

Ю.Л.Саенко, докт.техн.наук, **А.С.Попов**
Приазовский государственный технический университет,
ул. Университетская, 7, Мариуполь, 87500, Украина.

Исследованы феррорезонансные процессы, развивающиеся без замыкания на землю. Рассмотрен механизм возбуждения этих процессов. Показано влияние нагрузки вторичных цепей трансформатора напряжения на протекание процессов феррорезонанса. Приведены некоторые результаты расчетов. Библ. 13, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: феррорезонанс, трансформатор напряжения, кривая намагничивания, емкость нулевой последовательности, режим нейтрали сети.

Введение. В электрических сетях, содержащих нелинейную индуктивность и емкость, при определенных соотношениях параметров сети возможно возникновение феррорезонансных процессов (ФРП) между заземленными обмотками высокого напряжения (ВН) трансформатора напряжения контроля изоляции (ТНКИ) и емкостью сети. Для режима феррорезонанса характерно равенство индуктивного сопротивления трансформатора напряжения (ТН) и емкостного сопротивления сети, причем это равенство может выполняться как на основной частоте, так и на высших или низших гармонических составляющих.

Толчком к возбуждению ФРП является возникновение несимметрии в контуре нулевой последовательности, которая приводит к появлению напряжения смещения нейтрали. В результате возмущения емкость нулевой последовательности получает определенный избыточный заряд, который после исчезновения возмущения будет стекать через заземленную обмотку ВН ТН. Далее, в зависимости от начальных условий, соотношения емкости сети и индуктивности ТН процесс разряда может быть затухающим и незатухающим. При этом незатухающие колебания представляют собой устойчивый феррорезонанс.

Известно, что результатом длительного существования ФРП в сетях с изолированной нейтралью является повреждение ТНКИ. Согласно статистике, приведенной в [6], в Украине в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью ежегодно повреждается 5–12% из всех установленных ТН. При этом необходимо отметить, что повреждение ТН происходит лишь при субгармоническом феррорезонансе, который, как правило, возникает при ликвидации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Наличие в спектре фазных напряжений составляющей пониженной частоты приводит к заметному насыщению сердечника и протеканию значительных токов по обмотке ВН. ФРП на частотах 50 Гц и выше к повреждению ТН, как правило, не приводят.

Анализ публикаций. На сегодняшний день исследованию проблемы феррорезонанса и надежности работы ТНКИ посвящено немало работ, например, [2,7,8]. Однако основное внимание авторов при этом уделено исследованию субгармонических ФРП, развивающихся после отключения или самоустранения ОЗЗ и приводящих к повреждению ТН. Кроме того, некоторые защиты ТНКИ от токовых перегрузок при феррорезонансе проектируются с учетом срабатывания при появлении субгармонических колебаний. Так, например, известное устройство [5] срабатывает при появлении в напряжении $3U_0$ составляющей 25 Гц. При этом к обмотке $3U_0$ кратковременно подключается резистор 5 Ом и ФРП гасится.

Исследованию ФРП без ОЗЗ, возникающих в результате различного рода коммутаций, не уделено должного внимания, а именно: в недостаточной мере исследован механизм возбуждения и особенности протекания этих процессов. Длительное существование любого режима феррорезонанса крайне опасно. Во-первых, существование ФРП сопряжено с появлением напряжения смещения нейтрали и соответствующих перенапряжений. В условиях высокой изношенности изоляции отечественных сетей даже незначительные перенапряжения кратностью 2,2–2,4 U_ϕ могут привести к многоместным пробоям ослабленной изоляции. Во-вторых, процессы феррорезонанса могут существовать сколько угодно долго и охватывают всю электрически связанную сеть. Кроме того, как было отмечено выше, некоторые разновидности ФРП приводят к повреждению ТНКИ.

Целью работы является исследование процессов феррорезонанса без замыканий на землю, оценка эффективности мероприятий по их предотвращению.

