مروری بر روش‌های تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن در شبکه‌های توزیع برق

میلاد صمدی شادلو

کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بجنورد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بجنورد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۸

خلاصه: به مجموعه روش‌هایی که بعد از بروز خطا، موقعیت خطا را با توجه به شرایط قبل و بعد از خطا تشخیص می‌دهند، الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا گفته می‌شود و بخشی که این کار را انجام می‌دهد، مکان‌یاب خطا نامیده می‌شود. در همین رابطه مفاهیمی چون تشخیص خطا و جداسازی آن و تشخیص خطا و سرمنشأ آن نیز در سیستم قدرت مطرح شده است. تاکنون روش‌های مختلفی به منظور تشخیص خطا و سرمنشأ آن در بخش‌های مختلف سیستم قدرت و نیز تجهیزات آن نظیر ترانسفورماتورها، مبدل‌ها، خطوط هوایی، کابل‌های زمینی، فیدرها، مدارشکن‌ها، رله‌های حفاظتی، ژنراتورها، توربین‌ها و غیره معرفی شده است که هر کدام در تکمیل کارهای گذشته، روشی جدید و کارآمدتر را پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله، مطالعه جامعی روی روش‌های تشخص خطا و تعیین سرمنشأ آن در سیستم‌های توزیع برق ارائه شده است. همچنین دسته‌بندی و روش‌شناسی تحقیقات صورت گرفته پیرامون این موضوع در مقالات مختلف، بیان شده است. الگوریتم‌های تشخیص خطا و تعیین مکان خطا از دو دیدگاه کلی تقسیم‌بندی شده و ویژگی‌های هر دسته به صورت کامل تشریح شده است.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا، تعیین سرمنشأ خطا، شبکه‌های توزیع برق.

A Review on Fault Detection and Diagnosis Methods in Distribution Power Networks

Milad Samady Shadlu

MSc. - Department of Electrical and Electronic Engineering, Young Researchers and Elite Club, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran

Milad.Samady@yahoo.com

Abstract: Fault detection and diagnosis algorithms are methods whose function is determining the fault point in a system according to pre-faulting and post-faulting conditions, and fault detector is a part of system which performs this function. Accordingly, the aspects like fault detection and diagnosis and faulted point isolation have been introduced. Until now many researches have focused on fault detection methods in different parts of power system such as transformers, converters, overhead lines, underground cables, feeders, breakers, protection relays, generators, turbines, etc., which every one of them has proposed a new and effective method in supplementing of previous works. In this paper, a comprehensive study is done on fault detection and diagnosis in distribution power systems. Also, categorizing and also methodology of previous works in literature is addressed. Fault detection and diagnosis algorithms are divided based on two viewpoints and characteristics and features of each one are described completely.

Index Terms: Fault Detection, Fault Diagnosis, Distribution Power Networks.

نویسنده مسئول: میلاد صمدی شادلو، کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بجنورد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بجنورد، ایران، Milad.Samady@yahoo.com

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های توزیع به‌تدریج خودکار می‌شوند و سیستم‌های توزیع معمولی جای خود را به سیستم‌های اتوماسیون می‌دهند. در سیستم‌های اتوماسیون توزیع، ابزارهای حفاظت آنالوگ با ابزارهای حفاظت دیجیتال جایگزین شده‌اند. مهم‌ترین ویژگی ابزارهای حفاظت دیجیتال، امکان ثبت مؤلفه‌های ولتاژ و جریان برای تمامی لحظه‌ها و سرعت بالای به‌روزرسانی اطلاعات و بهره‌گیری از ساختار بانک‌های اطلاعاتی می‌باشد که این ویژگی‌ها در ابزارهای قدیمی آنالوگ وجود نداشت. این امکانات سبب شده است تا پیشرفت‌های زیادی در زمینه کنترل و حفاظت سیستم‌های اتوماسیون توزیع صورت گیرد. وجود ابزارهای حفاظت دیجیتال باعث شده است تا اکثر الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا بر روی سیستم‌های اتوماسیون توزیع اجرا شوند، در حالی که در سیستم‌های توزیع قدیمی نمی‌توان به راحتی الگوریتم‌های مکان‌یابی را اجرا نمود. سیستم‌های اتوماسیون توزیع مانند سیستم‌های انتقال به صورت مرکزی کنترل می‌شوند. بنابراین در سیستم‌های اتوماسیون برای ایجاد سرعت در تجزیه و تحلیل داده‌ها و جلوگیری از انتقال حجم زیادی از اطلاعات در فرآیند مکان‌یابی خطا، بخشی از عملیات تجزیه و تحلیل در پست و بخشی دیگر در مرکز کنترل انجام می‌شود.

مطالعه تشخیص خطا در سیستم‌های قدرت، سابقه طولانی دارد. مقالات و تحقیقات متعددی وجود دارد که روی مسئله تشخیص خطا و تعیین منشأ آن متمرکز شده‌اند. نکته بسیار مهم این است که تشخیص خطا در زمانی که سیستم هنوز فعالیت می‌کند، می‌تواند از حوادث بعدی و نیز بروز آسیب‌های جدی به سیستم جلوگیری کند.

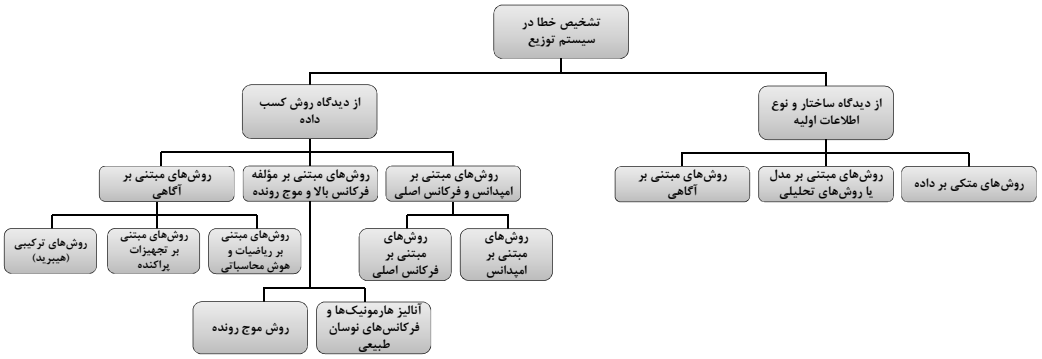
در این‌گونه سیستم‌ها، کنترل‌کننده‌هایی به صورت بی‌وقفه وجود دارند که وظیفه آن‌ها برقراری پایداری سیستم بعد از بروز خطا است. اثر اغتشاش، نویز و اختلال در سیستم به کمک این کنترل‌کننده‌ها به حداقل می‌رسد. همچنین، پارامترهای الکتریکی نظیر ولتاژ، جریان، توان و غیره نیز در سیستم به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شوند. با در نظر گرفتن تمام این فرآیندها و متغیرهای مربوط به آنها، ما با حجم بالایی از داده‌ها مواجه خواهیم بود و در نتیجه تشخیص خطا در زمان مناسب چالش بزرگی را به وجود می‌آورد. از طرفی، در سیستم‌هایی که با میزان نفوذ بالای منابع تولید پراکنده مواجه هستند، به خاطر تعدّد منابع تولیدی و نیز بارهای موجود در سیستم، حجم داده‌ها و نیز مکان‌های مستعد برای بروز خطا افزایش خواهد یافت.

خطا در حقیقت یک انحراف غیر قابل پیش‌بینی است که حداقل در یک پارامتر یا مشخصه از سیستم قدرت رخ می‌دهد که این انحراف در مقایسه با مقدار پارامتر در شرایط عادی یا مقدار استاندارد آن تعریف می‌شود. زمانی که مقدار اندازه‌گیری شده یک متغیر، متفاوت با مقدار آستانه آن باشد، می‌گوییم که در سیستم خطا رخ داده است. مقادیر آستانه بر اساس داده‌های قبلی در شرایط کار عادی سیستم قابل محاسبه و ثبت هستند.

اهمیت خطایابی در سیستم قدرت زمانی بیشتر است که فعالیت‌های سیستم از راه دور کنترل می‌شود و یا سیستم در مکان‌های دور از دسترس قرار دارد که مشاهده و کنترل مستقیم پارامترهای آن را دشوار می‌سازد. تشخیص به موقع خطا می‌تواند در زمان و هزینه تعمیر یک سیستم یا تولید یک محصول صرفه‌جویی کند. به عنوان مثال، بروز خطا در داخل روتور و یا سیم‌پیچ‌های استاتور یک ماشین الکتریکی را در نظر بگیرید. در چنین شرایطی، امکان دسترسی مستقیم به بخش معیوب وجود ندارد و باید ماشین از محصل نصب خود جدا شده که هزینه و وقت زیادی را می‌طلبد، و یا خطاهای رخ داده در ترانسفورماتورهای قدرت، و یا ادوات الکترونیک قدرت در خطوط انتقال که هر یک برای بازرسی مستقیم، با چالش‌های زیادی مواجه است.

یکی از بخش‌های سیستم قدرت که با خطاهای متعددی دست به گریبان است، سیستم توزیع برق است. در این سیستم به دلیل وجود ترانس‌های قدرت، رله‌های حفاظتی، خطوط انتقال زمینی و هوایی، دکل‌های توزیع و غیره، بروز خطاهای مختلفی محتمل است. هدف روش‌های تشخیص خطا، اول از همه تشخیص بروز خطا و زمان رخداد آن و در مرحله بعدی، تشخیص سرمنشأ خطا می‌باشد. عملکرد صحیح سیستم‌های خطایاب در سیستم توزیع، یک مزیت قابل‌توجه به شمار می‌آید. به منظور خطایابی در سیستم توزیع به صورت اتوماسیون، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی معرفی شده است. هر یک از این روش‌ها دارای یک سری مزایا و معایب هستند و بنابراین انتخاب روش تشخیص خطا، به شرایط سیستم وابسته است. ساختار کلی تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا در سیستم توزیع در شکل (۱) نشان داده شده است. به طور کلی، تشخیص خطاهای مختلف در سیستم توزیع، به دو روش تقسیم‌بندی می‌گردد. روش اول، تقسیم‌بندی از دیدگاه ساختار و نوع اطلاعات اولیه‌ای است که در فرآیند تشخیص خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش دوم، تقسیم‌بندی از دیدگاه روش کسب داده است. هر یک از این دسته‌بندی‌ها، خود به زیر بخش‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به تشریح دقیق آنها خواهیم پرداخت.

ساختار کلی مقاله به صورت زیر قابل توصیف است. تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا از دیدگاه ساختار و نوع اطلاعات اولیه در بخش ۲ صورت می‌گیرد. در بخش ۳، تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا از دیدگاه روش کسب داده بیان می‌شود و در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه خواهد شد.



شکل (۱): ساختار کلی تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا در سیستم توزیع

Fig. (1): The overall structure of the division of fault detection methods in the distribution system

۲- تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا از دیدگاه ساختار و نوع اطلاعات اولیه

روش‌های تشخص خطا به طور کلی بر اساس ساختار و نوع اطلاعات اولیه به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های متکی بر داده، روش‌های مبتنی بر مدل یا روش‌های تحلیل و روش‌های مبتنی بر آگاهی. در تشخیص خطای مبتنی بر مدل، می‌بایست مدل دقیق فرآیند یا مدل ریاضی آن معلوم باشد. گاهی اوقات یافتن مدل دقیق سیستم کار دشواری است، در این‌گونه موارد، تکنیک‌های متکی بر داده می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از سیستم‌های قدرت دارای حجم بالایی از داده‌ها هستند که شامل پارامترهایی نظیر دما، فشار، سرعت، جریان و غیره است و این پارامترها در شرایط کار عادی و شرایط خطا تغییر می‌کنند. با استفاده از این حجم داده می‌توان یک مدل آماری برای سیستم تعریف کرد که از این مدل می‌توان برای تشخیص خطا در مراحل بعدی استفاده نمود. شکل (۲) به صورت خلاصه، دسته‌بندی روش‌های تشخیص خطا از دیدگاه ساختار و نوع اطلاعات اولیه را نشان می‌دهد.

