

АЛГОРИТМИ ВІДКЛЮЧЕННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ПРОЦЕСИ, ЩО ЇХ СУПРОВОДЖУЮТЬ

В.А.Халіков, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: xva@nm.ru

Розглядаються процеси зміни стану магнітопроводу при відключенні від мережі живлення трифазного трансформатора з чотирипровідною системою під'єднання його первинних обмоток. Показано способи зменшення залишкової намагніченості осердя після знеструмлення трансформатора. Проведено візуальне моделювання процесів засобами програмного пакету MATLAB та запропоновано заходи щодо мінімізації їхньої тривалості. Бібл. 6, рис.6.

Ключові слова: трансформатор, комутація, перехідний процес, моделювання.

Потужності споживання електричної енергії нерозривно пов'язані з використанням трифазних трансформаторів (ТФТ) та їхньою комутацією. Остання, як правило, асоціюється з екстремальними процесами в обмотках трансформатора при її виконанні. Наприклад, одночасне підключення всіх трьох первинних обмоток ТФТ до мережі живлення (незалежно від значень фазових кутів її лінійних чи фазних напруг на момент включення) без застосування деяких додаткових заходів завжди викликає перехідні процеси у формі затухаючих сплесків вхідного струму. Вони спричиняються насиченням магнітопроводу під час та після комутації і внаслідок незначних величин внутрішніх опорів ТФТ у порівнянні із однофазними трансформаторами (ОФТ) мають значно більшу амплітуду і відповідно носять більш екстремальний характер. Це змушує розробляти алгоритми включення ТФТ, спрямовані на недопущення або пом'якшення такого роду струмових ексцесів [1]. Але включенню завжди передує короткий період знеструмленого стану обмоток. Він характеризується самовільним розмагнічуванням осердя трансформатора, і тому, в залежності від того, яким чином та за яких умов виконується процес відключення, залежить степінь залишкової намагніченості. Якщо ставити перед собою задачу недопущення сплесків вхідного струму трансформатора при його наступному включенні, то необхідно, щоб у знеструмленому стані магнітопровід трансформатора (з точки зору величини потоку) був у більш-менш передбачуваному стані. Це дало б можливість виробити достатньо прості і прийнятні алгоритми для його наступного включення. Природно, що найбільш бажаною стартовою умовою було б нульове значення магнітного потоку для всіх трьох стержнів осердя, тобто стан його повної розмагніченості. У такому разі було б можливе застосування вже опрацьованих і оприлюднених алгоритмів комутації [4, 5]. Проте, на жаль, при одночасному асинхронному знятті напруги з обмоток ТФТ хоча б один із стержнів магнітопроводу все ж буде знаходитися у стані, близькому до насичення, а інші матимуть на цей момент проміжні, тобто дещо менші, початкові значення залишкового магнітного потоку.

Ця проблема стає ще більш актуальною, коли необхідно виконувати періодичний або дискретно-разовий цикл включення–відключення ТФТ у межах часового проміжку, співставного із часом експоненціального спаду залишкового магнітного потоку Φ_3 осердя обезструмленого трансформатора хоча б до значення 10...20% номінального Φ_m . У даному разі виконання розроблених алгоритмів комутації ТФТ [4, 5], спрямованих на уникнення появи екстремальних сплесків вхідних струмів, у згаданому часовому проміжку є неприйнятним і стає ефективним з часом, який визначається затяжним процесом саморозмагнічування осердя трансформатора. Тобто необхідна розробка простих у реалізації алгоритмів вимкнення трансформатора, при виконанні яких магнітопровід приводився б у розмагнічений стан за прийнятний проміжок часу.

Разом із тим, намагання осмислення, обґрунтування та вирішення такого роду задач аналітичними методами через наявність у них нелінійної складової, змінності параметрів силового трансформаторно-ключового вузла, величини та характеру його навантаження, багатоваріантності схем з'єднання обмоток і т.п. є настільки громіздким, що її вирішення у такій формі стає виправданим ли-

ше в спрощених (орієнтирних) варіантах. Проте, розвиток програмних пакетів візуального імітаційного моделювання електротехнічних систем (наприклад, розділу силової електроніки SimPower-Systems у середовищі MATLAB/Simulink) дозволяє на основі числових методів значно детальніше і, головне, ефективніше висвітлити на сучасному рівні аспекти даної проблеми, використовуючи при цьому раніше недоступний апарат аналізу [6]. На цій основі і базуються викладки даного матеріалу. Параметри трансформаторів та їхні навантаження для спрощення викладок та порівняння вибрані аналогічними раніше наведеним прикладам комутації ОФТ та ТФТ [4, 5].

