KNO-1301-5101

هوش مصنوعی، راهکاری موثر در پایش و نگهداری پیشگویانه در سیستم‌های توزیع برق

صدف ظریفی[۱] sadaf_zarifi@yahoo.com

سیمین خضرایی شولای فر[۲] si.khazraei@iau.ac.ir

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش سیستم های قدرت، دانشکده هوش مصنوعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

[۲]استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده هوش مصنوعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

چکیده:

نگهداری پیش‌گویانه(PdM) شـــبکه توزیع برق، یک اقدام حیاتی برای تشـــخیص خرابی‌های بالقوه بشـــمار می‌رود و می‌تواند قبل از اینکه خاموشی کامل در شبکه اتفاق بیفتد، هشدارهای لازم را به راهبران شبکه ارائه نماید. نگهداری پیش‌گویانه، تأثیر خوبی بر کاهش هزینه‌های شبکه توزیع برق نیز دارد؛ زیرا با مدرن‌تر شدن و پیچیده‌تر شدن سیستم شبکه‌های توزیع برق، هزینه تولید برق نیز افزایش یافته است. با انجام نگهداری پیش‌گویانه، مشکلات مربوط به همگام‌سازی[۴]اجزای مختلف شبکه کاهش می‌یابد.

در روش نگهداری پیش‌گویانه برای شبکه‌های توزیع برق، شبکه باید بتواند به سرعت داده‌های تحلیل شده‌ای را ارائه نماید تا وضعیت شبکه را پیش از وقوع خرابی در سیستم نشان دهد. همچنین، سیستم باید داده‌های حاکی از علائم خرابی و علل بروز عیب در زیرساخت-های شبکه را به سرعت ارائه نماید. در این مقاله خلاصه روش های تعمیر ونگهداری پیشگویانه شبکه توزیع بیان و بر استفاده از روش های فناورانه برای پیش گویی خرابی ها یا حملات سایبری شبکه تاکید گردیده است. با استفاده از روش های بیان شده، ناترازی ها، از کار افتادگی های شبکه یا حملات سایبری به شبکه توزیع را می توان به حداقل میزان ممکنه رساند و حتی حذف نمود.

کلید واژه ها: تعمیر و *نگهداری پیش گویانه، شبکه برق هوشمند، هوش مصنوعی*

۱. مقدمه

نگهداری پیش‌گویانه شبکه توزیع برق، یک اقدام حیاتی برای تشخیص خرابی‌های بالقوه بشمار می‌رود و می‌تواند قبل از اینکه خاموشی کامل در شبکه اتفاق بیفتد، هشدارهای لازم را به راهبران شبکه ارائه نماید [۱-۵]. خرابی ها را به دو گروه عمده می توان دسته بندی کرد: خرابی مدار باز [۶] و خرابی اتصال کوتاه [۷]. هر گونه قطع شدگی در مدار مانند باز بودن یک سوییچ، قطع شدگی در سیم‌کشی یا مقاومتی که مقدار آن به طور ناگهانی تغییر کرده باشد، باعث ایجاد وقفه در عبور جریان از مدار می‌شود که از آن به خرابی مدار باز تعبیر می شود [۶]. خرابی‌های ناشی از اتصال کوتاه را می‌توان بخاطر نفوذ غیرعادی یک امپدانس پایین بین دو نقطه با پتانسیل‌های مختلف دانست [۷].

با پیشرفت طرح‌های مبتکرانه و هوشمندانه در سیستم‌های توزیع برق و ورود شبکه‌های هوشمند به عرصه شبکه‌های توزیع برق، نگهداری مبتنی بر شرایط[۳]راهکار مناسبی برای نگهداری شبکه‌های هوشمند آینده به شمار می‌رود. در نگهداری مبتنی بر شرایط، خرابی تجهیزات الکتریکی با نرخ مشخصی پیش‌بینی می‌شود [۸]. بطور مثال، PMU[۴](دستگاه اندازه‌گیری فازور)، وسیله‌ای است که با استفاده از مشتق زمانی پایه برای همگام‌سازی[۵] امواج الکتریکی روی یک شبکه قدرت را اندازه‌گیری می‌نماید. PMU ها اطلاعات فوق‌العاده

[1] Predictive Maintenance
[2] synchronization
[۳]condition-based
[۴]Phasor Measurement Unit
[۵]synchronization

زیادی ارائه می‌نمایند که بدست آوردن و چک کردن آن‌ها بطور فیزیکی امکان‌پذیر نیست [۳]. جالب است بدانیم که استفاده از ژنراتورهای توزیع شده در سیستم‌های قدرت مذکور طی سال‌های اخیر گسترش یافته است؛ زیرا این ژنراتورها می‌توانند نیاز به افزایش توان در محدوده خود را برطرف کنند. بنابراین، روش مذکور علاوه بر مزیت‌هایی که برای تشخیص عیب دارد، می‌تواند مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط روش‌های تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را هم کاهش دهد [۹].

یک رویکرد تشخیص خرابی دیگر هم که به مدل‌های مبتنی بر اعداد وابسته است، در تحقیق انجام شده توسط Moamin A Mahmoud و همکارانش، مورد استفاده قرار گرفته است. هم مدل عیب‌یابی و هم سیکل آزمایش مربوط به آن از طریق یک ارتباط علمی مبتنی بر افزایش عددی در هر دوره آزمایش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با تشخیص رفتارهای غیرعادی بین سیگنال‌های آن دو، باقی‌مانده‌ها بدست آمد [۱۰]. هنگامی که هیچ خرابی وجود نداشته باشد ، باقی‌مانده‌ها باید صفر شوند. البته این موضوع بخاطر نویز و سایر نقایص مدل، از دقت کافی برخوردار نیست. به همین دلیل، پس از دریافت باقی‌مانده‌ها، ضرورت دارد که بررسی کاملی بر روی آن‌ها انجام شود تا بتوان خرابی‌ها را به درستی تشخیص داد. بنابراین، باقی‌مانده‌ها نمی‌توانند کمک قابل اتکایی در مورد تشخیص خرابی‌ها محسوب شوند [۱۰].

در سال‌های گذشته، مطالعاتی انجام شده تا یک قطعه مینیاتوری ساخته شود که بتواند به سیستم توزیع متصل شود و محل دقیق وقوع خرابی را مشخص نماید. تشخیص محل خرابی می‌تواند باعث کاهش نیروی انسانی مصرفی برای یافتن عیب باشد و می‌تواند با محدود نمودن زمان خاموشی، کیفیت بی‌چون و چرای ذخیره برق را تضمین نماید. با پیشرفت‌هایی که در زمینه میکروکنترلرها و GSM[۱] و استراتژی‌های تطبیقی و قدرتمند Arduino حاصل شده، راه روشنی به سمت یافتن محل خرابی‌ها پیدا شده است [۲]. در یک طرح نوآورانه که Moamin A Mahmoud و همکارانش به انجام رساندند، از یک ساعت بلادرنگ[۲] استفاده شد. در این طرح، سیگنال‌هایی که توسط این ساعت تولید می‌شوند، در محدوده‌های زمانی مختلفی با flagهای مربوط به خود قرار می‌گیرند. بنابراین با تحلیل سیگنال حاصله، تعیین محل خرابی امکان‌پذیر خواهد شد. البته تشخیص محل خرابی، به تخمین ولتاژهای نقطه مورد بررسی و جریان‌های عبور کننده از سیستم توزیع بستگی دارد. این طرح نوآورانه، دارای بخش‌های مرحله به مرحله است و در هر مرحله اجزای جدید و تکامل یافته‌ای ایجاد می‌کند که در حداقل زمان ممکنه، پاسخ لازم را ارئه می‌نمایند و خروجی‌های دقیقی دارند [۱۱].

۲. روش‌های پیش‌گویی خرابی

تا کنون، خرابی‌های یک سایت تولید برق (به‌عنوان مثال، اتصال یک فاز به زمین [۱۳ و ۱۴]) معمولاً توسط انسان مشخص و رفع شده است. با پیشرفت تکنولوژی و سیستم‌های قدرت، به منظور اطمینان از پایداری سیستم‌های مذکور و افزایش مقاومت این سیستم‌ها در مقابل عوامل طبیعی [۲۳ و ۳۸]، چندین روش از جمله Stockwell Transform پیشنهاد شده که تا کنون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۳۶]. البته خرابی‌ها در سیستم‌های قدرت اجتناب ناپذیر هستند اما می‌توان آن‌ها را به حداقل مقدار ممکنه رساند. در ادامه، چند روش مختلف که می‌توانند اطمینان‌پذیری شبکه‌های هوشمند را برای کاربران آن‌ها افزایش دهند، تشریح می‌گردد.

۲,۱. تکنیک مبتنی بر حرارت نگاری مادون قرمز[۳] (IRT) به کمک پرسپترون چند لایه[۴] (MLP)

[۱] Global System for Mobile
[۲] real time
[۳] InfraRed Thermography
[۴] MultilLayer Perceptron

این تکنیک بصورت غیرمخرب، خرابی‌ها و راه‌های پرهیز از آن‌ها را در یک ایستگاه کنترل، بررسی می‌کند. در این تکنیک، از روش‌های کامپیوتری و تکنولوژی هوش مصنوعی بهره‌گیری می‌شود تا با استفاده از تصاویر حرارتی مادون قرمز، خرابی تجهیزات سخت‌افزاری در مراحل اولیه بروز مشکل، تشخیص داده شوند. از این‌رو، با پایبندی به این متدلوژی و استفاده از هوش مصنوعی روش غیرمخربی برای انجام تست‌های عیب‌یابی در ادوات الکتریکی ایجاد می‌شود. این متدلوژی، برای تشخیص عیب از MLP استفاده می‌نماید تا وضعیت حرارتی اجزای ایستگاه برق را با دقت ۷۹/۷٪ در گروه‌های «معیوب» و «غیرمعیوب» قرار دهد. حرارتی که در اجزای الکتریکی تولید می‌شود را می‌توان با حرارت نگاری مادون قرمز شناسایی نمود. IRT، آخرین وضعیت قطعات مختلف الکتریکی را با استفاده از یک دوربین مادون قرمز دریافت می‌کند. به کمک این اطلاعات، می‌توان با حرارت سنج[۱] این تصاویر را تجزیه نمود. حرارت سنج، وضعیت بخش‌های معیوب را در گروه‌های مربوطه درج می‌نماید [۱۵]. در طولانی مدت، اداراتی که به این امر تخصیص یافته‌اند، می‌توانند بخش‌های داغ شبکه را تجزیه و تحلیل نموده و سخت‌افزارهای معیوب را حسب مورد تعمیر نمایند. به مرور زمان، حرارت سنجی قطعات تکنیک مهمی برای پیش‌بینی و ممانعت از تغییر شکل قطعات الکتریکی شده است؛ زیرا ساختار محافظت شده و معقولی دارد. با ضعیف شدن یک قطعه الکتریکی، مقاومت آن در برابر عبور جریان افزایش و گرمای بیشتری را در طول خطوط انتقال ایجاد می‌نماید. انرژی گرمایی حاصل از یک قطعه الکتریکی، متناسب است با مقاومت آن قطعه و مربع جریان عبور کننده از آن [۱۶]. گسترش این گرما می‌تواند منجر به خرابی یک بخش الکتریکی و برافروخته شدن آن گردد. معمولاً وقتی که روال‌های IRT بکار گرفته می‌شوند، خرابی‌های الکتریکی ناشی از گرمای قطعات و نوع وضعیت خرابی آن‌ها با مراجعه به استانداردهای ΔT آن بررسی می‌شوند. به این روش، معمولاً چارچوب ارزیابی حرارتی نظری[۲] گفته می‌شود. در [۱۶]، قواعد ΔT مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲,۲. تشخیص عیب با استفاده از امواج متحرک

در متد استفاده از موج متحرک، از انتقال و بازتاب امواج متحرک بین محل خرابی و ترمینال خط استفاده می‌شود. در «شکل ۱» دیاگرام استفاده از متد موج متحرک نشان داده شده است.

