

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТУПИКОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ 220-110 КВ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ ПО ПРИЗНАКУ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

М.Ш. Мисриханов, д-р техн.наук, Т.Е. Путова, инж., В.П.Гречин, канд.техн.наук, П.Г. Малюшицкий, инж.

Рассмотрены особенности работы тупиковых подстанций с высшим напряжением 110-220 кВ, работающих с изолированной или заземленной нейтралью при неполнофазных режимах. Показано, что при работе тупиковых и отпаечных подстанций с изолированной нейтралью в случае возникновения неполнофазных режимов возможны массовые повреждения электроприемников потребителей и повреждения подстанционного оборудования. Для уменьшения ущерба от последствий неполнофазных режимов на тупиковых и отпаечных подстанциях необходимо применять режимы работы трансформаторов с заземленной нейтралью.

Введение. Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) в России обладают достаточно большим запасом по параметрам надежности, устойчивости и энергетической безопасности [1]. Но, несмотря на имеющиеся удаленные конечные пределы по надежности и безопасности ЭЭС, существующие (построенные сорок и более лет назад) энергетические объекты (подстанции и ЛЭП) уже давно выработали свой технический (не говоря о моральном) ресурс. Кроме того, наличие отличных от нормальных ситуаций в системах электроснабжения, вызванных производственными (при ремонтно-эксплуатационном обслуживании) и режимными нарушениями, ставит перед энергетиками необходимость рассмотрения и решения вопросов по разработке штатных мероприятий по обнаружению и скорейшей ликвидации аварийных режимов. Это касается и возникающих в электрических сетях неполнофазных режимов (НПФР), особенности которых рассмотрены в данной статье.

Основными задачами электроэнергетики являются обеспечение надёжности, живучести, устойчивости систем электроснабжения (выработка и передача энергии потребителям) и безопасности работы и эксплуатации электрооборудования электрических сетей и электростанций, а также обеспечение минимального ущерба при возможных повреждениях и отказах элементов этих систем.

Становление и дальнейшее укрепление экономики, связанное со значительным ростом энергопотребления, требует постоянного развития электроэнергетики, что приводит к значительному росту протяжённости распределительных и передающих электрических сетей и увеличению установленных мощностей оборудования электростанций и подстанций, что, в свою очередь, сопровождается значительным ростом уровней токов короткого замыкания (ТКЗ).

Увеличение уровня ТКЗ требует установки более мощного (по току) силового оборудования, повышения отключающей способности коммутационных аппаратов, надёжности схем электроснабжения, так как сокращает рабочий ресурс оборудования подстанций вследствие более высокого уровня динамических и тепловых воздействий на электроустановки при аварийных режимах, что в целом снижает эксплуатационную надёжность работы оборудования и устойчивость работы энергосистем.

Сложные требования по поиску больших финансовых (инвестиционных) вложений и материальных затрат, необходимых для ускоренного развития электроэнергетики (сооружение и ввод в действие энергетических объектов), определило в прошлом направление на минимизацию капитальных вложений на развитие электроэнергетики. Во время бурного развития сетевой электроэнергетики, вызванное вводом в эксплуатации объектов промышленной индустрии, Министерством энергетики бывшего СССР, по предложению научных и проектных энергетических организаций, было принято решение о внедрении менее затратных упрощенных (отпаечных) схем присоединения к электрической сети напряжением 220-110 кВ, особенно, тупиковых подстанций.

Трудности, связанные с поиском больших финансовых (инвестиционных) вложений и увеличение материальных затрат, необходимых для ускоренного развития электроэнергетики (сооружение и ввод в действие энергетических объектов), определили в прошлом направление на минимизацию капитальных вложений на развитие электроэнергетики. Во время бурного развития сетевой электроэнергетики, вызванного вводом в эксплуатацию объектов промышленной индустрии, Министерством энергетики

бывшего СССР по предложению научных и проектных энергетических организаций было принято решение о внедрении менее затратных упрощенных (отпаечных) схем присоединения к электрической сети напряжением 220-110 кВ, особенно, тупиковых подстанций.

