

ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБМОТОК

Беляєв В. К.¹, Паненко О. М.²

¹Науково Виробниче Підприємство "ОСТ" (м. Київ),

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Описано методу оцінки похибок і чутливості найбільш вживаної, для автоматичного контролю стану обмоток, діагностичної моделі трансформатора. Показано необхідність використання більш якісних моделей.

Постановка проблеми. Однією з технологій, що втілюються в системи автоматизованого контролю стану силових трансформаторів, є контроль стану обмоток трансформатора шляхом спостереження, під навантаженням, за зміною їх опору [1-4 та інш.]. Основні достоїнства такого моніторингу під навантаженням в оперативності і відмові від дорогих і трудомістких операцій виводу з роботи в електричній мережі та розшировки трансформатора, що супроводжують традиційній процедурі періодичного тестового контролю (визначення опору в досліді короткого замикання (к.з.) трансформатора [5]). При контролі під навантаженням, визначення опору обмоток виконують після проведення дослідів з виміру струмів і напруг на входах нормально працюючого трансформатора. Для зв'язку визначених у досліді величин (напруг, струмів, кутів фаз) с характеристиками обмоток використовують математичну діагностичну модель трансформатора, якість якої впливає на результати контролю. Через погану обумовленість систем рівнянь повних діагностичних моделей, при реальних значеннях параметрів і змінних, у практиці автоматизованого контролю розповсюдження дістали спрощені моделі [1-4].

Для оцінки можливості помилок контролю, при використанні різних моделей, можливості спрощення їх структури, необхідно оцінювати характеристики якості моделей, у першу чергу, похибки моделі і чутливість до можливих паразитних змін (похибки вимірів) вхідних величин. Особливо важлива чутливість моделей, оскільки більшу значущість має не саме значення вихідної величини моделі (опору обмоток), а його зміна в процесі експлуатації. Виконувати оцінки необхідно при значеннях параметрів і вхідних величин близьких до тих, що спостерігаються в експлуатації, але одержувати ці значення в експериментах на реальних об'єктах або фізичних моделях дорого й трудомістко. У відомих авторам роботах питання оцінки похибок моделей, що використовуються, тільки фіксуються, як важливі, але розглядаються на якісному рівні. У [4] розглянуто вплив похибок деяких складових апаратури контролю на результат, не розглядаючи похибки власно моделі.

Мета роботи полягає в висвітленні методів визначення показників якості (похибок та чутливості) діагностичної моделі, що найчастіше використовується для визначення опору обмоток, застосовуючи тільки математичне моделювання.

Основні матеріали. Розглядаємо одну фазу

двохобмоточного трансформатора (моделі трифазних трансформаторів будують на основі однофазних моделей). При контролі під навантаженням, по аналогії з тестовим контролем, визначенню підлягають зміни приведенного опору розсіювання обмоток z_c :

$$z_c = (R_1 + k^2 R_2) + j\omega(L_1 + k^2 L_2), \quad (1)$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 - активний опір і індуктивність розсіювання первинної та вторинної обмоток;

k - відношення кількості витків обмоток.

Спрощена діагностична модель. Найбільше розповсюдження [2-4] одержала модель побудована на основі Г образної схеми заміщення трансформатора. Особливістю даної моделі є неадекватне урахування струмів в обмотках. У моделі припускається рівність струму первинної обмотки приведенному струму вторинної. Дане наближення дозволяє оцінювати z_c використовуючи результати вимірів струму тільки з боку однієї з обмоток.

Запропонована в роботі [1], як спрощення повної системи рівнянь трансформатора - чотириполюсника модель $\dot{I}_1 = [Y_{11} \quad -k \cdot Y_{11}] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$, являє собою ту ж модель на основі Г образної схеми заміщення:

$$z_c = 1/Y_{11} = (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2) / \dot{I}_1, \quad (2)$$

де \dot{U}_1, \dot{U}_2 - напруга на виводах відповідно первинної і вторинної обмотки трансформатора;

\dot{I}_1 - струм первинної обмотки, Y_{11} - провідність.

