

Є. І. Бардик¹
М. В. Костерев¹
М. П. Болотний¹

ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЕС ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ ВІДМОВИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Запропоновано комплексну математичну модель, алгоритм та програмне забезпечення оцінки ризику відмови силових трансформаторів за наявності дефекту обмоток внаслідок зовнішніх КЗ, які ґрунтуються на використанні нечіткого моделювання технічного стану обмоток силових трансформаторів та імовірно-статистичного моделювання електричної мережі для визначення імовірнісних характеристик струмів КЗ в обмотках силових трансформаторів.

Ключові слова: нечітка модель, електрообладнання, ризик, відмова, коротке замикання.

Вступ

Збільшення частки електрообладнання, що відпрацювало свій нормативний ресурс, погіршення метеорологічних умов (ураганні вітри, грози, ожеледь) і низка інших факторів призводять до збільшення кількості відмов електрообладнання, що сприяє підвищенню ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС. В зв'язку з цим важливим є визначення елементів енергосистем, які мають найбільшу ймовірність відмови і тих, відмови яких можуть спричинити каскадний розвиток аварій в системі.

Силові трансформатори (СТ) сучасних ЕЕС є одними з найвідповідальніших елементів основного електрообладнання ЕЕС від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність складної ЕЕС в цілому [1, 3]. Елементом СТ, який найбільшою мірою піддається впливам з боку зовнішньої електричної мережі є обмотки. В першу чергу це стосується коротких замикань, дія яких в залежності від кількості і величини струмів короткого замикання (КЗ) в обмотках СТ може призвести до їх невідновлювальної відмови [3—5]. Відмова СТ для ЕЕС є збуренням, яке може спричинити виникнення аварійної ситуації з можливим подальшим каскадним розвитком в ЕЕС.

Метою роботи є комплексне моделювання режимів ЕЕС і технічного стану СТ для оцінки ризику відмови СТ і виникнення аварійної ситуації в енергосистемі.

Результати дослідження

Найважливішими показниками, котрі характеризують рівень технічного стану обмоток СТ є: зношення виткової ізоляції; небезпечні деформації, спричиненні великими струмами наскрізних КЗ і несинхронними включеннями.

Стосовно першого показника можна зазначити [4, 5], що у випадку відсутності розвинутих дефектів, ресурс СТ значною мірою зазвичай визначається ресурсом паперової ізоляції. Загальноприйнятим методом оцінки її стану є вимірювання ступеня полімеризації паперу [4, 5]. Ресурс паперової виткової ізоляції обмоток вважається вичерпаним у разі зниження ступеня полімеризації паперу від 1000...1300 (на початку експлуатації) до 200...250 одиниць.

Другий показник, що характеризує можливість відмови СТ, є величина небезпечних деформацій обмоток, спричинених дією струмів КЗ і визначається на основі вимірювання опору короткого замикання Z_K . В рамках цієї роботи розглядаються питання моделювання і оцінки ризику відмови СТ, пов'язаного зі спрацюванням ресурсу паперової ізоляції і зниженням ступеня її полімеризації та дії струмів КЗ в зовнішній електричній мережі.

В умовах значної кількості факторів, що впливають на технічний стан (ТС) СТ, і складному ха-

рактері розвитку деградаційних процесів в ізоляції обмоток задача визначення ресурсу погано формалізується і потребує використання якісних оцінок. Необхідність використання як кількісної так і якісної вхідної інформації щодо ТС обмоток СТ і рівня збурень в електричній мережі та неможливість визначати ризик відмови СТ при зовнішніх КЗ на основі аналітичних моделей потребує використання підходу, що ґрунтується на застосуванні експертних оцінок, теорії нечітких множин і нечіткої логіки під час побудови даних моделей відмов [1, 3, 6].

Нечітка модель оцінки ризику відмови СТ

Як вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі оцінки ризику відмови СТ за зовнішніх КЗ у відповідності із загальним підходом [3—6] використаємо: DP — ступінь полімеризації ізоляції обмоток; $A_1 = \{L_1, M_1, B_1\}$; IKZ — величина аварійного наскрізного струму КЗ, що проходить через обмотки СТ; $A_2 = \{L_2, M_2, B_2\}$; PKZ — імовірність виникнення струму в обмотках СТ певного рівня за зовнішнього КЗ; $A_3 = \{L_3, M_3, B_3\}$, де L_i, M_i, B_i — «низьке», «середнє», «високе» значення параметрів СТ і мережі, відповідно.

