

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, **І.В. Притискач**, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Борщагівська, 115, Київ, 03056, Україна

Створення інтегрованої системи енергозабезпечення для ефективної експлуатації електричних мереж вимагає виконання моніторингу технологічних процесів в електрообладнанні. Згідно з сучасними визначеннями моніторинг повинен включати як автоматичне спостереження, так і оцінку стану об'єкта. У статті розглянуто питання застосування таких принципів до силових трансформаторів, оскільки вони є найбільш дорогими і стратегічно важливими компонентами будь-якої електропостачальної системи. Для оцінки залишкового ресурсу та допустимості певних режимів навантаження в системах моніторингу запропоновано використовувати більш точні, порівняно з детермінованими, стохастичні моделі процесів у трансформаторі. Як приклад використання стохастичних моделей розглянуто систему оцінки навантажувальної здатності силового трансформатора з використанням моделі навантаження як неперіодичного нестационарного випадкового процесу. Бібл. 12.

Ключові слова: моніторинг, силовий трансформатор, оцінка стану, електропостачальна система, навантажувальна здатність.

Сучасні вимоги до електропостачальної системи передбачають забезпечення надійного, безвідмовного живлення, оскільки порушення нормальних режимів роботи мереж 110...750 кВ мають надзвичайно важкі наслідки [10].

Нові концепції побудови електроенергетичних систем, наприклад Smart Grid, передбачають створення інтегрованої системи енергозабезпечення для ефективної експлуатації електричних мереж [4]. Побудова таких електричних мереж вимагає від їх обладнання якісно нового рівня інформатизації [6]. Наслідком цього стає та обставина, що електрообладнання набуде здатності виконувати функції власного моніторингу з подальшою передачею інформації в різноманітні системи керування та прийняття рішень.

Останнім часом поняття моніторингу в електроенергетиці набуває все більш чіткого та однозначного визначення [7]. У цій роботі сформульовано таке визначення: моніторинг в енергетиці – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в енергетиці з оцінкою або без оцінки їхнього стану. Даються наступні завдання процесу моніторингу:

- негайне, в режимі on-line, забезпечення інформацією в необхідному, інколи досить малому реальному часі автоматичного керування (автоматичного регулювання, автоматики, релейного захисту, стеження та ін.);

- негайне, в режимі on-line, забезпечення інформацією автоматизованого та ручного оперативно-диспетчерського керування;

- накопичення даних, створення баз даних, баз знань, архівів;

- проведення ретроспективного (тенденції, напрями, оцінки розвитку), поточного (спостереження, контроль, діагностика, розпізнавання образів) та перспективного (прогноз, планування) аналізу ситуацій та оцінка стану об'єктів моніторингу;

- організація передачі та обміну моніторинговою інформацією між об'єктами та суб'єктами, що мають відношення до технологічних процесів в електроенергетиці.

Оскільки потужні силові трансформатори є найбільш дорогими і стратегічно важливими компонентами будь-якої електропостачальної системи, їх безвідмовна робота має вирішальне значення для її функціонування. Серйозне пошкодження великого силового трансформатора за пробою ізоляції призводить до значних витрат на ремонт і невідпуск електроенергії через відключення. Небезпека виникнення аварійних ситуацій призводить до того, що для більшості енергокомпаній ефективний моніторинг потужного силового електрообла-

днання має вирішальне значення. Необхідність виконання моніторингу також підкріплюється тим, що як у нас, так і в інших країнах велика частка силових трансформаторів має дуже значний термін експлуатації і потребує заміни [10].

Побудова сучасних електроенергетичних систем передбачає широке використання мікропроцесорної техніки для реалізації інтелектуальних алгоритмів роботи обладнання та його моніторингу [6]. Електрообладнання стає джерелом великих обсягів інформації та набуває здатності реагувати на різноманітні впливи та сигнали. Це стосується і таких пристроїв та підсистем трансформаторних підстанцій, як вимірювальні трансформатори струму та напруги, комутаційні апарати, мікропроцесорні термінали релейного захисту та автоматики, АСУ ТП. Впровадження сучасних протоколів передачі та засобів обробки інформації приводить нас до ідеї «цифрової підстанції», що передбачає перехід від обміну традиційними аналоговими і дискретними сигналами на уніфікований обмін цифровими повідомленнями, що забезпечують можливість розподіленої реалізації функцій системи автоматизації підстанції і повну функціональну сумісність інтелектуальних електронних пристроїв різних виробників.

