

цов К.І. Автоматизація керування потоками потужності в електроенергетичних системах з використанням методів теорії подібності // Пр. Донецького держ. техн. ун-ту. – 2000. – Вип. 17. – С. 124–128. 7. Лежнюк П.Д., Кравцов К.І. Розв’язання задач чутливості оптимального керування критеріальним методом // Пр. Міжнар. конф. з управління “Автоматика-2000”. Управління та ідентифікація в умовах невизначеності. Т.2. – Львів, 2000. – С. 155–160.

УДК 621.314.2

Г. Лисяк, А. Маліновський, М. Зубрицький

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕПМС

ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ АГРЕГАТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ СТРУМІВ ВИТКОВИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

© Лисяк Г., Маліновський А., Зубрицький М., 2001

У статті описано моделювання з використанням методу симетричних складових усталених режимів виткових коротких замикань трифазного двотрансформаторного агрегату для оцінки рівня струмів при різних схемах з’єднання його обвиток.

In the article modeling steady state of faults between turns in three phase two transformer block for current level evaluation due to its winding connection using symmetrical component approach is given.

Надійність роботи силових трансформаторів, які належать до основного обладнання електричних станцій і підстанцій, значною мірою визначає надійність роботи системи вироблення і розподілу електроенергії. Однією з найрозповсюдженіших причин виходу з ладу трансформаторів є виткові короткі замикання (ВКЗ) [1]. Під час ВКЗ виникають надструми у замкнених витках і гілці, що утворила замикання. Вони спричиняють недопустимі місцеві нагрівання і великі динамічні зусилля на замкнені витки, що за відсутності відповідних заходів може призвести до руйнування обвитки трансформатора.

Існує можливість знизити рівень надструмів ВКЗ застосуванням двотрансформаторних агрегатів, у яких значення струму в гілці, що утворила замикання, залежить від значення струмів намагнічування трансформаторів та кількості замкнених витків. Для спрощення викладення надалі двотрансформаторний агрегат називатимемо агрегатом. Принципова схема агрегату з двома двообвитковими трансформаторами Т1 і Т2 показана на рис. 1.

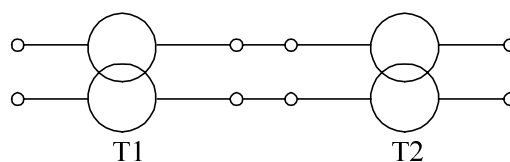


Рис. 1. Принципова схема агрегату

Агрегати можуть бути як однофазними, так і трифазними з будь-якою схемою з’єднання обвиток: зірка, зірка з нулем, трикутник і містити трансформатори з довільною

кількістю обвиток. Надалі розглядаємо лише трифазні агрегати, які можуть складатись як із тристрижневих трансформаторів, так і з груп однофазних трансформаторів (трансформаторних груп).

З метою оцінки рівня струмів ВКЗ у агрегатах за допомогою методу симетричних складових [2] розроблена модель, у якій замкнену частину витків розглядаємо як ще одну обвитку [3], а ВКЗ – як поздовжню несиметрію у схемі агрегату. Під час розрахунків прийняті такі умови та припущення:

- магнітні системи трансформаторів агрегату ненасичені, тобто їхні характеристики лінійні;
- нехтуємо можливою несиметрією трифазного осердя (для тристрижневих трансформаторів), резистансами гілок схеми і втратами активної потужності у магнітній системі агрегату;
- агрегат під'єднаний до двох трифазних джерел живлення, напруги яких є синусоїдними, симетричними з незмінними амплітудними значеннями як у нормальному режимі, так і під час ВКЗ.

Особливості моделювання та вплив схем з'єднання обвиток на рівень струмів ВКЗ розглянемо для випадку замикання всіх витків обвитки однієї фази вищої напруги одного з трансформаторів агрегату, що відповідає замиканню виводів цієї обвитки, для таких схем з'єднань:

- зірка з заземленою нейтраллю – зірка з заземленою нейтраллю (Y_0/Y_0);
- зірка з заземленою нейтраллю – зірка (Y_0/ Y або Y/Y_0);
- зірка з заземленою нейтраллю – трикутник (Y_0/Δ або Δ/Y_0);
- зірка – зірка (Y/ Y);
- зірка – трикутник (Y/Δ або Δ/ Y);
- трикутник – трикутник (Δ/Δ).