Як вихідну лінгвістичну змінну нечіткої моделі взято ризик R_{KZ} відмови СТ за зовнішніх КЗ з термами: $A_4 = \{VL_4, L_4, M_4, B_4, VB_4\}$, де $VL_4, L_4, M_4, B_4, VB_4$ — «дуже низьке», «низьке», «середнє», «високе», «дуже високе» значення ризику відмови СТ, відповідно. Функції належності вхідних і вихідної лінгвістичних змінних наведено на рис. 1.

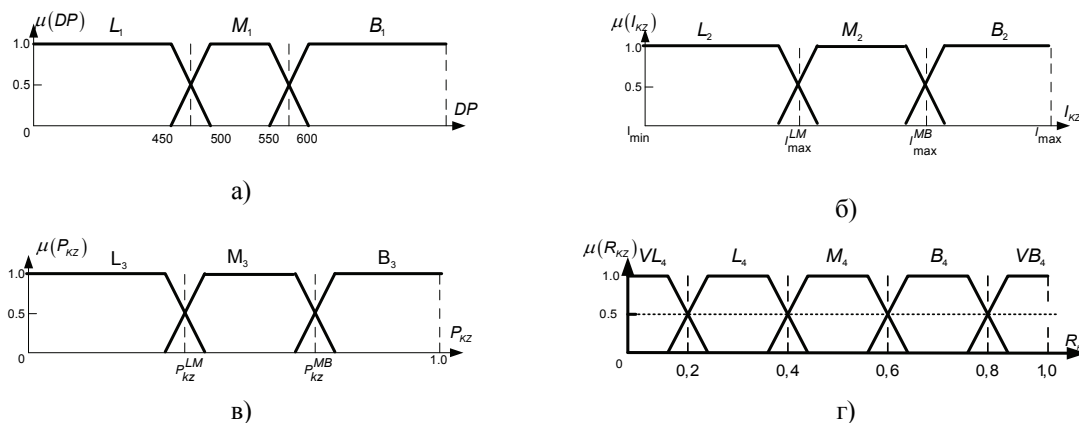


Рис. 1. Функції належності терм-множин вхідних і вихідної лінгвістичної змінних:

а — ступінь полімеризації ізоляції; б — величина наскрізного струму КЗ;

в — імовірність наскрізного струму в обмотках СТ; г — ризик відмови СТ за дії струмів зовнішніх КЗ

База правил для оцінки ризику відмови СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі наведена в табл. 1 і містить 27 продукційних правил.

Таблиця 1

База правил оцінки ризику відмови СТ за дії струмів зовнішніх КЗ R_{KZ}

$DP = L_1$				$DP = M_1$				$DP = B_1$			
I_{kz}	L_2	M_2	B_2	I_{kz}	L_2	M_2	B_2	I_{kz}	L_2	M_2	B_2
P_{kz}				P_{kz}				P_{kz}			
L_3	B_4	VB_4	VB_4	L_3	M_4	B_4	B_4	L_3	VL_4	L_4	B_4
M_3	B_4	VB_4	VB_4	M_3	M_4	B_4	VB_4	M_3	VL_4	M_4	B_4
B_3	VB_4	VB_4	VB_4	B_3	B_4	B_4	VB_4	B_3	L_4	B_4	VB_4

Визначення імовірності струмів в обмотках СТ у разі КЗ в ЕЕС

На імовірність виникнення небезпечних струмів КЗ в обмотках СТ, викликаних КЗ в електричній мережі, впливають такі фактори [1, 2, 7]: топологія зовнішньої мережі; рівень навантаження у вузлах енергосистеми; елемент мережі, який зазнає пошкодження; вид і місце КЗ; фаза, яка пошкоджується. Отримання розподілу імовірності струмів в обмотках СТ певної величини для оцінки ризику їх пошкодження за зовнішніх КЗ з урахуванням вищезазначених випадкових факторів

можливе на основі статистичного моделювання (метод Монте-Карло) стану електроенергетичної системи з розглядуваним силовим трансформатором [1, 2]. В процесі експлуатації кожен елемент ЕЕС може знаходитись в режимах експлуатації або ремонту, а імовірність того, що об'єкт знаходиться на інтервалі часу в ремонті, доцільно характеризувати коефіцієнтом неготовності (простою) $K_{НГ}$ [5, 8].