Основной материал. Основной проблемой при исследовании ФРП является отсутствие достоверной кривой намагничивания ТН. В литературе, где приводятся вебер-амперные характеристики ТН [3, 8, 9], нет информации ни о методике определения этих кривых, ни о погрешности измерения. Между тем, параметры кривой намагничивания самым существенным образом влияют на полученные результаты при моделировании и определяют достоверность этих результатов. Кроме того, параметры кривой намагничивания определяют требования к демпфирующим устройствам. Известно, что энергия, запасенная в нелинейной индуктивности при заданном значении потокосцепления, определяется площадью фигуры между осью ординат и кривой (рис. 1). Соответственно, чем ниже пойдет кривая, тем большая энергия будет запасена в индуктивности и тем большие активные потери необходимо будет ввести в контур для срыва устойчивых колебаний.

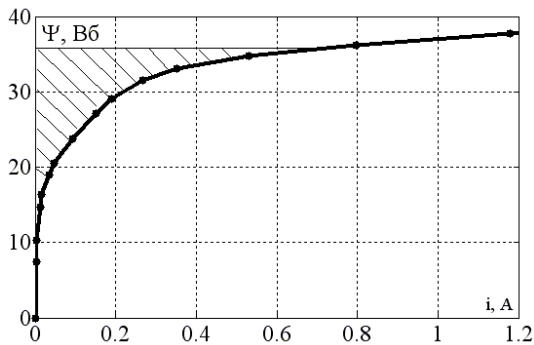


Рис. 1

Экспериментальная вебер-амперная характеристика фазы ТН типа НТМИ-6, показанная на рис. 1, получена путем разряда конденсатора на основную вторичную обмотку низкого напряжения (НН) ТН. При этом осциллографировался ток в обмотке НН и потокосцепление как напряжение на емкости интегрирующей RC цепочки, подключенной к дополнительной вторичной обмотке. Полученная кривая была приведена через коэффициент трансформации к стороне 6 кВ. Погрешность измерения потокосцепления составила 1,7%, тока – 2%. Необходимо отметить, что эксперименты проводились на шести различных фазах ТН, при этом полученные результаты отличались не более чем на 7%.

Для более точного моделирования ТН необходимо учитывать эффект гистерезиса стали ТН [10]. При этом соответствующим образом будут учтены потери в стали ТН и мгновенная индуктивность намагничивающего контура. Ввиду того, что ТНКИ выполнен из холоднокатаной стали, имеющей относительно узкую петлю гистерезиса, и с учетом того, что процессы феррорезонанса сопровождаются глубоким насыщением стали, при котором восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли практически сливаются с основной кривой намагничивания, в расчетах была принята безгистерезисная модель ТН.

Среди разновидностей переходных процессов, приводящих к возбуждению ФРП без ОЗЗ, можно выделить следующие: включение холостых шин с ТН (рис. 2, а), подключение ТН к ненагруженным шинам (рис. 2, б), подключение или отключение участка сети (рис. 2, в). Ниже все случаи рассмотрены более детально.

Включение ненагруженных шин с ТН. Как было отмечено выше, любому появлению процесса феррорезонанса предшествует появление напряжения смещения нейтрали. Для сети с изолированной нейтралью напряжение смещения нейтрали определяется известным выражением

$$U_0 = \frac{E_a \cdot Y_a + E_b \cdot Y_b + E_c \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (1)$$

где E_a, E_b, E_c – ЭДС источника питания; Y_a, Y_b, Y_c – проводимость сети на землю, которая в общем случае носит емкостный характер.

При строго симметричной сети напряжение смещения нейтрали равно нулю. При ненагруженных шинах эквивалентное емкостное сопротивление сети велико, в то же время индуктивное сопротивление ТН все еще значительно больше емкостного, и резонансные условия не выполняются. Толчком к возбуждению ФРП служит включение участка сети (рис. 2, а), когда за счет свободной составляющей происходит насыщение ТН и уменьшение его сопро-

