

УДК 621.311

Александр Николаевич Антонов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Исследование феррорезонансных явлений в электромагнитных трансформаторах напряжения сетей 6–10 кВ при воздействии дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Среди явлений, оказывающих негативное влияние на работу оборудования в сетях с изолированной нейтралью, особое место занимают феррорезонансные явления. Данная проблема актуальна не только для сетей РФ, но и для сетей ряда европейских стран. Тем не менее на сегодняшний день однозначно не установлены закономерности и параметры элементов сети (электромагнитных трансформаторов напряжения и суммарных емкостей сети), которые в достаточной степени могли бы установить факт потенциального возникновения феррорезонансных явлений. Кроме того, существует проблема экспериментального подтверждения антирезонансных свойств трансформаторов напряжения заводами-изготовителями в рамках независимых лабораторий. Таким образом, возникает задача исследования феррорезонансных явлений на базе полноразмерной физической модели сети с изолированной нейтралью, позволяющей оценить условия возникновения данного рода процессов, с применением реальных электромагнитных трансформаторов напряжения, выпускаемых современными производителями.

Материалы и методы. Методом исследования, способным наиболее адекватно отразить характер протекания процессов и порядок исследуемых величин в рамках исследуемого вопроса, является физическое моделирование на базе стенда для моделирования сетей 6–10 кВ.

Результаты. Исследованы количественные параметры фазных токов и напряжений первичных обмоток трансформаторов напряжения, а также токов дуги и утроенного напряжения нулевой последовательности с выводов «разомкнутого треугольника» при феррорезонансных явлениях в сети. Получены осциллограммы, иллюстрирующие характер изменения величин указанных токов и напряжений при инициировании феррорезонансных процессов. Дана оценка применения различных методов предотвращения феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать выводы о количественных характеристиках параметров сети, при которых возникают феррорезонансные процессы, а также об эффективности ряда мер по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Ключевые слова: феррорезонансные явления, сети с изолированной нейтралью, трансформатор напряжения, дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, переходные процессы, антирезонансные трансформаторы напряжения

Aleksandr Nikolaevich Antonov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Study of ferroresonance phenomena in 6–10 kV electromagnetic voltage transformers when exposed to intermittent single-phase earth faults

Abstract

Background. Ferroresonance occupies a special place among the phenomena that negatively affect the operation of equipment in isolated-neutral networks. This problem is relevant not only for the networks of Russia, but also for a number of European countries. However, to date there are no patterns and parameters of the network elements (electromagnetic

voltage transformers (VT) and total network capacitance), that could sufficiently establish the potential occurrence of ferroresonance phenomena. In addition, there is the problem of experimental validation of anti-resonance properties of VT by manufacturers within independent laboratories. Thus, there is a task to study ferroresonance phenomena based on a full-scale physical model of an isolated-neutral network that allows us to evaluate the conditions of this kind of processes, using real electromagnetic VT produced by modern manufacturers.

Materials and methods. The method of the study that can most adequately reflect the nature of the processes and the order of the values to be studied within the scope of the research is physical modelling based on the test-bed for modelling 6–10 kV networks.

Results. The authors have studied quantitative parameters of phase currents and voltages of VT primary winding, as well as arc currents and triple voltage of zero sequence from the terminals of open delta in case of ferroresonance phenomena in the network. Oscillograms have been obtained, that demonstrate the nature of the change of the values of the indicated currents and voltages during the initiation of ferroresonance processes. Evaluation of the application of different methods for ferroresonance prevention in isolated-neutral networks is given.

Conclusions. The obtained results make it possible to draw conclusions about the quantitative characteristics of the network parameters at which ferroresonance processes occur, as well as on the effectiveness of a number of measures to prevent ferroresonance in 6–10 kV isolated-neutral networks.

Key words: ferroresonance phenomena, isolated-neutral networks, voltage transformer, intermittent single-phase earth faults, transient processes, antiresonant voltage transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.051-057

Введение. В Российской Федерации значительную долю от всех энергосетей 6–35 кВ представляют сети, работающие с изолированной нейтралью. По разным подсчетам, их доля составляет от 70 до 80 % от общей протяженности сетей среднего напряжения. Данный факт обуславливает наличие существенного количества трансформаторов напряжения (ТН), применяемых на соответствующих энергообъектах.