«معادله (۱)»، فاصله محل خرابی از نود آزمونگر[۳] (F_d) را نشان می دهد که باید تعیین شود. t_1 مدت زمان صرف شده برای حرکت موج اولیه از نود آزمونگر به محل خرابی و t_2 مدت زمان صرف شده برای حرکت موج بازتابی از محل خرابی به نود آزمونگر می‌باشد.

$$F_d=v\,(t_2-t_1)/2 \quad (۱)$$

متد موج متحرک به ادواتی نیاز دارد که اولاً در دریافت اطلاعات، سریع باشند، ثانیاً به سنسورها، نشانگرهای عیوب موقتی و یک چارچوب بین المللی GPS[۴] نیاز دارد تا بتواند شکل موجی که از محدوده خرابی عبور می‌کند را دریافت کند [۱۶]. در [۱۶]، آزمونی برای خرابی‌های نه چندان مهم انجام شد و زمان آشکار شدن خرابی‌های آشکار شده با موج متحرک، با استفاده از GPS مشخص گردید. دقت این تکنیک برای یافتن خرابی به دقت تقریب‌های بکار رفته برای محدودیت‌های خط انتقال مانند اندوکتانس خط و ظرفیت خط بستگی دارد.

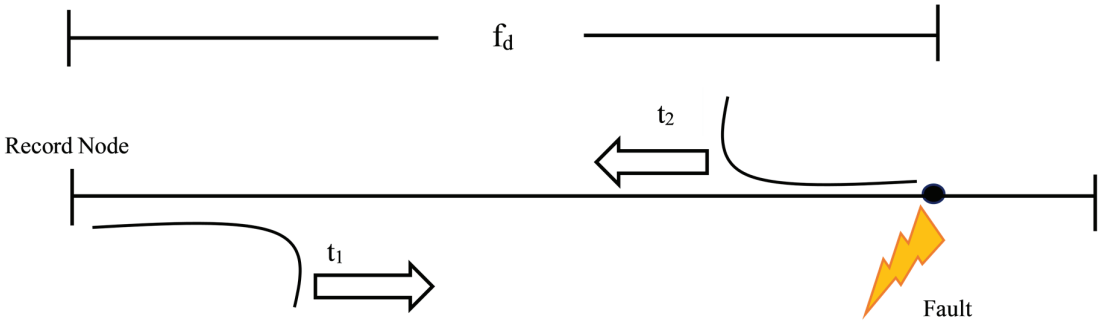
---

[۱] Thermograph

[۲] subjective-based temperature assessment framework

[۳] false distance

[۴] Global Positioning System



شکل ۱- متد استفاده از موج متحرک [۱]

مزیت استفاده از این تکنیک، این است که تحت تأثیر مقاومت بالا یا ترکیب بانک خازنی قرار نمی‌گیرد.

تکنیک دیگری در [۱۷] پیشنهاد شده است که در آن اطلاعات مربوط به موج عبوری با استفاده از حذف نویزموجک‌های آن در باس بارها[۱] ثبت می‌شود. موج عبوری حاوی اطلاعاتی در مورد خرابی و مرزهای قابل اندازه‌گیری آن می‌باشد که به یافتن عیب کمک می‌کنند. با این وجود، این تکنیک در مقایسه با تکنیک عیب‌یابی مبتنی بر GPS خطاهای بیشتری دارد؛ اگرچه هزینه‌های آن به دلیل عدم استفاده از ابزارهای جمع‌آوری اطلاعات GPS کمتر است.

تکنیک دیگری که در[۱۶] پیشنهاد گردیده، تکنیک عیب‌یابی مبتنی بر امواج متحرک ماندگار می‌باشد. در این تکنیک، از امواج متحرکی استفاده می‌شود که بین دو نقطه یک خط انتقال رفت و آمد می‌کنند. مزیت این تکنیک، این است که هم با اطلاعات همگام و هم با اطلاعات ناهمگام می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. یک تکنیک عیب‌یابی دو ترمیناله دیگر نیز در [۱۲] پیشنهاد شده است. در این تکنیک، ترکیبی از قواعد مربوط به موج متحرک و موجک‌ها برای عیب‌یابی استفاده می‌شود. همچنین، با تعیین مدت زمانی که موج متحرک اولیه به

دو نقطه حرکت می‌کند، فاصله محل انتشار موج تا نقطه خرابی مشخص می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که این تکنیک با قطعیت نقاط خرابی را مشخص می‌کند.

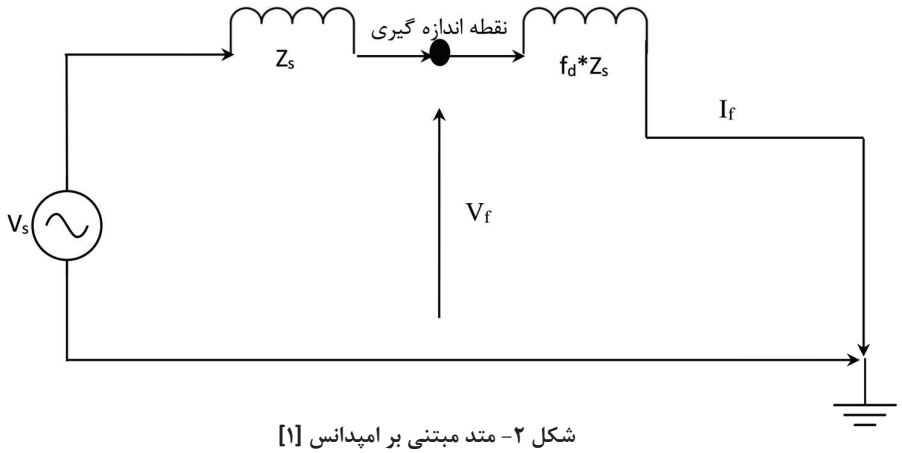
بررسی‌ها نشان می‌دهد که متد موج متحرک بیشتر در خطوط انتقال بکار گرفته می‌شود تا در خطوط توزیع. علتش هم حضور شعب جانبی و شعب فرعی در سیستم‌های توزیع است. مزیت این متد، آن است که مستقل از پیکربندی شرکت توزیع و تجهیزات موجود در آن است و عیب آن نیاز به ادواتی نظیر سنسور و GPS می باشد تا بتواند امواج عبوری را دریافت کند. این بدین معنی است که این سیستم از نظر اجرایی بسیار پر هزینه می‌باشد.

۲,۳. متد مبتنی بر امپدانس

این متد، به دلیل سادگی و بهره‌وری اقتصادی‌اش در مقایسه با متد مبتنی بر امواج متحرک، یکی از متداول‌ترین متدهای مورد استفاده در سیستم‌های قدرت است. مبنای این تکنیک، استفاده از تقریب‌های امپدانسی مشاهده شده از نودهای آزمونگر برای عیب‌یابی است. در «شکل۲»، دیاگرام این متد نشان داده شده است.

[۱] باس بار، یک نوار فلزی رساناست که چند مدار را به یکدیگر متصل می‌نماید.

در این متد، از مقدار ولتاژ و جریان برای کشف امپدانس خرابی استفاده می‌شود. این یک استراتژی پیشرفته و منظم است و می‌تواند یک انتها یا دو انتها داشته باشد. استراتژی یک انتهایی، از ولتاژ و جریان ایستگاه برای عیب‌یابی استفاده می‌کند [۱۸]. استراتژی دو انتهایی، از ولتاژ و جریان دو دریچه توزیع برای عیب‌یابی استفاده می‌نماید.



شکل ۲- متد مبتنی بر امپدانس [۱]

رویکردهای مختلفی برای پیدا کردن فاصله خرابی در خرابی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی نظیر receptive segment (یک مفهوم کلیدی در طراحی و تحلیل شبکه‌های عصبی)، محاسبات Takagi و تکنیک‌های Girgis قبلاً بکار گرفته شده‌اند. هدف این متدها، اندازه‌گیری محدوده خرابی در چارچوب‌های کاری تخصیص یافته است. بخشی که مسئول ارائه پاسخ در این متد است، راکتانس آشکار شده خط را از نود آزمونگر به محل خرابی اعلام می‌نماید و پس از آن، راکتانس مذکور را با هدف حذف شدن، تغییر می‌دهد. تحقیقات قبلی [۱۶] به منظور عیب‌یابی، نسبت receptive segment امپدانس آشکار شده به راکتانس خط را تعیین کرده‌اند. این تحقیقات همچنین تأثیر ظرفیت خط بر روی محدوده خرابی را مورد توجه قرار داده‌اند. با این وجود، نقطه ضعفی که برای این روش وجود دارد، این است که به پایداری خرابی توجه ننموده است. بنابراین، این تکنیک برای وضعیت‌هایی که فاقد خرابی هستند، قابل بکارگیری نیست و احتمالاً دارای خطاهای قابل توجهی می‌باشد. در محاسبات Takagi از عبور مجدد جریان و ولتاژ ، قبل از خرابی (یا در حین خرابی) استفاده می‌شود و مشاهده شده که عملکرد خوبی دارد [۱۶].

۲,۴. سیستم رله حفاظت

سیستم رله حفاظت را می‌توان به رله‌ها، مبدل‌های انرژی، مدار قطع کن‌ها و منبع انرژی کمکی تجزیه نمود. برای تعیین یک خرابی، باید به شرایط سیستم برق توجه داشت. شناخته شده‌ترین علائم مورد استفاده برای کشف خرابی، ولتاژ و جریان است [۱۹]. علاوه بر این، نور می‌تواند برای تشخیص یک خرابی از نوع قوس الکتریکی که در داخل جعبه تجهیزات کنترل و حفاظت الکتریکی ایجاد می‌شود، کمک کند. از این رو، با اندازه

گیری فشار درون یک مبدل، می‌توان امواج فشار تولید شده توسط یک خرابی را شناسایی نمود. ترانسفورماتورهای ابزار[۱] را معمولاً با عناوین VT (ترانسفورماتور ولتاژ که به آن ترانسفورماتور پتانسیل (PT) هم گفته می‌شود)، CT[۳] (ترانسفورماتور جریان) و

[۱] Instrument Transformer
[۲] Voltage Transformer
[۳] Current Transformer

CVT[۱](ترانسفورماتورهای ولتاژ ظرفیتی) می‌شناسند. ترانسفورماتورهای ابزار اساساً شامل دو سیم‌پیچ هستند که حول یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند. تفاوت CT با VT در این است که CT در ترکیبی استفاده می‌شود که در آن یک مسیر اصلی برای عبور جریان وجود دارد و VT به عنوان یک ابزار شنت به زمین (اگر ولتاژهای فاز به زمین مشخص باشند) یا بین فازها (اگر ولتاژهای فاز به فاز مشخص باشند) مورد استفاده قرار می‌گیرد. CTها و VTها سال‌ها بصورت بخش‌های اجتناب‌ناپذیری از شبکه‌های برق تلقی شده‌اند؛ زیرا دقت بالایی در تکرار جریان یا ولتاژ لازم در ترمینال‌های کمکی دارند.

۲,۵. استفاده از زیرساخت مانیتورینگ و سنسورها

سنسورها باعث هوشمندتر شدن شبکه‌ها می‌شوند و نقشی اساسی در کنترل ثابت سیستم‌های توزیع و انتقال برق ایفا می‌نمایند. بعلاوه، سنسورها برای مراقبت از پایداری و قدرت شبکه، یک عنصر حیاتی هستند [۲۰]. کنترل شبکه به تخمین و کنترل محدودیت‌های الکتریکی شبکه‌های انتقال و توزیع بستگی دارد.

سنسورها چند مقدار آستانه واقعی را در چارچوب کاری مورد نظر اندازه‌گیری می‌کنند از جمله مقدار انرژی ذخیره شده، ظرفیت خط توزیع، مدت برق‌رسانی، ظرفیت ایستگاه‌ها، ظرفیت خطوط انتقال، شناسنامه مصرف برق مشتریان و میزان مصرف. در میان سنسورهای مذکور، ترانسفورماتورهای ولتاژ و ترانسفورماتورهای جریان، بخش بزرگی از سیستم‌های هوشمند برق را به خود اختصاص داده‌اند. تعداد سنسورها و ابزارهای تخمین زننده در این‌گونه شبکه‌های برق و کنتورهای هوشمند (SM)[۲] و PMUها در حال افزایش است.

سنسورهای هوشمند[۳](SS) سنسورهایی هستند که قابلیت درک نحوه کارکرد اجزای شبکه را دارند. از جمله این سنسورها، می‌توان به سنسورهای فشار، جریان، حرارت، آب و هوا، ولتاژ و رطوبت اشاره نمود [۲۱].

