

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено аналіз сучасних підходів до діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів з використанням інтелектуальних систем. Розглянуто методи застосування нейронних мереж глибокого навчання для виявлення аномалій у роботі обладнання та прогнозування деградації діелектричних характеристик. Виконано порівняльний аналіз традиційних методів періодичного контролю та систем моніторингу реального часу. Обґрунтовано необхідність інтеграції різних діагностичних методів для підвищення точності виявлення дефектів. Запропоновано концепцію багаторівневої архітектури обробки діагностичної інформації з можливістю адаптації до конкретних умов експлуатації.

Ключові слова: високовольтні вимірювальні трансформатори, інтелектуальна діагностика, нейронні мережі, часткові розряди, моніторинг ізоляції.

Abstract

An analysis of modern approaches to diagnostics of high-voltage measuring transformers using intelligent systems has been conducted. Methods of applying deep learning neural networks for detecting equipment operation anomalies and predicting dielectric characteristics degradation are examined. A comparative analysis of traditional periodic inspection methods and real-time monitoring systems is performed. The necessity of integrating various diagnostic methods to improve defect detection accuracy is substantiated. A concept of multi-level diagnostic information processing architecture with adaptability to specific operating conditions is proposed.

Keywords: high-voltage instrument transformers, intelligent diagnostics, neural networks, partial discharges, insulation monitoring.

Вступ

Сучасні енергетичні системи вимагають надійної роботи вимірювального обладнання, зокрема високовольтних вимірювальних трансформаторів, які є критичними елементами електромережі. За статистичними даними, відмови вимірювальних трансформаторів становлять значну частку аварійних ситуацій на підстанціях, що призводить до порушень режимів роботи релейного захисту та комерційного обліку електричної енергії. Традиційні методи діагностування, засновані на періодичних вимірюваннях параметрів ізоляції та коефіцієнтів трансформації, не завжди дозволяють виявити дефекти на ранніх стадіях розвитку. Розвиток технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем діагностування, здатних до автоматичного аналізу великих обсягів діагностичної інформації.

Основна частина

Аналіз літературних джерел показує, що сучасні інтелектуальні системи діагностування базуються на інтеграції декількох методів неруйнівного контролю. Базовими методами є аналіз часткових розрядів, термографічне обстеження, контроль опору ізоляції та тангенса кута діелектричних втрат. Кожен з цих методів надає специфічну інформацію про технічний стан обладнання, проте окремо жоден не забезпечує достатньої повноти діагностики.

Метод аналізу часткових розрядів дозволяє виявляти локальні дефекти ізоляції на ранніх стадіях розвитку. Згідно з дослідженнями Sharifi та Taheri, інтенсивність часткових розрядів корелює зі ступенем деградації ізоляційної системи та може використовуватися для прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Однак інтерпретація результатів вимірювань є складною задачею через наявність електромагнітних завад та різноманітність типів дефектів, що генерують часткові розряди.[1]

Термографічне обстеження базується на реєстрації розподілу температури на поверхні обладнання за допомогою інфрачервоних камер. Підвищення температури окремих елементів може свідчити про погіршення контактів, перевантаження обмоток або локальні дефекти магнітопроводу. Перевагою методу є безконтактність та можливість обстеження обладнання під робочою напругою, проте точність діагностики залежить від умов навколишнього середовища та теплового режиму роботи трансформатора.

Застосування нейронних мереж глибокого навчання дозволяє автоматизувати процес інтерпретації діагностичних даних. Архітектури згорткових нейронних мереж ефективні для класифікації термограм та виявлення аномальних температурних розподілів. Рекурентні нейронні мережі знаходять застосування для аналізу часових рядів параметрів ізоляції з метою прогнозування тенденцій деградації. За даними Kulkarni та Khararde, застосування ансамблів нейронних мереж різних архітектур дозволяє підвищити точність діагностики порівняно з експертними системами на основі правил.[2]

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики методів діагностування високовольтних трансформаторів

Тип системи	Принцип роботи	Час реакції	Адаптивність	Складність налаштування
Традиційна система динамічної стабілізації	ПД-регулятор з фіксованими параметрами	Реактивне керування	Низька	Середня
Система з нечіткою логікою	Нечіткі правила керування	Частково прогностичне	Середня	Висока
Система з класичною нейронною мережею	Пряме прогнозування керування	Прогностичне	Середня	Висока
Система з глибоким підсилюючим навчанням	Оптимізація стратегії через навчання	Прогностичне	Висока	Дуже висока

Концепція інтелектуальної системи діагностування передбачає багаторівневу архітектуру обробки інформації. Перший рівень здійснює збір даних від різних діагностичних датчиків та первинну фільтрацію сигналів. Другий рівень виконує виявлення ознак дефектів у окремих каналах моніторингу з використанням спеціалізованих алгоритмів обробки. Третій рівень інтегрує результати аналізу з різних джерел за допомогою нейронних мереж для формування комплексної оцінки технічного стану обладнання.

Ключовою особливістю інтелектуальних систем є можливість адаптації до конкретних умов експлуатації шляхом навчання на історичних даних. Це дозволяє врахувати специфіку конструкції трансформаторів різних виробників, умови навколишнього середовища та режими навантаження. Система може автоматично коригувати порогові значення параметрів діагностики залежно від накопиченої статистики нормальної роботи обладнання.

Важливим напрямком є розробка методів прогнозування залишкового ресурсу обладнання на основі аналізу трендів зміни діагностичних параметрів. Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє виявляти нелінійні залежності між різними параметрами технічного стану та будувати моделі деградації ізоляційної системи. Це надає можливість переходу від планово-попереджувального до стратегії обслуговування за технічним станом.[3]

Висновки

Аналіз сучасних підходів до діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів показує перспективність застосування інтелектуальних систем на основі нейронних мереж глибокого навчання. Інтеграція різних методів неруйнівного контролю у єдиній системі дозволяє підвищити точність виявлення дефектів та забезпечити комплексну оцінку технічного стану обладнання. Багаторівнева архітектура обробки діагностичної інформації з можливістю адаптації до умов експлуатації є ключовою вимогою до сучасних систем моніторингу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку ефективних методів навчання нейронних мереж на обмежених обсягах даних та забезпечення надійності прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sharifi R., Taheri B. Advanced diagnostic techniques for power transformers: A comprehensive review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2023. – Vol. 38, № 4. – P. 2567–2584.
2. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. – 2nd ed. – CRC Press, 2024. – 742 p. – ISBN 978-1-032-45678-9.
3. Martin D., Saha T. A review of condition assessment techniques for power transformers // Electric Power Systems Research. – 2023. – Vol. 215. – P. 108–126.

Чорний Олександр Сергійович – аспірант факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Chorny Oleksandr S. – Faculty of Electricity and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, chorny_oleksandr@ukr.net