Среди явлений, оказывающих негативное влияние на работу оборудования в сетях с изолированной нейтралью, особое место занимают феррорезонансные явления. Данная проблема актуальна не только для сетей РФ, но и для сетей ряда стран Европы, таких как Испания и Польша [1–4]. Также внимание данному вопросу уделяется со стороны СИГРЭ в виде подготовки соответствующего документа [5].

Характерным признаком протекания феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью является продолжительное воздействие перенапряжений и сверхтоков на первичную обмотку трансформаторов напряжения. Это приводит к повреждению ТН и необходимости их последующей замены. Еще одна опасность феррорезонансных явлений состоит в неограниченной длительности их протекания. Вместе с этим на обмотке «разомкнутого треугольника» возникает величина утроенного напряжения нулевой последовательности, достаточная для ложного срабатывания некоторых защит от ОЗЗ.

Для сетей с изолированной нейтралью характерны несколько факторов, приводящих к развитию электромагнитных колебательных процессов, способных повредить трансформаторы напряжения [6–8]:

- перенапряжения при воздействии дугowych перемежающихся замыканий на землю;
- феррорезонансные явления при включении на ненагруженные шины;

- перенапряжения, возникающие при неполнофазных режимах работы.

Общим для указанных типов феррорезонансных процессов является тот факт, что имеет место возникновение напряжения смещения нейтрали. Это, в свою очередь, сопровождается колебательными процессами на различных гармониках и насыщением ферромагнитных сердечников трансформаторов напряжения [9].

Особый интерес вызывает инициирование феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью при возникновении режима дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. Это становится возможным ввиду нелинейности характеристики намагничивания электромагнитных трансформаторов напряжения, преимущественно использующихся в сетях среднего напряжения. В моменты гашения дуги возникают переходные процессы, связанные с обменом энергией между емкостями фаз сети и нелинейными индуктивными сопротивлениями ТН, что зачастую сопровождается насыщением сердечников. Войдя в режим насыщения, первичные обмотки ТН становятся подвержены термическому воздействию от протекания сверхтоков, что способно либо повредить сам трансформатор, либо привести к срабатыванию установленных на его выводах предохранителей и отключению ТН от сети. Чем чаще происходят последовательные зажигания и погасания дуги, тем большее время трансформатор напряжения будет находиться под воздействием повышенных токов и напряжений.

Тем не менее на сегодняшний день однозначно не установлены закономерности и параметры элементов сети (электромагнитных ТН и суммарных емкостей сети), которые в достаточной степени могли бы установить факт потенциального возникновения феррорезонансных явлений. Кроме того, существует проблема

экспериментального подтверждения антирезонансных свойств ТН заводами-изготовителями в рамках независимых лабораторий.

Таким образом, возникает задача исследования феррорезонансных явлений на базе полноразмерной физической модели сети с изолированной нейтралью, позволяющей оценить условия возникновения данного рода процессов, с применением реальных электромагнитных ТН, выпускаемых современными производителями.

Методы исследования. Методом исследования, способным наиболее адекватно отразить характер протекания процессов и порядок исследуемых величин, является физическое моделирование. Соответствующие эксперименты проводились на базе физического стенда для моделирования сетей 6–10 кВ, организованного на базе научно-образовательного центра «Высоковольтные измерительные преобразователи и трансформаторы» (НОЦ ВИПТ) ИГЭУ.

Для воспроизведения реальных условий работы трансформаторов напряжения 10 кВ был разработан испытательный стенд, показанный на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторная испытательная установка

Для подачи высокого напряжения на установку применен силовой двухобмоточный трансформатор типа ТЛС-100/10 УХЛ2 с номинальной мощностью 100 кВА и высшим номинальным напряжением 10 кВ. Данный трансформатор обладает магнитопроводом трехстержневого типа из холоднокатаной электротехнической стали. Питание стенда производится со стороны обмотки 0,4 кВ с помощью лабораторных автотрансформаторов АТСН-80-380. Лабораторный

автотрансформатор АТСН-80-380 с номинальной мощностью 60 кВА предназначен для регулировки однофазного напряжения в пределах от 0 до 430 В при питании от сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

Для подключения высоковольтной обмотки силового трансформатора к остальной части установки используются высоковольтные выключатели ВВТЕЛ 15 кВ с пофазным управлением. Такие выключатели предназначены для коммутации электрических цепей с изолированной нейтралью при нормальных и аварийных режимах работы в сетях переменного тока частоты 50 Гц с номинальным напряжением до 15 кВ. Наличие возможности пофазного типа управления необходимо для моделирования различного рода неполнофазных режимов, часто приводящих к феррорезонансным явлениям.