З метою порівняння вважаємо, що для всіх схем з'єднань трансформатори мають однакові: лінійні напруги $U_{Вном}$, $U_{Нном}$; номінальну потужність $S_{ном}$; струм неробочого ходу $I_{нх}$ і напругу короткого замикання U_K , виражені у відсотках.

На рис. 2 зображені трифазні схеми для першого (Y_0/Y_0) та останнього (Δ/Δ) видів з'єднання обвиток агрегату під час замикання всіх витків обвитки фази А трансформатора Т1. Таку поздовжню несиметрію можна інтерпретувати як розрив двох фаз В і С між точками несиметрії L і L'. Аналогічно можна одержати схеми для інших з'єднань обвиток.

Надалі використовуємо такі позначення параметрів та співвідношення між ними:

- опори джерел живлення окремих послідовностей відповідно однакові, тобто $x_{A1} = x_{A2} = x_{A0} = x_A$; $x'_{a1} = x'_{a2} = x'_{a0} = x'_a$;
- зведені опори розсіювання обвиток трансформаторів для різних послідовностей однакові, тобто $x_{в1} = x_{в2} = x_{в0} = x_в$, $x'_{н1} = x'_{н2} = x'_{н0} = x'_н$;
- індуктивні опори гілок намагнічування трансформаторів для прямої та зворотної послідовностей однакові, тобто $x_{\mu 1} = x_{\mu 2} = x_{\mu}$.

Однофазні розрахункові схеми прямої та зворотної послідовностей можна одержати з електричної заступної схеми трансформаторного агрегату [4] у випадку рівності коефіцієнтів трансформації трансформаторів Т1 і Т2. Такі схеми для особливої фази А по відношенню до місця поздовжньої несиметрії показані на рис. 3.