У класичному варіанті підключення простого двообмоточного силового ОФТ ексцесів у вигляді затухаючих сплесків струму первинної обмотки можна уникнути. Це досягається, наприклад, у випадку нульового залишкового (початкового) магнітного потоку осердя ($\Phi_3=0$), тобто при повному його розмагнічуванні шляхом подачі синусоїдальної напруги $u_1=U_{1m} \sin \omega t$ на первинну обмотку за умови досягненні нею амплітуди (U_{1m}) при фазовому куті $\pi/2$ [4]. У такому разі трансформатор відразу виходить на режим усталеного магнітного потоку Φ_y (його циркуляція буде відбуватися в межах відрізка кривої намагнічування, для якого характерне велике значення магнітного опору), і тому сплески струму, пов'язані із насиченням магнітопроводу, не виникають. Задача ускладнюється, коли на моменти підключення–відключення ОФТ його магнітопровід все ж буде мати деяке значення Φ_3 , тоді необхідно відповідним чином коригувати фазові кути комутації ключа. Якщо при цьому використовувати тиристорні ключі з природною комутацією, то можна буде реалізовувати передбачуваний синхронізм у процесах відносно параметрів струму мережі живлення як при включенні, так і відключенні трансформатора. Проте в останньому випадку через фізичні властивості тиристора синхронізм буде задаватися спадом до нульового рівня не напруги, а вхідного струму. Завдяки цьому маємо варіації величини магнітного потоку на момент закриття ключа. Наприклад, при активному навантаженні ОФТ $\Phi_3 = \pm \Phi_m$ (знак залежить від полярності півперіоду напруги безпосередньо перед комутацією), а при індуктивному, навпаки $-\Phi_3 = 0$ як при $+U_{1m}$, так і при $-U_{1m}$. Таким чином, у цьому випадку він не залежить від полярності напруги на момент закриття ключа. Коли ж навантаження має активно-індуктивний характер, то значення Φ_3 буде (із відповідним знаком) пропорційним різниці повної вольтсекундної площі напруги півперіоду і її частини, яка припадає на проміжок часу між переходом напругою нульового рівня та моментом закриття необхідних тиристорних ключів. Тобто, в залежності від того, на яку чверть періоду припадає виключення ключа та характеру навантаження ($\cos \varphi$), значення Φ_3 при усталеному режимі роботи в докомутаційному інтервалі часу може знаходитися у будь-якій точці максимально можливого діапазону $+\Phi_m \dots 0 \dots -\Phi_m$. Варіація потоку відбувається в межах його повного діапазону, властивого усталеному робочому режиму. При цьому природно, що аналітичний взаємозв'язок потоку із напругою для усталеного режиму ідеального трансформатора визначається відомим виразом, який відображає циркуляцію модуля вольтсекундної площі вхідної напруги

$$\Phi = (U_{1m} / w_1) \int \sin(\omega t - \pi) dt, \quad (1)$$

де w_1 – кількість витків первинної обмотки.

Потік у осерді такого трансформатора завжди буде відставати від напруги $u_1=U_{1m} \sin \omega t$, що його викликає, на кут $-\pi/2$: $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$, тобто співпадати за фазою із струмом обмотки при номінальному чисто індуктивному навантаженні трансформатора. Порушена проблема не виникла б, якби завжди була можливість зменшувати U_{1m} до нуля або ж збільшення кількості витків w_1 до безкінечності, і навпаки. Першу умову можливо фізично реалізувати. Питання лише в раціональності і необхідності. Друга умова може реалізуватися лише частково як рекомендація включати і виключати трансформатор при більших значеннях числа витків первинної обмотки та коефіцієнта трансформації. Дані залежності кількісно відображають лише режим перемагнічування осердя в усталеному режимі роботи трансформатора за умови синусоїдальних напруг на обмотках. Вони ніяк не відобразять дійсності, наприклад, при наростанні та спаді напруг на первинних обмотках, організованих за рахунок їхнього фазового регулювання і т.п., тобто в перехідних стадіях процесів, і, тим більше, при явній несинусоїдальності напруг. Проте ними якісно визначається напрям зусиль, оскільки кожний усталений режим є граничним по відношенню до перехідного.