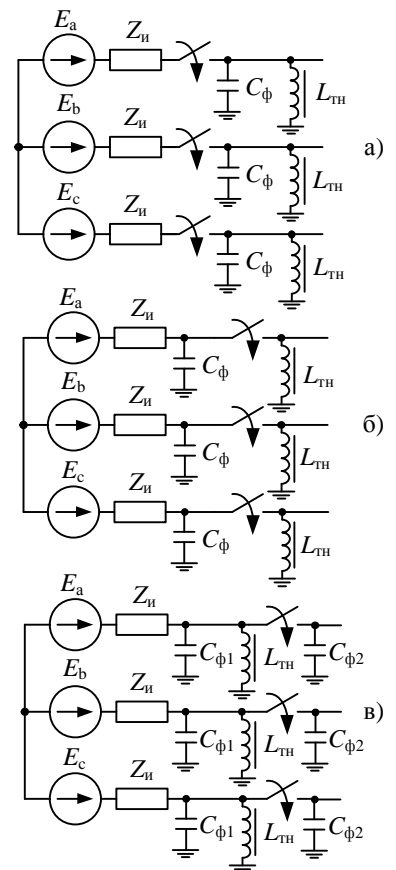


Рис. 2

тивления. При этом индуктивное сопротивление одной из фаз трансформатора становится равным или соизмеримым с емкостным сопротивлением сети этой фазы, в результате чего симметрия проводимостей сети по фазам нарушается и появляется напряжение смещения нейтрали. Далее начинают развиваться колебания, которые в зависимости от начальных условий и соотношений параметров сети могут носить затухающий и незатухающий характер.

В отличие от субгармонических ФРП, процессы феррорезонанса без ОЗЗ не отличаются явной периодичностью. На рис. 3 показаны расчетные кривые напряжения $3U_0$ и токов в обмотке ВН при феррорезонансе, возникшем при включении ненагруженных шин. Моделировалось синхронное включение трех фаз в момент, когда напряжение фазы *A* проходило через ноль. Фазная емкость сети на землю при этом равна 60 пФ. Токи в обмотке ВН в этом режиме незначительны и не опасны. Это, в первую очередь, объясняется отсутствием низкочастотных составляющих в напряжении нулевой последовательности.

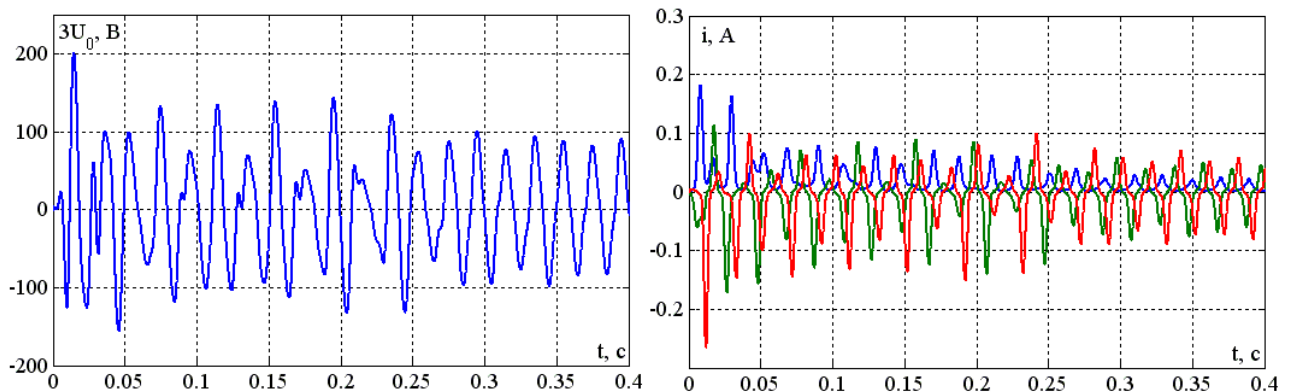


Рис. 3

В спектре напряжения $3U_0$ наряду с составляющей 50 Гц присутствует значительная доля высших гармоник, причем как канонических, так и не канонических. Среди канонических гармоник наиболее весомыми и часто встречающимися являются составляющие 100 и 150 Гц. В целом необходимо отметить, что амплитудно-частотный состав напряжения смещения нейтрали в режиме феррорезонанса определяется соотношением параметров сети, а также начальными условиями. Ввиду того, что величина тока в обмотках определяется амплитудно-частотным составом напряжения смещения нейтрали, можно констатировать, что риск повреждения ТН определяется как соотношением параметров сети, так и начальными условиями. При одних и тех же параметрах сети и различных начальных условиях (момент включения, фаза) система может иметь несколько устойчивых состояний. Так, например, при параметрах емкости сети $C_{\phi}=0,1 \div 0,3$ мкФ включение шин сопровождалось появлением субгармонического феррорезонанса, который, как известно, при длительном существовании может повредить ТН.