۲-۱- روش‌های متکی بر داده

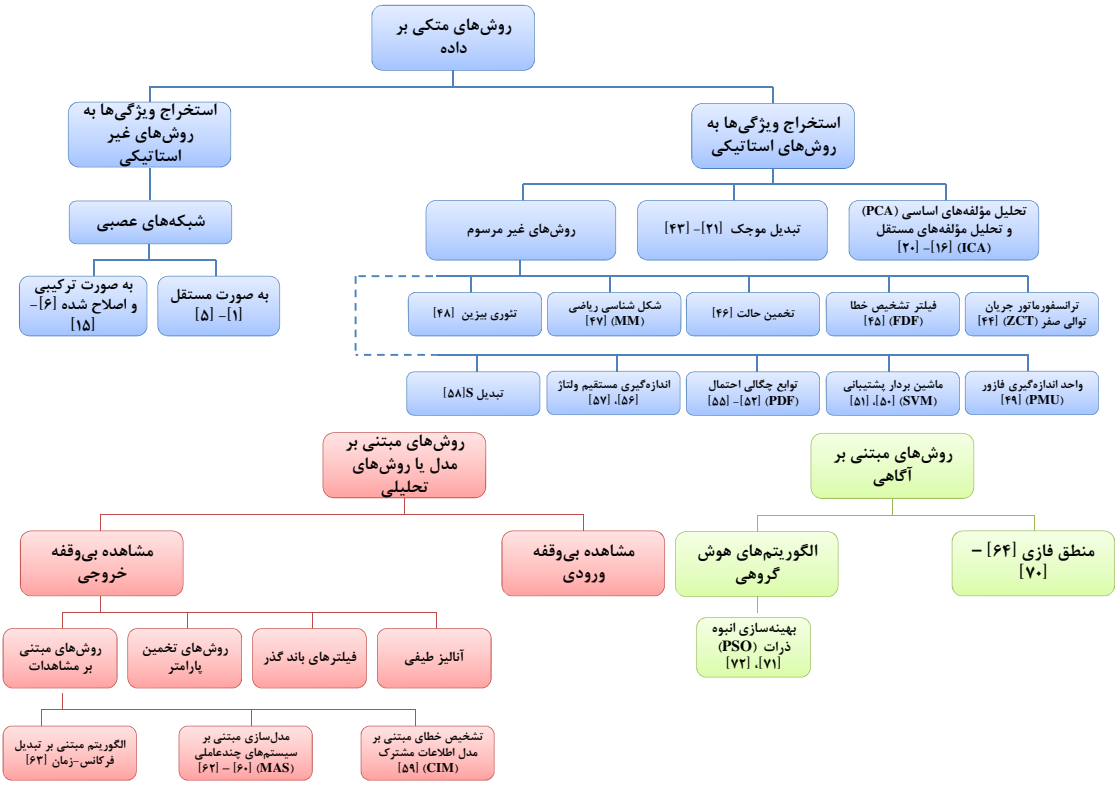
این روش‌ها عموماً تنها از داده‌های موجود برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند و در بسیاری از فرآیندهای صنعتی نیز کاربرد دارند. داده موجود به یک سری بانک اطلاعاتی خاص قابل تبدیل است که این کار به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد. این فرآیند را معمولاً استخراج ویژگی‌ها نیز می‌نامند. استخراج ویژگی‌ها با روش‌های استاتیکی یا غیر استاتیکی قابل پیاده‌سازی است. یکی از معمول‌ترین روش‌های غیر استاتیکی مورد استفاده در این مورد شبکه‌های عصبی است. از این روش یا به صورت مستقل [۱]- [۵] و یا به صورت ترکیبی و اصلاح شده [۶]- [۱۵] استفاده شده است. از روش‌های استاتیکی استخراج ویژگی‌ها نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA[۱]) و تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA[۲]) [۱۶]- [۲۰]، تبدیل موجک[۳] [۲۱]- [۴۳] و روش‌های غیرمرسوم دیگری نظیر روش استفاده از ترانسفورماتور جریان توالی صفر (ZCT[۴]) [۴۴]، استفاده از فیلتر تشخیص خطا (FDF[۵]) [۴۵]، روش مبتنی بر تخمین حالت [۴۶]، روش مبتنی بر شکل‌شناسی ریاضی (MM[۶]) [۴۷]، روش احتمالی مبتنی بر تئوری بیزین[۷] [۴۸]، تشخیص خطا با استفاده از واحد اندازه‌گیری فازور (PMU[۸]) [۴۹]، استفاده از ماشین بردار پشتیبانی (SVM[۹]) [۵۰]، [۵۱]، روش مبتنی بر توابع چگالی احتمال (PDF[۱۰]) [۵۲]- [۵۵]، روش اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ [۵۶]، [۵۷] و به‌کارگیری تبدیل S[۱۱] [۵۸]. تنها اشکال روش‌های متکی بر داده این است که به میزان زیادی به کیفیت و کمیت داده‌ها وابسته بوده و نسبت به پارامترهای سیستم، حساس هستند.

۲-۲- روش‌های مبتنی بر مدل یا روش‌های تحلیلی

روش‌های مختلفی بر مبنای مدل برای تشخیص خطا وجود دارد. تشخیص خطا با استفاده از مشاهده بی‌وقفه ورودی و خروجی سیستم، معمول‌ترین این روش‌هاست. در برخی موارد، تنها سیگنال خروجی مشاهده می‌شود؛ در چنین مدل‌هایی از روش‌هایی نظیر آنالیز طیفی و فیلترهای باندگذر برای تشخیص خطا استفاده می‌شود. در میان این دسته، بیشترین روش‌های مورد استفاده عبارت‌اند از روش‌های تخمین پارامتر و روش‌های مبتنی بر مشاهدات. تشخیص خطا با کمک این روش‌ها با مقایسه متغیرهای اندازه‌گیری شده با اطلاعات به دست آمده از مدل ریاضی سیستم، صورت می‌گیرد. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل اطلاعات مشترک (CIM[۱۲]) [۵۹]، مدل‌سازی مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی (MAS[۱۳]) [۶۰]- [۶۲] و الگوریتم مبتنی بر تبدیل فرکانس-زمان [۶۳].

۲-۳- روش‌های مبتنی بر آگاهی

تشخیص خطا به کمک روش‌های مبتنی بر آگاهی یک پروسه ابتکاری دارد. در روش‌های ابتکاری معمولاً از مقادیر مشخصه‌های سیستم نظیر دامنه، واریانس، متغیرهای حالت، پارامترهای مدل و نوسانات برای استخراج ویژگی‌های سیستم در شرایط نرمال و شرایط خطا استفاده می‌شود. بعد از استخراج ویژگی‌ها تحت هر دو شرایط نرمال و خطا، این دو اطلاعات با هم مقایسه می‌شوند و روش‌های تشخیص اختلاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. منطق فازی [۶۴]- [۷۰] و الگوریتم‌های هوش گروهی نظیر بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO[۱۴]) [۷۱]، [۷۲]، از جمله روش‌های مبتنی بر آگاهی هستند.



شکل (۲): دسته‌بندی روش‌های متکی بر داده، روش‌های مبتنی بر مدل یا روش‌های تحلیلی و روش‌های مبتنی بر آگاهی

Fig. (2): Classification of data-based, model-based (analytical) and knowledge-based methods

۳- تقسیم‌بندی روش‌های تشخیص خطا از دیدگاه روش کسب داده

اولین دسته از الگوریتم‌های تشخیص خطا و یافتن سرمنشأ آن (FDD[۱۵]) از دیدگاه روش کسب داده، روش‌های مبتنی بر جمع‌بندی امپدانس است که در [۷۳]- [۷۶] به آن پرداخته شده است.

اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در این روش به منظور محاسبه مشخصه‌های خط انتقال و با استفاده از روش‌های ریاضی صورت می‌گیرد. اما، این روش به واسطه محدودیت‌هایی نظیر تخمین‌های چندگانه در شبکه‌های توزیع که به دلیل فاصله زیاد بخش‌های مختلف از هم اجتناب‌ناپذیر است، چندان کارآمد نیست.

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه فناوری و محاسبات، روش‌های مبتنی بر موج‌های رونده[۱۶] و نیز روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی، در شبکه‌های قدرت مطرح شده‌اند. تحقیقات انجام شده در [۷۷]- [۸۷] بر مبنای مؤلفه‌های فرکانس بالا می‌باشد که معمولاً اندازه‌گیری و ثبت این مؤلفه‌ها در سیستم‌های قدرت دشوار است. به منظور حل این مشکل و مقابله با این محدودیت، فناوری‌های ثبت موج رونده، سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی (GPS[۱۷])، کانال‌های ارتباطی سرعت بالا و غیره، مطرح شده‌اند.

استفاده از روش‌های هوش محاسباتی نیز با پیشرفت و توسعه روش‌های محاسبه و پردازش سیگنال، مطرح شده‌اند. از این رو، این روش‌های خاص، موضوع بسیاری از تحقیقات سال‌های اخیر قرار گرفته‌اند [۸۸]- [۹۱].

روش‌های موجود برای تشخیص خطا در خطوط توزیع و تعیین سرمنشأ خطا معمولاً از دیدگاه روش کسب داده به روش‌های مبتنی بر امپدانس یا فرکانس اصلی، روش‌های مبتنی بر مؤلفه‌های فرکانس بالا یا موج‌های رونده و روش‌های مبتنی بر آگاهی تقسیم‌بندی می‌شود [۹۲]- [۹۵]. در ادامه به بررسی دقیق‌تر این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۳-۱- مروری بر روش‌های مبتنی بر امپدانس و فرکانس اصلی

۳-۱-۱- روش‌های مبتنی بر امپدانس

مبنای تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن به کمک روش‌های مبتنی بر امپدانس و فرکانس اصلی، اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در ابتدای خط، و یا پس از پایان خط در ابتدا و یا انتها و یا هر دو نقطه ابتدایی و انتهایی فیدرها می‌باشد. سپس کمیت‌های اندازه‌گیری شده، برای محاسبه مشخصه‌های خط با استفاده از معادلات ریاضی استفاده خواهند شد. در اصل، امپدانس خط به ازای طول واحد، برای تعیین سرمنشأ خطا استفاده می‌شود. روش رأکتانس ساده که در (۱) تا (۳) بیان شده است، برای محاسبه فاصله خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

افت ولتاژ در نقطه انتهای خط از (۱) قابل‌محاسبه است:

$$V_s = (x.Z_l.I_s) + R_F.I_F \quad (۱)$$

$$Im(\frac{V_s}{I_s}) = Im(x.Z_l) = x.X_l \quad (۲)$$

$$x = \frac{Im(\frac{V_s}{I_s})}{x_l} \quad (۳)$$

که در این روابط، x فاصله نقطه وقوع خطا، V_s و I_s به ترتیب ولتاژ و جریان ترمینال ابتدای خط، I_F جریان خطا، X_l رأکتانس خط در واحد طول و Im علامت مختص بخش موهومی می‌باشد.

طی اصلاحاتی که روی روش رأکتانس در [۷۳] اعمال شده است، این روش که به روش Takagi نیز معروف است، به یک روش تک پایانه تبدیل شده است که هم از داده‌های پیش از خطا و هم از داده‌های پس از خطا استفاده می‌کند. همچنین در [۹۶] با تغییراتی که در روش رأکتانس ساده اعمال شده است، اثرات پخش بار و مقاومت خطا نیز به حداقل رسیده است. با این تغییرات، (۳) به صورت (۴) بازنویسی شده است [۹۶]:

$$x = \frac{\mathrm{Im}(V_S I_S^{"*})}{\mathrm{Im}(Z_1 . V_S I_S^{"*})} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، x فاصله نقطه خطا، V_s و I_s به ترتیب ولتاژ و جریان ترمینال ابتدای خط، $I_s^{"}$ اختلاف جریان پیش از بروز خطا و پس از بروز خطا (جریان مؤلفه خطا)، Z_1 امپدانس خط انتقال در واحد طول، Im علامت مختص بخش موهومی و * نیز علامت مزدوج مختلط است.

یک مقاله مروری نیز در [۹۷] ارائه شده است که در آن، روش‌های معرفی شده برای تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن در شبکه‌های توزیع ذکر شده و مقایسه‌ای نیز برای این روش‌ها ارائه گردیده است. در این مرجع به روش [۷۴] اشاره شده است که در آن، معادلاتی برای محاسبه انواع مختلف خطا در فیدرهای اصلی و نیز در خط عرضی تک فاز معرفی شده‌اند. در [۷۴] از تبدیل فوریه گسسته (DFT[۱۸]) برای فیلتر کردن هارمونیک‌ها با استفاده از یک سری محاسبات ساده استفاده شده است. همچنین مشکل تعدّد مکان‌های بروز خطا و مقادیر محاسبه شده متناظر با آن‌ها نیز با به‌روزرسانی کردن بردارهای ولتاژ و جریان با استفاده از مدل بار امپدانس استاتیک، حل شده است. در [۷۶] نیز دو روش تئوری برای تخمین فاصله خطا معرفی شده است. در روش اول، دو معادله خطی با توجه به معادله امپدانس ظاهری تشکیل می‌شود در حالی که در روش دوم، معادله فاصله به صورت تابعی از مقاومت خطا تشکیل می‌گردد. همچنین دو روش تئوری معرفی شده روی یک مورد آزمایشی نیز پیاده‌سازی شده و نتایج آن ارائه گردیده است. اما نتایج نشان داده است که روش معادله خطی در حالتی که خطا بدون هیچ‌گونه مقاومتی رخ می‌دهد، از دقت بیشتری برخوردار است.

در [۹۸]، نویسندگان روشی را برای اندازه‌گیری پارامترها از طریق تجهیزات الکترونیکی هوشمند (IED[۱۹]) پیشنهاد داده‌اند. این تجهیزات در پست‌ها نصب شده و به کمک زیرساخت‌های مخابراتی خاصی برای تبادل داده‌ها با هم مرتبط می‌شوند. نوع خطاهای در نظر گرفته شده در این مقاله، خطای فاز A به زمین (A-G)، خطای فاز B به فاز C (B-C)، خطاهای فاز B به فاز C به زمین (BC-G)، خطای سه فاز به هم (3Ph) و خطای سه فاز به زمین (3Ph-G) می‌باشد. در [۹۹] نیز از مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ سه فاز در باس بار تغذیه در یک شبکه ولتاژ متوسط با ۱۶ فیدر، همچنین اندازه‌گیری جریان در فیدرهای خطادار و اندازه‌گیری امپدانس شبکه در مؤلفه‌های متقارن آن برای تعیین مکان خطا استفاده شده است. در این مقاله دو نوع خطا مد نظر قرار گرفته است که عبارت‌اند از: خطای تک فاز به زمان (SL-G) و خطای سه فاز به هم (3Ph). در این روش، پارامترهای اندازه‌گیری مذکور پس از هر تغییر در شبکه، یک بار اندازه‌گیری شده و در مرکز داده ذخیره‌سازی می‌شوند که به نوعی بیانگر تشخیص خطا به صورت آفلاین بوده که به زمان و حجم محاسبات و حافظه زیادی برای ذخیره داده‌ها نیاز دارد.

