

М. Б. Сабат

к.т.н., доц., Національний університет «Львівська політехніка», myroslav.b.sabat@lpnu.ua

Ю. Л. Шелех

к.т.н., доц., Національний університет «Львівська політехніка»,
yurii.l.shelekh@lpnu.ua

М. І. Метлушко

студентка, Національний університет «Львівська політехніка»,
mariia.metlushko.ee.2020@lpnu.ua

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПІД ЧАС ЇХ ВІДКЛЮЧЕННЯ ВАКУУМНИМИ ВИМИКАЧАМИ

<http://doi.org/10.23939/>

© Сабат М. Б., Шелех Ю. Л., Метлушко М. І., 2023

Досліджено вплив роботи вакуумних вимикачів на електромагнітні процеси трансформаторів розподільчих мереж. Показано, що під час відключення трансформаторів від мережі зі схемою з'єднання обмоток «Зірка/Зірка з нулем» обумовлює значно більші кратності перенапруг в обмотках, ніж відключення трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «Трикутник/Зірка з нулем». Встановлено, що кратності перенапруг залежність від величини попередньо запасеної енергії магнітного поля. Значення магнітних потоків до відключення трансформатора за схеми з'єднання обмоток «Зірка/Зірка з нулем» перевищує аналогічні за схеми з'єднання «Трикутник/Зірка з нулем». У процесі відключення трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «Зірка/Зірка з нулем» магнітний потік нульової послідовності збільшується в порівнянні з номінальним, а за схеми з'єднання «Трикутник/Зірка з нулем» магнітні потоки нульової послідовності відсутні. Під час дослідження процесу відключення трансформатора вакуумним вимикачем важливим є врахування багаторазового повторного запалювання, яке відбувається, якщо відновлена напруга між контактами вакуумного вимикача стає більшою, ніж величина електричної міцності діелектрика після розмикання контактів. Встановлено, що виникнення повторних замикань у вакуумному вимикачі за відключення трансформатора не створює небезпечного впливу на поздовжню ізоляцію обмоток вищої напруги трансформатора, але призводить до небезпечних перенапруг в обмотках нижчої напруги трансформаторів. Виникнення небезпечних перенапруг в обмотках нижчої напруги трансформаторів вимагає примусового обмеження перенапруг з боку обмотки за допомогою обмежувачів перенапруг, здатних обмежувати перенапруги на обмотках нижчої напруги, викликані повторними багаторазовими запалюваннями у вакуумних вимикачах. Встановлено нові причини ушкодження та характер їх появи в електрообладнанні та можливості дослідження електромагнітних процесів в обладнанні з обмотками високої напруги. Проведені дослідження та розрахунки вказують на необхідність поетапного перегляду та коригування всієї нормативної документації щодо захисту обладнання розподільчих мереж (зокрема трансформаторів) від внутрішніх перенапруг.

Ключові слова: електромагнітні процеси, трансформатор, вакуумний вимикач, повторні замикання, осцилограми., виткова ізоляція, перенапруги.

Вступ

Для забезпечення надійної роботи системи потрібна надійна робота її окремих елементів, основним з яких є силові трансформатори. З досвіду експлуатації трифазних трансформаторів, з номінальною напругою 10/0,4 кВ відомо, що в 55% випадків пошкоджується поздовжня ізоляція. На сьогодні попри всі вимоги до ізоляції силових трансформаторів, вони і досі виходять з ладу і як

показує досвід експлуатації ці випадки є непоодинокі. Для вирішення поставленої задачі потрібне детальне вивчення електромагнітних процесів в обмотках трансформатора. Основним інструментом який дасть можливість зрозуміння процеси, що виникають в обмотках та ізоляції трансформатора, є моделі, які дають змогу детального дослідження цих процесів за різних умов.

Постановка проблеми

Недостатня надійність виткової ізоляції трансформаторів [1] зумовлює необхідність ретельного аналізу взаємозв'язку між електромагнітними процесами в обмотках та електричними процесами в ізоляції трансформатора.