Стремление уменьшить негативные последствия роста ТКЗ, путем ограничения величины ТКЗ, привело к использованию работы питаемых силовых трансформаторов на отпаечных и тупиковых подстанциях в режиме с изолированной нейтралью (ИН), что позволило снизить уровень однофазных ТКЗ, уменьшить частоту и объемы повреждаемости оборудования, а это, в свою очередь, обеспечило повышение надёжности электроснабжения потребителей.

Рассмотрим особенности использования на отпаечных подстанциях схем работы силовых трансформаторов с ИН:

Ожидаемые преимущества:

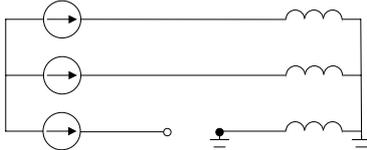
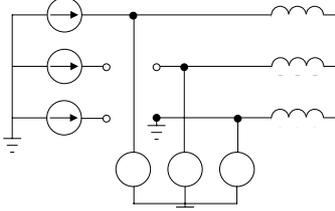
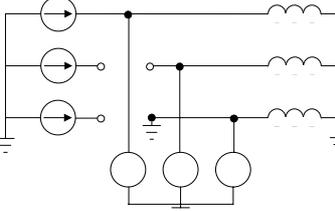
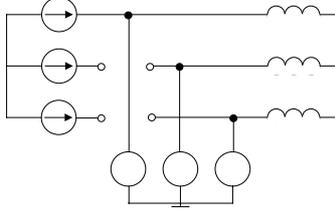
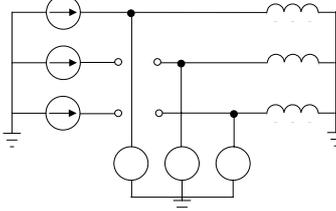
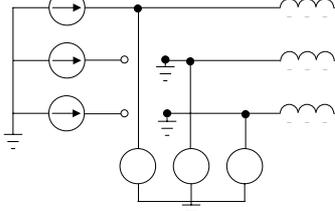
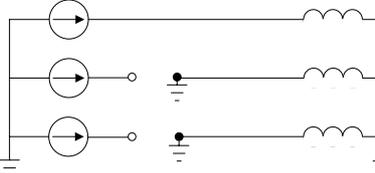
- уменьшение токов короткого замыкания;
- снижение требования к отключающей способности выключателей;
- облегчение выбора оборудования по ТКЗ;
- уменьшение стоимости выключателей и другого оборудования;
- повышение надёжности работающего оборудования;
- увеличение ресурса оборудования;
- снижение расходов на обслуживание.

При более подробном изучении различных схем работы трансформаторов с ИН было выявлено, что недостатки преобладают над преимуществами. Основным недостатком является повышенная опасность повреждения электрооборудования и электроустановок станций и подстанций и, особенно, электроприёмников потребителей при возникновении НППР. Хотя НППР достаточно редкое явление, но они опасны масштабами последствий, так как охватывают значительные участки электрической сети, связанные с источником и местом возникновения.

Рассмотрим возможные схемы НППР, приведенные в табл.1.

Таблица 1. Описание и схемы несимметричных аварийных режимов

№ схемы	Описание режима	Схема режима работы трансформатора
1	Обрыв одной фазы без замыкания на землю, нейтраль трансформатора заземлена	
2	Обрыв одной фазы без замыкания на землю, нейтраль трансформатора изолирована	
3	Обрыв одной фазы с замыканием на землю, нейтраль трансформатора изолирована	

4*	Обрыв одной фазы с замыканием на землю, нейтраль трансформатора заземлена	
5	Обрыв двух фаз с замыканием одной фазы на землю, нейтраль трансформатора изолирована	
6	Обрыв двух фаз с замыканием одной из фаз на землю, нейтраль трансформатора заземлена	
7	Обрыв двух фаз без замыкания на землю, нейтраль трансформатора изолирована	
8	Обрыв двух фаз без замыкания на землю, нейтраль трансформатора заземлена	
9	Обрыв двух фаз с замыканием обеих фаз на землю, нейтраль трансформатора изолирована	
10*	Обрыв двух фаз с замыканием обеих фаз на землю, нейтраль трансформатора заземлена	

Примечание. * – Режим короткого замыкания по данной схеме подлежит немедленному отключению (работа автоматической защиты).

