

Технология надёжной защиты электрооборудования с использованием коммутируемого низкоомного резистора в сети 35 кВ нефтеперерабатывающего предприятия

ВАЛОВ В. Н.; valov111@mail.ru

Новосибирский государственный университет
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

СОЛОВЫХ С. В.; Sergei.Solovyh@lukoil.com

ДЕРНОВ А. И.; Anton.Dernov@lukoil.com

КОЛУПАЕВ М. В.; Mikhail.Kolupaev@lukoil.com

Пермское региональное управление ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ»
614068, г. Пермь, ул. Ленина, 77



В. Н. Валов



С. В. Соловых



А. И. Дернов



М. В. Колупаев

Приведены результаты комплексной работы по исследованию, выбору и реализации режима заземления нейтрали в схеме электроснабжения сети ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» напряжением 35 кВ. Главная задача исследования — поиск оптимального способа ограничения перенапряжений при однофазных замыканиях на землю, их селективное выявление и быстрая ликвидация в кабельной сети для исключения междофазных коротких замыканий, повреждений оборудования и нарушений снабжения технологических потребителей. Особенностью сети 35 кВ, обеспечивающей питание всех технологических потребителей предприятия, является связь между тремя центрами питания — ПС 110 кВ «Устиново», ПС 110 кВ «Комплекс» и газотурбинной электростанции ГТУ–ТЭС с выдачей мощности на понижающие подстанции 35/6 кВ.

Ключевые слова: режим заземления нейтрали, комбинированное заземление нейтрали, низкоомный коммутируемый резистор, перенапряжения, селективное определение ОЗЗ.

В рамках строительства электростанции собственных нужд нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» в г. Пермь и ввода её в эксплуатацию в октябре 2015 г. возникла потребность полностью реконструировать распределительную кабельную сеть 35 кВ завода: увеличить её протяжённость более чем в 9 раз и использовать кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Общая протяжённость электрически связанной заводской распределительной кабельной сети 35 кВ составила 90,33 км, при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) в сети возникает ёмкостный ток до 441,48 А.

Когда электроснабжение завода проводилось от ТЭС-9, компенсация ёмкостных токов осуществлялась со стороны ТЭС, но после строительства собственного энергоцентра, задачи компенсации ёмкостного тока, защиты оборудования от перенапряжений в распределительной кабельной сети

35 кВ и селективного быстрого выявления ОЗЗ требовали современных решений.

Особенности сети 35 кВ ГТУ–ТЭС

Сеть 35 кВ электростанции собственных нужд ГТУ–ТЭС состоит из четырёх секций шин (1-1СШ, 1-2СШ, 2-1СШ, 2-2СШ). К секциям шин подключено 8 турбогенераторов по 25 МВт каждый напряжением 10,5 кВ с блочными повышающими трансформаторами типа ТРДНС-40000-35/10/10 мощностью 40 МВА. Обмотки блочного трансформатора высокого напряжения соединены по схеме «звезда» с выведенной нейтралью, к нейтралю подключён дугогасящий реактор (ДГР) типа РДМКУ-1520/35-У1. В нормальном режиме эксплуатируются шесть генераторов, один генератор — в ремонте, один — в резерве.

От секций шин 35 кВ ГТУ–ТЭС питаются десять ЦРП 35/6 кВ. Существует электрическая связь ГТУ–ТЭС с двумя подстанциями 110/35/6 кВ — ПС

«Комплекс» и ПС «Устиново» (ПС «Устиново-2»).

Для эксплуатации электростанции собственных нужд разработаны три схемы выдачи мощности — 4-1, 4-2 и 4-3. Схемы отличаются положением секционных и шиносоединительных выключателей 35 кВ ГТУ–ТЭС, а также положением выключателей 110 кВ на ПС «Комплекс» и ПС «Устиново» (рис. 1). Нормальная схема выдачи мощности — схема 4-3, по которой секции 1-1СШ и 2-1СШ, 1-2СШ и 2-2СШ работают попарно совместно. Параллельная работа ГТУ–ТЭС с сетью 110 кВ Пермской энергосистемы осуществляется через ПС «Комплекс» и ПС «Устиново».