Аналіз досліджень та публікацій

З метою підвищення надійності роботи електрообладнання електричних мереж класу 10 кВ застосовуються вакуумні вимикачі (ВВ) [2] та нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) [3]. У [3] (пункт 2.2.4.) зазначено, що перенапруги (ПН) при комутаціях вакуумними вимикачами мають низку особливостей: “При вимиканні індуктивності L_0 об'єкту (трансформатора, електродвигуна) виникають: зрізи струму; ескалація напруги; віртуальний зріз струму... При вимиканні малих індуктивних струмів, внаслідок зрізу струму енергія магнітного поля індуктивності переходить в енергію електричного поля ємності. Оскільки C_0 незначна (до 10000 пф), а струм зрізу для ВВ досягає 2-5 А, то ПН після зрізу струму може мати $K_{\max} = 5$. Для вирішення питання про необхідність використання ОПН у приєднаннях ВВ із силовими трансформаторами слід використовувати поняття “область безпечної роботи”, яку визначають у координатах: “струм ненавантаженого режиму трансформатора $I_{нр}$, фазна ємність приєднання C_{ϕ} , нФ” (додаток 1)”.

Відповідно до [2,3] трансформатори розподільчої мережі класу 10 кВ з нормальною ізоляцією, що мають струми ненавантаженого режиму менше 4 А, що відповідає номінальній потужності $S_{ном} \leq 1600$ кВА, не вимагають встановлення ОПН для обмеження перенапруг при використанні вакуумних вимикачів. Для мережі 6 кВ ці параметри дорівнюють – 2 А та 400 кВА.

Завдання дослідження

Вивчити особливості електромагнітних процесів у разі відключення ненавантажених трансформаторів розподільчої мережі.

Виклад основних результатів дослідження

Дослідження проведено на моделі трифазного трансформатора потужністю 20 кВА [4-8]. Для можливості досліджень розподілу перенапруг вздовж обмотки модель була вдосконалена. Обмотки трансформатора виконані на номінальні фазні напруги $\frac{20}{\sqrt{3}}$ та $\frac{0.4}{\sqrt{3}}$ кВ. Передбачалося, що досліджуваний трансформатор підключений до повітряної лінії живлення через запобіжники, а сама лінія підключена до джерела живлення через вимикач. Досліджувався вплив схеми з'єднання обмоток трансформатора на електромагнітні процеси трансформатора при його відключенні в ненавантаженому режимі.

На рис.1 наведені осцилограми режиму відключення трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Y° . Враховуючи особливості роботи вакуумного вимикача, прийнято, що він обірвав струми ненавантаженого режиму в момент досягнення струмом фази А свого максимального значення (рис.1б). Як видно, їхні перенапруги (рис.1а) на обмотці ВН фази А досягли величин 45,2 кВ, що в 2,66 рази перевищує її номінальну напругу, і небезпечно для виткової ізоляції. Перенапруги на ввіді фази А трансформатора по відношенню до “землі” склали 44,8 кВ (рис.1д), а нейтралі обмотки ВН досягли величини 2,25 кВ (рис.1г). Перенапруги на обмотках НН трансформатора (рис.1в) формою практично повторюють перенапруги на обмотці ВН. У цьому досліді можливість повторного запалювання дуги у вакуумному вимикачі не враховувалася.