Подключение ТН к ненагруженным шинам. Процесс возбуждения ФРП в данном случае схож с процессом при включении ненагруженных шин (рис. 2, б). Свободная составляющая, возникающая при подключении ТН, насыщает сердечник, индуктивное сопротивление которого уменьшается, и при приблизительном равенстве емкостного сопротивления сети и индуктивного сопротивления ТН возникает смещение нейтрали, обусловленное несимметрией проводимостей сети на землю. Этот процесс становится толчком к возбуждению ФРП. По аналогии с предыдущим случаем частота процесса и вероятность повреждения ТН зависит от соотношения параметров сети и начальных условий. Кроме того, согласно результатам моделирования при параметрах емкости сети $C_{\phi}=0,1 \div 0,3$ мкФ подключение ТН сопровождалось появлением субгармонического ФРП. На рис. 4 показана расчетная кривая напряжения $3U_0$ при ФРП, возникшем при подключении ТН к сети с фазной емкостью 80 пФ. Токи в обмотке ВН в этом режиме незначительны, поэтому не приводятся. Многочисленные расчеты данной схемы и спектральный анализ напряжения $3U_0$ при ФРП также показал значительное содержание высших гармоник.

Коммутация участка сети. Механизм возбуждения ФРП в этом случае заключается в следующем (рис. 2, в). При подключении участка сети ($C_{\phi 2}$) ввиду одновременности хода включения контактов сначала замыкается одна фаза и начинается заряд ее емкости, затем вторая и третья. Емкость, подключаемая первой, создает несимметрию проводимостей сети по фазам, в результате которой появляется напряжение смещения нейтрали. Соответственно, чем больше будет соотношение

$C_{\phi 2}/C_{\phi 1}$, тем большее смещение нейтрали будет иметь место при коммутации. Исчезновение несимметрии емкостей по фазам наступит после подключения выключателем последней фазы. После этого избыточный заряд начинает стекать через заземленные обмотки ВН трансформатора, и этот процесс может носить затухающий или незатухающий характер. Возбуждение ФРП при отключении участка сети происходит аналогично.

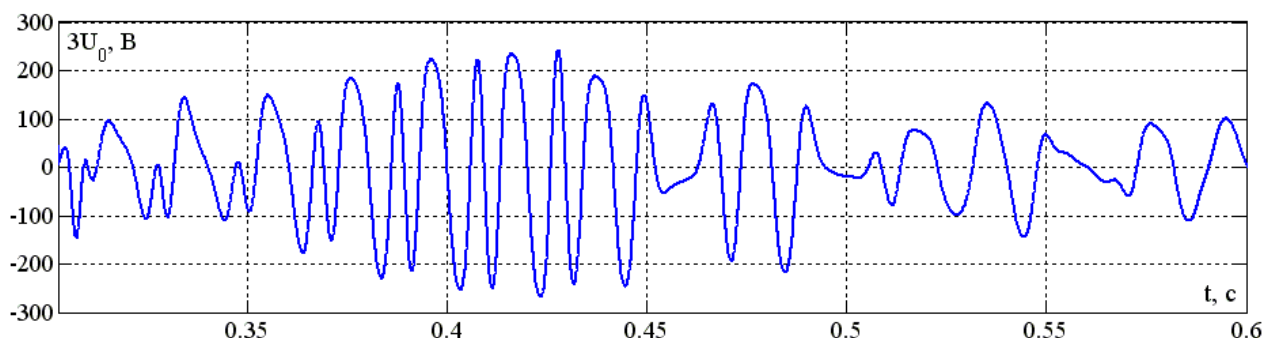


Рис. 4

Соответствующая расчетная кривая напряжения $3U_0$ показана на рис. 5. Отметим, что и для этого типа ФРП характерно наличие значительной доли высших гармоник в напряжении $3U_0$, зависимость частоты процесса от начальных условий и параметров сети, возможность возбуждения субгармонического феррорезонанса.

