

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, эл. почта: yls@mail.ru, artempopov9@gmail.com

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Сети 6-35 кВ получили широкое распространение в отечественной практике, согласно статистики, порядка 90 % из них работают с изолированной нейтралью. Это в свою очередь обуславливает специфические особенности работы этих сетей, к которым, прежде всего, можно отнести высокие кратности перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ), невысокая чувствительность а также ложное срабатывание защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), феррорезонансные процессы, сопровождающиеся выходом из строя трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ) [1].

В данной статье рассматриваются проблемы, связанные с эксплуатацией ТНКИ в таких сетях. В настоящее время согласно статистике, приводимой в технической литературе, доля поврежденных трансформаторов напряжения (ТН) составляет порядка 7-12 % из общего числа установленных. Нарушение нормальной работы ТНКИ, прежде всего, сказывается на уровне электробезопасности сети, нормальной работе приборов учета электроэнергии, релейной защиты и автоматики. Известны случаи, когда повреждения ТН сопровождались выбросом масла и пожарами в распределительных устройствах, которые в итоге приводили к полному погашению подстанции.

Одной из основных и наиболее распространенных проблем, связанных с эксплуатацией ТНКИ, является феррорезонанс. Среди всех разновидностей феррорезонансных процессов (ФРП) наиболее часто на практике встречается субгармонический феррорезонанс на частоте 25 Гц, возникающий при отключении или самоустранении ОЗЗ. Данный режим представляет наибольшую опасность для ТНКИ, что обусловлено существованием составляющей пониженной частоты в спектре фазных напряжений и повышенных токов в обмотке высокого напряжения (ВН) ТН. При этом наблюдается перегрев этой обмотки, спекание витков, возникновение витковых и коротких замыканий.

Встроенная защита ТН оказывается не чувствительной к таким перегрузкам ТН, в результате чего она срабатывает после возникновения короткого замыкания в обмотке. В качестве примера на рис. 1 представлены полученные в результате моделирования расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке при феррорезонансе, возникшем в результате появления и самоустранения ОЗЗ.

Существующие решения этой проблемы могут быть разделены на три основные концепции: разработка защитных устройств от феррорезонанса, изменение режима нейтрали распределительных сетей 6-35 кВ, разработка и внедрение антирезонансных трансформаторов напряжения. Более подробно остановимся на последнем подходе.

Согласно действующего ГОСТа на ТН антирезонансным считается трансформатор, который устойчиво и без повреждений работает при существовании в сети феррорезонансных явлений. Основной принцип, положенный в основу всех антирезонансных ТНКИ, заключается в использовании дополнительного трансформатора нулевой последовательности (ТНП) с пониженной рабочей индукцией. Этот ТНП включается или между фазой и землей, или между нейтралью обмотки высокого напряжения (ВН) и землей. Наибольшую популярность в отечественно практике получили антирезонансные ТН типа НАМИ и НАМИТ, подробное описание принципа действия которых приведено в работе [2]. В последнее время также появляются предложения, в которых авторы предлагают разделить функции ТНКИ на два отдельных трансформатора, один из которых будет использован для метрологических задач, другой – для контроля изоляции сети [3].

Для исследования эффективности применения антирезонансных ТН была создана модель сети 6 кВ в среде MATLAB/Simulink, параметры которой были приближены к реальным. С точки зрения функциональных возможностей предложенная модель способна исследовать

такі види переходних процесів як виникнення і зникнення однофазного замикання на землю, процеси перемежовуються од-

нофазного дугового замикання, включення або відключення участка мережі, підключення ТН к шинам с малою суммарною ємністю.