روش دیگری که در [۱۰۰] اشاره شده است، بر مبنای اندازه‌گیری فازورهای جریان و ولتاژ در سطح پست‌های فرعی می‌باشد و در کنار آن، دامنه‌های ولتاژ اندازه‌گیری شده در برخی از باس‌های فیدر نیز در محاسبات استفاده می‌شود. در این روش یک مرکز داده در نظر گرفته شده است که شامل پارامترهای الکتریکی، عملیاتی و ساختاری شبکه توزیع می‌باشد. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله روی یک شبکه واقعی 13.8 kV با ۲۳۸ فیدر هوایی تست شده است. این روش را می‌توان به راحتی با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری کیفیت توان (PQ[۲۰]) که قبلاً در فیدرها نصب شده‌اند، پیاده‌سازی نمود. با این روش، تجهیزات PQ وظیفه آنالیز کیفیت توان و تعیین موقعیت خطا را به صورت لحظه‌ای بر عهده خواهند داشت. از این رو، برای شرکت‌های توزیع برق این امتیاز را خواهد داشت که هزینه‌های سرمایه‌گذاری خود را کاهش دهند.

در [۱۰۱] یک الگوریتم مکان‌یابی خطا ارائه شده است که از اندازه‌گیری نوسانات ولتاژ به کمک کنتورهای PQ و تجهیزات اندازه‌گیری ولتاژ در فیدرها بهره می‌برد. داده‌های تولید شده توسط شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار ATP[۲۱] به عنوان داده‌های ورودی به الگوریتم استفاده می‌شود. همچنین [۱۰۲] نیز روشی را برای حذف مشکلات ناشی از تخمین چندگانه که در روش‌های مکان‌یابی خطای مبتنی بر امپدانس وجود دارد، ارائه کرده است که در این روش، از اندازه‌گیری‌های یک طرفه جریان و ولتاژ در پست‌های قدرت استفاده می‌شود. همچنین سه سیستم آزمایشی نیز برای شناسایی بخش‌های دچار خطا مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله ثابت شده است که تنها با شناسایی یک نقطه خطادار، مشکل تخمین‌های چندگانه حل خواهد شد. مرجع [۱۰۳] نیز یک رابطه تعمیم یافته را برای روش مکان‌یابی خطای مبتنی بر امپدانس ارائه کرده است که در آن، فیدرهای توزیع به صورت نامتعادل در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های ورودی به الگوریتم پیشنهادی، مقادیر ولتاژها و جریان‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند و همچنین اثرات تغییر بار نیز در محاسبات مختلف خطا، در نظر گرفته شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی نیز با شبیه‌سازی یک سیستم توزیع در بخش جنوبی کشور برزیل به دست آمده است. اگرچه روش پیشنهادی در این مقاله، روش مناسبی است اما هیچ نوع خطای واقعی در سیستم‌های قدرت توسط نرم‌افزار، مورد تحلیل قرار نگرفته و تنها به بیان ریاضی تکنیک پیشنهادی بسنده کرده است.

در [۱۰۴] الگوریتمی برای شناسایی خطاهای SL-G و 3Ph در یک شبکه توزیع پیشنهاد شده است. داده‌های ورودی الگوریتم، امپدانس ظاهری محاسبه شده از روی ولتاژ و جریان محلی است. جریان خازنی مربوط به کابل‌های هوایی با کمک یک الگوریتم تکراری، جبران سازی شده است. عملکرد این روش به مقدار مقاومت خطا و فاصله آن وابسته نیست؛ اما وجود تغییرات عرضی در ساختار شبکه می‌تواند روی دقت روش تخمین فاصله خطا، اثر بگذارد.

مرجع [۱۰۵] نیز روشی را برای بهبود عملکرد روش‌های مبتنی بر امپدانس با استفاده از آشکارساز مدار خطا (FCI[۲۲]) که در طول فیدرها نصب می‌شود، ارائه داده است که هدف از به‌کارگیری این آشکارسازها، کاهش و یا حذف عدم قطعیت مکان خطا است. روش پیشنهادی، از الگوریتم ژنتیک موسوم به Chu-Beasley برای تعیین تعداد بهینه FCIها در طول فیدرهای توزیع استفاده کرده است. نتایج روش پیشنهادی نیز روی سیستم استاندارد IEEE با ۳۴ باس و نیز سیستم واقعی ۴۷۵ باس پیاده‌سازی شده است.

به صورت مشابه، روشی که شامل دسته‌بندی مناطق بروز خطا با استفاده از امپدانس‌ها، لینک‌های ارتباطی مربوط به فیوزهای نصب شده در فیدر، مقایسه زمانی، و تشخیص عملکرد فیوز می‌باشد، در [۱۰۶] ارائه شده است. این روش شامل اندازه‌گیری جریان، ولتاژ، امپدانس و مدت زمان خطا می‌باشد. این پارامترها با مقادیر متناظرشان در پیش از وقوع خطا که در مرکز داده ذخیره شده است، مقایسه می‌شوند. امپدانس اندازه‌گیری شده برای شناسایی منطقه خطا استفاده شده و با تحلیل مدت زمان خطا، فیوز قطع‌کننده مورد استفاده در مدار مشخص و در نتیجه بخش دچار خطا در مدار، شناسایی خواهد شد.

۳-۱-۲- روش‌های مبتنی بر فرکانس اصلی (فرکانس پایه)

هرگاه خطایی در شبکه قدرت رخ می‌دهد، کمیت‌های بهره‌برداری، دچار نوسان شده و سبب تخریب مؤلفه‌های جریان مستقیم (dc) و نیز مؤلفه‌های فرکانس پایه می‌گردد. روش‌های مبتنی بر فرکانس پایه برای تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن، به اندازه‌گیری کمیت‌های فرکانسی توان وابسته هستند. این اندازه‌گیری‌ها توسط تجهیزات حفاظتی نظیر ترانس‌های جریان (CT)، ترانس‌های ولتاژ (PT) و رله‌های حفاظتی موجود در پست‌های اصلی، پست‌های ناحیه‌ای و پست‌های فرعی، صورت می‌گیرد. کمیت‌های حاصل، در آنالیز مؤلفه‌های مرتبط به منظور تعیین نوع خطا، فازهای دچار خطا و تخمین مکان خطا مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

در [۷۵]، روشی برای تشخیص خطا بر اساس فرکانس پایه شرح داده شده است که در آن، مقادیر ولتاژ و جریان خطا قبل و بعد از بروز خطا، در الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است. اما، این روش تنها برای نوع خطاهای SL-G کاربرد دارد و یک محدودیت دیگر آن این است که بارهای واقع در مناطق دور از مکان بروز خطا به صورت یک بار مجتمع دیده می‌شود و در نتیجه، امکان شناسایی مکان دقیق خطا در این نواحی، وجود ندارد. به صورت مشابه، در [۹۴] نیز الگوریتمی برای تخمین مکان خطا در یک شبکه ولتاژ متوسط (MV) شعاعی با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده امپدانس فیدر و مقادیر محاسبه شده قبلی، ارائه شده است. این الگوریتم برای خطاهای خط به خط (L-L) و خطاهای SL-G تست شده است. در [۱۰۷] نیز یک سیستم شناسایی خطا و تعیین سرمنشأ آن پیشنهاد شده است که در آن، محاسبات با استفاده از جریان بار و جریان خطای به دست آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار EMTP[۲۳] صورت گرفته و مکان وقوع خطا با کمک این محاسبات تعیین می‌گردد. الگوی شکل موج جریان در هر نقطه دلخواه از شبکه به صورت لحظه‌ای با شکل موج‌های پیش‌بینی شده توسط تجهیزات حفاظتی مقایسه می‌گردد. در نتیجه، مقایسه بار دچار خطا با بار واقعی، به تعیین دقیق مکان خطا منجر خواهد شد.

در [۱۰۸] و [۱۰۹] روشی شرح داده شده است که در آن، خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز مربوط به کابل‌ها به صورت شبیه‌سازی در یک شبکه توزیع 11 kV مورد آزمایش قرار گرفته است. در شرایط عملکرد عادی، جریان بار با عدد 0 نمایش داده می‌شود. پس از خطا، بخش‌های خطادار شبکه دارای جریان خطای زیادی می‌شوند که با عدد 1 نشان داده می‌شود. مرجع [۱۱۰] نیز، یک الگوریتم جدید به صورت ماتریس از پیش تعریف شده برای تعیین مکان خطا در شبکه‌های توزیع شامل واحدهای تولید پراکنده (DG[۲۴]) پیشنهاد کرده است که داده‌های ورودی الگوریتم در این مقاله را جریان‌های ترمینال‌های فیدر تشکیل می‌دهند. الگوریتم ماتریسی از سه مرحله تشکیل یافته است. هر مرحله به صورت یک ماتریس تعریف می‌شود که عبارت‌اند از: ماتریس شبکه، ماتریس اطلاعات خطا و ماتریس تشخیص خطا. نویسندگان [۱۱۱] نیز روشی را پیشنهاد کرده‌اند که از مقادیر مؤثر (RMS) جریان خط و ولتاژ خط در پست‌های فرعی MV/LV بهره می‌برد. الگوریتم مورد استفاده در این مقاله در ریزپردازنده‌های خاصی پیاده‌سازی شده است که در پست‌های فرعی نصب شده و با پردازش داده‌های دریافتی، مکان خطا را تخمین می‌زنند. مرجع [۱۱۲] نیز روشی را بر اساس روش امپدانس برای تشخیص خطا معرفی نموده است که از امپدانس‌ها، طول بخش‌های فیدر، داده‌های دریافتی رله‌ها و FCIها برای محاسبه و تخمین مکان خطا در شبکه توزیع استفاده می‌کند.

۳-۲- مروری بر روش‌های مبتنی بر مؤلفه فرکانس بالا و موج رونده

روش مؤلفه‌های فرکانس بالا و روش موج رونده شامل آنالیز سیگنال‌هایی است که دارای فرکانسی بالاتر از فرکانس سیگنال‌های پایه هستند، یعنی شامل هارمونیک‌ها، فرکانس‌های نوسان طبیعی و موج‌های رونده می‌شوند. چالش اصلی در این روش‌ها، استخراج مؤلفه‌های فرکانس بالا از سیگنال‌های خطای مخلوط است، به این خاطر که اغلب این مؤلفه‌های فرکانس بالا دارای دامنه کمی بوده و در مقابل نویزهای زمینه موجود در شبکه، اثرپذیر هستند.

این روش‌ها را در حالت کلی می‌توان به دو صورت پیاده‌سازی نمود:

- آنالیز هارمونیک‌ها و فرکانس‌های نوسان طبیعی
- روش موج رونده

در روش‌های آنالیز هارمونیک، جریان‌های هارمونیک مرتبه بالاتر به منظور تفکیک مشخصه‌های مربوط به سوئیچینگ بار، سوئیچینگ خازن‌ها و تجهیزات تولید جرقه در برق‌گیرهای موجود در خط انتقال، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مؤلفه‌های فرکانسی از محل خطا به سرعت منتشر می‌شوند. همان‌طور که امواج خطا در طول فیدر پیش می‌روند، برخورد آن‌ها با بخش‌های منقطع خط سبب می‌شود که دوباره به نقطه خطا منعکس شوند و سبب بروز سیگنال بزرگ‌تری از نظر دامنه شوند. مقادیر اولیه این موج‌ها اساساً به مکان خطا در فیدر، مقاومت مسیر خطا و لحظه بروز خطا بستگی دارد. معادله (۵)، فاصله بروز خطا (x) را برای یک خط دو طرفه، بر اساس روش موج رونده نشان می‌دهد [۱۱۳]:

$$x = \frac{l + k_c(t_a - t_b)}{2} \quad (۵)$$

که در این رابطه، l طول خط، k_c سرعت انتشار موج رونده و (t_a-t_b) نیز اختلاف زمانی بین انتشار و برخورد هر موج رونده به هر یک از نقاط انتهایی خط می‌باشد.

آنالیز موجک بسته‌ای (WP[۲۵]) روش دیگری است که در واقع یک ترکیب خطی از موجک‌هایی است که دارای مشخصه‌های یکسانی هستند. تبدل موجک (WT) روشی بر اساس آنالیز موجک می‌باشد که سیگنال‌های حوزه فرکانس را به مؤلفه‌های موجک متوالی، متناسب با سیگنال‌های حوزه زمان تجزیه می‌کند. سیگنال اصلی را می‌توان به صورت بسط سیگنال‌های موجک تعریف نمود به‌گونه‌ای که از ضرایب معینی به صورت توابع موجک برای هر سیگنال استفاده می‌شود. همچنین روش دیگری که در مقالات بر اساس تبدیل فوریه ارائه شده است، تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT[۲۶]) نام دارد. از این روش برای تعیین پارامترهای فرکانس و فاز سینوسی در بخش‌های محلی یک سیگنال استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که این پارامترها با گذشت زمان، تغییر می‌کنند. ایده اصلی STFT تقسیم سیگنال به کمک پنجره‌های زمانی و آنالیز هر یک از این بخش‌ها به صورت جداگانه است. با این وجود، روش STFT از پنجره‌های زمانی با اندازه برابر برای تمامی فرکانس‌ها استفاده می‌کند. آنالیز موجک برای حل این محدودیت پیشنهاد شده است که در آن، از تکنیک‌های پنجره سازی با اندازه‌های متغیر در یک بازه زمانی مشخص استفاده می‌شود تا دقت روش، برای آنالیز اطلاعات و داده‌های فرکانس پایین نیز افزایش یافته و نیز قسمت‌های کوتاه‌تر که دارای داده‌هایی با فرکانس بالا هستند هم در محاسبات لحاظ شوند.