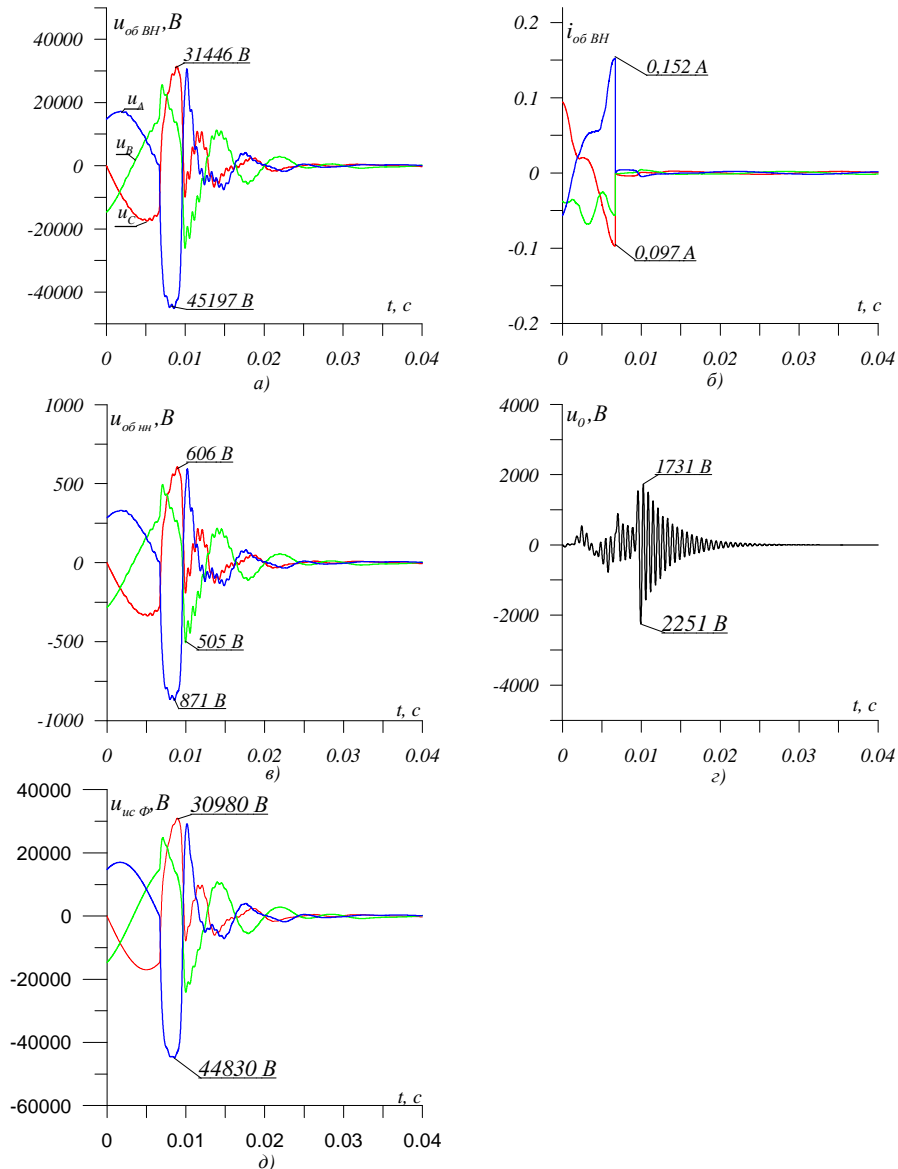


Рис.1. Осцилограми режиму відключення трансформатора із схемою з'єднання обмоток Y/Y^{Δ}
 а) напруги обмоток ВН; б) струми ненавантаженого режиму; в) напруги на обмотках НН; з) напруги в нейтралі; д) фазні напруги мережі.

Якщо з'єднати обмотки ВН цього трансформатора в трикутник і, відповідно, зменшити лінійну напругу джерела живлення в $\sqrt{3}$ раз, то ми отримаємо трансформатор зі схемою з'єднання обмоток Δ/Y^{Δ} . На рис.2 представлені осцилограми відключення трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Δ/Y^{Δ} , отримані для таких умов, що наведені на рис.1 для трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Y^{Δ} . Як видно з рис.2 величини перенапруг на обмотках ВН не перевищили значення 34,2 кВ (рис.2а), що допустимо для поздовжньої ізоляції обмоток ВН. Слід звернути увагу, що величина амплітуд лінійних струмів (рис.2б) – 0,224 А лише в 1,58 разів більша від амплітуди лінійних струмів ненавантаженого режиму роботи того ж трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Y^{Δ} .

Порівняння даних рис.1 і рис.2 показує, що в трансформаторі зі схемою з'єднання Y/Y^{Δ} перенапруги при відключенні в 1,32 рази більші, ніж для схеми з'єднання Δ/Y^{Δ} . Це результат ретельного аналізу. Відомо, що величина перенапруг залежить від величини енергії, запасеної на момент відключення в магнітному полі трансформатора. На рис.3,4 наведені результати щодо визначення значень величини втрат активної та повної потужності в ненавантаженому режимі для

Електромагнітні процеси в трансформаторах під час їх відключення вакуумними вимикачами

трансформатора зі схемою з'єднання Υ/Υ^* і Δ/Υ^* при живленні його від мережі з лінійними напругами, що відрізняються в $\sqrt{3}$ раз. Як видно з цих рисунків для схеми з'єднання Υ/Υ^* активна потужність втрат склала 164 Вт, а повна - 606 ВА, а для схеми з'єднання Δ/Υ^* - відповідно 155 Вт і 412 ВА. Відношення втрат повної потужності $\frac{606}{412} = 1,47$ приблизно відповідає отриманому вище відношенню кратностей перенапруг 1,32, що підтверджує тезу про залежність кратності перенапруг від величини попередньо запасеної енергії магнітного поля.

