

О ПРИЧИНАХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ 110–500 кВ И МЕРАХ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИХ НАДЕЖНОСТИ

ПОЛЯКОВ В.С., к.т.н., главный эксперт ООО «Квадро электрик» (Санкт-Петербург), почетный профессор ПЭИПК

Электромагнитные трансформаторы напряжения (ТН) – один из наиболее надежных видов электрооборудования в сетях любых классов напряжения от 6 кВ до 500 кВ включительно, и надежно работают значительно больше установленного ГОСТами двадцатипятилетнего срока эксплуатации. Так, на подстанциях Санкт-Петербурга заменяется нормально работающее оборудование, в том числе и ТН, находившееся в эксплуатации более 80 лет, в связи с реконструкцией объектов, а не из-за, так называемого старения. Повреждения ТН, как и любого электрооборудования вообще, происходят из-за нерасчетных эксплуатационных воздействий. Одно из таких нерасчетных воздействий (феррорезонанс) на ТН в сетях с изолированной нейтралью подробно рассмотрено в [1]. В данной статье рассматриваются нерасчетные воздействия на электромагнитные ТН в сетях с заземленной нейтралью 110–500 кВ.

Анализ повреждений ТН в сетях 110 кВ показал, что в последнее время чаще всего ТН повреждаются от грозовых перенапряжений (89 % – грозовые перенапряжения, 11 % – другие причины). Такие же повреждения электромагнитных ТН происходят в сетях всех классов напряжения (35–500 кВ) в аналогичных схемах.

Повреждения ТН от грозовых перенапряжений происходят в схемах, где ТН вынесен на линию или установлен на шинах (сборках) до защитного аппарата по ходу волны грозового перенапряжения с воздушной линии (ВЛ), как показано на рис. 1 и 2.

Повреждения ТН, находящихся перед защитным аппаратом по ходу волны грозового перенапряжения, происходит из-за того, что при воздействии волн грозовых перенапряжений с крутизной фронта волны, превышающей расчетную (витковая изоляция ТН рассчитана на воздействие, волны ограниченной защитными аппаратами), напряжение распределяется по виткам резко неравномерно, и на первые витки приходится напряжение, значительно превышающее расчетное. Это приводит к пробоем витковой изоляции в начале первичной обмотки (со стороны высоковольтного вывода, обозначаемого «А») или к пробоем изо-

ляции экрана и образованию короткозамкнутого витка.

Такой дефект может приводить к разрушению ТН не в момент воздействия грозового перенапряжения, а через определенный промежуток времени, в течение которого развивается дефект. Признаком того, что повреждение произошло из-за воздействия грозовых перенапряжений – место установки ТН и грозовая активность либо в момент повреждения ТН, либо за некоторое время до повреждения.

Если воздействие грозовых перенапряжений не привело непосредственно к повреждению ТН во время грозы, но привело к появлению дефекта, то это

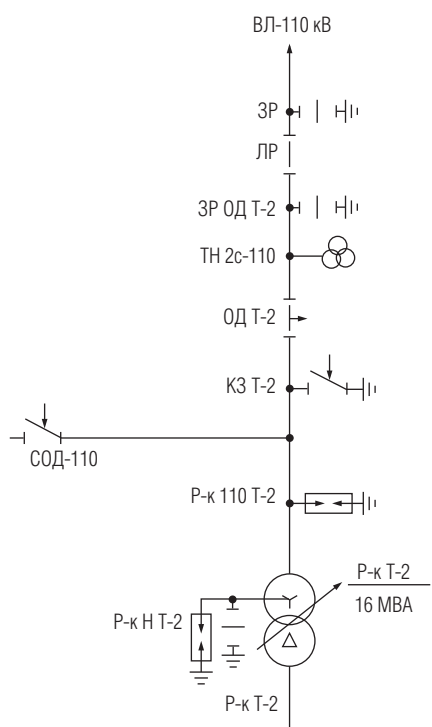


Рис. 1. ТН-2с 110 кВ установлен на ВЛ без защитных аппаратов перед ВР Т-2 110 кВ

событие может быть зарегистрировано ЦРАПом (цифровым регистратором аварийных процессов). Признаком того, что произошел пробой витковой изоляции, является запуск ЦРАП только от одного параметра $3U_0$. Для своевременного выявления появившегося дефекта необходимо выполнить внеочередное тепловизионное обследование ТН на подстанциях, которые связаны с ВЛ, подвергавшихся воздействию грозовых перенапряжений и не защищенных от них.