В качестве емкостей фаз на землю применен набор высоковольтных конденсаторов КБГ-П 30 кВ с номинальными емкостями 0,1 и 1 мкФ. Указанные емкости сгруппированы в виде наборной панели. Наличие специальной наборной панели позволяет комбинировать указанные конденсаторы для получения более точного соответствия модели и сети. Для подключения в нейтраль силового трансформатора используются высоковольтные конденсаторы с емкостью 0,5 мкФ. Междупазные емкости не моделировались, так как их наличие приводит к ограничению уровней перенапряжений.

В рамках исследования эксперименты проводятся на группе однофазных трансформаторов напряжения ЗНОЛ-НТЗ-10 УХЛ2 с номинальным первичным напряжением $10/\sqrt{3}$ кВ. Корпус трансформаторов выполнен из эпоксидного компаунда, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий. Данные трансформаторы работают в системе с изолированной нейтралью без автоматического отключения при замыкании на землю, поэтому должны выдерживать в течение 8 часов приложенное напряжение, равное $1,9 \cdot U_{ном}$. Трансформаторы обеспечивают питание приборов учета электроэнергии, контрольно-измерительной аппаратуры, релейных (микропроцессорных) защит, автоматики и используются, когда требуются измерения фазных напряжений и контроль изоляции сети 6 или 10 кВ.

Измерительная часть испытательного стенда представлена датчиками напряжения, тока и устройством обработки полученных сигналов.

Для моделирования дугового замыкания используется несколько типов замыкателей, в числе которых имеются разрядник с поворотным контактом и разрядник с контактом на воздушной подвеске.

В рамках данного исследования феррорезонансные процессы в сети были получены с помощью опыта моделирования дуговых

однофазных замыканий на землю. Схема испытательной установки для данного опыта представлена на рис. 2.

Для создания режима с возникновением дуговых перемежающихся замыканий на землю использовался разрядник с поворотным контактом. В нормальном режиме в высоковольтной части линейное напряжение поддерживалось на уровне 12 кВ (максимальное рабочее напряжение для ТН класса напряжения 10 кВ по ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009)). Количество повторных зажиганий дуги – 20, длительность паузы после каждого погасания дуги – не менее 5 с.

Также в нескольких экспериментах между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей были включены резисторы с суммарным сопротивлением 733 Ом для оценки влияния данного фактора на вероятность погашения феррорезонансных явлений. Дополнительно было исследовано действие прибора для погашения феррорезонансных явлений СЗТн У2.1, подключаемого к выводам вторичных обмоток, соединенных в «разомкнутый треугольник».

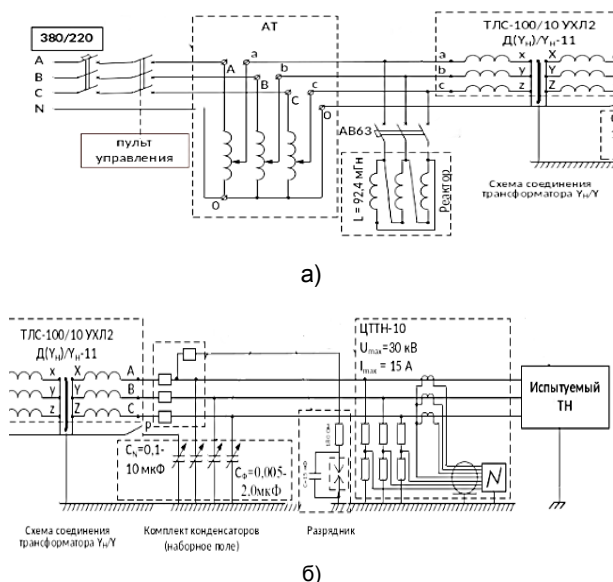


Рис. 2. Схема установки для испытания на устойчивость ТН к воздействиям при перемежающемся дуговом однофазном замыкании на землю с подключением предварительно заряженной емкости в нейтраль силового трансформатора: а – участок схемы 0,4 кВ; б – участок схемы 10 кВ

Результаты исследования. Результатами исследования являются статистические данные в виде осциллограмм фазных токов и напряжений первичных обмоток ТН, а также токов дуги и напряжений $3U_0$ с выводов «разомкнутого треугольника» для суммарной емкости сети в диапазоне от 96,76 до 10052,6 нФ.