۳. چارچوب‌های یادگیری ماشین برای پیشگویی خرابی تجهیزات

استفاده از تکنییک های مبتنی بر تکنولوژی یادگیری ماشین برای نگهداری پیشگویانه بویژه در ریز شبکه ها[۴] چندین مزیت دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش دقت پیش گویی بروز خطا در شبکه، آشکار سازی خطاها بصورت بلادرنگ، نظارت بر پایداری و سلامت شبکه در جهت افزایش عمر مفید شبکه و اجزای آن، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش عدم بهره‌وری احتمالی هر یک از دستگاه ها، افزایش تولید برق در شبکه، کنترل تعمیرات و غیره اشاره نمود [۶۲]. «شکل ۳» چارچوب کاری تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر یادگیری ماشین در یک ریزشبکه را نشان می دهد.

۳,۱. متد SVM

در[۲۲]، یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین پیشنهاد شده است که برای پاسخگویی به حوادث، بصورت تقریبی وضعیت‌های مختلف سیستم را پیش‌بینی می‌کند. این مدل پیشنهادی، مبتنی بر یک ماشین بردار پشتیبان[۵](SVM) چند بعدی است. ماشین‌های بردار پشتیبان به طور کلی در خوشه‌بندی[۶]داده‌های ورودی،طبقه‌بندی وهمچنین تحلیل رگرسیون نقش دارند [۶۲]. الگوریتم SVM معمولاً به دنبال نزدیک‌ترین میانگین‌ها (که به آن‌ها بردارهای پشتیبان گفته می‌شود) می‌گردد. سپس زمانی که نزدیک‌ترین میانگین‌ها شناسایی شدند، الگوریتم SVM، خطی را برای اتصال آن‌ها ترسیم می‌نماید. به دلیل دقت بالای این روش، SVM یکی از روش‌های محبوب یادگیری ماشین است که هم در تحلیل رگرسیونی و هم در مسائل طبقه‌بندی به کار گرفته می‌شود. SVM چند بعدی بکار گرفته شده در تحقیق مذکور، شاخص مربوط به مقاومت سیستم را در نظر می گیرد.

---

[۱] Capacitive Voltage Transformer
[۲] Smart Meters
[۳] Smart Sensor
[۴] Microgrids
[۵] Support Vector Machine
[۶] clustering

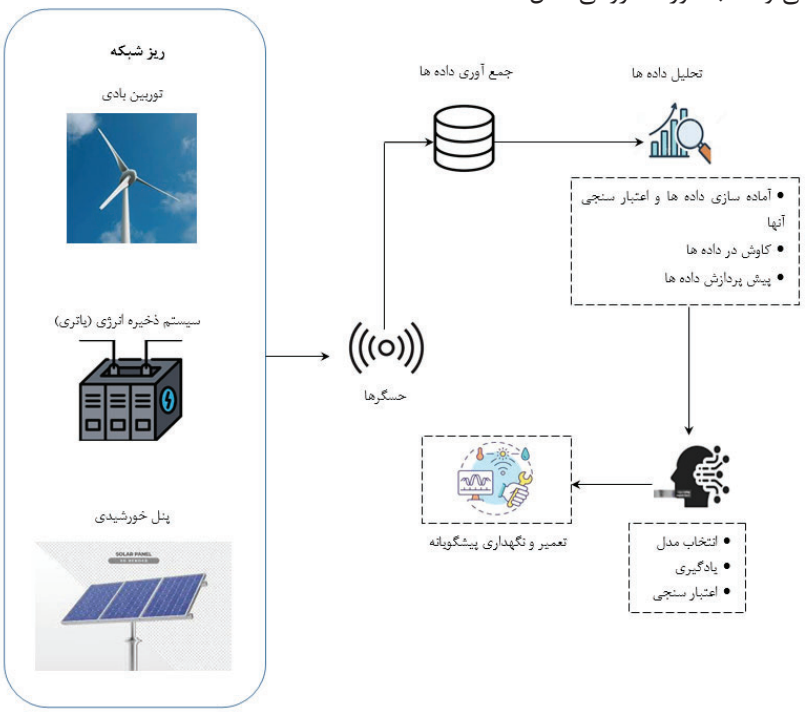
از جمله این شاخص‌ها، می‌توان به سطح کیفیت زیرساخت شبکه، مدت زمانی که هر کدام از اجزای شبکه می‌توانند در برابر حادثه مقاومت کنند، مسیر پیش‌بینی شده برای حادثه و شدت حوادثی که در آینده اتفاق می‌افتند، اشاره نمود. نتیجه عملکرد این مدل پیشنهادی، یکسری از داده‌های طبقه‌بندی شده از وضعیت‌های مختلف سیستم است که به دو دسته «قطع شده» و «عملیاتی» تقسیم می‌شوند و می‌توانند برای برنامه‌ریزی منابع سیستم مورد استفاده قرار گیرند. عملکرد این مدل، از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و معیارهایی برای عملکرد خوب، آزمایش شده است.

الگوریتم SVM در پیش‌بینی عمر باقی‌مانده مفید سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری در ریزشبکه‌ها[۱] و نگهداری پیش‌بینانه (PdM) پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی در یک سیستم ریزشبکه نیز مؤثر است[۶۲].

از دیگر مزایای استفاده از SVM، توانایی آن در مدیریت سیستم‌های غیرخطی و پیچیده است. با توجه به اینکه سیستم‌های ریزشبکه دارای روابط پیچیده و غیرخطی بین داده‌های ورودی و متغیر هدف هستند، استفاده از SVM در نگهداری پیش‌بینانه ریزشبکه‌ها بسیار مناسب می باشد .

۳،۲. الگوریتم Random Forest

برای مدل‌سازی اطلاعات با بُعد بالا، تکنیک جنگل تصادفی[۲](یا به اختصار RF) می‌تواند گزینه مناسبی باشد، چرا که توانایی مدیریت داده‌های طبقه بندی شده[۳] پیوسته، دودویی[۴] و همچنین داده‌های ناقص را دارد. تکنیک RF شامل تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری مستقل است که می‌توانند به‌صورت گروهی عمل کنند.



شکل ۳- چارچوب کاری تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر یادگیری ماشین در یک ریزشبکه [۶۲]

[۱] microgrids
[۲] Random Forest
[۳] categorical
[۴] binary

به همین دلیل به آن جنگل تصادفی گفته می‌شود. این تکنیک می‌تواند برای انجام وظایف مرتبط با رگرسیون و طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. تکنیک‌های RF حتی زمانی که تعداد نمونه‌ها کمتر از تعداد متغیرها باشد، عملکرد خوبی دارند. در فرآیند RF، هر درخت یک پیش‌بینی برای کلاس انجام می‌دهد. در نهایت، خروجی الگوریتم، کلاسی است که بیشترین رأی را از درخت‌ها دریافت کرده باشد. یک پژوهش مبتنی بر مدل RF برای تولید تکنیک پیش‌بینی پویا پیاده‌سازی شده است [۶۲]. نسخه بهبودیافته‌ای از این پژوهش در تحقیق دیگری برای پایش توربین‌های بادی طراحی شده است [۶۲]. در این راستا، از داده‌های عملیاتی و داده‌های وضعیت برای طراحی روش RF استفاده شده است؛ داده‌های عملیاتی به عملکرد توربین‌های بادی مربوط می‌شوند و داده‌های وضعیت با هشدارهای فعال و غیرفعال مرتبط هستند.

۳,۳. استفاده از روش های شبکه عصبی مصنوعی[۱](ANN)

روش‌های شبکه عصبی مصنوعی به‌دلیل توانایی پردازش انواع وسیعی از اطلاعات غیرفازی، غیرخطی و تصادفی، نسبت به روش‌های سنتی یادگیری ماشین، بیشتر پیاده‌سازی شده اند. معماری‌های ANN از تکنیک‌های پرکاربرد محسوب می‌شوند به‌ویژه برای سیستم‌هایی که با داده‌های مبهم، ساختارهای پیچیده و در مقیاس بزرگ سر و کار دارند [۶۲].

شبکه عصبی برای انجام یادگیری، به یک داده آموزشی شامل نمونه‌های واقعی از مسائل نیاز دارد. اندازه این داده آموزشی باید متناسب با پیچیدگی و ساختار مسئله باشد. با این حال، داده آموزشی نباید بیش از حد بزرگ باشد زیرا در این صورت ممکن است قابلیت تعمیم‌دهی مدل کاهش یافته و عملکرد کلی الگوریتم افت کند. بنابراین، برقرار کردن تعادل مناسب بین یادگیری بیش‌ازحد و تعمیم‌دهی مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. تعدادی از محققان از معماری‌های ANN در حوزه نگهداری پیش‌بینانه سیستم‌های قدرت استفاده کرده‌اند. برای نمونه، جهت شناسایی و طبقه‌بندی اختلالات کیفیت توان (PQ)، در شرایط محیطی نویزدار و دینامیک، این روش کاربرد گسترده‌ای داشته است. مدل‌هایی با قابلیت شناسایی آنی اختلالات، بر پایه معماری ANN نیز ارائه شده‌اند[۶۲]. این تکنیک می‌تواند اختلالات PQ تکی و ترکیبی را به‌صورت بلادرنگ طبقه‌بندی کند.

ANN در تشخیص ناهنجاری پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در یک تحقیق، سیستم PdM مبتنی بر ANN برای سیستم‌های PV پیاده‌سازی شده است. با مقایسه تولید توان AC پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده، الگوریتم تشخیص ناهنجاری وارد عمل شده است بطوریکه نرخ تشخیص آن بیش از ۹۰٪ گزارش شده است[۶۲].

در زمینه تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه توربین‌های بادی نیز از ANN استفاده شده است. در [۶۲] که برای مقابله با مدل غیرخطی مبدل‌ها در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه[۲](DFIG) انجام شده، از معماری ANN جهت شناسایی اتصال کوتاه بین دورهای سیم‌پیچ استفاده شده است.

ANN می‌تواند احتمال خرابی تجهیزات، سلامت سیستم و طول عمر باقیمانده اجزای ریزشبکه را پیش‌بینی کند. با این حال، در پیاده‌سازی آن باید هزینه محاسباتی بالا و حساسیت به داده‌های پرت[۳]نیز در نظر گرفته شود. در «شکل ۴» مراحل اصلی تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر مدل ANN نشان داده شده است.

---

[۱] Artificial Neural Network

[۲] Doubly Fed Induction Generator

[۳] outliers

۳،۴. استفاده از سیستم‌های خبره فازی[۱](FES)

منطق فازی[۲]که توانایی شبیه‌سازی تصمیم‌گیری و هوش انسانی را دارد، نوعی منطق احتمالاتی است که با منطق دودویی متفاوت است. در منطق دودویی، مقادیر تنها صفر یا یک هستند، اما در منطق فازی، مقدار متغیرها می‌تواند بین صفر تا یک تغییر کند. این ویژگی منطق فازی را به گزینه‌ای مناسب برای حل مسائل پیچیده در حوزه‌های جست‌وجو، کنترل و پاسخ‌گویی به سوالات تبدیل کرده است، زیرا دارای قابلیت تعمیم‌دهی بالایی می باشد.

منطق فازی در مطالعات مختلفی برای طبقه‌بندی و شناسایی خودکار خطاهای سیستم قدرت به‌کار رفته است [۶۲]. علاوه بر این، در معماری‌های منطق فازی تطبیقی[۳] قابلیت‌های یادگیری بر پایه الگوریتم ژنتیک یا شبکه عصبی مصنوعی به‌کار گرفته می‌شوند تا پارامترهای الگوریتم را تنظیم کرده و در نتیجه، عملکرد سیستم در نظارت بر پارامترهای اختلال کیفیت توان را بهبود دهند.

سیستم‌های خبره فازی می‌توانند ابزار مؤثری در مدیریت سیستم‌های ذخیره انرژی[۴](ESS) در ریزشبکه‌ها باشند. در [۶۲] ، یک معماری کنترلی مبتنی بر FES پیاده‌سازی شده که توانایی کاهش نوسانات شبکه و همچنین افزایش طول عمر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را در ریزشبکه دارد.

سیستم‌های خبره فازی با تکیه بر قابلیت شبیه‌سازی تصمیم‌گیری انسانی و سازگاری با محیط‌های نامعین، ابزار مناسبی برای پایش، کنترل و تشخیص خطا در سیستم‌های قدرت و ریزشبکه‌ها هستند. ترکیب آن‌ها با تکنیک‌های یادگیری مانند ANN یا GA نیز می‌تواند کارایی و دقت آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مفهوم یک سیستم خبره فازی در «شکل ۵» نمایش داده شده است.