Такие НПФР наиболее вероятны при:

- выводе в ремонт трансформатора подстанции с упрощенной схемой и отказе выключателя со стороны источника питания;
- отказе оборудования в момент отключения трансформатора от собственных защит;

- стихийных воздействиях;
- обрыве проводов питающей воздушной ЛЭП.

Рассмотрим, какую опасность представляет возникновение НПФР, на конкретных схемах:

1. Прежде всего, это возможность возникновения феррорезонансных режимов (ФР), которые сопровождаются повышением линейных и фазных напряжений выше номинального. При этом возможны повреждения подстанционного оборудования. При наличии нелинейностей происходит нарушение симметрии линейных и фазных напряжений и соотношений между их величинами. Напряжение при ФР трансформируется на низкую сторону. При наличии присоединённых электроприёмников последние могут выйти из строя из-за повышенного напряжения.

ФР возникает при следующих условиях:

- неполнофазном питании трансформатора, работающего в режиме холостого хода, или при наличии близкого к нему трансформатора с изолированной нейтралью;
- наличии подключённой ёмкости к трансформатору в фазе, где имеется обрыв.

Возникающая при этом несимметрия фазных напряжений в обмотке ВН трансформатора, у которого схема соединения обмоток «звезда с нулем – треугольник», трансформируется в сеть 10 (6) кВ, а линейные напряжения на стороне 6 (10) кВ пропорциональны фазным напряжениям на стороне 220 (110) кВ.

Несимметричные линейные напряжения в обмотке 10 (6) кВ в свою очередь трансформируются в сеть 0,4 кВ через трансформаторы 6 (10)/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «треугольник – звезда с заземлённой нейтралью». При этом фазные напряжения на стороне 0,4 кВ пропорциональны линейным напряжениям на стороне 10 (6) кВ (т.е. векторные диаграммы напряжений на стороне 220 (110) кВ и на стороне 0,4 кВ идентичны).

При несимметрии напряжений возможны повреждения:

- двигателей, не имеющих защиту от минимального напряжения или от НПФР, из-за асимметрии и снижения питающего напряжения;
- электроприёмников, чувствительных к отклонению уровня напряжения от нормального.

Причём за счёт неравномерности нагрузки по фазам в несимметричном режиме, т.е. за счёт частичного шунтирования нагрузкой большей величины одной из фаз, возможно повышение фазного напряжения выше номинальной величины в другой фазе и, как следствие, повреждение оборудования подключённых к этой фазе потребителей.

2. На тупиковых подстанциях, работающих с трансформаторами с ИН, возможны повреждения трансформаторов напряжения (ТН) из-за самопроизвольного смещения нейтрали и при отсутствии НПФР.

3. При НПФР производство операций с разъединителем в нейтрали силового трансформатора представляет опасность из-за возможного появления больших токов, протекающих через нейтраль.

Поэтому НПФР необходимо ликвидировать в кратчайшие сроки. Ситуация осложняется тем, что, несмотря на то, что высокий уровень автоматизации энергетики позволяет мгновенно с помощью устройств релейной защиты определить и отключить почти все виды возникающих повреждений, автоматика по предотвращению НПФР отсутствует. Реакция основных видов защит ориентирована на срабатывание от коротких замыканий. Менее распространены виды защит, реагирующие на повышение или понижение напряжения и появление токов обратной последовательности.

Исходя из вышеизложенного, возникает необходимость разработки и внедрения специфических автоматических устройств, задачей которых является распознавание и ликвидация НПФР в зависимости от его вида. При отсутствии данной автоматики задача по ликвидации НПФР полностью возлагается на обслуживающий оперативный персонал. Но положение усугубляется тем, что оперативное обслуживание отпаечных подстанций осуществляется преимущественно оперативно-выездными бригадами (ОВБ), а не постоянным персоналом.

В связи с вышеизложенным актуальной является задача выявления и оценки НПФР:

- для автоматических устройств – по физическим процессам и соотношениям физических величин (фазные, линейные напряжения, токи, фазные углы и т.д.);
- для персонала – по показаниям измерительных приборов.