Одной из выявленных особенностей является ограниченный диапазон значений суммарной емкости сети, при которых возникали феррорезонансные явления. В частности, для исследуемых ТН 3хЗНОЛ-НТЗ-10 УХЛ2 он составляет 199,16–2078,4 нФ. Пример осциллограмм при

зарегистрированном протекании устойчивого феррорезонансного явления после погасания дуги для суммарной емкости сети 976 нФ приведен на рис. 3, 4.

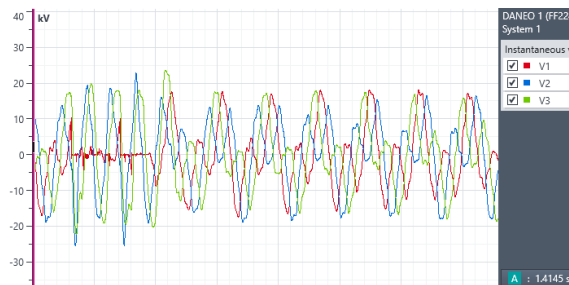


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети суммарной емкостью 976 нФ

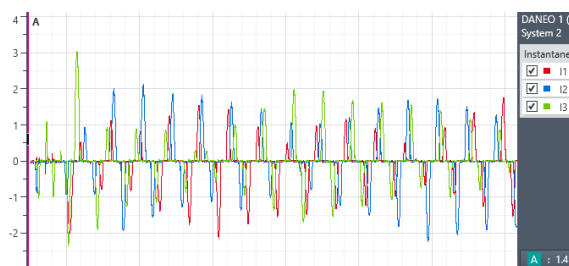


Рис. 4. Осциллограммы фазных токов при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об отсутствии корреляции между увеличением значения суммарной емкости сети и повышением вероятности возникновения феррорезонансных явлений.

Также было исследовано влияние включения между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей активного сопротивления (733 Ом). Наличие резисторов не оказывало влияния на вероятность возникновения феррорезонансных явлений. Единственным положительным следствием такого включения является ограничение действующих значений фазных токов в первичных обмотках ТН (рис. 5, 6).

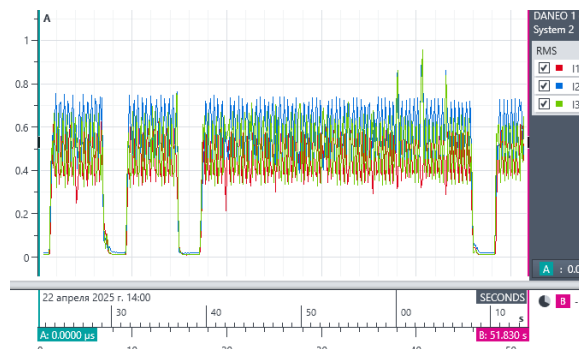


Рис. 5. Действующие значения фазных токов при перемежающейся дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при отсутствии резисторов в нейтрали первичных обмоток ТН

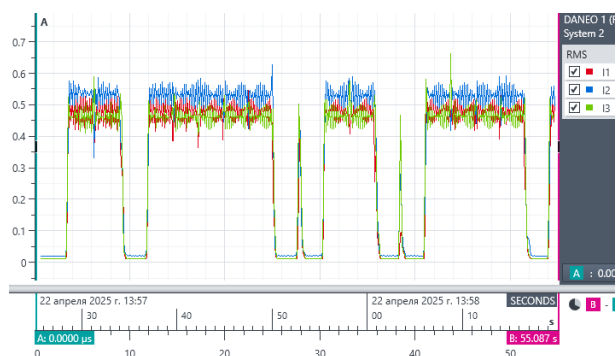


Рис. 6. Действующие значения фазных токов при перебегающей дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при наличии резисторов в нейтрали первичных обмоток ТН

При этом в экспериментах с величиной суммарной емкости сети от 4,2 мкФ наблюдается выход из строя установленных резисторов, что приводит к разземлению нейтрали первичных обмоток ТН.

Таким образом, включение активного сопротивления величиной 733 Ом и менее между нейтральной точкой первичных обмоток ТН и землей не является мерой, способной предотвратить или даже снизить вероятность возникновения феррорезонансных явлений, а также может привести к недопустимому режиму заземления первичных обмоток ТН (а именно, обрыву нейтрали ТН).