Найбільша імовірність виникнення КЗ в електричних мережах високої напруги 110—750 кВ спостерігається на ПЛ [7], і становить 77,3...91,44 % від загальної кількості КЗ в ЕЕС. Складність задачі визначення місця виникнення КЗ на ПЛ потребує використання рівномірного розподілу як для визначення ПЛ з КЗ так і місця розташування КЗ на ПЛ, якщо ПЛ не обладнана захисними тросами по кінцях [7]. Імовірність P_{LK} того, що на конкретній i -й ПЛ цього рівня напруги виникне КЗ визначається так: $P_{LK_j} = L_j / \sum_{j=1}^M L_j$, де L_j — довжина k -ї ПЛ; $\sum_{j=1}^M L_j$ — сума довжин всіх ПЛ цього

рівня напруги системи. ПЛ, на якій виникло КЗ визначається шляхом порівняння величини P_{LK_j} з рівномірно розподіленим випадковим числом P_{Kj} в діапазоні (0, 1) за умови пропорційності кількості КЗ по всій довжині ЛЕП. Визначення частки довжини пошкодженої ЛЕП, за умови, що місце виникнення КЗ на ЛЕП має рівномірно розподілену імовірність моделюється за допомогою рівномірно розподілених випадкових чисел p_{rk} між 0 та 1.

У більшості випадків на інтервалах спостереження в межах однієї доби, місяця та навіть кварталу потік КЗ в енергосистемі можна вважати стаціонарним. Тоді імовірність виникнення КЗ на інтервалі Δt за умови, що параметр потоку КЗ $\omega_{KZ} = \text{const}$ визначається [8]: $P_{KZ}(\Delta t) = 1 - e^{-\omega_{KZ} \cdot \Delta t}$. Попадання в процесі генерації випадкового числа під час статистичного моделювання в інтервал $[0, P_{KZ}(\Delta t)]$, за умови рівномірного розподілу кількості КЗ, свідчить про виникнення КЗ на інтервалі Δt .

Імовірність виникнення певного виду КЗ p_{VID} в алгоритмі статистичного моделювання, визначається згідно з [5, 8], на основі аналізу отриманих статистичних даних по КЗ розглядуваної енергосистеми. Потужність навантаження у вузлах схеми енергосистеми S_{Hj} в процесі статистичного моделювання стану ЕЕС, якщо P_{S_H} є випадковим рівномірно розподіленим числом між 0 та 1, визначається так: $S_{Hj} = S_{H \min} + (S_{H \max} - S_{H \min}) P_{S_H}$. Імовірнісні інтервали для визначення кількісних характеристик факторів впливу за умови їх рівномірного розподілу на імовірність і рівень струмів КЗ в елементах електричної мережі в алгоритмі статистичного моделювання стану ЕЕС з розглядуваним СТ показані на рис. 2.

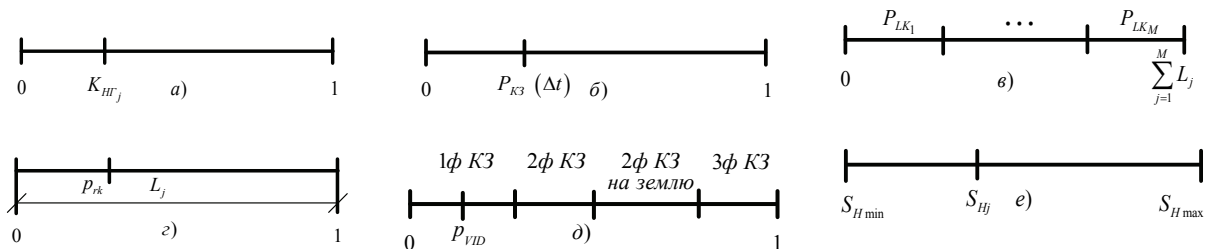


Рис. 2. Імовірнісні інтервали для визначення кількісних характеристик факторів впливу на імовірність і рівень струмів КЗ в елементах електричної мережі: а — топології електричної мережі; б — середньої інтенсивності КЗ в електричній мережі; в — імовірності виникнення КЗ на певній ЛЕП; г — місця розташування КЗ на ЛЕП; д — види КЗ; е — рівня генерації і навантаження у вузлах схеми

