

УДК 621.314

В. М. Кутін, д. т. н., проф.;

В. Б. Одреховський, бакалавр

ДОСЛІДЖЕННЯ КИДКІВ СТРУМУ НАМАГНІЧУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

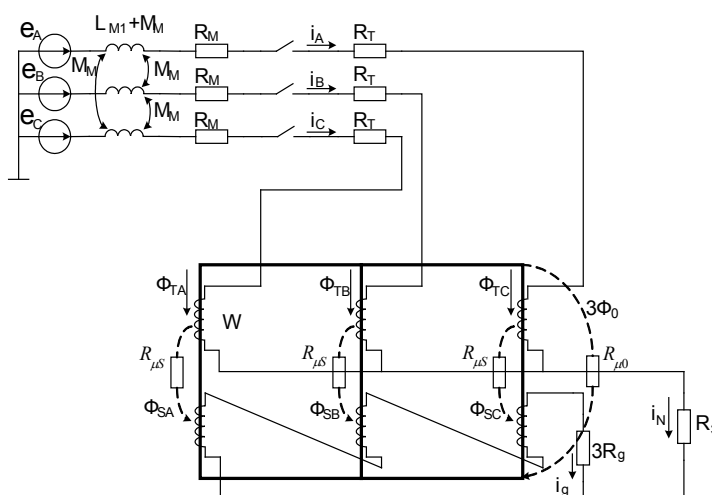
Запропоновано математичну модель для дослідження кидків струму намагнічування (КСН) при вмиканні силового трансформатора до мережі. Показано, що розрахункові види КСН з достатньою точністю визначаються параметрами системи і насиченого трансформатора. Математична модель дозволяє порівнювати відстроювання від КСН різних реле і розраховувати параметри спрацювання захисту за параметрами системи і трансформатора або однофазного КСН. Розроблено програму розрахунків струмів у фазах трансформаторів, що дозволяє автоматизувати процес дослідження роботи трансформатора під час КСН і підвищити точність спрацювання і чутливість диференційного захисту трансформаторів великої потужності.

Релейний захист трансформаторів повинен надійно функціонувати в аварійних і аномальних режимах роботи. До аварійних режимів відносять усі види внутрішніх к.з., до аномальних — кидок струму намагнічування (КСН), надзбудження, перевантаження, зовнішні к.з. та інші.

Найсуттєвіший негативний вплив на роботу релейного захисту в аномальних режимах має кидок струму намагнічування. Форма КСН суттєво несинусоїдальна, а характеристики параметрів процесу є випадковими величинами, які залежать від моменту комутації при вмиканні та вмиканні трансформатора. В практиці релейного захисту користуються граничними характеристиками КСН. Практичні методи розрахунку КСН досліджувались рядом науковців, однак підвищення одиничної потужності трансформаторів, удосконалення релейного захисту ставить задачу глибшого дослідження процесів в трансформаторі в аварійних і аномальних режимах роботи, які важко розпізнаються.

В роботі ставилась задача побудови математичної моделі трифазного трансформатора при його насиченні для дослідження впливу на роботу релейного захисту кидків струму намагнічування. Розглядалась схема заміщення електричної мережі і трифазного тристержневого трансформатора «зірка з нулем—трикутник» при вмиканні його на холостий хід зі сторони зовнішньої обмотки. Трансформатор вважався симетричним, оскільки несиметрія стану крайніх і середнього осердя для магнітного потоку є не суттєвою при розрахунку КСН.

На рисунку зображена розрахункова схема електричної мережі і трифазного тристержневого трансформатора «зірка з нулем – трикутник» при вмиканні його на холостий хід зі сторони зовнішньої обмотки.



Розрахункова схема електричної мережі і трифазного трансформатора при вмиканні його на холостий хід

Для побудови математичної моделі трифазного трансформатора будемо його вважати симетричним, оскільки несиметрія стану крайніх і середнього осердя для магнітного потоку є не суттєвою при розрахунку КСН.

