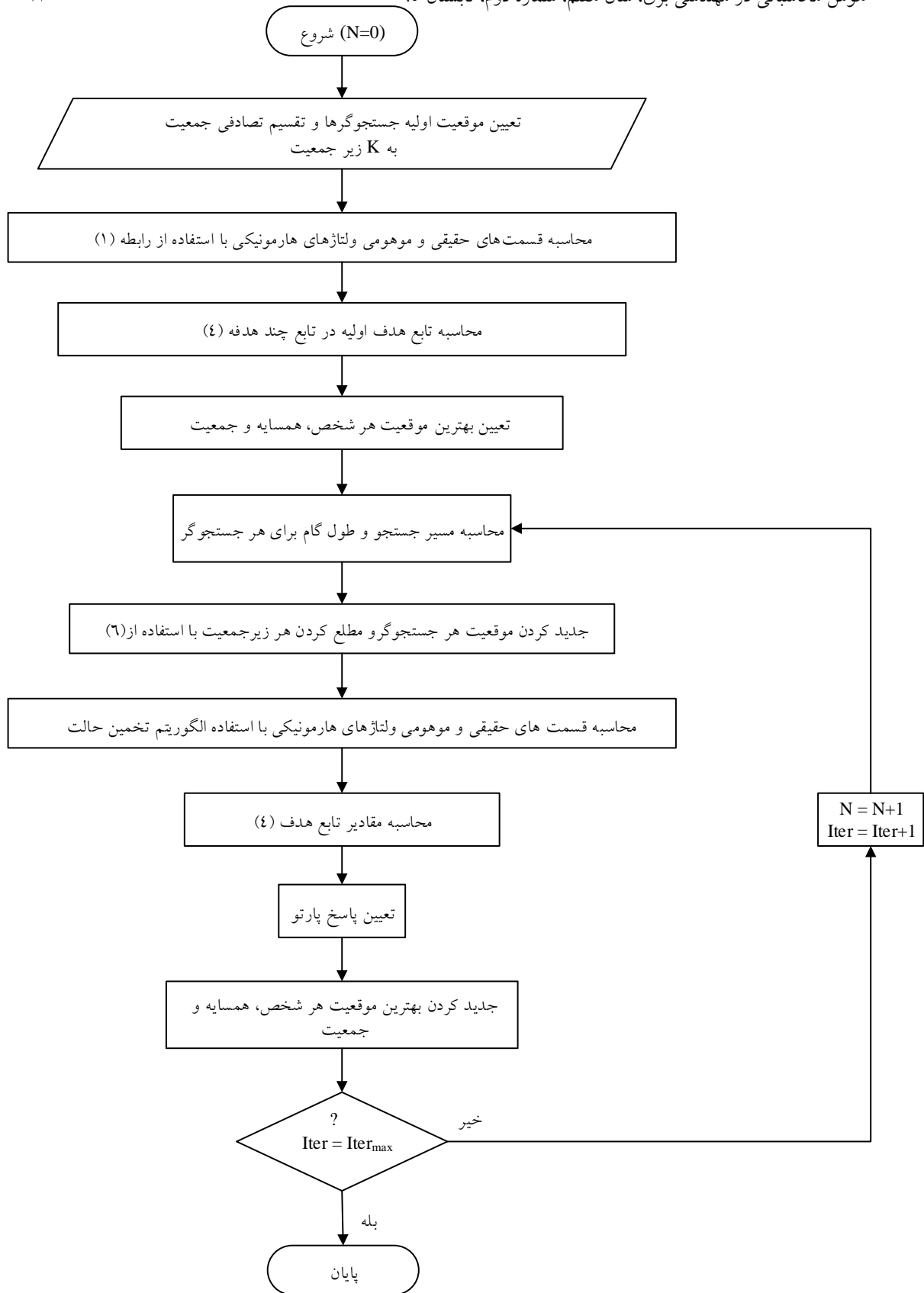
در شکل (۲) نمایش داده شده است. در گام اول، مقادردهی