Вследствие стадийности реализации инвестиционной программы по созданию собственного энергоцентра, после ввода ГТУ–ТЭС наступил промежуточный период эксплуатации электрической кабельной сети 35 кВ — только с компенсацией ёмкостных токов, который выявил множество проблем. Одна из них — большой разброс величины тока замыкания на землю — от 80 до 441,48 А при разных схемах выдачи мощности ГТУ–ТЭС. Вследствие чего возникает сложность настройки полной компенсации ёмкостных токов для ДГР, так как автоматика каждого из восьми ДГР не «видит» автоматику других ДГР. Кроме того, при разных схемах выдачи мощности ДГР могут быть установлены на разных системах и секциях шин. Длинные дуговые перекрытия изоляции и высокие кратности перенапряжения провоцируют переход однофазных замыканий в многоместные повреждения и отключение нескольких фидеров даже при полной компенсации ёмкостных токов. Поиск места замыкания на землю в сети сопровождается большими временными затратами, так как имеющиеся защиты от ОЗЗ без дополнительных мероприятий неспособны селективно определять повреждённое присоединение.

Как итог перечисленных проблем, любое ОЗЗ в электрической сети 35 кВ завода приводило к серьёзным повреждениям дорогостоящего электрооборудования и отключению технологических установок (даже к полной остановке технологических процессов нефтепереработки), что сопровождалось значительными финансовыми потерями, как от упущенной выгоды, так и от необходимости повторной подготовки и запуска технологических процессов.

Результаты расчётных исследований

С целью оценки максимально возможных кратностей перенапряжений при дуговом ОЗЗ выполнено компьютерное моделирование переходных процессов с помощью программного комплекса МАЭС (предназначенного для расчёта электромагнитных пере-