Повреждения ТН всех классов напряжений происходили в аналогичных схемах не только на Северо-Западе, но и в Казахстане и других регионах бывшего Советского Союза. Так, аналогичные повреждения ТН-330 кВ, установленных на двухцепных ВЛ-330 кВ, произошли в Беларуси, в Ленэнерго и других. Расчеты, выполненные проф. Халиловым Ф.Х. (СПбГТУ) на анализаторе грозозащиты для схемы подстанции, на которой произошли повреждения ТН, показали, что при интенсивности грозовой деятельности от 40 до 60 грозовых часов ТН-330 кВ, установленные без защитных аппаратов на двухцепных ВЛ повреждаются 1 раз в 30 трансформаторо/лет эксплуатации при длине двухцепного участка ВЛ 330 кВ 10 км

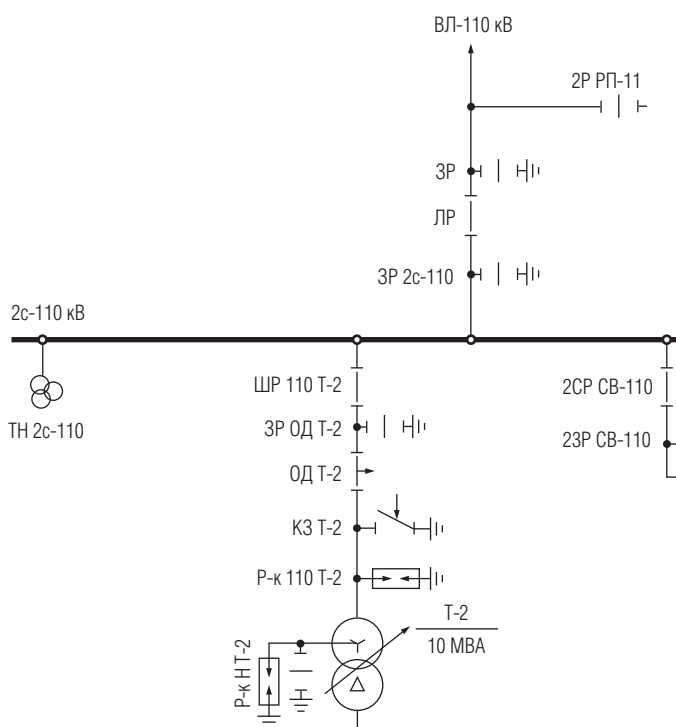


Рис. 2. ТН-2 с 110 кВ установлен на секции без защитных аппаратов перед ВР Т-2 110 кВ

и более. На одноцепных ВЛ ожидаемая повреждаемость ТН-330 кВ на порядок ниже (1 раз в 300 трансформаторо/лет эксплуатации).

В качестве защитных аппаратов для ТН, устанавливаемых на ВЛ, могут быть использованы не только ОПН, но и защитные конденсаторы, опыт эксплуатации которых подтверждает их эффективность. Так, в одном из первых в СССР ОРУ-500 кВ (Жигулевская ГЭС) электромагнитные ТН, установленные на ВЛ-500 кВ и защищенные двумя параллельными колонками конденсаторов на фазу, надежно эксплуатировались более 40 лет при высокой интенсивности грозовой деятельности в этом районе.

Для предотвращения повреждений ТН, находящихся перед защитным аппаратом по ходу волны грозового перенапряжения, необходимо установить на ВЛ всех классов напряжения защитный аппарат перед ТН по ходу волны, как показано на рис. 3. Установка защитных аппаратов на ВЛ не только защищает ТН, но и повышает грозоупорность подстанции почти на порядок [2].

Второе нерасчетное воздействие на ТН по числу повреждений – феррорезонансные процессы, приводящие не только к повреждениям ТН, но и к по-

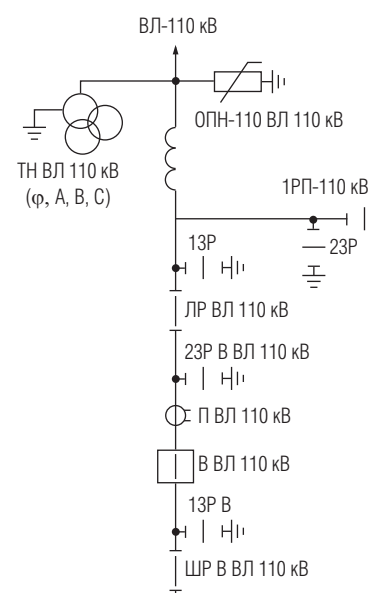


Рис. 3. ТН ВЛ-110 кВ установлен на ВЛ и защищен ОПН-110

вреждениям нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

Феррорезонансные явления в сетях с эффективно заземленной нейтралью (в основном это сети 110 кВ) возникают трех видов в зависимости от типа индуктивного элемента, вступающего в феррорезонанс.