Рассмотрим основные виды НПФР для отпаечных и тупиковых подстанций с трансформаторами, работающими:

- а) с заземлённой нейтралью;
- б) с изолированной нейтралью при следующих режимах работы сети:
 - обрыве одной фазы без замыкания на землю;
 - обрыве одной фазы с замыканием на землю;
 - обрыве двух фаз без замыкания на землю;
 - обрыве двух фаз с замыканием на землю одной из фаз;
 - обрыве двух фаз с замыканием их на землю.

Обрыв одной фазы без замыкания на землю.

Рассмотрим два режима:

- а) *нейтраль трансформатора заземлена* (табл.1, схема 1);
- б) *нейтраль трансформатора изолирована* (табл. 1, сх. 2).

При обрыве одной фазы без замыкания на землю практически полностью сохраняются симметрия и величины линейных и фазных напряжений на трансформаторе как с высокой стороны, так и со стороны потребителей при любой нагрузке.

Объясняется это тем, что при ЗН каждая фаза трёхстержневого трансформатора питается независимо от других фаз, и поэтому в целых фазах напряжение определяется фазными напряжениями источника, которые являются симметричными. Векторная сумма напряжений этих двух фаз даёт по величине и углу значение напряжения третьей недостающей фазы. Под действием напряжения источника в каждом стержне обмотки, подключённой к источнику, возбуждается магнитный поток. При этом значение магнитного потока по величине и углу задано подводимым напряжением. Поэтому сумма векторов магнитного потока в двух стержнях равна магнитному потоку, соответствующему напряжению недостающей третьей фазы (где обрыв). В соответствии с первым законом Кирхгофа для узловых точек магнитных цепей, суммарный магнитный поток двух стержней поступает в стержень третьей фазы с обрывом, где этим магнитным потоком возбуждается напряжение, равное напряжению, которое было до обрыва. Таким образом, полностью сохраняются симметрия и величина всех линейных и фазных напряжений на трансформаторе как по высокой, так и по низкой стороне.

Ток в оставшихся в работе обмотках со стороны ВН увеличивается в $\sqrt{3}$ раза. Распределение токов в обмотке низкого напряжения (НН) такое же, как и при нормальном режиме. При отсутствии перегрузки трансформатор в данном режиме может находиться достаточно долго, что позволяет принять целесообразные меры по ликвидации НПФР без ущерба для потребителей.

Увеличение тока в обмотке ВН в $\sqrt{3}$ раз связано с тем, что размагничивающими токами в магнитосвязанных цепях, согласно закону электромагнитной инерции (закон Ленца), являются токи нагрузки с высокой и низкой стороны. Токи нагрузки с низкой стороны при симметричной нагрузке образуют симметричную систему, так как определяются симметричной системой напряжений с низкой стороны. В силу того, что по высокой стороне в фазе с обрывом ток отсутствует, с низкой стороны появляется размагничивающий ток нулевой последовательности с углом и величиной, соответствующий току с высокой стороны недостающей фазы. Этот ток создаёт магнитодвижущую силу (МДС) нулевой последовательности. Для сохранения магнитного равновесия в других стержнях появляется МДС нулевой последовательности, которая создаётся токами нулевой последовательности с высокой стороны. Поэтому ток нулевой последовательности со стороны ВН, складываясь с токами нагрузки в целых фазах, вызывает возрастание токов в этих фазах в $\sqrt{3}$ раза. Ток нулевой последовательности проходит через нейтраль. Поэтому в нейтрали появляется ток, равный утроенной величине тока нагрузки недостающей фазы со стороны ВН, значение которого определяется величиной нагрузки на стороне НН.

По показаниям приборов наличие НПФР определяется по следующим признакам:

- на стороне 220 (110) кВ в фазе с разрывом – ток отсутствует;
- на стороне 6 (10) кВ – неизменность значений токов по всем фазам;
- несоответствие токов в обмотке ВН, с учётом коэффициента трансформации, токам в обмотке НН (больше в 1,732 раза).

Если нейтраль трансформатора изолирована, возможно появление ФР.

При наличии нагрузки или отсутствии подключённой ёмкости к обмотке трансформатора в фазе, в которой имеется разрыв, ФР невозможен и, следовательно, повышения линейного напряжения выше рабочего не произойдёт. В этом случае трансформатор будет работать как однофазный, что приведет к искажению симметрии линейных и фазных напряжений.