Результати тестового моделювання

Досліджуваний трансформатор Т1 працює в електричній мережі, еквівалентна заступна схема якої показана на рис. 3. Тестове ІСМ виконувалось на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 1$ мс з інтенсивністю потоку КЗ ω_{KZ} для весняно-літнього та зимового періодів 3,5 роки...1 та 4,5 роки ...1, відповідно. Гістограми частот $m_{I_{KZ}}$ наскрізних струмів КЗ в обмотках СТ та функція розподілу ймовірностей перевищення значень струмів КЗ $p(\text{IKZ})$ з можливого діапазону їх змінення показані на рис. 4. За результатами розрахунків для зимового (весняно-літнього) періодів величини імовірності виникнення максимального струму однофазного КЗ в обмотці ВН величиною 3,731 кА (3,477 кА)

складають 0,008 (0,007), відповідно, а струми, що мають найбільшу відносну частоту $m_{I_{KZ}} = 2,74 \%$ ($m_{I_{KZ}} = 2,94 \%$) дорівнюють 0,658 кА (0,382 кА) з імовірністю перевищення цього значення 0,703 (0,732), відповідно.

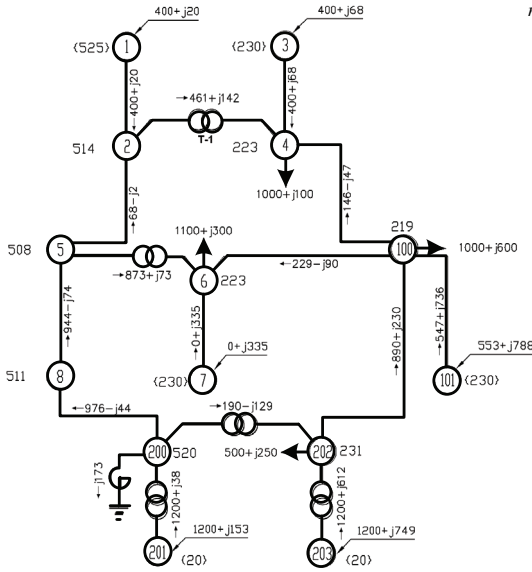


Рис. 3. Розрахункова схема тестової шестимашинної моделі підсистеми ЕЕС

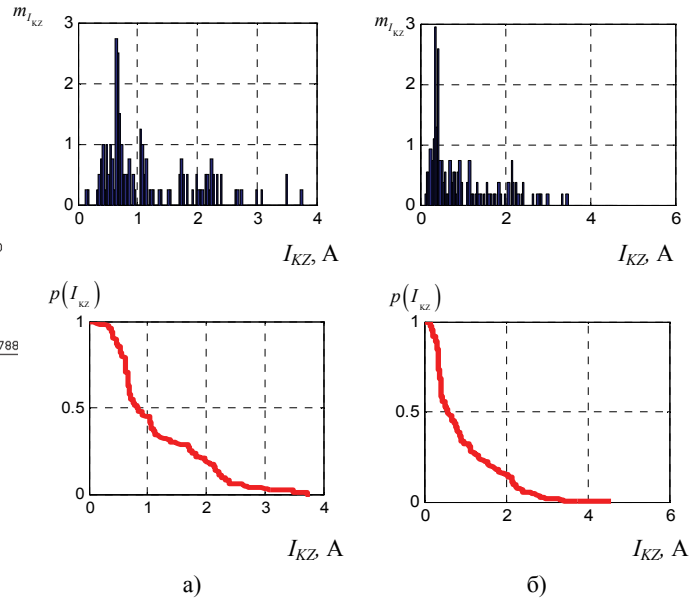


Рис. 4. Гістограми частот та функція розподілу імовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці ВН СТ у разі КЗ в зовнішній електричній мережі: а — зимовий період; б — весняно-літній період