При порівнянні процесів природної комутації для ОФТ та ТФТ в останньому випадку є два суттєвих ускладнення. Перше – кількісне, пов'язане із збільшенням втричі числа напруг, і друге – наявність одного спільного осердя. Останнє означає, що при знятті напруги з однієї фази трансфор-

матора процеси зміни магнітного потоку відповідного стержня не набудуть затухаючого виду, а визначаться процесом перерозподілу магнітних потоків від двох інших стержнів осердя трансформатора, обмотки яких ще деякий час будуть знаходитися під напругою. Проблематика разового однокомутаційного включення ТФТ без перехідного режиму через насичення магнітопроводу та за нульових для нього початкових умов уже в значній мірі висвітлювалася автором [5]. Тому увага акцентована на те, який стан магнітопроводу буде одразу після виключення тиристорних ключів, оскільки це безпосередньо впливає на спосіб наступного включення трансформатора.

Систему напруг ТФТ при його комутації (рис. 1, а) можна представити у вигляді композиції з трьох окремих ОФТ (рис. 1, б). У даному разі для обґрунтування різниці та подібності в характері зміни потоків при застосуванні одного спільного для ТФТ чи роздільних магнітопроводів при використанні ОФТ можливе перенесення відомих принципів комутації із більш простішого прикладу (ОФТ) на більш складний (ТФТ) [3]. При цьому необхідна ідентичність реалізації управління комутаційним вузлом (VS1...VS3) для обох схем. При вимкненні трансформатора в обох випадках найпростішим є почергове синхронне зняття сигналів управління тиристорними ключами при однакових фазових кутах напруг відповідних фаз.

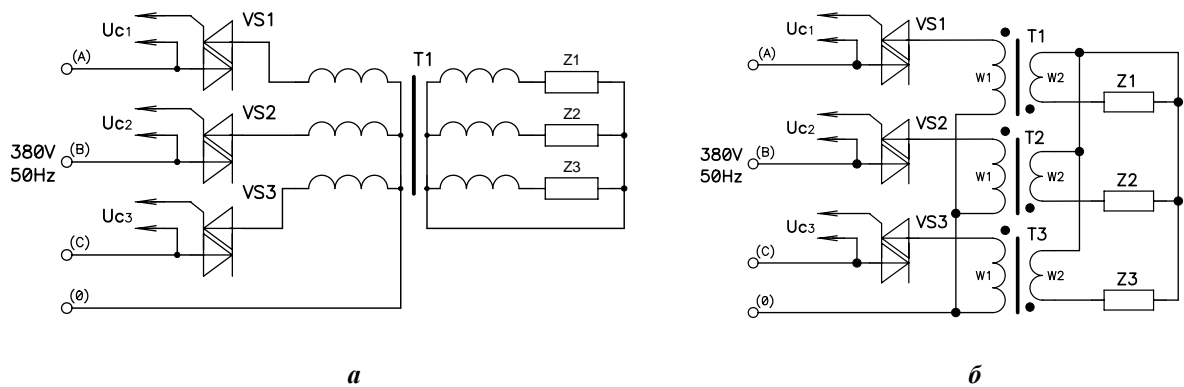


Рис. 1

Наприклад, для даних схем при конфігурації як первинних, так і вторинних обмоток трансформатора “зіркою” (Y_n) із нульовим проводом послідовне почергове відключення відповідних фаз (A, B, C) реалізується в моменти, коли напруга в них досягне відповідно значень: $U_{1m(A)}$, $U_{1m(B)}$, $U_{1m(C)}$. При частоті струму 50 Гц та нульовому початковому відліку значення фазового кута для напруги $U_{1(A)}$ такими найближчими моментами часу могли б бути: 5мс ($\pi/2$ – для фази A), 11,66 мс ($\pi/2+120^\circ$ – для фази B), 18,33 мс ($\pi/2+240^\circ$ – для фази C) і т.п. із дискретністю їхнього повторення в один півперіод – 10 мс (π). У даному випадку при симетричному номінальному навантаженні активного характеру як для комбінації ОФТ (рис. 1, б), так і ТФТ (рис. 1, а) за умови ідентичності імпедансів обмоток, навантаження та загальної потужності будемо спостерігати абсолютно подібний характер зміни магнітного потоку (рис. 2, а) як у кожному із стержнів відповідних фаз ТФТ, так і для кожного окремого магнітопроводу ОФТ, включених в трифазну схему з’єднання.