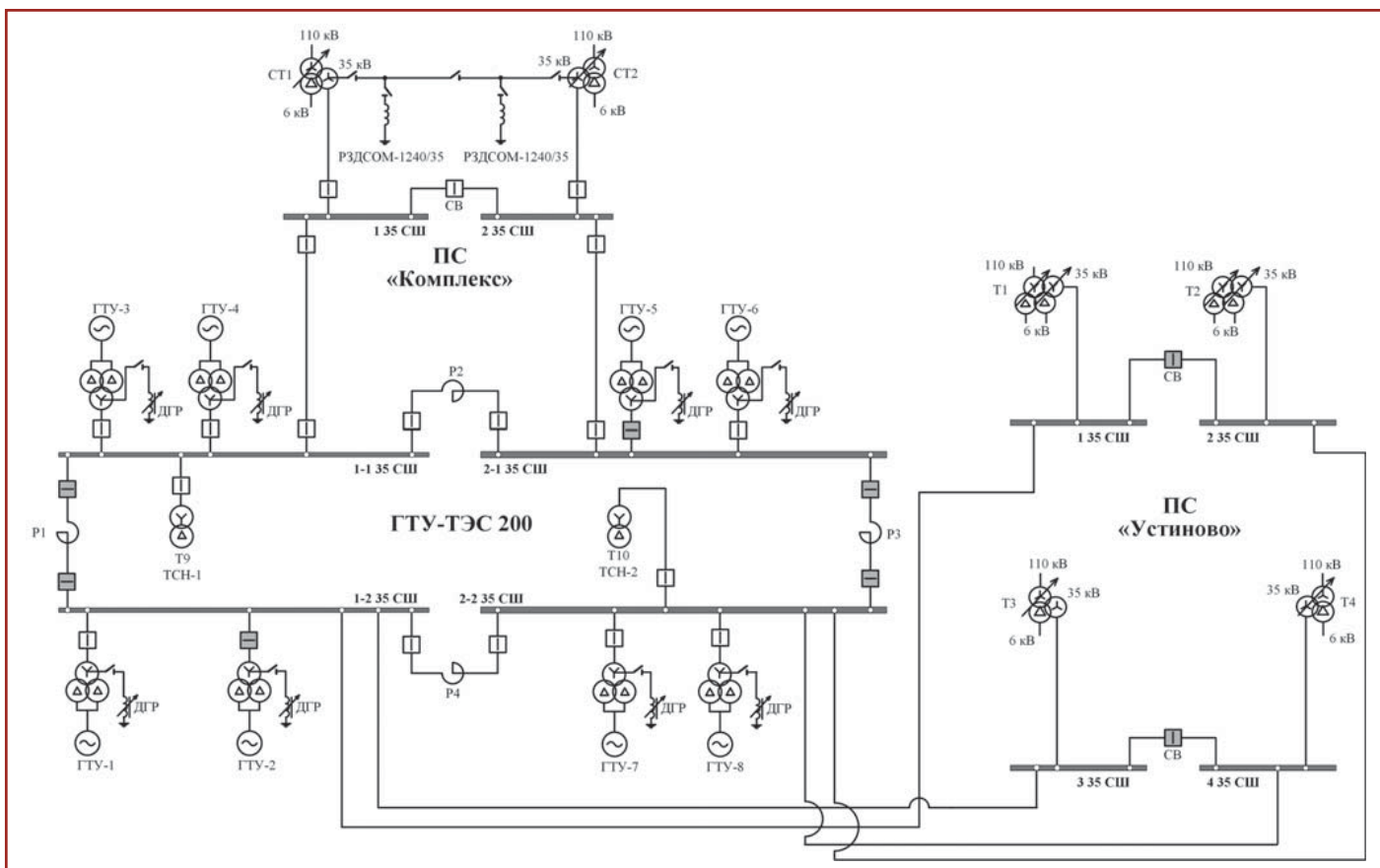


Рис. 1. Упрощённая схема сети 35 кВ электростанции собственных нужд ГТУ-ТЭС

ходных процессов в электроэнергетических схемах). В качестве расчётного принят наиболее «тяжёлый» с точки зрения расстройки компенсации режим, который может возникнуть в рассматриваемой сети 35 кВ при отключении присоединения с наибольшим ёмкостным током. Правомерность такого допущения определяется результатами накопленного опыта в сфере анализа измеренных уровней перенапряжений в сетях с различной степенью расстройки компенсации. Аварийное событие (ОЗЗ через перемежающуюся дугу) моделируется в разных точках сети: на шинах, на короткой КЛ, в наиболее удалённой точке от центра питания, результаты расчётов переходных процессов при дуговом ОЗЗ приведены для наихудшего режима (с наиболее высокими кратностями перенапряжений) в табл. 1.

Комбинированное заземление нейтрали сети

Расчёты переходных процессов при дуговых ОЗЗ в сети 35 кВ с нейтралью, заземлённой через ДГР, показали необходимость снижения кратностей перенапряжений. В связи с чем рассмотрен вариант установки высокоомных резисторов в нейтраль силовых трансформаторов. Включение резистора параллельно ДГР позволяет:

- ограничить перенапряжения при однофазных дуговых замыканиях на землю;
- исключить переходы однофазных замыканий на землю в двойные/многочесные короткие замыкания (КЗ).

Расчёты переходных процессов в сети 35 кВ для разных режимов эксплуатации показали, что эффективно снизить перенапряжения при дуговых ОЗЗ до уровня первого пробоя, не превышающего $(2,4 - 2,6)U_{ф\max}$, ($U_{ф\max}$ — амплитуда наибольшего рабо-

чего фазного напряжения, в расчётах для сети 35 кВ — 28,58 кВ), возможно путём заземления нейтрали 1-1СШ и 2-1СШ сети 35 кВ через резистор сопротивлением не более 1200 Ом, а нейтрали 1-2СШ и 2-2СШ сети 35 кВ — не более 600 Ом.