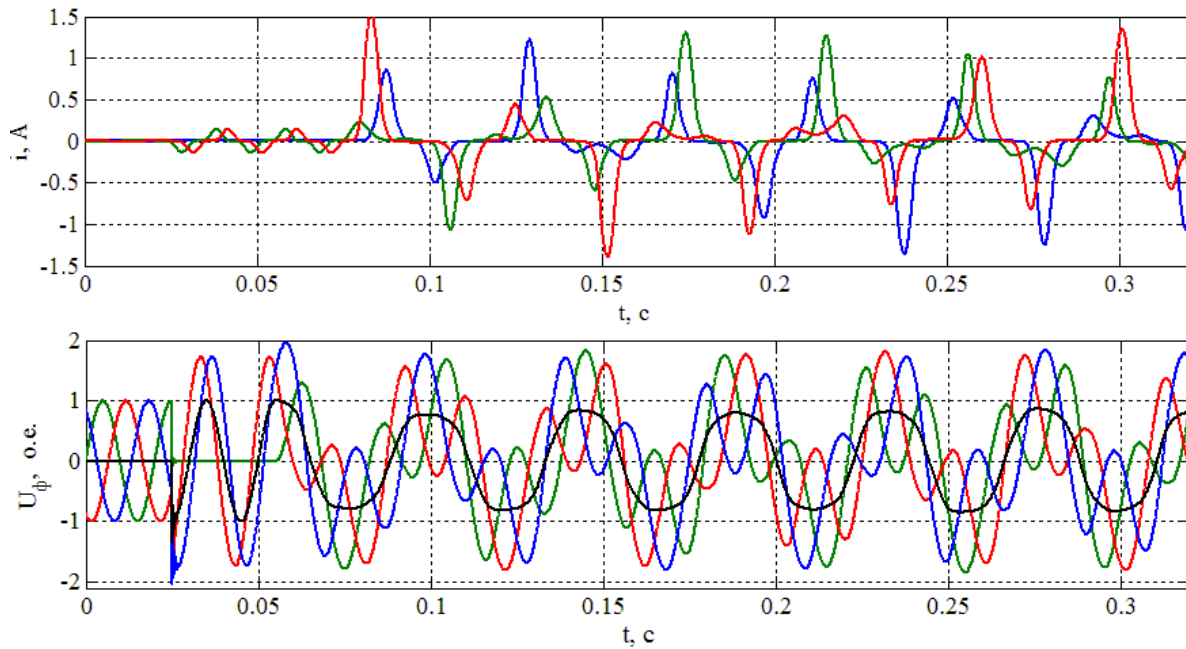


Рис. 1. Расчетные кривые токов в обмотке ВН и фазных напряжений при феррорезонансе, возникшем в результате устранения ОЗЗ

Исследования эффективности применения антирезонансного трансформатора типа НАМИТ показали его невысокую эффективность. Низкая чувствительность встроенной защиты от феррорезонанса не всегда срабатывает при субгармонических колебаниях, в результате чего данный трансформатор становится аналогичен ТН традиционного исполнения со всеми вытекающими последствиями. Снижение уставки срабатывания защиты ниже 100 В приведет к тому, что коммутация ТНП будет происходить при каждом ОЗЗ. Измерение напряжения нулевой последовательности на таком ТН производится с обмотки разомкнутого треугольника. ТНП выступает в роли делителя напряжения, поэтому при его подключении имеет место недоучет измерения напряжения нулевой последовательности и напряжения фаз относительно земли. В режиме ОЗЗ при срабатывании защиты ТНП будет в разомкнутом состоянии, что напрямую скажется на точности измерения напряжения нулевой последовательности, а также повлиять на работу токовых направленных защит.

Результаты моделирования показали, что встроенная защита НАМИТ, выполненная на основе коммутирующегося ТНП, не всегда оказывается эффективной. При некоторых параметрах сети размыкание обмотки ТНП не приводит к срыву феррорезонанса, а лишь приводит к изме-

нению частоты процесса. Характерная расчетная кривая напряжения 3U0 приведена на рис. 2.

Также возможны случаи заклинивания защиты. После ее срабатывания происходит уменьшение напряжения нулевой последовательности, и защита возвращается в исходное состояние. При этом сама коммутация защиты (шунтирование ТНП) может привести к возбуждению феррорезонанса, и ее срабатывание может произойти вновь. Такой процесс может повторяться сколь угодно долго. Характерная расчетная кривая напряжения 3U0 для такого случая приведена на рис. 3.

Без размыкания обмотки ТНП конструкция НАМИТ полностью аналогична трансформатору типа НТМИ, поэтому при длительных перенапряжениях его сердечники быстро насыщаются и обмотки могут быть повреждены.