در [۱۱۴] از روشی استفاده شده است که در آن، سیگنال‌های فرکانس بالا در پست‌های فرعی اندازه‌گیری می‌شود. روش مذکور، مسیر وقوع خطا را بر اساس داده‌های مربوط به سیگنال‌های گذرای خطا شناسایی می‌کند. سپس این روش، مکان خطا را با استفاده از سیگنال‌های فرکانسی توان مشخص می‌نماید. در [۹۲] نیز نویسندگان روشی را بر اساس اختلاف دامنه ولتاژ بین ولتاژ تجهیزات اندازه‌گیری در ترمینال‌ها و ولتاژ آشکارسازهای خطا در فیدرهای پست‌های فرعی پیشنهاد کرده‌اند که برای شناسایی مکان خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. نویسندگان [۷۷] نیز تکنیکی را پیشنهاد کرده‌اند که بر روی سیستم توزیع واقعی 23.8 kV پیاده‌سازی شده و در آن، اندازه‌گیری‌های مربوط به جریان‌های گذرای خطا، در پست‌های فرعی صورت گرفته است، در حالی که دامنه‌های ولتاژ به کمک روش مدل‌سازی خط انتقال، تخمین زده شده است. یک تابع همبستگی به منظور شناسایی موج‌های رونده گذرا و محاسبه فاصله خطا استفاده شده است. به‌کارگیری پنجره‌های همبستگی با عرض بیشتر به عنوان یک راه‌کار عملی برای حل مشکل عدم پیوستگی در تکنیک‌های یک طرفه، در این مقاله پیشنهاد شده است.

مرجع [۱۱۵]، الگوریتمی را برای شناسایی فیدرهای خطادار با استفاده از سیگنال‌های گذرا و سیگنال‌های حالت دائم به کار برده است. این روش، فیدر خطادار را به کمک آنالیز موجک بسته‌ای شناسایی کرده و مؤلفه‌های فرکانس بالا و فرکانس پایه را در این فیدر استخراج می‌کند. در [۷۸] مطالعه‌ای بر اساس سازگاری سیستم‌های انتقال ولتاژ بالا در شبکه‌های توزیع ولتاژ متوسط ارائه شده است. الگوریتم‌های موج رونده مختلفی برای ارزیابی این سازگاری استفاده شده است. همچنین یک روش تشخیص خطا بر مبنای سیگنال‌های فرکانس بالا توسط نویسندگان [۱۱۶] ارائه شده است. در این روش، بخش‌های خطادار سیستم بر اساس تجزیه موجک سیگنال‌های گذرا، شناسایی می‌گردند. تشخیص بخش‌های خطادار به کمک تجزیه سیگنال ولتاژ در یک طیف فرکانسی بین 12.5 kHz تا 25 kHz صورت می‌گیرد. این روش این مزیت را دارا می‌باشد که مشخصه‌های خاص تبدیل موجک، بین فیدرهای خطادار و فیدرهای سالم که دارای فواصل یکسانی از پست‌های اصلی هستند، تمایز ایجاد می‌کند.

مرجع [۱۱۷] الگوریتمی را برای تعیین مکان خطا در شبکه‌های توزیع پیشنهاد کرده است. این الگوریتم بر اساس آنالیز تبدیل موجک در شکل موج‌های ولتاژ در حین خطا تعریف شده است. روند الگوریتم بر اساس تبدیل موجک پیوسته (CWT[۲۷]) پیاده‌سازی شده است. همچنین سیستم استاندارد IEEE با ۳۴ باس نیز به عنوان مورد آزمایشی برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۱۸] از تبدیل موجک برای آنالیز تجزیه چندگانه روی سیگنال‌های جریان اندازه‌گیری شده در نقطه اتصال رله استفاده شده است تا مکان خطای SL-G را در سیستم توزیع شناسایی نماید. مرجع [۱۱۹] نیز روشی را بر مبنای آنالیز تجزیه چندگانه (MRA[۲۸]) برای پارامترهای اندازه‌گیری شده سیستم قدرت پیشنهاد کرده است. این روش، خطاهای امپدانس بالا (HIF[۲۹]) را با استفاده از خروجی MRA شناسایی می‌کند. در این روش، سیگنال‌های ولتاژ و جریان فیدر توزیع، حتی در صورتی که سیگنال‌های ضعیفی باشند، باز هم استخراج خواهند شد. در ادامه این مقاله، سیستم استخراج ویژگی بر اساس تبدیل موجک گسسته (DWT[۳۰]) و روش شناسایی ویژگی نیز بر مبنای روش‌های تصادفی برای تفکیک خطاهای HIF و خطاهای سوئیچ به کار رفته است.

مرجع [۳۱] نیز روی دسته‌بندی خطاها و مکان‌های وقوع خطا با استفاده از روش موجک تجزیه چندگانه روی یک سیستم آزمایشی سه فاز با ۱۹ باس و ۷ باس، با انواع مختلف خطا، مقاومت‌های مختلف خطا و زاویه‌های مختلف شروع خطا، کار کرده است. مرجع [۱۲۰] الگوریتمی را به کمک MATLAB پیاده‌سازی کرده و مورد آزمایش قرار داده است که داده‌های ورودی این الگوریتم به کمک نرم‌افزار EMTP تولید شده است. یک فیدر آزمایشی IEEE اصلاح شده نیز با ۱۳ باس برای تخمین بخش‌های خطادار در سیستم نامتعادل در یک محیط نویزی، مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، از روش موج رونده استفاده شده است. روش مذکور از داده‌های ولتاژ محلی به عنوان ورودی استفاده می‌کند. روشی برای شناسایی خطا و تعیین محل آن در سیستم‌های توزیع زمینی با استفاده از روش DWT در [۱۲۱] ارائه شده است. یک سیستم توزیع زمینی 400 kV نیز که بارهای سه فاز متعادل را در سیستم‌های مختلف تغذیه می‌کند، به ازای خطاهای

مختلف توسط نرم‌افزار ATP-EMTP شبیه‌سازی شده است. تبدیل موجک خاصی موسوم به Daubechies db-8 در این مقاله برای آنالیز خطاهای گذار به کار رفته است.

نویسندگان در [۱۲۲]، تحقیقی مقدماتی روی روش‌های آنلاین برای شناسایی خطا و پیش‌بینی عمر مفید کابل‌های زمینی ارائه کرده‌اند. دو مورد آزمایشی نیز در این مقاله طراحی شده و به منظور پایش کابل‌های زمینی مورد استفاده قرار گرفته است. آنالیز داده‌های مربوط به کابل‌های زمینی نیز بر اساس روش تجزیه چندگانه صورت گرفته است. همچنین از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شناسایی الگوهای داده‌های ثبت شده بهره گرفته شده و نتایج آن ارائه گردیده است.

همچنین، [۱۲۳] از روش DWT بر اساس موج رونده برای شناسایی مؤلفه‌های فرکانس بالا و نیز تشخیص مکان‌های خطا در سیستم توزیع زمینی استفاده کرده است. اولین پیک زمانی به دست آمده از باس خطادار برای محاسبه فاصله خطا از انتهای نقطه ارسال سیگنال، استفاده شده است. اعتبار روش پیشنهادی به ازای خطاهای مختلف با زوایای شروع گوناگون و مکان‌های مختلف وقوع خطا مورد آزمایش قرار گرفته است. نرم‌افزار ATP-EMTP نیز برای شبیه‌سازی سیگنال‌های خطا با فرکانس نمونه‌برداری 200 kHz استفاده شده است. در [۱۲۴] نیز روشی برای شناسایی فاز خطادار در کابل‌های زیرزمینی معرفی شده است. خطاهای مختلف در محیط ATP-EMTP شبیه‌سازی شده‌اند و از تبدیل موجک برای استخراج مؤلفه‌های فرکانس بالا در سیگنال‌های خطا بهره گرفته شده است. همچنین ضرایب سیگنال‌های جریان توالی مثبت، محاسبه شده و در الگوریتم تشخیص خطا مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در بین مقالات و تحقیقاتی که پیرامون روش‌های فرکانس بالا و موج رونده فعالیت کرده‌اند، تنها روش‌های ارائه شده در [۸۶] و [۱۲۰] مسئله تشخیص مکان خطا را هم برای خطوط هوایی و هم کابل‌های زمینی در نظر گرفته‌اند. با این وجود، روش ارائه شده توسط [۱۲۰] به شدت توصیه می‌شود به این خاطر که در این روش، شناسایی مکان خطا در محیط‌های نویزی صورت گرفته است که معمولاً در سیستم‌های توزیع که دارای رله‌های دیجیتالی هستند، وجود نویز امری طبیعی است.

۳-۳- مروری بر روش‌های مبتنی بر آگاهی

روش‌های مبتنی بر آگاهی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

- روش‌های مبتنی بر ریاضیات و هوش محاسباتی
- روش‌های مبتنی بر تجهیزات پراکنده
- روش‌های ترکیبی (هیبرید)

۳-۳-۱- روش های مبتنی بر ریاضیات و هوش محاسباتی

روش‌های ریاضی در اصل روش‌های احتمالی و تصادفی‌ای هستند که برای تشخیص خطا در مواردی که خطاهای تک فاز به زمین با مقاومت بسیار بالا رخ می‌دهد، کاربرد دارند. همچنین، ماتریس‌هایی که در این روش تشکیل می‌شود، برای بیان ارتباط بین گره‌ها و بخش‌های مختلف سیستم نظیر سنسورهای ولتاژ، به کار می‌روند.

روش‌های هوش محاسباتی نیز تشکیل شده‌اند از [۱۲۵]:

- سیستم‌های خبره (ES[۳۱])
- منطق فازی (FL[۳۲])
- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)
- روش‌های بهینه‌سازی

یک سیستم خبره را می‌توان به عنوان یک سیستم تعاملی تعریف کرد که سطح آگاهی جامعی را در حوزه خاصی نشان می‌دهد. یک سیستم خبره با روش مبتنی بر آگاهی و به کمک موتور واسط، مسائل مختلف را حل می‌کند. مبنای آگاهی در سیستم خبره از قواعد تولید و معلومات تشکیل می‌شود در حالی که موتور واسط از درخت فضای جستجو برای تعیین ساختار جستجوی ابتکاری بهره می‌برد.

همچنین، سیستم‌های مبتنی بر منطق فازی از روشی مشابه برای حل مسائل استفاده می‌کنند. در این روش، از عبارت‌های تقریبی برای بیان مبنای آگاهی استفاده می‌گردد، از این رو آگاهی درست و یا غلط مورد استفاده را از نظر منطقی ارزیابی کرده و برای هر حالت، یک عدد متناظر در نظر می‌گیرد مثلاً برای آگاهی صحیح عدد 1 و برای آگاهی غلط عدد 0 را در نظر می‌گیرد. شبکه عصبی مصنوعی یک الگوی پردازش اطلاعات است که ساختاری مشابه سیستم‌های عصبی بیولوژیکی دارد. این روش، شامل تعداد زیادی از مؤلفه‌های پردازشی به هم متصل است که به عنوان نرون‌ها شناخته شده و همانند انسان، قابلیت یادگیری دارند. در این ساختار، لایه‌هایی تعریف می‌شود که متشکل هستند از نرون‌هایی که به کمک وزن‌های سیناپسی و بایاس‌های پیوندی به هم متصل هستند. با تنظیم این وزن‌ها و بایاس‌ها می‌توان نرون‌ها را آموزش داد. شبکه‌های عصبی (NNها) بر اساس آگاهی‌های از پیش ذخیره شده، تصمیم‌گیری می‌کنند.

در [۱۲۶]، نویسندگان برای نخستین بار یک شبکه عصبی را بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی به منظور شناسایی و دسته‌بندی خطاهای سیستم توزیع برق مورد استفاده قرار دادند. در [۱۲۷] نیز یک سیستم تشخیص خطا برای شبکه توزیع برق با استفاده از مسائل یادگیری ماشین بر اساس الگوهای خطا، پیشنهاد شده است. روش مشابهی که قادر است خطاهای HIF و LIF[۳۳] را در شبکه قدرت شناسایی کند، در [۱۲۸] معرفی شده است که در آن، ساختار ANN چندلایه در کنار الگوریتم پس انتشار (BP[۳۴]) مورد استفاده قرار گرفته است.

مرجع [۱۲۹] یک روش شناسایی خطا را برای شبکه‌های توزیع معرفی کرده است. در روش مذکور، از تئوری پوشش مجموعه و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. روشی نیز برای تعیین مکان خطا در سیستم قدرت در [۱۳۰] پیشنهاد شده است. تخمین مسافت محل خطا بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و با کمک اطلاعات باینری به دست آمده از رله‌های حفاظتی و مداشکن‌ها، صورت گرفته است. در [۱۳۱] نیز یک الگوی مکان‌یابی خطا با کمک بردار مشخصه و با استفاده از اطلاعات رله‌های اضافه جریان دیجیتالی پیشنهاد شده است. الگوی پیشنهادی قادر است هم خطاهای باس و هم خطاهای فیدر را بر اساس الگوی بردار جریان خطای متناظر با هر بخش، و با بهره‌گیری از بردارهای مشخصه موجود در مرکز داده، مکان‌یابی کند. با به‌روزرسانی داده‌های بردار مشخصه، الگوی پیشنهادی را می‌توان با تغییرات ساختاری سیستم، سازگار نمود.