Технически оправдано рассмотреть рассредоточенное распределение (подключение) резисторов в сети, а именно установить резисторы в нейтраль трансформаторов на нескольких питающих подстанциях.

Выбор низкоомного коммутируемого резистора

Рассмотренный вариант заземления нейтрали сети 35 кВ ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» через высокоомные резисторы позволяет ограничить перенапряжения при дуговых ОЗЗ до уровня не более $2,5U_{ф\max}$ [1] в режимах максимально возможной раскомпенсации ёмкостного тока, а также для демпфирования возможных резонансных явлений. Однако выбор номиналов резисторов, подключаемых к нейтрали сети 35 кВ, должен учитывать решение задачи селективной и чувствительной работы релейной защиты на линиях 35 кВ. Реализация комбинированного режима заземления нейтрали сети 35 кВ не позволяет организовать селективную релейную защиту от ОЗЗ на протяжённых присоединениях, в том

Таблица 1

Результаты расчётов кратности перенапряжений при дуговых ОЗЗ в сети 35 кВ ГТУ-ТЭС

Наименование сети	Степень раскомпенсации, %	Кратность перенапряжений при дуговых ОЗЗ, отн. ед.
1-1СШ + 2-1СШ (схема 4-3)	19,5	3,21
1-2СШ + 2-2СШ (схема 4-3)	26,2	3,29
1-1СШ + 2-1СШ + 1-2СШ + 2-2СШ (схемы 4-1, 4-2)	14,5	3,14

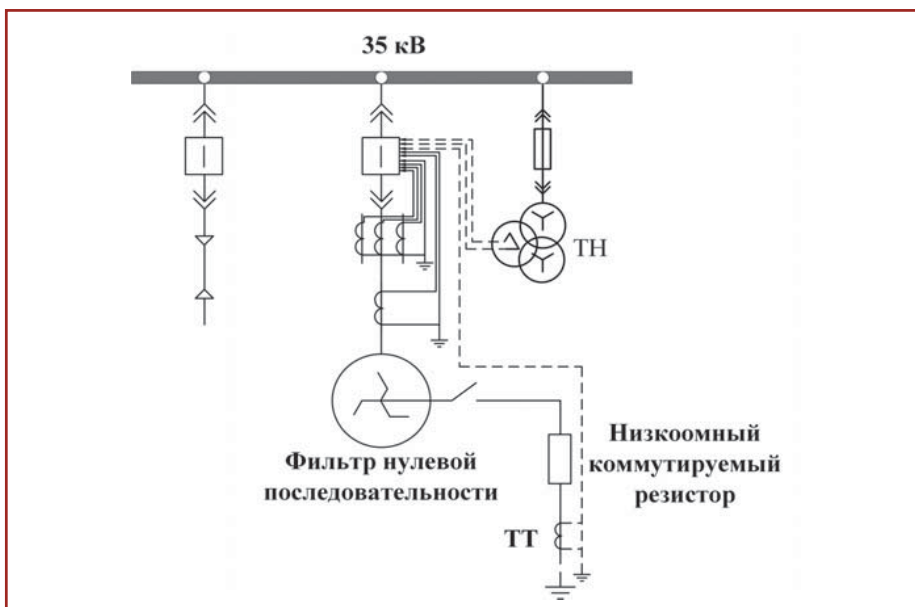


Рис. 2. Подключение низкоомного коммутируемого резистора к шинам 35 кВ

числе линиях связи между ГТУ-ТЭС и ПС «Комплекс», ГТУ-ТЭС и ПС «Устиново».