۳،۵. استفاده از متدهای یادگیری عمیق[۵](DL)

یادگیری عمیق شامل ساختارهایی مانند شبکه‌های باور عمیق،[۶] شبکه‌های عصبی عمیق (DNNs)، شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است. یکی از ویژگی‌های مهم در معماری‌های یادگیری عمیق، توانایی ذاتی در یادگیری خودکار ویژگی‌های بهینه از سیگنال ورودی است.

این معماری به دلیل توانمندی بالا در شناسایی الگوها و استخراج ویژگی‌ها، پتانسیل بالایی در تخمین، تشخیص و پیش‌بینی مسائل مختلف سیستم های قدرت دارد. به همین دلیل، در بسیاری از مطالعات اخیر برای کاهش اختلالات کیفیت توان (PQ)، کنترل بار خانگی و نگهداری پنل‌های خورشیدی (PV) از DL استفاده شده است[۶۲]. همچنین یک معماری مبتنی بر CNN برای نگهداری پیش‌بینانه پنل‌های خورشیدی در ریزشبکه‌ها طراحی شده است. در این روش، منحنی توان روزانه پنل خورشیدی بر اساس عملکرد پنل‌های همسایه پیش‌بینی شده و با مقدار واقعی مقایسه می‌شود. انحراف بالا در منحنی پیش‌بینی‌شده و واقعی نشانه‌ای از احتمال وجود مشکل در پنل مورد نظر است.

تکنیک‌های DL در پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده (RUL) باتری‌ها در سیستم‌های ذخیره انرژی ریزشبکه‌ها نیز نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند [۶۲].

۴. ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورهای قدرت از اجزای حیاتی در سیستم‌های قدرت به شمار می‌روند و خرابی آن‌ها می‌تواند منجر به اختلالات عملیاتی گسترده، خطرات ایمنی جدی و خسارات مالی قابل توجه شود. این تجهیزات در معرض طیف گسترده‌ای از تنش‌های درونی و بیرونی از

---

[۱] Fuzzy Expert Systems
[۲] Fuzzy Logic
[۳] Adaptive Fuzzy Logic
[۴] Energy Storage Systems
[۵] Deep Learning
[۶] Deep Belief Networks

جمله تحمل بار حرارتی بیش از اندازه[۱]، شکست عایقی[۲] تنش‌های ناشی از اتصال کوتاه و خستگی مکانیکی[۳]قرار دارند. هر یک از این عوامل می‌توانند به تخریب سیستم عایقی منجر شوند و در نهایت باعث خرابی ترانسفورماتور گردند.

درک مکانیزم‌های خرابی و شناسایی پارامترهای مؤثر در پایش وضعیت ترانسفورماتورها برای جلوگیری از خرابی زودرس و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق ضروری است. رویکردهای پیشرفته پایش مانند آنالیز گازهای محلول، سنجش دما و اندازه‌گیری تخلیه جزئی نقش مهمی در پیش‌بینی و تشخیص زودهنگام مشکلات ایفا می‌کنند.

در کنار مکانیزم‌های اصلی خرابی، پارامترهای دیگر پایش وضعیت و تکنیک‌های تشخیصی متنوع نقش مهمی در ارزیابی جامع وضعیت سلامت ترانسفورماتورها ایفا می‌کنند. ذیلاً به برخی از روش ها و ابزارهای تشخیصی اشاره می شود:

۱. تشخیص تخلیه جزئی[۴](PD)

تخلیه جزئی یکی از ابزارهای کلیدی برای شناسایی زودهنگام تخریب عایقی به‌ویژه در تجهیزات ولتاژ بالا است. فعالیت‌های PD معمولاً با استفاده از تجهیزات زیر اندازه‌گیری می‌شوند:

- حسگرهای انتشار صوتی[۵]
- حسگرهای فرکانس فوق‌العاده بالا[۶](UHF)
- کوپلرهای خازنی[۷]

این ابزارها قادر به شناسایی پالس‌های الکترومغناطیسی ضعیفی هستند که از نقص‌های عایقی یا حباب‌های داخلی تولید می‌شوند [۸].

۲. پایش دمای روغن سطحی و نقطه داغ سیم‌پیچ

دمای بالای روغن و سیم‌پیچ نشانگر عملکرد حرارتی ترانسفورماتور و فرآیند پیری ناشی از تحمل بار هستند. دمای زیاد موجب اتفاقاتی نظیر تسریع در تخریب پلیمرها و کاهش استحکام مکانیکی و قابلیت عایقی می شود.

۳. تحلیل ارتعاشات

تحلیل ارتعاش برای شناسایی مشکلاتی مانند شل‌شدن هسته و جابجایی سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود.

۴. سیستم‌های[۸] SCADA

پارامترهای فوق از طریق کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده (SCADA) جمع‌آوری و مدیریت می‌شوند. این سیستم‌ها به مواردی از قبیل تشخیص از راه دور، تولید هشدارها و یکپارچگی با رله‌های دیجیتال برای مکان‌یابی خطا کمک می کنند. همچنین این سیستم‌ها بستر مناسبی برای مدل‌های نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی فراهم می‌کنند که در آن‌ها داده‌های گذشته و زمان واقعی تجزیه و تحلیل می‌شوند تا الگوهای قبل از وقوع خرابی شناسایی شوند.

۴،۱. الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تشخیص و پیش‌بینی خطا در ترانسفورماتورها

هوش مصنوعی نقش کلیدی در تحول مدل‌های نگهداری پیشگویانه ایفا کرده و روش‌های قدیمی مبتنی بر قوانین ثابت را به مدل‌های تطبیقی و داده محور با توانایی پردازش داده‌های غیرخطی و پیچیده تبدیل کرده است. پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص خرابی ترانسفورماتورها به شرح زیر می باشد:

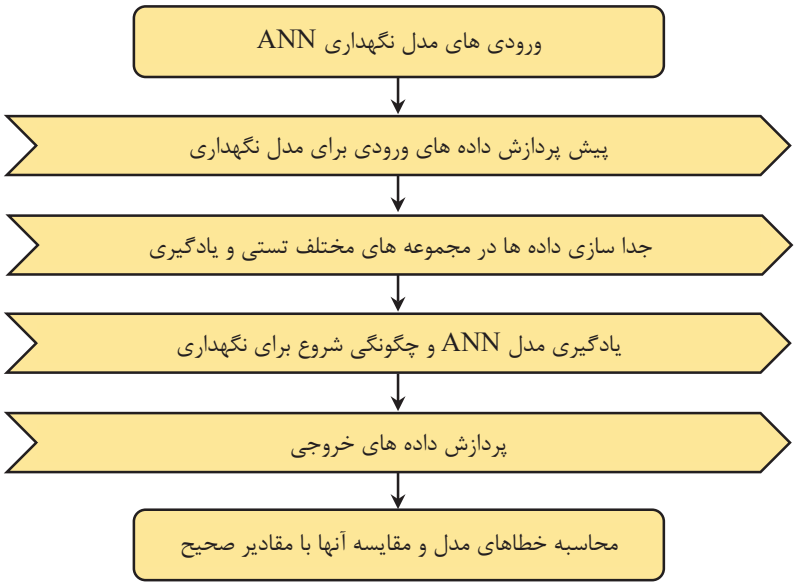
۱. SVM : بسیار مؤثر در مجموعه داده‌های کوچک تا متوسط، مناسب برای طبقه‌بندی چندکلاسه، دقت بیش از ۹۰٪ در تشخیص انواع گازهای مربوط به خطاهای قوسی، حرارتی و تخلیه جزئی.

---

[۱] Thermal Overloading
[۲] Dielectric Breakdown
[۳] Mechanical Fatigue
[۴] Partial Discharge
[۵] Acoustic Emission
[۶] Ultra High Frequency
[۷] Capacitive Couplers
[۸] Supervisory Control And Data Acquisition

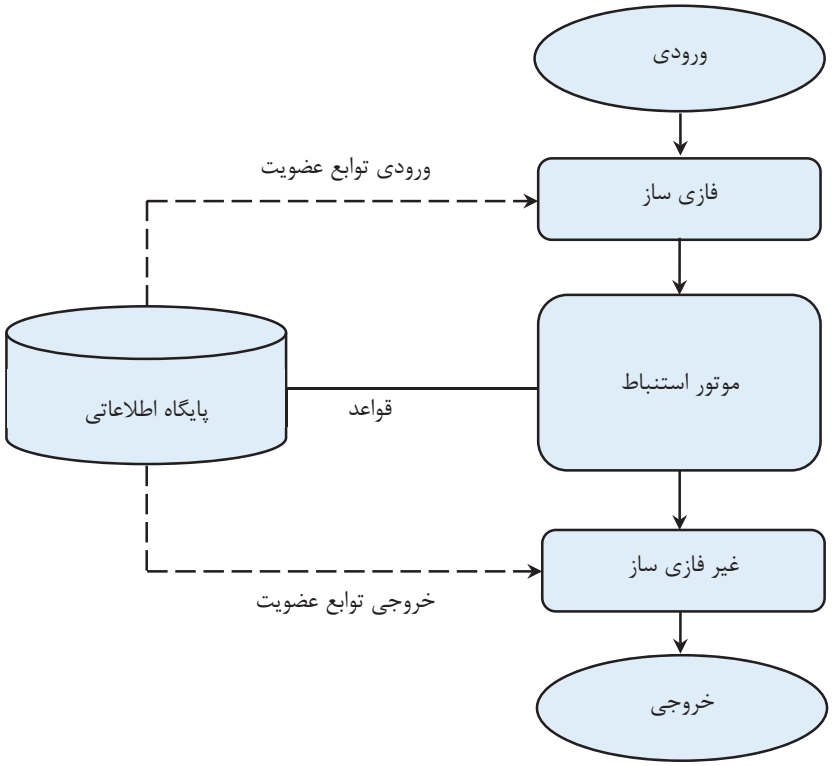
۲. درخت تصمیم و جنگل تصادفی: درخت تصمیم، ساده و قابل فهم است و جنگل تصادفی برای داده‌های با ابعاد بالا و عملکرد بهینه در طبقه‌بندی‌های پیچیده مناسب می باشد.

۳. ANN : این الگوریتم، توانایی نگاشت غیرخطی و مقاومت در برابر نویز را دارد و از عملکرد بسیار بالایی در پیش‌بینی خطاهای پیچیده برخوردار است.



شکل ۴- مراحل اصلی تعمیر و نگهداری پیشگویانه مبتنی بر مدل ANN [۶۲]

بنابراین، ترکیب تکنیک‌های پیشرفته پایش وضعیت و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر خرابی‌ها، افزایش طول عمر ترانسفورماتورها و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در تعمیر و تعویض تجهیزات را فراهم می‌سازد. مدل‌های آینده باید از ترکیب داده‌های چندمنبعی، مدل‌های یادگیری عمیق، و چارچوب‌های مقیاس‌پذیر بهره‌مند شوند تا پاسخگوی نیازهای شبکه‌های مدرن قدرت باشند.



شکل ۵- مفهوم یک سیستم خبره فازی [۶۲]

۴،۲. معماری‌های اینترنت اشیاء (IoT[1]) و سیستم‌های پایش مبتنی بر حسگر در ترانسفورماتورها

[1] Internet of Things

ادغام معماری‌های اینترنت اشیاء در اکوسیستم نگهداری ترانسفورماتورها، باعث تحول قابل توجهی در روش‌های سنتی پایش شده و پیشرفت‌های قابل توجهی را در زمینه‌های دقت داده، پاسخ‌گویی سیستم، و مقیاس‌پذیری عملیاتی به همراه داشته است.
حسگرهای IoT که به‌صورت دائم در واحدهای ترانسفورماتور نصب می‌شوند، قادر به جمع‌آوری بلادرنگ پارامترهای کلیدی از جمله جریان ،دمای سیم‌پیچ و روغن سطحی، رطوبت محیطی، غلظت گازهای محلول، سطوح ارتعاش و میزان رطوبت در عایق هستند.
این حسگرها داده‌ها را با وضوح بالا منتقل می‌کنند و امکان ادغام بدون وقفه با شبکه و پلتفرم‌های ابری برای ذخیره‌سازی و تحلیل داده ها را فراهم می‌سازند. در «شکل ۶» چارچوب تشخیص خرابی مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های آنالیز گازهای محلول نمایش داده شده است.