اولیه الگوریتم SOA، انجام شده است. هر کدام از توابع

f_1 ، f_2 و f_3 با استفاده از جمعیت اولیه در تکرار اول

تعیین می‌شوند. سپس یک مجموعه تعداد از پاسخ‌های اولیه

با استفاده از روش پارتو انتخاب می‌شوند. پس از آن،

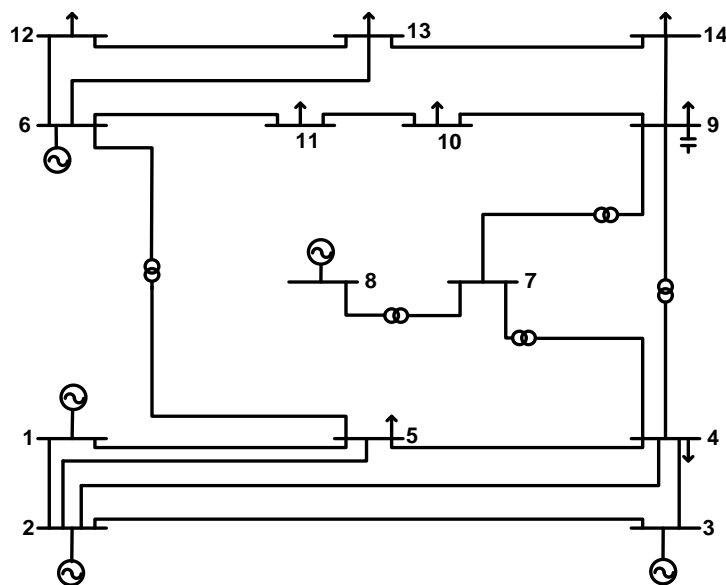


شکل (۲): فلوچارت پیشنهادی برای جایابی اندازه گیرها

۷- نتایج شبیه‌سازی‌ها

است که نتایج در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول، بهینه‌ترین مکان‌ها برای تعیین دستگاه‌های اندازه‌گیری برای HSE مشخص شده‌اند. برای مثال اگر ۴ اندازه‌گیر در دسترس باشد، شین‌های ۱، ۵، ۱۰ و ۱۱ می‌توانند بهترین مکان‌ها برای نصب آن‌ها باشند. از طرف دیگر، با استفاده از نتایج به دست آمده، با تعیین میزان دقت قابل قبول برای تخمین، می‌توان حداقل اندازه‌گیر لازم و محل آن‌ها را در سیستم مشخص کرد. برای مثال اگر بیشترین OF_{min} قابل قبول از نظر یک کاربر 4×10^{-7} باشد، با توجه به نتایج به دست آمده، نصب ۵ اندازه‌گیر در شین‌های ۳، ۴، ۵، ۱۰ و ۱۱ خروجی الگوریتم پیشنهادی برای جایابی است. در ادامه جایابی، اندازه‌گیرها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های خارج‌شدن یک اندازه‌گیر و یک خط برای شبکه تست انجام گرفته است.

در این مقاله سیستم ۱۴ شینه استاندارد IEEE نشان داده شده در شکل (۳) به منظور شبیه‌سازی استفاده شده است [۳۳]. در ابتدا تخمین حالت برای شبکه تست انجام شده است. به این منظور، ۴ اندازه‌گیر در شین‌های ۷، ۹، ۱۰ و ۱۴ نصب شده و نتایج تخمین در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در شین‌های رؤیت‌پذیر، تخمین با دقت زیادی انجام شده است. در شین‌های رؤیت‌ناپذیر (۱۳، ۶، ۵، ۳، ۲، ۱) نیز با دقت قابل قبولی این عمل صورت گرفته است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، الگوریتم HSE پیشنهادی دقت زیادی داشته و می‌تواند به عنوان روشی مناسب در مسئله جایابی استفاده شود. در ادامه شبیه‌سازی‌ها، در حالت نرمال سیستم و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت، جایابی اندازه‌گیرها صورت گرفته



