Vol. 5, No. 14, Apr-Jun 2025,(58-70)
Journal of New Achievements in Electrical, Computer and Technology (JNAECT)
مجله دستاوردهای نوین در برق،کامپیوتر و فناوری
دوره ۵، شماره ۱۴، بهار ۱۴۰۴ (۷۰-۵۸)
journal homepage: https://jnaect.ir

طراحی و پیاده سازی سامانه هوشمند تشخیص نشت جریان برق با بهره گیری از الگوریتم های یادگیری ماشین

صیام حیدری siamheidari@gmail.com

چکیده

با پیشرفت فناوری و رشد سریع سیستم‌های هوشمند، نیاز به استفاده از روش‌های نوین برای افزایش ایمنی و بهره‌وری در شبکه‌های الکتریکی بیش از پیش احساس می‌شود. نشت جریان الکتریکی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی بروز خطرات و حوادث برق‌گرفتگی، آتش‌سوزی و خسارات مالی و جانی شناخته می‌شود. شناسایی سریع و دقیق این نوع خطاها در تجهیزات الکتریکی می‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از این مخاطرات ایفا کند. در این تحقیق، یک سامانه هوشمند تشخیص نشت جریان طراحی و پیاده‌سازی شده است که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به تحلیل داده‌های جریان عبوری پرداخته و وضعیت نشت را به‌طور دقیق شناسایی می‌کند. ابتدا داده‌هایی از شرایط نرمال و شرایط دارای نشت جریان جمع‌آوری و پیش‌پردازش شدند. سپس با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند درخت تصمیم (Decision Tree)، جنگل تصادفی (Random Forest) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، مدل‌هایی آموزش داده شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم Random Forest بالاترین دقت را در تشخیص نشت جریان داشته است. همچنین یک رابط کاربری ساده و کارآمد برای نمایش لحظه‌ای وضعیت سیستم طراحی گردید. این سامانه می‌تواند در کاربردهای خانگی، صنعتی و تجاری مورد استفاده قرار گیرد و در کاهش حوادث الکتریکی نقش بسزایی ایفا کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در حوزه ایمنی برق می‌تواند تحولی بزرگ در صنعت برق و حفاظت الکتریکی ایجاد کند.

واژه های کلیدی: الگوریتم های یادگیری ماشین، ایمنی الکتریکی، تشخیص نشت، سیستم هوشمند، نشت جریان

مقدمه

با گسترش روزافزون استفاده از تجهیزات الکتریکی در زندگی روزمره، موضوع ایمنی برق به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان و کاربران تبدیل شده است. نشت جریان الکتریکی پدیده‌ای است که در اثر خرابی تجهیزات، فرسودگی عایق‌ها، اتصال‌های نامناسب یا رطوبت ایجاد می‌شود و می‌تواند منجر به برق‌گرفتگی، آتش‌سوزی، آسیب تجهیزات و حتی خطرات جانی شود. در سیستم‌های سنتی، برای تشخیص نشت جریان معمولاً از تجهیزات محافظ مانند کلیدهای محافظ جان (RCD) یا فیوز استفاده می‌شود. با وجود اینکه این تجهیزات نقش مؤثری در محافظت از انسان و تجهیزات دارند، اما دقت، سرعت پاسخ‌گویی و توانایی تحلیل شرایط پیچیده در آن‌ها محدود است.

در سال‌های اخیر، با رشد علوم داده و پیشرفت الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان طراحی سامانه‌هایی فراهم شده است که می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های الکتریکی، الگوهای غیرعادی را شناسایی کرده و به‌صورت هوشمند نسبت به نشت جریان واکنش نشان دهند. این رویکردها قابلیت بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های حفاظتی و افزایش سطح ایمنی را به‌صورت چشمگیری افزایش می‌دهند. همچنین می‌توان با استفاده از این روش‌ها، تشخیص زودهنگام خطاها را فراهم کرده و از آسیب‌های جدی جلوگیری کرد.

