

تخصیص بهینه واحدهای اندازه‌گیری جریان در شبکه قدرت با هدف افزایش دقت در محل‌یابی هوشمند خطا

خلیل گرگانی فیروزجاه، استادیار

دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه مازندران - بابلسر - ایران - k.gorgani@umz.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی مبتنی بر حداقل اندازه‌گیری جریان برای محل‌یابی خطا در خطوط انتقال ارائه شده است. این روش، با تکیه بر تئوری تونن در شبکه و محاسبات اتصال کوتاه، نسبت‌های جریانی مناسب را برای طرح مسئله محل‌یابی خطا مورد بررسی قرار داده است. نسبت‌های جریانی مناسب با توجه به کم‌ترین وابستگی به تغییرات امپدانس‌های تونن موجود در ساختار شبکه استخراج می‌گردند. الگوریتم پیشنهادی، توسط سیستم جدول ارجاع، نسبت‌های جریانی در محاسبات غیر برخط را با مقادیر متناظر حاصل از اندازه‌گیری‌ها مقایسه نموده و با تکنیکی مبتنی بر جست‌وجوی معیار شباهت جواب سازگار با مسئله را به‌عنوان محل خطا بیان می‌دارد. تکنیک بهینه‌سازی مورد استفاده برای جست‌وجوی نقاط مانیتورینگ توأم با حداقل اندازه‌گیری جریان، الگوریتم زنبور عسل است. صحت و قابلیت الگوریتم پیشنهادی، در شبکه چندماشینی WSCC ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: محل‌یابی خطا، واحدهای اندازه‌گیری جریان، بهینه‌سازی، معیار شباهت.

Optimal Placement of Current Measurement Units for Accurate and Smart Fault Location Purpose

K. Gorgani Firouzjah, Assistant Professor

Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, Email: k.gorgani@umz.ac.ir

Abstract: This paper presents a fault location technique for transmission lines with minimum current measurement units. The proposed method used proper current ratios to find fault locations based on both Thevenin theory in faulty power networks and calculation of short circuit currents in each branch. These current ratios are extracted based on lowest sensitivity to Thevenin impedance variations of the network. Proposed algorithm compares current ratios in offline calculations with associated values collected by measurements with a lookup table mechanism. A similarity measure algorithm can find location of the fault including line number and the distance. A multi-objective optimization problem using Bees Algorithm (BA) is used to search monitoring points with minimum possible current measurements. Accuracy of the proposed algorithm is evaluated in a widely used multi-machine network of Western Systems Coordinating Council (WSCC).

Keywords: Fault location, current measurement unit, similarity measure.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۳، ۱۳۹۴/۰۱/۲۵، ۱۳۹۴/۰۴/۰۵، ۱۳۹۴/۰۶/۰۴، ۱۳۹۴/۰۷/۰۶ و ۱۳۹۴/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱

نام نویسنده مسئول: خلیل گرگانی فیروزجاه

نشانی نویسنده مسئول: ایران - مازندران - بابلسر - خیابان شهید بهشتی - پردیس دانشگاه مازندران - دانشکده فنی و مهندسی.

فهرست علائم و اختصارات

| | |
|---|---|
| ΔV | تغییرات ولتاژ باس‌ها در مدل تونن شبکه |
| V^o | ولتاژ باس قبل از خطا |
| V^f | ولتاژ باس حین خطا |
| Y_{ij} | ادمیتانس شبکه |
| I_{Fault} | جریان خطا |
| $\Delta I_{branch i}$ | جریان در خط Δ ام در شبکه تونن |
| $f_i(I_{Fault})$ | تابع ارتباط‌دهنده جریان در خط Δ ام و جریان خطا |
| x, k | محل خطا از باس Δ ام در خط بین باس Δ ام و k ام |
| M_k^l | ماتریس نسبت جریان خطوط به هم |
| C_k^l | ماتریس نسبت جریان خطوط به هم (اصلاح شده M_k^l) |
| $[C_{k\%}^{branch i}]$ | ماتریس نسبت جریان خطوط به هم به ازای خطا در خط Δ ام و در فاصله $k\%$ از باس مبدأ |
| VarMatrix | ماتریس وردایی نسبت‌های جریان باس‌ها |
| $Var\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right), Mean\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right)$ | وردایی و متوسط نسبت جریان دو خط به هم متأثر از تغییرات امیدانس تونن |
| $[CurrentRatio_{k\%}^{branch i}]^{Ref}$ | ماتریس مرجع نسبت جریان خطوط به ازای خطا در خط Δ ام و در فاصله $k\%$ از باس مبدأ |
| $[CurrentRatio]^{Test}$ | ماتریس نسبت‌های جریانی اندازه‌گیری شده |
| N_{branch} | تعداد خطوط در شبکه |
| $C_{WrongFaultyLinesEst}$ | دفعات تخمین غلط خط خطا دار شده |
| $C_{MaxFaultLocationError}$ | بیش‌ترین خطای تخمین فاصله خطا |
| $C_{\sum MonitoringBus}$ | هزینه مرتبط با تعداد باس‌های مانیتورینگ |
| $C_{\sum MeasurementCurrent}$ | هزینه مرتبط با تعداد جریان‌های اندازه‌گیری شده |
| $[CurrentRatio]^{Candidate}$ | نسبت‌های جریانی منتخب با ترتیب کم‌ترین استقلال نسبت به تغییرات مقادیر امیدانس تونن |
| $[CurrentRatio]^{Selected}$ | نسبت‌های جریانی بهینه |
| $C_{MaxCurrentRatioVariance}$ | هزینه مرتبط با وابستگی نسبت‌های جریانی به تغییرات امیدانس تونن |
| W_{m1} | وزن تعداد باس‌های مانیتورینگ |
| W_{m2} | وزن تعداد جریان‌های اندازه‌گیری شده |
| W_{m3} | وزن وابستگی نسبت‌های جریانی به امیدانس تونن |
| $C_{Measurement}$ | هزینه اندازه‌گیری |
| $C_{EstimationError}$ | هزینه تخمین محل خطا با کم‌ترین خطا |
| C_{Total} | تابع هزینه نهایی |
| W_1 | وزن هزینه تخمین |
| W_2 | وزن هزینه اندازه‌گیری |
| Str | رشته باینری بیانگر حضور هر یک از نسبت‌های جریانی منتخب در فرآیند تخمین |

۱ - مقدمه

پیشرفت روزافزون صنعت برق و اهمیت صرفه اقتصادی در چرخه تولید و تحویل به مشتری توأم با کیفیت و پیوستگی، لزوم بازگردانی سریع شبکه معیوب را از طریق محل یابی خطا ضروری می‌نمایند. اطلاعات مورد استفاده در فرآیند محل‌یابی خطا از جمله عوامل تعیین‌کننده روش محل‌یابی است. سلسله مراتب اندازه‌گیری در فرایند حفاظت و محل‌یابی خطا از طریق ترانسفورماتورهای حفاظتی تکمیل می‌گردد. به دلیل محدودیت ساختاری، ترانسفورماتور جریان CT^1 و ولتاژ CVT^2

دارای رفتار دینامیکی بوده و سوءعمل رله‌های حفاظتی متصل به آن‌ها ممکن می‌گردد [۱].

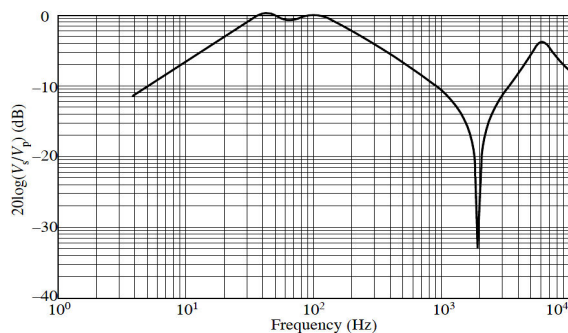
مطابق تحقیقی که در [۲] برای بهبود عملکرد رله‌های دیستانس انجام شده است، فاصله‌یابی در خطوط انتقال کوتاه با مشکلات حادث‌تری روبرو است. این مشکلات ناشی از اثر مقاومت خطا و کوچکی ولتاژ محل نمونه‌برداری و در نتیجه افزایش خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ می‌باشند. البته با صرف‌نظر از رفتار ایده‌آل سیستم‌های اندازه‌گیری و دقت روش‌های ولتاژی و جریانی، توسعه روش‌های جدید مستقل از پارامترهای نویزی مغتنم به شمار می‌آیند. در [۳]، با اندازه‌گیری فازوری همزمان ولتاژ و جریان توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری همزمان PMU^3 در پایانه‌های یک شبکه انتقال چندترمینال، با تخمین مدل تونن شبکه در هر پایانه و تشکیل ماتریس امیدانس باس، محل خطا را محاسبه نموده است. در [۴-۷] با بهره‌گیری از تکنیک اندازه‌گیری توسط PMU ، روش‌هایی مستقل از جریان ارائه شده است. هدف روش ارائه‌شده در [۷] محل‌یابی خطا در یک شبکه گسترده با قابلیت محل‌یابی در مرکز دیسپاچینگ بر اساس محل‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری پایه‌ریزی گشته است.

در اکثر روش‌های فوق‌الذکر، بدون در اختیار داشتن معادل تونن شبکه در باس‌های ژنراتوری و تبادلی و تشکیل ماتریس ادمیتانس تونن شبکه معادل، تعیین محل خطا امکان‌پذیر نیست. با فرض معلوم بودن مدل تونن شبکه، اندازه‌گیری در تمامی باس‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل شبکه، کل شبکه را مشاهده‌پذیر می‌نماید. این برنامه، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبوده و در جهت کاهش هزینه کلی آن بایستی اندازه‌گیری از تمامی باس‌ها را به تنها تعداد محدودی از باس‌ها برای مانیتورینگ تقلیل داد [۸]. از سویی، تأثیر مدل تونن و تغییرات آن در جریان خطا انکارناپذیر است. لذا ارائه الگوریتم تعیین محل خطا به‌صورت هوشمند و تنها مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محدود در حفاظت هوشمند شبکه ضرورت می‌یابد. براین اساس، در این مقاله الگوریتمی برای محل‌یابی خطا بر اساس حداقل نقاط اندازه‌گیری جریان معرفی می‌گردد. راهکار محل‌یابی خطا با کم‌ترین حساسیت به اطلاعات اندازه‌گیری شده، در الگوریتمی مستقل از اندازه‌گیری ولتاژ در شرایط خطا است. سهم اصلی این پیشنهاد را می‌توان در ارائه محل‌یاب خطا با قابلیت‌های ذیل بیان نمود:

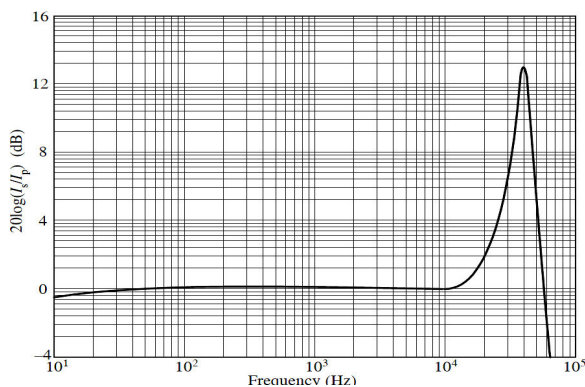
- حداقل نقاط موردنیاز برای اندازه‌گیری منحصرأً جریان
- مستقل از اندازه‌گیری ولتاژ و حالت گذرای ولتاژ متأثر از خطا
- عدم نیاز به مدل بار و ژنراتور و به‌طور کلی امیدانس تونن شبکه

به‌منظور تدوین و پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، در بخش دوم مقاله بیان مسئله و انگیزه‌های موجود در لزوم ارائه روشی جدید مطرح می‌گردد. بخش سوم به فرمول‌بندی و بیان روابط در سیستم قدرت به‌صورت عام خواهد پرداخت. همچنین فلوچارت مناسبی از الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده و فرآیند تخمین محل خطا به‌صورت مشروح مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش چهارم، شبیه‌سازی موارد مورد بحث و

مستقل از ولتاژ و با حذف معادلات وابسته به جریان شبکه در حین خطا روشی مستقل از جریان ارائه نمود. در غیر این صورت، بایستی از روش‌های پیچیده‌ای برای جبران پدیده گذرا و اشباع CT و تأثیر آن‌ها در تخمین محل وقوع خطا بهره‌گیری نمود. به دلیل محدودیت‌های ساختاری، ترانسفورماتورهای حفاظتی جریان CT و ولتاژ CVT دارای رفتارهای دینامیکی خاص بوده و سوءعمل رله‌های حفاظتی متصل به این ادوات احتمال وقوع می‌یابد. الگوریتم‌های وابسته به مؤلفه‌های فرکانس بالا و امواج سیار ولتاژ وابستگی قابل توجهی به پاسخ فرکانسی CVT دارند. مطابق شکل ۱، به استثنای محدوده فرکانس قدرت، بهره اندازه‌گیری CVT بسیار ناچیز بوده و تضعیف شدیدی در دیگر فرکانس‌ها صورت می‌پذیرد. همانند CVT، پاسخ فرکانسی CT در الگوریتم‌های وابسته به مؤلفه‌های فرکانس بالا و امواج سیار جریان اندازه‌گیری شده اهمیت می‌یابد. پاسخ فرکانسی یک CT نمونه در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق شکل، به استثنای محدوده فرکانس‌های بالا، اندازه‌گیری با دقت و مشابه واقعیت انجام شده است. اگرچه، اندازه‌گیری در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز دقیق نیست. در تحلیل مؤلفه‌های فرکانس بالای خطا، تکنیک امواج سیار به‌عنوان روشی پرسرعت مورد توجه قرار گرفته است. اساس این روش همبستگی بین امواج سیار جلو رونده و برگشتی در طول خط انتقال می‌باشد. محل‌یابی خطا بر اساس تئوری امواج سیار در کابل‌های زیرزمینی و خطوط هوایی از سال ۱۹۵۱ پیشنهاد شده است [۱۴].



شکل ۱: پاسخ فرکانسی CVT [۱]



شکل ۲: پاسخ فرکانسی CT [۱]

در سال‌های اخیر نیز تئوری امواج سیار در محل‌یابی خطا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶-۱۵]. لیکن با نظر به امکان وجود خطا در

تحلیل نتایج ارائه خواهند شد. در پایان، نتیجه‌گیری مناسبی از مطالب در بخش پایانی صورت می‌پذیرد.

۲- بیان مسئله

تکنیک ارائه‌شده در این مقاله با سه انگیزه پایه‌ریزی شده است. مواردی که تأثیر مستقیم بر دقت روش تخمین محل خطا و جامعیت روش در شبکه‌های هوشمند دارند.

۲-۱- ناشناختگی مدل سیستم قدرت

در راستای تخمین حالت هارمونیک شبکه قدرت، شناسایی ساختار شبکه و وضعیت عناصر از دیدگاه در مدار بودن یا نبودنشان اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. نظر به اینکه در طی یا پس از وقوع خطا، توپولوژی مداری تغییر می‌یابد، مشاهده‌پذیری سیستم هم تغییر خواهد نمود. لذا، تخمین‌زن حالت هارمونیک در اولین گام از محاسبات خود به ماتریس اندازه‌گیری (برگرفته از توپولوژی مداری) نیازمند است. بنابراین، ارائه الگوریتم تعیین محل خطا به‌صورت هوشمند و تنها مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محدود در کم‌ترین نقاط ممکن مرحله‌ای غیرقابل چشم‌پوشی در تخمین حالت هارمونیک است. در این راستا انتظار می‌رود تا الگوریتمی برای محل‌یابی خطا بر اساس حداقل نقاط استقرار تجهیزات اندازه‌گیری معرفی گردد. راهکار محل‌یابی خطا با کم‌ترین حساسیت به اطلاعات اندازه‌گیری شده، به‌صورت طرحی مستقل از اندازه‌گیری‌های ولتاژ در هنگام خطا در شبکه خواهد بود.

۲-۲- مشاهده‌پذیری خطا در کل شبکه

روش‌های متداول محل‌یابی خطا علی‌رغم انجام وظیفه در تخمین حالت سیستم، به مبحث تعیین محل خطا و تخمین مقادیر در شرایط خطا نپرداخته‌اند. تنها تعداد اندکی از تحقیقات به مکان‌یابی PMU جهت محل‌یابی خطا پرداخته‌اند [۹-۱۲]. این مراجع بر اساس توپولوژی‌های ممکن شبکه قدرت پایه‌ریزی شده‌اند. در این طرح‌ها، PMU در یکی از دو سمت خط انتقال نصب می‌گردد. مزیت این روش عدم نیاز به اطلاعات از زیر شبکه‌های متصل به شبکه اصلی از جمله بار، ژنراتور یا شبکه مرکب است. لیکن این امر مستلزم اختصاص تعداد بیشتری از واحدهای اندازه‌گیری می‌باشد. تأثیر مدل تونن و تغییرات آن در جریان خطا امری انکارناپذیر می‌نماید.

۲-۳- تأثیرگذاری دقت تجهیزات اندازه‌گیری

روش‌های متعددی به‌منظور تخمین دقیق و قابل‌قبول محل خطا پایه‌ریزی شده‌اند. مطالعه این روش‌ها نشان می‌دهد که وجود اطلاعات بیشتر عاملی در جهت افزایش دقت خواهد بود. در مواجهه با این روش‌ها، حالت گذرای CVT و همچنین احتمال و امکان اشباع ناخواسته CT، تأثیر به‌سزایی در کاهش دقت محل‌یابی خطا دارند. در مرجع [۱۳] راهکار شناسایی این رفتار پیشنهاد شده است. بنابراین، با حذف معادلات وابسته به ولتاژ شبکه در حین خطا می‌توان روشی

مهم‌ترین دلیل انتقال پارامترها به مختصات توالی متقارن، عدم تقارن شبکه در خطاهای نامتقارن است. تبدیل مؤلفه‌های متقارن از تکنیک‌های مناسب با قابلیت کاهش پیچیدگی معادلات در سیستم‌های گسترده است. در نتیجه توالی مثبت جریان شاخه‌های شبکه تونن بر اساس جریان خطا در محل موردنظر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{branch1} \\ \vdots \\ \Delta I_{branchN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(I_{Fault}) \\ \vdots \\ f_n(I_{Fault}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta I_{branch i} : \begin{cases} \Delta I_{LR} & \text{Current from local to remote bus} \\ \Delta I_{RL} & \text{Current from remote to local bus} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta I_{branch i}}{\Delta I_{branch j}} = \frac{f_i(I_{Fault})}{f_j(I_{Fault})} = f_{ij}(x) \quad (5)$$

جریان‌های مورد استفاده در روابط فوق بر اساس اندازه‌گیری مبتنی بر PMU صورت می‌پذیرد. نکته ضروری، بهره‌گیری از اندازه و فاز جریان در سیستم خطا دار شده است. و این امر نیازمند اندازه‌گیری فازوری همزمان جریان در سیستم می‌باشد. بنابراین در رابطه (۵)، نسبت جریان شاخه‌ها مستقل از جریان خطا و تنها وابسته به محل خطا (x) از باس آم و خط انتقال بین باس آم و زام می‌باشند. چگونگی ارتباط بین جریان خطا و محل خطا (x) در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌گونه که بیان شد، در نظریه تونن در شبکه خطا دار شده، تغییرات ولتاژ محل خطا به صورت یک منبع ولتاژ مدل سازی می‌گردد. با تکیه بر حذف منابع سیستم در مدل تونن شبکه، جریانی از دو سمت محل خطا جاری خواهد شد. این جریان‌ها به مقدار x بستگی دارد. اگرچه، در میان جریان‌های جاری در شبکه، برخی جریان‌ها از درجه وابستگی کم‌تری برخوردارند. که متأثر از وابستگی مدل تونن به منابع تونن انتهایی شبکه می‌باشند. آنچه به عنوان پایه تکنیک پیشنهادی معرفی می‌گردد، استخراج جریان‌های با بهترین وابستگی به تغییرات x در هریک از خطوط خواهد بود. بر اساس این نسبت‌ها، نسبت جریان شاخه‌ها و در نتیجه ماتریس M_k^l به صورت منحصر به محل خطای خاص (k% از طول خط) در شاخه ام از (N شاخه) ارائه می‌شود.

$$M_k^l = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I_{branch1}}{\Delta I_{branch1}} & \frac{\Delta I_{branch1}}{\Delta I_{branch2}} & \dots & \frac{\Delta I_{branch1}}{\Delta I_{branchN}} \\ \frac{\Delta I_{branch2}}{\Delta I_{branch1}} & \frac{\Delta I_{branch2}}{\Delta I_{branch2}} & \dots & \frac{\Delta I_{branch2}}{\Delta I_{branchN}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta I_{branchN}}{\Delta I_{branch1}} & \frac{\Delta I_{branchN}}{\Delta I_{branch2}} & \dots & \frac{\Delta I_{branchN}}{\Delta I_{branchN}} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (6)$$

در ماتریس M_k^l ، پردازش عناصر قطری با مقدار ۱ صورت نمی‌گیرد. همچنین اگر برخی از نسبت‌ها با توجه به صفر شدن صورت یا مخرج، مقداری صفر، مبهم یا بی‌نهایت بگیرند، مؤلفه موردنظر برابر با صفر لحاظ می‌گردد. به علاوه، به دلیل تقارن معکوس قطری، تنها مثلث بالا مورد بررسی قرار می‌گیرند. لذا M_k^l به صورت C_k^l اصلاح می‌شود.