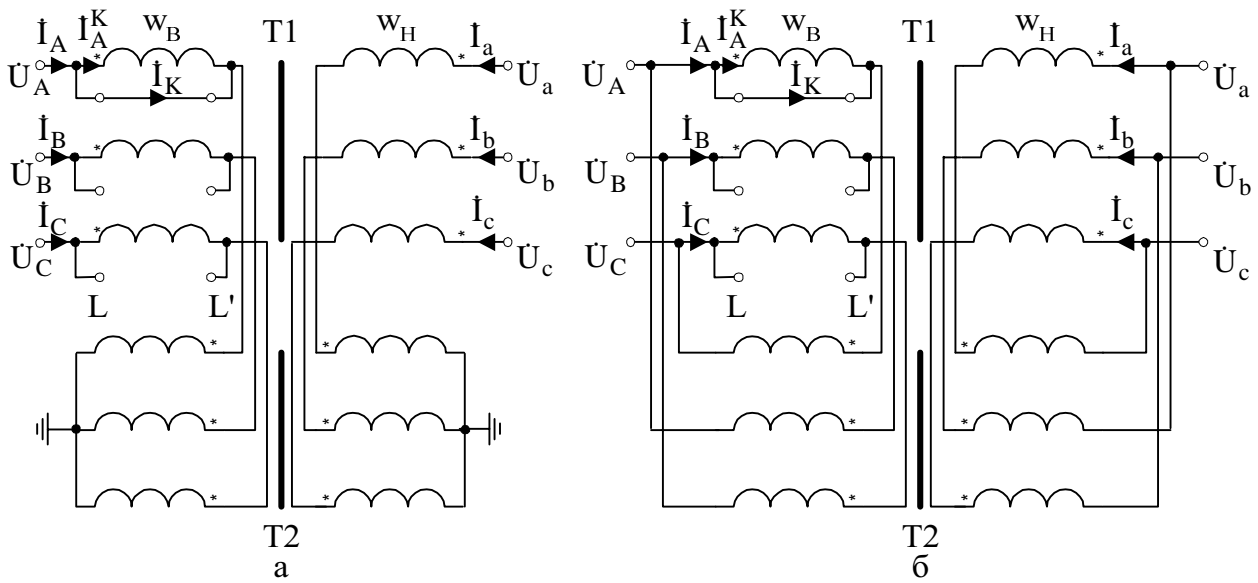


Рис. 2. Схеми агрегату:
а – Y_0/Y_0 ; б – Δ/Δ

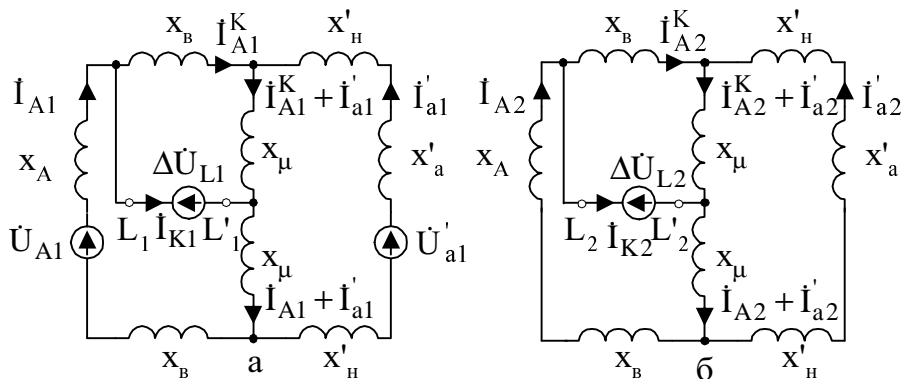


Рис. 3. Розрахункові схеми послідовностей агрегату:
а – прямої; б – зворотної

Зазначимо, що для випадків з'єднання обвитки вищої напруги агрегату трикутником під \dot{U}_{A1} і \dot{U}'_{a1} розуміємо лінійні напруги. Тоді параметри розрахункових схем окремих послідовностей, зведені до лінійної напруги, будуть утричі більші за відповідні параметри для схеми з'єднання зіркою.

Схеми нульової послідовності визначаються конструкцією і схемою з'єднання обмоток агрегату. Для групи однофазних трансформаторів магнітні потоки, створені струмами нульової послідовності фаз, замикаються по окремих магнітопроводах трансформаторів, внаслідок чого індуктивний опір гілки намагнічування нульової послідовності таких трансформаторів можна прийняти таким, що дорівнює відповідному опору прямої послідовностей. У трифазному тристрижневому трансформаторі магнітний потік, створений струмами нульової послідовності, замикається через навколишнє середовище з великим магнітним опором, тому його опір гілки намагнічування нульової послідовності менший за

опір прямої послідовності. Залежно від конструкції трансформатора цього типу індуктивний опір гілки намагнічування нульової послідовності у відносних номінальних одиницях знаходиться в межах $x_{\mu 0}^* = 0,3 \div 1$ [5].

На рис. 4 зображені розрахункові схеми нульової послідовності агрегату для усіх можливих з'єднань його обмоток зіркою.

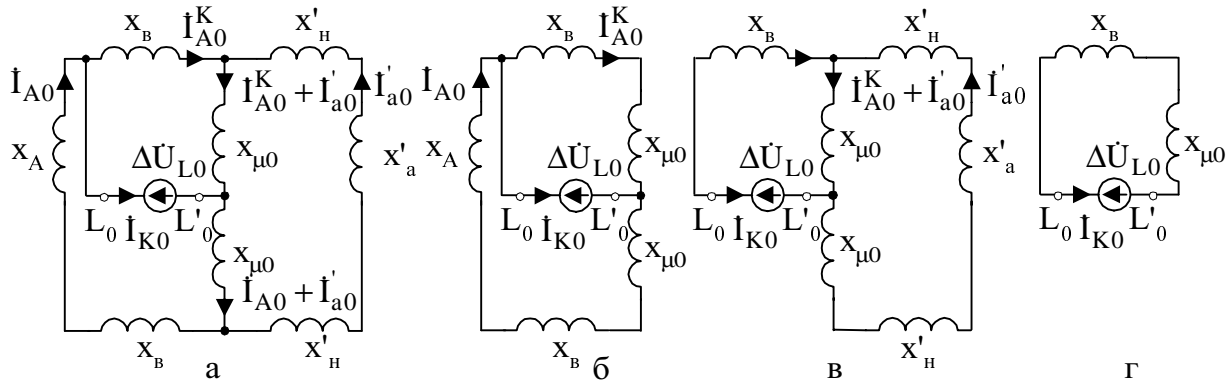


Рис. 4. Розрахункові схеми нульової послідовності агрегату для з'єднання обмоток зіркою:
 а – Y_0/Y_0 ; б – Y_0/Y ; в – Y/Y_0 ; г – Y/Y

У випадку з'єднання обмоток трикутником струми нульової послідовності, протікаючи у обмотках, не виходять у зовнішнє коло. Отже, прийнявши, що відповідні опори джерел живлення дорівнюють нулю, схеми рис. 4 можна застосовувати і для з'єднання обмоток трикутником. Так, якщо у схемі рис. 4, а прийняти $x_A = 0$, то одержимо схему для з'єднання Δ/Y_0 ; якщо $x'_a = 0$, то $-Y_0/\Delta$; якщо $x_A = 0$ та $x'_a = 0$ – то Δ/Δ .