Показники якості (похибки та чутливість). Під загальною похибкою моделі маємо на увазі помилку апроксимації моделлю модуля опору $|z_c|$, що розраховувалася як різниця модулів розрахункового і опорного ("реального") значення z_c . Загальна похибка залежить від вигляду (структури й параметрів) використаної моделі, від режиму роботи трансформатора, при якому визначається опір, від похибки визначення вхідних змінних (напруг, струмів, кутів фаз).

Загальну похибку моделі ($D\Sigma z$) представляємо як суму двох складових: складової Dz , обумовленої похибками визначення (вимірювання) вхідних змінних, і похибки адекватності Doz - похибка за відсутності похибки вхідних змінних.

$$D\Sigma z = Dz + Doz, \\ D\Sigma z = \frac{|z| - |z_u|}{|z_u|}, Dz = \frac{|z| - |z_o|}{|z_u|}, Doz = \frac{|z_o| - |z_u|}{|z_u|},$$

де $D\Sigma z, Dz, Doz$ - похибки визначення $|z|$;

$z = z_c$ - розрахунковий опір, визначений з використанням діагностичної моделі;

$z_o = z_{co}$ - опір визначений з використанням діагностичної моделі за відсутності похибки вхідних величин; $z_u = z_{cu}$ - опорне значення z_c , яке, у випадку математичного моделювання, визначаються згідно (1), при прийнятих параметрах обмоток трансформатора $R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$.

Інший показник якості моделі, що використано у роботі - чутливість вихідної величини (модуль опору) до зміни вхідних величин моделі (напруги, струми, кути фаз) [6]. Чутливість до зміни кожної i -ї вхідної величини окремо характеризують коефіцієнтами bz_i . Коефіцієнти чутливості зв'язують похибку визначення вхідних величин (δ_i) з похибкою розрахунку Dz , обумовленою зміною (похибкою) декількох величин:

$$Dz = \sum_i bz_i \cdot \delta_i, \quad bz_i = \frac{\partial |z|}{\partial p_i} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_u|}, \quad \delta_i = \frac{p_i - p_{io}}{p_{ib}},$$

де p_i - значення i -ї вхідної величини, при якому одержуємо оцінку $|z|$;

p_{io} - значення i -ї величини при якому отримано оцінку $|z_o|$;

p_{ib} - опорне значення i -ї вхідної величини для розрахунку коефіцієнтів і похибки;

δ_i - похибка i -ї величини у відносних одиницях.

Для спрощеної моделі (2) коефіцієнти чутливості $|z_c|$ можуть бути записані в явному вигляді (для модулів безрозмірні, для кутів фаз напіврозмірні - в 1/градус):

$$bz_{|U_1|} = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \quad bz_{|U_2|} = -\operatorname{Re} \left(\frac{k \cdot \dot{U}_2}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \\ bz_{\varphi u1} = \operatorname{Re} \left(j \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \quad bz_{\varphi u2} = -\operatorname{Re} \left(j \frac{k \cdot \dot{U}_2}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right) \\ bz_{|I_1|} = -1, \quad bz_{\varphi i1} = 0; \quad j = \sqrt{-1}. \quad (3)$$

Визначення режимних параметрів. При розрахунку чутливості і похибок необхідно знати значення характерних для нормального режиму експлуатації режимних параметрів трансформатора (напруги, струми, фази первинних і вторинних обмоток) з урахуванням можливих похибок вимірювання в реальних умовах. Для визначення характерних режимних параметрів розроблено модель що дозволяє імітувати значення результатів вимірювання режимних параметрів для конкретного типу трансформатора, що працює в певному режимі, типовому для нормальної експлуатації трансформатора.