مؤلفه‌های فرکانس بالای جریان و ولتاژ شبکه و به عنوان تکنیکی جایگزین، روش نسبت‌های جریانی در مؤلفه فرکانس شبکه پیشنهاد شده است. اگرچه، تکنیک امواج سیار نیز در مسیر عملیاتی خود شامل منافعی هستند که نیازمند توجهی جامع در مقالات دیگر خواهد بود. لذا با تکیه بر موارد ذکر شده، ارائه طرحی به منظور محلیابی خطای هوشمند شبکه قدرت با ویژگی‌های ذیل در این مقاله انجام می‌گیرد.

- کاهش واحدهای اندازه‌گیری جریان و حذف اندازه‌گیری ولتاژ
- استقلال محلیابی خطا نسبت به گذرای تجهیزات اندازه‌گیری
- کاهش وابستگی و نیاز الگوریتم به مدل تونن زیر شبکه

۳- فرمول بندی مسئله

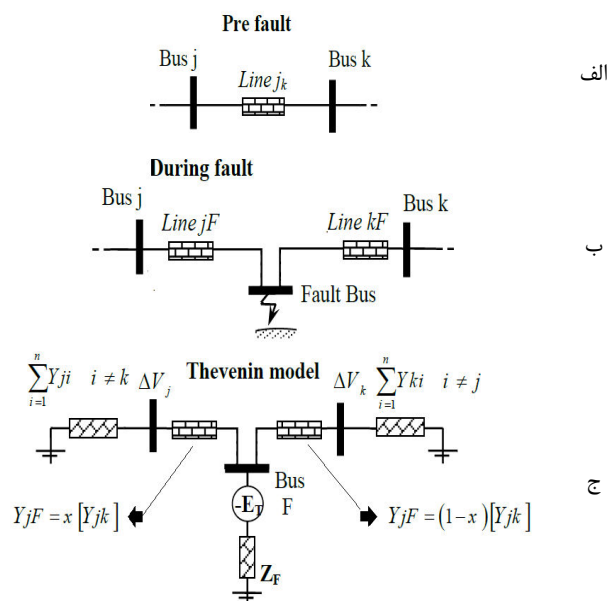
۳-۱- محاسبات جریان اتصال کوتاه

مدل خط انتقال پیش از وقوع و حین خطا در شکل ۳ ارائه شده است. یکی از روش‌های موجود در محاسبات اتصال کوتاه، قضیه تونن می‌باشد. در این مدل، اثر اتصال کوتاه با منبع ET نشان داده شده و ولتاژ باس‌ها و جریان شاخه‌ها تغییرات حاصل از خطا می‌باشند. لذا می‌توان تغییرات ولتاژ را به تغییرات جریان شبکه $\Delta i = i^f - i^o$ ارتباط داد.

$$\Delta V = V_{Post-Fault} - V_{Pre-Fault} = V^f - V^o \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_{11} & \dots & Y'_{1n} & Y'_{1F} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y'_{n1} & \dots & Y'_{nn} & Y'_{nF} \\ Y'_{F1} & \dots & Y'_{Fn} & Y'_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \\ \Delta V_F \end{bmatrix} \quad (2)$$

رابطه (۲) توسط ماتریس تبدیل مؤلفه‌های سه‌فاز به مختصات توالی متقارن تبدیل می‌گردند.



شکل ۳: بخشی از شبکه n باس: الف) قبل از خطا ب) حین خطا ج) مدل تونن شبکه خطا دار

وردایی برای تمامی متغیرهای غیر صفر ماتریس‌های C_k^l ، ماتریس وردایی به صورت زیر در اختیار قرار می‌گیرد.

$$VarMatrix_{N^2 \times N^2} = \begin{bmatrix} \infty & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{N1}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{N1}}\right)} & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{N1}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{N1}}\right)} & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{NN}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{NN}}\right)} & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ \infty & \dots & \infty & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{N1}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{N1}}\right)} & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{NN}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{NN}}\right)} & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ \infty & \dots & \infty & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{N1}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{N1}}\right)} & \dots & \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{NN}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{NN}}\right)} & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ \infty & \dots & \infty & \dots & \infty & \dots & \infty & \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

where $\begin{cases} in Var\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right) & \text{if } \Delta I_{ij}=0 \text{ or } \Delta I_{kl}=0 \\ \rightarrow \frac{Var\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right)}{Mean\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right)} = \infty \end{cases}$

که مؤلفه‌های با کم‌ترین مقدار، متناظر با نسبت‌های جریانی با کم‌ترین وابستگی به تغییرات امیدانس تونن موجود در شبکه می‌باشند. با توجه به تعدد مؤلفه‌های غیر بی‌نهایت در VarMatrix، تنها مقادیری ملاحظه می‌شوند که وردایی کم‌تر از ۱٪ داشته باشد. پس از مرتب‌سازی مقادیر مطلوب، نسبت جریان‌های کاندید با ارزشی متناسب با میزان وردایی‌شان حاصل می‌شوند. مشهود است که چرا مقادیر وردایی متناظر با مؤلفه‌های صفر ماتریس C_k^l ، برابر با بی‌نهایت لحاظ شده‌اند. چراکه بایستی در مرحله مرتب‌سازی، از پروسه خارج گردند. درنهایت، به جای ماتریس‌های $N^2 \times N^2$ در رابطه (۸)، ماتریس‌هایی برداری با ابعاد کوچک‌تر (به طول ماتریس وردایی) تحت عنوان نسبت جریان‌های مرجع در شرایط مختلف خطا به دست می‌آیند.

$$\begin{bmatrix} [CurrentRatio_{1\%}^{branch1}]^{Ref} & \dots & [CurrentRatio_{99\%}^{branch1}]^{Ref} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [CurrentRatio_{1\%}^{branchN}]^{Ref} & \dots & [CurrentRatio_{99\%}^{branchN}]^{Ref} \end{bmatrix} \quad (10)$$

بنابراین، الگوریتم محلیابی خطا، بر پایه اندازه‌گیری‌های محدود جریانی متناظر با نسبت‌های جریانی کاندید پایریزی می‌گردد. به‌منظور تعیین محل خطا در موارد قابل وقوع، جریان‌های موردنیاز برای تشکیل ماتریس نسبت‌های کاندید از اندازه‌گیری جمع‌آوری می‌گردند. این مقادیر، ماتریسی متناظر با طول و نسبت‌های مورد استفاده در ماتریس CurrentRatio، با نام Test تولید می‌نمایند.

$$[CurrentRatio]^{Test} \quad (11)$$

الگوریتم پیشنهادی با پردازش سیگنال و معیار شباهت، شبیه‌ترین ماتریس از بین رابطه (۱۱) را به ماتریس اندازه‌گیری تولیدشده در رابطه (۱۰) استخراج می‌نماید. ماتریس استخراج‌شده، محل وقوع خطا را مشخص نموده و به‌عنوان خروجی الگوریتم شناسایی محلیاب خطا در اختیار قرار می‌دهد.

$$C_k^l = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{11}} & \dots & \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{1N}} & \dots & \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{N1}} & \dots & \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{NN}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{11}} & \dots & \frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{1N}} & \dots & \frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{N1}} & \dots & \frac{\Delta I_{1N}}{\Delta I_{NN}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{11}} & \dots & \frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{1N}} & \dots & \frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{N1}} & \dots & \frac{\Delta I_{N1}}{\Delta I_{NN}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta I_{NN}}{\Delta I_{11}} & \dots & \frac{\Delta I_{NN}}{\Delta I_{1N}} & \dots & \frac{\Delta I_{NN}}{\Delta I_{N1}} & \dots & \frac{\Delta I_{NN}}{\Delta I_{NN}} \end{bmatrix}_{N^2 \times N^2} \quad (V)$$

where $\begin{cases} in \frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}} & \text{if } \Delta I_{ij}=0 \text{ or } \Delta I_{kl}=0 \\ \rightarrow C_k^l(ij,kl)=0 \end{cases}$

با امکان وقوع خطا در فواصل خطوط (۹۹ خطای مستقل از هم در فواصل ۱٪ تا ۹۹٪ خط)، ماتریس‌های ذیل ارائه می‌گردند:

$$\begin{bmatrix} [C_{1\%}^{branch1}] & [C_{2\%}^{branch1}] & [C_{3\%}^{branch1}] & \dots & [C_{99\%}^{branch1}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [C_{1\%}^{branchN}] & [C_{2\%}^{branchN}] & [C_{3\%}^{branchN}] & \dots & [C_{99\%}^{branchN}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

بدیهی است که مؤلفه‌های موجود در هر یک از ماتریس‌های رابطه ۷، بیانگر نسبت خاصی از جریان شاخه‌ها در فواصل خطاهای مختلف در تمام خطوط می‌باشند. این مقادیر بر اساس محاسبات اتصال کوتاه سیستم در شرایط غیر برخط می‌باشند.

نسبت‌های جریانی شبکه که تفاضل بین جریان حین و قبل خطاست، در اکثر نقاط متأثر از ساختار شبکه خواهد بود. اگرچه نکته مثبت، وابستگی مقادیر به ساختار و توپولوژی شبکه و امکان بازشناسی خطا از نحوه تغییر مقادیر و عامل منفی، معادل تونن در باس‌های ژنراتوری و تبدالی است. اصول الگوریتم پیشنهادی بر مبنای انتخاب بهترین نسبت‌ها با بیش‌ترین توانایی در شناسایی محل خطا از روی ماتریس‌های رابطه (۸) است. در حقیقت، الگوریتم پیشنهادی با تکنیکی مبتنی بر پردازش سیگنال و روش‌های استخراج معیار شباهت، شبیه‌ترین ماتریس از مجموعه رابطه (۸) را به‌عنوان ماتریس مرتبط با محل خطا با استفاده از اندازه‌گیری‌های محدود به‌دست‌آمده از مدل نسبتاً واقعی شبکه در اختیار قرار می‌دهد. یقیناً، یافتن نسبت‌های جریانی منتخب مناسب از تعداد زیاد موجود در ماتریس‌های C_k^l اهمیت دارد. این امر بر اساس انتخاب نسبت‌هایی با کم‌ترین وابستگی به تغییرات امیدانس‌های تونن شبکه صورت می‌پذیرد. این روند در الگوریتم شکل ۴ ارائه شده است.

نسبت‌های جریانی موجود در C_k^l به ازای محدوده ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ از امیدانس تونن مینا و برای خطاهای مختلف قابل وقوع در فواصل ۱٪ تا ۹۹٪ از طول خطوط بررسی می‌گردند. بر اساس وردایی هر یک از نسبت‌های جریانی متناظر با $C_{(ij)}$ در حالت‌های تصادفی موردبحث، ماتریس وردایی محاسبه می‌گردد.

