

ДИНАМІЧНА ОЦІНКА НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Обґрунтовано необхідність переходу від статичного оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів до динамічного підходу, що враховує фактичний тепловий стан, температуру навколишнього середовища, профіль навантаження, технічний стан ізоляції, режими охолодження, вплив несинусоїдальних струмів і зміну напрямів перетоків потужності. Показано, що в умовах пошкодження енергетичної інфраструктури та інтеграції розосередженої генерації трансформатор не повинен розглядатися лише як пасивний елемент мережі. Він стає критичним обмежувальним ресурсом, від якого залежать пропускна здатність вузла, надійність електропостачання та швидкість післяаварійного відновлення.

Ключові слова: силовий трансформатор, навантажувальна здатність, динамічний рейтинг, термічне старіння, ізоляція, температура найбільш нагрітої точки, перевантаження, гармоніки, розосереджена генерація.

Abstract

The necessity of transition from static assessment of power transformer loading capability to a dynamic approach is substantiated. Such an approach takes into account the actual thermal state, ambient temperature, load profile, insulation condition, cooling modes, influence of non-sinusoidal currents, and changes in power flow directions. It is shown that under conditions of damaged energy infrastructure and distributed generation integration, a transformer should not be considered only as a passive network element. It becomes a critical limiting resource that determines node transfer capability, power supply reliability, and the speed of post-emergency restoration.

Keywords: power transformer, loading capability, dynamic rating, thermal ageing, insulation, hot-spot temperature, overload, harmonics, distributed generation.

Силові трансформатори є одними з найбільш капіталомістких і критичних елементів електричних станцій, підстанцій та розподільних мереж. Їх пошкодження або вимушене обмеження навантаження призводить не лише до локального дефіциту пропускної здатності, а й до зміни режиму цілих енерговузлів. В умовах воєнних пошкоджень енергетичної інфраструктури України значення трансформаторного обладнання суттєво зростає, оскільки від його фактичної здатності переносити навантаження залежать можливість резервування споживачів, відновлення схем живлення та перерозподіл потоків потужності між підстанціями. За оцінками International Energy Agency, енергосистема України зазнає системних атак, що ускладнює підтримання надійності електропостачання та потребує підвищення стійкості інфраструктури [1].

Традиційний підхід до оцінювання трансформаторів ґрунтується на паспортній номінальній потужності. Однак номінальна потужність не відображає повної картини допустимого навантаження в конкретний момент часу. Реальна навантажувальна здатність залежить від температури навколишнього середовища, попередньої історії навантаження, ефективності системи охолодження, теплової інерції бака та обмоток, стану ізоляції, якості оливи, вологості твердої ізоляції, стану вводів, пристрою РПН, струмопровідних з'єднань і допоміжного обладнання. Тому однакове значення струму навантаження може бути допустимим в одному режимі й небезпечним в іншому.

Базовим параметром для визначення допустимості навантаження є температура найбільш нагрітої точки обмотки. Саме вона визначає інтенсивність термічного старіння паперово-оливної ізоляції та, відповідно, втрату ресурсу трансформатора. ІЕС 60076-7:2018 встановлює підхід до навантаження масляних силових трансформаторів з урахуванням робочих температур і термічного старіння [2]. Це принципово важливо, оскільки перевантаження саме по собі не є аварійним режимом, якщо воно короткочасне, контрольоване та не призводить до недопустимого прискорення старіння ізоляції.

Науково обґрунтоване оцінювання навантажувальної здатності повинно спиратися на послідовність: фактичний струм навантаження — втрати в обмотках — нагрівання оливи — температура найбільш нагрітої точки — швидкість старіння ізоляції — допустимий час роботи в заданому режимі. Такий підхід відрізняється від простого порівняння фактичного струму з номінальним. Він дозволяє визначити, чи є можливим короткочасне перевантаження без критичного скорочення ресурсу, або навпаки — виявити небезпечний режим навіть за навантаження, близького до номінального, якщо трансформатор має погіршений тепловий стан.

Для сухих трансформаторів обмежувальними чинниками є інші теплові та ізоляційні умови. ДСТУ EN ІЕС 60076-11:2022 установлює вимоги до сухих силових трансформаторів, які дедалі частіше застосовуються в будівлях, промислових об'єктах, розподільних пунктах і локальних енергетичних вузлах [3]. Для таких трансформаторів критичними є клас нагрівостійкості ізоляції, вентиляція приміщення, пожежна безпека, пил, вологість, температура навколишнього середовища та якість тепловідведення. Тому універсальний підхід до оцінювання навантажувальної здатності для всіх типів трансформаторів є некоректним.

Важливою складовою є врахування фактичного технічного стану трансформатора. Два трансформатори однакової потужності, класу напруги та системи охолодження можуть мати різну допустиму навантажувальну здатність через різний стан ізоляції, оливи, вводів, РПН, системи охолодження та ущільнень. IECRE Technical Brochure 761 пропонує підходи до оцінювання технічного стану силових трансформаторів із використанням індексів стану, діагностичних параметрів і ранжування обладнання для прийняття рішень щодо експлуатації, ремонту або заміни [4]. Це означає, що допустиме перевантаження має визначатися не тільки за паспортом, а й за фактичною залишковою працездатністю конкретної одиниці обладнання.

Сучасна структура навантаження додатково ускладнює задачу. Зростання частки сонячної генерації, BESS, електротранспорту та інверторних навантажень змінює добові графіки струмів і може формувати реверсивні перетоки потужності через трансформатор. У матеріалах IECRE щодо роботи трансформаторів у мережах з відновлюваною генерацією показано, що підключення сонячних електростанцій і накопичувачів потребує аналізу фактичних профілів навантаження, можливих реверсів потужності, роботи РПН, температурного моніторингу та довгострокового впливу на ресурс трансформаторів [5].

Реверсивний потік потужності сам по собі не обов'язково є небезпечним для трансформатора, але він змінює режим роботи вузла. При значній генерації ВДЕ в години малого місцевого споживання трансформатор може бути звантажений у напрямі, для якого первинна схема регулювання напруги, налаштування РПН або розрахунок резерву пропускної здатності не були оптимізовані. Крім того, поєднання сонячної генерації та накопичувачів може створювати ситуації, коли трансформатор зазнає високого навантаження не в традиційний вечірній максимум, а в інші години доби. Це потребує переходу від статичних літніх і зимових допустимих навантажень до динамічних профілів.

Окремим фактором є якість електричної енергії. Інверторні навантаження, перетворювачі частоти, зарядні станції електротранспорту, силова електроніка ВДЕ та промислові нелінійні споживачі формують несинусоїдальні струми. Гармоніки збільшують додаткові втрати в обмотках, конструктивних елементах і магнітній системі, що може призводити до перегрівання навіть за відносно помірною діючою значення струму. IEEE C57.110-2018 визначає підходи до оцінювання здатності масляних і сухих трансформаторів жити навантаження з несинусоїдальними струмами [6]. Для українських мереж цей аспект важливий

через зростання частки силової електроніки та нерівномірний технічний стан розподільної інфраструктури.

Динамічна оцінка навантажувальної здатності повинна спиратися на поєднання вимірювань і моделей. Мінімально необхідними є дані про струми фаз, температуру верхніх шарів оливи або обмоток, температуру навколишнього середовища, стан системи охолодження, положення РПН, режим напруги та наявність перевантажень за фазами. Для більш відповідальних трансформаторів доцільним є використання онлайн-моніторингу розчинених газів в оливі, контролю вологості ізоляції, температурних датчиків, моніторингу вводів і реєстрації параметрів якості електроенергії.

У практичному застосуванні доцільно розрізняти три рівні допустимого навантаження. Перший — нормальне довготривале навантаження, за якого старіння ізоляції не перевищує прийнятого розрахункового рівня. Другий — планове контрольоване перевантаження, яке допускається за сприятливих температурних умов або за наявності резерву ресурсу. Третій — аварійне перевантаження, яке може бути прийняте лише для збереження електропостачання критичних споживачів і повинно супроводжуватися оцінкою втрати ресурсу та подальшою діагностикою.

Для умов України важливим є формування пріоритетів використання перевантажувальної здатності. У мирних умовах головним обмеженням є економічна доцільність та ресурс обладнання. В умовах пошкодженої інфраструктури допустиме короткочасне перевантаження може бути виправданим, якщо воно дозволяє зберегти живлення лікарень, насосних станцій, об'єктів зв'язку, промислових споживачів або критичної інфраструктури. Проте таке рішення має бути інженерно обґрунтованим, а не інтуїтивним. Воно повинно базуватися на тепловій моделі, технічному стані трансформатора та оцінці ризику його втрати.

Отже, навантажувальна здатність трансформатора має розглядатися як змінна величина, що залежить від режиму, температури, технічного стану та системної важливості вузла. Для підстанцій, які забезпечують критичне навантаження або працюють у післяаварійних схемах, доцільно впроваджувати динамічне рейтингування трансформаторів. Це дозволить підвищити використання наявного обладнання без необґрунтованого ризику, зменшити потребу в надмірному резервуванні та обґрунтовано визначити моменти ремонту, модернізації або заміни.

Висновки

Навантажувальна здатність силового трансформатора не може оцінюватися лише за паспортною номінальною потужністю. У сучасних умовах вона повинна визначатися на основі фактичного теплового стану, температури навколишнього середовища, історії навантаження, технічного стану ізоляції, режиму охолодження, впливу гармонік і характеру перетоків потужності. Динамічна оцінка навантажувальної здатності дає змогу обґрунтовано використовувати короткочасні перевантаження, підвищувати пропускну здатність енерговузлів, підтримувати електропостачання критичних споживачів і водночас контролювати втрату ресурсу трансформаторного обладнання. Для України такий підхід є особливо актуальним у зв'язку з пошкодженням енергетичної інфраструктури, потребою швидкого післяаварійного відновлення та зростанням ролі розосередженої генерації, накопичувачів і нелінійних навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ukraine's energy system under attack. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack>.
2. IEC 60076-7:2018. Power transformers. Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2018.
3. ДСТУ EN IEC 60076-11:2022. Силові трансформатори. Частина 11. Трансформатори сухого типу (EN IEC 60076-11:2018, IDT; IEC 60076-11:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. Condition assessment of power transformers. CIGRE Technical Brochure 761. Paris : CIGRE, 2019. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/761-condition-assessment-of-power-transformers.html>.
5. Martin D. Engineering the Future: Optimizing Power Transformer Performance in Renewable-Powered Grids. CIGRE Science & Engineering. URL: <https://cse.cigre.org/cse-n038/engineering-the-future-optimizing-power-transformer-performance-in-renewable-powered-grids.html>.

6. IEEE Std C57.110-2018. IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents. New York : IEEE, 2018.

Пилипчук Денис Русланович — студент групи 2ЕСМ-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Вишневецький Святослав Янович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com

Рупрчук Денис R. — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sviatoslav Ya. Vyshnevskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com