Для схеми рис. 4, б у випадку $x_A = 0$ одержуємо схему для з'єднання Δ/Y , а для схеми рис. 4, в у випадку $x'_a = 0$ – Y/Δ .

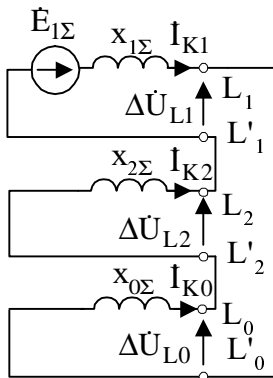


Рис. 5. Комплексна розрахункова схема ВКЗ

Комплексна розрахункова схема агрегату під час ВКЗ має відомий вигляд [2] і зображена на рис. 5. З неї можна одержати вираз струму у гілці, що утворила замикання

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} + I_{K0} = \frac{3 \cdot \dot{E}_{1\Sigma}}{j \cdot (x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} \quad (1)$$

Вирази для порівняння впливу схем з'єднань обмоток на рівень струмів ВКЗ найпростіше отримати, прийнявши, що джерела живлення є джерелами безмежної потужності, тобто $x_A = 0$, $x'_a = 0$, а відповідно зведені опори розсіювання обмоток трансформаторів рівні між собою: $x_B = x'_H$. Застосувавши розрахункові схеми послідовностей, закони Кірхгофа та принципи еквівалентування електричних кіл знаходимо параметри комплексної розрахункової схеми.

Еквівалентна ЕРС прямої послідовності:

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \dot{U}_{A1} / 2; \quad (2)$$

Еквівалентні опори прямої та зворотної послідовностей однакові і визначаються з виразу

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = (x_B + x_{\mu}) / 2. \quad (3)$$

Залежно від схеми з'єднання обвиток еквівалентний опір нульової послідовності розраховується для випадків

$$(a) \text{ і } (б): x_{0\Sigma} = (x_B + x_{\mu 0}) / 2; \quad (4)$$

$$(в): x_{0\Sigma} = [2 \cdot x_B \cdot (x_B + 2 \cdot x_{\mu 0}) + x_{\mu 0}^2] / [2 \cdot (x_B + x_{\mu 0})]; \quad (5)$$

$$(г): x_{0\Sigma} = x_B + x_{\mu 0}. \quad (6)$$

Позначення випадків знаходяться на рис. 4.

Для оцінки впливу схеми з'єднання обвиток агрегату на значення струму у гілці, яка утворила замикання, проведено розрахунок цього струму у агрегаті, що містить два трансформатори типу ТМ-6300/35 [6]: $S_{\text{ном}} = 6300$ МВА, $U_{\text{Вном}} = 35$ кВ, $U_{\text{Нном}} = 10,5$ кВ, $I_{\text{нх}} = 0,6$ %, $U_K = 7,5$ %, схема з'єднання обвиток – Y/ Δ . Вважаємо, що агрегат за вказаних вище умов може мати усі схеми з'єднання обвиток. Номінальний струм, що протікає по обвитці вищої напруги, для схеми з'єднання обвиток зіркою дорівнює $I_{\text{Вном}} = 104$ А, а трикутником – $I_{\text{Вном}} = 60$ А. У розрахунках прийнято $x_{\mu 0}^* = 0,5$. Отримані результати показали, що під час замикання обвитки вищої напруги одного з трансформаторів, обчислений за (1) модуль струму у гілці, що утворила замикання, для усіх випадків з'єднання цієї обвитки зіркою, окрім Y/Y, дорівнює: $I_K = 0,987$ А, а для Y/Y – $I_K = 0,985$ А. Отже, можна твердити, що для агрегату, який містить два тристрижневі трансформатори, за наведених допущень струм у гілці, яка утворила замикання практично не залежить від режиму нейтралі. Це відбувається внаслідок малого значення еквівалентного опору нульової послідовності порівняно із сумою еквівалентних опорів прямої і зворотної послідовностей, хоч сам еквівалентний опір нульової послідовності для різних схем з'єднання суттєво відрізняється. Під час з'єднання обвитки вищої напруги трикутником – $I_K = 0,57$ А.