مؤلفه‌های متناظر $M(i,j)$ که یکی از جریان‌های مورد استفاده در آن صفر بوده باشند، برابر با بی‌نهایت لحاظ می‌گردد. پس از محاسبه

۲-۳- استخراج نسبت‌های جریانی بهینه

نسبت‌های جریانی منتخب به‌دست‌آمده از الگوریتم شکل ۴، با نظر به ساختار شبکه مورد مطالعه استاندارد ۹ باس WSCC [۱۷] (شکل ۵) می‌تواند از ترکیب جریان‌های متعددی تشکیل گردد. انتخاب تمامی این نسبت‌ها در یک بردار نسبتاً طولانی علاوه بر افزایش پیچیدگی محاسبات، از دیدگاه تعداد باس‌های پیشنهادی برای نصب تجهیزات و جریان‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری و تأثیر خطاهای اندازه‌گیری (Measurement Error) نیز امری غیرمنطقی خواهد بود.

به‌عنوان مثال در شبکه WSCC، تعدادی از نسبت‌های جریانی منتخب با ترتیب کم‌ترین استقلال نسبت به تغییرات مقادیر امپدانس تونن موجود در شبکه مورد مطالعه به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\text{Candidate Current Ratio} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{14}} & \frac{\Delta I_{22}}{\Delta I_{28}} & \frac{\Delta I_{33}}{\Delta I_{36}} & \frac{\Delta I_{11}}{\Delta I_{41}} & \frac{\Delta I_{14}}{\Delta I_{41}} \\ \frac{\Delta I_{22}}{\Delta I_{82}} & \frac{\Delta I_{28}}{\Delta I_{82}} & \frac{\Delta I_{33}}{\Delta I_{63}} & \frac{\Delta I_{36}}{\Delta I_{63}} & \frac{\Delta I_{55}}{\Delta I_{99}} & \frac{\Delta I_{77}}{\Delta I_{99}} & \frac{\Delta I_{55}}{\Delta I_{82}} & \frac{\Delta I_{77}}{\Delta I_{82}} \\ \frac{\Delta I_{55}}{\Delta I_{63}} & \frac{\Delta I_{55}}{\Delta I_{77}} & \frac{\Delta I_{49}}{\Delta I_{94}} & \frac{\Delta I_{76}}{\Delta I_{87}} & \frac{\Delta I_{45}}{\Delta I_{54}} & \frac{\Delta I_{78}}{\Delta I_{87}} & \frac{\Delta I_{67}}{\Delta I_{87}} & \dots \end{bmatrix} \quad (12)$$

ترتیب‌بندی مؤلفه‌های فوق به‌صورت ذیل است:

در مرحله نخست، نسبت جریان‌ها در ماتریس‌های رابطه (۸) به ازای خطا در خطوط مختلف و تمامی فواصل ممکن در خط مربوطه استخراج می‌گردند. این مجموعه ماتریس به ازای مقادیر مختلفی از امپدانس تونن در شبکه به وجود می‌آیند.

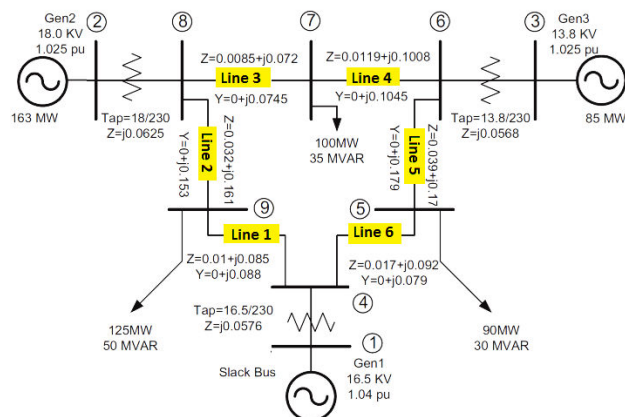
امپدانس تونن شبکه ارتباطی در ترکیب ۱ ام

$$\begin{bmatrix} C_{1\%}^{\text{branch1}} & C_{2\%}^{\text{branch1}} & \dots & C_{99\%}^{\text{branch1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1\%}^{\text{branchN}} & C_{2\%}^{\text{branchN}} & \dots & C_{99\%}^{\text{branchN}} \end{bmatrix}$$

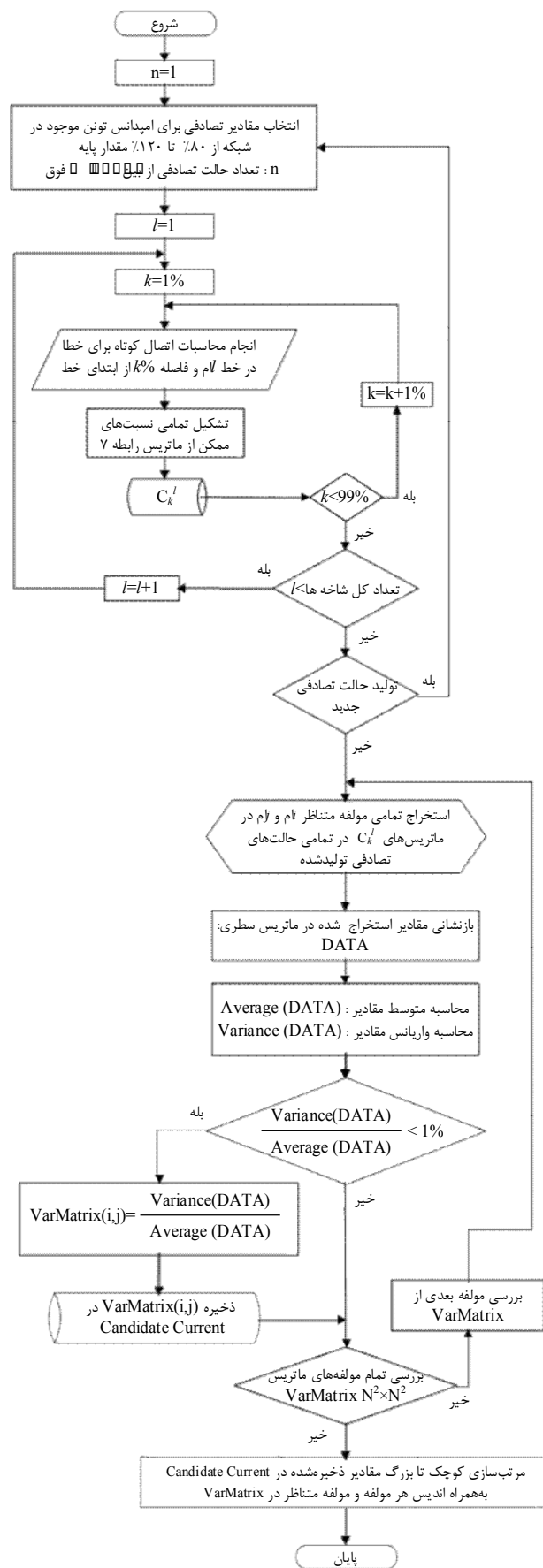
امپدانس تونن شبکه ارتباطی در ترکیب ... ام

$$\begin{bmatrix} C_{1\%}^{\text{branch1}} & C_{2\%}^{\text{branch1}} & \dots & C_{99\%}^{\text{branch1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1\%}^{\text{branchN}} & C_{2\%}^{\text{branchN}} & \dots & C_{99\%}^{\text{branchN}} \end{bmatrix}$$

این ماتریس‌ها در تمامی حالت‌های ممکن از تغییر امپدانس تونن شبکه در باس‌های تبدیلی از مقدار ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ مقدار پایه محاسبه می‌گردند.



شکل ۵: شبکه استاندارد ۹ باس WSCC [۱۷]



شکل ۴: الگوریتم انتخاب نسبت‌های جریانی پیشنهادی

تابع هدف معرفی می‌گردد. تعداد جریان‌های مورداستفاده در نسبت‌های جریانی منتخب و تعدادشان، با متغیر $C_{\Sigma \text{MeasurementCurrent}}$ در هزینه اندازه‌گیری معرفی می‌گردد.

$$[\text{CurrentRatio}]_{\text{Selected}} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I_{22}}{\Delta I_{28}} & \frac{\Delta I_{32}}{\Delta I_{82}} & \frac{\Delta I_{36}}{\Delta I_{63}} & \frac{\Delta I_{77}}{\Delta I_{82}} & \frac{\Delta I_{45}}{\Delta I_{54}} \\ 2 & 6 & 9 & 13 & 18 \end{bmatrix} \quad (14)$$

که سطر دوم، بیانگر رتبه نسبت جریانی منتخب در میزان استقلال از تغییرات مقادیر امپدانس تونن موجود در شبکه نمونه است. آنگاه، بدترین حالت در وابستگی، به‌عنوان دیگر عامل مؤثر در برازندگی رشته نسبت جریانی منتخب انتخاب می‌گردد. که با نظر به رابطه (۱۲)، این وابستگی در بدترین حالت به هجدهمین نسبت جریانی از مجموعه نسبت‌های جریانی منتخب به‌دست‌آمده از الگوریتم شکل ۴ منتهی خواهد شد. تابع هزینه این عامل، با در نظر گرفتن میزان وردایی هجدهمین نسبت جریانی با عنوان $C_{\text{MaxCurrentRatioVariance}}$ تعیین می‌گردد. درنهایت ضریب وزنی مناسب برای توابع هزینه فوق با مدل‌سازی مناسب در تابع هدف اندازه‌گیری، اعمال می‌گردند. ضریب وزنی W_{m1} در رابطه (۱۵) از درجه اهمیت بیشتری در تابع هزینه برخوردار است. به‌عبارت‌دیگر: $W_{m1} > W_{m2}, W_{m3}$

$$C_{\text{Measurement}} = W_{m1} \times C_{\Sigma \text{MonitoringBus}} + W_{m2} \times C_{\text{NumberofCurrentMeasurement}} + W_{m3} \times C_{\text{MaxCurrentRatioVariance}} \quad (15)$$

۳-۲-۳- تابع هزینه نهایی

برای کمینه‌سازی تابع هدف تخمین محل خطا با اندازه‌گیری‌های محدود، توابع هزینه مربوط تخمین محل خطا با کمترین خطا و اندازه‌گیری، با وزن W_1 و W_2 در تابع هزینه نهایی جمع می‌گردند.

$$C_{\text{Total}} = W_1 \times C_{\text{Estimation Error}} + W_2 \times C_{\text{Measurement}} \quad (16)$$

هدف از کاهش اندازه‌گیری، کاهش وابستگی معادلات به اندازه‌گیری‌های بیش‌تر برای دستیابی به محل‌یابی خطا است. در طرح کاهش اندازه‌گیری‌ها، انتظار می‌رود تا بتوان با حداقل اندازه‌گیری محل خطا را به دست آورد. در صورت ورود اندازه‌گیری‌های بیش‌تر می‌توان دقت تخمین محل خطا را در شرایط ورود نویز در اندازه‌گیری تضمین نمود. در بحث تخمین حالت سیستم قدرت نیز، در صورت ورود نویز در اندازه‌گیری، راهکار مناسب با افزایش اندازه‌گیری‌ها (redundancy) قابل‌ارائه است. یقیناً کاهش اندازه‌گیری با کاهش هزینه اندازه‌گیری توأم خواهد بود. اگرچه در بحث تخمین، کاهش اندازه‌گیر به‌عنوان هدفی مهم پیگیری می‌گردد، لیکن انگیزه اصلی بحث ارتباط بین اندازه‌گیرها است. چنانچه اختلالی در اندازه‌گیری برخی پارامترها صورت پذیرد، الگوریتم تخمین بایستی حتی با وجود اندازه‌گیری در تمام نقاط، قابلیت تشخیص مقادیر نویزی و ازدست‌رفته را داشته باشد. الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله در یک نگاه با هدف بررسی امکان تعیین محل خطا به‌صورت جامع در شبکه قدرت با استفاده از منحصراً جریان (با کمترین تعداد) پایه‌ریزی شده است.