В сложившейся ситуации принято следующее техническое решение: кратковременное подключение к нейтрали сети 35 кВ ГТУ-ТЭС резистора с низким номинальным сопротивлением и током, достаточным для организации селективной релейной защиты от ОЗЗ. Предложенное решение для сети 35 кВ объединит достоинства комбинированного и низкоомного режимов заземления нейтрали.

Релейная защита в ЗРУ-35 кВ ГТУ-ТЭС реализована на микропроцессорных терминалах производства General Electric. Проанализировав состав функций защит от ОЗЗ данных терминалов (ненаправленная токовая защита нулевой последовательности, направленная токовая защита нулевой последовательности, направленная защита по мощности нулевой последовательности — ваттметрическая), принято решение использовать токовую ненаправленную

защиту нулевой последовательности, ввиду того, что только данная функция имела во всех терминалах релейной защиты. Обеспечить требуемую чувствительность ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ (коэффициент чувствительности не менее 1,25 согласно [2]) на всех присоединениях 35 кВ (определяющими будут протяжённые линии 35 кВ между ГТУ-ТЭС и ПС «Комплекс», ГТУ-ТЭС и ПС «Устиново», каждая из которых имеет собственный ёмкостный ток от 28,2 А до 55,9 А) с помощью микропроцессорных защит можно при активном токе не менее 126 А [3]. Предварительная оценка свидетельствует о необходимости подключения резистора сопротивлением не более 150 Ом для каждой из двух частей сети 35 кВ по схеме 4-3, а также в полной схеме 4-1 (4-2). Ненаправленную токовую защиту от ОЗЗ рекомендуется выполнить с пуском по напряжению нулевой последовательности $3U_0$.

Таблица 2

Рекомендуемое к установке оборудование для заземления нейтрали сети 35 кВ с местами его размещения на подстанциях «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»

Наименование	Место установки, тип, число штук		
	ГТУ-ТЭС	ПС «Комплекс»	ПС «Устиново»
Высокоомный резистор	Нейтраль 35 кВ ТСН-1 (Т-9) и ТСН-2 (Т-10)	Нейтраль 35 кВ силовых трансформаторов СТ1 и СТ2	Нейтраль 35 кВ силовых трансформаторов Т3 и Т4
	РЗ-6000-68-35	РЗ-6000-68-35	РЗ-6000-68-35
	2	2	2
Низкоомный резистор	В ячейки 8, 46	Дополнительной установки не требуется	
	РКЭ1-150		
Нейтрале-образующий трансформатор	В резервные ячейки 8, 46	Дополнительной установки не требуется	
	ФЗМ-1250/35		
	2		

Автоматика коммутируемого низкоомного резистора

Подключение низкоомного резистора к шинам 35 кВ (рис. 2) происходит по факту появления напряжения $3U_0$ выше заданной уставки в 15 В с выдержкой времени 0,1 с. Отключение резистора — реализованной по факту протекания тока величиной 90 А через трансформатор тока, установленный в цепи заземления нейтрали с выдержкой времени 1 с. Повторное включение резистора возможно только после исчезновения напряжения $3U_0$ через 12 с (время готовности привода). Дополнительно реализовано автоматическое отключение резистора через 2 с по факту включения выключателя, запуск выдержки времени на отключение проводится при появлении сигнала с реле повторного включения (РПВ).

Реализованный способ заземления нейтрали

После расчёта уставок РЗА и подтверждения правильного выбора номинального сопротивления низкоомного коммутируемого резистора возникла необходимость коррекции технического решения по выбору номиналов высокоомных резисторов для снижения массогабаритных и стоимостных показателей (в связи с ограничением по габаритам). При включении низкоомного резистора в режиме ОЗЗ уровень перенапряжений при дугowych ОЗЗ будет ниже.

