



PS1 – S3-01



Дифференциальная защита блоков «генератор-трансформатор с секционированной обмоткой» гидроаккумулирующих электростанций

**З. ГАИЧ¹, Й. МЕНЕЗЕС¹, Т. МЬОС², А. ВОЛДЕН³, Л. ЭЛЗЕТ³, А. ГРАФТАС³
ABB SA Products¹, E-CO Vannkraft AS², ABB AS³
Швеция¹, Норвегия^{2,3}
zoran.gajic@se.abb.com**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Дифференциальная защита блока, защита генератора, гидроаккумулирующая электростанция.

1 ВСТУПЛЕНИЕ

Каждая гидроаккумулирующая электростанция имеет, по меньшей мере, три режима работы, которые могут создавать проблемы при проектировании схемы защиты: режим генератора, режим насоса и пуск машины в режиме насоса.

Основная разница между режимами генератора и насоса заключается в различии направлений вращения синхронной машины и направления (т.е. знака) потока активной мощности. Такое изменение направления вращения достигается при помощи так называемых реверсивных фазных разъединителей. Эти разъединители изменяют чередование двух фаз в насосном режиме с целью изменения направления вращения магнитного поля статора в синхронной машине на обратное. Однако физическое расположение реверсивных фазных разъединителей может быть очень важным для правильного проектирования некоторых функций защиты (например, дифференциальной защиты) блока «генератор/двигатель-трансформатор». Для данной установки реверсивные фазные разъединители 89G и 89P размещаются между низковольтными вводами блочного трансформатора и синхронной машины в соответствии с рис. 1, т.е. в пределах зоны защиты дифференциального реле.

Пуск синхронной машины в насосном режиме специфичен для каждой гидроаккумулирующей электростанции. На данной конкретной станции машина запускается как асинхронный двигатель при пониженном уровне напряжения. Снижение уровня напряжения достигается посредством применения специальной конструкции блочного трансформатора с секционированной вторичной обмоткой, соединенной в треугольник в соответствии с рис. 2.

Работа дифференциальной защиты блока на любой электростанции должна основываться на балансе ампер-витков блочного трансформатора. Т.е. в принципе, можно говорить о том, что она является разновидностью стандартной дифференциальной защиты трансформатора. При проектировании необходимой схемы дифференциальной защиты блока на электростанции с использованием трансформаторов тока СТ1, СТ7 и СТ8 в соответствии с рис. 1 должны учитываться все вышеперечисленные факторы. Одна из проблем – как поступить с токами от трансформатора тока СТ7 (т.е. точки соединения в звезду), которые могут заводиться на блочный трансформатор тремя разными способами в зависимости от режима работы машины. Вторая проблема – как выбрать и задать номинальные параметры блочного трансформатора (например, мощность, напряжение и группу соединения обмоток) для дифференциальной защиты блока в связи с особой конструкцией блочного трансформатора.

В настоящей статье показано, как проектируется схема дифференциальной защиты блока с применением цифровых интеллектуальных электронных устройств последнего поколения. В

программном обеспечении реле используется адаптивная схема с возможностью переключения токов CT7.