Достаточно обширные эксплуатационные данные о ФРП без замыканий на землю приведены в [4]. В сети 10 кВ с изолированной нейтралью и суммарным емкостным током 15 А практически любая коммутация оборудования возбуждала феррорезонанс. Соответствующие выводы автор делает на основе анализа осциллограмм, записанных цифровыми терминалами релейной защиты. Т.е. фиксировались даже незначительные смещения нейтрали, которые не опасны и не приводят к срабатыванию сигнализации об ОЗЗ. Были зарегистрированы случаи так называемого раскачивания нейтрали сети. В результате ФРП выполнялось равенство индуктивного сопротивления ТН и емкостного сопротивления сети, при этом появлялось дополнительное смещение нейтрали и соответствующие перенапряжения. Отмечается, что при этом наблюдались срабатывания ОПН.

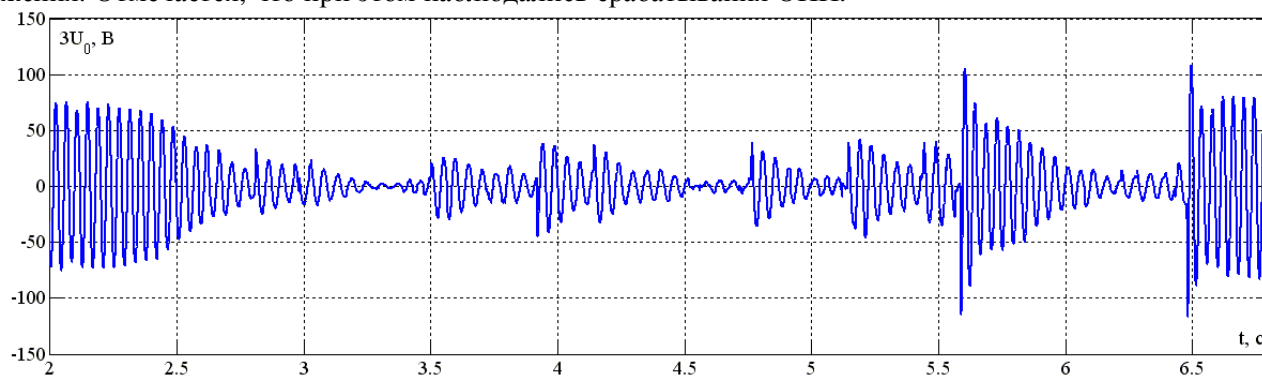


Рис. 5

Достаточно эффективным устройством защиты ТНКИ от токовых перегрузок при ФРП является устройство, описанное в [5]. Однако оно срабатывает лишь при субгармоническом ФРП. В то же время ФРП на частотах 50 Гц и выше представляют не меньшую опасность для сети. Поэтому перспективным является разработка универсальных устройств защиты от всех видов ФРП, срабатывание которых не определяется частотой ФРП.

Разработанные на сегодняшний день антирезонансные трансформаторы (НАМИ, НАМИ-Т, НАЛИ), хотя и имеют гораздо меньшую аварийность, чем ТН традиционного исполнения, также подвержены явлению феррорезонанса. В первую очередь, это обусловлено электромагнитной связью с землей обмотки ВН, в результате чего процесс разряда емкости сети через эти обмотки остается возможным.

Немаловажным аспектом при исследовании ФРП является учет нагрузки вторичных обмоток ТНКИ. В подавляющем большинстве случаев при моделировании ТН делается допущение о невозможности существенного влияния нагрузки ТН на протекание ФРП. При моделировании было выявлено, что даже незначительная нагрузка может демпфировать феррорезонанс. В табл. 1 приведены

результаты компьютерного моделирования при исследовании влияния величины нагрузки вторичной цепи ТН на гашение феррорезонансных колебаний при различных значениях емкости в сети 6 кВ и ТН типа НТМИ-6. Знак «-» соответствует затухающему ФРП, знак «+» – незатухающему ФРП. Следует указать, что устойчивый феррорезонанс при ненагруженном ТН наблюдается при изменении емкости в диапазоне 0,1–0,65 мкФ. Из результатов следует, что с ростом нагрузки вторичных цепей область существования устойчивого феррорезонанса сужается, что обусловлено демпфирующим действием нагрузки, причем эффективность гашения колебаний нелинейно зависит от нагрузки, что обусловлено нелинейными свойствами колебательного контура. При нагрузке выше 120 ВА на всем диапазоне устойчивого феррорезонанса наблюдается гашение колебаний.