Інформаційна модель комунікацій та управління великою кількістю пристроїв була стандартизована в документі, розробленому Міжнародною електротехнічною комісією під назвою МЕК 61850 Системи, і мережі зв'язку підстанцій (IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations) [8].

Вироблення конкретних вимог до систем моніторингу трансформаторів відбувалося під егідою МЕК, і на цей час найбільш повним документом з цього питання вважаються рекомендації IEEE [12]. Діагностичні параметри, які зазвичай контролюються за вимогами цього керівництва, наступні [3]: струм, напруга, потужність; гази, розчинені в маслі, і вміст вологи; зміна ємності і tgδ вводів; температура масла в різних частинах трансформатора; комутаційні й атмосферні перенапруги; струми короткого замикання; часткові розряди.

Залежно від застосовуваного датчика вмісту газів у маслі можна контролювати як композиційну величину чотирьох видів газів, які можуть викликати несправність трансформатора, та вологовміст масла, так і окремо величини восьми видів газу та вологовміст масла. Обсяг розчинених газів у маслі й тенденція його зростання вказують на погіршення стану ізоляції в результаті розрядних процесів або теплового перевантаження. Підвищена вологість ізоляції також є небезпечним фактором для робочого стану трансформатора.

Зафіксовані зміни ємності й tgδ свідчать про несправність системи ізоляції високовольтних вводів трансформатора. Записи процесів перенапруги дають уявлення про навантаження системи ізоляції і в разі несправності можуть підтвердити або спростувати першопричину виникнення дефекту. Записи процесів струмів короткого замикання надають інформацію, перш за все, про динамічне навантаження обмоток трансформатора.

Зростаючий рівень часткових розрядів вказує на поступове зниження характеристик твердої ізоляції, що може призвести до пробою з подальшим виникненням короткого замикання. Вимірювання температури масла служить для контролю ефективності системи охолодження трансформатора, а також в якості вхідних величин для моделей розрахунку температури найбільш нагрітої точки обмотки і теплового балансу трансформатора.

Сукупність встановлюваних датчиків і систем моніторингу визначається економічною доцільністю відповідно до напруги та потужності трансформаторів.

Вихідними функціями системи моніторингу є:

- безпосередньо вимірювані та похідні величини;
- величини, що характеризують поточний стан;
- часові ряди вимірюваних і похідних величин;
- модель для розрахунку найбільш нагрітої точки обмотки;
- модель теплового балансу з контролем потоку енергії;
- аварійна сигналізація при перевищенні граничних величин;
- самодіагностика системи моніторингу.

Додатково до зазначених основних параметрів деякі виробники систем моніторингу пропонують наступні можливості вимірювання та аналізу: вологість масла в РПН; кількість і

швидкість зміни газів у газовому реле; тиск, різниця тисків масла у вводах; віброхарактеристики трансформатора та РПН; вологість повітря в розширнику [3].

Раніше повідомлялось, що моніторинг розглядається не тільки як спостереження, але й як спостереження і оцінка стану. При цьому під оцінкою стану вважається не тільки поточна оцінка, а і ретроспективний аналіз та прогнозування стану.

Найбільш часто в трансформаторі пошкоджується ізоляційна система, яка зазнає в роботі теплових, електричних і механічних впливів, тому саме вона є найбільш важливим чинником в оцінці стану трансформатора. Залишковий термін служби трансформатора найчастіше оцінюється саме за ступенем деградації ізоляції, навантаженням і умовами роботи його обмоток. Контроль навантаження та умов роботи здійснюється за рахунок вимірювання напруг, струмів і температури, а оцінка накопиченого старіння ізоляції трансформатора вимагає даних про режими останніх 10-20 років експлуатації.

Для оцінки старіння ізоляції найважливішим параметром є температура найбільш нагрітих точок. Безпосереднє визначення досить складне, тому зазвичай застосовується її апроксимація за температурою верхніх шарів масла з урахуванням кратності струму навантаження, як це рекомендує керівництво МЕК 354-91. Приймається, що відносно теплове старіння подвоюється при збільшенні температури на кожні 6 °С.

Також непрямим шляхом оцінки можливості появи дефектів ізоляції є оцінка механічної деформації обмоток від зусиль при коротких замиканнях. У системах безперервного контролю стану трансформатора використовуються підрахунок числа струмів КЗ великої кратності та аналіз накопичених впливів на основі практичного досвіду експлуатації такого типу трансформаторів.