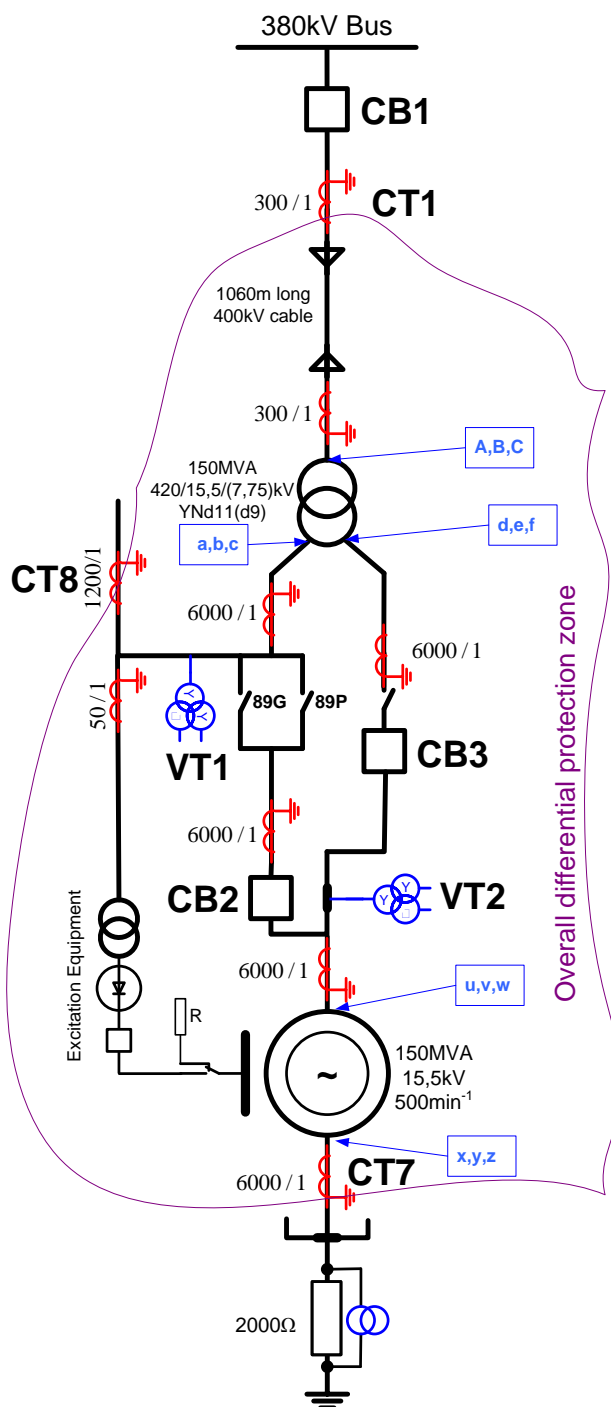


Рис. 1: Однолинейная схема электростанции с обозначениями фаз обмоток машины и блочного трансформатора

2 НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

На рис. 1 показана схема одного блока «генератор/двигатель-трансформатор» с соответствующими защитными трансформаторами тока и напряжения, их коэффициентами трансформации и обозначениями фаз обмоток машины и блочного трансформатора. Показано расположение реверсивных пофазных разъединителей. В настоящей статье не представлена полная схема защиты для такой гидроаккумулирующей электростанции - ее можно найти в

статье [3]. Вместо этого описываются проблемы, с которыми разработчики столкнулись при проектировании дифференциальной защиты блока для этой электростанции.

2.1 Конструкция блочного трансформатора

Блочный трансформатор представляет собой двухобмоточный трансформатор с группой соединения обмоток YNd11. От средних точек каждой фазы обмотки НН, соединенной в треугольник, выведены три дополнительных отвода d, e и f в соответствии с рис. 2. Такая конструкция трансформатора позволяет создать "третью кажущуюся обмотку" с номинальным напряжением 7,75 кВ и группой соединения обмоток Yd9. Номинальные данные для "третьей кажущейся обмотки" приведены в круглых скобках на рис. 1 и 2. "Третья обмотка" используется только при пуске машины в насосном режиме (см. описание в следующем разделе). Для дифференциальной защиты такой трансформатор должен рассматриваться как трехобмоточный силовой трансформатор с группой соединения обмоток YNd11d9 [4].