مرجع [۱۳۲] از یک الگوریتم مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین مکان‌های وقوع خطای سه فاز در یک سیستم توزیع با حلقه‌های تودرتو استفاده کرده است که داده‌های ورودی الگوریتم برای آموزش شبکه عصبی، ولتاژ خطای فیدر، وضعیت مدارشکن، توان اکتیو فیدرها در شرایط عادی و شرایط اتصال کوتاه و غیره استفاده می‌شوند. این روش بر روی یک شبکه توزیع واقعی 13.8 kV پیاده‌سازی شده است. مرجع [۱۰۷] نیز روشی را بر اساس تخمین جریان خطا و جریان بار به منظور مکان‌یابی خطا ارائه کرده است. بر مبنای روش پیشنهادی در [۸۹]، تبدیل کلارک[۳۵] جریان‌های خط به مؤلفه‌های توالی آلفا، بتا و صفر (αβ0)، می‌تواند به عنوان پارامترهای تشخیص خطا و تعیین محل خطا مورد استفاده قرار گیرد. این روش شامل دریافت داده، عملیات ریاضی به کمک تبدیل کلارک، شناسایی خطا با مقایسه منحنی‌های مشخصه پیش از خطا و پس از خطا و در نهایت، تعیین مکان خطا می‌باشد. سرمنشأ خطا با فاصله بین مقادیر ویژه مربوط به ماتریس جریان‌های خط، متناسب است. مرجع [۸۸] یک روش تصادفی را برای مکان‌یابی خطا در سیستم‌های توزیع ارائه کرده است. این روش بر مبنای مدل‌سازی تصادفی و استخراج اطلاعات از پارامترهای خطای ثبت شده می‌باشد. محدودیت‌های بالقوه روش پیشنهادی عبارت‌اند از: انتخاب تعداد گروه‌ها، مقایسه نمونه‌ها در هر گروه و مقداردهی اولیه به پارامترهای لازم برای الگوریتم. مرجع [۱۳۳] نیز روشی را شرح داده است که شامل مدل‌سازی یک سیستم توزیع برق 25 kV و رله‌های حفاظتی موجود در این سیستم به کمک ATP و MATLAB است. هدف از این مدل‌سازی، به دست آوردن داده‌های اولیه خطا می‌باشد. این داده‌های اولیه شامل ۹۳۰ حالت خطای مختلف است که برای آنالیز سیستم در هر حالت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مرجع [۱۳۴] روشی را پیشنهاد داده است که به کمک جریان‌های سه فاز مربوط به تمامی n ترمینال موجود در شبکه و ولتاژ سه فاز خط پیاده‌سازی می‌گردد. بخش‌های مختلف الگوریتم با استفاده از مدل‌های خطا و حلقه‌های خطا تشکیل می‌شوند. یک پروسه انتخاب با معیارهای چندگانه برای انتخاب بخش صحیح که نشان‌دهنده قسمت خطادار در خط انتقال است، مورد استفاده قرار گرفته است. مرجع [۱۳۵] نیز روشی را به کار برده است که به صورت خودکار، مکان خطا را در یک سیستم توزیع محاسبه می‌کند. روش مذکور بر اساس ساختار درخت N آرایه‌ای سازمان‌دهی شده است. در [۴۱] الگویی پیشنهاد شده است که خود متشکل از سه فرآیند مختلف است. روش تشخیص خطا و دسته‌بندی آن مبتنی بر تکنیک موجک است، در حالی که روش مکان‌یابی خطا بر روش مبتنی بر امپدانس و فازورهای پایه جریان و ولتاژ محلی استوار است. ANN نیز برای شناسایی محل خطا با استفاده از سیگنال‌های ولتاژ و جریان محلی استفاده شده است. روشی نیز بر مبنای نسبت‌های مختلف جریان توسط [۱۳۶] پیشنهاد شده است که در شبکه‌های توزیع و ژنراتورهای پراکنده قابل استفاده است.

نویسندگان [۹۰]، روشی را بر مبنای ماهیت تصادفی خطا و بر اساس روش ترکیب متناهی پیشنهاد کرده‌اند. یک مدل تصادفی با توجه به مقادیر دامنه نوسانی ولتاژ در حین خطا به دست آمده است که در کنار سایر پارامترهای ساختاری شبکه به عنوان ورودی روش مذکور اعمال می‌گردد. محدودیت‌های بالقوه این روش در انتخاب تعداد گروه‌ها، نسبت نمونه‌های هر گروه و انتخاب مقادیر اولیه مورد نیاز برای الگوریتم خلاصه می‌گردد. این محدودیت‌ها با به‌کارگیری معیارهای تئوری و ابتکاری حل خواهد شد. مرجع [۹۱] یک الگوریتم تشخیص را پیشنهاد کرده است که در سیستم توزیع کشور نیوزلند پیاده‌سازی شده است. ساختار پراکنده این روش برای آنالیز خطای شبکه قدرت (DAPFA) در واقع یک ساختار هوشمند و مبتنی بر مدل است که از ترکیب مدل سلسله‌مراتبی و استانداردهای پیاده‌سازی خودکار پست‌های برق، تشکیل یافته است. ساختار و مدل اصلی این الگوریتم، در واقع چند سطحی است، به‌گونه‌ای که هر سطح بیانگر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های سیستم است که در سلسله‌مراتب پیشین تعریف شده‌اند. این روش یک روش مبتنی بر آگاهی است که از اطلاعات هر یک از مؤلفه‌ها در هر سطح، برای تخمین مؤلفه‌های سطح بعدی استفاده می‌کند. الگوریتم شناسایی DAPFA طوری طراحی شده است که هم در شرایط پیش از وقوع خطا و هم پس از آن، قابل پیاده‌سازی است. این مسئله باعث می‌شود که امکان آنالیز آنلاین سیستم فراهم گردد.

روش دیگری نیز بر اساس شبکه‌های عصبی مبتنی بر تابع پایه شعاعی (RBF[۳۶]) در [۱۳۷] پیشنهاد شده است. این روش نوع خطا و مکان وقوع آن را در شبکه توزیع متشکل از واحدهای تولید پراکنده (DG) با استفاده از جریان‌های نرمالیزه شده خطا مشخص می‌کند. برای تشخیص نوع خطا تنها از جریان‌های خطا در منبع اصلی استفاده می‌شود در حالی که برای تشخیص مکان وقوع خطا از جریان‌های اتصال کوتاه سه فاز در تمامی منابع موجود در شبکه به عنوان ورودی شبکه عصبی RBF استفاده می‌گردد.

در [۱۳۸] تکنیکی برای شناسایی خودکار خطا در یک شبکه توزیع با واحدهای DG بر مبنای شبکه عصبی RBF پیشنهاد شده است. این روش از ورودی‌های جریان در فرآیند آموزش چهار شبکه عصبی برای چهار نوع مختلف خطا استفاده می‌کند.

۳-۳-۲- روش‌های مبتنی بر تجهیزات پراکنده

ایده اصلی روش مبتنی بر تجهیزات پراکنده، به‌کارگیری روشی است که از پارامترهای اضافی شبکه نظیر سیستم اطلاعات و داده‌های اتوماسیون سیستم توزیع در چارچوب سیستم حفاظتی شبکه توزیع بهره می‌برد. در تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن، این تعریف بدان معنی است که تنها از تجهیزات و داده‌های موجود به‌جای مدل‌های در حال توسعه شبکه و تجهیزات جدید آن استفاده می‌گردد. علاوه بر این، روش مبتنی بر تجهیزات پراکنده یک روش مفید برای پردازش داده‌ها بوده و امکان ترکیب داده‌های گرافیکی حاصل از تجهیزات واسط (نظیر فیوزها، مدارشکن‌ها و غیره) برای شناسایی خطا، داده‌های مربوط به عوارض زمین و داده‌های هواشناسی سیستم را به صورت همزمان، فراهم می‌آورد. در [۱۳۹] روشی برای ترکیب سیستم‌های اطلاعاتی شبکه و زیرساخت‌های موجود با تجهیزات اتوماسیون پراکنده پیشنهاد شده است. این روش شامل یک مرکز داده است که برای آنالیز جریان خطا در شبکه توزیع به کار می‌رود. همچنین، شرایط آب و هوایی و اطلاعات

دریافتی از آشکارسازهای خطا را می‌توان با روش منطق فازی، برای پردازش سیستم ترکیب نمود.

مرجع [۹۲] روشی را بر مبنای ماتریس‌های ریاضی پیشنهاد کرده است. ماتریس‌ها بین پارامترهای سنسورهای ولتاژ و بخش‌های خط و نیز بین بخش‌های خط و باس‌های شبکه برق تشکیل می‌شوند. از این رو، بخش‌های خطادار سیستم را می‌توان با اعمال عملیات ریاضی روی ماتریس‌های تشکیل شده، شناسایی نمود. در [۱۴۰] روشی ارائه شده است که در آن، داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های قبلی مربوط به خطاها مقایسه می‌شوند. این داده‌های خطای قدیمی بر اساس اطلاعات ثبت شده گذشته، در مرکز داده ذخیره شده و این اطلاعات عموماً از اندازه‌گیری نوسانات ولتاژ در حین خطا، نوع خطا و مکان خطا تشکیل شده‌اند. زمانی که خطایی در سیستم رخ می‌دهد، نوسانات ولتاژ اندازه‌گیری شده با داده‌های ثبت شده قبلی مقایسه می‌شوند. نقطه‌ضعف مهم این روش این است که اگر خطایی رخ دهد که قبلاً اطلاعاتی در مورد آن ثبت نشده باشد، شناسایی چنین خطایی غیرممکن خواهد بود. همچنین [۱۴۰] روشی را برای پردازش خودکار و آنالیز داده‌های مربوط به خطا در پست‌های برق پیشنهاد کرده است. اما این روش نیز به تجهیزات الکتریکی هوشمند، کانال‌های ارتباطی، داده‌های باینری حاصل از تجهیزات الکتریکی و مدارشکن‌ها و نیز پارامترهای سیستم برق نیاز دارد.

۳-۳-۳- روش‌های هیبرید

روش هیبرید برای تشخیص خطا و مکان‌یابی آن به منظور ترکیب دو یا چند روش و بهره‌برداری از مزایای تمامی آن‌ها، معرفی شده است. بر همین اساس، هدف اصلی در این روش، بهبود دقت و قابلیت اطمینان است در حالی که کاهش و یا حذف محدودیت‌های روش‌های تشکیل‌دهنده به تنهایی نیز مد نظر خواهد بود.

در [۱۴۱] برای نخستین بار یک سیستم آنالیز خطا متشکل از یک سیستم خبره (ES)، شبکه عصبی (NN) و یک بسته آنالیز خطا معرفی شده است. ورودی‌های مورد استفاده این سیستم، شکل موج‌های ولتاژ و جریان خطا، اطلاعات باینری حاصل از رله‌های حفاظتی و CBها می‌باشد. وظیفه ES، تخمین بخش خطادار است در حالی که NN وظیفه شناسایی خطا، تعیین مقاومت خطا، تعیین نقطه خطا و تصمیم‌گیری در مورد خطاهای منفرد و یا چندگانه را بر عهده دارد.

بسته آنالیز خطا نیز برای تأیید تصمیم‌های اتخاذ شده توسط شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روشی بر مبنای تبدیل موجک بازگشتی و شبکه عصبی Kohonen در [۱۴۲] معرفی شده است. ورودی‌های این شبکه عصبی، ضرایب موجک حاصل از مقادیر ولتاژ و جریان باقی‌مانده در فیدر خطادار است.

در [۸۹] روشی مشابه پیشنهاد شده است که از مقدار ویژه و الگوریتم یادگیری مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌کند. این روش، نوع خطا را شناسایی و دسته‌بندی می‌کند، پیش از آنکه مکان خطا را تعیین نماید. مرجع [۱۴۳] نیز روشی را بر اساس تبدیل فوریه کوتاه‌مدت (STFT) و فیلتر کالمن برای تعیین کیفیت توان (PQ) در سیستم خطادار معرفی کرده است. در [۱۴۴] یک سیستم خبره برای آنالیز خطا در سیستم قدرت پیشنهاد شده است. این سیستم بر مبنای تئوری عامل هوشمند، تئوری کشف دانش و تئوری مجموعه راف، به کمک مقدار آستانه و جدول منطقی عمل می‌کند. ورودی‌های سیستم عبارت‌اند از نسبت‌های زاویه فاز در توالی صفر، توالی منفی و توالی مثبت، متناسب با نوع خطای رخ داده.

در [۱۴۵] روشی بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و دسته‌بندی بردار پشتیبان (SVC) برای تعیین مکان خطا در سیستم‌های توزیع پیشنهاد شده است. ورودی‌های مورد استفاده برای این روش، پارامترهای اندازه‌گیری شده در پست‌های فرعی و وضعیت مدارشکن‌ها و رله‌ها به صورت داده‌های باینری می‌باشد. همچنین از آنالیز مؤلفه‌های اساسی (PCA) نیز برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است. یک سیستم توزیع واقعی با ۵۲ باس نیز به عنوان مورد مطالعه‌ای به کار رفته است.

روشی نیز بر مبنای سیستم‌های هوشمند و روش‌های تصادفی، به کمک ولتاژهای فاز و جریان‌های خط به عنوان ورودی در [۱۴۶] پیشنهاد شده است. این روش برای شناسایی خطا و دسته‌بندی نوع خطا در سیستم‌های توزیع به کار می‌رود.