Таблица 1

Нагрузка вторичной цепи ТН, ВА	Фазная емкость сети на землю, мкФ											
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
25	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
50	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
75	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
100	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Особого внимания заслуживает следующий факт. Величина энергии, запасенная в феррорезонансном контуре, растет при увеличении емкости сети, поэтому при больших значениях емкости требуются большие активные потери для демпфирования колебаний. Это объясняет тот факт, что при малых емкостях сети даже незначительная нагрузка величиной 50–75 ВА успешно гасит феррорезонансные колебания, а с ростом емкости демпфирующие способности нагрузки заметно снижаются (табл. 1). Приведенные результаты достаточно хорошо согласуются с эксплуатационными данными [1], согласно которым повреждаемость ТНКИ обратно пропорциональна нагрузке вторичных цепей ТН. Соответствующая зависимость приведена в табл. 2.

Таблица 2

Нагрузка вторичной обмотки ТН, ВА	до 25	25–50	50–75	75–100	свыше 100
Параметр потока отказов, 1/год	0,208	0,1383	0,1097	0,114	0,0513

В рамках исследования была проанализирована эффективность действия такого способа подавления ФРП как включение резистора 25 Ом в контур обмоток разомкнутого треугольника. Расчеты показали, что во всех случаях возбуждения ФРП установка резистора гасила устойчивые колебания [11]. При этом следует указать, что известен ряд публикаций, в которых на основе компьютерного моделирования продемонстрирована низкая эффективность такой защитной меры [5]. Подобное отличие в результатах может быть обусловлено, в первую очередь, погрешностью исходных данных, а именно – вебер-амперной характеристики. В случае, если характеристика намагничивания пойдет ниже, чем базовая (рис. 1), запас энергии в контуре нулевой последовательности увеличится, в результате чего к демпфирующим устройствам следует предъявлять более жесткие требования. Другими словами, резистора 25 Ом попросту не хватит, и для гашения потребуются уменьшение номинала резистора. Это также приведет и к изменению области существования устойчивого феррорезонанса. Данный способ не следует рассматривать как основной, однако в качестве профилактической меры для предотвращения самопроизвольного смещения нейтрали сети он может оказаться достаточно эффективным.

В рамках данной статьи не рассматривается влияние погрешности вебер-амперной характеристики на результаты моделирования феррорезонансных процессов, отметим лишь тот факт, что в случае, если характеристика намагничивания будет ниже базовой на 15–20%, резистор 25 Ом будет эффективным лишь в малом диапазоне емкостей (0,1–0,35 мкФ), что, по сути, не противоречит известным публикациям. Также следует отметить возможность различия характеристик намагничивания однотипных трансформаторов и несоответствие их с кривой, приведенной в данной статье. Разброс характеристик намагничивания может быть вызван старением стали, витковыми замыканиями, ремонтами ТН и др.

Кардинальным и наиболее эффективным решением проблемы феррорезонанса, по нашему мнению, является изменение режима нейтрали этих сетей и применение резистивной или резонансно заземленной нейтрали. При этом процесс разряда емкости сети через индуктивность ТН становится невозможным, поскольку избыточные заряды будут стекать через относительно малое сопротивление в нейтрали

сети [12, 13]. Изменение режима нейтрали позволит не только полностью решить проблему феррорезонанса и высокой аварийности ТНКИ, но и всецело повысить надежность работы этих сетей. Подробное изложение и анализ преимуществ резонансной и резистивной нейтрали выходит за рамки данной статьи, подробный анализ преимуществ различных способов заземления нейтрали приведен в работах [12, 13].