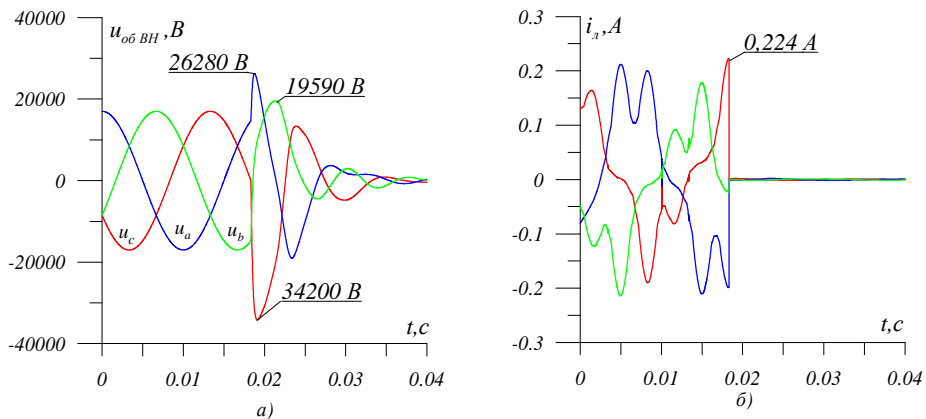


Рис 2. Осцилограми відключення трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Δ/Υ^*
 а) напруги обмоток ВН; б) струми ненавантаженого режиму;

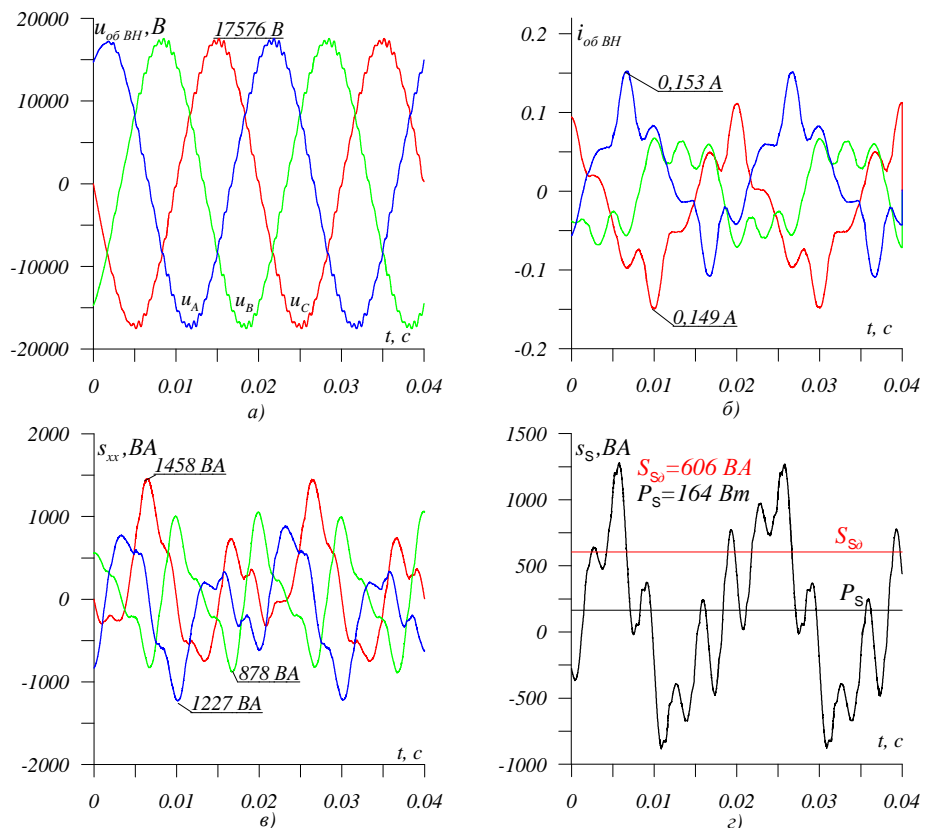


Рис 3. Результати математичного експерименту щодо визначення значень величини втрат активної та повної потужностей в ненавантаженому режимі для трансформатора зі схемою з'єднання Υ/Υ^*
 а) напруги обмоток ВН; б) струми ненавантаженого режиму; в) фазна потужність ненавантаженого режиму; г) сумарна потужність втрат ненавантаженого режиму.