یک روش پیشنهادی دیگر در [۱۴۷] ارائه شده است. این روش از شبکه عصبی-فازی موجک برای اندازه‌گیری پارامترهای گذرای پس از خطا و پارامترهای حالت دائم سیستم استفاده می‌کند. تئوری فازی و شبکه عصبی برای فازی سازی اطلاعات استخراج شده به کار می‌روند. تبدیل موجک نیز در ادامه به همراه شبکه عصبی-فازی برای تشکیل شبکه عصبی فازی موجک (WFNN) به کار رفته است. این روش تشخیص خطا، شامل محاسبات بسیاری است و زمان زیادی را نیز برای آموزش شبکه عصبی می‌طلبد. روشی با استفاده از ترکیب پردازش سیگنال پیشرفته و شبکه عصبی در [۹] پیشنهاد شده است. در روش مذکور، اطلاعات مربوط به اغتشاشات زمان-فرکانس و زمان-زمان در سیگنال‌های خطای امپدانس بالا (HIF) و سیگنال‌های بدون خطا (NF) به صورت جداگانه استخراج می‌شوند. سپس از این اطلاعات برای آموزش و آزمایش یک شبکه عصبی احتمالی (PNN) به منظور دسته‌بندی و شناسایی خطاهای HIF و جداسازی آن‌ها از بخش‌های بدون خطا، استفاده می‌گردد.

در [۱۴۸] روشی بر مبنای ترکیب WT و ANNها برای حل مشکل تشخیص HIFها در فیدرهای توزیع برق ارائه شده است. تغییر شکل موج‌های جریان فاز در اثر خطا و در اثر عملکرد عادی سوئیچ‌ها، از هم تفکیک شده‌اند. DWT برای تجزیه سیگنال‌های جریان در حوزه زمان به هارمونیک‌های مختلف در حوزه زمان-فرکانس و استخراج مؤلفه‌های لازم برای آموزش ANNها، به کار رفته است. این پردازش اولیه، باعث کاهش تعداد ورودی‌های ANN و بهبود همگرایی در فرآیند آموزش خواهد شد. از محیط نرم‌افزار MATLAB هم برای محاسبه داده‌های خطای HIF، خطاهای امپدانس پایین (LIF) و خطاهای عملکرد عادی سوئیچ‌ها استفاده شده است. همچنین شبکه پرسپترون چندلایه و الگوریتم پس انتشار Levenberg–Marquardt هم برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی به کار رفته است.

نویسندگان در [۱۴۹] روشی را با استفاده از کنترل‌کننده منطقی قابل‌برنامه‌ریزی (PLC) پیشنهاد کرده‌اند. این روش از مقادیر ولتاژ و

جریان پیش از وقوع خطا و پس از وقوع خطا به عنوان ورودی استفاده می‌کند. همچنین روش موج رونده نیز برای حل مشکل عدم پیوستگی فیدرهای فرعی در سیستم توزیع شعاعی به کار رفته است. عدم پیوستگی ممکن است بین نقطه انتهایی خط و نقطه خطادار خط به وجود بیاید و این امر موجب انعکاس موج‌های گذرای ناشی از خطا در کل خط خواهد شد. همچنین، پارامترهای جریان اندازه‌گیری شده از نقاط عرضی پست‌های فرعی، ممکن است سبب گمراه شدن روش و مکان‌یابی غلط شوند. از یک روش پردازش آفلاین بر روی داده‌های جمع آوری شده به منظور مکان‌یابی خطاهای شنت روی فیدرهای اصلی و یا در نقاط عرضی فیدر استفاده شده است. پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا، تمام خودکار بوده و با اسکن کردن فیدرهای هوایی و یا بخش‌های خطادار در فواصل ۱۰ متری خط انتقال، صورت می‌گیرد.

در [۹۷] روشی برای تشخیص خطا و دسته‌بندی آن در سیستم توزیع ارائه شده است. در تحقیقات بعدی نویسندگان این مقاله در [۹۵]، عملکرد الگوریتم‌های مبتنی بر آنتروپی موجک را با سایر روش‌های تصادفی نظیر انحراف استاندارد و میانگین انحراف مطلق مقایسه کرده‌اند.

۴– جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تشخیص به موقع خطا و تعیین دقیق مکان خطا، یکی از مؤثرترین روش‌ها به منظور جلوگیری از وقوع خرابی و پیامدهای ناشی از آن در سیستم توزیع است. تشخیص دقیق خطا به اپراتور این امکان را می‌دهد که دستورات کنترلی مناسبی را در زمان کوتاه صادر کرده و بخش‌های خطادار شبکه را با سرعت بالا از بخش‌های سالم جدا کند. همچنین زمان تعمیر بخش‌های خطادار نیز کاهش پیدا خواهد کرد. در این مقاله، سعی شد تا روش‌های مختلف تشخیص خطا در سیستم‌های توزیع و تعیین سرمنشأ آن، مورد بررسی قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت هر یک نیز بیان گردد. این مقاله می‌تواند برای محققینی که در این زمینه فعال هستند، مرجع مناسبی باشد تا به صورت خلاصه با روش‌های ارائه شده در مقالات گوناگون آشنا شده و جنبه‌های تحقیقاتی موضوع را بسنجند. همچنین روش‌شناسی و دسته‌بندی موضوعی پیرامون روش‌های مختلف تشخیص خطا و تعیین سرمنشأ آن در سیستم توزیع صورت گرفته است تا پاسخ‌گوی نیاز محققین در این زمینه باشد.

پی‌نوشت:

1. Principle Component Analysis
2. Independent Component Analysis
3. Wavelet Transform
4. Zero-sequence Current Transformer
5. Fault Detection Filter
6. Mathematical Morphology
7. Bayesian theorem
8. Phasor Measurement Unit
9. Support Vector Machine
10. Probability Density Function
11. S-transform
12. Common Information Model
13. Multi Agent Systems
14. Particle Swarm Optimization
15. Fault Detection and Diagnosis
16. Traveling Waves
17. Global Positioning System
18. Discrete Fourier Transform
19. Intelligent Electronics Devices
20. Power Quality
21. Alternative Transient Program
22. Faulted Circuit Indicator
23. Electromagnetic Transients Program
24. Distributed Generation
25. Wavelet Packets
26. Short-Time Fourier Transform
27. Continues Wavelet Transform
28. Multi-Resolution Analysis
29. High Impedance Fault
30. Discrete Wavelet Transform
31. Expert Systems
32. Fuzzy Logic
33. Low Impedance Fault
34. Back-Propagation
35. Clarke Transform
36. Radial Basis Function

References

[1] S. Ebron, D.L. Lubkeman, M. White, "A neural network approach to the detection of incipient faults on power distribution feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No. 2, pp.905-914, April 1990.

[2] Y. Assef, G. Yvette, M. Meunier, "Artificial neural networks for single phase fault detection in resonant grounded power distribution systems", Proceeding of the IEEE/TDC, pp.566-572, Los Angeles, CA, USA, Sep. 1998.

[3] M.A. Dabbagh, L.A. Dabbagh, "Neural networks based algorithm for detecting high impedance faults on power distribution lines", Proceeding of the IEEE/IJCNN, Vol. 5, pp.3386-3390, Washington, DC, USA, July 1999.

[4] H.K. Zadeh, "A novel approach to detection high impedance faults using artificial neural network", Proceeding of the IEEE/UPEC, Vol. 1, pp.373-376, Bristol, UK, Sep. 2004.

[5] K.L. Butler, J.A. Momoh, "A neural net based approach for fault diagnosis in distribution networks", Proceeding of the IEEE/PESW, pp.353-356, Singapore, Jan. 2000.

[6] A.M. Sharat, L.A. Snider, K. Debnath, "A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection", Proceeding of the IEEE/APSCOM., Vol. 2, pp.613-620, Hong Kong, Dec. 1993.

[7] L.S. Martins, J.F. Martins, V.F. Pires, C.M. Alegria, "The application of neural networks and Clarke-Concordia transformation in fault location on distribution power systems", Proceeding of the IEEE/TDC, Vol. 3, pp.2091-2095, Yokohama, Japan, Oct. 2002.

[8] I. Baqui, A.J. Mazon, I. Zamora, R. Vicente, "High impedance faults detection in power distribution system by combination of artificial neural network and wavelet transform", Proceeding of the IEEE/CIRED, pp.1-4, Turin, Italy, June 2005.

[9] S.R. Samantaray, B.K. Panigrahi, P.K. Dash, "High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network", IET Generation, Transmission and Distribution ,Vol.2, No. 2, pp.261-270, Mar. 2008.
[10] P. Qingle, L. Xinyun, Z. Min, "Improved neural network based on rough set and application in fault line detection for distribution network", Proceeding of the IEEE/CISP, Vol. 8, pp.3784-3788,Yantai, China, Oct. 2010.
[11] I. Nikoofekr, M. Sarlak, S.M. Shahrtash, "Detection and classification of high impedance faults in power distribution networks using ART neural networks", Proceeding of the IEEE/ICEE, pp.1-6, Mashhad, Iran, May 2013.
[12] P. Routray, M. Mishra, P.K. Rout, "High Impedance Fault detection in radial distribution system using S-Transform and neural network", Proceeding of the IEEE/PCITC, pp.545-551, Bhubaneswar, India, Oct. 2015.
[13] A.N. Kannan, A. Rathinam, "High Impedance Fault Classification Using Wavelet Transform and Artificial Neural Network", Proceeding of the IEEE/CICN, pp.831-837, Mathura, India, Nov. 2012.
[14] M.M.A.S. Mahmoud, "Detection of high impedance faults in M.V. mesh distribution network", Proceeding of the IEEE/MEPS, pp.1-8, Wroclaw, Poland,July 2015.
[15] P.E. Farias, A.P. de Morais, G. Cardoso, A.L. Oliveira, "Transients detection and classification in distribution networks for high impedance faults identification", Proceeding of the IEEE/UPEC, pp.1-6, Cluj-Napoca, Romania, Sept. 2014.
[16] Q. Alsafasfeh, I. Abdel-Qader, A. Harb, "Symmetrical pattern and PCA based framework for fault detection and classification in power systems", Proceeding of the IEEE/EIT, pp.1-5,Normal, IL, USA, May 2010.
[17] A.K. Sinha, K.K. Chowdoju, "Power system fault detection classification based on PCA and PNN", Proceeding of the IEEE/ICETECT, pp.111-115, Nagercoil, India, Mar.2011.
[18] E. Barocio, B.C. Pal, D. Fabozzi, N.F. Thornhill, "Detection and visualization of power system disturbances using principal component analysis", Proceeding of the IEEE/IREP, pp.1-10, Rethymno, Greece, Aug. 2013.
[19] Z. Niu, J.Z. Liu, Y.G. Niu, Y.S. Pan, "A reformative PCA-based fault detection method suitable for power plant process", Proceeding of the IEEE/ICMLC, Vol. 4, pp.2133-2138, Guangzhou, China, Aug. 2005.
[20] H.C. Dubey, S.R. Mohanty, N. Kishore, "Abrupt change detection of fault in power system using independent component analysis", Proceeding of the IEEE/ICSCCN, pp.659-664, Thuckafay, India, July 2011.
[21] M. Shaik, M.N. Rao, S.A. Gafoor, "A wavelet based protection scheme for distribution networks with Distributed Generation", Proceeding of the IEEE/ICETEEEM, pp.33-37, Chennai, India, Dec. 2012.
[22] T.M. Lai, L.A. Snider, E.Lo, D.Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.20, No. 1, pp.397-407, Jan. 2005.
[23] V.T. Garcia, H.R. Paredes, "High impedance fault detection in Distribution System using Wavelet Transform", Proceeding of the IEEE/ICEEE, pp.1-6, Merida City, Mexico,Oct. 2011.
[24] H.N. Alves, R.N.B. Fonseca, "An algorithm based on discrete wavelet transform for fault detection and evaluation of the performance of overcurrent protection in radial distribution systems", IEEE Latin America Transactions, Vol.12, No. 4, pp.602-608, June 2014.
[25] M. Sarlak, S.M. Shahrtash, "High impedance fault detection in distribution networks using support vector machines based on wavelet transform", Proceeding of the IEEE/EPC, pp.1-6, Vancouver, BC, Canada, Oct. 2008.
[26] J. Momoh, T. Rizy, "Application of wavelet theory to power distribution systems for fault detection", Proceeding of the IEEE/ISAP, pp.345-350, Orlando, FL, USA, Feb. 1996.
[27] A.H. Eldin, E. Abdallah, N. Mohamed, "Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks using discrete wavelet transform", Proceeding of the IEEE/CIRED, pp.1-4, Stockholm, Sweden, June 2013.
[28] H. Yong, C. Minyou, Z. Jinqian, "High impedance fault identification method of the distribution network based on discrete wavelet transformation", Proceeding of the IEEE/ICECENG, pp.2262-2265, Yichang, China, Sept. 2011.
[29] F.B. Costa, B.A. Souza, N.S.D. Brito, J.A.C.B. Silva, W.C. Santos, "Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.51, No. 6, pp. 5312-5323, Nov-Dec. 2015.
[30] F.B. Costa, A. Monti, S.C. Paiva, "Overcurrent Protection in Distribution Systems with Distributed Generation based on the Real-Time Boundary Wavelet Transform", IEEE Trans. onPower Delivery, Vol. 32, No. 1, pp.462-473, Feb. 2017.
[31] U.D. Dwivedi, S.N. Singh, S.C. Srivastava, "A wavelet based approach for classification and location of faults in distribution systems", Proceeding of the IEEE/INDCON, Vol. 2, pp.488-493, Kanpur, India, Dec. 2008.
[32] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, S.J. Lee, S.H. Kang, "High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp.1793-1802, Oct. 2006.
[33] J. Liang, Z. Yun, F. Liu, Y. Liu, "A method of fault line detection in distribution systems based on wavelets", Proceeding of the IEEE/ICPST, Vol. 4, pp.2635-2639,Kunming, China,Oct. 2002.
[34] M. Mishra, P.K. Rout, P. Routray, "High impedance fault detection in radial distribution system using wavelet transform", Proceeding of the IEEE/INDICON, pp.1-6, New Delhi, India, Dec. 2015.
[35] H. Jingguang, H. Xiangyong, L. Xianshan, H. Hanmei, L. Yanping,"A Novel Single-Phase Earth Fault Feeder Detection by Traveling Wave and Wavelets", Proceeding of the IEEE/ICPST, pp.1-4, Chongqing, China, Oct. 2006.
[36] M.T. Yang, J.C. Gu, W.S. Hsu, Y.C. Chang, C. Cheng, "A novel intelligent protection scheme for high impedance fault detection in distribution feeder", Proceeding of the IEEE/TENCON, Vol. 3, pp.401-404, Chiang Mai, Thailand, Nov. 2004.
[37] J. Liang, Z. Liu, Z. Yun, M. Li, "A New Method for Earth Fault Line Detection Based on Two-Dimensional Wavelet Transform in Distribution Automation", Proceeding of the IEEE/TDC, pp.1-5, Dalian, China, Aug. 2005.