Конструкцию ТН типа НАМИ следует считать более удачной и перспективной, хотя она также не лишена своих недостатков. Расчеты показали, что при однократном появлении и исчезновении ОЗЗ в сети с ТН типа НАМИ возникают затухающий колебательный процесс, т.е. устойчивый феррорезонанс не наступает. Наличие электрической связи с землей обмотки ВН обуславливает возможность появления феррорезонанса. Как показали результаты моделирования, при коммутации в сети с малой емкостью (десятки-сотни пФ) возможно появления ФРП.

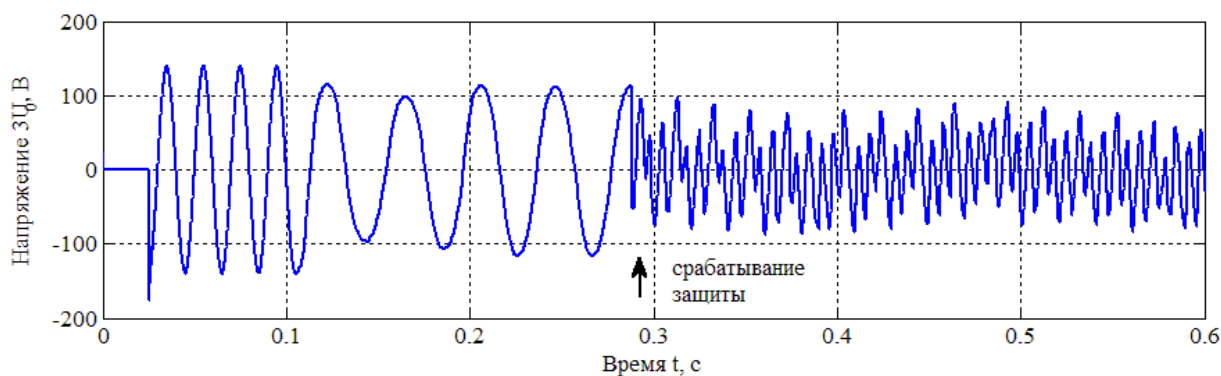


Рис. 2. Расчетная кривая напряжения $3U_0$ при феррорезонансе с ТН типа НАМИТ, возникшем при устраниии ОЗЗ

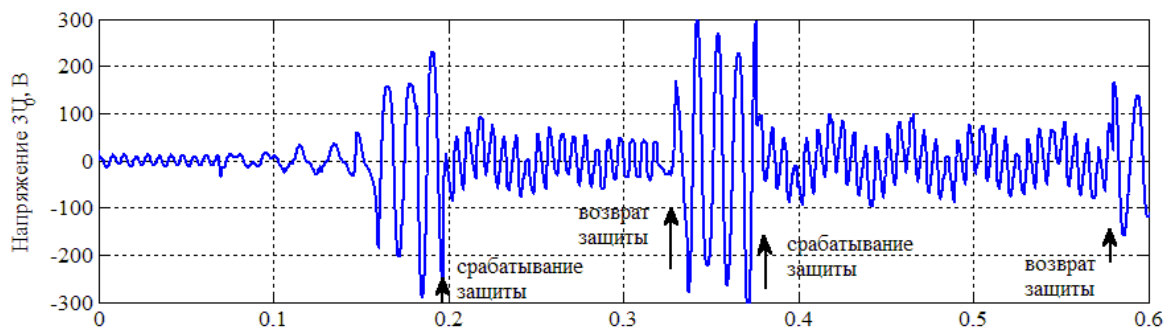


Рис. 3. Расчетная кривая напряжения $3U_0$ при феррорезонансе с ТН типа НАМИТ, возникшем при коммутации участка сети

Характерная кривая напряжения $3U_0$ для такого случая приведена на рис. 4. С точки зрения термической перегрузки ТН данный режим опасность не представляет, поэтому надежность этого ТН гораздо выше. Кроме того, данный тип трансформатора более устойчив к перемежающимся ОДЗ, поскольку при дуговых перенапряжениях заметного насыщения трансформатора не происходит. Это обусловлено постоянным наличием ненасыщающегося ТНП с индуктивным сопротивлением порядка 300 кОм.