در مرحله دوم، مؤلفه‌های متناظر در ماتریس‌ها برای بررسی میزان وردایی مطالعه می‌گردند. در مرحله سوم، وردایی هر مرحله از مجموعه ماتریس‌ها در محلی متناظر در ماتریس وردایی (VarMatrix) جانمایی می‌گردد. در مرحله چهارم، مؤلفه‌های با کمترین وردایی در VarMatrix به ترتیب معرفی می‌گردند.

استخراج نسبت‌های جریانی بهینه با کمینه‌سازی تابع هدفی متشکل از موارد ذیل صورت می‌پذیرد.

۳-۲-۱- تخمین محل خطا با بیش‌ترین دقت

انتخاب نسبت‌های رابطه (۱۲) و تشکیل بردارهایی جدید از روابط (۹) و (۱۰)، وابسته به بهترین تخمین و شباهت بردارهای Test و Ref می‌باشد. تخمین و استخراج شبیه‌ترین بردار از روابط بازنویسی‌شده (۹) به بردار بازنویسی شده (۱۰) به دو قسمت تجزیه خواهد شد. ابتدا تشخیص درست خط خطادار و سپس تشخیص مطلوب درصد فاصله خطا می‌باشد. عبارت «بردار بازنویسی‌شده» در جمله اخیر، بردار جدیدی است که تنها بر اساس برخی از نسبت‌های جریانی منتخب (نسبت‌های بهینه) از بردارهای روابط (۹) و (۱۰) استخراج می‌شوند. برازندگی هر رشته از نسبت‌های جریانی، پس از بررسی تمامی حالات قابل رخداد خطا در خطوط شبکه به دست می‌آید. پیاده‌سازی این بخش، با فرض وقوع خطا در تمامی نقاط شبکه و جستجوی شباهت بین بردارهای Test و Ref در هر حالت صورت می‌پذیرد. تابع هزینه مؤثر در تابع هدف، بر اساس تعداد حالت‌های منجر به تخمین غلط خط خطادار شده ($C_{\text{WrongFaultyLinesEst}}$) و بیش‌ترین خطای تخمین فاصله خطا ($C_{\text{MaxFaultLocationError}}$) در کل حالات ممکن برای رخداد خطا شکل یافته است.

تعیین ضریب وزنی مناسب برای هر یک از این مقادیر فوق، بایستی به‌صورتی طراحی شود تا اهمیت هر یک به درستی مدل‌سازی گردد. در این رابطه، ضریب وزنی مجموع تعداد حالت‌های منجر به تخمین غلط خط خطادار شده در کل حالات ۱ و ضریب وزنی بیش‌ترین خطای تخمین فاصله خطا در کل حالات ۰/۰۱ می‌باشند. درنهایت، مجموع توابع هزینه فوق با ضرایب وزنی آن‌ها هزینه دقت تخمین محل خطا را برای هر رشته اختیاری از نسبت‌های جریانی به‌صورت زیر نتیجه می‌دهند:

$$C_{\text{EstimationError}} = C_{\text{WrongFaultyLinesEst}} + \frac{1}{100} \times C_{\text{MaxFaultLocationError}} \quad (13)$$

۳-۲-۲- هزینه اندازه‌گیری‌ها

در نسبت‌های جریانی منتخب رابطه (۱۲)، نسبت $\Delta I_{11}/\Delta I_{14}$ تنها باس ۱ را ملزم به استقرار اندازه‌گیری جریان می‌نماید. همچنین نسبت $\Delta I_{55}/\Delta I_{99}$ ، باس‌های ۵ و ۹ را نیازمند نصب اندازه‌گیر جریان می‌نمایند. به همین ترتیب، نسبت‌های دیگر نیز قابل پیگیری خواهند بود. انتخاب بهینه نسبت‌های منتخب رابطه (۱۲) با ملاحظه کمترین باس موردنیاز توأم با تشخیص خوب محل خطا با $C_{\Sigma \text{MonitoringBus}}$

مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین بهترین جواب در جستجوی این مرحله، با مجموعه وزن‌های استخراج شده اخیر محاسبه و ذخیره می‌گردد. به همین ترتیب، ضرایب وزنی طی هر مرحله بهینه‌سازی بر اساس محدوده‌های مشخص شده و با تکیه بر جستجوی تصادفی و به‌روزرسانی با پاسخ مراحل قبلی تعیین می‌گردند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

بر اساس شبکه مورد مطالعه در شکل ۵، خطوطی که در معرض اتصال کوتاه قرار دارند عبارت‌اند از:

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| خط ۱: از باس ۹ به باس ۴ | خط ۲: از باس ۸ به باس ۹ |
| خط ۳: از باس ۸ به باس ۷ | خط ۴: از باس ۷ به باس ۶ |
| خط ۵: از باس ۶ به باس ۵ | خط ۶: از باس ۵ به باس ۴ |

مقدار k که به‌عنوان محل خط در خط معرفی می‌گردد، $k\%$ از طول خط و فاصله از باس مبدأ در خطوط فوق است.

۴-۱- تهیه پایگاه اطلاعات در تشکیل بردار آزمون

الگوریتم پیشنهادی، نیازمند در اختیار داشتن پایگاه اطلاعاتی از شبکه مورد مطالعه با خطاهای مختلف در فواصل زمانی متعدد است. تا بر اساس تشخیص صحیح ماتریس $[CurrentRatio]^{Ref}$ از روی ماتریس اندازه‌گیری $[CurrentRatio]^{Test}$ جستجوی بهینه‌ای را به انجام برساند. لذا مدل‌سازی شبکه WSCC در نرم‌افزار DigSilent به ازای خطاهای مختلف در یک پایگاه اطلاعات کلی صورت پذیرفته است. علت انتخاب این نرم‌افزار توانایی غیرقابل‌انکار در مطالعات سیستم با دقتی برابر با واقعیت است.

هر یک از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در محیط نرم‌افزار DigSilent، به‌عنوان مسئله مجهول لحاظ می‌گردد. بدین صورت که اطلاعات مورد نیاز الگوریتم محل‌یاب خطا (جریان‌های منتخب نهایی در نسبت‌های جریانی بهینه) از خروجی این نرم‌افزار در اختیار قرار می‌گیرند. فرآیند جستجوی بیش‌ترین شباهت، بهترین ماتریس را از روی پایگاه اطلاعات مرجع (برگرفته از اطلاعات پخش بار در حالت غیر برخط) استخراج و به‌عنوان محل تطبیق یافته شده با مقدار اندازه‌گیری ارائه می‌نماید.

۴-۲- تکنیک بهینه‌سازی

انتخاب هر یک از نسبت‌های جریانی منتخب در رابطه (۱۲)، توسط بهینه‌سازی باینری صورت می‌پذیرد. طول رشته باینری در بهینه‌سازی برابر با طول بردار نسبت جریانی رابطه (۱۲) است. با توجه به طول نسبتا بالای رشته باینری به‌دست آمده، تکمیل الگوریتم محل‌یابی خطا نیازمند الگوریتم بهینه‌سازی پرسرعت با دقت مناسب و مطلوب خواهد بود. تا در نهایت، بهترین جریان‌ها را برای بهترین تخمین معرفی نماید. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده الگوریتم زنبور (BA) است. نحوه پیاده‌سازی الگوریتم زنبور در مرجع [۱۸] قابل پیگیری است.

۳-۲-۴- تعیین ضرایب وزنی

روشی که به‌منظور تعیین ضرایب وزنی مورد استفاده قرار گرفته است، فرآیندی تحلیلی-تصادفی است. در این روش، وزن‌های مطرح شده در بخش‌های پیشین از جمله: W_{m1} ، W_{m2} ، W_{m3} و W_2 و W_1 در محدوده‌ای از پیش تعیین شده به‌صورت تصادفی تعیین می‌گردند. هر محدوده، بر اساس ذات هر یک از هزینه‌ها و دانش کلی نسبت به اهمیت آن‌ها تعیین می‌گردد.

همان‌گونه که اشاره شد، اولویت‌بندی ضرایب وزنی در برآورد هزینه اندازه‌گیری با تخصیص بیش‌ترین وزن به W_{m1} و کم‌ترین به W_{m3} صورت می‌پذیرد. زیرا نخستین هدف کاهش باس‌های مورد نیاز در نصب تجهیزات اندازه‌گیری جریان و سپس حداقل اندازه‌گیری در هر باس و نهایتاً انتخاب جریانی با کم‌ترین وابستگی به تغییرات مدل تونن شبکه است. بنابراین، با تقریب می‌توان محدوده مناسب هر یک از ضرایب را مطابق رابطه (۱۷) لحاظ نمود. چنانچه وزن‌های W_{m2} و W_{m3} با هم برابر باشند در شرایط مرزی وزن‌ها و در اولویت تخصیص یافته به W_{m1} مقدار این وزن 0.8 و دو وزن دیگر 0.1 و یا W_{m1} برابر با 0.4 و دو وزن دیگر 0.3 خواهند بود.

همچنین اولویت تخصیص یافته به W_1 بیش‌تر از W_2 است. یقیناً کمینه‌سازی خطای تخمین اولویت افزون‌تری نسبت به نقاط و تعداد اندازه‌گیری‌ها دارد. انتخاب مرز تغییرات W_1 و W_2 تنها با یک قید حتمی صورت می‌پذیرد. اولویت W_1 بیش‌تر از W_2 است، لیکن نه به آن میزان که W_2 ناچیز گردد.