شکل (۳): سیستم ۱۴ شینه استاندارد IEEE

می‌رسد، محاسبه مجموع وزن دار توابع هدف در نقاط موجود در مجموع پاسخ‌های پارتو با استفاده از رابطه زیر است:

$$F(A) = W_{Normal} \times OF_{Normal}^A + W_{S.L.C} \times OF_{S.L.C}^A + W_{S.M.C} \times OF_{S.M.C}^A \quad (13)$$

وزن‌های $W_{S.L.C}$ و $W_{S.M.C}$ ، به ترتیب نشان‌دهنده اولویت اهمیت هر یک از شرایط حالت نرمال سیستم، خارج‌شدن یک خط و یک اندازه‌گیر است. در واقع،

به منظور رسیدن به بهترین پاسخ‌ها، ابتدا با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نقاط بهینه پارتو برای تعداد مختلف اندازه‌گیر به دست آمده است که در شکل (۴) برای نمونه نقاط پیشنهادی توسط الگوریتم برای تعداد ۴ اندازه‌گیر نشان داده شده است. انتخاب بهترین جواب بین مجموعه پاسخ‌های پارتو، به درجه اهمیت هر کدام از توابع هدف بستگی دارد. ساده‌ترین روشی که برای انتخاب بهترین جواب به نظر

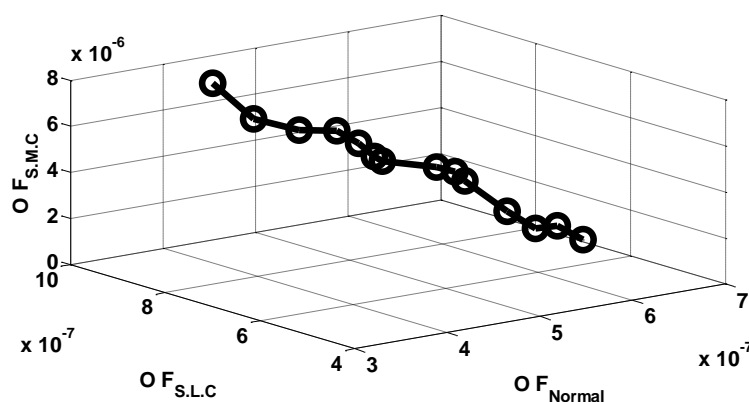
در این روش برای تمام نقاط موجود در مجموعه پاسخ‌های پارتو مقدار مجموع وزن‌دار توابع محاسبه می‌شود و هر کدام از نقاط که کمترین مقدار F را داشته باشد به‌عنوان بهترین پاسخ انتخاب می‌شود؛ اما مشکل این روش آن است که اگر حدود عددی توابع هدف یکسان نباشد، جمع وزن‌دار آن‌ها بی‌معنی خواهد بود.

جدول (۱): نتایج HSE با استفاده از روش پیشنهادی

شین	مقدار واقعی THD%	مقدار تخمینی THD%	درصد خطای نسبی تخمین
۱	۱/۷۸۲	۱/۷۶۱	۱/۱۷۸
۲	۱/۹۸۳	۱/۹۲۲۷	۳/۰۴۱
۳	۲/۴۰۱	۲/۳۰۸۱	۳/۸۶۹
۴	۳/۷۶۱۲	۳/۷۶۱۲	۰
۵	۶/۳۳۱	۶/۱۱۷۲	۱/۷۲۱
۶	۱/۹۸۸۲	۱/۹۲۸۷	۲/۹۹۳
۷	۵/۲۱۱۵	۵/۲۱۱۵	۰
۸	۱/۳۳۲۱	۱/۳۳۲۱	۰
۹	۱/۵۳۶۲	۱/۵۳۶۲	۰
۱۰	۲/۹۷۲۲	۲/۹۷۲۲	۰
۱۱	۵/۲۳۱۱	۵/۲۳۱۱	۰
۱۲	۲/۳۲۶۳	۲/۳۲۶۳	۰
۱۳	۵/۶۶۲۷	۷/۲۳۱۳	۴/۴۲۶
۱۴	۶/۴۳۳۲	۶/۴۳۳۲	۰