Для оцінки залишкового ресурсу та допустимості певних режимів навантаження в системах моніторингу можуть використовуватися як детерміновані, так і стохастичні моделі процесів у трансформаторі. Більш точними моделями навантажувальної здатності трансформаторів є стохастичні моделі, які детально розглянуто в роботі [1]. Вони базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів у трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації.

За стохастичного підходу кожна з умов оптимізації чи вибору розглядають як бажану або небажану подію. Критерієм оптимальності у цьому випадку є імовірності виконання даних подій. У цьому випадку максимізують або нормують (умова ухвалення оптимального рішення) мінімальну імовірність появи бажаної події й мінімізують або нормують максимальну імовірність появи небажаної події, наприклад:

$$\begin{aligned} p[\theta(t) \geq \theta_{\text{ном}}] &= 0,05; \\ p[L_n \geq 1] &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Як приклад використання стохастичних моделей у системах моніторингу було розглянуто систему оцінки навантажувальної здатності силового трансформатора з використанням моделі навантаження як неперіодичного нестационарного випадкового процесу.

Безпосередньо побудова реалізацій навантаження відбувається за допомогою вимірювань струмів і напруг. Вимірювання напруг проводиться на вимірювальних обкладках введів високої напруги. За допомогою вимірювань напруги може бути реалізована також оцінка тривалості роботи трансформатора: якщо трансформатор не ввімкнений під напругу, то припиняється відлік часу його роботи. Струми вимірюються в фазах обмотки ВН, СН і НН. У комбінації з положенням РПН це дає змогу розрахувати навантаження трансформатора.

Стандартом, який визначає побудову цифрових вторинних кіл для отримання миттєвих значень струму та напруги, є МЕК 61850-9.2. Угода про його впровадження визначає основну частоту вибірки цих величин як 80 вибірок за один період частоти живлення для основного захисту і моніторингу та високу частоту вибірки як 256 вибірок за період для таких застосувань, як контроль показників якості електроенергії та отримання осцилограм з високою роздільною здатністю. Для вирішення задачі отримання цих даних на цей час відбувається інтенсивне впровадження цифрових трансформаторів струму та напруги з волокон-

но-оптичними датчиками струму, робота яких заснована на ефектах Фарадея і Поккельса [9]. Їх основними перевагами є те, що вони є нечутливими до електромагнітних перешкод і у них відсутній гальванічний зв'язок між активною частиною датчика на високовольтній підстанції та керуючою електронікою. У них відсутні також такі проблеми їх традиційних аналогів, як магнітне насичення, залишкова намагніченість та ферорезонансні явища. Оптичні перетворювачі можуть бути легко інтегровані в існуюче обладнання підстанції, що призводить до значної економії простору і зниження витрат на установку.

Після одержання відліків навантаження із заданою дискретизацією за часом, відбувається їх обробка для визначення статистичних характеристик [2]. У разі нерегулярного характеру електричного навантаження виконується така послідовність дій:

- знаходяться інтервали стаціонарності Δt_μ нестационарного випадкового процесу навантаження $H(t)$;

- формується функція розподілу та визначається закон розподілу на кожному з отриманих інтервалів стаціонарності;

- на кожному інтервалі стаціонарності знаходяться оцінки математичного очікування \tilde{H}_μ , середньоквадратичного відхилення $\tilde{\sigma}_\mu[H]$, коефіцієнта варіації $\tilde{v}_\mu[H]$ та нормованої автокореляційної функції $\tilde{\rho}_\mu(\tau)$;

- виконується кластеризація одержаних інтервалів стаціонарності за значеннями параметрів розподілу електричного навантаження у цих інтервалах. Таким чином, визначаються інтервали, які відповідають однаковим режимам роботи досліджуваного споживача;

- визначаються параметри розподілу електричного навантаження, а також відносні тривалості, які відповідають певним режимам роботи.