Причини збільшення потужності, споживаної одним і тим самим трансформатором в ненавантаженому режимі при схемі з'єднання Υ/Υ в порівнянні зі схемою Δ/Υ пояснює рис.5в. На рис.5 представлені магнітні потоки у трансформаторі зі схемою з'єднання Υ/Υ та їх зміни при відключенні трансформатора за допомогою ВВ. З рис.5 видно, що крім магнітних потоків у магнітопроводі (рис.5а) є магнітний потік нульової послідовності, який замикається по шляхах з високим магнітним опором через масляні проміжки та бак трансформатора (рис.5а,б). Хоча цей потік не перевищує 2% від номінального, але для його створення потрібно, як випливає з рис.3,4 майже половина потужності ненавантаженого режиму роботи трансформатора зі схемою з'єднання Δ/Υ . На рис.6 представлені магнітні потоки в трансформаторі при схемі з'єднання Δ/Υ . Як видно з порівняння рис.5, значення магнітних потоків до відключення трансформатора при схемі з'єднання Υ/Υ перевищує аналогічні для схеми Δ/Υ . У процесі відключення трансформатора (рис.5) магнітний потік нульової послідовності збільшується від номінального. При схемі з'єднання Δ/Υ магнітні потоки нульової послідовності відсутні (рис.6).