[38] T.S. Sidhu, Z. Xu, "Detection of Incipient Faults in Distribution Underground Cables", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.25, No. 3, pp.1363-1371, July 2010.
[39] M. Michalik, M. Lukowicz, W. Rebizant, S.J. Lee, S.H. Kang, "Verification of the Wavelet-Based HIF Detecting Algorithm Performance in Solidly Grounded MV Networks", IEEE Trans. on Power Delivery,Vol.22, No. 4, pp.2057-2064, Oct. 2007.
[40] J. Zhang, Z.Y. He, "Distribution System Fault Diagnosis Scheme Based on Multiple Information Sources", Proceeding of the IEEE/APPEEC, pp.1-4, Wuhan, China, Mar. 2009.
[41] R.H. Salim, K.R.C. de Oliveira, A.D. Filomena, M. Resener, A.S. Bretas,"Hybrid Fault Diagnosis Scheme Implementation for Power Distribution Systems Automation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.23, No.4, pp.1846-1856, Oct. 2008.
[42] N.I. Elkalashy, M. Lehtonen, H.A. Darwish, A.I. Taalab, M.A. Izzularab,"Verification of DWT-Based Detection of High Impedance Faults in MV Networks", Proceeding of the IEEE/DPSP, pp.344-348, Glasgow, UK, Mar. 2008.
[43] M.T. Yang, J.C. Gu, J.L. Guan, C.Y. Cheng, "Detection of High Impedance Faults in Distribution System", Proceeding of the IEEE/TDC, pp.1-5, Dalian, China, Aug. 2005.
[44] I.H. Lim, H.T. Lim, M.S. Choi, S.J. Lee, D. Bak, T.W. Kim, "A fault section detection method using ZCT when a single phase to ground fault in ungrounded distribution system", Proceeding of the IEEE/TDC, pp.1-6, New Orleans, LA, USA, April 2010.
[45] A. Ali, A.Q. Khan, B. Hussain, M.T. Raza, M. Arif, "Fault modelling and detection in power generation, transmission and distribution systems", IET Generation, Transmission & Distribution,Vol.9, No. 16, pp.2782-2791, Mar. 2015.
[46] D. Thukaram, H.P. Khincha, L. Jenkins, K. Visakha, "A three phase fault detection algorithm for radial distribution networks", Proceeding of the IEEE/TENCON, Vol. 2, pp.1242-1248, Beijing, China, Oct. 2002.
[47] S. Gautam, S.M. Brahma, "Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology", IEEE Trans. on Power Systems,Vol.28, No. 2, pp.1226-1234, May 2013.
[48] M.F. Abdel-Fattah, M. Lehtonen, "A probabilistic-based technique using transient RMS currents for earth fault detection in medium voltage distribution networks", Proceeding of the IEEE/DPSP, pp.1-5, Manchester, UK, April 2010.
[49] M.G.M. Zanjani, H.K. Kargar, M.G. M.Zanjani, "High impedance fault detection of distribution network by phasor measurement units", Proceeding of the IEEE/EPDC, pp.1-5,Tehran, Iran,May 2012.
[50] A. Ngaopitakkul, C. Pothisarn, S. Bunjongjit, B. Suechoey, "An application of discrete wavelet transform and support vector machines algorithm for classification of fault types on underground cable", Proceeding of the IEEE/IBICA, pp.85-88, Kaohsiung, Taiwan, Sept. 2012.
[51] S.R. Samantaray, L.N. Tripathy, P.K. Dash, "Combined EKF and SVM based High Impedance Fault detection in power distribution feeders", Proceeding of the IEEE/ICPWS, pp.1-6, Kharagpur, India, Dec. 2009.
[52] T. Li, W. Zheng, X. Yao, "Fault detection and diagnosis using PDF for stochastic distribution systems", Proceeding of the IEEE/CCC, pp.117-121, Yantai, China, July 2011.
[53] L. Yao, H. Wang, H. Yue, J. Zhou, "Fault detection and diagnosis for stochastic distribution systems using a rational square-root approximation model", Proceeding of the IEEE/CDC, pp.4163-4168,San Diego, CA, USA, Dec. 2006.
[54] L. Guo, Y.M. Zhang, H. Wang, J.C. Fang, "Observer-Based Optimal Fault Detection and Diagnosis Using Conditional Probability Distributions", IEEE Trans. on Signal Processing,Vol.54, No. 10, pp.3712-3719, Oct. 2006.
[55] J.Li, J.Zhou, D. Zhou, "Fault detection and diagnosis of singular stochastic distribution systems", Proceeding of the IEEE/WCICA, pp.274-279, Chongqing, China,June 2008.
[56] L.G. Santander, P. Bastard, M. Petit, I. Gal, E. Lopez, H. Opazo, "Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol.152, No. 2, pp.180-184, Mar. 2005.
[57] P. Balcerek, M. Fulczyk, E. Rosolowski, J. Izykowski, P. Pierz, "New algorithm for determination of faulty feeder in distribution network", Proceeding of the IEEE/DPSP, pp.1-6, Birmingham, UK, April 2012.
[58] H. Shu, W. Xu, T. Xincui, W. Qianjin,S. Peng, "On the use of S-transform for fault feeder detection based on two phase currents in distribution power systems", Proceeding of the IEEE/INDUSIS, Vol. 2, pp.282-287,Dalian, China, July 2010.
[59] L. Qin, C. Hao, H. Jin, M. Li,Y. Wang, "CIM-based fault detection analysis of distribution system",Proceeding of the IEEE/APAP, Vol. 1, pp.554-557,Beijing, China,Oct. 2011.
[60] J. Ghorbani, M.A. Choudhry, A. Feliachi, "Real-time multi agent system modeling for fault detection in power distribution systems", Proceeding of the IEEE/NAPS, pp.1-6, Champaign, IL, USA,Sept. 2012.
[61] P. Bhasin, H.S.V.S. Kumar Nunna, S. Doolla, S.V. Kulkarni, "Multi-agent based diagnosis framework for transformers in a smart distribution system", Proceeding of the IEEE/PEDES, pp.1-6, Mumbai, India, Dec. 2014.
[62] K. Nareshkumar, M.A. Choudhry, J. Lai, A. Feliachi, "Application of multi-agents for fault detection and reconfiguration of power distribution systems", Proceeding of the IEEE/PES, pp.1-8, Calgary, AB, Canada, July 2009.
[63] A. Ghaderi, H.A. Mohammadpour, H.L. Ginn, Y.J. Shin, "High-Impedance Fault Detection in the Distribution Network Using the Time-Frequency-Based Algorithm", IEEE Trans. on Power Delivery,Vol.30, No. 3, pp.1260-1268, June 2015.
[64] F. Ruz, J.A. Fuentes, "Fuzzy decision making applied to high impedance fault detection in compensated neutral grounded MV distribution systems", Proceeding of the IEEE/ICDPSP, pp.307-310,Amsterdam, Netherlands,April 2001.
[65] K. Stergiopoulos, A.G. Pipe, H. Nouri, "Intelligent control architectures for fault diagnosis in electrical power distribution networks", Proceeding of the IEEE/ISIC, pp.569-573, Houston, TX, USA, Oct. 2003.

[66] M.R. Haghifam, A.R. Sedighi, O.P. Malik, "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol.153, No. 3, pp.359-367, May 2006.
[67] A.H. Etemadi, M.S. Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.2, No. 1, pp.110-118, Jan. 2008.
[68] J.G.M.S. Decanini, M.S. Tonelli-Neto, C.R.Minussi, "Robust fault diagnosis in power distribution systems based on fuzzy ARTMAP neural network-aided evidence theory", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.6, No. 11, pp.1112-1120, Nov. 2012.
[69] P.R.Silva, A.Santos, F.G.Jota, "An intelligent system for automatic detection of high impedance faults in electrical distribution systems", Proceeding of the IEEE/MWSCAS, Vol. 1, pp.453-456,Rio de Janeiro, Brazil,Aug. 1995.
[70] F.G. Jota, P.R.S. Jota, "High-impedance fault identification using a fuzzy reasoning system", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol.145, No. 6, pp.656-661, Nov. 1998.
[71] T. Jin, H. Li, "Fault location method for distribution lines with distributed generators based on a novel hybrid BPSOGA", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.10, No. 10, pp.2454-2463, July 2016.
[72] Q. Zhou, B. Zheng, C. Wang, J. Zhao, Y. Wang, "Fault location for distribution networks with distributed generation sources using a hybrid DE/PSO algorithm", Proceeding of the IEEE/PESMG, pp.1-5,Vancouver, BC, Canada, July 2013.
[73] T.Takagi, Y.Yamakoshi, M.Yamaura, R.Kondow, T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Power Engineering Review, Vol.PER-2, No. 8, pp.59-60, Aug. 1982.
[74] A.A. Girgis, C.M. Fallon, D.L. Lubkeman, "A fault location technique for rural distribution feeders", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.29, No. 6, pp.1170-1175, Nov/Dec. 1993.
[75] R. Das, M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, "A fault locator for radial subtransmission and distribution lines", Proceeding of the IEEE/PESS, Vol. 1, pp.443-448, Seattle, WA, USA, July 2000.
[76] S. Santoso, R.C. Dugan, J. Lamoree, A. Sundaram, "Distance estimation technique for single line-to-ground faults in a radial distribution system", Proceeding of the IEEE/PESW, Vol. 4, pp.2251-2555,Singapore, Singapore,Jan. 2000.
[77] D.W.P. Thomas, R.J.O. Carvalho, E.T. Pereira, "Fault location in distribution systems based on traveling waves", Proceeding of the IEEE/PTC, Vol. 2, pp.1-5, Bologna, Italy, June 2003.
[78] M. Öhrström, M. Geidl, L. Söder, G. Andersson, "Evaluation of travelling wave based protection schemes for implementation in medium voltage distribution systems", Proceeding of the IEEE/CIRED, pp.1-5,Turin, Italy,June 2005.
[79] X. Dong, J. Wang, S. Shi, B. Wang, B. Dominik, M. Redefern, "Traveling wave based single-phase-to-ground protection method for power distribution system", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol.1, No. 2, pp.75-82, June 2015.
[80] A.T. Jahromi, P. Wolfs, S. Islam, "Travelling wave fault location in rural radial distribution networks to reduce wild fire risk", Proceeding of the IEEE/AUPEC, pp.1-6, Wollongong, Australia, Sept. 2015.
[81] H. Ye, K. Rui, Z. Zhu, X. Zeng, D. Yang, Y. Cao, "A novel single-phase grounding fault location method with traveling wave for distribution networks", Proceeding of the IEEE/DRPT, pp.1175-1179, Changsha, China, Nov. 2015.
[82] S. Shi, X. Dong, "Traveling waves based fault forecast for feeders in power distribution system", Proceeding of the IEEE/PESGM, pp.1-4, National Harbor, MD, USA, July 2014.
[83] H. Zhao, Y. Qi, H. Jia, "Medium voltage distribution network traveling wave fault location method based on wavelet packet energy spectrum", Proceeding of the IEEE/APAP, Vol. 3, pp.1650-1655,Beijing, China,Oct. 2011.
[84] F. Yan, Z. Guo, "Composite fault location method of single-phase-to-earth about rural distribution networks", Proceeding of the IEEE/ICEMI, pp.4968-4972,Beijing, China, Aug. 2009.
[85] X. Qin, X. Zeng, Z. Xiaoli, L. Zewen, "Traveling Wave Based Distribution Lines Fault Location Using Hilbert-Huang Transform", Proceeding of the IEEE/IAS, pp.1-5,Edmonton, AB, Canada, Oct. 2008.
[86] H. Hizman, P.A. Crossley, P.F. Gale, G.Bryson, "Fault section identification and location on a distribution feeder using travelling waves", Proceeding of the IEEE/PESS, Vol. 3, pp.1107-1112, Chicago, IL, USA, July 2002.
[87] M.El- Hami, L.L. Lai, D.J. Daruvala, A.T. Johns, "A new travelling-wave based scheme for fault detection on overhead power distribution feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No. 4, pp.1825-1833, Oct. 1992.
[88] J.A. Cormane, H.R. Vargas, G. Ordonez, G. Carrillo, "Fault Location in Distribution Systems by Means of a Statistical Model", Proceeding of the IEEE/TDCLA, pp.1-7, Caracas, Venezuela,Aug. 2006.
[89] L.S. Martins, J.F. Martins, C.M. Alegria, V.F. Pires, "A network distribution power system fault location based on neural eigenvalue algorithm", Proceeding of the IEEE/PTC, Vol. 2, pp.1-6,Bologna, Italy,June 2003.
[90] J.M. Flóreza, J.C. Angaritab, G.O. Platab, "K-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems", Electric Power Systems Research, Vol.79, No. 5, pp.714-721, May 2009.
[91] R.K. Rayudu, "A knowledge-based architecture for distributed fault analysis in power networks", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, No. 4, pp.514-525, June 2010.
[92] Y. Tang, H.F. Wang, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "Fault indicators in transmission and distribution systems", Proceeding of the IEEE/DRPT, pp.238-243, London, UK, April 2000.
[93] J.M. Flòreza, J. Meléndezb, G.C. Caicedoc, "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems", Electric Power Systems Research, Vol.78, No. 4, pp.657-666, April 2008.
[94] M.M. Saha, F. Provoost, E. Rosolowski, "Fault location method for MV cable network", Proceeding of the IEEE/DPSP, pp.323-326, Amsterdam, Netherlands,April 2001.