В рамках данного исследования также было проанализировано действие прибора для погашения феррорезонансных явлений СЗТн У2.1, подключаемого к выводам вторичных обмоток, соединенных в «разомкнутый треугольник». Производитель гарантирует эффективную работу устройства при дуговых перебегающих замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. При проведении экспериментов диапазон значений суммарных емкостей сети, вызывающих феррорезонанс, сократился до 976–2078,4 нФ. Заявленное ранее увеличение линейного напряжения в ходе испытаний с номинального значения 10 кВ до максимального рабочего (12 кВ) привело к отказу устройства на указанном диапазоне суммарных емкостей сети после нескольких успешных срабатываний. Данный факт иллюстрируется осциллограммами на рис. 7, 8.

К аналогичному выводу относительно вопроса эффективности приборов, демпфирующих феррорезонансные явления при подключении к обмотке «разомкнутого треугольника», пришли польские коллеги из Горно-металлургической академии им. Станислава Сташица в Кракове [10]. В рамках своего исследования они анализировали работу приборов ABB VT Guard и Orion EE Ferro-Damp, которые аналогично рассмотренному ранее СЗТн У2.1 должны погашать феррорезонансные явления в сетях с изолированной нейтралью и с электромагнитными ТН.

Тем не менее авторы [10] подчеркивают ограниченную эффективность указанных устройств, подтверждая выдвинутые положения соответствующими осциллограммами. Таким образом, на сегодняшний момент существующие приборы для погашения феррорезонансных явлений, включаемые в обмотку «разомкнутого треугольника», не способны в полной мере выполнять закладываемую в них производителями функцию и требуют дальнейшего усовершенствования.

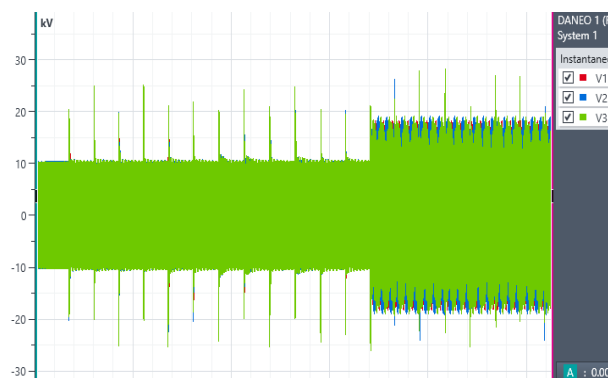


Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений при перебегающей дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при подключении прибора СЗТн У2.1

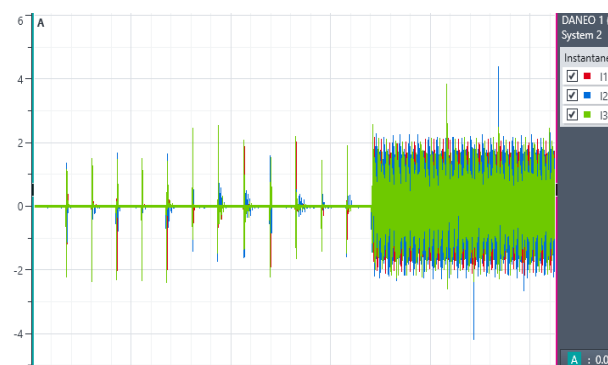


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов в первичных обмотках ТН при перебегающей дуге (вращающийся замыкатель) в моделируемой сети с суммарной емкостью 976 нФ при подключении прибора СЗТн У2.1

Организационно-технические мероприятия по предотвращению повреждаемости трансформаторов напряжения в сетях с изолированной нейтралью. Для эффективного проведения мероприятий по предотвращению повреждений воспользуемся разграничениями явлений в сетях с трансформаторами напряжений, передоложенными Ю.Л. Саенко и А.С. Поповым [11, 12], которые предлагают разделить повреждаемость трансформаторов при перебегающих замыканиях на повреждаемость при феррорезонансе, который определяется равенством эквивалентного индуктивного сопротивления ТН и емкостного сопротивления сети

$\omega L_{\text{экв}} = 1/\omega C$, и повреждаемость ТН в результате «перевозбуждения». Термин «перевозбуждение» авторы применяют для режимов, когда имеет место повышение напряжения на обмотках высшего напряжения (ВН), например во время однофазных дуговых замыканий (ОДЗ) через перемежающуюся дугу, удовлетворяющих условиям, вызывающим эскалацию напряжения (например, в соответствии с теорией Петерсена). Пример такого повышения напряжения представлен на рис. 9. В данном режиме могут недопустимо возрастать токи в обмотках ВН, выводя ТН из строя. Причем следует отметить, что условие равенства $\omega L_{\text{экв}} = 1/\omega C$ может не соблюдаться, поэтому повышение токов без соблюдения указанного равенства не относится, строго говоря, к феррорезонансу.