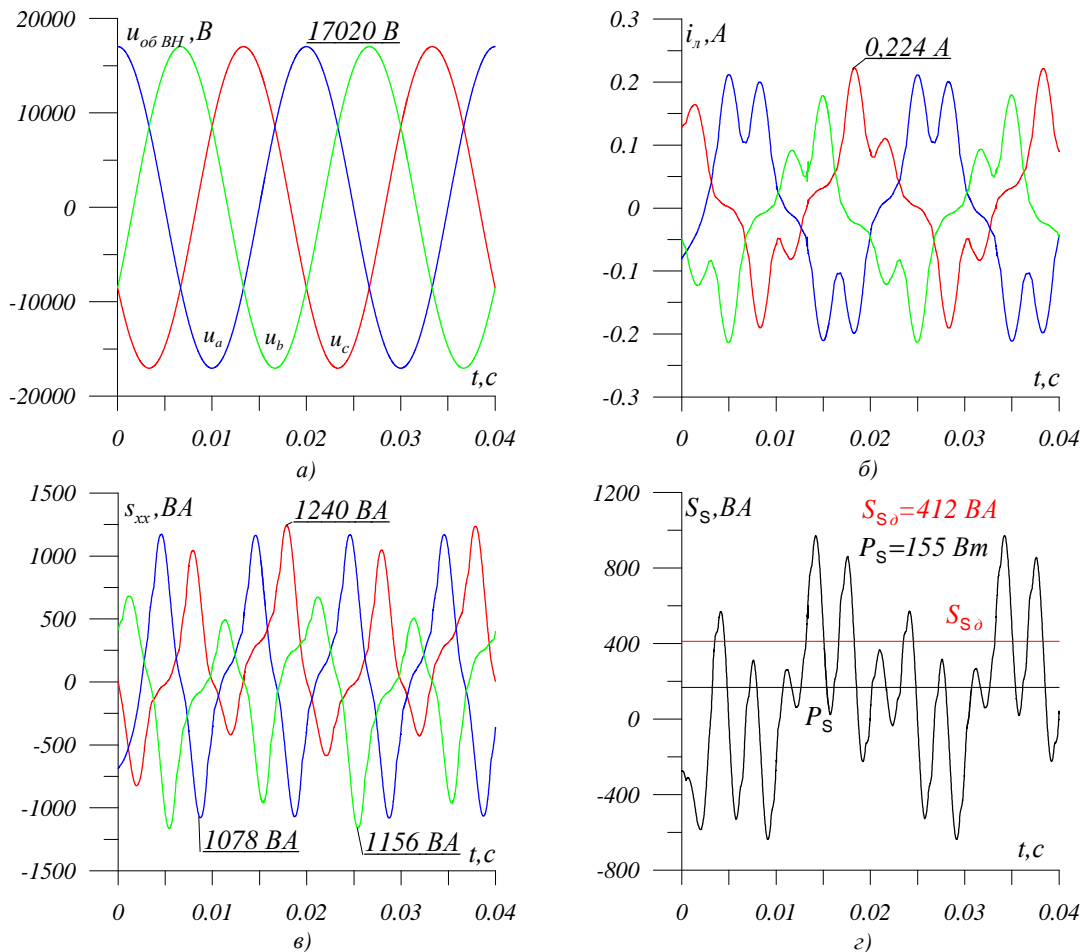


Рис 4. Результати математичного експерименту щодо визначення значень величини втрат активної та повної потужностей в ненавантаженому режимі для трансформатора зі схемою з'єднання Δ/Υ
 а) напруги обмоток ВН; б) струми ненавантаженого режиму; в) фазна потужність ненавантаженого режиму; г) сумарна потужність втрат.

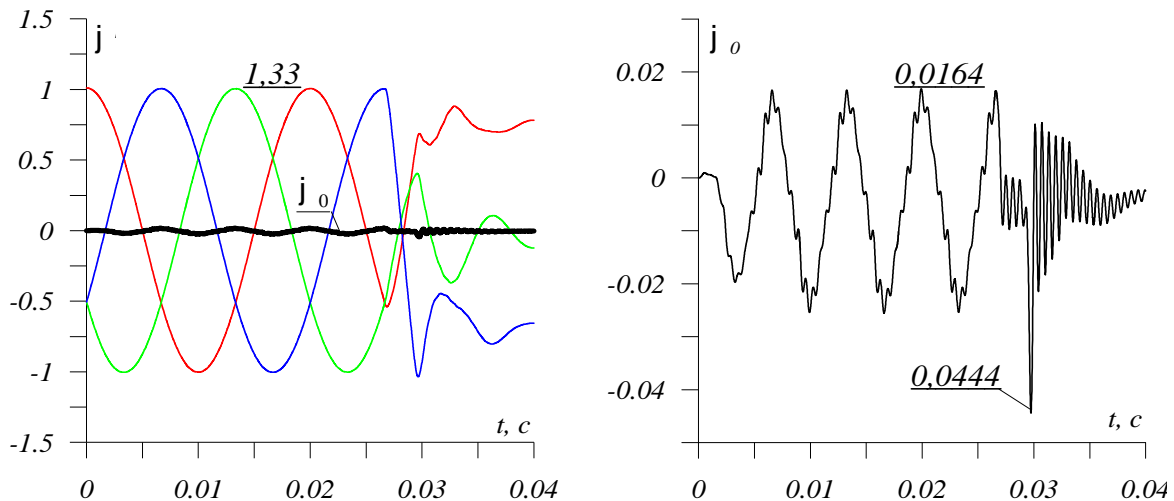


Рис 5. Магнітні потоки у трансформаторі зі схемою з'єднання Y/Y_6
 а) магнітні потоки стрижнів магнітопроводу; б) магнітний потік нульової послідовності.

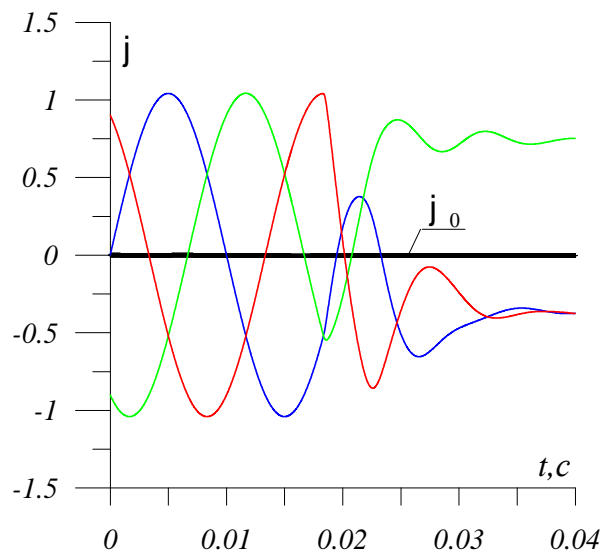


Рис 6. Магнітні потоки у трансформаторі зі схемою з'єднання Δ/Y_6

Важливим є врахування багаторазового повторного запалювання, яке відбувається, якщо відновлена напруга між контактами ВВ стає більшою, ніж величина електричної міцності діелектрика після розмикання контактів. Для матеріалу електродів ВВ, здатного обривати індуктивні струми 4-8 А (CuCr) [9-10], зміна електричної міцності між контактами становить $0,1 \frac{\text{кВ}}{\text{мкс}}$ або 1 кВ за 10 мкс.

Під час дослідження відключення трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Y/Y_6 з урахуванням повторних запалювань ВВ. Момент часу повторних запалювань вибирався на основі проведених попередніх математичних експериментів, у процесі яких порівнювали величини напруг, що відновлюються на контактах в даний момент часу, з електричною міцністю міжконтактних проміжків ВВ відповідно до даних [9].

За повторних відключень амплітуди перенапруг на обмотках ВН зменшилися з 45,2 кВ до 43,65 кВ, а перенапруги в нейтралі збільшилися з 2,25 кВ до 3,97 кВ..

Перенапруги на введеннях ВН зменшилися з 44,8 кВ до 41,7 кВ. За те різко збільшилися перенапруги на обмотках НН, які досягли значення 1454 В, що в 4,6 рази перевищує номінальну напругу обмотки НН і, безумовно, призведе до пробую виткової ізоляції, яка випробовується лише подвійною номінальною напругою [9]. Поява повторних запалювань практично не змінила значень магнітних потоків у фазах трансформатора та дещо зменшила величини потоків нульової послідовності. Амплітуди стрибків струму запалювання у фазах обмотки ВН досягли 13 А.

Висновки

1. Досліджено вплив роботи вакуумних вимикачів на електромагнітні процеси трансформаторів розподільчої мережі. Показано, що відключення трансформаторів зі схемою з'єднання Y/Y_0 обумовлює значно більші кратності перенапруг, ніж відключення трансформаторів зі схемою з'єднання Δ/Y_0 . Виникнення повторних замикань у вакуумному вимикачі при відключенні трансформаторів не надає небезпечного впливу на поздовжню ізоляцію обмоток ВН, але призводить до небезпечних перенапруг в обмотках НН трансформаторів.

2. Використання вакуумних вимикачів у приєднаннях з трансформаторами вимагає примусового обмеження перенапруг з боку обмотки 0,4 кВ за допомогою ОПН, здатних обмежувати перенапруги на обмотках НН, викликані повторними багаторазовими запалюваннями у вакуумних вимикачах.

Література

1. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // Электричество. – 2005. – № 5.
2. Таврида Електрик “Вимикачі вакуумні серії ВВ/TEL” АРТА 674 152.001.
3. Міністерство палива та енергетики України, Державний департамент електроенергетики, “Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства “Таврида Електрик” для електричних мереж 6-35 кВ”. Київ 2001р.
4. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонь О.Л. Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі. // Новини енергетики– 2010. -№3. С.40-46.
5. Никонь О.Л. Бучковський І.Р., Сабат М.Б., Математична модель трифазного трансформатора для частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі // Вісник НУ «Львівська політехніка» “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. — Львів, 2012. — №736. — С. 108-116.
6. Сабат М.Б., Бучковський І.Р., Никонь О.Л.; Оцінка адекватності математичної моделі трифазного трансформатора для вільних складових внутрішніх перенапруг мережі// Вісник НУ «Львівська політехніка» “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. — Львів, 2012. — №736. — С. 117-123.
7. Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонь О. Л.; Перенапруги на поздовжній ізоляції трансформатора за дії струмів короткого замикання // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012. — №5. — С. 41-48.
8. Маліновський А.А., Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонь О. Л. Електромагнітні процеси в трансформаторах за виткових коротких замикань // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012. — №7. — С. 35-42.
9. Schneider Electric, “Відключення електричного струму у вакуумі”. Випуск 15., 2008 г.
10. Міністерство палива та енергетики України, Державний департамент електроенергетики /Норми випробування електрообладнання СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007/ «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» -Київ 2007р.

References

1. Akhmetshin R.S., Rybakov L.M. Technical means of diagnosing power transformers 10/0.4 kV based on frequency characteristics // Elektrychestvo. –2005. – No. 5.
2. Tavrida Electric "BB/TEL series vacuum switches" АРТА 674 152.001.

3. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, State Department of Electric Power, "Methodical guidelines for the selection of non-linear surge arresters produced by the Tavrida Electric company for 6-35 kV electrical networks", Kyiv 2001.
4. Kontorovych L.N., Molnar M.M., Nikonets O.L. Mathematical model of a three-phase transformer for frequencies of the free component of internal network overvoltages. // Energy News - 2010. - No. 3. P. 40-46.
5. Nikonets, L.O. Buchkovskiy, I.R., Sabat, M.B., Mathematical model of a three-phase transformer for the frequency of the free component of internal network overvoltages // Bulletin of Lviv Polytechnic University "Electroenergetic and electromechanical systems". — Lviv, 2012. — No. 736. - C. 108-116.
6. Sabat M.B., Buchkovskiy I.R., Nikonets O.L.; Evaluation of the adequacy of the mathematical model of a three-phase transformer for free components of internal overvoltages of the network// Bulletin of the Lviv Polytechnic University "Electroenergetic and electromechanical systems". — Lviv, 2012. — No. 736. — C. 117-123.
7. Sabat M. B., Buchkovskiy I. R., Nikonets O. L.; Overvoltages on the longitudinal insulation of the transformer under the action of short-circuit currents // Scientific and technical analytical magazine "News of Energy". — K., 2012. — No. 5. — C. 41-48.
8. Malinovskyi A.A., Sabat M.B., Buchkovskiy I.R., Nikonets O.L. Electromagnetic processes in transformers under winding short circuits // Scientific and technical analytical magazine "News of Energy". — K., 2012. — No. 7. - C. 35-42.
9. Schneider Electric, "Disconnecting the electric current in a vacuum". Issue 15., 2008
10. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, State Department of Electric Power / Norms for testing electrical equipment COU-H EE 20.302:2007/ "Industry reserve and investment fund for the development of energy" - Kyiv 2007.

Sabat M. B.

Ph.D., Associate Professor, Lviv Polytechnic National University,
myroslav.b.sabat@lpnu.ua

Shelekh Yu. L.

Ph.D., Associate Professor, Lviv Polytechnic National University,
yurii.l.shelekh@lpnu.ua

Metlushko M. I.

student, Lviv Polytechnic National University,
mariia.metlushko.ee.2020@lpnu.ua

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMERS DURING THEIR DISCONNECTION BY VACUUM SWITCHES

© Sabat M. B., Shelekh Yu. L., Metlushko M. I., 2023

The influence of the operation of vacuum switches on the electromagnetic processes of transformers of distribution networks has been studied. It is shown that during the disconnection of transformers from the network with the connection scheme of the windings "Wye/Wye, with neutral brought out for grounding" causes significantly higher multiples of overvoltages in the windings than the disconnection of transformers with the connection scheme of windings "Delta/ Wye, with neutral brought out for grounding". It was established that the multiplicity of overvoltages depends on the amount of previously stored magnetic field energy. The value of the magnetic fluxes before disconnecting the transformer for the connection schemes of the windings "Wye/Wye, with neutral brought out for grounding" exceeds the similar ones for the connection schemes "Delta/ Wye, with neutral brought out for grounding". In the process of turning off the transformer with the " Wye/Wye, with neutral brought out for grounding " winding connection scheme, the zero sequence magnetic flux increases compared to the nominal one, and with the "Delta/ Wye, with neutral brought out for grounding " connection scheme, there are no zero sequence magnetic fluxes. When studying the process of turning off the transformer with a vacuum

switch, it is important to take into account multiple re-ignition, which occurs if the restored voltage between the contacts of the vacuum switch becomes greater than the electrical strength of the dielectric after opening the contacts. It was established that the occurrence of repeated circuits in the vacuum circuit breaker when the transformer is turned off does not create a dangerous effect on the longitudinal insulation of the windings of the higher voltage of the transformer, but leads to dangerous overvoltages in the windings of the lower voltage of the transformers. The occurrence of dangerous overvoltages in the lower voltage windings of transformers requires forced limitation of overvoltages from the winding side with the help of overvoltage limiters capable of limiting overvoltages on the lower voltage windings caused by repeated multiple ignitions in vacuum switches. New causes of damage and the nature of their appearance in electrical equipment and the possibility of researching electromagnetic processes in equipment with high-voltage windings have been established. The conducted studies and calculations indicate the need for a step-by-step review and adjustment of all regulatory documentation regarding the protection of distribution network equipment (in particular, transformers) against internal overvoltages.

Key words: electromagnetic processes, transformer, vacuum switch, repeated circuits, oscillograms, turn insulation, overvoltages.