Кроме проблемы, связанной с повреждением ТНКИ и феррорезонансными перенапряжениями, достаточно острой является проблему точности учета электроэнергии в сетях 6-35 кВ. Одним из решений задачи повышения точности работы измерительного комплекса стало внедрение цифровых счетчиков электроэнергии, которые обладают улучшенными метрологическими характеристиками, по сравнению с индукционными. Однако повышение точности учета лишь за счет применения высокоточных счетчиков не даст должного эффекта, поскольку погрешности преобразователей (трансформаторов тока и напряжения) могут резко снизить точность учета электроэнергии.

Известной и широко распространенной схемой учета активной электроэнергии является

схема Аарона, для реализации которой требуется измерение двух междуфазных напряжений и двух фазных токов. Нейтраль сетей 6-35 кВ и нагрузки изолирована, поэтому в токах нагрузки нет составляющих нулевой последовательности. Измеряя ток в двух фазах всегда можно определить ток в третьей фазе, поскольку сумма трех фазных токов всегда равна нулю. Для измерения междуфазных напряжений могут быть использованы либо незаземленные ТН (НОМ, НОЛ), подключаемые на линейное напряжение, либо заземленные ТН (НТМИ, ЗНОМ, ЗНОЛ), подключаемые между фазой и землей.

Одной из первых проблем, возникающей при замене индукционных счетчиков на электронные является проблема их совместимости с ТН [4].

Схема Аарона предполагает использование двухэлементных счетчиков, для подключения которых достаточно два ТН, подключенных на линейное напряжение (схема неполного треугольника). Измерение третьего междуфазного напряжения при этом возможно, однако при подключении нагрузки к паре этих фаз возникают дополнительные погрешности в измерении двух других напряжений, особенно по углу, поскольку потребляемая приборами мощность будет распределена между двумя ТН. Это в свою очередь станет причиной снижения точности ТН [2].

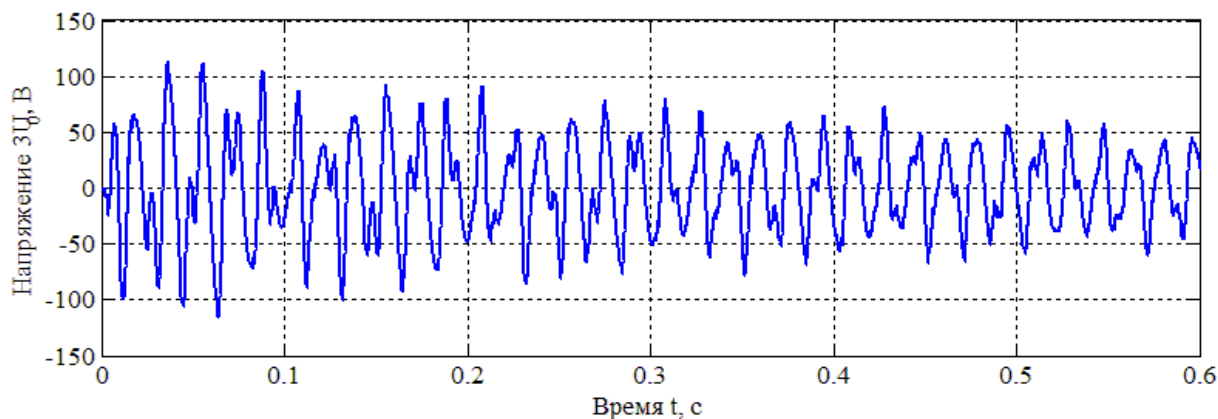


Рис. 4. Расчетная кривая напряжения $3U_0$ при феррорезонансе с ТН типа НАМИ, возникшем при включении ненагруженных шин

Питание счетчиков электроэнергии от заземленных ТН сопряжено с рядом трудностей, которые в первую очередь обусловлены присутствием напряжения нулевой последовательности во вторичных напряжениях ТН. Так, например, при ОЗЗ в сети одна фаза ТН закорочена, а две другие находятся под линейным напряжением. Такая схема аналогична схеме неполного треугольника, в которой при условии подключения нагрузки к трем фазам могут возникать недопустимые погрешности. Кроме того при ОЗЗ возрастает ток холостого хода ТН, что также отрицательно сказывается на метрологических характеристиках ТН. Именно поэтому согласно ГОСТа на ТНКИ их класс точности не гарантируется при ОЗЗ.