1. Феррорезонанс может возбуждаться, когда участок сети 110 кВ

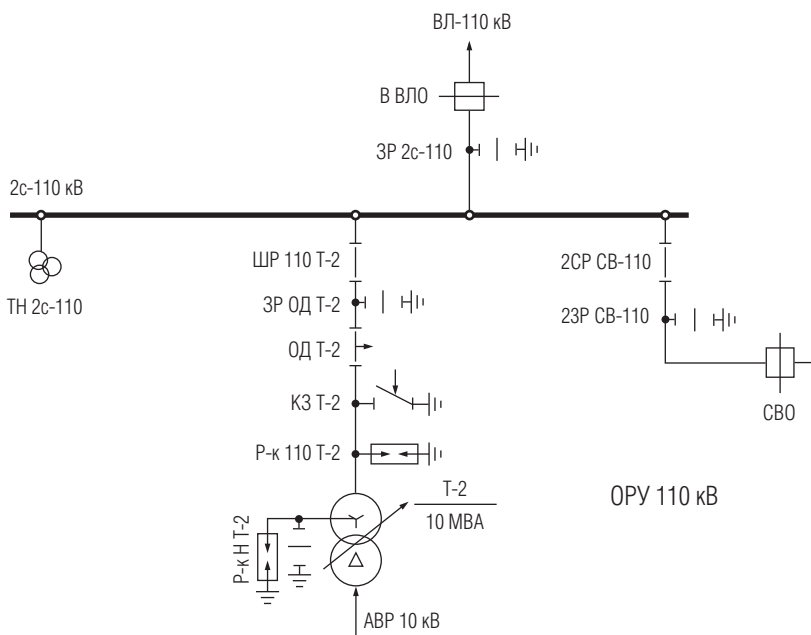


Рис. 4. Выделение участка сети 110 кВ питающегося от трансформатора с изолированной нейтралью и запитанного со стороны 10 кВ. При возникновении данной схемы повреждены 3 фазы ТН 2с 110 кВ

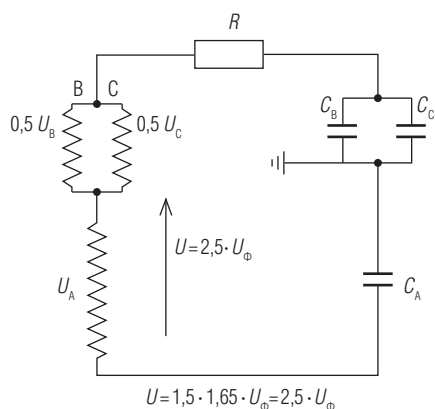


Рис. 5. Схема замещения сети по рис. 4 с образованием феррорезонансного контура между индуктивностью силового понижающего трансформатора и емкостью участка сети 110 кВ

запитан от трансформатора с изолированной нейтралью (рис. 4) и отделен от сети с трансформаторами с заземленной нейтралью. Чаще всего такая схема может создаваться при автоматическом отключении источников питания с заземленной нейтралью и автоматическом включении от АВР понижающего трансформатора с изолированной нейтралью с низкой стороны на сеть 110 кВ без нагрузки.

В этой схеме создается резонансный контур из емкости сети и индуктивности трансформатора, ранее отключенного выключателем, тем самым оставшегося несимметрично намагничен-

ным ($\Psi_{ост}$). Подача напряжения ($\Psi_{уст}$) с низкой стороны на такой трансформатор без заземления нейтрали приводит к насыщению его магнитопровода ($\Psi_{нач.нас} \geq \Psi_{ост} + \Psi_{уст}$) и изменению индуктивного сопротивления до величины, соответствующей емкостному сопротивлению участка сети 110 кВ, подключенного к этому трансформатору, и возбуждению феррорезонанса (рис. 5).

То есть создается феррорезонансный контур, в котором возбуждается феррорезонанс напряжений. В данной схеме резонирующей индуктивностью является индуктивность силового трансформатора с изолированной нейтралью, включенная последовательно с емкостью участка сети, отделенного от остальной сети 110 кВ с трансформаторами с заземленной нейтралью.

При феррорезонансе индуктивности силового трансформатора с емкостью сети на емкости устанавливается напряжение, величина которого определяется параметрами магнитной системы, на которые она рассчитывается.

Основным параметром является максимальная номинальная магнитная индукция магнитопровода, которая равна $B_{MAX\ NOM} = 1,5$ Тесла. Точка начального насыщения в таком магнитопроводе достигается при индукции равной или большей $B_{нач.нас} = 1,65$ Тесла [1]. Таким образом, напряжение в контуре нулевой последовательности феррорезонанс-

ного контура установится напряжение: $U_{ТР} = 1,65 \cdot U_{ТР} = 1,65 \cdot 1,5 \cdot U_{\phi} \approx 2,5 \cdot U_{\phi}$. Это напряжение существует столько времени, сколько существует этот режим. При этом повреждаются ОПН-110, ТН-110 и др.

Первый случай повреждения ОПН-110, установленных в промышленную эксплуатацию, произошел при их включении под напряжение. ОПН-110 были установлены на блочном трансформаторе, нейтраль которого не была заземлена. При включении трансформатора со стороны генераторного напряжения все три фазы ОПН-110 были разрушены. Подобные повреждения ОПН-110 кВ продолжают и в настоящее время, когда они установлены для защиты обмоток трансформаторов с изолированной нейтралью, особенно при автоматических отключениях.

В инструкциях на первые ограничители перенапряжений была запрещена установка ОПН для защиты обмоток силовых трансформаторов 110–220 кВ, которые могут работать в режиме с изолированной нейтралью.

Это положение трансформировано в п. 5.2.2 «Инструкции по эксплуатации средств защиты от перенапряжений» [3]: «Ограничители перенапряжений на напряжение 110 кВ предназначены для применения в открытых (ОРУ) и закрытых (ЗРУ) распределительных устройствах в сетях в случаях, когда исключено выделение при различных оперативных и автоматических отключениях участков сети с ограничителями перенапряжений и без трансформаторов с заземленными нейтральями».

Если на таком участке сети установлены ТН-110 кВ, то повредятся все три фазы ТН, причем не из-за возбуждения феррорезонанса с их участием, а из-за длительного воздействия недопустимо высокого напряжения $U_{ТР} \approx 2,5 \cdot U_{\phi}$ (см. рис. 4). При этом повреждаются не только обычные ТН типа НКФ-110, но и антиферрорезонансные ТН типа НАМИ-110, поэтому их установка в сети 110 кВ не оправдана.

2. Второй вариант возбуждения феррорезонанса в сети 110 кВ (рис. 6, 7) – это когда индуктивным элементом является понижающий трансформатор с незаземленной нейтралью, при неполнофазном режиме питания [1]. В этом режиме на отделившейся фазе участка сети, питающейся от понижающего трансформатора с изолированной нейтралью обмотки

110 кВ, возбуждается феррорезонанс напряжений с уровнем перенапряжений $U_{\text{пер}}=4,35 \cdot U_{\text{Ф}}$, что приводит к повреждениям ОПН-110 и ТН-110 кВ. Защитой от такого режима является отключение понижающего трансформатора от сети 110 кВ с исключением автоматического включения его от автоматики с низкой стороны (п. 5.2.2 [3]).

3. Третий вариант возбуждения феррорезонанса в сети 110 кВ – это когда индуктивным элементом является измерительный электромагнитный трансформатор напряжения. Собственно методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения, рассматривают только такой вариант, схем (рис. 8) в которых возникает феррорезонанс [4].

Однако, случаев повреждения ТН-110 кВ от феррорезонанса в схемах, рассматриваемых в [4], в эксплуатации не зафиксировано. Кроме того, завод изготовитель воздушных выключателей разрешает снятие емкостных делителей с выключателей 110 кВ, что исключает возникновение схем по рис. 8, так как отсутствует суммарная емкость выключателей ($C_{\Sigma\text{В}}$).

Впервые феррорезонанс токов в сети 110 кВ, приведший к повреждению ТН-110, возникший в 1958 году при пофазном ремонте ВЛ 110 кВ Дубоссарская ГЭС- ПС Тирасполь, описан в [5]. При пофазном ремонте 2 ТН по концам ВЛ оставались подключенными к отключенной фазе линии и подвергались воздействию субгармонического феррорезонанса. При этом образовался резонансный контур, аналогичный схеме по рис. 8, где напряжение от источника ($U_{\text{С}}$) передавалось через междуфазные емкости от фаз, находившихся под напряжением. В результате длительного протекания больших токов по обмотке высокого напряжения ТН была повреждена их изоляция, и после включения фазы под напряжение загорелись оба ТН по концам линии. Технология пофазного ремонта ВЛ в дальнейшем не нашла распространения, поэтому ТН в таких схемах не повреждались.

Повреждения ТН типа НКФ-220 от феррорезонанса в сетях с заземленной нейтралью стали происходить в сетях

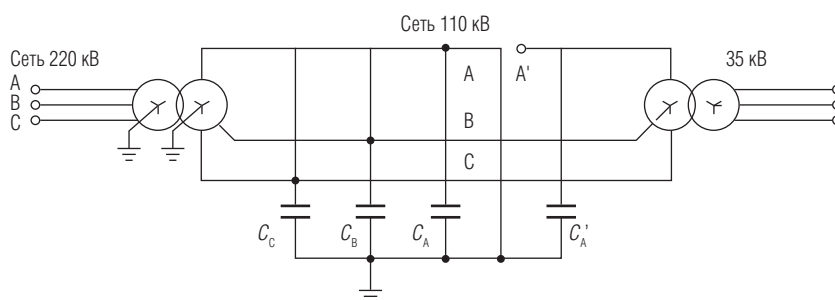


Рис. 6. Неполнофазный режим питания понижающего трансформатора 110/35 кВ с изолированной нейтралью

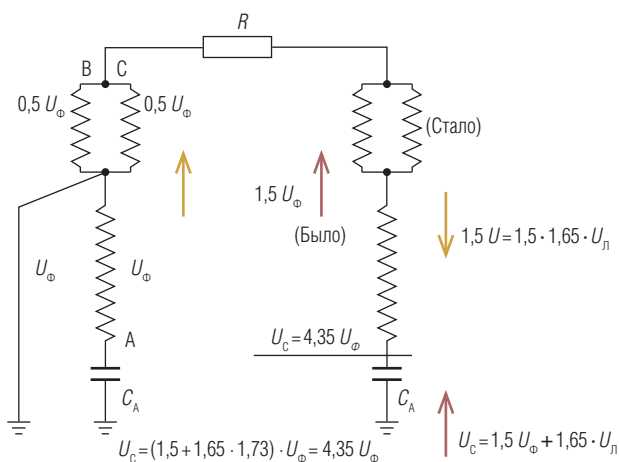


Рис. 7. Схема замещения сети 110 кВ по рис. 5 в режиме неполнофазного питания понижающего трансформатора с изолированной нейтралью обмотки 110 кВ

220 кВ с появлением в 1971 году в эксплуатации воздушных выключателей типа ВВБ-220, которые в отключенном положении шунтированы емкостными делителями напряжения [6, 7]. До этого в эксплуатации находились воздушные выключатели типа ВВН, ВВНВ и др., также шунтированные в отключенном положении емкостными делителями, однако повреждений ТН от феррорезонанса в схемах с этими выключателями не было зафиксировано. Тем не менее, МУ [4] рекомендуют выполнять мероприятия по предотвращению феррорезонанса после проведения соответствующих расчетов, естественно, в соответствии с МУ. Однако такой подход приводит к выполнению ненужных мероприятий, так как МУ не учитывают многие факторы, исключаящие возникновение ФРП в схемах с упомянутыми выключателями.

Так, в схемах с выключателями типа ВВН-220 при возникновении резонансного контура по схеме (рис. 8) не создаются условия для возбуждения феррорезонанса, в частности, не выполняется второе условие возникновения и существования феррорезонанса ($\Psi_{\text{ост}} + \Psi_{\text{уст}} \geq \Psi_{\text{нач.нас}}$) [1]. Поток в магнитопроводе ТН типа НКФ-

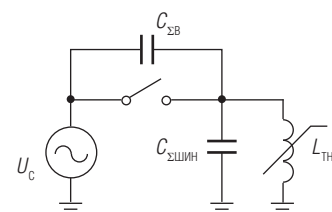


Рис. 8. Схема замещения сети с выключателями, шунтированными емкостными делителями напряжения. $U_{\text{С}}$ – ЭДС системы; $C_{\Sigma\text{В}}$ – суммарная емкость выключателей; $C_{\Sigma\text{ШИН}}$ – емкость шин РУ; $L_{\text{ТН}}$ – нелинейная индуктивность трансформатора напряжения

220 ($\Psi_{\text{ост}} \ll \Psi_{\text{Ф}}$) при отключении последнего выключателя, связывающего систему шин с напряжением энергосистемы ($U_{\text{С}}$), поэтому суммарный поток не достигает точки начального насыщения ($\Psi_{\Sigma} < \Psi_{\text{нач.нас}}$), что не приводит к изменению индуктивного сопротивления ТН. Обрыв тока в индуктивности ТН происходит не при фазном напряжении, а при пониженном напряжении, определяемом $K_{\text{дел}} = (R - C)_{\Sigma\text{ВЫКЛ}} / Z_{\text{ШИН}}$.