Для обох схем є характерним і однаковий затяжний експоненціальний спад відповідних магнітних потоків. Пофазна ідентичність їхньої поведінки задається згаданим порядком зняття напруги кожної фази. Якщо із всіх ключів тиристорного комутатора зняти управління одночасно, наприклад, при $t=20,0$ мс, то відмінність буде в різнознаковості магнітних потоків на момент закриття ключа відповідної фази (рис. 2, б). Тобто такий спрощений порядок комутації дещо ускладнює уявлення про їхній хід, подальший аналіз та порядок дій.

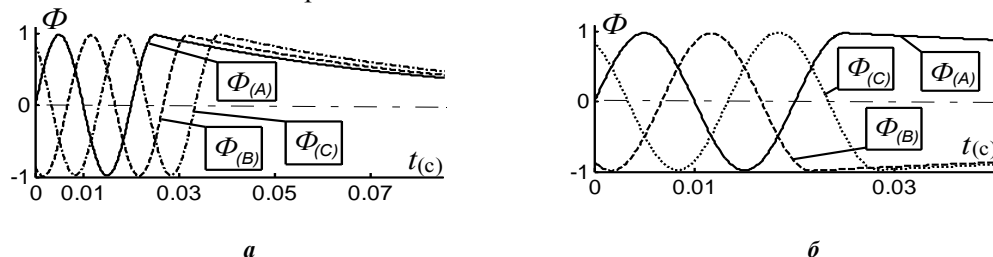


Рис. 2

Разом із тим, активне навантаження трансформатора з точки зору забезпечення нульових початкових умов для подальшого його включення є найбільш несприятливим, оскільки на момент закриття тиристорного ключа магнітний потік відповідного стержня буде мати максимальне – амплітудне – значення (рис. 2). Тому такого роду випадок є об'єктом першочергового інтересу.

Особливістю магнітних процесів у стержнях ТФТ, як і для будь-якого іншого трансформатора, є їхня підпорядкованість принципу електромагнітної інерції, відповідно до якого спостерігається тенденція до збереження незмінними наявних у них магнітних потоків. Тобто, більше навантаження на трансформатор на момент його відключення буде причиною більш пологого спаду магнітного потоку і, навпаки, його незначна величина – до крутого. Це ілюструє сімейство кривих (рис. 3, а), що відображають характер поведінки потоку в стержні однієї із фаз (фази А) для розглянутого прикладу рис. 2, а, проте не тільки при номінальному значенні активного навантаження ($R_H = 10,0 \text{ Ом}$), а і при його варіаціях. При цьому крива 1 відповідає подвійному перевантаженню ТФТ ($R_H = 5,0 \text{ Ом}$), крива 2 – номінальному опору навантаження, а інші залежності (в порядку зростання своїх номерів) відповідають значенням опору навантаження у 20, 40, 80, 160 Ом і холостому ходу (XX) трансформатора (крива 7). Коли через деякий інтервал часу, наприклад, через 4 періоди струму після зняття управління із відповідного тиристорного ключа, що відповідає часовому відліку $t=0,1 \text{ с}$ по графіку рис. 3, а, для кожного значення навантаження ТФТ визначати на цей момент у відповідному стержні його осердя величину потоку, то можна одержати відповідну залежність – рис. 3, б.

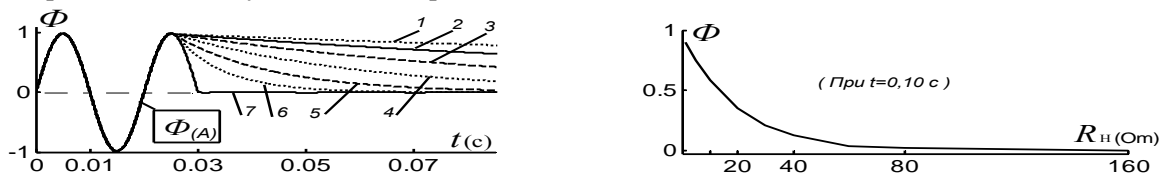


Рис. 3, а, б

Очевидно, що повторне включення трансформатора при $t=0,1 \text{ с}$ відповідно до алгоритму, розробленому для нульових початкових умов, можливе в тому разі, коли його навантаження на момент попереднього відключення складало 6–8-у частини номінального. Через ефект інерційності, тобто збереження протягом досить тривалого часу відносно великого значення потоку, реалізація подібних алгоритмів при відключеннях у режимах перевантаження не раціональна і потребує суттєвої корекції. Викладене стосується і комутації ОФТ.