С одной стороны появление составляющих нулевой последовательности в фазных напряжениях и их учет счетчиком не должен повлиять на результаты учета, поскольку в нагрузке нет тока нулевой последовательности, а произведение токов и напряжений различных последовательностей гарантировано дают нулевой результат. При неустойчивых замыканиях напряжения относительно земли не являются строго периодическими функциями и изменяются хаотически. В таком случае оценить влияние переходных процессов на точность учета гораздо сложнее. При переходных процессах ОДЗ напряжения фаз относительно земли могут превышать линейное напряжение, в результате ТНКИ насыщаются в еще большей степени. Согласно результатам исследований сотрудников ИЭД НАН Украины, погрешности самого ТН в таких режимах составляют порядка 4-5%, причем погрешность является отрицательной, т.е. речь идет о недоучете электроэнергии. Также следует отметить, что АЦП счетчиков электроэнергии рассчитывается на фазное напряжение ТН, т.е. на 57,7 В, в то время как

при процессах ОДЗ это значение может быть в несколько раз больше, что может привести к его повреждению или повлиять на точность преобразования.

Антирезонансные ТН, несмотря на общие принципы построения, с точки зрения учета электроэнергии дают различные результаты. В ТН типа НАМИТ независимо от состояния обмотки ТНП вторичные напряжения содержат составляющую нулевой последовательности, которая, как было отмечено выше, отрицательно влияет на метрологические функции измерительного комплекса. Кроме того, при ОЗЗ и замкнутом ТНП возрастает ток холостого хода в сердечниках неповрежденных фаз, что также отрицательно влияет на точность измерения напряжения. В этих случаях имеют место отрицательные погрешности, т.е. речь идет о недоучете напряжения, и соответственно электроэнергии.

Антирезонансный ТН типа НАМИ имеет трехсердцевую конструкцию и замкнутую коротко обмотку треугольника, расположенную на трех стержнях. Сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора близко к сопротивлению рассеивания обмотки, поэтому при несимметричных режимах все напряжение нулевой последовательности выделяется на ТНП. В результате чего во вторичных напряжениях нет составляющей нулевой последовательности и влияния на учет электроэнергии. Это является весомым преимуществом, по сравнению с трансформатором типа НАМИТ.

Современные счетчики электрической энергии являются трехэлементными, их микропроцессор в цифровом виде умножает три вектора фазных напряжения на три вектора фазных тока и суммирует результаты во времени [4]. Очевидно, что попытки подключить новый счетчик к двум ТН повлекут за собой погрешности и снижение точности ТН, поскольку нагрузка счетчика будет рас-

пределена на два ТН. Решением такой проблемы является использование третьего ТН, включенного на линейное напряжение. Также следует добавить, что вариант подключения счетчиков к трем незаземленным ТН является наиболее приемлемым.

Выводы

1. Проблема феррорезонанса остается актуальной и окончательно не решенной. В сетях с малым током ОЗЗ необходимо использовать методы прогнозирования риска возникновения ФРП, основанные на численном анализе феррорезонансных схем. Исходя из полученных результатов следует принимать решение о внедрении защит мер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сивокобыленко В.Ф. Повышение надежности работы сетей 6-10 кВ при замыкании фазы на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика – Донецьк, 2011. – Вип. №11(186). – С. 348-352.
2. Овчинников А.Г., Степанов Ю.А. Трансформаторы напряжения контроля изоляции 6-10 кВ. Сравнительный анализ моделей // Новости электротехники. – 2003. – №6(24).
3. Бардинский С.И., Соколов В.И. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Вариант конструкторского решения // Новости Электротехники. 2010. № 2(62).
4. Зихерман М.Х. Трехфазный измерительный комплекс. Проблема совместимости элементов / М.Х. Зихерман // Новости электротехники. – 2010. – №4 (64).

