

Система РЗА фазорегулирующего устройства сверхвысокого напряжения

В.К. ВАНИН, Г.А. ЕВДОКУНИН, Р.Н. НИКОЛАЕВ, М.Г. ПОПОВ
**ГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Россия**

А.К. ИСКАКОВ
АО Батыс транзит
Б.К. ОСПАНОВ, Н.И. УТЕГУЛОВ,
ИПК ZHERSU
Казахстан
PopovMG@eef.spbstu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электропередача 500 кВ, управляемая электропередача (FACTS), особенности повреждений, релейная защита и автоматика, микропроцессорная система, система релейной защиты и автоматики фазорегулирующего устройства.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены основные аспекты научно-обоснованного проектирования системы релейной защиты фазоповоротного комплекса (FACTS – Flexible AC Transmission System), введенного в эксплуатацию на ПС 500 кВ «Ульке» (Казахстан) в феврале 2009 года.

Рассматриваются виды повреждений и ненормальных режимов электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ Северный Казахстан – Актюбинская область с используемым устройством FACTS мощностью 500 000 кВА. Выполнены расчетные исследования динамических режимов (коротких замыканий) электроэнергетической системы с управляемой электропередачей сверхвысокого напряжения. На основе анализа результатов расчета переходных процессов показаны особенности повреждений фазоповоротного трансформатора. Оригинальность его конструкции вызывает необходимость по-новому оценить возникающие повреждения электроэнергетического оборудования и режимные особенности их протекания.

Представлены основные положения по созданию системы релейной защиты и автоматики устройства FACTS с продольно-поперечным регулированием с учетом его схемно-технических особенностей.

2. СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.1. Особенности повреждений фазоповоротного трансформатора

Конструктивно фазоповоротный трансформатор (ФПТ) состоит из автотрансформатора (АТ) и вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) с электромеханическими переключателями для регулирования коэффициентов трансформации. Регулируемая вторичная обмотка ВДТ, и регулируемая и общая обмотки АТ образуют последовательную схему суммирования (см. рис. 1). Номинальная

мощность ФПТ составляет $S_{ном} = 400$ МВА. При этом номинальная мощность АТ $S_{ном} = 3 \times 167$ МВА. Номинальная мощность ВДТ составляет $S_{номВДТ} = 400$ МВА, типовая мощность $S_{типВДТ} = 146$ МВА. Диапазон регулирования коэффициентов трансформации АТ $k_{вс}, k_{сн}$ равен $\pm 8 \times 1,5\%$ (число ступеней регулирования равно 16). Диапазон регулирования коэффициента трансформации ВДТ $k_{ВДТ}$: 0 – 2,17 (число ступеней регулирования равно 16).

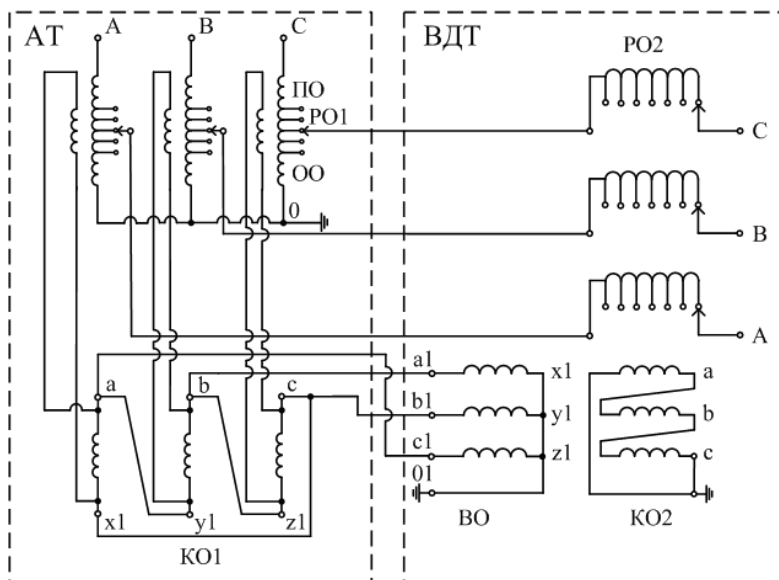


Рис. 1: Схема электрических соединений обмоток фазоворотного трансформатора

ПО – последовательная обмотка АТ; ОО – общая обмотка АТ;
 PO1, PO2 – регулировочная обмотка АТ и ВДТ, соответственно;
 KO1, KO2 – компенсационная обмотка АТ и ВДТ, соответственно;
 BO – возбуждающая обмотка ВДТ

Первичная схема соединения фазоворотного трансформатора, приведенная на рис. 1, позволяет выявить следующие особенности повреждений фазоворотного трансформатора. Кроме широко известных повреждений, характерных для автономно работающих автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора, опасными становятся замыкания, возникающие в их дополнительных (компенсационных) обмотках. Также при решении общих вопросов построения системы релейной защиты ФПТ приходится считаться с повреждениями их соединительных элементов (ошиновки АТ и ВДТ).

Исследование различных повреждений обмоток фазоворотного комплекса и его ошиновки осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения для расчета электромагнитных переходных процессов, разработанного в ГОУ СПбГПУ. При этом наиболее характерными повреждениями (с точки зрения формулирования особых требований к РЗА) являются замыкания на землю в цепи ВО вольтодобавочного трансформатора (см. осциллограммы и комплексные величины сигналов тока, напряжения рис. 2, 3).

Необходимо подчеркнуть, что при имеющемся подключении (питание обмотки возбуждения со стороны НН автотрансформатора) ВДТ его дифференциальная защита будет нечувствительна к замыканиям на землю со стороны возбуждающей обмотки при нулевом положении избирателя отпаек регулировочной обмотки.

Однако, при ненулевом положении переключателя витков РО ВДТ этот вид повреждения будет восприниматься как короткое замыкание (см. рис. 2). Здесь, не вдаваясь в особенности расчета параметров срабатывания защит от отмеченных видов повреждений, которые изложены в последующих разделах, лишь укажем, что для устранения этого недостатка система защиты фазоворотного трансформатора дополняется защитой от замыканий на землю в цепи низшего напряжения 38,5 кВ с контролем напряжения и тока нулевой последовательности.

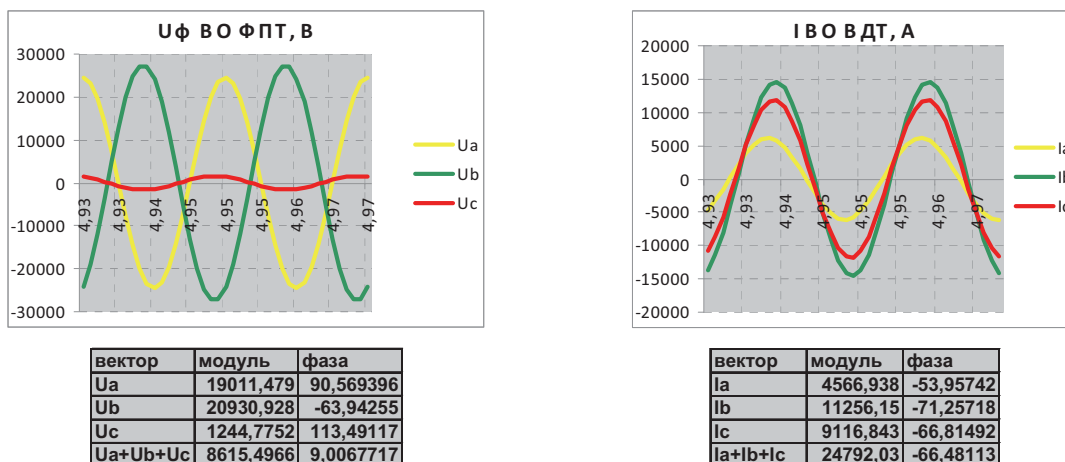


Рис. 2: Режим установившегося 1-фазного замыкания на землю в цепи 38,5 кВ ФПТ

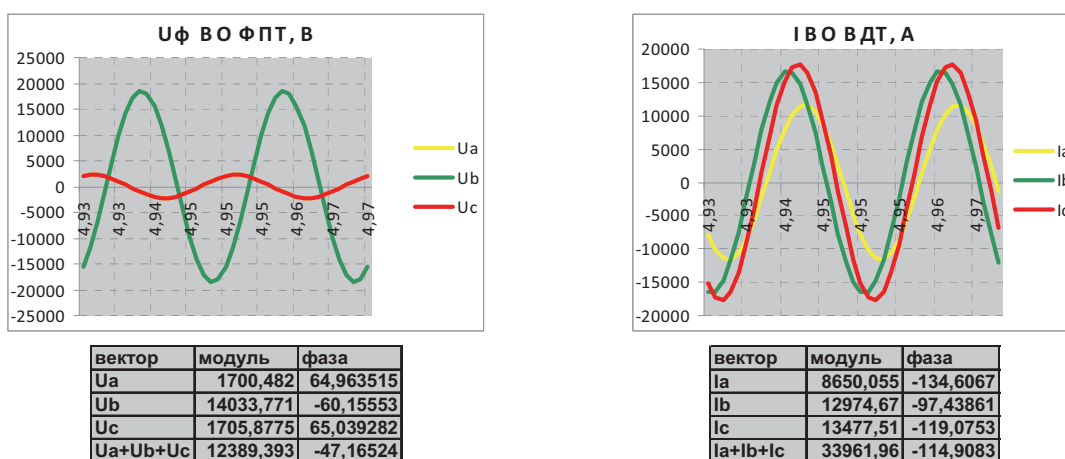


Рис. 3: Режим установившегося 2-фазного замыкания на землю в цепи 38,5 кВ ФПТ

Также отметим одну из особенностей схемы ФПТ, которая заключается в том, что при появлении многофазных коротких замыканий на участке между АТ и РО ВДТ к последней прикладывается напряжение 220 кВ со стороны сети среднего напряжения, что утяжеляет последствия таких повреждений. В частности, это вызывает значительные перенапряжения со стороны 38,5 кВ. Поэтому дополнительно целесообразно ведение на стороне 38,5 кВ защиты от повышения напряжения, действующей на отключение ФПТ.

2.2. Общие требования к системе релейной защиты фазоповоротного трансформатора

Оригинальность конструкции фазоповоротного трансформатора вызывает необходимость по-новому оценить возникающие повреждения электроэнергетического оборудования и режимные особенности их протекания. В свете сказанного выше каждый элемент этого комплекса должен иметь собственные быстродействующие защиты от внутренних повреждений и резервные защиты, которые в основном, являются общими.

Для организации системы релейной защиты фазоповоротного комплекса должна быть предусмотрена установка следующих видов быстродействующих защит:

- продольная дифференциальная защита ошиновки высшего напряжения (ВН) 500 кВ;
- продольная дифференциальная защита ошиновки среднего напряжения (СН) 220 кВ;
- продольная дифференциальная защита ошиновки низшего напряжения (НН) 38,5 кВ;
- продольная дифференциальная защита вольтодобавочного трансформатора от повреждений его обмоток и на выводах;
- газовая защита вольтодобавочного трансформатора от внутренних повреждений и от понижения уровня масла;
- продольная дифференциальная защита автотрансформатора от повреждений его обмоток и на выводах;
- газовая защита автотрансформатора от повреждений внутри кожуха и от понижения уровня масла.

Перечень резервных защит фазопоротного комплекса включает в себя:

- дистанционную защиту от междуфазных КЗ в сети 500 кВ и осуществляющую частичное резервирование основных защит автотрансформатора;
- дистанционную защиту от междуфазных КЗ в сети 220 кВ и реализующую частичное резервирование основных защит автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора;
- токовую защиту АТ с комбинированным пуском по напряжению от междуфазных КЗ, включенную со стороны ВН (500 кВ) АТ;
- токовую защиту от перегрузки АТ;
- токовую направленную защиту нулевой последовательности от КЗ на землю в сети 500 кВ, охватывающую ошиновку ВН АТ;
- токовую направленную защиту нулевой последовательности от КЗ на землю в сети 220 кВ, охватывающую ошиновку СН АТ;
- защиту с контролем напряжения и тока нулевой последовательности от замыканий на землю в цепях 38,5 кВ автотрансформатора, вольтодобавочного трансформатора и трансформатора собственных нужд.

В целом, общая система релейной защиты фазопоротного трансформатора представляется как объединение указанных подсистем РЗА ошиновки, автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора. При этом наибольший интерес представляет методика расчета дифференциальной защиты [2] вольтодобавочного трансформатора в силу последовательного подключения в сеть среднего напряжения (220 кВ) его регулировочной обмотки (см. рис. 4).

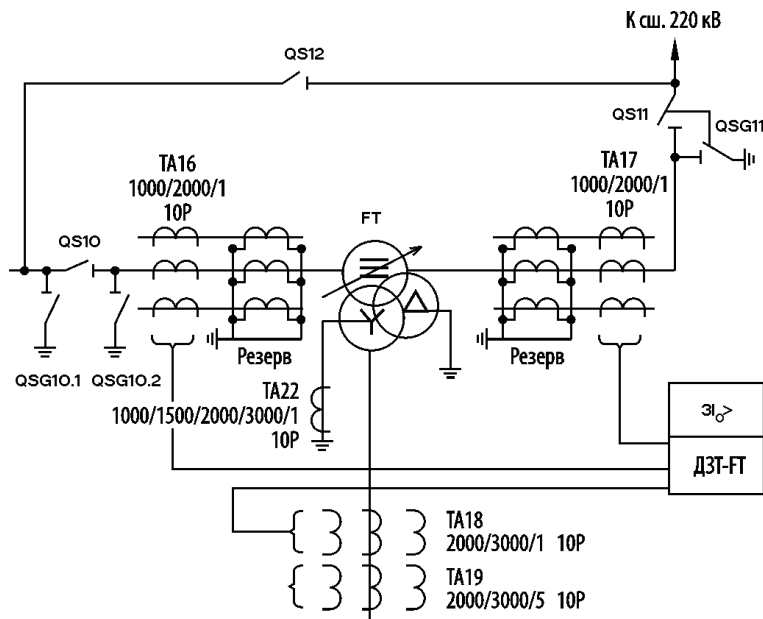


Рис. 4: Подключение дифференциальной защиты ВДТ к трансформаторам тока

Более того, в виду наличия в вольтодобавочном трансформаторе шунтирующей перемычки (см. рис. 4), входящей в ошиновку 220 кВ фазоворотного трансформатора, выбор параметров срабатывания его защит и проверка чувствительности последних имеют особенности, поскольку должны распространяться на два характерных случая:

- 1) автономная работа АТ при введении шунтирующей ВДТ перемычки;
- 2) совместная работа АТ и ВДТ при разомкнутом положении разъединителя QS12 перемычки.

Естественно, что во втором случае может проявляться недостаточная чувствительность некоторых видов защит электроустановок (автотрансформатора, ВДТ, ошиновки) фазоворотного комплекса из-за некоторого снижения уровня токов внешних КЗ вследствие последовательно включенного сопротивления ВДТ. Для повышения их чувствительности в указанных схемно-режимных условиях предлагается использование независимых групп уставок (такие возможности имеются практически у всех современных микропроцессорных защит). Выбор той или иной группы уставок может осуществляться как вручную, так и автоматически. Последний вариант управления группами уставок предполагает контроль состояния разъединителя QSG12 (см. рис. 4) шунтирующей ВДТ перемычки.

2.3. Особенности дифференциальной защиты вольтодобавочного трансформатора

Чувствительная дифференциальная токовая защита (с торможением и блокировками по гармоническим составляющим тока включения) ВДТ (ДЗТ-FT) подключается к токовым цепям трансформаторов тока ТА 16, ТА 17 и ТА 18, охватывая все обмотки вольтодобавочного трансформатора (см. рис. 4). Напомним, что методика выбора уставок дифференциальной защиты ВДТ [2], заключается в расчете значений начального тока срабатывания, коэффициентов торможения участков характеристики первой ступени и уставок блокировок по второй и пятой гармоническим составляющим, а также в определении тока срабатывания дифференциальной отсечки. Расчет коэффициентов торможения характеристики срабатывания дифференциальной защиты осуществляется применительно к условиям отстройки от внешних коротких замыканий. Оценка чувствительности ступеней дифференциальной защиты ВДТ выполняется для режима двухфазного короткого замыкания при минимальной нагрузке электроэнергетической системы.

В целом, методика расчета дифференциальной защиты ВДТ идентична методическим указаниям по выбору уставок дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора. Тем не менее, в связи с неоднократно отмечавшейся особенностью последовательного включения регулировочной обмотки линейного регулировочного трансформатора в сеть 220 кВ расчетные выражения для определения тока небаланса (как будет показано далее) несколько видоизменены в соответствии с физическими представлениями.

Как известно, величина тока небаланса, контролируемая дифференциальной защитой, определяется неуравновешенностью токов отдельных ее плеч (сторон ВДТ):

$$I_{нб\Sigma} = I_{нбВО} + I_{нбРО}, \quad (1)$$

где $I_{нбВО}$, $I_{нбРО}$ – составляющие тока небаланса, обусловленные током ВО и РО соответственно, А.

Естественно, что значение отдельно взятой составляющей тока небаланса, будет обусловлено погрешностью соответствующих трансформаторов тока и регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора и автотрансформатора. Ввиду некоторой неопределенности учета знака отдельно взятых регулирующих эффектов по напряжению при несогласованном его регулировании устройствами РПН указанных трансформаторов в методике используется понятие среднеквадратичного эквивалентного регулирующего эффекта напряжения:

$$\Delta U_{ВО} = \Delta U_{ВДТ} \quad (2)$$

$$\Delta U_{РО} = \sqrt{(\Delta U_{АТ})^2 + (\Delta U_{ВДТ})^2}, \quad (3)$$

Москва, 7–10 сентября 2009 г.

где ΔU_{BO} , ΔU_{PO} – эквивалентные регулирующие эффекты по напряжению токов РО и ВО, о. е.; $\Delta U_{ВДТ} = 0,5 \times \frac{U_{BO}}{U_{номРО}}$ – диапазон регулирования напряжения относительно среднего положения переключающих устройства ВДТ, приведенный к стороне СН, о.е.; $\Delta U_{АТ}$ – диапазон регулирования напряжения АТ относительно среднего положения его переключающего устройства, о. е.

Такой подход позволяет применить традиционный расчет составляющих тока небаланса с учетом изменения положения переключающих устройств ФПТ (АТ + ВДТ) при регулировании напряжения при некотором загрузлении чувствительного измерительного органа дифференциальной защиты. Составляющие тока небаланса, обусловленные током возбуждающей и регулировочной обмоток ВДТ, определяются по уравнениям:

$$I_{нбВО} = (k_{пер} \times \varepsilon + \Delta U_{ВО}) \times I_{ВО} \quad (4)$$

$$I_{нбРО} = (k_{пер} \times k_{одн} \times \varepsilon + \Delta U_{РО}) \times I_{РО}, \quad (5)$$

где $k_{пер}$ – коэффициент, учитывающий переходный процесс, о. е.; ε – относительное значение полной погрешности трансформаторов тока, о.е.; $k_{одн}$ – коэффициент однотипности трансформаторов тока, о.е.

Учитывая, что в большинстве устройств микропроцессорных защит осуществляется программная компенсация фазового сдвига, обусловленного группой соединения обмоток ВДТ, величина суммарного тока небаланса находится как результат алгебраического сложения его составляющих:

$$I_{нб\Sigma} = I_{нбВО} + I_{нбРО} \quad (6)$$

Применяя вышеописанный подход, могут быть определены величины дифференциального и тормозного токов [2]. Важно также отметить, что при крайних (1-ом и 17-ом) положениях переключающего ответвления РО устройства эквивалентные регулирующие эффекты по напряжению $U_{ВО}$ и $U_{РО}$, определяются только внешним (по отношению к ВДТ) регулированием напряжения на автотрансформаторе. Как следствие этого в указанных схемно-режимных условиях работы ФПТ дифференциальная защита с торможением будет обладать лучшей (большей) чувствительностью, поскольку ее параметры срабатывания $I_{*С3min}$, $k_{торм1}$ и $k_{торм2}$ будут иметь меньшие (по сравнению с расчетом для среднего положения РПН) значения.

2.4. Особенности защиты от замыканий на землю ФПТ

Ранее отмечалось, что данная защита относится к основным и предназначена действовать при повреждении изоляции относительно земли. В зону ее действия входят обмотка низкого напряжения АТ, компенсационная обмотка (КО), возбуждающая обмотка ВО ВДТ, обмотка 38 кВ соединенная в треугольник трансформатора собственных нужд (ТСН), соединительная ошиновка перечисленных элементов с коммутационными аппаратами (разъединители QS9, QSG9, QS13, QSG13 и выключатель ТСН).

Важность защиты состоит в том, что практически все повреждения сопровождаются замыканиями на землю. Поэтому защита частично резервирует другие основные (дифференциальные) защиты ФПТ, предупреждая развитие аварий. Защита контролирует напряжение нулевой последовательности, подаваемое с выводов разомкнутого треугольника первичного преобразователя напряжения TV1 (см. рис. 5). Как указывалось выше, особенностью схемы подключения ВДТ является то, что повреждения относительно земли в цепях с изолированной нейтралью воспринимаются со стороны РО ВДТ как однофазные короткие замыкания в зависимости от положения переключателя. Поэтому защита дополнительно должна осуществлять контроль тока нулевой последовательности в цепи с помощью включенного в нейтраль ВО ВДТ трансформатора тока ТА 22 (см. рис. 5).

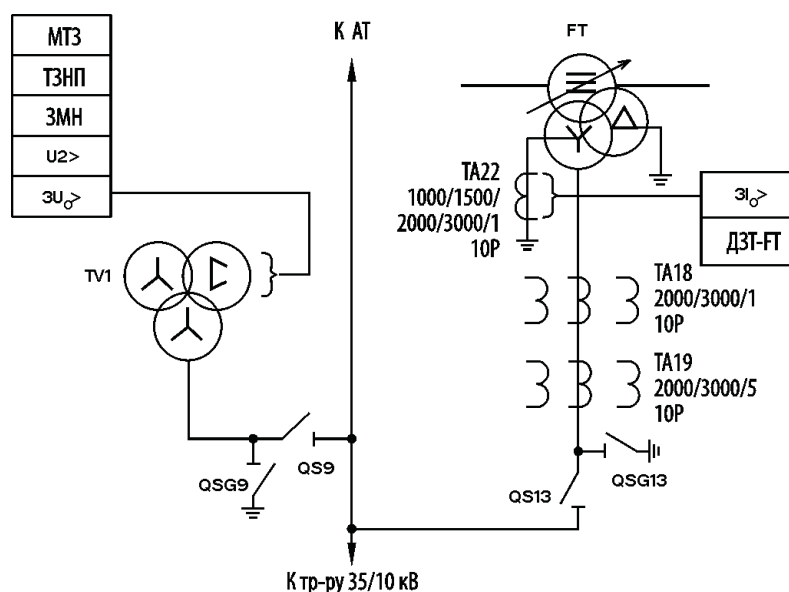


Рис. 5: Схема подключения защиты от замыканий на землю ФПТ

Защита имеет два параметра срабатывания U_{0c3} , I_{0c3} . Их расчет заключается в следующем. U_{0c3} отстраивается от напряжения небаланса на выходе фильтра $3U_0$ TV1, который обусловливается возможным появлением напряжения нулевой последовательности с высокой и средней стороны АТ при однофазных и двухфазных КЗ с землей и наличием в напряжении $U_{нн}$ составляющей тройной частоты U_{3f} .

$$3U_{*0c3} \geq 3U_{*0нб}, \quad (7)$$

где $3U_{*0нб}$ – величина напряжения небаланса, о. е.

Учитывая малые значения межобмоточной емкости АТ и U_{3f} , отстройка обеспечивается при $3U_{0c3} = (5 - 12) \%$. Однако, напряжение нулевой последовательности на выходе фильтра $3U_0$ (с выводов обмотки «разомкнутого» Δ) трансформатора напряжения обусловливается и путем его трансформации со стороны РО ВДТ при указанных выше КЗ относительно земли на стороне ВН и СН автотрансформатора и ненулевом положении переключателя РО ВДТ.

Для согласования действия защит от замыканий относительно земли, необходимо отстроить их по времени срабатывания друг от друга и введением взаимных блокировок по логическому входу. Так, первые ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП) автотрансформатора блокируют по логическому (дискретному) входу описанную выше защиту от замыканий на землю со стороны НН АТ (контроль $3U_0$), реализуя тем самым логическую селективность. В последней также необходимо предусмотреть выдержку времени $\Delta t_{c3} = (0.5 - 1.0)$ с. Кроме того, ток срабатывания I_{0c3} отстраивается от тока небаланса в нейтрали ВО при внешних КЗ со стороны ВН и СН автотрансформатора:

$$I_{*0c3} \geq I_{*Ннб}, \quad (8)$$

где $I_{*Ннб}$ – относительное значение тока небаланса, контролируемое от трансформатора тока ТА 22 в нейтрали ВО ВДТ, о. е.

Междуфазные КЗ со стороны НН автотрансформатора (включая сюда ВДТ и трансформатор собственных нужд) устраняются дифференциальной защитой АТ и дифференциальной защитой ошиновки низшего напряжения.

2.5. Опытно-промышленные испытания фазоворотного комплекса

Опытно-промышленные испытания по включению первой (на территории СНГ) управляемой электропередачи 500 кВ Северный Казахстан – Актюбинская область с ФПТ (ПС 500 кВ Ульке) проводились в период с 26.01.2009 по 02.02.2009. Включение фазоворотного комплекса осуществлялось в два этапа – включение АТ в режиме холостого хода со стороны ВН 500 кВ (см. рис. 6, 7) и последующее включение ВДТ под нагрузку со стороны СН 220 кВ (см. рис. 8).

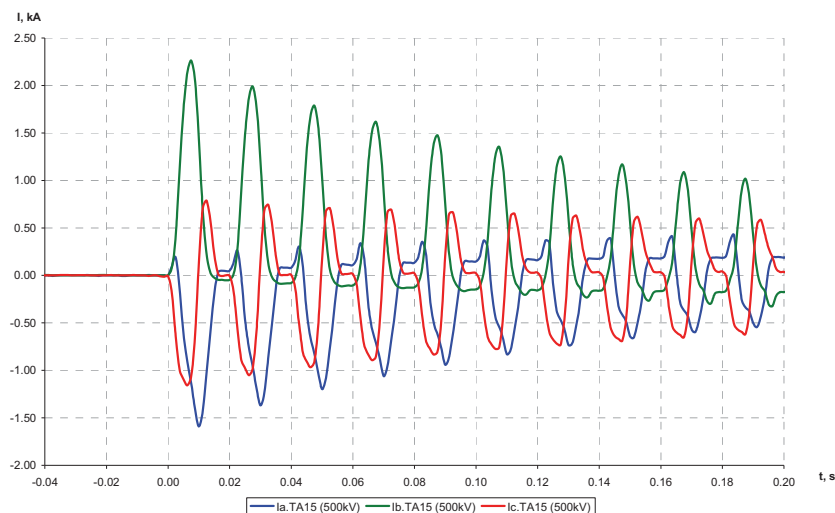


Рис. 6: Осциллограмма включения АТ в режиме холостого хода

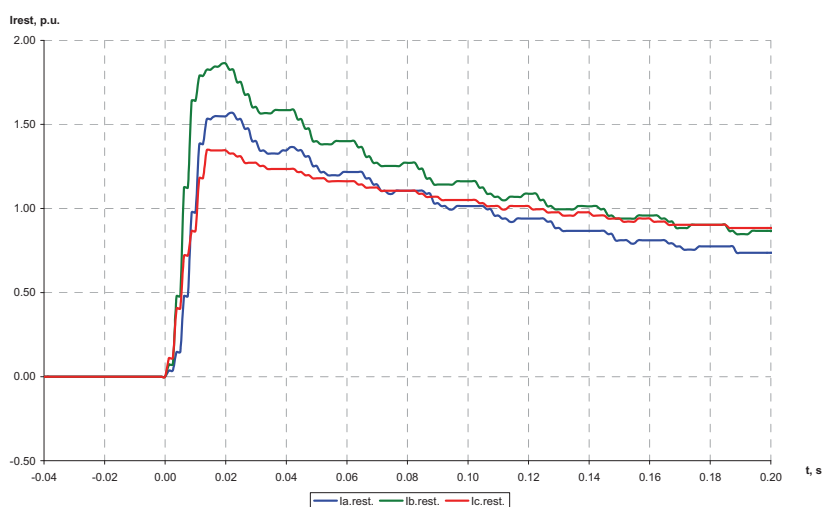


Рис. 7: Изменение токов торможения дифференциальной защиты АТ при его включении в режиме холостого хода

В процессе включения АТ в режиме холостого хода осциллографировался бросок тока намагничивания (см. рис. 6) и контролировался пуск этим током дифференциальной защиты ($I_{C3_min} = 0,2 I_{ном}$). Также сделан расчет тока торможения (см. рис. 7), обусловленного появлением броска намагничивающего тока при интервале усреднения 20 мс.

Уставка органа блокировки от броска тока намагничивания по второй гармонике принималась равной 15% (по отношению к основной гармонике), а уставка дифференциальной отсечки из этих соображений принималась $6,0 I_{ном}$.

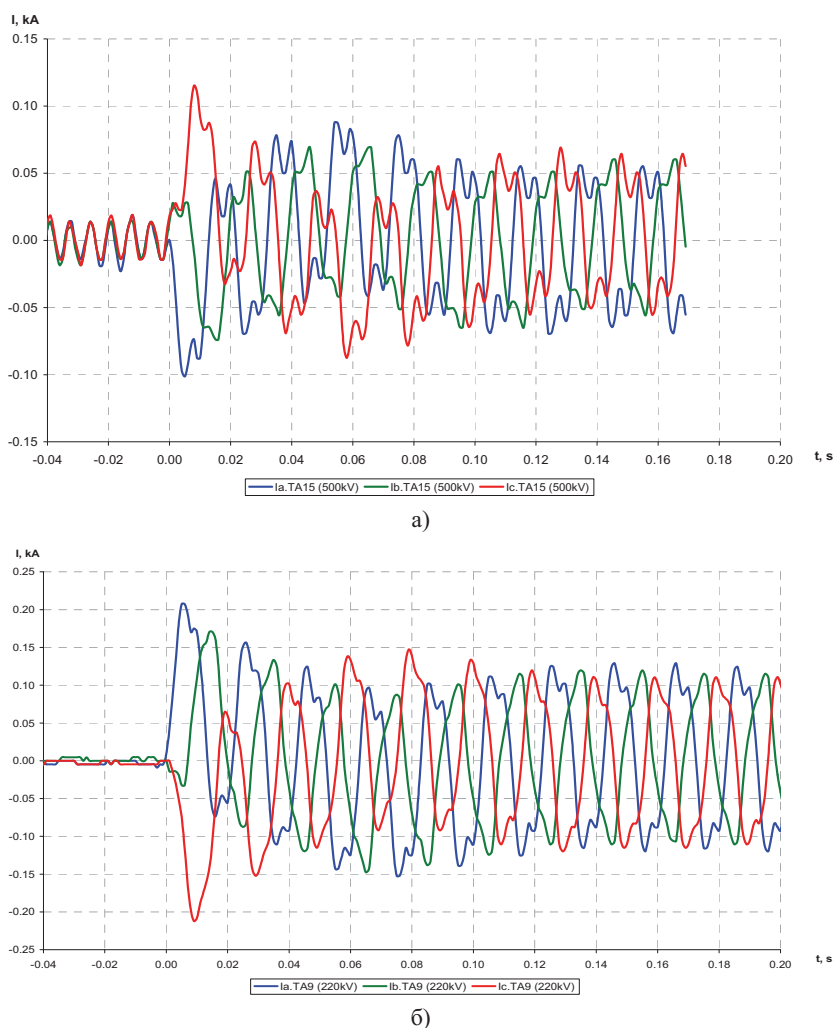


Рис. 8: Осциллограмма включения ВДТ под нагрузку
а) сторона 500 кВ; б) сторона 220 кВ

В результате анализа цифровых осциллограмм установлено, что пиковое значение токов включения АТ составляет 2,263 кА (см. рис. 6), что отвечает кратности 3,91 ($I_{ном} = 578,51$ А). Спектральный анализ сигналов фазных токов включения показал наличие второй гармонической составляющей (22-24 %), а также незначительный уровень (около 2%) пятой и высших гармонических составляющих.

На рис. 8 изображены осциллограммы переходного процесса (последовательно на сторонах 500 кВ и 220 кВ) при включении вольтодобавочного трансформатора под нагрузку около $0,2 I_{ном}$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены особенности повреждений фазоповоротного трансформатора в цепях его низшего напряжения 38,5 кВ. Установлено, что дифференциальная защита будет нечувствительна к замыканиям на землю со стороны возбуждающей обмотки при нулевом положении избирателя отпаек регулирующей обмотки. Для устранения этого недостатка система защиты фазоповоротного трансформатора должна быть дополнена защитой от замыканий на землю в цепи низшего напряжения 38,5 кВ с контролем напряжения и тока нулевой последовательности.

Москва, 7–10 сентября 2009 г.

Предложена концепция создания системы релейной защиты фазоповоротного комплекса. Такой принцип построения системы защиты позволяет обеспечить необходимую чувствительность и селективность с учетом схемно-режимных условий работы фазоповоротного трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокунин Г.А. и др. Фазоповоротный трансформатор. Впервые в СНГ применен в Казахстане. Новости электротехники, № 6 (48), 2008.
- [2] Ванин В.К., Попов М.Г. Фазоповоротный трансформатор. Особенности релейной защиты. Новости электротехники, № 2 (56), 2009.