Проте крутизна спаду залишкового магнітного потоку залежить не тільки від величини навантаження, а і від внутрішніх властивостей трансформатора, які характеризуються струмом I_0 , необхідним для створення в його осерді магніторушійної сили. Для реальних трансформаторів типових конструкцій при номінальній напрузі обмоток значення цього струму, що носить реактивний характер, майже співпадає із струмом холостого ходу I_{XX} , оскільки його активна складова, як правило, не перевищує 10% струму I_{XX} . Відповідно на рис. 4, а відображено характер поведінки потоку в стержні фази А (для того ж прикладу рис. 1, а, 2, а) в залежності від процентного відношення струму холостого ходу до номінального вхідного струму (I_{XX}/I_{1n}), тобто при незмінному значенні $R_H = 10,0 \text{ Ом}$.

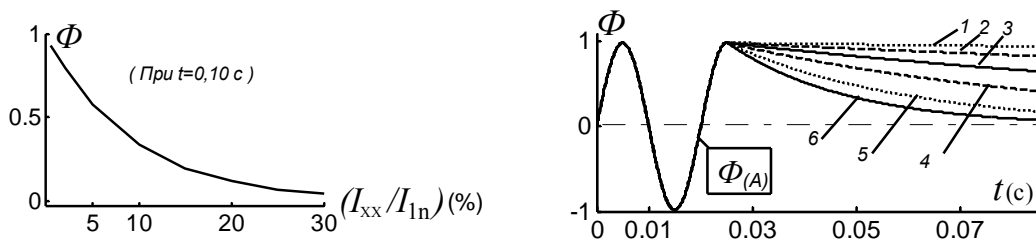


Рис. 4, а, б

На рис. 4, а показано значення потоку в стержні при тому самому відліку часу 0,1 с в залежності від процентного значення струму холостого ходу трансформатора. Криві залежностей (рис.

4, б) у порядку зростання своїх номерів належать відповідно до значень I_{XX} / I_{1n} (%): 0,5, 2, 5, 10, 20, 30. Очевидно, що більш якісному трансформатору повинні відповідати менші величини I_{XX} , проте при цьому значення залишкового магнітного потоку буде більшим, а процес саморозмагнічування осердя затягнутим. І навпаки, при достатньо великих значеннях струму холостого ходу потік після відключення спадає вже через 0,1 с майже до нуля. Тобто на такий момент часу повторне включення трансформатора (із застосуванням алгоритму комутації, розробленого для нульових початкових умов) можливе, лише у тому разі, коли I_{XX} для його первинної обмотки складе більше 20% від її номінального струму.

Отже, із розглянутих позицій випливає, що більш якісному трансформатору повинна відповідати більш низька періодичність його комутації, і навпаки. Тому необхідна розробка таких алгоритмів комутації ТФТ, які б не залежали від параметрів трансформатора та його навантаження.

Один із способів оперативної підготовки трансформатора до наступного ввімкнення полягає у тому, що в один із наступних півперіодів напруги після природного закриття ключа виконується його повторне замикання коротким імпульсом управління на час, дещо менший чверті періоду U_1 . Таке повторне короткочасне включення ключа виконується вже при іншій полярності напруги U_1 при фазовому куті, вибраному із умов достатності вольтсекундної площі u_1 , починаючи від моменту включення і до її нульового значення, для компенсації потоку [4]. Наприклад, коли для обох схем рис. 1 зняти управління із ключа фази А при $t = 20,0$ мс (його закриття відбудеться при $t = 25,0$ мс), а для двох інших фаз відключити управління із затримкою у два періоди, то одержимо абсолютно ідентичну картину (рис. 5, а) як для однофазної комбінації трифазної системи (рис. 1, б), так і для схеми з ТФТ (рис. 1, а). Із рис. 5, а видно, що відключення фази А ніяк не впливає на характер поведінки потоків фаз В і С, вони продовжують циркулювати в рамках меж свого усталеного режиму. Таким чином магнітні процеси у кожному окремому стержні мають незалежний, тобто інваріантний характер і визначаються лише напругою відповідної обмотки. Тому згаданий алгоритм зведення потоку до нуля шляхом додаткового включення тиристорного комутатора повністю транслюється на дану трифазну систему. На рис. 5, б, в показано, як у такому випадку будуть змінюватися пофазно вхідний струм та потік для фази А при вибраних необхідних моментах часу повторного включення $t = 0,05$ с і як повинні бути зміщені фазові кути у 120° та 240° для фаз В і С.