Повторно были выполнены расчёты переходных процессов при дугowych ОЗЗ в сети 35 кВ с учётом подключения в каждой части схемы эквивалентного сопротивления 2000 Ом. Использование резисторов такого сопротивления обеспечит надёжное демпфирование высокочастотных колебаний. Уровень ограничения перенапряжений при дугowych ОЗЗ не превысит $2,84U_{фмакс}$. Повышение расчётного уровня ограниченных перенапряжений до $2,84U_{фмакс}$, т. е. на 9 – 18 % относительно $(2,4 - 2,6) U_{фмакс}$ практически не повлияет на ресурс изоляции. С другой стороны, данное решение приведёт к снижению массогабаритных показателей подключаемых высокоомных резисторов, которое оценивается как очень существенное (не менее чем на 25 %). Кратковременное подключение низкоомного резистора к секциям шин 35 кВ в режиме ОЗЗ снизит уровень перенапряжений при дугowych ОЗЗ на 20 % — с $2,84U_{фмакс}$ до $2,4U_{фмакс}$. В табл. 2 представлено рекомендуемое к установке оборудование для заземления нейтрали сети 35 кВ с местами его размещения. Реализованный вариант подключения высокоомных и низкоомных резисторов к нейтрали сети 35 кВ при рассредоточенном размещении оборудования по трём центрам питания показан на рис. 3.