جدول (۲): نتایج جایابی اندازه‌گیرها در حالت نرمال

تعداد اندازه‌گیرهای PQ	مکان اندازه‌گیرهای PQ	OFmin
۷	۳،۴،۵،۷،۱۱،۱۲،۱۴	۰
۶	۳،۴،۷،۱۰،۱۱،۱۴	7×10^{-7}
۵	۳،۴،۵،۱۰،۱۱	9×10^{-7}
۴	۱،۵،۱۰،۱۱	4×10^{-7}
۳	۶،۱۱،۱۲	1×10^{-6}



شکل (۴): دسته پاسخ‌های پارتو برای ۴ اندازه‌گیر

در این مقاله، روشی برای انتخاب بهترین پاسخ از میان نقاط پارتو با اختصاص دادن وزن‌های دلخواه به هر کدام از

توابع هدف با حدود عددی متفاوت پذیرفتنی است. پس از مقایسه دو نقطه A و B با استفاده از رابطه (۱۳)، با محاسبه $F(A, B)$ و $F(B, A)$ ، اگر $F(A, B) < F(B, A)$ ، نقطه A نسبت به B با توجه به وزن‌های انتخاب‌شده شرایط بهتری خواهد داشت. این مقایسه تا جایی ادامه می‌یابد که بهترین پاسخ به دست آید. در جدول (۳) بهترین پاسخ‌ها برای تعداد مختلف اندازه‌گیر آورده شده است. با استفاده از این جدول نیز می‌توان بهترین مکان برای نصب اندازه‌گیرها با معلوم بودن تعداد، آن‌ها را معلوم کرد. همچنین در صورتی که کاربر OF‌های خاصی را مد نظر داشته باشد، می‌توان حداقل تعداد اندازه‌گیر و مکان آن‌ها را تعیین کرد.

توابع هدف پیشنهاد شده است. در این روش نقاط مختلف پارتو به صورت دو به دو مقایسه می‌شوند. مقایسه بین دو نقطه دلخواه A و B موجود در دسته پاسخ پارتو با استفاده از رابطه زیر صورت می‌گیرد:

$$F(A, B) = W_{Normal} \frac{OF_{Normal}^A - OF_{Normal}^B}{OF_{Normal}^A} + W_{S.L.C} \frac{OF_{S.L.C}^A - OF_{S.L.C}^B}{OF_{S.L.C}^A} + W_{S.M.C} \frac{OF_{S.M.C}^A - OF_{S.M.C}^B}{OF_{S.M.C}^A}$$

در این رابطه، مجموع وزن‌دار تفاضل نسبی بین توابع هدف محاسبه شده است. در واقع، با نرمالیزه شدن توابع هدف، مشکل موجود در رابطه (۱۲) حل می‌شود و جمع

جدول (۳): نتایج جایابی اندازه‌گیرها با در نظر گرفتن عدم قطعیت

OF _{normal}	OF _{S.M.C}	OF _{S.L.C}	مکان اندازه‌گیرهای PQ	تعداد اندازه‌گیرهای PQ
6×10^{-16}	7×10^{-11}	۰	۱،۲،۴،۷،۹،۱۱،۱۴	۷
$8/8 \times 10^{-11}$	$3/5 \times 10^{-9}$	$5/3 \times 10^{-11}$	۸،۹،۱۳،۱۴،۲،۵	۶
$8/6 \times 10^{-8}$	$3/9 \times 10^{-7}$	$7/1 \times 10^{-8}$	۵،۸،۱۰،۱۱،۱۴	۵
$6/3 \times 10^{-7}$	$9/1 \times 10^{-7}$	$4/6 \times 10^{-7}$	۴،۵،۹،۱۱	۴
$9/1 \times 10^{-7}$	$8/3 \times 10^{-6}$	$7/3 \times 10^{-7}$	۴،۱۱،۱۳	۳