Наступним кроком одержуємо сукупність реалізацій температур масла $\theta_o(t)$ та найбільш нагрітої точки обмотки $\theta_h(t)$ трансформатора, а також відносного зносу його ізоляції L . Для цього виконуються такі дії [5]:

- імітується сукупність реалізацій навантажувального струму $I(t)$ на інтервалі часу, рівному тривалості режиму роботи. При цьому може бути використана як більш складна, так і спрощена імітація струму, який підкоряється нормальному закону розподілу;

- для кожної реалізації навантажувального струму обчислюються реалізації $\theta_{o,v}(t)$ і $\theta_{h,v}(t)$ з використанням термічної моделі трансформатора, а також реалізації його відносного зносу L . Для i -го моменту часу температури $\theta_o(t_i)$ та $\theta_h(t_i)$ знаходимо за такими виразами:

$$\theta_o(t_i) = \theta_o(t_{i-1}) + \delta\theta_o(\delta t_i); \quad (1)$$

$$\theta_h(t_i) = \theta_o(t_i) + \delta\theta_{h-o}(\delta t_i), \quad (2)$$

де $\theta_o(t_{i-1})$ – значення температури масла в кінці попереднього $i-1$ часового інтервалу; $\delta t_i = t_i - t_{i-1}$; $\delta\theta_o(\delta t_i)$ – зміна температури масла на інтервалі δt_i ; $\delta\theta_{h-o}(\delta t_i)$ – зміна перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки над температурою масла на інтервалі δt_i ;

- проводиться статистична обробка сукупностей реалізацій кожної з величин з одержанням їх статистичних характеристик, насамперед, детермінованих функцій квантилів $\theta_{o,\alpha_0}(t)$, $\theta_{h,\alpha_0}(t)$, L_β за відповідними ймовірностями α_0 (імовірність перевищення температурою масла або найбільш нагрітої точки обмотки певного її значення) та β (імовірність перевищення зносом ізоляції певного значення).

Еквівалентний загальний відносний знос ізоляції трансформатора пропонується визначати як середньозважене значення, яке враховує відносні тривалості кожного кластеру ЕН, за формулою

$$L_{\max \Sigma} = \sum_{i=1}^m L_{\max i} \frac{T_i}{T_\Sigma}, \quad (3)$$

де T_i – загальна тривалість i -го кластеру; T_Σ – сумарна тривалість всіх кластерів; $L_{\max i}$ – максимальне значення квантилю відносного зносу для i -го кластеру; m – кількість кластерів.

На основі цих значень можна оцінити допустимість використання заданого трансформатора для живлення споживача. Для цього порівнюються отримані значення квантилів температур з їх допустимими значеннями, а також обчислюється еквівалентний загальний відносний знос ізоляції $L_{\max \Sigma}$ трансформатора, для якого має виконуватися умова $L_{\max \Sigma} < 1$.

Крім оцінки допустимості режимів навантаження перед системою моніторингу силових трансформаторів ставиться задача оцінки інших показників, які характеризують його стан. Одним з шляхів її вирішення є визначення певного «індексу стану», який залежить від усіх індикаторів, доступних для цього трансформатора. На основі отриманих значень цього індексу виконується класифікація трансформатора за станом. Відповідно до отриманого класу можуть бути зроблені висновки щодо необхідної частоти виконання профілактичного обслуговування чи про необхідність заміни трансформатора.

Алгоритм визначення індексу стану трансформатора S_I базується на системі оцінок на основі значень контрольованих показників (струми збігання, тангенс кута діелектричних втрат, вологість і температура масла та інші). Оскільки індикатором погіршення стану обладнання може бути не тільки саме значення параметра, але і його швидке зростання, що характеризується похідною за часом, то крім середнього значення для певних показників алгоритму розглядається й їхня зміна за певний базисний термін часу.

На основі отриманих оцінок первинних характеристик визначається інтегральний індекс стану трансформатора, використовуючи адитивність складових з ваговими коефіцієнтами. Для цього може бути використана наступна формула:

$$S_I = \sum_{i=1}^n z_i F_i,$$

де z_i – вагові коефіцієнти; $\sum z_i = 1$; F_i – значення відповідних рангів показників.

Деякі показники (наприклад, температуру масла) безпосередньо використовувати для оцінки стану недоцільно. Замість цього пропонується використовувати порівняння вимірних значень зі значеннями, розрахованими за допомогою методик, наведених у ІЕС 60076-7 [11]. Значна відмінність між цими значеннями може вказувати на розвиток дефектів у трансформаторі, що потребуватиме більш детального діагностування.

Введення системи безперервної оцінки стану трансформатора спрощує профілактичний догляд за таким обладнанням. Інформація про його фактичний стан дає змогу проводити профілактичні заходи до появи конкретних дефектів у трансформаторі або до аномальних режимів його роботи. Це дає можливість збільшити час між ревізіями та скоротити число діагностичних заходів на трансформаторі, що вимагають відключення від мережі.