З використанням як вхідних даних значення ступеня полімеризації $DP = 500$ одиниць та отриманих імовірнісних характеристик наскрізних струмів в обмотках ВН СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі за допомогою програмного забезпечення RISK — СТ та нечіткого моделювання в програмному середовищі MatLab за алгоритмом нечіткого логічного висновку Мамдані визначено дефазифіковані значення ризику відмови СТ, котрі для зимового та весняно-літнього періодів дорівнюють 0,7 та 0,689, відповідно.

Висновки

Для визначення кількісних показників ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС запропонована нечітка модель та програмне забезпечення оцінки ризику відмови СТ внаслідок зовнішніх КЗ за наявності дефекту обмоток. Наведено результати тестового моделювання оцінки технічного стану СТ потужністю 267 МВА та режиму електричної мережі в умовах КЗ на ПЛ в зовнішній електричній мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костерев М. В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем : монографія / М. В. Костерев, Є. І. Бардик. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 148 с.
2. Бардик Є. І. Моделювання електроенергетичної системи для оцінки ризику виникнення аварій при відмовах електрообладнання [Текст] / Є. І. Бардик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Серія «Електротехніка і енергетика», 2013. — Вип. 1. — С. 15—22.
3. Лежнюк П. Д. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. А. Жук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 1. — С. 43—51.
4. Анализ методов оценки ресурса бумажной изоляции силовых трансформаторов [Текст] / [В. Н. Бондарева и др. // Электротехника. — 2009. — № 3. — С. 77—84.
5. Wilfredo C. Flores, Enrique Mombello, Jose A. Jardini. Fuzzy risk index for power transformer failures due to external short-circuits / C. Wilfredo // Electric Power Systems Research. — 2009. — 79(4). — P. 539—549.
6. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : Телеком, 2007. — 288 с.
7. Неклепаев Б. Н. Вероятностные характеристики коротких замыканий в энергосистемах / Б. Н. Неклепаев, А. А. Востросаблин // Электричество. — 1999. — № 8. — С. 15—23.
8. Шалин А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. — Новосибирск : изд-во НГТУ, 2002. — 384 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.01.2016

Бардик Євген Іванович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних станцій, e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua;

Костерев Микола Володимирович — д-р техн. наук, професор кафедри електричних станцій;

Болотний Микола Петрович — аспірант кафедри електричних станцій.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

Ye. I. Bardyk¹
M. V. Kosteriev¹
M. P. Bolotnyi¹

Probabilistic and Statistical Modeling of Electric Power System for Risk Assessment of Power Transformer Failure in Power Grid under Short-Circuit Conditions

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Complex mathematical model, algorithm and software of risk assessment of failure if defected power transformer windings due to external short circuit have been proposed, based on the use of fuzzy modeling of technical condition of power transformer windings and probabilistic and statistical modeling of power grid to determine probability characteristics of short circuit currents, which is flowing in the power transformer windings.

Keywords: fuzzy model, electrical equipment, risk, failure, short-circuit

Bardyk Yevgenii I. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Chair of Electrical Power Stations, e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua;

Kosteriev Mykola V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Power Stations;

Bolotnyi Mykola P. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Power Stations

Е. И. Бардик¹
Н. В. Костерев¹
Н. П. Болотный¹

Вероятностно-статистическое моделирование ЭЭС для оценки риска отказа силового трансформатора при коротком замыкании в электрической сети

¹Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»

Предложена комплексная математическая модель, алгоритм и программное обеспечение оценки риска отказа силовых трансформаторов (СТ) при наличии дефекта обмоток, вследствие внешних КЗ, основанные на использовании нечеткого моделирования технического состояния обмоток СТ и вероятностно-статистического моделирования электрической сети для определения вероятностных характеристик токов КЗ в обмотках СТ.

Ключевые слова: нечеткая модель, электрооборудование, риск, отказ, короткое замыкание.

Бардик Евгений Иванович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических станций, e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua;

Костерев Николай Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры электрических станций;

Болотный Николай Петрович — аспирант кафедры электрических станций