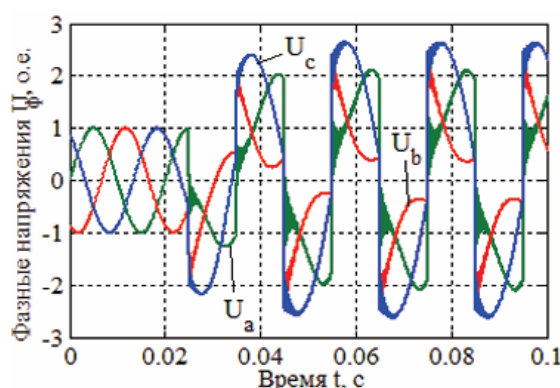


Рис. 9. Расчетные кривые фазных напряжений в обмотке ТН при перемежающемся ОДЗ

Разделение физических явлений позволяет разграничить меры по предотвращению повреждений. Многочисленные эксперименты, выполненные в данном исследовании, показывают, что область существования феррорезонанса в диапазоне емкостей сети существенно ниже, чем это зафиксировано в редакции стандарта по испытанию на предмет феррорезонанса, и ограничивается диапазоном $0,2 \div 1$ мкФ (в стандарте диапазон емкостей ограничен 10,7 мкФ для ТН 10 кВ и 27 мкФ для ТН 6 кВ), что в какой-то мере коррелирует с данными [12], где диапазон емкостей резонанса ограничен 1,5 мкФ, что может быть связано как с параметрами самого трансформатора напряжения, так и с условиями проведения экспериментов (в нашем случае испытания проводились на максимальном рабочем напряжении $1,2 U_{\text{ном}}$).

На основании проведенных исследований и данных [11, 12] можно рекомендовать включение резистора 25 Ом и менее в цепь «разомкнутого треугольника» вторичной обмотки для предотвращения феррорезонансных явлений, однако для ТН с литой изоляцией выделение тепловой энергии при ОЗЗ в первичной обмотке и обмотке цепи «замкнутого треугольника» может превышать предельные значения, по сравнению с трансформаторами с масляной

изоляцией, осуществляющей более эффективное охлаждение. Таким образом, включение резистора сопротивлением 25 Ом и менее может быть недопустимо.

В режиме перевозбуждения, вызванного явлением эскалации напряжения на обмотке ВН, не сопровождаемого резонансом, работа резистора в обмотке «разомкнутого треугольника» малоэффективна. В этом режиме следует применять меры для ограничения тока в обмотке ВН, единственный способ это сделать – добавить сопротивление в нейтраль обмотки трансформатора. В общем смысле под термином сопротивление можно подразумевать как активное сопротивление, так и нелинейную индуктивность в виде однофазного трансформатора, включенного в нейтраль ТН, реализованного в выпускаемых трансформаторах типа НАМИ. Следует отметить, что нелинейная индуктивность при несимметричной дуге с присутствием в спектре постоянной составляющей подвержена насыщению и феррорезонанс в этом режиме возможен по причине снижения сопротивления.

Для резистивного сопротивления рекомендованный диапазон сопротивлений в нейтрали трансформатора – 5–10 кОм [12], меньшие сопротивления, как показали исследования, неэффективны. Также при выборе активного сопротивления следует обратить внимание на его стойкость к тепловому удару. При проведении экспериментов используемые резисторы регулярно перегорали, разземляя обмотки ВН. Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы: применение мощных резисторов типа RX24, выпускаемых в алюминиевом корпусе, выполняющем роль радиатора, не рекомендуется; наиболее предпочтительны проволочные резисторы типа С5-35В(ПЭВ); величина сопротивления в нейтрали должна выбираться с учетом точности измерений в соответствии с рекомендациями изготовителя. Более точный выбор резистора должен быть проведен на основе анализа емкости сети и вероятности ОЗЗ с эскалацией напряжения на обмотках ВН.