Вирази (1)–(6) справедливі і для агрегату, що містить дві групи однофазних трансформаторів, якщо у розрахунках прийняти $x_{\mu 0} = x_{\mu}$. Аналіз виразів (1)–(6) показує, що для схем з'єднання обвитки вищої напруги зіркою максимального обмеження струму у гілці, яка утворила замикання, можна досягнути у випадку Y/Y, оскільки тоді еквівалентний опір нульової послідовності є найбільшим. У такому агрегаті, параметри груп однофазних трансформаторів якого відповідають наведеним вище параметрам трансформатора ТМ-6300/35, модуль струму у гілці, що утворила замикання, дорівнює: $I_K = 0,494$ А. Для всіх інших вказаних вище схем з'єднання обвитки вищої напруги зіркою: $I_K = 0,659$ А, а трикутником – $I_K = 0,381$ А.

Використовуючи схеми послідовностей можна обчислити струм у будь-якій гілці схеми агрегату.

Отже, використання агрегатів дає змогу знизити значення струму у гілці, що утворила ВКЗ. Це набагато підвищить надійність роботи трансформаторів, зменшивши час їхнього простою і ремонту. Для конкретного агрегату значення струму, який протікає через гілку, що утворила замикання обвитки одного з трансформаторів, знаходиться у межах 0,381–0,987 А і є на декілька порядків меншим від номінального струму пошкодженої обвитки. Ступінь обмеження струму залежить від конструкції агрегату і схем з'єднання його обвиток.

Подані схеми послідовностей можна використовувати і для більш загального випадку замикання будь-якої частини витків обвитки трансформатора агрегату. Тоді параметри схем

слід обчислювати, виходячи з кількості замкнених витків, місця їхнього розташування та геометричних розмірів обвиток [7]. За допомогою схем симетричних послідовностей можна одержати вирази для обчислення струму у гілці, що утворила замикання, а також оцінити вплив схеми з'єднання обвиток і виконання агрегату на його значення.

1. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М., 1989. 2. Букович Н.В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем / За ред. Г.І. Денисенка. 1988. 3. Чечушков Г.А., Гаген А.Ф. Витковые замыкания в трансформаторах и их схемы замещения // Автоматизация энергосистем и энергоустановок пром. предпр. – Челябинск, 1974. – № 141. – С. 36–42. 4. Урманов Р.Н., Павлов И.Ф. Особенности последовательной работы трансформаторов и расчет режимов // Электричество. – 1961. – № 11. – С. 29–35. 5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М., 1970. 6. Гончарук А. И. Расчет и конструирование трансформаторов. – М., 1990. 7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивности: Справ. книга. – Л., 1986.

УДК 621.365.2

О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, А.О. Лозинський
Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

© Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., 2001

Пропонується структура системи оптимального керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі (ДСП) за критерієм мінімуму дисперсії струмів дуг, що враховує взаємні впливи між фазами печі. Описано метод синтезу системи керування, в основу якого покладено генетичний алгоритм. Наведено результати математичного моделювання електричних режимів ДСП для традиційної і запропонованої систем керування.

The structure of a system of optimal control of an electrical condition of arc steel melting furnace (ASMF) behind the criterion of a minimum of the arcs currents variance, that take into account the cross effect between phases, is proposed. The method of synthesis of a control system, in which basis lays the application of genetic algorithm, is described. The simulation results of an electrical regimes of arc steel melting furnace with traditional and proposed control systems are given.

Для взаємозалежних електромеханічних систем здебільшого виникають труднощі при формуванні вектора керування, який би враховував всю складність зв'язків між координатами системи і тому під час синтезу систем керування такі взаємні впливи як правило не враховуються, тобто система з багатьма входами і виходами розглядається як декілька систем з окремими входом і виходом. Внаслідок такого підходу істотно знижується якість керування, через формування помилкових керуючих впливів, що спровоковані взаємовпливом координат стану системи.