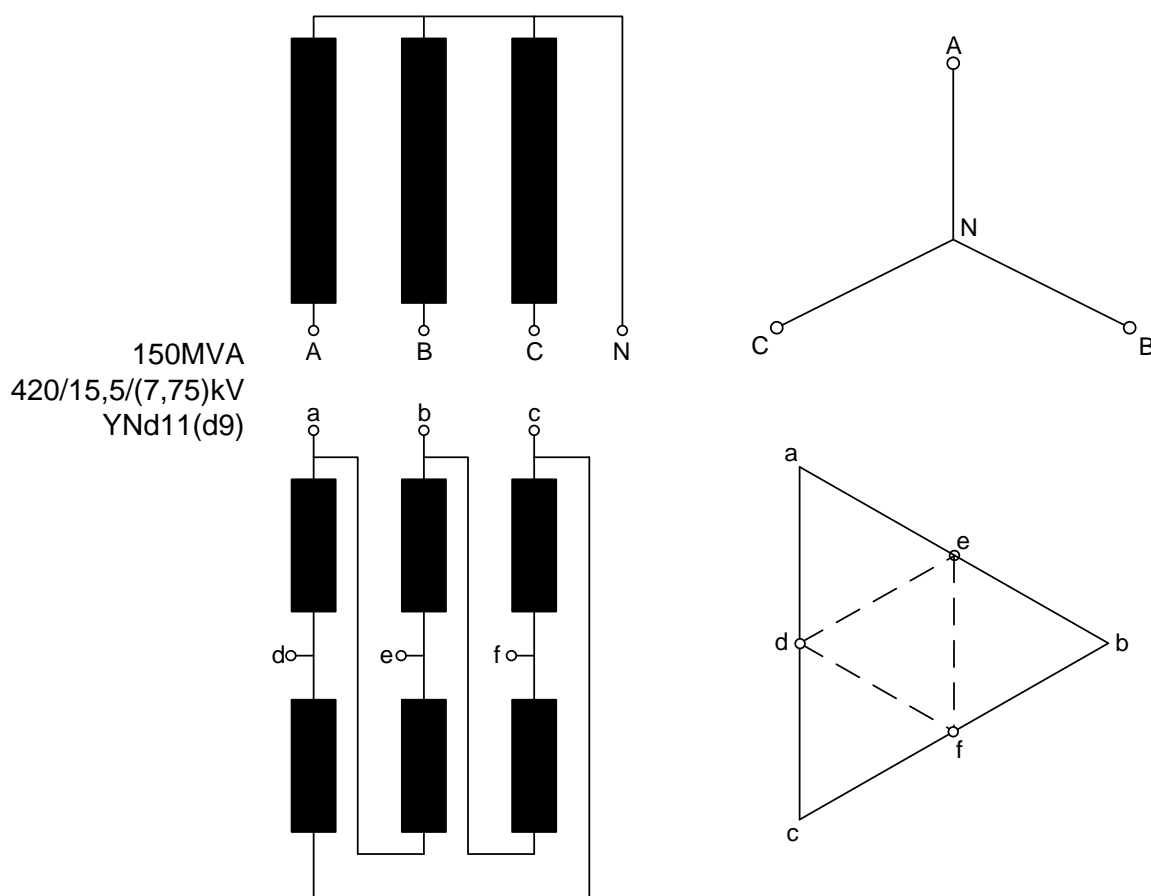


Рис. 2: Принципиальная схема, векторные диаграммы, номинальные данные и обозначения фаз блочного трансформатора

2.2 Пуск электрической машины в режиме насоса

На каждой гидроаккумулирующей электростанции пуск электрической машины в режиме насоса создает проблему для проектировщиков. На различных электростанциях используются различные схемные решения. В нашей конкретной установке насос запускается как асинхронный двигатель методом прямого пуска в сеть при пониженном уровне напряжения. Снижение уровня напряжения достигается посредством специальной конструкции блочного трансформатора, как было сказано выше. Пуск насоса включает в себя следующие этапы:

- режим останова машины;
- подается напряжение на блочный трансформатор из высоковольтной системы (выключатель СВ1 включен, СВ2 и СВ3 отключены в соответствии с рис. 1);
- вода вытесняется из камеры турбины при помощи компрессора;
- замыкается реверсивный пофазный разъединитель 89Р;

- включается дополнительный пусковой резистор в цепь обмотки ротора для уменьшения тока;
- включается выключатель СВ3 и машина запускается как асинхронный двигатель при напряжении 50 % номинального значения. Действующее значение пускового тока машины составляет около 200 % номинального значения. Необходимо учесть, что такой пусковой ток в высоковольтной сети будет расценен как номинальный ток (т.е. 100 %) вследствие изменения коэффициента трансформации блочного трансформатора при пуске;
- пусковой резистор отключается после разгона машины до скорости, близкой к синхронной, и в обмотку ротора подается ток возбуждения;
- двигатель втягивается в синхронный режим при напряжении 50 % номинального значения;
- отключается выключатель СВ3 и машина оказывается временно отключенной от сети;
- включается форсировка возбуждения в течение следующей 1 с для повышения напряжения на зажимах машины с 50 до 100 % номинального значения;
- замыкается выключатель СВ2 после односекундной форсировки возбуждения и машина вновь синхронизируется с сетью при напряжении 100 % номинального значения;
- открывается поворотный затвор и насос нагружается.