Процесс отключения выключателя ВВН-220-15 состоит из следующих этапов:

- первыми отключаются 4 последовательные гасительные камеры, шун-

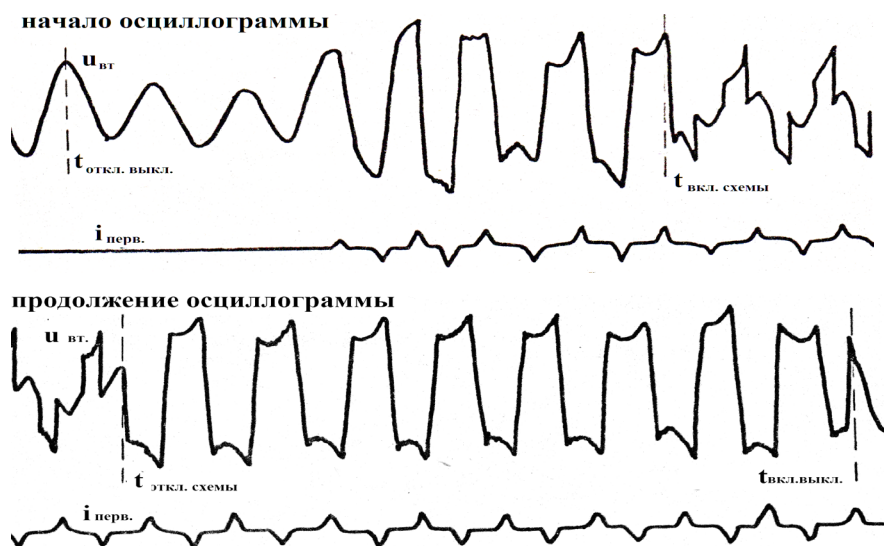


Рис. 9. Начало осциллограммы экспериментальной проверки эффективности подавления ФРП специальным устройством по п. 3.1.11 [4] на шинах 220 кВ с параметрами $C_{\Sigma B}=9,9$ нФ и $C_{\Sigma Ш}=10,2$ нФ. $u_{вт}$ - фазное напряжение на вторичной обмотке ТН; $i_{перв}$ - ток первичной обмотки той же фазы; $t_{откл. выкл.}$ - момент отключения выключателя; $t_{вкл. выкл.}$ - момент включения выключателя; $t_{вкл. схемы}$ - момент включения устройства подавления ФРП; $t_{откл. схемы}$ - момент отключения устройства подавления ФРП

тированные резисторами 15 кОм каждая, и на 0,12 с напряжение энергосистемы (U_c) приложено к ТН с.ш. и последовательно включенному резистору 60 кОм (4 по 15 кОм). За это время величина магнитного потока снижается до значения определяемого распределением напряжения между резистором и ТН $\{K_{ДЕЛ}=(R-C)_{\Sigma ВЫКЛ}/Z_{ШИН}\}$;

- через 0,03...0,05 с отключаются делители, шунтированные конденсаторами типа ДМР-80-0,001, емкостью 1000 пФ каждый. Образуется последовательная цепочка: $R_B - C_B - L_{ТН}$. Пока разомкнуты контакты гасительных камер, происходит дальнейшее снижение величины потока в магнитопроводе ТН;

- через 0,12 с контакты гасительных камер смыкаются, шунтируя резистор 60 кОм, и образуется классический феррорезонансный контур по рис. 8. Пропускная емкость одного выключателя типа ВВН-220-15 составляет всего 250 пФ (проходная емкость одного выключателя типа ВВД-220 составляет 1650 пФ). Поэтому в схемах с выключателями типа ВВН при любом их количестве поток в магнитопроводе ТН после отключения последнего выключателя не достигает точки начального насыщения, что исключает возможность возбуждения и существования феррорезонанса.

Это объясняет то обстоятельство, что в схемах с выключателями серии

ВВН всех классов напряжения никогда не возникал феррорезонанс, и не повреждались ТН серии НКФ. Поэтому выключатели этих серий должны быть исключены из МУ [4], так как проектные организации устанавливают меры по защите от феррорезонанса в таких схемах, руководствуясь формальными признаками по МУ, что усложняет эксплуатацию электрооборудования.

В целом опыт эксплуатации электромагнитных ТН с использованием МУ [4] выявил их существенные недостатки, требующие полного пересмотра. При этом Главтехуправлению они известны, однако до сих пор такая задача даже не ставится. При этом некоторые изменения вносились индивидуально по запросам энергосистем, и только для них. Так, по запросу Белглавэнерго Главтехуправление разрешило сборку схемы с воздушными выключателями, шунтированными в отключенном положении емкостными делителями, в обычном порядке. Запрос Белглавэнерго был составлен на основании результатов эксперимента, которые подтвердили, что при сборке схемы в обычном порядке феррорезонанс не возникает, так как не выполняется второе условие возникновения и существования феррорезонанса: нет скачка напряжения от большего значения (U_0) к меньшему значению

$U_{УСТ}=U_0 \cdot C_{\Sigma B}/(C_{\Sigma B}+C_{\Sigma Ш})$, а величина суммарного потока не достигает значения потока начального насыщения.

Самый существенный недостаток МУ это абсолютная неэффективность основного мероприятия (п. 3.8 [4]) по предотвращению повреждений ТН от воздействия ФРП: «Применение специальных устройств, фиксирующих возникновение феррорезонанса и осуществляющих его подавление и вывод трансформатора напряжения из феррорезонанса» (п. 3.1.11 [4]), так как повреждались ТН защищенные этими специальными устройствами. Специальное устройство подавляет феррорезонанс «снижением добротности феррорезонансного контура за счет управляемого ввода в контур с последующим выводом резистора с активным сопротивлением». Неэффективность подавления феррорезонанса специальным устройством связана с тем, что затухание вносится через сам ТН, подключением резистора на вторичную обмотку. Таким способом можно внести затухание, мощность которого не превышает 2 кВт (предельная мощность ТН). В то же время, для большинства схем для подавления феррорезонанса необходимо внесение затухания 5–6 кВт и более, и это подтверждено экспериментально.

Так, для подстанции с параметрами ОРУ-220 $C_{\Sigma B}=9,9$ нФ и $C_{\Sigma Ш}=10,2$ нФ включение устройства подавления ФРП не привело к подавлению ФРП (рис. 9).

В момент отключения последнего выключателя ($t_{откл. выкл.}$), связывающего шины с ТН с напряжением источника, возникает ФРП. Через 7 периодов включается устройство подавления ФРП ($t_{вкл. схемы}$). Через 3 периода начинается насыщение магнитопровода ТН и увеличивается ток первичной обмотки, величина которого изменяется незначительно после включения схемы подавления ФРП ($t_{вкл. схемы}$). После включения устройства подавления ФРП изменяется величина и форма напряжения на ТН, однако, форма тока не изменяется, а величина тока изменяется незначительно ($i_{перв.}=1,6$ А).

В момент $t_{откл. схемы}$ восстанавливаются параметры ФРП, который подавляется при включении выключателя ($t_{вкл. выкл.}$).

То есть, экспериментальная проверка эффективности устройства фиксирующего возникновение фер-

резонанса и осуществляющего его подавление и вывод трансформатора напряжения из феррорезонанса показала его неэффективность, что полностью совпадает с опытом эксплуатации. На тех объектах, где использовались выключатели типа ВВБ и ВВД, и происходили повреждения ТН, внедрение устройства подавления ФРП не исключило повреждения ТН.

В некоторых из этих РУ была внедрена защита внесением затухания резистором, включенным либо параллельно емкостям выключателя [8], либо последовательно с первичной обмоткой ТН с высокой стороны, рассчитанных в соответствии с третьим условием возникновения и существования ФРП [1]. Опыт эксплуатации этих устройств в течение более 20 лет подтвердил их эффективность.

Радикальная мера по исключению повреждений ТН от воздействия ФРП – замена ТН серии НКФ не рассчитанных на воздействие ФРП, на антиферрорезонансные ТН серии НАМИ.

Также кардинальной мерой является замена выключателей, шунтированных в отключенном положении емкостными делителями, на элегазовые выключатели без таких емкостей.

Объем статьи не позволяет подробно разобрать все недостатки МУ [4]. Приведем еще лишь некоторые. Так, из 12 принципиальных электрических схем (приведенных на рис. 1 [4]) распределительных устройств 110–500 кВ, в которых возможно возникновение феррорезонанса, феррорезонанс может возникать только в шести. Подпись к рис. 5: «Схема неполнофазного питания системы шин ОРУ после автоматического отключения присоединений от системы шин» не соответствует действительности, так как это схема питания системы шин с ТН через емкости отключенных выключателей, которая и является феррорезонансным контуром по рис. 8.

Только приведенные недостатки и неточности МУ [4] достаточно убедительно подтверждают необходимость их полного пересмотра.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для предотвращения повреждения ТН, находящихся перед защитным аппаратом по ходу волны грозового

перенапряжения, необходимо установить на ВЛ всех классов напряжения защитный аппарат перед ТН по ходу волны. Установка защитных аппаратов на ВЛ не только защищает ТН, но и повышает грозоупорность подстанции почти на порядок.

2. В открытых (ОРУ) и закрытых (ЗРУ) распределительных устройствах должно быть исключено выделение при различных оперативных и автоматических отключениях участков сети с ограничителями перенапряжений и ТН, запитанных от трансформаторов с незаземленными нейтралью.

3. При неполнофазном питании участка сети от понижающего трансформатора с изолированной нейтралью обмотки 110 кВ, возбуждается феррорезонанс напряжений с уровнем перенапряжений $U_{\text{пер}} = 4,35 \cdot U_{\text{Ф}}$, что приводит к повреждениям ОПН-110 и ТН-110 кВ. Защитой от такого режима является отключение понижающего трансформатора от сети 110 кВ с исключением автоматического включения его от автоматики с низкой стороны. Замена ТН серии НКФ на ТН серии НАМИ в случаях п.п.2 и 3 нецелесообразна, так как не решает проблему их защиты от повреждений.

4. Радикальная мера по исключению повреждений ТН от воздействия ФРП – замена ТН серии НКФ, не рассчитанных на воздействие ФРП, на антиферрорезонансные ТН серии НАМИ.

5. Также кардинальной мерой по исключению повреждений ТН от воздействия ФРП является замена выключателей, шунтированных в отключенном положении емкостными делителями, на элегазовые выключатели без таких емкостей.

6. Необходимо пересмотреть методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения, так как опыт эксплуатации показал неэффективность предлагаемых МУ мер по предотвращению повреждений ТН от ФРП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков В.С. Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными

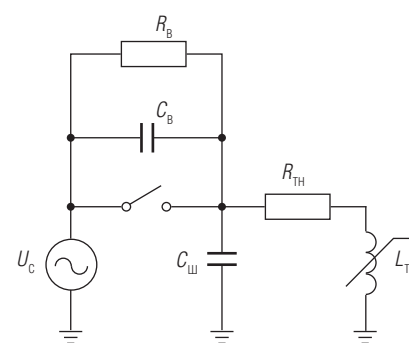


Рис. 10. Защита ТН от феррорезонанса подключением резистора R_B параллельно выключателю или $R_{\text{ТН}}$ последовательно с первичной обмоткой ТН

трансформаторами напряжения // Энергоэксперт, № 1, 2014 г.

2. Костенко М.В., Невретдинов Ю.М., Халилов Ф.Х. Грозозащита электрических сетей в районах с высоким сопротивлением грунта. – Наука, Л.О. – 1984 г.

3. И 34-70-021-85. Инструкция по эксплуатации средств защиты от перенапряжений. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986.

4. РД 34.20.517 и СО 153-34.20.517. МУ 34-70-163-87 Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / ЦПТИ-ИТО ОРГРЭС (17.09.87). – Москва, 2005 год.

5. Портной М.Г. Повреждение трансформаторов напряжения при субгармоническом резонансе // Информационные материалы ВНИИЭ. – М.: Госэнергоиздат, 1958.

6. Павлов В.И., Максимов В.М. Феррорезонанс в электрических сетях с заземленной нейтралью. – Электрические станции, 1975, № 1.

7. Цирель Я.А., Поляков В.С. Феррорезонансные явления в сетях с глухозаземленной нейтралью и мероприятия по их предотвращению // Электрические станции. 1977. № 3 с. 71–75.

8. А.С. СССР № 1464244. Подстанция переменного тока. Поляков В.С. Оpubл. в БИ № 9 от 07.03.1989 года.

9. Поляков В.С., Чертоусова В.М. Феррорезонанс в сети 220 кВ и меры борьбы с ним. Труды ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина, 1982, № 385, с. 65–71.