بنابراین مرزهای ذیل در این ارتباط تعیین می‌گردند، لیکن در روند بهینه‌سازی ضرایب وزنی، مراقبت مداوم صورت می‌پذیرد تا از عدم اشباع وزن‌ها در مرزها جلوگیری گردد. به عبارت دیگر، بایستی ضرایب در بین محدوده‌های انتخابی باشند، نه در مرزها.

$$\begin{cases} 0.4 < W_{m1} < 0.8 \\ 0.1 < W_{m2} < 0.3 \\ 0.1 < W_{m3} < 0.3 \end{cases} \quad \text{where } W_{m1} + W_{m2} + W_{m3} = 1 \quad (17)$$

$$\begin{cases} 0.6 < W_1 < 0.8 \\ 0.2 < W_2 < 0.4 \end{cases} \quad \text{where } W_1 + W_2 = 1$$

با مقدار تصادفی انتخاب شده برای هر یک از ضرایب فوق، مراحل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز انجام شده و بهترین جواب برای $C_{EstimationError}$ ، $C_{\Sigma MonitoringBus}$ ، $C_{\Sigma MeasurementCurrent}$ و $C_{MaxCurrentRatioVariance}$ استخراج می‌گردد. سپس بر اساس وزن‌های انتخاب شده در مرحله اخیر، تعداد ۵۰ دسته وزن جدید در محدوده مشخص شده در رابطه (۱۷) تولید می‌گردند.

لازم به ذکر است که ۵۰٪ از این دسته وزن‌ها تصادفی و ۵۰٪ دیگر در باند کوچکی اطراف وزن‌های مرحله جاری تولید می‌شوند. بر اساس دسته وزن‌های بازتولید شده و بهترین جواب به‌دست آمده در مرحله جاری، تابع هزینه نهایی با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه شده و بهترین جواب و دسته وزن‌های متناظر آن استخراج می‌گردند. دسته وزن استخراج شده به‌عنوان ضرایب وزنی به‌روز شده برای مرحله بعدی

دنباله مقایسه شده کم‌تر باشد (از خطای کم‌تری برخوردار باشد) شباهت بیش‌تری را میان دو دنباله تحت بررسی بیان می‌کنند.

۴-۳-۲- معیار همبستگی (Correlation)

$$\text{Correlation}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{that:} \begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (19)$$

این معیار علاوه بر مقیاس دامنه در برابر شیفت دامنه نیز عملکرد مناسبی دارد و اگر دو سیگنال در مقدار DC متفاوت باشند قادر به شناسایی شباهت میان آن‌هاست.

۴-۴- جمع‌بندی روش پیشنهادی

روش و محاسبات پیشنهادی در بخش‌های فوق با هدف یافتن بهترین نسبت‌هایی می‌باشند که توانایی تخمین محل خطا را دارا باشند. تکنیک ارائه شده همانند روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، شامل مرحله آموزش و آزمون است. در مرحله آموزش، بر اساس توپولوژی شبکه و حالت‌های قابل رخداد برای مشخصه خطوط و امپدانس تونن شبکه در باس‌های ژنراتوری و تبدالی، تحلیل مداری شبکه انجام می‌پذیرد. در این بخش از الگوریتم در شرایط غیر برخط با محوریت آموزش، ساخت داده‌ها صورت می‌گیرد. البته روشی که در شبکه به محل‌یابی خطا می‌پردازد، تنها با اندازه‌گیری جریان به صورت سنکرون با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری با نشانه‌گذاری زمانی به این هدف دست می‌یابد. در فرآیند آموزش تخمین‌گر محل خطا، در لایه تحلیل مدار، پارامترهای ولتاژ و جریان ورود می‌نمایند که این مسئله کاملاً مستقل از بحث اندازه‌گیری جریان در فرآیند آموزش خواهد بود.

داده‌های ساخته شده در ماتریس VarMatrix، نسبت‌های جریانی (نسبتاً) مستقل از تغییرات پارامترهای خط و شبکه را ارائه می‌دهد. در روند آموزش الگوریتم، نسبت‌هایی که قادر به تخمین محل خطا با بالاترین دقت می‌باشند استخراج می‌گردند. این بخش، دومین قسمت الگوریتم پیشنهادی است. با توجه به اینکه نسبت‌های جریانی با بیش‌ترین استقلال از تغییرات پارامتری شبکه تعداد قابل توجهی می‌باشند و بهره‌گیری از همه آن‌ها اندازه‌گیری جریان در همه خطوط را لازم می‌نماید، لذا بهینه‌سازی با هدف جستجوی نسبت‌هایی با کم‌ترین تعداد اندازه‌گیری و البته کم‌ترین باس سهمیم ضروری خواهد بود. پس از معرفی بهترین نسبت‌ها توأم با برآورده‌سازی تمامی قیود و بیش‌ترین برازندگی، جریانی‌های مناسب برای محل‌یابی خطا جهت آزمون پیشنهاد می‌گردند. در بخش آزمون، خطاهایی در شبکه نمونه که در نرم‌افزار DigSilent پیاده‌سازی شده است ایجاد می‌گردد. سپس منحصرآ جریان‌های پیشنهادی از مرحله قبل، از خروجی DigSilent به‌منظور ارزیابی الگوریتم تشخیص محل خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرآیند با اعمال معیار شباهت بین مقادیر به‌دست‌آمده

۴-۳- جستجوی شباهت بین مقادیر آزمون و مرجع

الگوریتم پیشنهادی از طریق مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از شبکه خطادار شده و تشکیل نسبت جریانی منتخب در رابطه (۱۱) و استخراج موردی با بیش‌ترین شباهت از ماتریس‌های رابطه (۱۰) محل خطا را شناسایی می‌نماید. ماتریس‌های رابطه (۱۱)، مطابق با شماره خط و فاصله خطا، محل وقوع خطا را مشخص نموده و به‌عنوان خروجی الگوریتم تشخیص محل خطا در اختیار قرار می‌دهد. جستجوی شباهت بین ماتریس‌های مرجع $[\text{CurrentRatio}]^{\text{Ref}}$ و ماتریس اندازه‌گیری $[\text{CurrentRatio}]^{\text{Test}}$ توسط معیار شباهت همبستگی صورت پذیرفته است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد:

۴-۳-۱- معیار شباهت

ارزیابی شباهت بین سیگنال‌های استخراج شده از هر یک از این روش‌های مختلف، راه‌حل مناسبی برای مقایسه آن‌ها و کسب اطلاعات جهت انتخاب بهترین تکنیک است. سیگنال‌ها دارای شباهت‌هایی هستند که توسط الگوریتم‌های پردازش سیگنال قابل استخراج می‌باشند. در تعیین شباهت‌ها مطلوب است، الگوریتمی به کار رود که با فرم‌های مختلف سیگنال که اساساً از برخی جنبه‌ها مشابه هستند، نامتغیر باشد. الگوریتم‌های متعددی برای محاسبه شباهت سیگنال‌ها و یا بردارها ارائه شده‌اند. هر کدام از معیارها به علت خصوصیت هندسی آن‌ها دید متفاوتی نسبت به بردارها در فضا دارند. در اینجا برای نمایش تفاوت دید هندسی آن‌ها از دو روش به قرار زیر استفاده شده است:

الف: معیارهای فاصله

در این رویکرد، مقایسه و محاسبه ساده نقطه‌به‌نقطه بین دو دنباله صورت می‌پذیرد. عموماً فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) به‌طور گسترده در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد، هر چند این دسته از معیارها ممکن است نتوانند به درستی شباهت میان دنباله‌ها را تعیین کنند، دلیل اصلی این امر عدم قابلیت آن‌ها در مواجه با اعوجاج و یا هر نوع تبدیل در سیگنال مانند مقیاس دامنه، شیفت دامنه، شیفت زمانی و مقیاس زمانی است.

فاصله اقلیدسی: سنجش فاصله بین دو بردار x و y ، بر اساس ریشه دوم مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر عبارت است از:

$$\text{Euclid}(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \quad (18)$$

ب: معیارهای شباهت متغیر

معیارهای شباهت دیگری نیز وجود دارند که خصوصیات دیگر دو بردار را در نظر می‌گیرند و خروجی این معیارها عمدتاً درک مناسب‌تری از شباهت را ارائه می‌کند. این رویکرد از طریق حداقل میزان تغییرات جهت تطبیق دو دنباله به بررسی شباهت می‌پردازد. به‌گونه‌ای که با اعمال برخی تبدیلات بر روی یکی از دنباله‌ها آن را بر روی دنباله دیگر مطابقت می‌دهند، هرچقدر میزان تفاوت میان دنباله تغییر یافته با

طولی برابر با ۴۶ مدل‌سازی می‌گردد. رشته باینری Str با ۴۶ المان به‌عنوان بردار حضور نسبت جریانی منتخب یا همان متغیر بهینه‌سازی در جواب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Str} = [S_1, S_2, \dots, S_{46}] \quad (21)$$

$$S(i) = \begin{cases} 1 & \text{CurrentRatio}(i) \text{ selected in } \text{CurrentRatio}(i) \\ 0 & \text{CurrentRatio}(i) \text{ not selected in } \text{CurrentRatio}(i) \end{cases} \quad (22)$$

مراحل بهینه‌سازی مطابق جدول ۲ ارائه شده است. نسبت‌های جریانی منتخب یافت‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی در ۷۰۰ تکرار، ۱۴ حالت مختلف می‌باشند که به ازای شماره تکرار ارائه شده‌اند.