مراجع

- [1] Arrillaga, J., Bradley, D., Bodger, D., "Power System Harmonics," New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [2] Ramesh, L., Choudhury, S. P., Chowdhury, S., Crossley, P. A., "Electrical Power System State Estimation Meter Placement—A Comparative Survey Report," Electric Power Components and Systems, Vol. 36, No. 10, pp. 1115-1129, 2008.
- [3] Madtharad, C., Premrudeepreechacharn, S., Watson, NR, "An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1514-1521, 2005.
- [4] Liang, Z., Ye, H., "Overview on power system harmonic state estimation," Power System Protection and Control, 2010.
- [5] Arruda, E., Kagan, N., Ribeiro, P., "Harmonic Distortion State Estimation Using an Evolutionary Strategy," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 25, No. 2, pp. 831-842, 2010.
- [6] Kumar, A., Das, B., Sharma, J., "Genetic algorithm-based meter placement for static

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای جایابی اندازه‌گیرهای هارمونیک برای تخمین حالت هارمونیک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های خارج‌شدن یک اندازه‌گیر و یک خط به صورت هم‌زمان پیشنهاد شده است. روش مد نظر از الگوریتم‌های SOA و پارتو به این منظور استفاده کرده است. نتایج روش پیشنهادی به منظور HSE دقت نتایج تخمین در شین‌های مختلف حتی در شین‌های رؤیت‌ناپذیر را نشان می‌دهد. در صورت مشخص بودن تعداد اندازه‌گیرهای در دسترس، با استفاده از نتایج حاصل از جایابی اندازه‌گیرها می‌توان بهترین مکان‌ها برای نصب آن‌ها را مشخص کرد. در صورت در نظر داشتن دقت خاصی، از نظر طراح، با توجه به نتایج، می‌توان دست‌کم تعداد اندازه‌گیرهای مورد نیاز و مکان آن‌ها را تعیین کرد. در این مقاله همچنین روشی برای انتخاب بهترین نقطه از میان مجموعه پاسخ‌های پارتو پیشنهاد شده است.