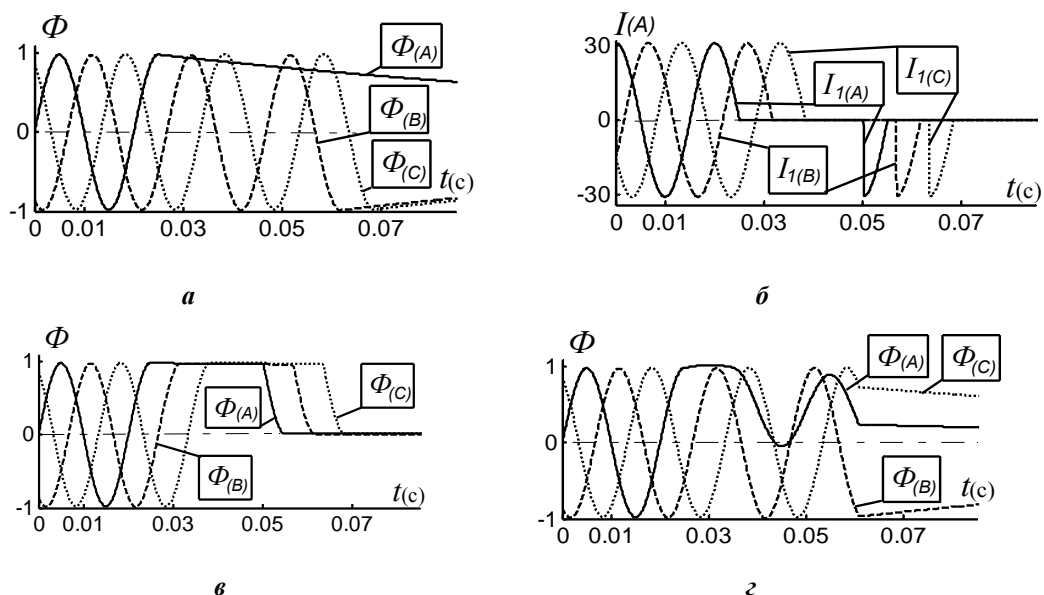


Рис. 5

Проте такий алгоритм розмагнічування для трифазних систем все ж має обмежене значення через те, що принцип інваріантності витримується лише для схем включення із нульовими провадами, причому одночасно як на первинній, так і на вторинній сторонах трансформатора. Саме вони задають незалежність ходу потоків один від другого в єдиному магнітопроводі. Наприклад, розглянутий хід процесів відразу порушиться, коли для схеми з ТФТ (рис. 1, а) розірвати нульовий провід вторинної сторони трансформатора, що наочно ілюструє рис. 5, г. Фактично на цьому етапі (розриву

електричного зв'язку між спільними точками з'єднання навантаження та обмоток) закінчується аналогією між характером процесів та їхніми кількісними показниками при комутації ТФТ та його однофазного аналога. Як видно із рис. 5, б, відразу після закриття ключа VS1 фази А (рис. 1, а) відповідний стержень магнітопроводу продовжує знаходитися в насиченому стані (тривалість інтервалу $t=10,0$ мс), а потім у його потоці з'являються дві складові. Одна із них – експоненціальна – пов'язана із саморозмагнічуванням, а друга (приблизно половинної амплітуди від усталеного значення) – одержана внаслідок геометричної суми потоків відповідно фаз В і С. Остання складова діє до закриття відповідних ключів. Як бачимо, незначна модифікація схеми (розрив нульового проводу на вторинній стороні трансформатора), яка (у випадку симетрії фаз навантаження) не впливає на розподіл струмів в усталеному режимі роботи системи, є суттєво принциповою для режиму комутації з точки зору зміни стану магнітної системи ТФТ через ефект перерозподілу магнітних потоків на стержень відключеної фази. Отже, можна констатувати, що принципи комутації, розроблені для ОФТ, не завжди можна механічно трансформувати на схеми з ТФТ.