В настоящее время массовое применение нашли микропроцессорные счетчики, которые, по сравнению с индукционными, потребляют гораздо меньшую мощность. В результате применения таких счетчиков суммарная мощность нагрузки вторичных цепей ТН зачастую не превышает 20–30 ВА. С учетом того, что повреждаемость ТНКИ, а соответственно, и вероятность появления феррорезонанса обратно пропорциональна нагрузке вторичных цепей ТН, можно сделать вывод о том, что в таких сетях при прочих равных параметрах вероятность появления феррорезонанса выше. Поэтому целесообразно искусственно увеличить нагрузку ТН до максимально допустимой величины в заданном классе точности, регламентируемой соответствующим ГОСТом, и таким образом снизить вероятность возникновения ФРП и повреждения ТНКИ.

Выводы. 1. В сетях с изолированной нейтралью существует вероятность появления феррорезонанса в результате различного рода коммутаций. Такие ФРП развиваются на частотах 50 Гц и выше и могут сопровождаться значительными перенапряжениями, которые по длительности и величине могут превосходить дуговые перенапряжения. Для защиты от феррорезонансных явлений следует разработать универсальное устройство, которое будет срабатывать как при субгармоническом ФРП, так и при феррорезонансе на частотах 50 Гц и выше.

2. Результаты исследования показали, что нагрузка вторичных цепей оказывает демпфирующее воздействие на процессы феррорезонанса. В условиях внедрения современных микропроцессорных счетчиков и тенденции к снижению нагрузки ТН в качестве контрмеры следует предусмотреть искусственное увеличение нагрузки вторичных цепей. Рекомендуется с целью снижения риска возникновения феррорезонанса увеличить нагрузку вторичных цепей ТНКИ до максимально допустимых значений в заданном классе точности.

3. С учетом наметившейся проблемы отсутствия достоверных исходных данных при исследовании ФРП, а также учета погрешности исходных данных на результаты исследования ФРП актуальным следует считать вопрос определения возможного диапазона разброса характеристик намагничивания ТН и учета разброса этих характеристик при исследовании ФРП.

1. Ганус А.И., Говоров Ф.П., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // *Электрика*. – 2006. – №5. – С. 28–31.

2. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению // *Світлотехніка та електроенергетика*. – 2003. – № 1. – С. 75–81.

3. 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.

4. Емельянец А.Ю. Феррорезонансные процессы без замыкания на землю. Эксплуатационные данные // *Новости Электротехники*. – 2009. – №4(58).

5. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Голяк О.Ю. Захист трансформаторів напруги від пошкоджень при феррорезонансних процесах у мережах з ізольованою нейтраллю // *Вісник ДУ "Львівська політехніка"*, серія "Електромеханічні та електроенергетичні системи" – 1997. – №340. – С. 40–47.

6. Журахівський А.В., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Режимы работы трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю // *Електроінформ*. – 2009. – №1. – С. 8–11.

7. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Феррорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №2. – С. 73–77.

8. Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ. – Новосибирск: НГТУ, 1993. – 158 с.

9. Зихерман М.Х. Повреждения трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ // *Электрические станции*. – 1978. – №11. – С. 65–67.

10. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Моделювання трансформатора напруги при феррорезонансних процесах // *Вісник Національного університету "Львівська Політехніка"*, серія "Електромеханічні та електроенергетичні системи" – 2007. – № 596. – С. 127–131.

11. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование переходных процессов в контуре нулевой последовательности распределительных сетей на основе компьютерного моделирования // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Серія "Електротехніка і енергетика". – 2011. – № 11 (186). – С. 324–329.

12. Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. О необходимости изменения режимов нейтрали в сетях 3–35 кВ // Энергетика и электрификация. – 2001. – №4. – С. 27–29.

13. Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. Способы заземления нейтрали электрических сетей 3–35 кВ // Энергетика и электрификация. – 2002. – №2. – С. 23–27.

УДК 621.311

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

Ю.Л.Саєнко, докт.техн.наук, А.С. Попов

Приазовський державний технічний університет,
вул. Університетська, 7, Маріуполь, 87500, Україна.