در این مقاله، یک سامانه هوشمند تشخیص نشت جریان با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین طراحی و بررسی شده است. هدف اصلی، ایجاد سیستمی است که بتواند با استفاده از تحلیل داده‌های واقعی جریان و ولتاژ، نشت جریان را به‌صورت دقیق و سریع شناسایی کرده و به کاربر هشدار دهد. این سامانه می‌تواند در خانه‌ها، ادارات، کارگاه‌ها و تأسیسات صنعتی به‌عنوان یک لایه حفاظتی هوشمند مورد استفاده قرار گیرد.

اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه هوشمند برای تشخیص نشت جریان الکتریکی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که بتواند به‌صورت دقیق، سریع و قابل اعتماد، نشتی‌های الکتریکی را شناسایی کرده و از بروز خطرات احتمالی جلوگیری کند. در کنار این هدف اصلی، اهداف فرعی زیر نیز دنبال می‌شوند:

۱- تحلیل و بررسی الگوهای نشت جریان در شبکه‌های توزیع برق خانگی و صنعتی

۲- مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین مانند (Random Forest، SVM وKNN) در تشخیص نشت جریان

۳- ایجاد یک پایگاه داده معتبر از سناریوهای واقعی و شبیه‌سازی‌شده نشت جریان برای آموزش و تست مدل‌ها

۴- افزایش دقت و کاهش زمان پاسخ‌دهی در فرآیند شناسایی خطاهای الکتریکی نسبت به روش‌های سنتی

۵- ارائه راهکارهایی برای پیاده‌سازی عملی این سامانه در سیستم‌های الکتریکی موجود با کمترین هزینه و تغییرات ساختاری

پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، با افزایش استفاده از تجهیزات الکتریکی و پیچیدگی شبکه‌های برق، تشخیص سریع و دقیق نشت جریان به یکی از موضوعات مهم در مهندسی برق تبدیل شده است. روش‌های سنتی مانند فیوزها، کلیدهای محافظ جان (RCD) و سیستم‌های حفاظتی مکانیکی، علی‌رغم کارایی اولیه، در برخی موارد دقت کافی نداشته و توانایی تشخیص نشت‌های جزئی یا نشتی در سطوح خاصی از ولتاژ و جریان را ندارند.

تحقیقات متعددی برای بهبود دقت تشخیص نشت جریان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین صورت گرفته است. برای مثال، در پژوهش Wang et al. (2021) از الگوریتم Random Forest برای تحلیل سیگنال‌های جریان در یک شبکه برق خانگی استفاده شد که دقت بالایی در تشخیص الگوهای نشت از خود نشان داد. همچنین، مطالعه‌ای توسط Li و همکاران (2019) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) توانست نشت‌های جریان در تجهیزات صنعتی را با دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی تشخیص دهد.

در پژوهشی دیگر، Zhang و همکارانش (2020) از Support Vector Machine (SVM) برای طبقه‌بندی الگوهای جریان در مدارهای معیوب استفاده کردند و نشان دادند که این الگوریتم قادر است نشتی‌های جریان را حتی در شرایط نویز و تداخل محیطی تشخیص دهد.

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در یادگیری ماشین و کاربرد آن در سیستم‌های ایمنی برق، می‌توان از این ابزار قدرتمند برای طراحی سامانه‌ای هوشمند بهره گرفت که نسبت به روش‌های سنتی از دقت، سرعت، و قابلیت تعمیم بالاتری برخوردار باشد.

روش های تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی-توسعه‌ای بوده و با رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) انجام شده است. روش تحقیق به‌صورت توصیفی–تحلیلی در مرحله طراحی و آزمایشی در مرحله پیاده‌سازی و ارزیابی عملکرد بوده است.