При равномерном распределении нагрузки по фазам или в режиме холостого хода, как показали расчёты (табл. 2), распределение напряжений на обмотке ВН трансформатора будет следующее:

- от источника подводится только одно линейное напряжение ($U_{\text{Л}}$) со значением, равным напряжению источника, остальные линейные напряжения со стороны источника питания равны нулю;
- фазное напряжение ($U_{\text{Ф}}$) в двух фазах обмоток будет равно $0,5U_{\text{Л}}$, что составляет около $0,87U_{\text{раб.ф}}$;

- фазное напряжение в третьей фазе равно нулю.

При несимметричной нагрузке за счёт частичного шунтирования нагрузкой большей величины одной из фаз возможно повышение напряжения выше номинального в другой фазе и, как следствие, повреждение электроприёмников потребителей в фазе с повышенным напряжением.

Показания приборов при отсутствии ФР (здесь и далее приведены данные соответственно по фазам А, В, С) будут следующие:

на стороне ВН:

- линейные напряжения по фазам – 1,0; 0,5; $0,5 U_{\text{раб.л}}$ источника;
- фазные напряжения по фазам – 1,0; 1,0; $0,5 U_{\text{раб.ф}}$ источника;
- напряжения на открытом треугольнике – 1,5 от $U_{\text{Ф}}$;

на стороне НН:

- линейные напряжения по фазам – 0,87; 0,87; $0 U_{\text{раб.л}}$;
- фазные напряжения по фазам – 1; 0,5; $0,5 U_{\text{раб.ф}}$.

Таблица 2. Расчетные значения параметров режимов работы (по схемам табл.1).

№ схемы	Величина напряжения на выводах трансформатора, кВ:						
	высокого напряжения (110 кВ)						
	U_{av}	$U_{вс}$	U_{ac}	U_{a0}	$U_{в0}$	$U_{с0}$	$3U_0$
1	110	110	110	63,5	63,5	63,5	0
2	110	55	55	63,5	63,5	31,75	95,25
3	110	63,5	63,5	63,5	63,5	0	63,5
4*							
5	31,75	31,75	63,5	63,5	31,75	0	95,25
6	127	63,5	63,5	63,5	63,5	0	127
7	0	0	0	63,5	63,5	63,5	190,5
8	95,25	95,25	0	63,5	31,75	31,75	0
9	63,5	63,5	0	63,5	0	0	63,5
10*							
	среднего напряжения (35кВ)						
1	35	35	35	20,2	20,2	20,2	0
2	35	17,5	17,5	17,5	17,5	0	0
3	35	20,2	20,2	17,8	17,8	6,7	0
4*							
5	10,1	10,1	20,1	10,1	0	10,1	0
6	40,4	20,2	20,2	20,2	20,2	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	30,3	30,3	0	20,2	10,1	10,1	0
9	20,2	20,2	0	13,5	6,7	6,7	0
10*							
	низкого напряжения (10/6 кВ)						
1	10,5/6,3	10,5/6,3	10,5/6,3	6,1/3,64	6,1/3,64	6,1/3,64	0/0
2	9,1/5,5	0/0	9,1/5,5	6,06/3,64	3,03/1,8	3,03/1,8	0/0
3	9,2/5,6	3,5/2,1	9,2/5,6	3,9/2,3	3,9/2,3	6,9/4,1	0/0
4*							
5	0/0	5,3/3,2	5,3/3,3	1,8/1,1	3,5/2,1	1,8/1,1	0/0
6	10,5/6,3	0/0	10,5/6,3	7,0/4,2	3,5/2,1	3,5/2,1	0/0
7	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
8	10,5/6,3	5,3/3,2	5,3/3,2	5,3/3,2	0/0	5,3/3,2	0/0
9	3,5/2,1	3,5/2,1	7,0/4,2	3,5/2,1	3,5/2,1	0/0	0/0
10*							

Примечание: * – смотри примечание таблицы 1.

Обрыв одной фазы с замыканием на землю.

Рассмотрим 2 режима:

- а) *нейтраль трансформатора заземлена* (табл. 1, схема 4);
- б) *нейтраль трансформатора изолирована* (табл. 1, схема 3).