[95] A.C. Adewole, R. Tzoneva, "Fault detection and classification in a distribution network integrated with distributed generators", Proceeding of the IEEE/PowerAfrica, pp.1-8, Johannesburg, South Africa, July 2012.
[96] K. Zimmerman, D. Costello, "Impedance-based fault location experience", Proceeding of the IEEE/REPCON, pp.1-16, Albuquerque, NM, USA, April 2006.
[97] A.C. Adewole, R. Tzoneva, "A Review of Methodologies for Fault Detection and Location in Distribution Power Networks", International Review on Modelling & Simulations, Vol.4, No. 6, pp.3214-3231, Dec. 2011.
[98] E.C. Senger, G. Manassero, C. Goldemberg, E.L. Pellini, "Automated fault location system for primary distribution networks", IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.20, No. 2, pp.1332-1340, April 2005.
[99] M.M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski, "A new fault location algorithm for distribution networks", Proceeding of the IEEE/DPSP, Vol. 1, pp.168-171, Amsterdam, Netherlands, April 2004.
[100] R.A.F. Pereira, L.G.W. Silva, M. Kezunovic, J.R.S. Mantovani, "Location of Single Line-to-Ground Faults on Distribution Feeders Using Voltage Measurements", Proceeding of the IEEE/TDCLA, pp.1-6, Caracas, Venezuela, Aug. 2006.
[101] R.A.F. Pereira, L.G.W. Silva, M. Kezunovic, J.R.S. Mantovani, "Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.24, No. 2, pp.852-862, April 2009.
[102] G.M. Espana, J.M. Florez, H.V. Torres, "Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.24, No. 3, pp.1382-1389, July 2009.
[103] R.H. Salim, M. Resener, A.D. Filomena, K.R.C. de Oliveira, A.S. Bretas, "Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.24, No. 2, pp.508-516, April 2009.
[104] A.D. Filomena, M. Resener, R.H. Salim, A.S. Bretas, "Fault location for underground distribution feeders: An extended impedance-based formulation with capacitive current compensation", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.31, No. 9, pp.489-496, Oct. 2009.
[105] M.C. Almeida, F.F. Costa, S.X. Souza, F. Santana, "Optimal placement of faulted circuit indicators in power distribution systems", Electric Power Systems Research, Vol.81, No. 2, pp.699-706, Feb. 2011.
[106] R. Dashti, J. Sadeh, "A new method for fault section estimation in distribution network", Proceeding of the IEEE/POWERCON, pp.1-5, Hangzhou, China, Oct. 2010.
[107] S.J. Lee, M.S. Choi, S.H. Kang, B.G. Jin, D.S. Lee, B.S. Ahn, N.S. Yoon, H.Y. Kim, S.B. Wee, "An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.19, No. 2, pp.524-532, April 2004.
[108] V.N. Gohokar, V.V. Gohokar, "Fault location in automated distribution network", Proceeding of the IEEE/SCAS, Vol. 4, pp.3898-3901, Kobe, Japan, May 2005.
[109] V.N. Gohokar, M.K. Khedkar, "Faults locations in automated distribution system", Electric Power Systems Research, Vol.75, No. 1, pp.51-55, July 2005.
[110] C. Yuan, X. Zeng, Y. Xia, "Improved Algorithm for Fault Location in Distribution Network with Distributed Generations", Proceeding of the IEEE/ICICTA, Vol. 2, pp.893-896, Hunan, China, Oct. 2008.
[111] A. Campoccia, M.L. Di Silvestre, I. Incontrera, E.R. Sanseverino, G. Spoto, "An efficient diagnostic technique for distribution systems based on under fault voltages and currents", Electric Power Systems Research, Vol.80, No. 10, pp.1205-1214, Oct. 2010.
[112] Y. Gong, A. Guzmán, "Distribution feeder fault location using IED and FCI information", Proceeding of the IEEE/CPRE, pp.168-177, College Station, TX, USA, April 2011.
[113] S.L. Zimath, M.A.F. Ramos, J.E.S. Filho, "Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults", Proceeding of the IEEE/TDC, pp.1-5, New Orleans, LA, USA, April 2010.
[114] F.H. Magnago, A. Abur, "A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals", Proceeding of the IEEE/PESS, Vol. 1, pp.426-431,Edmonton, Alta., Canada, July 1999.
[115] Y. Bi, J. Zhao, D. Zhang, "Single-phase-to-ground fault feeder detection based on transient current and wavelet packet", Proceeding of the IEEE/ICPST, Vol. 1, pp.936-940, Singapore, Singapore, Nov. 2004.
[116] D. Jalali, N. Moslemi, "Fault location for radial distribution systems using fault generated high-frequency transients and wavelet analysis", Proceeding of the IEEE/CIRED, pp.1-4, Turin, Italy, June 2005.
[117] A. Borghetti, S. Corsi, C.A. Nucci, M. Paolone, L. Peretto, R. Tinarelli, "On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.28, No. 9, pp.608-617, Nov. 2006.
[118] R.H. Salim, K.R.C. Oliveira, A.S. Bretas, "Fault Detection in Primary Distribution Systems using Wavelets", Proceeding of the IPST'07, pp.1-7, Lyon, France,June 2007.
[119] M.T. Yang, J.L. Guan, J.C. Gu, "High Impedance Faults Detection Technique Based on Wavelet Transform", International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.1, No.4, pp.681-685, 2007.
[120] K.R.C. de Oliveira, R.H. Salim, A.S. Jr., A.S. Bretas, "Faulted Branch Identification on Power Distribution Systems Under Noisy Environment", Proceeding of the IPST, pp.1-5, Kyoto, Japan, June 2009.
[121] W. Zhao, Y.H. Song, Y. Min, "Wavelet analysis based scheme for fault detection and classification in underground power cable systems", Electric Power Systems Research, Vol.53, No. 1, pp.23-30, Jan. 2000.
[122] K.L.B. Purry, J. Cardoso, "Characterization of underground cable incipient behavior using time-frequency multi-resolution analysis and artificial neural networks", Proceeding of the IEEE/PES, pp.1-11, Pittsburgh, PA, USA, July 2008.

[123] A. Ngaopitakkul, C. Apisit, C. Pothisarn, C. Jettanasen, S. Jaikhan, "Identification of fault locations in underground distribution system using discrete wavelet transform", Proceeding of the IMECS, Vol. 2, pp.1-5, Hong Kong, Mar. 2010.
[124] C. Apisit, C. Pothisarn, A. Ngaopitakkul, "An Application of Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Fault Locations in Underground Cable", Proceeding of the IEEE/IBICA, pp.89-92, Kaohsiung, Taiwan, Sep. 2012.
[125] M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu, S. Santoso, M.F. Mcgranaghan, P.A. Crossley, M.V. Ribeiro, P.F. Ribeiro, "Bridging the gap between signal and power: Assessing power system quality using signal processing techniques", IEEE Signal Processing Magazine, Vol.26, No.4, pp.12-31, July 2009.
[126] K.L. Butler, J.A. Momoh, "Detection and classification of line faults on power distribution systems using neural networks", Proceeding of the IEEE/MWSCAS, Vol. 1, pp.368-371, Detroit, MI, USA, Aug. 1993.
[127] C.Y. Teo, "Automation of knowledge acquisition and representation for fault diagnosis in power distribution networks", Electric Power Systems Research, Vol.27, No. 3, pp.183-189, Aug. 1993.
[128] E.A. Mohamed, N.D. Rao, "Artificial neural network based fault diagnostic system for electric power distribution feeders", Electric Power Systems Research, Vol.35, No. 1, pp.1-10, Oct. 1995.
[129] F.Wen, C.S.Chang, "A new approach to fault diagnosis in electrical distribution networks using a genetic algorithm", Artificial Intelligence in Engineering, Vol.12, No. 1-2, pp.69-80, Jan.–April 1998.
[130] Z.E. Aygen, S. Seker, M. Bagnyanik, F.G. Bagnyanik, E. Ayaz, "Fault section estimation in electrical power systems using artificial neural network approach", Proceeding of the IEEE/TDC, Vol. 2, pp.466-469, New Orleans, LA, USA, April 1999.
[131] D.T.W. Chan, C.Z. Lu, "Distribution system fault identification by mapping of characteristic vectors", Electric Power Systems Research, Vol.57, No. 1, pp.15-23, Jan. 2001.
[132] M.A. Al-Shaher, M.M. Sabry, A.S. Saleh, "Fault location in multi-ring distribution network using artificial neural network", Electric Power Systems Research, Vol.64, No. 2, pp.87-92, Feb. 2003.
[133] J.J. Mora, J.C. Bedoya, J. Melendez, "Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems", Proceeding of the IEEE/TDCLA, pp.1-6, Caracas, Venezuela, Aug. 2006.
[134] M. Fulczyk, P. Balcerek, J. Izykowski, E. Rosolowski, M.M. Saha, "New Method of Locating Faults on Three-terminal Lines Equipped with Current Differential Relays", Proceeding of the IEEE/PES, pp.1-8, Tampa, FL, USA, June 2007.
[135] S. Herraiz, J. Melendez, G. Ribugent, J. Sanchez, E. Brunet, "Fault location in distribution power systems by means of a toolbox based on N-ary tree data structures", Proceeding of the DIRED, pp.1-4, Vienna, Austria, May 2007.
[136] Z. Guo-fang, L. Yu-ping, "Development of fault location algorithm for distribution networks with DG", Proceeding of the IEEE/ICSET, pp.164-168,Singapore, Singapore, Nov. 2008.
[137] H. Zayandehroodi, A. Mohamed, H. Shareef, M. Mohammadjafari, "Determining exact fault location in a distribution network in presence of DGs using RBF neural networks", Proceeding of the IEEE/IRI, pp.434-438, Las Vegas, NV, USA, Aug. 2011.
[138] N. Rezaei, S.A. M.Javadian, N. Khalesi, M.R. Haghifam, "Diagnosis of impedance fault in distribution system with distributed generations using radial basis function neural network", Proceeding of the IEEE/SMFG, pp.79-83,Bologna, Italy, Nov. 2011.
[139] P. Jarventausta, P. Verho, J. Partanen, "Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No. 2, pp.954-960, April 1994.
[140] M. Kezunovic, S. Vasilic, D. Ristanovic, "Interfacing protective relays and relay models to power system modeling software and data files", Proceeding of the IEEE/ICPST, Vol. 1, pp.253-259, Kunming, China, Oct. 2002.
[141] Y. Fukuyama, Y. Ueki, "Fault analysis system using neural networks and artificial intelligence", Proceeding of the IEEE/ANN, pp.20-25, Yokohama, Japan,April 1993.
[142] Y. Assef, O. Chaari, M. Meunier, "Classification of power distribution system fault currents using wavelets associated to artificial neural networks", Proceeding of the IEEE/TFSA, pp.421-424, Paris, France, June 1996.
[143] J. Barros, E. Perez, A. Pigazo, "Real Time System for Identification of Power Quality Disturbances", Proceeding of the CIRED, pp.1-4, Barcelona, Spain, May 2003.
[144] Y. Yuehai, B. Yichuan, X. Guofu, X. Shiming, L. Jianbo, "Fault analysis expert system for power system", Proceeding of the IEEE/ICPST, Vol. 2, pp.1822-1826, Singapore, Singapore, Nov. 2004.
[145] D. Thukaram, H.P. Khincha, H.P. Vijaynarasimha, "Artificial neural network and support vector Machine approach for locating faults in radial distribution systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.20, No. 2, pp.710-721, April 2005.
[146] V. Ziolkowski, I.N. DaSilva, R. Flauzino, J.A. Ulson, "Fault Identification in Distribution Lines Using Intelligent Systems and Statistical Methods", Proceeding of the IEEE/MELCON, pp.1122-1125, Malaga, Spain, May 2006.
[147] F. Chunju, K.K. Li, W.L. Chan, Y. Weiyong, Z. Zhaoning, "Application of wavelet fuzzy neural network in locating single line to ground fault (SLG) in distribution lines", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.29, No. 6, pp.497-503, July 2007.
[148] I. Baqui, I. Zamora, J. Mazón, G. Buigues, "High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks", Electric Power Systems Research, Vol.81, No. 7, pp.1325-1333, July 2011.
[149] Y. Aslan, Ş. Türe, "Locationof faults in power distribution laterals using superimposed components and programmable logic controllers", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.33, No. 4, pp.1003-1011, May 2011.