Процеси, які відбуваються в первинному диференційному контурі трансформатора при вмиканні його до мережі, можна описати такою системою рівнянь:

$$e_A = (L_{M1} + M_M) \frac{di_A}{dt} + M_M \frac{di_B}{dt} + M_M \frac{di_C}{dt} + (R_M + R_T) i_A + R_3 i_N + W \frac{d(\Phi_{TA} + \Phi_{SA})}{dt}; \quad (1)$$

$$e_B = (L_{M1} + M_M) \frac{di_B}{dt} + M_M \frac{di_C}{dt} + M_M \frac{di_A}{dt} + (R_M + R_T) i_B + R_3 i_N + W \frac{d(\Phi_{TB} + \Phi_{SB})}{dt}; \quad (2)$$

$$e_C = (L_{M1} + M_M) \frac{di_C}{dt} + M_M \frac{di_A}{dt} + M_M \frac{di_B}{dt} + (R_M + R_T) i_C + R_3 i_N + W \frac{d(\Phi_{TC} + \Phi_{SC})}{dt}; \quad (3)$$

$$\sum_{j=A}^C i_j = i_N = 3i_0, \quad j = A, B, C. \quad (4)$$

Для ланцюгів вторинної обмотки трансформатора, яка з'єднана в трикутник

$$W \frac{d}{dt} \sum_{j=A}^C \Phi_{Tj} + R_g i_g = 0, \quad j = A, B, C. \quad (5)$$

Для магнітних полюсів трансформатора

$$(i_j + i_g) W = i_{\mu j} W + 3\Phi_0 R_{\mu 0}; \quad (6)$$

$$i_j W = \Phi_{Sj} R_{\mu S} - 3\Phi_0 R_{\mu 0}; \quad (7)$$

$$\sum_{j=A}^C (\Phi_{Tj} + \Phi_{Sj}) + 3\Phi_0 = 0, \quad j = A, B, C, \quad (8)$$

де e_A, e_B, e_C — фазні е.р.с., які дорівнюють фазним напругам в точці підключення трансформатора до його вмикання; L_{M1}, M_M — еквівалентні індуктивності прямої послідовності і взаємна індуктивність фаз мережі, що живить трансформатор; R_M, R_3, R_g, R_T — еквівалентний активний опір: мережі, що живить трансформатор, заземлення, вторинної обмотки, з'єднаної в трикутник, зведений до числа витків первинної обмотки W ; електричний опір первинної обмотки трансформатора, відповідно; $\Phi_{TA}, \Phi_{TB}, \Phi_{TC}$ — магнітні потоки в стержнях; $\Phi_{SA}, \Phi_{SB}, \Phi_{SC}, 3\Phi_0$ — магнітні потоки розсіювання між обмотками і між ярами поза межами обмоток; $R_{\mu S}, R_{\mu 0}$ — магнітний опір цим потокам; i_A, i_B, i_C, i_N — струми в фазах і нейтралі трансформатора; $i_N = i_A + i_B + i_C$; i_g — струм у вторинних обмотках, з'єднаних в трикутник, зведений до кількості витків первинної обмотки W ; $i_{\mu j}$ — намагнічувальні струми стержнів А, В, С трансформатора.

Магнітні опори $R_{\mu 0}$ і $R_{\mu S}$ зручніше виразити через індуктивності:

$$R_{\mu 0} = \frac{i_{\mu 0} W^2}{3\Phi_0 W} = \frac{W^2}{3L_{\mu 0}}; \quad (9)$$

$$R_{\mu S} = \frac{(i_j + i_{\mu 0}) W^2}{\Phi_{Sj} W} = \frac{W^2}{L_{ST}}, \quad (10)$$

де $L_{ST}, L_{\mu 0}$ — індуктивності короткого замикання трансформатора і нульової послідовності;

$i_j = i_{\mu j} - i_g - i_{\mu 0}$, $j = A, B, C$, тоді результуюче потокозчеплення фази можна подати як

$$\psi_j = L_{M1} i_{\mu j} + W(\Phi_{Tj} + \Phi_{Sj}) = (L_{M1} + L_B) i_{\mu j} + \psi_{Mj}, \quad j = A, B, C, \quad (11)$$

де L_B — диференційна індуктивність обмотки насиченого трансформатора, яка дорівнює індуктивності обмотки при заміні стержня повітрям; ψ_{Mj} — потокозчеплення, зумовлене намагніченістю сталі при повному насиченні ($\psi_{Mj} = \psi_S$).