- Meter Placement for Distribution System State Estimation in Presence of Network Parameter Uncertainty,” *IEEE Trans. on Instrumentation and measurement*, Vol. 62, No. 5, pp. 954-962, 2013.
- [20] Biswas, S., Chatterjeeb, A., Goswami, S., “An artificial bee colony-least square algorithm for solving Harmonic Estimation Problems,” *Applied Soft Computing*, Vol. 13, pp. 2343-2355, 2013.
- [21] Ketabi, A., Sheibani, M.R., Nosratabadi, S.M., “Power Quality Meters Placement Using Seeker Optimization Algorithm for Harmonic State Estimation,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 141-149, 2012.
- [22] Sepulchro, W., Brunoro, M., “Harmonic State and Power Flow Estimation in Distribution Systems Using Evolutionary Strategy,” *J control Autom Electr Syst*, Vol. 25, pp. 358-367, 2014.
- [23] Ketabi, A., Nosratabadi, S.M., Sheibani, M.R., “Optimal PMU Placement Based on Mean Square Error Using Differential Evolution Algorithm,” In *IEEE Proc. of the first Power Quality Conference (PQC 2010)*, pp. 1-6, 2010.
- [24] Babaei, E., Hosseini, H., Gharehpetian, G., “Reduction of THD and low order harmonics with symmetrical output current for single-phase ac/ac matrix converters,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 3, pp. 225-235, 2010.
- [25] Rakpenthai, C., Uatrongjit, S., Watson, N., Premrudeepreechacharn, S., “on Harmonic State Estimation of Power System with Uncertain Network Parameters,” *IEEE Trans. Power systems*, Vol. 28, No. 4, pp. 4829-4838, 2013.
- [26] Mazhari, M., Lesani, H., “A New Model for Multi-Objective PMU Placement Considering Actual Worth of Uncertainties Using Cellular Learning Automata,” *ISEE Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1- 16, 2013.
- [27] Dai, C., Zhu, Y., Chen, W., “Seeker optimization algorithm,” in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Y. Wang, Y. Cheung, and H. Liu, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, (2007), pp. 167–176, CIS (2006).
- [28] Dai, C., Zhu, Y., Chen, W., “Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch,” *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1218-1231, 2009.
- [29] Dai, C., Chen, W., Cheng, Z., Li, Q., Jiang, Z., Jia, j., “Seeker optimization algorithm for global optimization: A case study on optimal estimation of harmonic sources,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 1088-1096, 2005.
- [7] Celik, M., Liu, W-H.E., “An incremental measurement placement algorithm for state estimation,” *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 1698-1703, 1995.
- [8] Hajian, M., Ranjbar, A., Amraee, T., Mozafari, B., “Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 28-34, 2011.
- [9] El.Zonkly, A., “Optimal meter placement using genetic algorithm to maintain network observability,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 31, No. 1, pp. 193-198, 2006.
- [10] Kongjeen, Y., Inrawong, P., Buayani, K., Kerdchuen, T., “Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation,” *Energy Procedia*, Vol. 34, pp. 142-147, 2013.
- [11] Heydt, G.T., “Identification of harmonic sources by a state estimation technique,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 569-575, 1989.
- [12] Farach, J. E., Grady, W.M., Arapostathis, A., “An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power system,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1303-1310, 1993.
- [13] Ma, H., Girgis, A., “Identification and tracking of harmonic sources in a power system using Kalman filtering,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1659-1665, 1996.
- [14] Chakphed, M., Watson, N.R., “An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 1514-1521, 2005.
- [15] Du, Z.P., Arrillaga, J., Watson, N.R., “Continuous harmonic state estimation of power systems,” *Proc. IEE Generation, Transmission, Distribution*, pp. 329–336, 2000.
- [16] Meliopoulos, A.P.S., Fan Zhang, S., Zelingher., “Power system harmonic state estimation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, pp. 1701-1709, 1994.
- [17] Grainger, j., Stevenson, W.D., “*Power System Analysis*,” New York: Mc-Graw-Hill, 1994.
- [18] Wood, A.j., Wollenberg, B.F., “*Power Generation, Operation and Control*,” New York: Wiley, 1996.
- [19] Pegoraro, P., Sulis, S., “Robustness-Oriented

- modelling of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC),” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 3, pp. 369-376, 2011.
- [30] Miettinen, K.M., “Nonlinear multiobjective optimization,” Boston: Kluwer Academic Publisher; 1999.
- [31] Ketabi, A., Nosratabadi, S.M., Sheibani, M.R., “Optimal PMU Placement with Uncertainty Using Pareto Method,” *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012, Article ID. 501893, 2012.
- [32] Zhang, W.H., Gao, T., “A min–max method with adaptive weightings for uniformly spaced Pareto optimum points,” *Journal of Computers and Structures*; pp. 1760–1769, 2006.
- [33] Huaiwei, L., “Power system Harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization,” *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 15-23, 2007.

زیر نویس ها

1. Harmonic State Estimation
2. Under determined
3. Condition number
4. Seeker Optimization Algorithm
5. Pareto
6. Power Quality Meter
7. Mean Square Error (MSE)
8. Total Harmonic Distortion (THD)
9. Multi objective
10. Pareto Optimal Solution