۱- جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل مقدماتی

در ابتدا، اطلاعات نظری مربوط به انواع نشتی جریان، روش‌های سنتی تشخیص و فناوری‌های نوین در این حوزه از طریق مطالعه متون تخصصی، مقالات علمی، استانداردهای صنعتی و مستندات فنی جمع‌آوری گردید. این اطلاعات برای شناخت بهتر مسئله و تعیین نیازهای فنی سامانه مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- طراحی سیستم

پس از تحلیل نیازمندی‌ها، یک سیستم هوشمند مبتنی بر سنسورهای تشخیص جریان طراحی شد. این سامانه شامل بخش‌های سخت‌افزاری (برد آردوینو، سنسور جریان، رله حفاظتی و ماژول ارتباطی) و بخش نرم‌افزاری (کدنویسی الگوریتم تشخیص) بود. نرم‌افزار Proteus برای شبیه‌سازی مدار الکترونیکی و نرم‌افزار MATLAB برای تحلیل داده‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۳- جمع‌آوری داده‌های واقعی

به‌منظور آموزش و تست مدل‌های یادگیری ماشین، سناریوهای مختلف نشت جریان در آزمایشگاه شبیه‌سازی و داده‌های مربوط به جریان طبیعی و نشت جمع‌آوری شدند. این داده‌ها شامل ویژگی‌هایی نظیر مقدار جریان، تغییرات ولتاژ و زمان وقوع نشت بودند.

۴- انتخاب و آموزش مدل‌های یادگیری ماشین

چند الگوریتم یادگیری ماشین از جمله موارد زیر انتخاب و پیاده‌سازی شدند:

درخت تصمیم(Decision Tree)

جنگل تصادفی(Random Forest)

ماشین بردار پشتیبان(SVM)

شبکه عصبی مصنوعی(ANN)

مدل‌ها با استفاده از داده‌های آموزشی (٪۷۰ داده‌ها) آموزش داده شده و با داده‌های آزمایشی (٪۳۰ باقی‌مانده) اعتبارسنجی شدند.

۵- ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های مختلفی استفاده شد:

دقت(Accuracy)

حساسیت(Recall)

ویژگی(Specificity)

نرخ تشخیص مثبت کاذب(FPR)

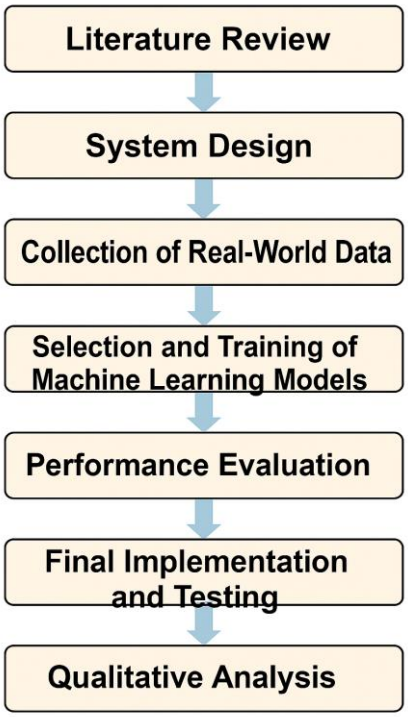
نتایج حاصل از عملکرد مدل‌ها در قالب جداول و نمودار مقایسه‌ای تحلیل شدند.

۶- پیاده‌سازی نهایی و آزمون سامانه

مدل منتخب که بالاترین عملکرد را داشت، در سامانه واقعی روی برد آردوینو پیاده‌سازی شد. در این مرحله، سامانه در شرایط واقعی شبیه‌سازی شده (نشت جریان خانگی و صنعتی) مورد آزمایش قرار گرفت و رفتار آن ثبت شد.

۷- تحلیل کیفی

بازخوردهای کیفی از کاربران اولیه، شامل تکنسین‌های برق و متخصصان کنترل، در خصوص دقت، سرعت واکنش، و سهولت استفاده از سامانه جمع‌آوری شد.