۴،۳. مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ترکیبی و یکپارچه‌سازی دوقلوی دیجیتال

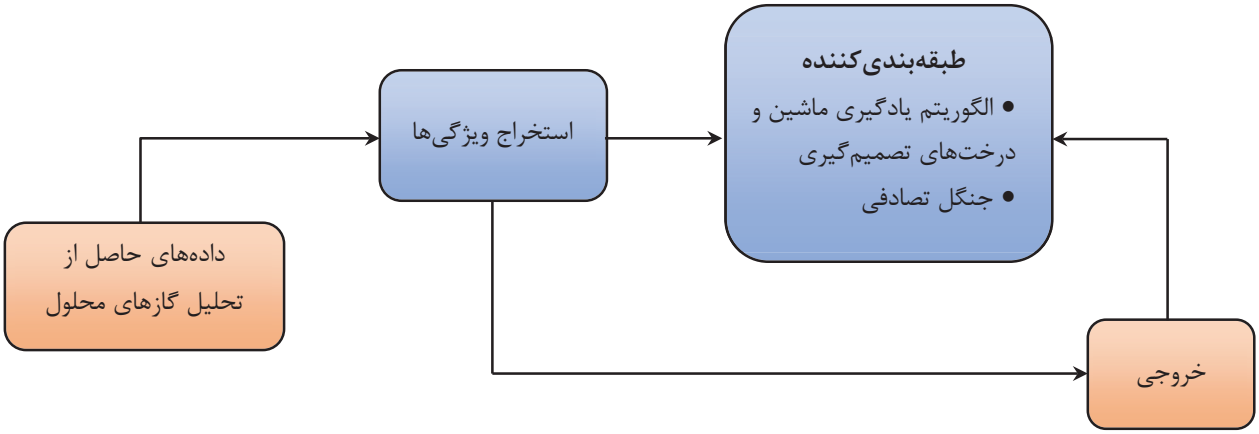
مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ترکیبی، هوش مصنوعی و فناوری اینترنت اشیا را با هم ادغام می‌کند. این مدل تحول چشمگیری در مدیریت ترانسفورماتورها ایجاد نموده است [۶۳] و با فراهم نمودن امکان بینش عمیق‌تر، یادگیری تطبیقی و تصمیم‌گیری پویا را امکانپذیر می سازد. مدل مذکور با جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ از طریق اینترنت اشیا و قدرت تحلیلی و پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی، یک معماری ویژه برای نگهداری پیشگویانه ایجاد می‌کند و به‌صورت مداوم عملیات پایش، ارزیابی و تصمیم‌گیری هوشمندانه را برای حفظ شرایط و عملکرد ترانسفورماتور انجام می‌دهد.
فناوری دوقلوی دیجیتال در خط مقدم این موضوع قرار دارد و شامل ایجاد نسخه‌های مجازی از ترانسفورماتورهای فیزیکی است که به صورت بلادرنگ با جریان‌های داده عملیاتی دریافت‌شده از حسگرهای تعبیه‌شده اینترنت اشیا همگام‌سازی می‌شوند. این نسخه‌های دیجیتال به‌صورت پویا رفتار عملیاتی ترانسفورماتورها را در شرایط مختلف تنش، عوامل محیطی، و سوابق بهره‌برداری شبیه‌سازی می کنند و بدین ترتیب امکان تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها و پیش‌بینی بلندمدت عملکرد را فراهم می‌سازند.
مدل‌های پیشرفته مبتنی بر وضعیت تجهیزات، در کنار تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده برای تحلیل هزینه تعمیر و نگهداری در چرخه عمر تجهیزات، زمان‌بندی بهینه ای برای نگهداری و مدیریت موجودی قطعات یدکی ارائه می نمایند. معماری‌های ترکیبی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که با سامانه‌های مدیریت دارایی سازمانی(EAMS)[1]، SCADA و ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری به‌صورت بی‌نقص تعامل داشته باشند.
در نتیجه، سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال، با دقت بالای تشخیص، چابکی عملیاتی، و هماهنگی کامل، به شرکت‌های برق این امکان را می‌دهند تا از نگهداری واکنشی یا زمان‌بندی‌شده به سمت مدیریت با زیرساخت هوشمند و بهینه‌شده از نظر عملکرد حرکت کنند. طبقه بندی فرایندهای نگهداری پیش‌گویانه شبکه‌های هوشمند در «شکل ۷» نشان داده شده است.

۵. نگهداری پیش‌گویانه سیستم توزیع برق بر اساس شناسایی موجودیت‌های شبکه

اندازه‌گیری میزان بهره‌وری شبکه‌های قدرتی که هر یک از آن‌ها پیکربندی‌های مختلفی دارند، یکی از مشکلاتی است که تکنولوژی شبکه‌های قدرت امروزی با آن مواجه می‌باشد. مدل‌های فعلی ارزیابی میزان بهره‌وری شبکه به قدرکافی پاسخگوی چالش‌هایی که با برپاسازی شبکه‌ها بوجود می‌آیند، نیستند؛ زیرا فاقد یک چارچوب کاری مناسب برای انجام ارزیابی مناسبی هستند که بتواند شرایط کاری یک شبکه واقعی را با حداکثر میزان شباهت، شبیه‌سازی نماید و سناریوهای مختلف موجود در شبکه را مورد توجه و ارزیابی قرار دهد. Moamin A Mahmoud و همکارانش سیستمی برای ارزیابی شبکه‌های قدرت معرفی نمودند که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و مبتنی بر شناسایی موجودیت اجزای شبکه می‌باشد و می‌تواند با انواع مختلف کارکرد شبکه‌ای جفت و جور شده و شبکه را ارزیابی نماید [۶۰].

تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده و کاربردهای جدید ابزارهای هوشمند ماشینی در تمام جنبه‌های زندگی روزانه ما نقش دارند.

[1] Enterprise Asset Management System



شکل ۶- چارچوب تشخیص خرابی مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز گازهای محلول **[۶۳]**

استفاده از مدل موجودیت‌ها، یک میان‌افزار برای ارزیابی عملکرد شبکه ایجاد می‌کند و بهترین راهکار برای ایجاد سیستمی است که با مفاهیم و معانی شبکه‌های قدرت آشنا بوده و در ارزیابی‌های خود دقت بالایی دارد و انعطاف‌پذیری لازم برای ارزیابی شبکه در سطوح متنوع را دارا می‌باشد. نحوه ارزیابی عملکرد شبکه در این سیستم، پیش‌گویی نمودن شدت خرابی و سپس تولید یک گزارش مناسب برای نگهداری شبکه‌ای با پیکربندی‌های مختلف است. این سیستم از سه مولفه اصلی تشکیل شده است که عبارتند از:

- ✓ GCT[۱] به معنی ابزار تولیدکننده پیکربندی
- ✓ FDM[۲] به معنی مدل پیشگویی خرابی
- ✓ HSP[۳] به معنی زیرساخت شبیه سازی هیبریدی.

[۱] Configuration Generator Tool
[۲] Failure Prediction Model
[۳] Hybrid Simulation Platform

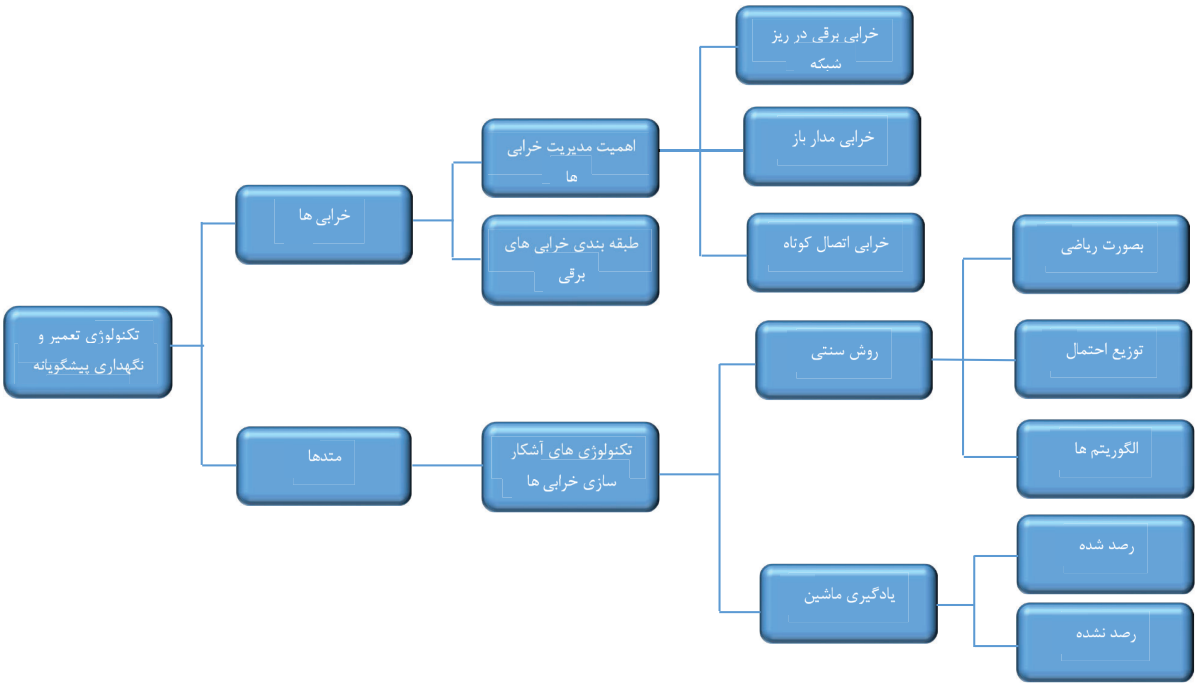
GCT یک سیستم مبتنی بر دانش است که ابزار قدرتمندی را در اختیار مهندسین برق قرار می‌دهد تا بتوانند پیکربندی‌های جایگزین را برای شبکه تولید نمایند. داده‌های مورد نیاز GCT را اظهاراتی تشکیل می‌دهند که توسط متخصصین امر، مورد تایید قرار گرفته‌اند . این داده‌ها با استفاده از زبان هستی شناسی OWL[1] که یک زبان هستی شناسی در وب است، مدل‌بندی می‌شوند.

HSP با استفاده از ۷ ابزار مدل‌گذاری و هستی شناسی نظیر Blender 3D Modeling، unity 3d، asp.net، my sql و apache Jena fuseki تولید شده است.

FDM نیز بر اساس تأثیری که وقایع منحصر بفرد بر عناصر شبکه قدرت می‌گذارند و ارتباط این وقایع یا عناصر شبکه و تأثیری که یک مولفه خراب بر سایر مولفه‌های شبکه می‌گذارد تولید شده است.

نهایتاً پیشگویی بر اساس دو متد مدل‌گذاری می‌گردد: متد پواسون و مدل تخمینی Likelyhood.

در سیستم پیشنهادی Moamin A Mahmoud و همکارانش، معانی و مفاهیم موجودیت‌های شبکه بین نرم‌افزارهای کاربردی مورد استفاده در سیستم و اجزای شبکه به اشتراک گذاشته می‌شوند. وقتی که تمامی اجزا از واژگان یکسان و مشابه استفاده کنند، مشکلات عادی که در خلال عملکرد متقابل نرم‌افزار کاربردی سیستم با شبکه بروز می‌نمایند به آسانی درک و حتی پیش‌بینی می‌شوند. موجودیت شناسی، حوزه کاربرد و خصوصیات نرم‌افزار کاربردی سیستم را پوشش می‌دهد و نه تنها می‌تواند با استفاده از واژگان استاندارد، یکپارچه‌سازی سیستم‌های درون شبکه را تقویت کند بلکه می‌تواند با استفاده مجدد از این تکنیک‌های هوشمند، عملکرد سیستم را نیز بهبود ببخشد.



شکل ۷- طبقه بندی نگهداری پیشگویانه ریز شبکه های هوشمند [۱]

[1] Web Ontology Language

۶. مقاوم‌سازی شبکه توزیع برق در مقابل حوادث طبیعی

در حال حاضر، شرکت‌های توزیع برق با انتظارات و تقاضای زیاد مشتریان خود مواجه هستند تا بتوانند بطور موثر نسبت به عواقب ناشی از حوادث فاجعه‌بار مثل طوفان که می‌تواند در کیفیت برق‌رسانی تأثیر گذاشته و در فعالیت آن وقفه ایجاد کند، پاسخ مناسب ارائه نمایند. در چنین شرایطی، مفهوم بهبود و افزایش مقاومت سیستم توزیع برق، یک معیار مهم در مدیریت ریسک جهت پاسخگویی به این چالش می‌باشد.