جدول ۲: نسبت جریانی منتخب به‌دست‌آمده در مراحل بهینه‌سازی

| تکرار | دفعات تخمین غلط خط | | خطای تخمین | | |
|-------|---|-------------------|--------------|-------------|------|
| | تعداد جریان‌های مانیتورینگ | | نسبت ورودایی | نسبت جریانی | |
| | باس‌های سهمیم در مانیتورینگ | | | | |
| | نسبت‌های جریانی | | | | |
| ۴ | -۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۳ -۲۵-۲۴-۲۲-۲۱-۲۰-۱۵ -۳۲-۳۱-۳۰-۲۹-۲۸-۲۶ ۴۳-۴۰-۳۹-۳۵-۳۳ | -۵-۴-۳ ۹-۸-۷-۶ | ۱۹ | ۳/۵۲ | ۰/۳۹ |
| ۶ | -۲۰-۱۸-۱۶-۱۵-۱۱-۱۰-۹ -۳۰-۲۸-۲۷-۲۶-۲۵-۲۳ ۴۵-۴۳-۴۲-۴۱-۳۵-۳۴ | -۵-۴-۳ ۹-۸-۷-۶ | ۱۷ | ۳/۵۲ | ۰/۳۵ |
| ۱۱ | -۲۱-۲۰-۱۸-۱۷-۱۶-۷-۲ -۳۱-۳۰-۲۸-۲۵-۲۳-۲۲ ۴۵-۴۴-۳۹-۳۵-۳۴ | -۵-۴-۳ ۹-۸-۷-۶ | ۱۶ | ۲/۶۲ | ۰/۵۴ |
| ۲۵ | -۲۶-۲۴-۲۰-۱۴-۱۱-۱۰-۱ ۴۶-۴۵-۴۲-۳۸-۳۴-۳۰-۲۷ | -۵-۴-۱ ۹-۸-۷-۶ | ۱۵ | ۲/۰۲ | ۰/۵۳ |
| ۳۵ | ۳۶-۳۲-۲۵-۱۱ | -۶-۴-۲ ۹-۸-۷ | ۸ | ۲۲/۲ | ۱/۱۹ |
| ۴۳ | ۴۵-۲۵-۱۵ | -۷-۵-۴ ۹-۸ | ۶ | ۲/۲۷ | ۰/۷۷ |
| ۴۷ | ۴۲-۴۱-۳۳-۱۸ | ۹-۵-۴-۳ | ۷ | ۵/۴۷ | ۱/۱۶ |
| ۴۸ | ۴۳-۳۳-۲۹-۱۸ | ۹-۸-۵-۴ | ۸ | ۵/۹۲ | ۰/۶۴ |
| ۵۵ | ۴۲-۴۱-۳۳-۱۶ | ۹-۴-۳ | ۶ | ۳/۱۲ | ۰/۷۱ |
| ۶۶ | ۴۶-۲۹-۱۵-۱۳ | ۸-۷-۵ | ۵ | ۱/۹۷ | ۱/۰۹ |
| ۸۸ | ۴۶-۲۹-۲۸-۲۷ | ۹-۸-۵ | ۵ | ۱/۹۷ | ۰/۹۹ |
| ۲۳۵ | ۲۱-۱۳ | ۸-۷ | ۳ | ۶۶/۱ | ۲/۹۸ |
| ۳۱۶ | ۲۹-۱۲ | ۸-۵ | ۳ | ۱/۸۲ | ۰/۴۱ |
| ۴۲۲ | ۴۲-۳۳ | ۹ | ۳ | ۵/۴۵ | ۱/۷۲ |

بر اساس تابع هزینه تعریف‌شده، جستجو در پی یافتن پاسخی بدون خطای تخمین خط خطادار شده و حداقل خطای تخمین می‌باشد. در این راستا، تعداد باس‌های موردنیاز در نصب اندازه‌گیری جریان، تعداد اندازه‌گیری در هر باس و وابستگی به تغییرات مدل تونن شبکه نیز در متن تابع هزینه کلی می‌باشند.

در تکرار ۲۵ام، ۱۵ جریان در ۷ باس برای تخمین محل خطا با دقت ۲/۰۲٪ به‌عنوان گزینه بهینه پیشنهاد شده‌اند. در صورتی که در تکرار ۳۵ام، تعداد باس‌ها به ۶ و تعداد اندازه‌گیری‌های جریان به ۸ تقلیل یافته‌اند. با نظر به وزن‌های انتخابی، تأثیر این تقلیل بیش‌تر از

از DigSilent و حالت‌های مرجع ایجادشده در جدول ارجاع^۵ (به‌عنوان نماینده خطا در خطوط مختلف و فواصل متنوع)، پیاده‌سازی می‌گردد.

۴-۵- نتایج

پیش از اجرای مراحل شبیه‌سازی، خطوط در معرض اتصال کوتاه شبکه ۹ باس WSCC به ترتیب در شکل ۵ شماره‌گذاری شده‌اند. در انتهای الگوریتم شکل ۴، نسبت‌های جریانی منتخب با کم‌ترین وابستگی به تغییرات مقادیر امپدانس تونن موجود در شبکه WSCC مطابق رابطه (۱۲) استخراج و در جدول ۱ ارائه شده‌اند. مطابق با مقادیر جدول ۱، میزان وابستگی هر یک از نسبت‌های ذکرشده در مقابل آن ارائه شده است. جریان‌های منتخب نمایش‌داده‌شده تنها برای مقادیر با نسبت ورودایی بر متوسط کم‌تر از ۱٪ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: نسبت جریانی منتخب به‌ترتیب کم‌ترین وابستگی به تغییرات

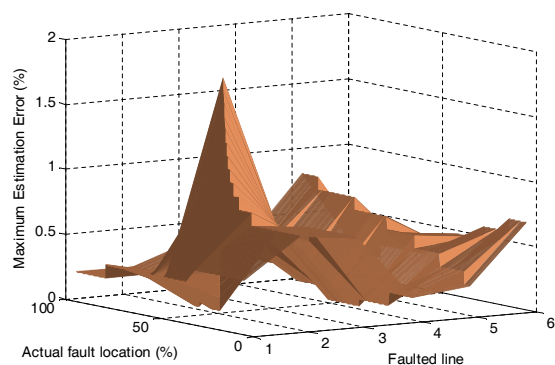
| امپدانس تونن شبکه | | | | | |
|-------------------|-------------------------------|-------|--------------|-------------------------------|-------|
| نسبت ورودایی | نسبت جریانی | ترتیب | نسبت ورودایی | نسبت جریانی | ترتیب |
| ۰/۴۱۸۸ | $\Delta I_{89}/\Delta I_{94}$ | ۲۴ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{11}/\Delta I_{14}$ | ۱ |
| ۰/۴۳۵۴ | $\Delta I_{76}/\Delta I_{82}$ | ۲۵ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{22}/\Delta I_{28}$ | ۲ |
| ۰/۵۰۱۵ | $\Delta I_{77}/\Delta I_{94}$ | ۲۶ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{33}/\Delta I_{36}$ | ۳ |
| ۰/۵۰۶۵ | $\Delta I_{54}/\Delta I_{82}$ | ۲۷ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{11}/\Delta I_{41}$ | ۴ |
| ۰/۵۱۹۴ | $\Delta I_{55}/\Delta I_{94}$ | ۲۸ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{14}/\Delta I_{41}$ | ۵ |
| ۰/۵۳۴۸ | $\Delta I_{56}/\Delta I_{82}$ | ۲۹ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{22}/\Delta I_{82}$ | ۶ |
| ۰/۵۹۶۶ | $\Delta I_{54}/\Delta I_{63}$ | ۳۰ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{28}/\Delta I_{82}$ | ۷ |
| ۰/۶۲۰۶ | $\Delta I_{65}/\Delta I_{82}$ | ۳۱ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{33}/\Delta I_{63}$ | ۸ |
| ۰/۶۲۱۷ | $\Delta I_{67}/\Delta I_{78}$ | ۳۲ | ۰/۰۰۰۰ | $\Delta I_{36}/\Delta I_{63}$ | ۹ |
| ۰/۶۲۷۵ | $\Delta I_{94}/\Delta I_{99}$ | ۳۳ | ۰/۰۴۹۹ | $\Delta I_{55}/\Delta I_{99}$ | ۱۰ |
| ۰/۶۲۲۵ | $\Delta I_{56}/\Delta I_{63}$ | ۳۴ | ۰/۰۷۱۸ | $\Delta I_{77}/\Delta I_{99}$ | ۱۱ |
| ۰/۶۵۸۹ | $\Delta I_{67}/\Delta I_{82}$ | ۳۵ | ۰/۰۸۷۲ | $\Delta I_{55}/\Delta I_{82}$ | ۱۲ |
| ۰/۷۲۵۲ | $\Delta I_{22}/\Delta I_{41}$ | ۳۶ | ۰/۱۰۴۴ | $\Delta I_{77}/\Delta I_{82}$ | ۱۳ |
| ۰/۷۲۵۲ | $\Delta I_{28}/\Delta I_{41}$ | ۳۷ | ۰/۱۵۲۰ | $\Delta I_{55}/\Delta I_{63}$ | ۱۴ |
| ۰/۷۶۷۶ | $\Delta I_{49}/\Delta I_{82}$ | ۳۸ | ۰/۱۶۲۷ | $\Delta I_{55}/\Delta I_{77}$ | ۱۵ |
| ۰/۷۸۲۲ | $\Delta I_{45}/\Delta I_{82}$ | ۳۹ | ۰/۱۷۷۸ | $\Delta I_{49}/\Delta I_{94}$ | ۱۶ |
| ۰/۷۹۵۸ | $\Delta I_{33}/\Delta I_{41}$ | ۴۰ | ۰/۳۰۲۳ | $\Delta I_{76}/\Delta I_{87}$ | ۱۷ |
| ۰/۷۹۵۸ | $\Delta I_{36}/\Delta I_{41}$ | ۴۱ | ۰/۳۱۰۶ | $\Delta I_{45}/\Delta I_{54}$ | ۱۸ |
| ۰/۸۳۷۵ | $\Delta I_{98}/\Delta I_{99}$ | ۴۲ | ۰/۳۱۳۳ | $\Delta I_{78}/\Delta I_{87}$ | ۱۹ |
| ۰/۸۴۷۷ | $\Delta I_{49}/\Delta I_{89}$ | ۴۳ | ۰/۳۷۱۹ | $\Delta I_{67}/\Delta I_{87}$ | ۲۰ |
| ۰/۸۸۲۲ | $\Delta I_{45}/\Delta I_{65}$ | ۴۴ | ۰/۳۸۸۰ | $\Delta I_{78}/\Delta I_{82}$ | ۲۱ |
| ۰/۸۹۱۷ | $\Delta I_{49}/\Delta I_{99}$ | ۴۵ | ۰/۳۹۷۲ | $\Delta I_{54}/\Delta I_{65}$ | ۲۲ |
| ۰/۹۵۰۱ | $\Delta I_{54}/\Delta I_{55}$ | ۴۶ | ۰/۴۰۶۲ | $\Delta I_{67}/\Delta I_{76}$ | ۲۳ |

$$\text{Variance Ratio} = \text{Var}\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right) / \text{Mean}\left(\frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_{kl}}\right) < 1\% \quad (20)$$

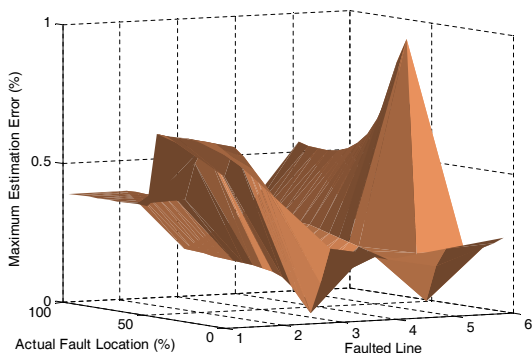
استفاده تمامی نسبت‌های جریانی منتخب در یک بردار برای جستجوی شباهت، تمامی باس‌ها و اکثر جریان‌ها را درگیر می‌نماید. لذا، بایستی مراحل بهینه‌سازی برای جستجوی مناسب‌ترین جریان‌ها انجام پذیرد. با توجه به طول بردار حاصل از انتخاب تمامی نسبت‌های موجود در جدول ۱، رشته باینری مورد استفاده در مراحل بهینه‌سازی با

تونن موجود در شبکه و فواصل مختلف خطا در شبکه، تقریب ۱٪ مناسب به نظر می‌رسد.