Проте цілісна конструкція магнітної системи ТФТ дає можливості такої реалізації алгоритму відключення, які не можуть бути притаманні однофазним системам. Наприклад, при відсутності нульового проводу вторинної обмотки ТФТ (рис. 1, а) та при використанні почергового алгоритму відключення при відповідних фазових кутах ($\pi/2$ – для фази А, $\pi/2+120^\circ$ – для фази В, $\pi/2+240^\circ$ – для фази С) одержимо цілком пристойний і прийнятний результат (рис. 6, а). Тобто безпосередньо після закриття ключа, відповідного фазі С (при $t=43,33$ мс), уже можливе повторне включення ТФТ за алгоритмом для повністю розмагніченого осердя. Можна впевнитися, що такого роду алгоритм ефективний не тільки у всьому діапазоні значень активного навантаження, а також і при зміні його характеру. Для прикладу, на рис. 6, б показані потоки у стержнях магнітопроводу у випадку зниження на 50% вхідної напруги для фази А. Як видно із порівняння графіків, показаних на рис. 6, нульове значення потоку досягається в один і той самий момент часу. Таким чином одержуємо необхідний ефект, проте без будь-якої додаткової комутації.

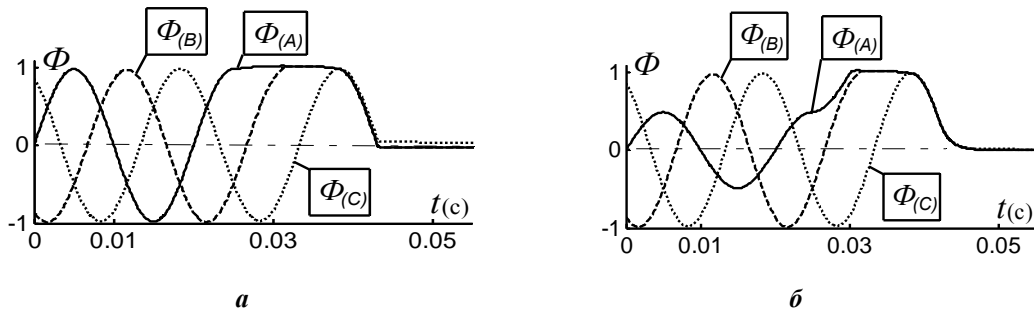


Рис. 6

Отже, можна рекомендувати безпосередньо перед відключенням на вторинній стороні трансформатора розривати нульовий провід, а після здійснення комутації цей електричний зв'язок знову відновлювати. Оскільки процеси в магнітопроводах як ОФТ, так і ТФТ за наявності обох нульових зв'язків ідентичні, то і комутація спрямована на наступне їхнє включення, повинна виконуватися також однаково. Тобто момент включення тиристора відповідної фази ТФТ повинен співпадати з амплітудою напруги для цієї ж фази (послідовне почергове включення відповідних фаз). Це гарантує відсутність сплесків струму, пов'язаних із насиченням магнітопроводу. При цьому повинна дотримуватися умова забезпечення нульового значення потоку перед виконанням комутації. Включення трансформатора за таким алгоритмом без залучення одного або двох одночасно нульових проводів недопустиме. Наприклад, модифікація схеми рис. 1, а шляхом видалення нульового проводу між спільною точкою з'єднання первинних обмоток та нульовим потенціалом джерела живлення при відключенні трансформатора призведе до процесу, подібного до наведеного на рис. 2, б, тобто неприйняттого через затяжний у часі спад потоку. Таким чином, кожна конфігурація трифазної системи потребує свого індивідуального підходу та алгоритмів комутації як при знеструмленні, так і підключенні напруги [5], причому в їхній розробці доводиться спиратися не тільки на аналітичні підходи [2], а і на евристичні, коли необхідним є практичний досвід при недостатньому математичному обґрунтуванні.

Підсумовуючи викладене, необхідно відзначити, що реалізація згаданих принципів (синхронний почерговий порядок виключення ключів комутатора, забезпечення режимів мінімально можли-

вого навантаження або ХХ на момент комутації, передкомутаційна модифікація схеми включення трансформатора спрямована на досягнення співпадіння моментів закриття ключів та наближення потоку до свого нульового значення і т.п.) базується, у першу чергу, на інформації про вхідну напругу трансформатора та врахуванні ефекту інерційності магнітного потоку, викликаного вхідною напругою. При цьому будуть повністю використані електроенергетичні можливості трансформаторів за рахунок уникнення різного роду ексцесів через появу аперіодичних складових у струмі споживання, поліпшиться динаміка системи у цілому. Викладене пройшло серйозну апробацію, а його реалізація забезпечила надійну комутацію без вказаних перехідних режимів незалежно від характеру навантаження і його величини.