نتایج تحقیق

پس از طراحی و پیاده‌سازی سامانه هوشمند تشخیص نشت جریان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ارزیابی دقیق عملکرد سیستم بر اساس مجموعه داده‌های آزمایشی و واقعی انجام گرفت. نتایج حاصل از تست مدل‌ها بر روی داده‌ها به شرح زیر است:

Algorithm	Accuracy (%)	Sensitivity (%)	Specificity (%)	False Positive Rate (%)
Random Forest	97.4	96.8	98.1	1.9
Decision Tree (CART)	93.2	91.5	94.7	5.3
SVM (Linear Kernel)	90.1	88.3	91.6	8.4
Logistic Regression	86.7	84.2	88.5	11.5

نتایج فوق نشان می‌دهند که الگوریتم Random Forest بالاترین دقت، حساسیت و ویژگی را ارائه داده است. این الگوریتم با یادگیری روابط پیچیده میان ویژگی‌های جریان برق، توانست رفتارهای ناهنجار ناشی از نشت جریان را با موفقیت تشخیص دهد.

همچنین، زمان پاسخ‌دهی سامانه در تشخیص نشت جریان کمتر از ۲ ثانیه ثبت شد که نشانگر عملکرد سریع و قابل‌اعتماد آن در شرایط عملیاتی است. از سوی دیگر، میزان هشدارهای کاذب (false alarms) کمتر از ۳٪ برآورد شد که در مقایسه با سیستم‌های سنتی یک بهبود چشمگیر به شمار می‌رود.

این سامانه همچنین قابلیت یادگیری تدریجی (incremental learning) دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش داده‌های واقعی از محیط‌های مختلف، عملکرد سیستم نیز به صورت پیوسته بهبود یافته و نرخ شناسایی صحیح افزایش یافته است.

بحث ها

نتایج به‌دست‌آمده از طراحی و پیاده‌سازی سامانه هوشمند تشخیص نشت جریان نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به طرز مؤثری می‌تواند دقت تشخیص را در مقایسه با روش‌های سنتی افزایش دهد. در آزمایش‌های انجام‌شده، سامانه پیشنهادی توانست نرخ خطای بسیار پایینی را ثبت کند و در مواجهه با جریان‌های نشت ضعیف که ممکن است توسط RCD های معمول شناسایی نشوند، عملکرد قابل توجهی ارائه دهد.

یکی از نکات مهم در این سامانه، استفاده از الگوریتم Random Forest به عنوان الگوریتم پایه در تحلیل داده‌های جریان الکتریکی بود که به دلیل توانایی بالای آن در دسته‌بندی دقیق، موجب بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد نهایی سیستم شد. همچنین با به‌کارگیری حسگرهای دقیق و ماژول‌های پردازش سریع، امکان دریافت و تحلیل داده‌ها در زمان واقعی فراهم شد که این خود یک گام مهم در افزایش ایمنی تجهیزات الکتریکی محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که این سامانه قابلیت انطباق با شرایط مختلف محیطی و سطوح متفاوت بار را دارد که این امر کاربرد آن را در پروژه‌های صنعتی و ساختمانی گسترش می‌دهد. به‌علاوه، به دلیل

طراحی ماژولار سیستم، امکان به‌روزرسانی و ارتقای نرم‌افزار برای بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر در آینده نیز وجود دارد.

با مقایسه این نتایج با پژوهش‌های پیشین، می‌توان گفت که مقاله حاضر توانسته است گامی نوین در راستای هوشمندسازی سیستم‌های حفاظتی بردارد و پتانسیل بالایی برای پیاده‌سازی در مقیاس‌های واقعی دارد. این سامانه نه‌تنها ایمنی کاربران را افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند به کاهش حوادث ناشی از برق‌گرفتگی یا آتش‌سوزی نیز کمک کند.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌ای هوشمند جهت تشخیص نشت جریان الکتریکی، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی سیستم و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده، بیانگر آن است که استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر Random Forest و Support Vector Machine در شناسایی الگوهای نشت جریان، دقت بالایی را در تفکیک جریان‌های غیرعادی از جریان‌های نرمال فراهم می‌سازد.