При обрыве одной фазы с замыканием на землю через трансформатор начинает протекать ТКЗ, который должен отключаться релейной защитой. Однако ТКЗ, которые проходят через трансформатор, значительно меньше, чем при обычных коротких замыканиях, за счёт того, что при данной схеме сопротивление короткого замыкания выше, чем при обычном режиме, и релейная защита может их не почувствовать.

Возникновение режима короткого замыкания можно объяснить следующим. Как было изложено выше, первичные обмотки являются магнитосвязанными цепями через магнитопровод, и поэтому в обмотке фазы с обрывом возбуждается электродвижущая сила (ЭДС) взаимной индукции, равная фазному напряжению. Т.е. при данной схеме подключения обмоток между двумя первичными обмотками, сохранившими питание, и первичной обмоткой в фазе с обрывом имеется трансформаторная связь с коэффициентом трансформации, равным единице. Поэтому, при закорачивании в фазе с обрывом первичной обмотки трансформатора, в ней начинает протекать значительный ток, который, трансформируясь в другие первичные обмотки, вызывает в цепи источника питания ток такой же величины, т.е. возникает режим короткого замыкания.

Если нейтраль трансформатора изолирована:

- ФР невозможен;
- трансформатор работает в несимметричном режиме по напряжению;
- диаграмма напряжений на обмотке ВН искажена по величинам и углам;
- фазные углы линейных и фазных напряжений различны;
- по величине одно из линейных напряжений равно линейному напряжению источника, значения других напряжений при равномерном распределении нагрузки по фазам меньше соответствующего рабочего напряжения ($U_{\text{раб.л}}$);
- при неравномерном распределении нагрузки возможно повышение фазного напряжения в одной из обмоток до $U_{\text{л}}$ источника.

Показания приборов при равномерной нагрузке будут следующими:

на стороне 220–110 кВ:

- линейные напряжения по фазам – 1; 0,58; 0,58 $U_{\text{раб.л}}$ источника;
- фазные напряжения – 1; 1; 0;
- напряжение на открытом треугольнике – 1 от $U_{\text{ф}}$;

на стороне 6–10 кВ:

- линейные напряжения по фазам – 0,88; 0,88; 0,33 $U_{\text{раб.л}}$;
- фазные напряжения приблизительно – 0,37; 0,37; 0,66 $U_{\text{раб.л}}$.

Обрыв двух фаз без замыкания на землю.

Рассмотрим 2 режима:

- а) *нейтраль трансформатора заземлена* (табл. 1, схема 8);
- б) *нейтраль трансформатора изолирована* (табл. 1, схема 7).

В первом режиме:

- ФР невозможен;
- происходит искажение линейных и фазных напряжений, но величина их не превышает рабочего уровня независимо от неравномерности распределения нагрузки по фазам;
- каждая фаза трансформатора работает независимо, поэтому распределение напряжения по обмоткам будет следующее:
 - в фазе, подключённой к источнику питания, сохраняется нормальное фазное напряжение независимо от величины нагрузки;
 - соотношение величин напряжения в двух других фазах зависит от распределения нагрузки по оставшимся фазам. При этом сумма напряжений равна фазному рабочему напряжению.

Показания приборов при этом:

на стороне ВН 220 (110) кВ:

- линейные напряжения по фазам – $1.5; 0; 1.5 U_{\text{раб.ф}}$;
- фазные напряжений по фазам – $1; 0.5; 0.5 U_{\text{раб.ф}}$;
- напряжение на открытом треугольнике – $2U_{\text{ф}}$;

на стороне НН 6 (10) кВ:

- линейные напряжения по фазам – $1; 0.5; 0.5 U_{\text{раб.л}}$;
- фазные напряжения по фазам: – $0.5; 0.5; 0 U_{\text{раб.ф}}$;

Во втором режиме:

- возможно появление ФР;
- при отсутствии ФР при обрыве двух фаз падение напряжения на обмотках трансформатора отсутствует. (т.е. на фазах и нейтрали, а также на изоляции и всех конструкциях трансформатора имеется потенциал, равный фазному напряжению). Напряжение у потребителей будет отсутствовать, поэтому данный режим может создать иллюзию отсутствия напряжения на подстанционном оборудовании.