Поступила в печать 01.12.2012.

Статью рекомендовано к печати д.ф.-м.н., профессором *В. И. Гаврилюком*

В статье рассмотрена проблема феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью. Приводятся результаты исследования субгармонических феррорезонансных процессов с трансформаторами напряжения традиционной конструкции. Показано, что такой режим чаще всего возникает после исчезновения однофазного замыкания на землю и приводит к термическому разрушению обмотки высокого напряжения трансформатора. Рассмотрены основные концепции защиты сетей с изолированной нейтралью от феррорезонансных явлений. Проанализированы конструкции и принцип действия современных антирезонансных трансформаторов напряжения таких типов как НАМИ и НАМИТ. Оценена эффективность их работы в сетях с изолированной нейтралью.

Моделирование переходных процессов реализовано в пакете MATLAB/Simulink. Расчеты показали, что все серийно выпускаемые трансформаторы напряжения способны вступать в феррорезонанс и повреждаться. Выявлено, что трансформатор типа НАМИТ имеет низкую чувствительность встроенной защиты, которая не способна эффективно срабатывать при субгармонических феррорезонансных колебаниях. В результате чего данный тип антирезонансного трансформатора аналогичен трансформатору типа НТМИ, поэтому также способен вступать в субгармонический феррорезонанс и повреждаться.

Кроме того, были выявлены режимы, в которых имеет место заикливание защиты трансформатора напряжения, которое сопровождается опасными перенапряжениями, причем термического повреждения трансформатора в таком режиме не происходит. При исследовании режимов работы трансформатора типа НАМИ также была выявлена возможность возбуждения феррорезонанса с его участием. Возникновение феррорезонанса наблюдается при коммутациях участков сети с малой суммарной емкостью, сам трансформатор в таких режимах, как правило, не повреждается.

Рассмотрена проблема точности учета электроэнергии в сетях 6-35 кВ, а также проблема совместимости современных счетчиков электроэнергии с антирезонансными трансформаторами напряжения. Показано, что для более точного учета счетчики электроэнергии их следует питать от незаземленных трансформаторов напряжения, которые лишены напряжения нулевой последовательности, и поэтому при переходных режимах не искажают показания.

Ключевые слова: переходные процессы, феррорезонанс, трансформатор напряжения, емкость нулевой последовательности, однофазное дуговое замыкание, точность учета электроэнергии.

REFERENCES

1. Sivokobylenko V.F. Povyshenie nadezhnosti raboty setej 6-10 kV pri zamykanii fazy na zemlju [Increase of reliability of work of networks 6-10 kV at the earth - fault of phase]. Elektrotehnika i energetika – Electrical Engineering and energy, Donetsk, 2011, issue 11(186), pp. 348-352.
2. Ovchinnikov A.G., Stepanov Ju.A. Transformatory naprjazhenija kontrolja izoljacii 6-10 kV. Sravnitel'nyj analiz modelej [Transformers of tension of control of isolation of 6-10 kV. The comparative analysis of models]. Novosti elektrotehniki – News of the electrical engineering, 2003, no. 6(24).
3. Bardinskij S.I., Sokolov V.I. Antirezonsnyye transformatory naprjazhenija. Variant konstruktorskogo reshenija [Antiresonance transformers of tension. Variant of designer decision.] Novosti jelektrotehniki - News of the electrical engineering, 2010, no. 2(62).
4. Ziherman M.H. Trehfaznyj izmeritel'nyj kompleks. Problema sovместimosti jelementov / M.H. Ziherman // Novosti elektrotehniki. – 2010. – №4 (64).

УДК 621.311

Ю.Л. САЄНКО, А.С. ПОПОВ (ПДТУ)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, ел. пошта: yls@mail.ru, artempopov9@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ АНТИРЕЗОНАНСНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ У МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

У статті розглянута проблема ферорезонансу в мережах з ізольованою нейтраллю. Наводяться результати дослідження субгармонійних ферорезонансних процесів з трансформаторами напруги традиційної конструкції. Показано, що такий режим найчастіше виникає після зникнення однофазного замикання на землю і призводить до термічного руйнування обмотки високої напруги трансформатора. Розглянуто основні концепції захисту мереж з ізольованою нейтраллю від ферорезонансних явищ. Проаналізовано конструкції і принцип дії сучасних антирезонансних трансформаторів напруги таких типів як НАМИ і НАМИТ. Оцінено ефективність їх роботи в мережах з ізольованою нейтраллю.