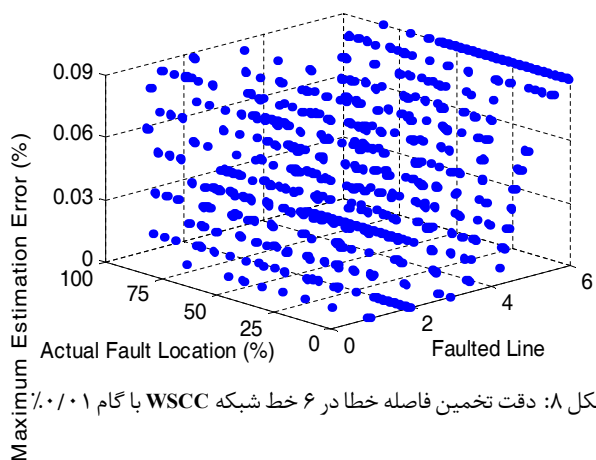
با نظر به اینکه دقت پایگاه اطلاعات از نسبت‌های تعیین شده، هرچه با گام‌های کوتاه‌تری صورت پذیرد، دقت و میزان همخوانی مقادیر افزایش می‌یابد، می‌توان با افزایش دقت در تشکیل پایگاه اطلاعات فواصل پیشنهادی را به ۰/۰۱٪ تقلیل داد. مشاهده می‌گردد که این امر موجب کاهش خطای تخمین به مقداری برابر با ۰/۱٪ می‌گردد. شکل ۸ بیانگر این مسئله است.



شکل ۶: دقت تخمین محل خطای تک‌فاز به زمین در ۶ خط شبکه WSCC



شکل ۷: دقت تخمین محل خطای سه‌فاز به زمین در ۶ خط شبکه WSCC



شکل ۸: دقت تخمین فاصله خطا در ۶ خط شبکه WSCC با گام ۰/۰۱٪

افزایشی است که در دقت تخمین صورت پذیرفته است (۲۲/۲٪). این مسئله در تکرار ۸۸ام و ۲۳۵ام نیز مشاهده می‌گردد.

در تکرار ۳۱۶ام، جوابی به دست آمده است که به ازای آن با دقت بالایی تخمین محل خطا با نصب تجهیزات اندازه‌گیری جریان در باس ۵ و ۸ انجام شده است. با در نظر گرفتن محدوده‌ای برای خطای تخمین، می‌توان تعداد باس‌های مانیتورینگ را به یک باس تقلیل و هزینه مانیتورینگ را کاهش داد.

سیستم مانیتورینگ A: دقت و هزینه بالاتر

$$[CurrentRatio] = \begin{bmatrix} \Delta I_{55} / \Delta I_{82} & \Delta I_{56} / \Delta I_{82} \\ 12 & 29 \end{bmatrix}$$

Busses: [5,8]

Currents: [I₅₅, I₅₆, I₈₂]

سیستم مانیتورینگ B: دقت و هزینه کمتر

$$[CurrentRatio] = \begin{bmatrix} \Delta I_{94} / \Delta I_{99} & \Delta I_{98} / \Delta I_{99} \\ 33 & 42 \end{bmatrix}$$

Busses: [9]

Currents: [I₉₄, I₉₈, I₉₉]

مجموع دفعات تخمین غلط خط خطا دار شده برابر با صفر و بیش‌ترین خطای تخمین فاصله خطا در کل حالات ممکن برای رخداد خطا در سیستم‌های مانیتورینگ A و B به ترتیب برابر با ۱/۱۸۲۵۰٪ و ۵/۴۵۴۰٪ شده است. این در حالی است که متوسط خطای تخمین فاصله خطا در کل حالات ممکن برای رخداد خطا در سیستم‌های مانیتورینگ A و B به ترتیب برابر با ۰/۴۱۶۰٪ و ۱/۷۲۱۸٪ گشته که مقدار بسیار کمی است. این بیان برای خطاهای قابل رخداد در ۶ خط شبکه WSCC، در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. بنابراین، فرآیند تخمین محل خطا با حداقل جریان‌های مستقل از تغییرات مقادیر امپدانس تونن موجود در شبکه WSCC با کم‌ترین باس موردنیاز به خوبی به انجام رسیده است. در خصوص نتایج مربوط به انتخاب بهینه وزن‌ها، مقادیر حاصل در طی مراحل بهینه‌سازی عبارت‌اند از:

$$W_{m1} = 0.603 \quad W_{m2} = 0.219 \quad W_{m3} = 0.178$$

$$W_1 = 0.667$$

$$W_2 = 0.333$$

بایستی بر این نکته متذکر شد که روش ارائه شده در این مقاله، روش جامع و هوشمند تعیین محل خطا در شبکه‌های قدرت است. این روش مبتنی بر حداقل اندازه‌گیری جریان صورت پذیرفته است. اینکه خطای تخمین به ۱٪ رسیده است و به نظر خطای تخمین بالایی است، این مسئله ناشی از اندازه‌گیری تنها سه جریان از دو باس بوده است. چنانچه هدف افزایش دقت تخمین باشد، یقیناً تعداد باس‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری افزایش خواهد یافت. تهیه بانک اطلاعاتی توسط تحلیل حالت‌های مختلف پیش‌آمده از خطاهای ممکن در فواصل ۱٪ طول خط پیشنهاد شده است. اینکه نسبت‌های جریانی بر اساس نمونه‌های ممکن و فواصل خطا بستگی دارد بدیهی است. لیکن با نظر به انتخاب نسبت‌های جریانی مستقل از تغییرات توأمان امپدانس‌های

- transmission networks," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1644-1652, 2012.
- [8] R.F. Nuqui, and A.G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [9] K.P. Lien, C.W. Liu, C.S. Yu, and J.A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1128-1136, 2006.
- [10] K. Mazlumi, H.A. Askarian, S.H. Sadegi, and S.S. Geramian, "Determination of optimal PMU placement for fault-location observability," *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 1938-1942, 2008.
- [11] S.S. Geramian, H.A. Askarian, and K. Mazlumi, "Determination of optimal PMU placement for fault location using genetic algorithm," *ICHQP-2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 1-5, 2008.
- [12] S.P. Pokharel, and S. Brahma, "Optimal PMU placement for fault location in a power system," *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-5, 2009.

[۱۳] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و قدرت‌اله سیف‌السادات، «تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۱، شماره ۲، صفحات ۲۹-۲۱، ۱۳۹۰.

- [14] L.J. Lewis, "Traveling Wave Relations Applicable to Power-System Fault Locators," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, pp. 1671-1680, 1951.
- [15] C.Y. Evrenosoglu, and A. Abur, "Travelling wave based fault location for teed circuits," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1115-1121, 2005.
- [16] S. Jamali, and A. Ghezjeljeh, "Fault location on transmission line using high frequency travelling waves," *Developments in Power System Protection, IEEE Proceedings*, vol. 1, pp. 220-223, 2004.
- [17] *Western Systems Coordinating Council: Data for the IEEE 14, 30, 57, 118, 300-bus test system*, University of Washington. Available online at <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.

[۱۸] پدram شهریاری‌نسب، معین پرستگاری و مهدی معلم، «استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال توان بدون تماس به روش القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۳، شماره ۲، صفحات ۲۰-۹، ۱۳۹۲.

زیرنویس‌ها

- ۱ Current Transformer
 ۲ Capacitive Voltage Transformer
 ۳ Phasor Measurement Unit
 ۴ Variance
 ۵ Lookup Table

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکان‌یابی تجهیزات اندازه‌گیری جریان بر اساس نگرشی مبتنی بر مشاهده‌پذیری محل خطا در شبکه قدرت با حداقل نقاط پایهریزی شده است. با نظر به دینامیک سیستم قدرت از دیدگاه تغییرات مقادیر امپدانس تونن موجود، مطالعات، پیرامون مشاهده‌پذیری کامل شبکه توأم با این حقیقت صورت پذیرفته است. الگوریتم تشخیص محل خطا، بر اساس مقدار نسبت جریان خطوط شبکه خطادار شده با تکیه بر تئوری تونن پایهریزی شده است. نتایج جستجویی برای یافتن جریان‌های بهینه و نسبت‌های مستقل از تغییرات امپدانس‌های تونن در شبکه ۹ باس WSCC با کم‌ترین باس‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری با دو پیشنهاد ارائه شده است. پیشنهاد اول با مانتورینگ یک باس و متوسط خطای کم‌تر از ۱/۷۲٪ و پیشنهاد دوم با مانتورینگ دو باس و متوسط خطای کم‌تر از ۰/۴۱٪ است. مطابق نتایج، متوسط خطای تخمین در کل حالات مقدار بسیار کمی است. چنانچه در هنگام تشکیل پایگاه اطلاعات گام مکان‌های ممکن به خطا ۰/۰۱٪ قرار گیرد، خطای تخمین به ۰/۱٪ می‌رسد. این روش در کنار مزیت‌ها، نقاط ضعفی نیز خواهد داشت. از جمله این موارد، امکان اشباع CT است که اگرچه احتمال رخداد بسیار کمی دارد، لیکن ملاحظه آن در تحقیقات آتی ضروری می‌نماید.

مراجع

- [1] M.M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski. *Fault location on power networks*, London, Springer, 2010.
- [۲] وحید فتحی، هیرش سیدی و ابراهیم بابایی، «بهبود عملکرد رله‌های دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۳، شماره ۲، صفحات ۲۹-۲۱، ۱۳۹۲.
- [3] S.M. Brahma, "New fault-location method for a single multi terminal transmission line using synchronized phasor measurements," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1148-1153, 2006.
- [4] K.G. Firouzjah, and A. Sheikholeslami, "Current independent method based on synchronized voltage measurement for fault location on transmission lines," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no.4, pp. 692-707, 2009.
- [۵] خلیل گرگانی فیروزجاه و عبدالرضا شیخ‌الاسلامی، «روش اصلاح‌شده مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ همزمان برای تعیین محل خطا در خطوط دو ترمینال با حذف ترانسفورماتور جریان»، *مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز*، جلد ۳۶، شماره ۱، صفحات ۵۲-۵۳، ۱۳۸۸.
- [6] K.G. Firouzjah, and A. Sheikholeslami, "A new fault location method for two and three-terminal Transmission lines accompanied by CT elimination," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 3, no. 2, pp. 241-256, 2008.
- [7] Q. Jiang, X. Li, B. Wang, and H. Wang, "PMU-based fault location using voltage measurements in large