1. Боос В.Я. Исследование и разработка регуляторов переменного напряжения с тиристорными ключами на первичной стороне трансформатора / Автореф. дис. канд.техн.наук. – Томск: 1979. – 21 с.
2. Косолапов С.П. Анализ формирования напряжения ступенчато-синусоидальной формы с помощью векторных диаграмм амплитудных значений // Силовые полупроводниковые и импульсные электротехнические преобразовательные устройства. – Куйбышев: Куйб. индустр. институт, 1976. – С. 119–128.
3. Окунь С.С., Сергеевков Б.Н., Киселев В.М. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
4. Халиков В.А., Липківський К.О. Процеси та організація комутації трансформаторів // Техн. електродинаміка. – 2010. – №3. – С. 22–30.
5. Халиков В.А. Процеси та організація комутації трифазного трансформатора // Техн. електродинаміка. – 2012. – №4. – С. 37–45.
6. Халиков В.А., Мозжаровський А.Г. Методологія застосування програмного пакета MATLAB при моделюванні та дослідженні електромагнітних процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах: Навчальний посібник. – Київ, ІЕД НАН України, 2001. – 45 с.

УДК 621.314.214

АЛГОРИТМЫ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭТОМУ ПРОЦЕССЫ

В.А.Халиков, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев–57, 03680, Украина,

e-mail: xva@nm.ru

Рассматриваются процессы изменения состояния магнитопровода при отключении от сети трехфазного трансформатора с четырехпроводной системой подключения его первичных обмоток. Показаны способы уменьшения остаточной намагниченности сердечника после обесточивания трансформатора. Проведено визуальное моделирование процессов средствами программного пакета MATLAB и предложены меры по минимизации их продолжительности. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: трансформатор, коммутация, переходный процесс, моделирование.

ALGORITHMS SHUTDOWN THREE-PHASE TRANSFORMERS AND ITS RELATED PROCESSES

V.A.Khalikov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremohy pr., 56, Kyiv–57, 03680, Ukraine,

e-mail: xva@nm.ru

The processes of change state of magnetic core when disconnected from the mains three-phase transformer with four-system connecting its primary windings. Ways of reduction of residual magnetization of the core after transformer shutdown are shown. Means of visual simulation shows identity processes recession residual magnetic flux in the single-phase and three-phase transformers. Dependences of the steepness of recession of a magnetic stream after disconnection of the transformer from the size of loading and current of idling of the transformer are given. It is shown that the gap between the neutral conductors on the secondary side of the transformer is an effective tool for the rapid decline of the residual magnetic flux. The nature of this process does not change depending on the load of the three-phase transformer. Visual modeling of transient processes is done with MATLAB and proposes measures to minimize the duration of the processes of. References 6, figures 6.

Key words: transformer, switching, transient, simulation.

1. Boos V.Ya. Research and development of AC voltage regulator with thyristor switches on the primary side of transformer / Avtoreferat dis.kand.tekhn.nauk. – Tomsk: 1979. – 21 p. (Rus)
2. Kosolapov S.P. The analysis of formation of tension of a step and sinusoidal form by means of vector charts of amplitude values // Silovye poluprovodnikovye i impulsnye elektrotekhnicheskije preobrazovatelnye ustroystva. – Kuibyshev: Kuibyshevskii industrialnyi institut, 1976. – Pp. 119–128. (Rus)
3. Okun S.S., Sergeenkov B.N., Kiselev V.M. Transformer and transformer-thyristor regulators-stabilizers of the voltage. – Moskva: Energiia, 1969. – 184 p. (Rus)
4. Khalikov V.A., Lypkivskiy K.O. Processes and organization of transformer switching // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №3. – Pp. 22–30. (Ukr)
5. Khalikov V.A. Processes and organization switching of three-phase transformer // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №4. – Pp. 37–45. (Ukr)
6. Khalikov V.A., Mozharovskii A.G. Methodology of modeling and studying of electromagnetic processes in transformer switching executive structure with MATLAB programme package: Education manual. – Kyiv, Instytut elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, 2001. – 45 p. (Ukr)

Надійшла 15.10.2012

Received 15.10.2012