منظور از مقاومت سیستم، قابلیت سیستم در سازگار شدن با شوک‌های خارجی است. انواع مختلفی از شوک‌های خارجی وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به حوادث ناشی از آب و هوای نامطلوب و بلایای طبیعی اشاره نمود. عواقب مخرب این حوادث، باعث می‌شود تا استراتژی‌هایی را جهت مقابله با آن‌ها انتخاب کنیم تا این اطمینان حاصل شود که شبکه توزیع برق، حتی با وجود چنین حوادثی می‌تواند برق را به مشتریان خود عرضه کند بطوری‌که حتی اگر شبکه برق بطور قابل توجهی تحت تأثیر چنین حوادثی قرار گرفت، بتواند از وضعیت نیاز به کنترل، به شرایط عملکرد نرمال خودش بازگردد. در این زمینه، پیش‌بینی دقیق تأثیرات چنین طوفان‌هایی در شبکه برق، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا می‌توان از این پیش‌بینی برای دستیابی به چگونگی ایجاد مقاومت بیشتر در شبکه برق استفاده کرد.

مفهوم مقاومت در برابر خرابی برای سیستم‌های پیچیده، اولین بار توسط Holling [۲۴] تعریف شد. از نظر Holling، مقاومت یک سیستم یعنی نرخ و سرعت برگشتن سیستم از شرایط غیرنرمال به شرایط نرمال، بعد از بروز یک حادثه. هدف از مطالعه مقاومت، این است که با توجه به محدودیت‌های سیستم‌های توزیع برق و تأثیر مداوم این محدودیت‌ها در طراحی سیستم‌های مذکور و نیز تأثیر شدت شوک‌های خارجی وارد شونده به آن‌ها بتوانیم تغییرات ناشی از وقوع خرابی در سیستم را پیش‌بینی کنیم. در[۲۵]، تأثیر مقاومت سیستم در کاهش احتمال بروز خرابی بررسی شده است. همچنین در[۲۶]، روشی برای محاسبه مقاومت زیرساخت یک شبکه توزیع برق و اجزای آن ارائه شده است. در[۲۷]، روش تخصیص منابع Proactive با هدف بازیابی شبکه توزیع برق بعد از یک حادثه مخرب، پیشنهاد شده است. در [۲۸] و [۲۹]، یک چارچوب کاری برای بازیابی عملکرد اجزای مختلف سیستم قبل از بروز خرابی ناشی از حادثه، معرفی شده و به دنبال آن، یک مدل برای بازیابی قطعی و مدیریت منابع حادثه بعد از بروز حادثه معرفی شده است.

در[۳۰]، یک مدل بازسازی پیشنهاد شده است که با استفاده از مفهوم macroeconomic ارزش بار از دست رفته را تعیین می‌کند تا ضررهای اقتصادی ناشی از وقفه‌های ایجاد شده در مرحله پس از خرابی، به حداقل میزان ممکنه برسد. در[۳۱]، یک مدل تصمیم‌گیری برای پیکربندی سیستم پیشنهاد شده تا بعد از طوفان و در مرحله بازسازی شبکه برق آسیب دیده، بهترین فهرست فعالیت‌های بازیابی را تعیین نماید.

در [۳۲]، پیشنهاد شده که شاخص مقاومت یک شبکه برق، به کمک تجزیه و تحلیل فرآیند تولید، ارسال و مصرف برق در کشورهای مختلف مشخص شود. در [۳۲]، میانگین هندسی چند عامل مختلف مانند وابستگی بهره تولید سوخت‌های تجدیدناپذیر، بهره توزیع، و تنوع منابع سوختی مذکور مورد بررسی قرار گرفتند تا شاخص مقاومت ایجاد شود. در[۳۳]، روشی برای محاسبه شاخص مقاومت سیستم انتقال برق جهت بازیابی زیرساخت‌ها بعد از رخ دادن حادثه، پیشنهاد شده است. یک سیستم با چندین زیرساخت، شامل زیرساخت‌های انتقال برق و ارتباطات از راه دور، مورد بررسی قرار گرفته و معیارهای کیفیت و مقاومت در برابر شکنندگی شبکه، با مدل ورودی-خروجی این زیرساخت‌ها ترکیب شده‌اند. شاخص پیشنهادی، توسط داده‌های حاصل از طوفان کاترینا مورد ارزیابی قرار گرفته است تا مقاومت شبکه حین حوادث طبیعی ارزیابی شود. در[۳۴]، یک چارچوب کاری برای تقویت مقاومت سیستم‌های زیرساختی شهری، پیشنهاد شده است. معیار مقاومت مورد انتظار وابسته به زمان، بر اساس عملکرد و پاسخگویی شبکه توزیع برقی که دچار یک حادثه مهیب شده، بنا شده است. این فرآیند، در چند مرحله از جمله پیش‌گیری از بروز فاجعه، جلوگیری از گسترش آسیب و صدمه، ارزیابی و بازیابی اجرا شده است. مقاومت در برابر طوفان در شبکه‌های برق، با استفاده از یک مدل احتمالی، مدل پواسون برای وقوع طوفان‌ها، مدل شکنندگی اجزای شبکه و مدل بازسازی شبکه با اولویت بازسازی اجزای آن، تعیین شده است [۳۵].

در بسیاری از مسائل، یافتن راه حل با یک فرمول‌بندی مشخص به راحتی قابل دسترسی نیست. اما به کمک تکنولوژی یادگیری ماشین، برای یافتن راه حل، الگوریتم‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرد که قابلیت یادگیری با استفاده از داده‌های قبلی را دارند. این الگوریتم‌ها، می‌توانند داده‌های مشاهده شده را دسته‌بندی کنند (یادگیری قابل نظارت)، الگوهای شبیه به هم را برای خوشه‌بندی با هم ترکیب کنند (یادگیری بدون نظارت) و خروجی سیستم را با استفاده از رفتار و تاریخچه داده‌ها، پیش‌بینی نمایند (مدل‌سازی رگرسیون) [۳۷]. رویکردهای یادگیری ماشین، در تعداد قابل توجهی از تحقیقات حوزه برق و قدرت به کار گرفته شده‌اند [۳۹]. ارزیابی امنیتی شبکه برق، یکی از کاربردهای متنوع یادگیری ماشین در شبکه برق می‌باشد که اگر بخواهیم تعدادی از این کاربردها را نام ببریم، می‌توانیم به کاربردهای تشخیص الگو [۳۹]، ایجاد درخت تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه [۴۰] اشاره کنیم. پیش‌بینی کردن، یکی دیگر از کاربردهای متداول یادگیری ماشین است. تعدادی از شبکه‌های عصبی هوشمند (ANNs) برای پیش‌بینی کوتاه مدت بار [۴۱] و پیش‌بینی قدرت باد [۴۲]، پیشنهاد داده شده‌اند. از مثال‌های دیگر کاربردهای یادگیری ماشین در شبکه برق، می‌توان به تجزیه و تحلیل ریسک با استفاده از مدل رگرسیون، ANNs و ماشین برداری پشتیبانی (SVM) [۴۳]، گسترش تشخیص خطا با بکار بردن ANNs و SVM [۴۴] و پیش‌بینی مدت زمان قطعی برق با استفاده از مدل‌های رگرسیون اشاره نمود [۴۵]. در[۶۱] ارزیابی جامعی از الگوریتم‌های دسته‌بندی و رگرسیون برای پیش‌بینی خطا در سامانه‌های شبکه هوشمند ارائه شده است. این الگوریتم ها از داده‌هایی استفاده می کنند که از قبل‌نمونه برداری‌شده اند.

در[۴۶]، یک مدل SVM سه بعدی پیشنهاد شده است که احتمال قطع شدن اجزای مختلف شبکه برق توسط طوفان‌ها را پیش‌بینی می‌کند. مدل پیشنهادی SVM، با استفاده از تاریخچه داده‌ها با سه ویژگی تحت یادگیری قرار می‌گیرد. این ویژگی‌ها، عبارتند از اندیس مقاومتی اجزای مختلف سیستم، فاصله اجزای سیستم تا مرکز طوفان و نوع طوفان که به سرعت طوفان بستگی دارد.

در[۴۷]، یک روش SVM سه بعدی بکار گرفته شده تا وضعیت اجزای مختلف سیستم و مرز تصمیم‌گیری برای وضعیت‌های «صدمه دیده» یا «دایر» تعیین شود.

۷. متدهای قابل استفاده برای تحلیل خرابی های شبکه هوشمند

چک کردن مداوم سیگنال‌های جریان و ولتاژهای تولید شده توسط ادوات هوشمند یک شبکه هوشمند، تکنیک ویژه‌ای برای تحلیل خرابی‌ها در شبکه به شمار می‌رود [۴۸]. تحلیل نقاط ضعف شبکه با استفاده از جدیدترین اطلاعات دریافت شده از شبکه با تکیه بر بررسی‌های مبتنی بر مدل مارکوف یا آزمون موجک‌ها[۵]نیز روش مطلوبی می باشد [۴۹ و ۵۰ و ۵۱]. موجک، یک ابزار ریاضی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها به ویژه پردازش سیگنال در طول زمان می‌باشد.

۷,۱. چالش‌های پیش روی شبکه‌های هوشمند

«شکل ۹»، چالش‌های پیش روی شبکه‌های هوشمند را نشان می‌دهد. امنیت، مهم‌ترین چالشی است که باید مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا هر آنچه که هوشمند است، می‌تواند به این شبکه سایبری وصل شود. شبکه‌های هوشمند نقش مهمی در تغذیه برق دارند و متصل نمودن آن‌ها به شبکه برق، خطرات زیادی را بر شبکه تحمیل می‌کند. امنیت سایبری یکی از چالش‌های کلی برای عملکرد صحیح چنین شبکه‌ای است[۶۴] زیرا هر تهدیدی در این شبکه، این احتمال را دارد که خطر را به حادثه‌ای برای تجهیزات برقی منازل و مردم درون شبکه تبدیل کند.

چالش دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، بازسازی خطوط است؛ زیرا خطوطی که از قبل برای کنترل الکتریکی شبکه ساخته شده‌اند قادر نخواهند بود با شبکه هوشمند پیشرفته و منابع تجدیدپذیر مربوطه کار کنند.

[۵] wavelet

چالش‌های ارتباطی، رتبه سوم چالش‌ها هستند؛ زیرا پروتکل‌های ارتباطی هنوز به خوبی در سیستم شبکه‌های هوشمند تعریف نشده‌اند. لذا چالش مذکور نقصی برای انتقال داده‌های این شبکه محسوب می‌شود.
چهارمین چالش، هزینه‌های سنگین ایجاد آن است و آخرین چالش هم عمومیت یافتن در سطح بین‌المللی برای چارچوب کاری آن می‌باشد.