Моделювання перехідних процесів реалізовано в пакеті MATLAB / Simulink. Розрахунки показали, що всі серійно випускаються трансформатори напруги здатні вступати в ферорезонансу і пошкоджуватися. Виявлено, що трансформатор типу Наміти має низьку чутливість вбудованого захисту, яка не здатна ефективно спрацювати при субгармонійних ферорезонансних коливаннях. В результаті чого даний тип антирезонансних трансформатора аналогічний трансформатору типу НТМИ, тому також здатний вступати в субгармонійний ферорезонанс і пошкоджуватися.

Крім того, були виявлені режими, в яких має місце зациклення захисту трансформатора напруги, яке супроводжується небезпечними перенапруженнями, причому термічного пошкодження трансформатора в такому режимі не відбувається. При дослідженні режимів роботи трансформатора типу НАМИ також була виявлена можливість порушення ферорезонансу з його участю. Виникнення ферорезонансу спостерігається при комутаціях ділянок мережі з малою сумарною ємністю, сам трансформатор в таких режимах, як правило, не пошкоджується.

Розглянуто проблему точності обліку електроенергії в мережах 6-35 кВ, а також проблема сумісності сучасних лічильників електроенергії з антирезонансних трансформаторами напруги. Показано, що для більш точного обліку лічильники електроенергії їх слід живити від незаземлених трансформаторів напруги, які позбавлені напруги нульової послідовності, і тому при перехідних режимах не спотворюють показання.

Ключові слова: перехідні процеси, ферорезонансу, трансформатор напруги, ємність нульової послідовності, однофазне дугове замикання, точність обліку електроенергії.

Статтю рекомендовано до друку д.ф.-м.н, професором *В. І. Гаврилюком*

UDC 621.311

Y. L. SAENKO, A. S. POPOV (DNURT)

State higher education institution «Azov State Technical University», 7 Universitetskaya Street, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, artempopov9@gmail.com

EFFECTIVENESS OF ANTIRESONANT VOLTAGE TRANSFORMER INSULATION MONITORING IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

In the paper the problem of ferroresonance in isolated neutral. The results of investigation of subharmonic ferroresonance processes with voltage transformers traditional design. It is shown that the regime most likely to occur after the disappearance of single-phase ground fault and lead to thermal degradation of high voltage winding of the transformer. The basic concept of the protection of isolated neutral of ferroresonance phenomena. Analyzed the structure and function of the modern antiresonance voltage transformer types such as NAMI and NAMIT. The effectiveness of their work in networks with isolated neutral.

Transient simulation package implemented in MATLAB / Simulink. Calculations showed that all commercially available voltage transformers are able to enter into ferroresonance and damaged. Revealed that the transformer type NAMIT has low sensitivity built-in protection, which is not able to effectively operate at subharmonic ferroresonance oscillations. As a result, this type of transformer is similar antiresonant transformer type NTMI therefore also able to enter into subharmonic ferroresonance and damaged.

In addition, the identified modes in which there is a loop protection voltage transformer, which is accompanied by dangerous overvoltage, and thermal damage to the transformer in this mode does not occur. In the study of modes of operation of the transformer type U.S. also revealed the possibility of instituting ferroresonance with his participation. Occurrence of ferroresonance occurs during switching network sites with low total capacitance, transformer itself in such regimes are usually not damaged.

The problem of the accuracy of accounting in networks 6-35 kV, and also the problem of compatibility of modern electricity meters with antiresonance voltage transformers. It is shown that for a more accurate accounting of electricity meters should be fed from ungrounded voltage transformers that are devoid of residual voltage, and therefore the transients do not distort the evidence.

Keywords: transients, ferroresonance, voltage transformer, residual capacity, single-phase arc fault, precision metering.

Prof. *V. I. Gavriluk*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.