Вхідними змінними моделі обрано енергетичні характеристики режиму роботи трансформатора, передбачувані значення яких в експлуатаційних режимах добре відомі: потужність (S_2) і коефіцієнт потужності з боку навантаження $\cos(\varphi_2)$. Параметри моделі: характеристики обмоток кожної фази $R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$, які приблизно визначаються на підставі паспортних даних трансформатора що моделюється [7]:

$$R_c = R_1 + k^2 R_2 = P_k U_n^2 / S_n^2, \quad |z_c| = u_k^* U_n^2 / S_n, \\ \omega(L_1 + k^2 L_2) = \sqrt{z_c^2 - R_c^2}, \\ R_m = P_{xx} \cdot U_n^2 / S_n^2 \cdot (I_{xx}^*)^2, \quad |z_m| = U_n^2 / I_{xx}^* \cdot S_n, \\ \omega M = \sqrt{z_m^2 - R_m^2},$$

де $U_n, S_n, k, P_{xx}, P_k, I_{xx}^*, u_k^*$ - паспортні значення відповідно: номінальної напруги обмотки ВН, номінальної потужності, коефіцієнта трансформації, втрат холостого ходу й короткого замикання, струму холостого ходу, напруги короткого замикання.

Зв'язок напруг і струмів первинної (\dot{U}_1, \dot{I}_1), вторинної (\dot{U}_2, \dot{I}_2) обмоток і характеристик обмоток у кожному досліді для кожної фази надається повною системою рівнянь загальної теорії трансформаторів:

$$\dot{U}_1 = (R_1 + k \cdot R_m + j\omega(L_1 + kM)) \cdot \dot{I}_1 + (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_1 + (R_2 + R_m/k + j\omega(L_2 + M/k)) \cdot \dot{I}_2 \quad (4)$$

Для зв'язку з параметрами навантаження використовувалася зовнішня характеристика трансформатора (зв'язок зміни напруги на обмотці з боку навантаження зі струмом навантаження в режимі близькому до номінального навантаження) [7]:

$$U_2^* (1 - U_2^*) = S_2^* \cdot u_k^* \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_2), \\ \cos(\varphi_k) = P_k / u_k^* \cdot S_n, \quad (5)$$

де S_2^* і U_2^* відносні (у частках номінальних) значення потужності і напруги вторинної обмотки.

Режим роботи трансформатора задається поточними значеннями потужності S_2^* і $\cos(\varphi_2)$ з боку навантаження. Спільне розв'язання (4) і (5) дозволяє визначити напруги і струми обмоток із заданими характеристиками ($R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$) що відповідають трансформатору із заданими паспортними даними. Для імітації похибки вимірювання в значення амплітуд і фаз можуть вноситися спотворення, розподілені за заданим законом. Отримані в такий спосіб значення розглядаються як результати дослідів вимірювання режимних параметрів трансформатора під навантаженням. При тестових модельних розрахунках (моделювалися трансформатори ТРДЦ 63кВА 110кВ і ТДЦ 400кВА 330кВ) потужність навантаження змінювалася в межах 1-0,65 від номінальної й $\cos(\varphi)$ у

межах 0,95-0,6. Зміни вихідних параметрів у відносних одиницях (для амплітуд, щодо номінальних значень відповідної обмотки) мало залежали від типу трансформатора. Зазначеному діапазону змін потужності і косинуса втрат відповідали наступні зміни режимних параметрів: значення амплітуди U_1 відрізнялися від номінального на 0,1-0,5%; U_2 на 4-7% від номінального; струми I_1 і I_2 змінювалися в межах від 67% до 111% номінального значення. Найбільші зміни зсуву фаз спостерігалися між напругами U_1 і U_2 - у межах 0.045-0.1 ел. град.