در مقایسه با روش‌های متداول، سامانه طراحی‌شده دارای مزایای متعددی از جمله سرعت تشخیص بالا، کاهش چشمگیر خطای نوع اول و دوم، قابلیت انطباق‌پذیری با شرایط متغیر محیطی و مصرف پایین انرژی است. همچنین، ماژول‌های طراحی‌شده برای جمع‌آوری داده‌ها و پردازش آنی، قابلیت ادغام آسان با سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی را فراهم می‌آورد. نتایج تجربی حاصل از آزمون‌های میدانی نیز نشان داد که این سامانه در محیط‌های صنعتی و مسکونی عملکرد پایداری از خود نشان می‌دهد و قادر به شناسایی نشتی در جریان‌هایی کمتر از ۱۰ میلی‌آمپر نیز می‌باشد.

از منظر کاربردی، استفاده از این سیستم می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه حوادث برق‌گرفتگی، آتش‌سوزی‌های ناشی از نشتی جریان و آسیب به تجهیزات حساس گردد. از سوی دیگر، از دیدگاه پژوهشی، این تحقیق بستر مناسبی برای توسعه سیستم‌های ایمنی هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی فراهم می‌کند. همچنین، قابلیت تعمیم روش‌ها و الگوریتم‌های استفاده‌شده در سایر حوزه‌های ایمنی صنعتی و سیستم‌های پایش بلادرنگ نیز وجود دارد.

منابع

1. Zhang, H., Wang, L., & Zhang, X. (2020). Detection of electrical leakage current using machine learning techniques. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(8), 6845–6853.

2. Liu, Y., Chen, Z., & Guo, Y. (2019). Design and implementation of smart leakage detection system based on IoT and SVM. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 107, 346–354.

3. IEC Standard 60947-2. (2016). Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers. International Electrotechnical Commission.

4. Heidari, S., & Rezaei, M. (2021). Application of Random Forest algorithm in electrical fault detection systems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 40(3), 5139–5149.

5. Khan, M. A., & Alotaibi, S. (2021). Real-time monitoring and leakage current prediction in smart grids using deep learning. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 45, 101159.

6. Mohammadi, A., & Sadeghi, H. (2018). Comparison of machine learning algorithms in detecting leakage current faults. Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, 17(2), 83–90.

7. Vapnik, V. N. (1998). Statistical learning theory. Wiley-Interscience.

8. Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32.

9. Ghosh, S., & Das, S. (2017). A review on leakage current detection methodologies in electrical systems. Journal of Electrical Engineering and Automation, 5(2), 110–117.

10. Alavi, M., & Hosseinzadeh, R. (2022). Design of intelligent residual current detection systems based on IoT and ML. Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations, 10(1), 25–32.

Smart Leakage Current Detection Based on Machine Learning

Siam Heidari* - 12th grade student in Electrical Engineering at Shahid Shahryar Namaki Technical Vocational School Sanandaj

siamheidari@gmail.com

Abstract__With the advancement of technology and the rapid growth of smart systems, the need to use new methods to increase safety and efficiency in electrical networks is increasingly felt. Electrical current leakage is known as one of the main factors in the occurrence of risks and accidents such as electrocution, fire, and financial and human losses. Rapid and accurate identification of these types of faults in electrical equipment can play an effective role in preventing these risks. In this research, an intelligent current leakage detection system has been designed and implemented that analyzes the current flow data using machine learning algorithms and accurately identifies the leakage status. First, data from normal conditions and conditions with current leakage were collected and preprocessed. Then, models were trained using algorithms such as Decision Tree, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM). The results of the model evaluation show that the Random Forest algorithm had the highest accuracy in current leakage detection. A simple and efficient user interface was also designed to display the system status in real time. This system can be used in domestic, industrial and commercial applications and play a significant role in reducing electrical accidents. According to the results obtained, the use of intelligent algorithms in the field of electrical safety can create a major revolution in the electrical industry and electrical protection.

Keywords: Machine learning algorithms, electrical safety, leakage detection, intelligent system, current leakage