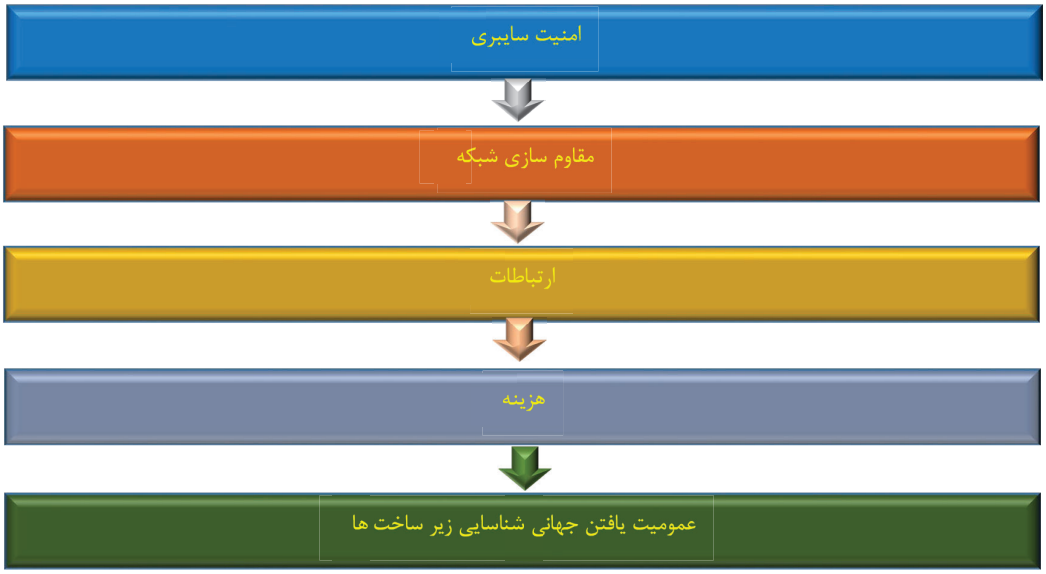
۷،۲. امنیت سایبری

در سیستم‌های تولید و توزیع برق، ایجاد کنترل‌های بلادرنگ، ارتباطات شبکه‌ای برای انجام تحلیل‌ها، شناسایی تهدیدات و استفاده از امکانات ارتباطی به منظور کنترل و تحلیل شبکه به طور وسیعی احتمال حملات سایبری در سیستم‌های کنترلی شبکه را افزایش می‌دهد. با افزایش شبکه‌های متکی بر زیرساخت سایبری، کامپیوتری‌سازی وکنترل‌های بیشتر وارد عرصه شبکه الکتریکی گردید [۵۲]. حملات سایبری با نمایش اطلاعات نادرست به راهبران شبکه، باعث ایجاد اختلال در شبکه و صدور هشدارها و پیغام‌های خطای نادرست می‌گردند. متدهای معمول برای حمله به یک سیستم شبکه هوشمند عبارتند از حمله از طریق: کامپیوتر، تجهیزات و کابل‌های شبکه، یک ترمینال در شبکه یا یک ترمینال دور دست. در صورت انجام چنین حملاتی، ضروری است که سیستم در اسرع وقت به وضعیت اولیه برگردد اما نه فقط با مدیریت حملات سایبری بلکه با رفع اختلالاتی که با وارد شدن صدمات فیزیکی به تجهیزات شبکه ایجاد شده‌اند.

۷،۳. برقراری امنیت سایبری و یکپارچگی داده‌ها هنگام نگهداری ترانسفورماتورها بر اساس AI-IoT

افزایش استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در سامانه‌های نگهداری پیشگویانه برای ترانسفورماتورهای قدرت، فضای جدیدی از پیچیدگی و ریسک را به‌ویژه از نظر امنیت سایبری و یکپارچگی داده‌ها ایجاد نموده است. این سیستم‌های هوشمند بر پایه شبکه‌های گسترده‌ای از دستگاه‌های متصلبه شبکه قدرت مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم[۵۲]گره‌های محاسباتی و بسترهای تجمیع داده‌های ابری طراحی شده‌اند که همگی ممکن است اهداف بالقوه‌ای برای حملات سایبری محسوب شوند.
شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل گره‌های حسگر با پراکندگی مکانی هستند که به‌صورت هم‌زمان امکان پایش چند نقطه‌ای در پست‌های برق یا مناطق توزیع‌شده شبکه را فراهم می‌کنند.

[۵] Wireless sensor networks



شکل ۹- چالش های پیش روی شبکه‌های هوشمند [۱]

ارسال بلادرنگ داده‌ها از طریق این گره‌ها در صورت عدم محافظت کافی ممکن است در معرض دسترسی غیرمجاز، جعل اطلاعات یا شنود داده‌ها قرار گیرد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که زیرساخت‌های PdM در برابر تهدیدات سایبری پیشرفته آسیب‌پذیر هستند [۶۵]. این حملات می‌توانند هم قابلیت اطمینان عملکردی و هم صحت خروجی‌های تشخیصی را به خطر بیندازند.

یکی از نگرانی‌های اصلی، خرابکاری یا دستکاری داده‌های پایش وضعیت مانند سطوح گاز، لرزش یا دمای حرارتی است که به عنوان ورودی الگوریتم‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حتی اختلالات جزئی یا مسموم‌سازی داده‌ها می‌تواند منجر به گمراهی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، تاخیر در شناسایی خطا یا اقدامات نگهداری غیرضروری شود .در ایستگاه‌های برق و محوطه‌های ترانسفورماتور، نبود رمزنگاری سرتاسری [۶۵] ، مکانیزم‌های احراز هویت قوی و سامانه‌های شناسایی نفوذ، آسیب‌پذیری سامانه را به میزان زیادی افزایش می‌دهد

۷,۴. بازسازی خطوط شبکه

خطوط کنترل الکتریکی که قبلا در یک شبکه توزیع برق ایجاد شده‌اند قادر به کار با شبکه‌های هوشمند پیشرفته و منابع انرژی تجدیدپذیر مربوطه نمی‌باشند. از این‌رو، شاید لازم باشد تا دستورالعمل مربوط به اتصالات داخلی شبکه توزیع به گونه‌ای توسعه یابد که سطوح بالاتری از کنترل‌ها نظیر کنترل ولتاژ پایین را پوشش دهند [۵۳]. همچنین به مرور زمان، پارامترهای الکتریکی و مکانیکی زیرساخت‌های شبکه و خطوط انتقال نیز تغییر می‌یابند. عملکرد اجزای شبکه نیز که در طی زمان فشارهای الکتریکی و مکانیکی و نیز فشارهای طبیعی مانند باد، برف، گرد و خاک و غیره را متحمل شده‌اند و دچار زنگ‌زدگی و فرسایش شده‌اند تحلیل می‌رود [۵۴]. بازسازی خطوط شبکه را می‌توان بخشی دائمی از اکوسیستم شبکه توزیع برق دانست. **۷,۵. ارتباطات**

شبکه هوشمند، تمامی اجزای یک سیستم توزیع برق را با یکدیگر هماهنگ می‌سازد تا عملکرد شبکه را ارتقا دهد. بخش اعظم هماهنگ‌سازی شبکه به سیستم‌های ارتباطی و چارچوب‌های کاری IT مربوط می‌شود. دسترس‌پذیری پایدار به ارتباطات دیجیتال پر سرعت دو طرفه برای سیستم‌های توزیع برق پیشرفته امروزی یک ضرورت محسوب می‌شود. اکنون دیگر معنی ندارد که شبکه‌ای فاقد تکنولوژی‌های ارتباطی برای خود متصور باشیم. امروز، عملکرد متقابل و هماهنگ‌سازی کلیه اجزای شبکه بدون استفاده از تکنولوژی ارتباطات امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، درخواست برای دسترسی به اینترنت پر سرعت و نامحدود، به یک نیاز اضطراری برای شبکه‌های

توزیع تبدیل شده است [۵۵]. امروزه لازم است تا ارتباطات شبکه‌ای نظیر ارتباط با یک مشتری در شبکه توزیع به سرعت با دسترسی به اینترنت صورت پذیرد. اگرچه اینترنت، بدون برق وجود نخواهد داشت اما امروزه بدون اینترنت، برق نیز پایدار نخواهد ماند.

۸. یک پروژه نمونه نگهداری شبکه‌های هوشمند توزیع برق در ایران

علیرضا فریدونیان، استاد دانشگاه خواجه نصیرطوسی و محقق شبکه‌های توزیع به همراه گروهی از دانشجویان رشته‌های مرتبط موفق به طراحی نرم‌افزاری برای پیش‌بینی شاخص پایداری شبکه برق با استفاده از روش داده‌کاوی و ابزار هوش مصنوعی شده و دستورالعمل داده‌کاوی در شرکت‌های توزیع را نیز تهیه و به این شرکت‌ها ارائه کرده است [۵۶] .

اولین پیش‌بینی‌هایی که در صنعت برق انجام شد، پیش‌بینی بار الکتریکی مصرف شده در شبکه بود. یکی از اهداف مهم شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای این است که بر مبنای اطلاعات آب‌وهوا، روزهای تعطیل و غیرتعطیل و سایر داده‌های محیطی، میزان تقاضای برق شهر یا کل کشور را پیش‌بینی کنند [۵۶].

با استفاده از داده‌های ثبت‌شده مربوط به حوادث و خرابی‌های شبکه برق، می‌توان الگوی آماری خرابی‌ها را پیش‌بینی نموده و از روی آن مقادیر دو شاخص اساسی فراوانی خرابی و تداوم خرابی را پیش‌بینی کرد. فراوانی خرابی یعنی سیستم برق یا دستگاه‌های شرکت تولید و توزیع برق، با چه فاصله زمانی خراب می‌شوند و تداوم خرابی (یا طول مدت خرابی) یعنی این‌که رفع خرابی و بازیابی خدمت برق‌رسانی چقدر طول می‌کشد.

البته داده‌های مذکور حتی با وجود ثبت خودکار در پایگاه داده‌ها، کم‌خطا نیستند! با این حال، الگوسازی و پیش‌بینی فراوانی خرابی و تداوم خرابی با تکیه به داده‌های فوق، با دقت و کیفیت خوبی حاصل می‌گردد.

یادگیری آماری و یادگیری ماشینی دو روش در داده‌کاوی هستند که با داده‌های دریافت شده از شبکه هوشمند برق می‌توانند الگویی برای توصیف رفتار شبکه ارائه دهند. بعد از این مرحله و رسیدن به الگویی برای پیش‌بینی رفتار شبکه، این سوال مطرح می‌شود که الگوسازی و پیش‌بینی شاخص‌های پایداری شبکه، فراوانی خرابی و تداوم خرابی در چه زمینه‌هایی می‌توانند به کار گرفته شوند.

مهم‌ترین فعالیت برای کاهش فراوانی قطع برق در شبکه‌های هوشمند توزیع برق، فعالیت نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه است. الگوی رفتاری شبکه هوشمند توزیع برق که با داده‌کاوی در پایگاه اطلاعاتی حوادث و خرابی‌های شبکه کشف شده، می‌تواند در برنامه‌ریزی موثرتر فعالیت‌های اصلاح و بهینه‌سازی شبکه و نیز در برنامه‌ریزی بازدیدها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه شبکه توزیع به کار گرفته شود. وقتی نگهداری تجهیزات به خوبی انجام می‌شود، انتظار داریم فراوانی قطع برق نیز کاهش یابد.

به منظور برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری، بررسی نقاط ضعف شبکه توزیع برق و کشف رخدادهای غیرعادی، باید خاموشی‌های رخ داده در شبکه را ردگیری کرد [۵۷]. مهم‌ترین وظیفه شرکت‌های توزیع برق، تأمین مطمئن و پایدار برق است که بایستی با حداقل خاموشی و ولتاژ استاندارد همراه باشد.

یکی از نرم‌افزارهای حوزه نگهداری شبکه‌های توزیع برق، نرم‌افزار ثبت حوادث ENOX است که می‌توان با کمک آن اطلاعات پایه شبکه، حوادثی که رخ می‌دهند و سایر مواردی از این قبیل را ثبت نمود و در نهایت، اطلاعات جامعی از خطاهای رخ داده (شامل زمان وقوع خطا، مدت زمان رفع خرابی، نوع خرابی و ...) که در پایگاه داده مربوط به ان سیستم ذخیره شده، استخراج نمود.

تکنیک تحلیل و آنالیز سری‌های زمانی و همچنین شبکه عصبی و درخت تصمیم از روش‌های پیش‌بینی خرابی تجهیزات شبکه برق هستند. مثلا در[۵۸]، یک تحلیل آماری پیشنهاد شده که به کمک آن، علل اصلی وقوع خرابی در شبکه توزیع برق مشخص می‌شوند. در[۵۹] نیز، یک مدل جامع برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق پیشنهاد شده است که از دو بخش مدل‌های خرابی شبکه توزیع برق و خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده تشکیل شده است. این مدل جامع، متشکل از شبکه عصبی سه لایه و تحلیل خاکستری می‌باشد.