Досліджено ферорезонансні процеси, що розвиваються без замикання на землю. Розглянуто механізм збудження цих процесів. Показано вплив навантаження вторинних ланцюгів трансформатора напруги на перебіг процесів ферорезонансу. Наведено деякі результати розрахунків. Бібл. 13, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: ферорезонанс, трансформатор напруги, крива намагнічення, ємність нульової послідовності, режим нейтралі мережі.

INVESTIGATED FERRORESONANCE PROCESSES WITHOUT GROUND FAULT

Yu.L.Saenko, A.S.Popov,

Pryazovskyi State Technical University,
Universytetstka 7 str., Mariupol, 87500, Ukraine.

Investigated ferroresonance processes that evolve without ground fault. Considered the principles of excitation of these processes. Shows the influence of load secondary winding voltage transformer on the flow processes ferroresonance. Show some results of calculations. References 13, tables 2, figures 5.

Key words: ferroresonance, voltage transformer, magnetization curve, capacity of the zero sequence, mode neutral network.

1. Ganus A.I., Govorov F.P., Starkov K.A. Influence of conditions of the transients in electrical networks 6–10 kV on the nature of damage voltage transformers // Elektriika. – 2006. – № 5. – Pp. 28–31. (Rus)

2. Ganus A.I., Starkov K.A. Damageability of voltage transformers in the regional electric network AK Kharkivoblenergo and events for its reduction // Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka. – 2003. – № 1. – Pp. 75–81. (Rus)

3. Dudarev L.E., Levkovskii A.I. Numerical analysis of ferroresonance processes in networks with isolated neutral // Elektricheskie stantsii. – 1991. – № 1. – Pp. 66–71. (Rus)

4. Emeliantsev A.Yu. Ferroresonance processes without ground fault. Operating data // Novosti Elektrotekhniki. – 2009. – №4(58). (Rus)

5. Zhurakhivskiy A.V., Kens Yu.A., Goliak O.Yu. Protection of the voltage transformers from damage by ferroresonance processes in networks with isolated neutral // Visnyk derzhavnoho universytetu "Lvivska politekhnika", serii "Elektromekhanichni ta elektroenerhetychni systemy". – 1997. – №340. – Pp. 40–47. (Ukr)

6. Zhurakhivskiy A.V., Yatseiko A.Ya., Masliak R.Ya. Modes of voltage transformers in the grids with isolated neutral // Elektroinform. – 2009. – №1. – Pp. 8–11. (Ukr)

7. Zhurakhivskiy A.V., Kens Yu.A., Yatseiko A.Ya., Masliak R.Ya. Ferroresonance processes in the networks 10 kV with different types of voltage transformer // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №2. – Pp. 73–77. (Ukr)

8. Zabolotnikov A.P., Kadomskaia K.P., Tikhonov A.A. Mathematical modeling and overvoltages in electrical networks 6...35 kV. – Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1993. – 158 p. (Rus)

9. Zikherman M.Kh. Damaging voltage transformers for arc-fault ground in the networks 6–10 kV // Elektricheskie stantsii. – 1978. – № 11. – Pp. 65–67. (Rus)

10. Kuznetsov V.G., Tugai I.Yu. Modelling of voltage transformer at ferroresonance processes // Visnyk Natsionalnogo universytetu "Lvivska politekhnika", serii "Elektromekhanichni ta elektroenerhetychni systemy". – 2007. – № 596. – Pp. 127–131. (Ukr)

11. Saienko Yu.L. Popov A.S. Research of transients process in zero-sequence circuit of distribution networks on the base of computer modeling // Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Serii "Elektrotekhnika i enerhetyka". – 2011. – № 11 (186). – Pp. 324–329. (Ukr)

12. Stognii B.S., Maslianik V.V., Nazarov V.V. On the need of changing the regimes of neutral point in the networks 3–35 kV // Energetika i elektrifikatsiia. – 2001. – №4. – Pp. 27–29. (Ukr)

13. Stognii B.S., Maslianik V.V., Nazarov V.V. Methods of grounding neutral point the electrical networks 3–35 kV // Energetika i elektrifikatsiia. – 2002. – №2. – Pp. 23–27. (Ukr)

Надійшла 06.10.2011

Received 06.10.2011