Введемо позначення

$$T = \frac{L_{M1} + L_B}{R_M + R_T}; \quad T_1 = \frac{L_{M1} + L_B}{3R_3}; \quad T_2 = \frac{L_{M1} + L_B}{R_g},$$

тоді в загальному вигляді рівняння (1)—(3) можна подати як

$$\left. \begin{aligned} \frac{e_j}{\omega(L_{M1} + L_B)} - \frac{i_j}{\omega T} + f(i_g, i_{\mu 0}, i_0) &= \frac{1}{L_{M1} + L_B} \frac{d\psi_j}{d\omega t}; \\ f(i_g, i_{\mu 0}, i_0) &= \frac{L_{M1}}{L_{M1} + L_B} \frac{d}{d\omega t} (i_g + i_{\mu 0}) - \frac{L_{M0} - L_{M1}}{L_{M1} + L_B} \frac{di_0}{d\omega t} - \frac{i_0}{\omega T_1}; \\ \frac{\psi_j}{L_{M1} + L_B} &= i_{\mu j} + \frac{\psi_{Mj}}{L_{M1} + L_B}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де $\omega = 2\pi f$ — кутова частота мережі; $L_{M0} = L_{M1} + 3M_M$ — еквівалентна індуктивність нульової послідовності; $j = A, B, C$.

Перша складова рівняння (12) є вимушеною складовою струму ($i_{\text{вим}}$) швидконасихуючого трансформатора струму при насиченому магнітопроводі, амплітуда якої

$$I_m = \frac{E_m}{\omega(L_{M1} + L_B)} = \frac{\psi_M}{L_{M1} + L_B}, \quad (13)$$

де $\psi_M = \frac{E_m}{\omega}$ — амплітуда вимушеного потокозчеплення.

Об'єднавши рівняння (1)—(3), отримаємо

$$W \frac{d}{dt} \sum_{j=A}^C (\Phi_{Tj} + \Phi_{Sj}) + L_{M0} \frac{di_N}{dt} + (R_M + R_T + 3R_3) i_N = 0, \quad j = A, B, C. \quad (14)$$

Із (8) з урахуванням (9) отримаємо ще одне рівняння

$$W \frac{d}{dt} \sum_{j=A}^C (\Phi_{Tj} + \Phi_{Sj}) + 3L_{\mu 0} \frac{di_{\mu 0}}{dt} = 0, \quad j = A, B, C, \quad (15)$$

де $W \frac{d}{dt} \sum_{j=A}^C \Phi_{Sj} = L_{ST} \frac{d}{dt} (i_N + 3i_{\mu 0})$, $j = A, B, C$.

Із (14) з урахуванням (15) і (5) отримаємо

$$L_{M0} \frac{di_0}{dt} + (R_M + R_T + 3R_3) i_0 + L_{ST} \frac{d}{dt} (i_0 + i_{\mu 0}) = R_g i_g \quad (16)$$

або

$$\frac{L_{M0}}{L_{M1} + L_B} \frac{di_0}{d\omega t} + \left(\frac{1}{\omega T} + \frac{1}{\omega T_1} \right) i_0 + \frac{L_{ST}}{L_{M1} + L_B} \frac{d}{d\omega t} (i_g + i_{\mu 0}) = \frac{1}{\omega T_2} i_g, \quad (17)$$

де $i_0 = \frac{1}{3} i_N = \frac{1}{3} \sum_{j=A}^C i_N$, $j = A, B, C$.

Використовуючи побудовану математичну модель, розроблено програму розрахунків струмів у фазах трансформаторів. Вона дозволяє автоматизувати процес дослідження роботи трансформатора під час кидків струмів намагнічування і підвищити точність спрацювання і чутливість поперечного диференційного захисту трансформаторів великої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. — М.: НЦ ЭНАС, 2002. — 216 с.
2. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 240 с.
3. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. РД 345.467.302-89. — М.: Союзтехэнерго. — 1989. — 27 с.
4. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. РД 34.46.303-89. — М.: Союзтехэнерго. — 1990. — 57 с.
5. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 240 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05
Рекомендована до друку 22.11.05

Кутін Василь Михайлович — професор кафедри електричних станцій та систем, **Одреховський Вадим Броніславович** — студент Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет