УДК 621.314.226

В. М. Кутін, д. т. н., проф.;
В. Б. Одреховський

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КИДКІВ СТРУМУ НАМАГНІЧУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Запропоновано математичну модель для дослідження кидків струму намагнічування (КСН) в момент вмикання силового трансформатора у мережу. 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 за характеристиками однофазного КСН.

Аналіз пошкоджень трансформаторів великої потужності (понад 25 МВ·А) [1] показав, що пошкодження електричної міцності ізоляції перевищує 50 % загальної кількості пошкоджень. Вартість ремонту трансформатора, який пошкодився в результаті внутрішнього короткого замикання (к.з.), вимкнутого релейним захистом, у середньому складає 65—70 %, а в деяких випадках наближається до його оптової ціни. Ремонт трансформатора, вимкнутого використовуваним у теперішній час релейним захистом, після внутрішнього к. з. вимагає, як правило, заміни усіх обмоток, тому час ремонту значно перевищує норму планово-попереджувального капітального ремонту. У разі виникнення пожежі трансформатор узагалі не підлягає ремонту.

Для зниження втрат від аварійних пошкоджень потужних трансформаторів можливі такі взаємопов'язані напрямки:

— підвищення надійності на стадії конструювання та виготовлення;

— удосконалення системи технічного діагностування, яка здатна фіксувати пошкодження на ранній стадії їх розвитку;

— удосконалення системи релейного захисту від внутрішніх пошкоджень та ненормального режиму роботи;

— застосування системи автоматичного пожежегасіння.

Підвищення надійності на стадії конструювання та виготовлення вимагає значних капітальних витрат. Ефективність системи діагностування залежить від рівня вірогідності діагнозу та автоматизації процесу діагностування. Під час експлуатації необхідно контролювати електричний і механічний стан ізоляції обмоток, відгалужень, перемикачів, магнітопроводів, конструктивних частин, залишкової деформації і стану запресовування обмоток, вібрацію, справність підсистеми заземлення активних частин, характеристики трансформаторного масла, нагрів контактів і струмопровідних частин, справність системи охолодження. Далеко не усі перевірки можна здійснювати без виведення трансформатора з роботи.

Незважаючи на успіхи, досягнуті в розробці методів і засобів діагностування пошкоджень, що розвиваються, шляхом аналізу розчинених в маслі газів, вимірювання й локалізування часткових розрядів, вимірювання під напругою [2, 3, 4], вдосконалення системи діагностування не може суттєво вплинути на зниження вимог до засобів релейного захисту й систем пожежегасіння.

Релейний захист від внутрішніх к.з. трансформатора повинен надійно функціонувати в аварійних і нормальних режимах роботи. До аварійних режимів роботи відносять усі види внутрішніх к.з., до анормальних — кидки струму намагнічування, надзбудження, перевантаження, зовнішні к.з. та інші.

Розробка досконаліших пристроїв релейного захисту трансформатора, який по-різному має функціонувати в режимах, що важко розпізнаються, є складною, багатоваріантною задачею синтезу.

В цій статті ставиться задача побудови математичної моделі трифазного трансформатора при його насиченні для дослідження впливу на роботу релейного захисту кидків струму намагнічування (КСН). Найбільші КСН виникають в ненавантажених трансформаторах, але вони можливі і в навантажених і навіть в закорочених трансформаторах. В най несприятливішому випадку, тобто в разі вмикання трансформатора в момент проходження напруги через нуль, коли вимушений магні-

© В. М. Кутін, В. Б. Одреховський, 2005

тний потік в момент вмикання максимальний, і залишковий потік також максимальний, але має протилежну полярність, максимальна величина потоку може більше, ніж в 2 рази перевищувати номінальну величину і магнітне осердя глибоко насичується, струм намагнічування збільшується в сотні разів. Тобто за величиною він може перевищувати номінальний у декілька разів. З часом КСН затухає до усталеного значення і не перевищує 5—7 % від номінального.

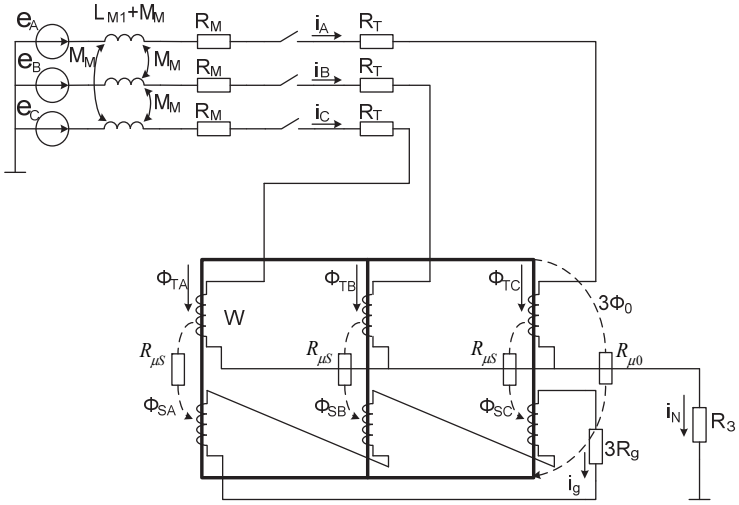

Рис. 1. Розрахункова схема електричної мережі і трифазного трансформатора в разі вмикання його на холостий хід

Форма КСН суттєво несинусоїдальна, параметри процесу є випадковими величинами, які залежать від моменту комутації під час вимикання трансформатора і його вмикання. Можливі трифазні КСН, двофазні, однофазні і послідовні КСН. Визначаючи початкові умови, ці види КСН є розрахунковими, тому їх доцільно використовувати для розрахунку параметрів спрацювання й перевірки поведінки релейного захисту в лабораторних умовах за допомогою спеціальних моделей КСН.

На рис. 1 зображена розрахункова схема електричної мережі і трифазного тристержневого трансформатора «зірка з нулем — трикутник» в разі вмикання його на холостий хід зі сторони зовнішньої обмотки.

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

Процеси, які відбуваються в первинному диференціальному контурі трансформатора в разі вмикання його до мережі можна описати такою системою рівнянь:

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

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

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

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

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

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

Для магнітних полюсів трансформатора

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

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

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

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, $R_з$, R_g, R_T — еквівалентний активний опір: мережі, що живить трансформатор; заземлення; вторинної обмотки, з'єднаної в трикутник, приведений до числа витків первинної обмотки W; електричний опір первинної обмотки трансформатора, відповідно; Φ_{TA}, Φ_{TB}, Φ_{TC} — магнітні потоки в стержнях; Φ_{SA}, Φ_{SB}, Φ_{SC}, $3\Phi_o$ — магнітні потоки розсіювання між обмотками і між ярмами поза межами обмоток; $R_{\mu S}$, $R_{\mu o}$ — магнітий 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, приведений до кількості витків первинної обмотки W; $i_{\mu j}$ — намагнічувальні струми стержнів A, B, C трансформатора.

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

$$R_{\mu o} = \frac{i_{\mu o} W^2}{3\Phi_o W} = \frac{W^2}{3L_{\mu o}}; \tag{9}$$

$$R_{\mu S} = \frac{\left(i_j + i_{\mu o}\right) W^2}{\Phi_{Sj} W} = \frac{W^2}{L_{ST}}, \tag{10}$$

де L_{ST}, $L_{\mu o}$ — індуктивності короткого замикання трансформатора і нульової послідовності; $i_j = i_{\mu j} - i_g - i_{\mu o}$, $j = A, B, C$, тоді підсумкове потокозчеплення фази можна подати як

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

де L_B — диференціальна індуктивність обмотки насиченого трансформатора, яка дорівнює індуктивності обмотки у разі заміни стержня повітрям; ψ_{Mj} — потокозчеплення, зумовлене намагніченністю сталі у разі повного насичення $\left(\psi_{Mj} = \psi_S\right)$.

Введемо позначення $T = \dfrac{L_{M1} + L_B}{R_M + R_T}$; $T_1 = \dfrac{L_{M1} + L_B}{3R_з}$; $T_2 = \dfrac{L_{M1} + L_B}{R_g}$, тоді в загальному вигляді рівняння (1)—(3) можна подати як

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

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

Перша складова рівняння (12) є вимушеною складовою струму $\left(i_{вим.}\right)$ швидконасичуваного трансформатора струму в насиченому магнітопроводі, амплітуда якої

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

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

Об'єднавши рівняння (1)—(3) отримаємо

$$W\frac{d}{dt}\sum_{j=A}^{C}\left(\Phi_{TJ}+\Phi_{SJ}\right)+L_{Mo}\frac{di_N}{dt}+\left(R_M+R_T+3R_з\right)i_N=0,\ j=A,\ B,\ C. \qquad (14)$$

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

$$W\frac{d}{dt}\sum_{j=A}^{C}\left(\Phi_{TJ}+\Phi_{SJ}\right)+3L_{\mu o}\frac{di_{\mu o}}{dt}=0,\ j=A,\ B,\ C, \qquad (15)$$

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

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

$$L_{Mo}\frac{di_o}{dt}+\left(R_M+R_T+3R_з\right)i_o+L_{ST}\frac{d}{dt}\left(i_o+i_{\mu o}\right)=R_g i_g \qquad (16)$$

або

$$\frac{L_{Mo}}{L_{M1}+L_B}\frac{di_o}{d\omega t}+\left(\frac{1}{\omega T}+\frac{1}{\omega T_1}\right)i_o+\frac{L_{ST}}{L_{M1}+L_B}\frac{d}{d\omega t}\left(i_g+i_{\mu o}\right)=\frac{1}{\omega T_g}i_g, \qquad (17)$$

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

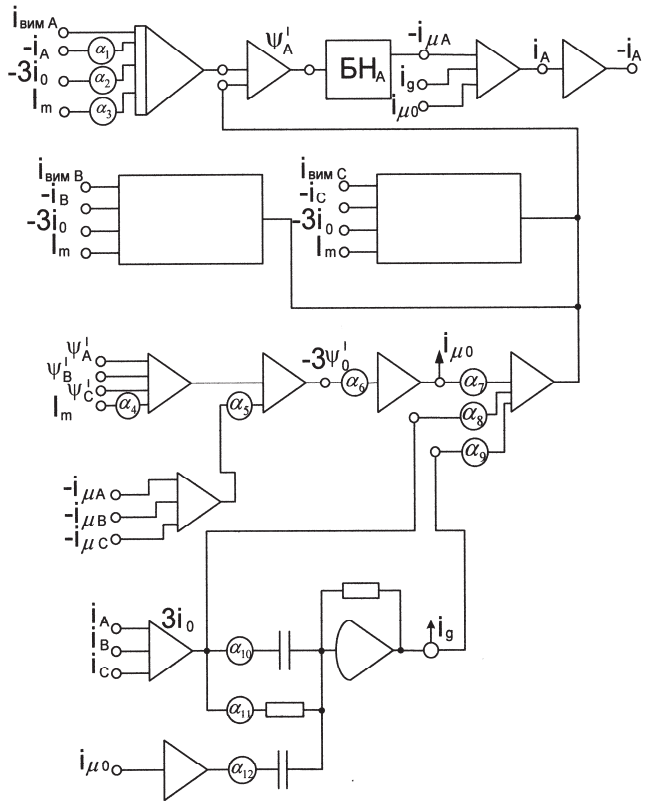

Рис. 2. Схема аналогової моделі трифазного трансформатора під час КСН

За отриманими рівняннями (8), (9), (11), (12), (16) можна скласти схему аналогової моделі для дослідження поведінки трансформатора і диференціального захисту у разі КСН. Наприклад, на рис. 2 показано один з можливих варіантів схеми аналогової моделі. Оскільки схеми аналогової моделі для фази А, В, С аналогічні, то в розгорнутому вигляді показано схему тільки для фази А. На рис. 2 також не показана схема моделювання симетричної трифазної системи вимушеної складової струму.