Более подробно о последовательности пуска см. в [5].

3 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА БЛОКА

Работа дифференциальной защиты блока на любой электростанции должна основываться на балансе ампер-витков блочного трансформатора. Т.е. в принципе, можно говорить о том, что она является разновидностью стандартной дифференциальной защиты трансформатора. При проектировании необходимой схемы дифференциальной защиты блока на электростанции с использованием трансформаторов тока СТ1, СТ7 и СТ8 в соответствии с рис. 1 должны учитываться все вышперечисленные факторы. Необходимо также учесть, что теоретически должен быть подключен к этой схеме трансформатор тока 50/1, находящийся в цепи возбуждения, но на практике его можно не учитывать, поскольку протекающий в этой точке ток очень мал.

Трансформаторы тока СТ1 и СТ8 находятся в зоне срабатывания дифференциальной защиты блока. Однако трансформатор тока СТ7 (т.е. ток в нейтрали обмотки машины) может подключаться к блочному трансформатору тремя различными способами в зависимости от режима работы блока (т.е. фактических положений СВ2, СВ3, 89G и 89P). Возможные варианты подключения трансформатора тока СТ7 показаны в таблице 1.

Табл. 1: Варианты подключения нейтрали обмотки статора к блочному трансформатору

	Режим генератора	Режим насоса	Пуск в режиме насоса
Вывод обмотки машины 'х' к выводу	a (15,5 кВ)	c (15,5 кВ)	f (7,75 кВ)
Вывод обмотки машины 'у' к выводу	b (15,5 кВ)	b (15,5 кВ)	e (7,75 кВ)
Вывод обмотки машины 'z' к выводу	c (15,5 кВ)	a (15,5 кВ)	d (7,75 кВ)

Для большинства цифровых дифференциальных реле необходимо ввести номинальные данные силового трансформатора, чтобы сбалансировать дифференциальную защиту трансформатора. Какие данные необходимо вводить и как должны заводиться на реле токи ТТ для данного применения?

Известно, что номинальные данные любого силового трансформатора (показанные, например, на рисунке 2) приводятся в соответствии с маркировкой выводов обмоток. Если токи дифференциальной защиты блока заводятся на дифференциальное реле в том же порядке (т.е.

последовательности), что и маркировка выводов, номинальные данные блочного трансформатора можно использовать непосредственно для балансировки цифрового дифференциального реле. Таким образом, в процессе наладки дифференциального реле необходимо сделать следующее:

- фазные токи реле L1, L2, L3 для обмотки 420 кВ должны всегда подключаться как IA, IB, IC;
- фазные токи реле L1, L2, L3 для обмотки 15,5 кВ должны всегда подключаться как Ia, Ib, Ic;
- фазные токи реле L1, L2, L3 для обмотки 7,75 кВ должны всегда подключаться как Id, Ie, If.

Используемое цифровое реле дифференциальной защиты блока [1] - адаптивное и может быть спроектировано на коммутацию токов СТ7 в направлении функции дифференциальной защиты блока в зависимости от режима работы блока. Необходимо учесть, что вторичная обмотка трансформатора тока СТ7 жестко соединена с аппаратной частью реле. Все необходимые переключения токов СТ7 выполняются при помощи программного обеспечения реле. Однако следует учесть, что все программные коммутации токов СТ7 будут выполняться только в то время, когда в первичном токе отсутствуют токи обмоток статора.

Информация о режиме работы машины (генератор или насос) подается в реле через два дискретных входа с АСУ электростанции. Информация о режиме пуска насоса выводится в самом реле путем измерения напряжения на выводах машины с использованием трансформатора напряжения VT2 в насосном режиме работы. Если уровень напряжения ниже 75 %, прогнозируется пуск насоса, и в программном обеспечении выполняются соответствующие подключения СТ7. Если измеренное напряжение оказывается больше 75 %, предполагается насосный режим работы, и токи СТ7 соответствующим образом переключаются в программном обеспечении. В таблице 2 обобщены подключения ТТ к схеме дифференциальной защиты блока.