Показания приборов при этом зафиксируют следующее:

на стороне ВН 220(110) кВ – равенство нулю всех линейных напряжений; все фазные напряжения за счёт гальванических связей будут равны значению фазного напряжения источника; на открытом треугольнике значение напряжения – $3U_{\text{ф}}$;

на стороне НН 6(10) кВ – равенство нулю всех линейных и фазных напряжений.

Обрыв двух фаз с заземлением на землю одной из фаз.

Рассмотрим 2 режима:

- а) *нейтраль трансформатора заземлена* (табл. 1, схема 6);
- б) *нейтраль трансформатора изолирована* (табл.1, схема 5).

В первом режиме:

- в работающей фазе сохранится нормальное фазное напряжение независимо от величины нагрузки;

- в фазе с обрывом и замыканием на землю напряжение будет равно нулю;
- в другой фазе с обрывом напряжение будет равно фазному, как и в рабочей фазе.

У потребителей (на стороне 0,4 кВ) в двух фазах $U_{\text{ф}}$ на электроприемниках будет равно номинальному, в третьей – равно нулю. Одно из линейных напряжений будет равно $2U_{\text{ф}}$ (т.е. на 15 % выше номинального), другие равны $U_{\text{ф}}$, что опасно для трёхфазных электроприёмников, чувствительных к нарушению симметрии напряжений и не имеющих защиту от несимметричных режимов.

Показания приборов при равномерной нагрузке будут следующие:

на стороне ВН 220 (110) кВ:

- линейные напряжения – $2,0; 1,0; 1,0 U_{\text{раб.ф}}$;
- фазные напряжения – $1,0; 1,0; 0 U_{\text{раб.ф}}$;

на стороне НН 6 (10) кВ:

- линейные напряжения – $1,0; 0; 1,0 U_{\text{раб.л}}$;
- фазные напряжения – $0.5; 0.5; 0 U_{\text{раб.ф}}$;

Во втором режиме:

- при отсутствии нагрузки и наличии ёмкости, присоединённой к обмотке трансформатора в фазах с обрывом, возможен ФР;

- трансформатор работает в несимметричном режиме, как в однофазном варианте, т.е. сдвиг углов между фазными и линейными напряжениями равен либо 0° , либо 180° ;

- распределение величин напряжений по обмоткам зависит от распределения нагрузки, но значения линейных и фазных напряжений при отсутствии ФР не превышают фазного напряжения источника.

Обрыв двух фаз с замыканием их на землю. Рассмотрим 2 режима:

- а) *нейтраль трансформатора заземлена* (табл. 1, схема 10);
- б) *нейтраль трансформатора изолирована* (табл. 1, схема 9).

В первом режиме обрыв двух фаз с их замыканием на землю аналогичен обрыву одной фазы с ее замыканием на землю при ЗН трансформатора.

Во втором режиме:

- феррорезонанс в данном случае невозможен;
- трансформатор работает в несимметричном режиме, как однофазный, т.е. сдвиг углов между фазными и линейными напряжениями равен 0° или 180° ;
- распределение величин напряжений по обмоткам зависит от распределения нагрузки, но значения линейных и фазных напряжений не превышают фазного напряжения источника.

На основании анализа рассмотренных выше вариантов НПФР с изолированной и заземлённой нейтралью (табл. 1) и опыта эксплуатации электрических сетей 220-110 кВ можно отметить следующие преимущества режима с заземленной нейтралью при НПФР:

- отсутствует опасность возникновения ФР;
- не происходит повышение напряжения выше номинального, и, как следствие, отсутствует возможность повреждения подстанционного оборудования и электроприёмников потребителей;
- уменьшается опасность повреждения двигателей и чувствительных к понижению напряжения электроприёмников, у которых отсутствует защита минимального напряжения;
- отсутствует опасность появления напряжения обратной последовательности и, как следствие, обратного хода трёхфазных двигателей;
- при обрыве одной из фаз без замыкания на землю сохраняется нормальное рабочее напряжение на оборудовании и у потребителей, поэтому данный вид НПФР для оборудования и потребителей не опасен; при этом существует опасность перегрузки трансформатора и, кроме того, на стороне 6(10)–35 кВ возможна кратковременная параллельная работа трансформатора, работающего в НПФР, с трансформаторами, работающими в нормальном режиме;
- при обрыве одной или двух фаз с замыканием на землю, будут работать токовые защиты и такой режим ликвидируется автоматически;
- снижается вероятность повреждения ТН.