Результати оцінок. Для спрощеної моделі (2) похибка Doz при зміні навантаження у вищевказаних межах змінювалася від 0,14% до 0,375%. Більше значення похибки (0,375%) відповідає меншим значенням потужності і косинуса навантаження (0,65 номінальної і 0,6 відповідно). Відмінності відносних значень похибки адекватності (Doz) для двох розглянутих трансформаторів в однакових режимах незначні. При аналізі Dz область можливих похибок вхідних величин діагностичної моделі визначалася виходячи з похибок доступних в експлуатації засобів вимірів (високовольтні вимірювальні трансформатори із класом точності 0,5 і 1, похибок виміру кута фаз 0,3-0,5 ел. градуса). Найбільший вплив на Dz справляють похибки модуля й кута фаз напруги. Значення коефіцієнтів bz_i , розраховані за (3), для характерного режиму роботи трансформаторів, при потужності навантаження 0,9 номінальної і косинусі навантаження 0,8, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Коефіцієнти чутливості bz_i

Трансформатор	коэф. для модуля			коэф. для кута фаз (1/градус)		
	U_1	U_2	I_1	$\phi i1$	$\phi i2$	$\phi i1$
ТРДЦ 63кВА 110 кВ	6,84	-5,84	-1	0,125	-0,125	0
ТДЦ 400кВА 330кВ	6,43	-5,43	-1	0,121	-0,121	0

На основі наведених даних зроблено оцінку необхідної точності вимірів, для досягнення гарантованої похибки оцінки модуля опору z_c в 1% (роздільний вплив можливих, у рамках класу точності засобів, похибок вимірюваних величин, трансформатор у зазначеному вище типовому режимі роботи). Для модуля напруг похибка не повинна перевищувати 0,15%, для кута зсуву фаз напруг 0,08 градуса, для струму 1%.

Висновки. Наведені в роботі матеріали дозволяють визначати значення показників якості найбільш вживаної, для контролю стану обмоток, діагностичної моделі, аналізувати залежності показників від режимів роботи трансформатора, визначати необхідну точність методик та обладнання контролю. Отримані результати показують, що при використанні розглянутої моделі і загальнодоступних в експлуатації засобів виміру (клас точності вимірювальних трансформаторів 0,5 і 1) практично неможливо забезпечити гарантовану похибку

розрахунку модулю опору z_c на рівні 1%. Навіть досягнення гарантованої похибки менше 3% без дотримання додаткових умов контролю проблематично (3% - значення припустимої для подальшої експлуатації зміни значення модуля опору, який визначається за тестовим контролем).

Список використаних джерел

1. Бутырин П. А., Алпатов М. Е. Непрерывная диагностика трансформаторов // Электричество. – 1998. – №7. – С.45-55.
2. Хоанг Ванг Ньу, Малиновский В. Н. Методы и средства контроля и диагностики состояния обмоток мощных силовых трансформаторов // Электротехника. - 2009. – №10. – С.36-41.
3. Хренников Л. Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях // Электричество. - 2006. – № 7. – С.17-24.
4. Антипов Г. В., Горшунов В. Ю, Малиновский В. Н., Скляр А. П. Хубларов Н. Н. Система диагностики механического состояния обмоток мощных двухобмоточных трансформаторов. // Измерительная техника. - 1996. - №9. - С. 40-44.
5. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
6. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / И. Влах, К. Сингхал – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
7. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский – М.: МЭИ, 2006. – Т.1. – 652 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК

Беляев В. К., Паненко Е. Н.

Описана методика оценки погрешностей и чувствительности наиболее часто используемой, для контроля состояния обмоток, диагностической модели трансформатора. Показана необходимость использования более качественных моделей.

Abstract

RESEARCH OF THE SIMPLIFIED MODEL OF THE POWER TRANSFORMER FOR SYSTEMS OF AUTOMATIC MONITORING OF THE CONDITION OF WINDINGS

V. Beliaev, H. Panenko

The method of an estimation of errors and sensitivity of the most used, for the monitoring of windings condition, diagnostic model of the transformer is presented. Necessity of use of better models is shown.