Список литературы

1. **Ferroresonant** Configurations in Power Systems / V. Valverde, G. Buigues, A.J. Mazón, et al. // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2012. – Vol. 10, No. 4. – P. 474–479.
2. **Araujo A.E.A., Soudack A.C., Marti J.R.** Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour // *IEEE Proceedings-c.* – May 1993. – Vol. 140. – P. 237–240.
3. **Ferroresonance** in voltage transformers: Analysis and simulations / V. Valverde, A.J. Mazón, I. Zamora, G. Buigues // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2007. – Vol. 1, No. 5. – P. 465–471.
4. **Mitigating** Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks / W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – October 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2362–2369.

5. CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569 - Resonance and Ferroresonance in Power Networks. – February 2014.

6. Зикерман М.Х. Трансформаторы напряжения для сетей 6–10 кВ. Причины повреждаемости // Новости электротехники. – 2003. – № 1(25).

7. Борисенко Л.С., Панасюк Д.И., Стреляев П.И. Предотвращение повреждений трансформаторов напряжения контроля изоляции 35 кВ при замыканиях на землю // Энергетик. – 1983. – № 9. – С. 21–23.

8. Дударев Л.Е., Волошек И.В., Левковский А.И. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции. – 1991. – № 1. – С. 66–71.

9. Петров О.А. Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети // Электрические станции. – 1972. – № 9. – С. 57–61.

10. Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations / R. Tarko, W. Nowak, J. Gajdzica, S. Czapp // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 10. – P. 2423.

11. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Определение границ существования феррорезонанса в сети с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66 на основе компьютерного моделирования // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 12(82). – С. 9–16.

12. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7(89). – С. 59–66.

References

1. Valverde, V., Buigues, G., Mazón, A.J., Zamora, I., Albizu, I. Ferroresonant Configurations in Power Systems. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 474–479.

2. Araujo, A.E.A., Soudack, A.C., Marti, J.R. Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour. *IEE Proceedings-c*, May 1993, vol. 140, pp. 237–240.

3. Valverde, V., Mazón, A.J., Zamora, I., Buigues, G. Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 465–471.

4. Piasecki, W., Florkowski, M., Fulczyk, M., Mahonen, P., Nowak, W. Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369.

5. CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569 – Resonance and Ferroresonance in Power Networks. February 2014.

6. Zikherman, M.Kh. Transformatory napryazheniya dlya setey 6–10 kV. Prichiny povrezhdaemosti [Voltage transformers for 6–10 kV networks. The causes of damageability]. *Novosti elektrotekhniki*, 2003, no. 1(25).

7. Borisenko, L.S., Panasyuk, D.I., Strelyaev, P.I. Predotvrashchenie povrezhdeniy transformatorov napryazheniya kontrolya izolyatsii 35 kV pri zamykaniyakh na zemlyu [Prevention of damage to 35 kV insulation control voltage transformers in case of earth faults]. *Energetik*, 1983, no. 9, pp. 21–23.

8. Dudarev, L.E., Voloshek, I.V., Levkovskiy, A.I. Chislenny analiz ferrozonansnykh protsessov v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Numerical analysis of ferroresonance processes in isolated-neutral networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1991, no. 1, pp. 66–71.

9. Petrov, O.A. Smeshchenie neytrali pri pofaznykh otklyucheniyyakh i obryvakh faz v kompensirovannoy seti [Neutral displacement during phase disconnections and phase failures in compensated networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 9, pp. 57–61.

10. Tarko, R., Nowak, W., Gajdzica, J., Czapp, S. Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 10, p. 2423.

11. Saenko, Yu.L., Popov, A.S. Opredelenie granits sushchestvovaniya ferrozonansa v seti s izolirovannoy neytral'yu i elektromagnitnymi transformatorami napryazheniya tipa NTMI-6-66 na osnove komp'yuternogo modelirovaniya [Determination of the boundaries of existence of ferroresonance in isolated-neutral network and the electromagnetic voltage transformers NTMI-6-66 on the basis on the computer simulation]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2010, no. 12(82), pp. 9–16.

12. Saenko, Yu.L., Popov, A.S. Issledovanie prichin povrezhdeniya transformatorov napryazheniya kontrolya izolyatsii [Study of the causes of damage to isolation monitoring voltage transformers]. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2011, no. 7(89), pp. 59–66.