В заключение отметим общие признаки НПФР, регистрируемые по измерительным приборам, на которые надо ориентироваться для обнаружения и ликвидации НПФР при отсутствии автоматики.

При работе силового трансформатора под нагрузкой:

- отсутствует повышение линейных или фазных напряжений выше номинальных значений на оборудовании;
- нарушается симметрия линейных и фазных напряжений на стороне высокого напряжения (первичной стороне);
- нарушается симметрия линейных напряжений на стороне НН (при этом происходит также нарушение симметрии фазных напряжений, но это нехарактерный признак, т.к. нарушение симметрии фазных напряжений возможно при замыкании на землю в сети НН).

НПФР при работе силового трансформатора с ИН в режиме холостого хода могут сопровождаться развитием ФР (при этом основными признаками феррорезонансных процессов являются: повышение величин линейных или фазных напряжений выше номинального; нарушение симметрии напряжений; нестационарное значение напряжений – показания приборов плавают, стрелки колеблются и дрожат).

Для повышения надежности в определении НПФР, например, для исключения возможности ошибки из-за отказов в цепях измерительных трансформаторов, желательно производить сопоставление результатов измерений от ТН, включенных на разные напряжения, или параллельно работающих ТН, ТСН или других источников информации.

Отметим действия персонала при ликвидации НПФР:

1. При обнаружении НПФР по характерным признакам с целью предупреждения возможных повреждений электроустановок необходимо в кратчайший срок восстановить нормальный режим электропитания.
2. Произвести немедленный перевод потребителей на резервный источник питания, временно погасить электроустановку для восстановления нормального режима.
3. В процессе ликвидации НПФР запрещено включать на параллельную работу трансформаторы и производить операции с разъединителем в нейтрали трансформатора.
4. При обнаружении повышения напряжения выше номинального необходимо произвести немедленное отключение участка сети и оборудования района там, где оно возникло.

Заключение

1. При работе отпаечных подстанций с изолированной нейтралью в случае возникновения НПФР возможны массовые повреждения электроприёмников потребителей, а также повреждение подстанционного оборудования.
2. Для обнаружения и ликвидации НПФР необходимы разработка и применение специального вида автоматики.
3. Для уменьшения ущерба от последствий при возникновении НПФР необходимо на отпаечных подстанциях применять режим работы трансформаторов с заземленной нейтралью.
4. При режиме с заземленной нейтралью упрощаются действия оперативного персонала, направленные на ликвидацию НПФР.
5. При всех видах НПФР трансформатора, работающего с изолированной нейтралью на тупиковых подстанциях, на нейтрали обмоток ВН появляется напряжение, которое может достигать значения фазного напряжения источника.

Список литературы

1. **Безопасность** России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Энергетическая безопасность. (Проблемы функционирования и развития электроэнергетики). – М.: МГФ «Знание», 2001.
2. **Лосев С.Б., Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. **Гогичайшвили П.Ф.** Подстанции без выключателей на стороне высшего напряжения. – М.: Высш. шк., 1965.
4. **Методические** указания по применению неполнофазных режимов работы основного электрооборудования электроустановок 330–1150 кВ.– М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
5. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Электрические цепи. Т. 2. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2001.
6. **Моделирование** энергетических систем при решении задач несимметричных режимов / А.А. Рагозин, М.Ш. Мисриханов, В.А. Попов и др. // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова.– Иваново, 2001.
7. **Авербух А.М.** Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий.– Л.: Энергия, 1979.
8. **Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д.** Метод симметричных составляющих.– М.: ОНТИ, 1936.
9. **Методика** расчета установившихся неполнофазных режимов оборудования 110 кВ и выше в электрических системах / М.Ш. Мисриханов, А.А. Рагозин, В.А. Попов, Е.И. Кушкова // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – Иваново, 2001.