۹. نتایج و جمع بندی

با توجه به پیچیده تر شدن شبکه های توزیع برق، افزایش تقاضای مصرف از سوی مشترکین و ریسک های امنیتی موجود در شبکه های مذکور، پایدارنگاه داشتن توزیع برق در شبکه، به امری حساس و درخور توجه ویژه تبدیل شده است. دستیابی به توزیع پایدار و بدون وقفه، نیازمند پیاده سازی یک طرح جامع برای تعمیر و نگهداری شبکه توزیع ازسوی شرکتهای توزیع برق می باشد. رویکرد بسیاری از این شرکت ها ، استفاده از متدهای جدید و موثر برای تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع است تا بتوانند چالش های پیش رو را پیش بینی نموده و برای مقابله با آنها برنامه ریزی و اقدام نمایند. در این مقاله، ضمن بررسی چالش های گفته شده، روش های مختلفی برای تعمیر ونگهداری پیشگویانه شبکه توزیع بیان و بر استفاده از روش های فناورانه برای پیش گویی خرابی ها یا حملات سایبری شبکه تاکید گردیده است. همچنین نشان داده شد که با استفاده از روش های بیان شده، ناترازی ها، از کار افتادگی های شبکه یا حملات سایبری به شبکه توزیع را می توان به حداقل میزان ممکنه رساند و حتی حذف نمود. با ارجاع به مقالات مختلف، مشخص گردید که گرایش عمده تحقیقات در زمینه توزیع انرژی، بر استفاده ازمتدهای مبتنی بر تکنولوژی فناوری اطلاعات و کاربردهای هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و منطق فازی متمرکز شده است. نتایج تحقیقات نشان داده است که هر یک از متدهای مذکور می تواند منجر به نتایج مطلوبی برای تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع شود. زیر ساختهای شبکه نیز نیازمند تقویت یا تجدید ساختارند بطوریکه شبکه هدف، پتانسیل پیاده سازی تعمیر و نگهداری پیش گویانه را داشته باشد. البته نباید فراموش کرد که فراهم نمودن امکانات لازم برای برپاسازی یک شبکه توزیع امن و پایدار نیازمند سرمایه گذاری و صرف هزینه در این راه می باشد. در واقع، بررسی نسبت فایده به هزینه از پارامترهای مهم برای گرایش به تعمیر و نگهداری پیش گویانه شبکه های توزیع محسوب می شود. اما این گرایش حتی اگر پر هزینه هم باشد، در طولانی مدت آثار خود را در جهت صرفه جویی در هزینه های تعمیر و نگهداری و افزایش رضایتمندی مشترکین شبکه به جای خواهد گذارد.

مراجع

[1] Mahmoud, M.A.; Md Nasir, N.R.; Gurunathan, M.; Raj, P.; Mostafa, S.A. The Current State of the Art in Research on Predictive Maintenance in Smart Grid Distribution Network: Fault's Types, Causes, and Prediction Methods, A Systematic Review. *Energies* 2021, *14*,5078. https://doi.org/10.3390/en14165078

[2] Thomas, P. et al, Stand Alone Distribution Feeder Inter Area Fault Location Identification System for Indian Utility. In Proceedings of the 2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, UP, India, 30-31 October 2020, pp. 258-262.

[3] Bhattacharya, B, Sinha, A., Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids. In Proceedings of the 2017 IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Boston, MA, USA, 6-8 November 2017, pp. 985-990.

[4] Korada, p., Devidas, A.R., Studying the impact of AC-microgrid on the main grid and its fault analysis, 2016-Bienn, In Proceedings of the 2016 Biennial International Conference on Power and Energy (PESTSE), Bengaluru, India, 21-23 January 2016.

[5] Skydt, M.R. et al, A probabilistic sequence classification approach for early fault prediction in distribution grids using long short-term memory neural networks, Meas. J. Int. Meas. Confed. 2020, 170, 108691.

[6] Sabir, R. et al, Open and Short Circuit Fault detection in Alternators using the rectified DC output voltage, In Proceedings of the 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), Singapore, 10-13 December 2018. pp. 1-7.

[7] Lau, S.K., Ho, S.K., Open-circuit fault detection in distribution overhead power supply network, J. Int. Counc. Electr. Eng. 2017, 7, 269-275.

[8] Wang, H. et al, Prediction of electrical equipment failure rate based on improved drosophila optimization algorithm, In Proceedings of the 2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Guilin, China, 29-31 July 2017, pp. 1915-1921.

[9] Chaitanya, B.K., Yadav, A., An intelligent fault detection and classification scheme for distribution lines integrate with distributed generators, Comput. Electr. Eng. 2018, 69, 28-40.

[10] Marquez, J.J. et al, Diagnosis and Fault Mitigation in a Microgrid Using Model Predictive Control, In Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Sevilla, Spain, 10-12 September 2018, pp. 1-6.

[11] Feng, D. et al, Optimization Method With Prediction-Based Maintenance Strategy for Traction Power Supply Equipment Based on Risk Quantification, IEEE Trans. Transp. Electrif. 2018, 4, 961-970.

[12] Wang, B. et al, High-Impedance Fault Detection ased on Nonlinear Voltage-Current Characteristic Profile Identification, IEEE Trans. Smart Grid 2016, 9, 3783-3791.

[13] Yu, J.J.Q. et al, Intelligent Fault Detection Scheme for Microgrids with Wavelet-Based Deep Neural Networks, IEEE Trans. Smart Grid 2017, 10, 1694-1703.

[14] Robson, S. et al, Fault Location on Branched Networks Using a Multiended Approach, IEEE Trans. Power Deliv. 2014, 29, 1955-1963.

[15] Ullah, I. et al, Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine-Learning Approach, Energies 2017, 10, 1987.

[16] Gururajapathy, S.S. et al, Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 74, 949-958.

[17] Barik, M.A. et al, A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding, IEEE Trans. Power Deliv. 2018, 33, 2462-2473.

[18] Roostaee, S. et al, Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines, Prot. Control. Mod. Power Syst. 2017, 2, 16.

[19] Zhang, Z. et al, straživanje sustava zaštite releja mikro-rešetke, Teh, Vjesn. 2015, 22, 51-59.

[20] Hidayatullah, N.A. et al, Power Transmission and Distribution Monitoring Using Internet of Things (IoT) for Smart Grid, IOP Conf, Ser. Mater. Sci. Eng 2018, 384, 012039.

[21] Awalin, L.J., Rahmat, M.K., A Recent Development of Monitoring Devices on Smart Grid, E3S Web Conf. 2020, 186, 02004.

[22] Shafiullah, M. et al, Distribution Grids Fault Location employing ST based Optimized Machine Learning Approach, Energies, 11(9), 2328, 2018.

[23] L.M. Branscomb, Sustainable cities: Safety and security, Technol., Soc., Vol 28, no. 1, pp. 225-234, 2006.

[24] C.S. Holling, Reselience and stability of ecological systems, Annu. Rev. Ecol. Syst., pp. 1-23, 1973.

[25] N.O. Attoh-Okine et al, Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions, Syst. J. IEEE, vol. 3, no. 2, pp. 147-153, 2009.
[26] O.O. Aderinlewo, N.O. Attoh-Okine, Assesment of a Transportation Infrastructure System using Graph Theory, 2013.
[27] A. Arab et al, Stochastic Pre-Hurricane Restoration Planning for Electric Power Systems Infrastructure, Smart Grid IEEE Trans. on. vol. 6, no. 2, pp. 1046-1054, 2015.
[28] A. arab et al, Proactive Recovery of Electric Power Assest for Resiliency Enhancement, Access IEEE, vol. 3, pp. 99-109, 2015.
[29] A. Arab et al, Post-hurricane transmission network outage management, in Proc. IEEE Great Lakes Symp, Smart Grid New Energy Econ., pp. 1-6, 2013.
[30] A. Arab et al, Transmission network restoration considering AC power flow constrains, in 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 816-821, 2015.
[31] A. Arab et al, Electric Power Grid Restoration Considering Disaster Economics, 2016.
[32] L. Molyneaux et al, Resilience and electricity systems: A comparative Analysis, Energy Policy, vol. 47, pp. 188-201, 2012.
[33] D.A. Reed et al, Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure, Syst. J. IEEE, vol. 3, no. 2, pp. 174-184, 2009
[34] M. Ouyang et al, A three- stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems, Struct. Saf., vol. 36, pp. 23-31, 2012.
[35] M. Ouyang, L. Duenas-Osorio, Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems, Struct. Saf., vol. 48, pp. 15-24, 2014.
[36] Sharma. R. et al, Detection of Power System Faults in Distribution System Using Stockwell Transform, In Proceeding of the 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, 24-25 February 2018, pp. 1-5.
[37] C.M. Bishop, Pattern Recognition, Mach. Learn. vol. 128, pp. 1-58, 2006.
[38] Executive Office of the President, Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resilience to Weather Outages-August 2013.
[39] C.K. Pang et al, Security Evaluation in Power Systems Using Pattern Recognition, IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-93, no. 3, pp. 969-976, May 1974.
[40] D.J. Sobajic, Y.-H. Pao, Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems, IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 1, pp. 220-228, 1989.
[41] A.D. Papalexopoulos et al, An implementation of a neural network based load forecasting model for the EMS, IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 4, pp. 1956-1962, 1994.
[42] G.N. Kariniotakis et al, Wind power forecasting using advanced neural network models, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 4, pp. 762-768, 1996.
[43] S.D. Guikema, Natural disaster risk analysis for critical infrastructure systems: An approach based on statistical learning theory, Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 94, no. 4, pp. 855-860, 2009.
[44] D. Thukaram et al, Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 2, pp. 710-721, 2005.
[45] R. Nateghi et al, Comparison and validation of statistical methods for predicting power outage durations in the event of hurricanes, Risk Anal., vol. 31, no. 12, pp. 1897-1906, 2011.
[46] C. Cortes, V. Vapnik, Support-vector networks, Mach. Learn., vol. 20, no. 3, pp. 273-297, 1995.
[47] Rozhin Eskandarpour et al, I mproving Power Grid Resilience Through Predictive Outage Estimation.
[48] Rajaei, N. et al, Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids, IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5, 2183-2193.
[49] Samanta, S. et al, An approach for power system fault diagnosis using current samples towards smart grid operation, In Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIES), Calcutta, India, 31 January-2 February 2014, pp. 743-746.
[50] Dhend, M.H., Chile, R.H., Efficient fault diagnosis in smart grid using non conventional mother wavelet function, In Proceedings of the 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 25-28 October 2016, pp. 342-347.
[51] Ntalampiras, S., Fault Diagnosis for Smart Grids in Pragmatic Conditions, IEEE Trans. Smart Grid 2016, 9, 1964-1971.

[52] Rajendran, G. et al, Cyber Security in Smart Grid: Challenges and Solutions, In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 21-23 August 2019, pp. 546-551.
[53] Bayindir, R. et al, The path of the smart grid –the new and improved power grid, In Proceedings of the 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, Turkey, 21-25 March 2016, pp. 1-8.
[54] Hossain, E. et al, Utility Grid: Present Challenges and Their Potential Solutions, IEEE Access 2018, 6, 60294-60317.
[55] Baimel, D. et al, Smart Grid Communication Technologies, J. Powe Energy Eng. 2016, 4, 1-8.
[56] IRNA News Agency, https://www.google.com /amp/s/www.irna.ir/amp/85498647/, August 2024.
[57] Shervin Asadzadeh, Modeling and Optimal Prediction of Eqipment Failure Rate in Power Distribution Networks, Journal of Quality and Productivity in IRAN`s Power Industry- No. 15, 2019.
[58] Quiroga, O. et al, Fault Causes analysis in Feeders of Power Distribution Networks, Renewable Enegries and Power Quality Journal, vol. 1, no. 5, pp. 1269-1272, 2011.
[59] Kaigui, X. et al, Reliability Forecasting Models for Electrical Distribution Systems Considering Component Failures and Planned Outages, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 79, pp. 228-234, 2016.
[60] Moamin A Mahmoud et al, An Ontology-Based Predictive Maintenance Tool for Power Substation Faults in Distribution Grid, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 11, no. 11, 2020.
[61] J. Olalekan Awujoola et al, Machine Learning and Predictive Maintenance in Smart Grids, AI and Blockchain in Smart Grids, 2025.
[62] M. Y. Arafat, Machine Learning Scopes on Microgrid Predictive Maintenance: Potential frameworks, challenges, and prospects, School of Electrical and Data Engineering, University of Technology, Sydney, Renewable and Sustainable Energy Review (190), 2024.
[63] Md. Nuruzzaman et al, Predictive Maintenance in Power Transformers: A Syatematic Review of AI and IoT Applications, 1st Global Research and Innovation Conference, 2025.
[64] Alireza Joshan, Analyzing and optimization of smart grid operation using of machine learning algorithms: challenges and new solutions, Quarterly journal of Electrical and Computer Engineering-Kahroba, NO. 47, 2025.
[65] Mehdi Aref Khiabani, Smart grid: Technologies, pros. and cons., Quarterly journal of Electrical and Computer Engineering-Kahroba, NO. 46, 2024.