Если токи ТТ всегда заведены на дифференциальное реле в соответствии с маркировками выводов трансформатора, номинальные токи трансформатора должны вводиться в реле с целью балансировки дифференциальной функции (см. [1] и [2]). Необходимые данные для такого случая показаны в таблице 3.

Поскольку коммутация токов ТТ дифференциальной защиты блока зависит от напряжения, эта функция блокируется сигналом УРОВ VT2 в насосном режиме работы.

Табл. 2: Подключения ТТ к схеме дифференциальной защиты блока

	Токи обмотки 1	Токи обмотки 2	Токи обмотки 3
Режим генератора	СТ1: IL1, IL2, IL3	СТ8: IL1, IL2, IL3 СТ7: Ix, Iy, Iz	-
Режим насоса	СТ1: IL1, IL2, IL3	СТ8: IL1, IL2, IL3 СТ7: Iz, Iy, Ix	-
Пуск насоса	СТ1: IL1, IL2, IL3	СТ8: IL1, IL2, IL3	СТ7: Iz, Iy, Ix

Табл. 3: Значения базисных величин, необходимые для настройки дифференциальной защиты блока

	Обмотка 1	Обмотка 2	Обмотка 3
SBase	150 МВА		
UBase	420 кВ	15,5 кВ	7,75 кВ

IBase	206 A	5587 A	11174 A
Группа соединения обмоток	Y	d11	d9
Снижение напряжения нулевой последовательности	Вкл	Выкл	Выкл

4 ОСЦИЛЛОГРАММЫ

Схема дифференциальной защиты первого блока была введена в эксплуатацию в июне 2010 года, второго блока – в ноябре 2010 года. С тех пор опыт эксплуатации – только положительный.

На рис. 3 и 4 приведены осциллограммы, записанные на этой установке. Необходимо учесть, что буквы В, Н и R используются для обозначения отдельных фаз трехфазной системы вместо более употребительных L1, L2 и L3 (МЭК) или А, В, С (ANSI). Такие обозначения фаз используются конечным пользователем.

На рис. 3 показаны записанные в процессе пуска машины при напряжении 7,75 кВ (например, 50 % номинального напряжения) осциллограммы следующих величин:

- напряжения трехфазного замыкания на землю на выводах машины (в первичных кВ);
- трехфазных токов на стороне 420 кВ блочного трансформатора (в первичных амперах);
- трехфазных токов на стороне нейтрали обмотки машины (в первичных кА).

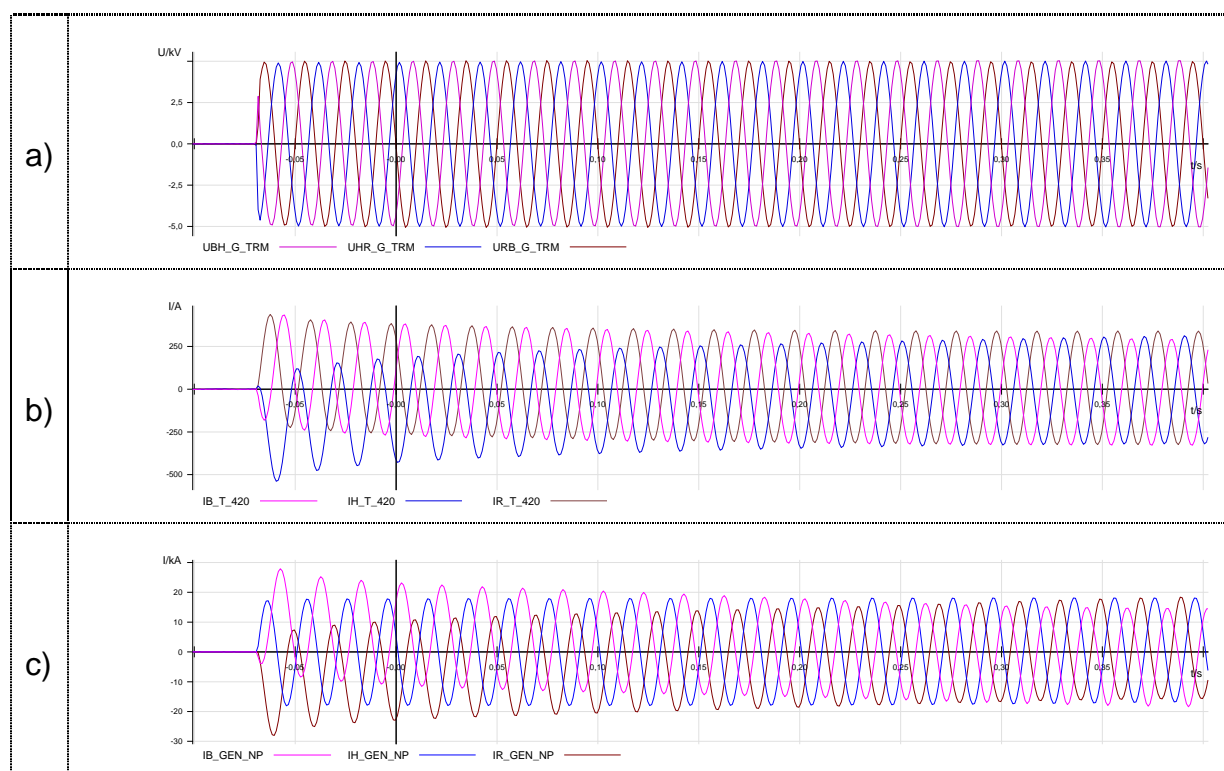


Рис. 3: Осциллограммы напряжений и токов во время пуска машины при пониженном напряжении 7,75 кВ (например, 50% номинального напряжения)

Во время пуска насоса дифференциальная защита блока была полностью устойчивой.

На рисунке 4 показаны зафиксированные при переключении напряжения питания с 7,75 кВ на 15,5 кВ во время пуска насоса (например, с 50 на 100 % номинального напряжения) осциллограммы следующих величин:

- действующих значений напряжения трехфазного замыкания на землю на выводах машины (в первичных кВ);
- трехфазных токов на стороне 420 кВ блочного трансформатора (в первичных амперах);

с) трехфазных токов на стороне нейтрали обмотки машины (в первичных кА).

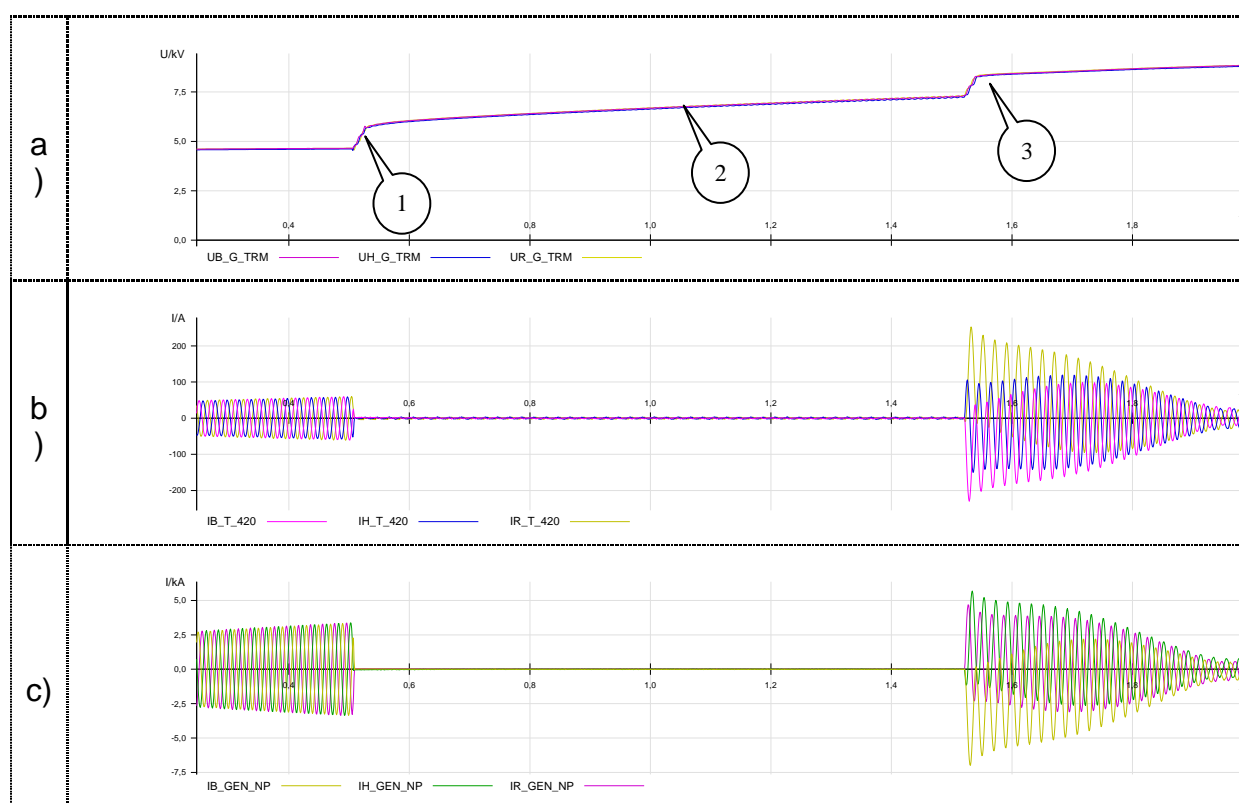


Рис. 4: Осциллограммы напряжений и токов во время переключения напряжения питания с 7,75 кВ на 15,5 кВ при пуске насоса

Касательно рисунка 4 необходимо учесть следующее:

- цифра 1 на рисунке 4а соответствует моменту времени, когда был отключен выключатель СВЗ, и машина оказалась отключенной от высоковольтной системы. При этом пропал ток на обеих сторонах блочного трансформатора;
- цифра 2 на рисунке 4а соответствует периоду времени, равному 1 сек, во время которого при увеличении тока возбуждения напряжение на зажимах машины увеличивается с 50 до 100 % номинального значения. При этом скорость вращения слегка уменьшается;
- цифра 3 на рисунке 4а соответствует моменту времени, когда был включен выключатель СВ2, и машина повторно синхронизируется с высоковольтной системой. При этом на мгновение на обеих сторонах блочного трансформатора вновь появляются токи.

В течение 1-секундной форсировки возбуждения подключения токов ТТ к дифференциальной защите блока автоматически переключились, см. таблицу 2 /строка 4, на подключения в таблице 2/строка 3. Как показано на рисунке 4, дифференциальная защита блока была устойчивой при пуске насоса.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье показана схема дифференциальной защиты блока гидроаккумулирующей электростанции с достаточно сложным первичным оборудованием. Это решение было реализовано с помощью современного цифрового реле защиты генератора, которое успешно эксплуатируется уже около года.

Чтобы правильно спроектировать схему дифференциальной защиты для подобных применений, необходимо решить следующие задачи:

- определить номинальные данные силового трансформатора;

- определить маркировки выводов силового трансформатора и соответствующие зависимости отдельных токов ТТ. Для гидроаккумулирующей электростанции обычно требуется трехфазная схема подключения, включая маркировки выводов блочного трансформатора и машины;
- необходимо убедиться в том, что на всех сторонах силового трансформатора и во всех режимах работы токи к реле дифференциальной защиты заведены в одной и той же последовательности, соответствующей маркировкам выводов;
- только после этого можно использовать номинальные данные силового трансформатора для балансировки дифференциальной защиты в соответствии с рекомендациями производителя.

Необходимо учесть, что вышеприведенные утверждения касаются всех реле дифференциальной защиты трансформатора независимо от типа и производителя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] АBB. “Интеллектуальное электронное устройство REG670, Техническое справочное руководство”, 1MRK502013-UEN, (2007).
- [2] Z. Gajić, “Differential protection methodology for arbitrary three-phase power transformers”, Конференция DPSP 2008, Глазго-Великобритания, 2008.
- [3] Z. Gajić, J. Menezes, D. Trišić, M. Čitaković. “Integrated Protection Scheme for Pump-Storage Hydroelectric Power Plant”, 3-я международная конференция "Вопросы релейной защиты и автоматизации подстанций современных энергосистем сверхвысокого напряжения", Санкт-Петербург, Россия, (2011).
- [4] Силовые трансформаторы – Международный стандарт МЭК 60076, редакция 2.1.
- [5] E. Westgaard, E. Nordrik, J. Sonstad; “Aurland III: Største pumpe i landet“; Elektro, nr 11, 29 mai 1981 (на норвежском языке).