Для зручності переходу на моделі (рис. 2) від дійсної вебер-амперної характеристики до спрощеної необхідно набирати на блоках нелінійності (БН) зміщення по осі ψ залежності $i_\mu\left(\psi'\right)$, наприклад, для фази А (рис. 2)

$$\psi'_A=i_{\mu A}+I_m\left(\frac{\psi_{MA}}{\psi_m}-\frac{\psi_{HA}}{\psi_m}\right),$$

де ψ_H — початкове потокозчеплення, яке відповідає нулю характеристики, що набирається.

Якщо прийняти $\omega_M=2\pi f_m=1$, то величини коефіцієнтів можна визначити як:

$$\alpha_1=1/(\omega T);\ \alpha_2=1/(3\omega T_1);$$

$$\alpha_3=\left(\psi_{зал.A}-\psi_{HA}\right)/\psi_m;\ \alpha_4=\left(\psi_{HA}+\psi_{HB}+\psi_{HC}\right)/\psi_m;\ \alpha_5=\alpha_7=\alpha_9=L_{M1}/\left(L_{M1}+L_B\right);$$

$$\alpha_6=\left(L_{M1}+L_B\right)/\left(3L_{\mu o}\right);\ \alpha_8=\left(L_{Mo}-L_{M1}\right)/3\left(L_{M1}+L_B\right);$$

$$\alpha_{10}=\frac{1}{3}\omega T_2\left(L_{Mo}-L_{ST}\right)/\left(L_{M1}+L_B\right);\ \alpha_{11}=\frac{1}{3}\left(\frac{T_2}{T}+\frac{T_2}{T_1}\right);\ \alpha_{12}=\frac{\omega T_2 L_{ST}}{L_{M1}+L_B}.$$

З урахуванням фаз В і С в моделі використовується 18 коефіцієнтів, в які входять 9 комбінацій величин $\left(\omega T;\ \omega T_1;\ \omega T_2;\ \frac{\Psi_{зал.A}}{\Psi_m};\ \frac{\Psi_{зал.B}}{\Psi_m};\ \frac{L_{ST}}{L_{M1}+L_B};\ \frac{L_{M1}}{3(L_{M1}+L_B)};\ \frac{(L_{Mo}-L_{M1})}{(L_{M1}+L_B)};\ \frac{(L_{M1}+L_B)}{3L_{\mu o}}\right)$ тобто на одиницю менше, ніж кількість незалежних параметрів $\left(R_M+R_T;\ R_з;\ R_g;\ \Psi_{зал.A};\ \Psi_{зал.B};\ L_{M1};\ L_{Mo};\ L_{ST};\ L_B;\ L_{\mu 2}\right)$.

Висновок

1. Запропоновану модель трифазного трансформатора можна використати для досліджень КСН. Розрахункові види КСН визначаються параметрами системи і насиченого трансформатора. Це дозволяє порівнювати відстроювання від КСН різних реле і розраховувати параметри спрацювання захисту за параметрами системи і трансформатора або за характеристиками однофазного КСН.

2. В результаті затухання змінюються характеристики КСН. У будь-якому розрахунковому вигляді КСН ці характеристики визначаються з використанням однієї і тієї ж узагальненої кривої затухання, побудованої за методом, який грунтується на використанні породжувальної задачі [5]. Узагальнена крива затухання дозволяє визначити параметри трансформатора з насиченим магнітопроводом по осцилограмі струму вмикання, моделювати КСН в пристроях для випробування релейного захисту.

3. Для релейного захисту кінцевим параметром є параметр його спрацювання. Збитковий запас в ньому визначається коефіцієнтом надійності, який приймають 1,3—1,5. В разі розрахунку КСН в якості вхідних даних використовуються індуктивності обмоток в повітрі, що створює запас порядка 30 %; додатковий запас створюється вибором граничної залишкової індукції в якості розрахункових величин. Активний опір проводів збільшується на 4 % при нагріванні на кожні 10 °С, а можливі відхилення температури від розрахункової складає не більше 10...20 °С.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алеексеев 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.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 11.01.05
Рекомендована до друку 10.05.05

Кутін Василь Михайлович — професор кафедри електричних станцій та систем;
Одреховський Вадим Броніславович — студент Інституту електроенергетики, екології та електромеханіки
Вінницький національний технічний університет