Висновки. Нові підходи до побудови електропостачальних систем, такі як впровадження сучасних комплексів та систем моніторингу електрообладнання, дають у перспективі якісно нові можливості для підвищення їх надійності та якості функціонування. Збільшення інтелектуальної складової в такому елементі підстанцій, як силові трансформатори, дасть змогу виконувати безперервну оцінку їх стану та призведе до перенесення частини розрахунково-діагностичних завдань в інтерфейсні модулі самого силового електрообладнання. Перехід на цифрові (в основному оптичні) технології знімання та обробки інформації про електричні навантаження дасть змогу широко використовувати стохастичні моделі процесів в електрообладнанні, зокрема силових трансформаторах, як показано на прикладі визначення характеристик нестационарного процесу електричного навантаження, для оцінки допустимих навантажень.

1. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання. Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 288 с.

2. Денисенко М.А., Притискач І.В. Отримання статистичних характеристик електричного навантаження як неперіодичного випадкового процесу // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – ІЕД НАН України, 2013. – № 36. – С. 14–17.
3. Живодерников С.В., Овсянников А.Г., Русов В.А. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Мат. Четвертого научно-практического семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Востока по проблемам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок, Белокуриха, 20-24 апреля 2009. – Новосибирск: ГЦРО, 2009. – С. 7–22.
4. Праховник А.В. Від управління електроспоживанням до енергетики сталого розвитку // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19. – С.110–121.
5. Притискач І.В. Вибір силових масляних трансформаторів за випадкового неперіодичного характеру електричного навантаження [Електронне видання] // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Спец. вип.: Зб. пр. аспірантських читань пам'яті Праховника А.В. – 2013. – С. 31–35.
6. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 20–31.
7. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62–69.
8. Baigent D., Adamiak M., Mackiewicz R. IEC 61850 Communication Networks and Systems in Substations: An Overview for Users // GE Multilink, 2009.
9. Bohnert K., Gabus P. and Brändle H. Fiber-Optic Current and Voltage Sensors for High-Voltage Substations // Invited paper at 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, October 13-17, 2003, Nara Japan Technical Digest. – P. 752–754.
10. Hässig M., Bräunlich R., Gysi R., Alff J.-J., V. Der Houhanessian, Zaengl W.S. On-Site Applications of Advanced Diagnosis Methods for Quality Assessment of Insulation of Power Transformers // Annual Report of the 2001 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Publication 01CH37225. – P. 441–447.
11. IEC 60076-7:2005. Power transformers – P. 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. – 2005. – 62 p.
12. C57.143-2012. IEEE Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components. – 2012. – 83 p.

УДК 621.314.222.600

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, **И.В. Прытыскач**, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Борщаговская, 115, Киев, 03056, Украина

Общие подходы к построению систем мониторинга силовых трансформаторов с использованием стохастических моделей

Создание интегрированной системы энергообеспечения для эффективной эксплуатации электрических сетей требует выполнения мониторинга технологических процессов в электрооборудовании. Согласно современным определениям мониторинг должен включать как автоматическое слежение, так и оценку состояния объекта. В статье рассмотрены вопросы применения таких принципов к силовым трансформаторам, поскольку они являются наиболее дорогими и стратегически важными компонентами любой системы электроснабжения. Для оценки остаточного ресурса и допустимости определенных режимов нагрузки в системах мониторинга предложено использовать более точные, по сравнению с детерминированными, стохастические модели процессов в трансформаторе. В качестве примера использования стохастических моделей рассмотрена система оценки нагрузочной способности силового трансформатора с использованием модели нагрузки как неперіодического нестационарного случайного процесса. Библ. 12.

Ключевые слова: мониторинг, силовой трансформатор, оценка состояния, система электроснабжения, нагрузочная способность.

S. Denysiuk, I. Prytyskach

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Borschahivska str., 115, Kyiv, 03056, Ukraine

General approach to power transformer monitoring systems using stochastic models

Creating an integrated energy system for efficient operation of power networks requires to perform accurate monitoring in electrical equipment. According to current definitions, monitoring should include both automatic observation and assessment of the object state. In the article presented the application of such principles to power transformers, because they are the most expensive and strategically important components of any electricity supply system. To assess the residual life and the admissibility of certain modes of load monitoring system is proposed to use a more accurate, compared to deterministic, stochastic models of processes in transformer. As an example of stochastic models considered evaluation of power transformer load capacity, using a model for electrical load as non-periodic non-stationary random process. References 12.

Key words: monitoring, power transformer, state assessment, electricity supply system, load capacity.

Надійшла 05.02.2014

Received 05.02.2014