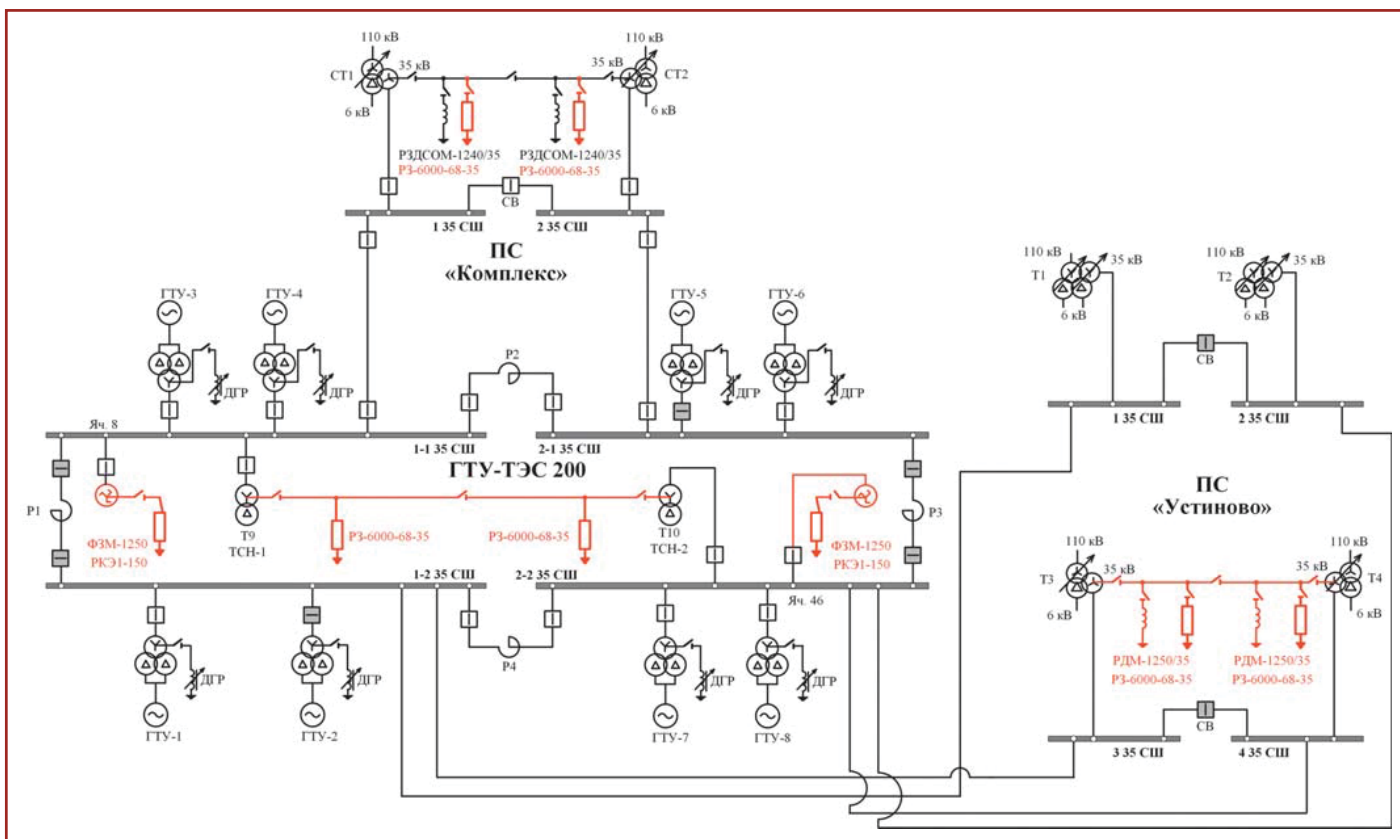


Рис. 3. Схема размещения оборудования для заземления нейтрали в сети 35 кВ

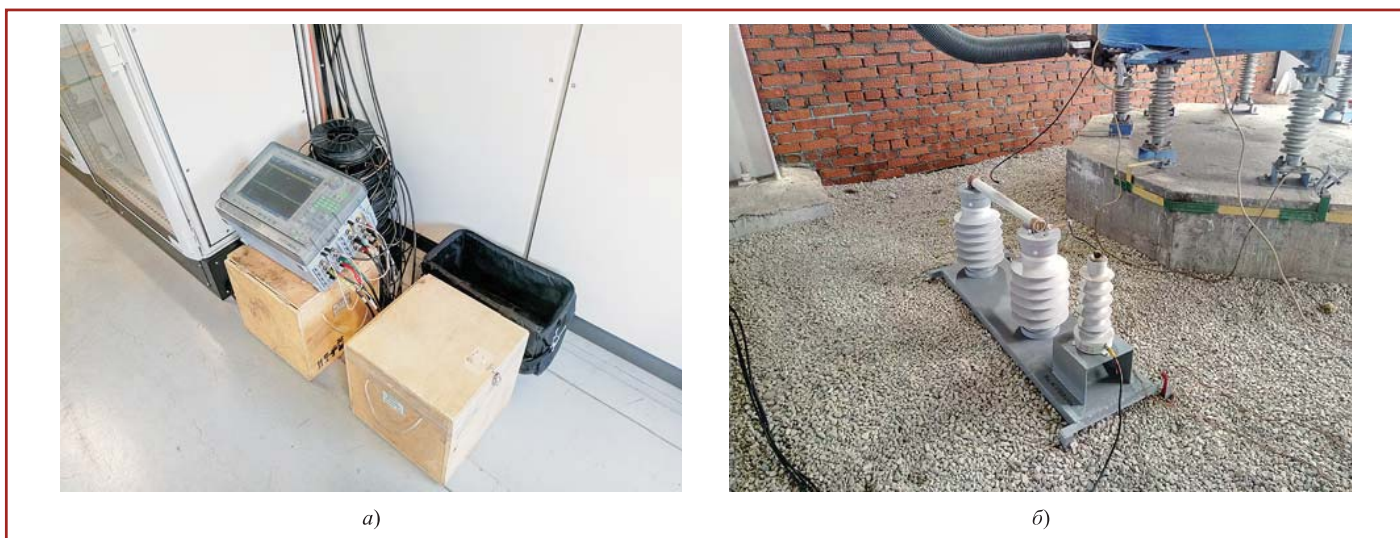


Рис. 4. Система мониторинга переходных процессов при ОЗЗ в электрической сети 35 кВ:

а — высокочастотный цифровой осциллограф; б — ёмкостной делитель напряжения

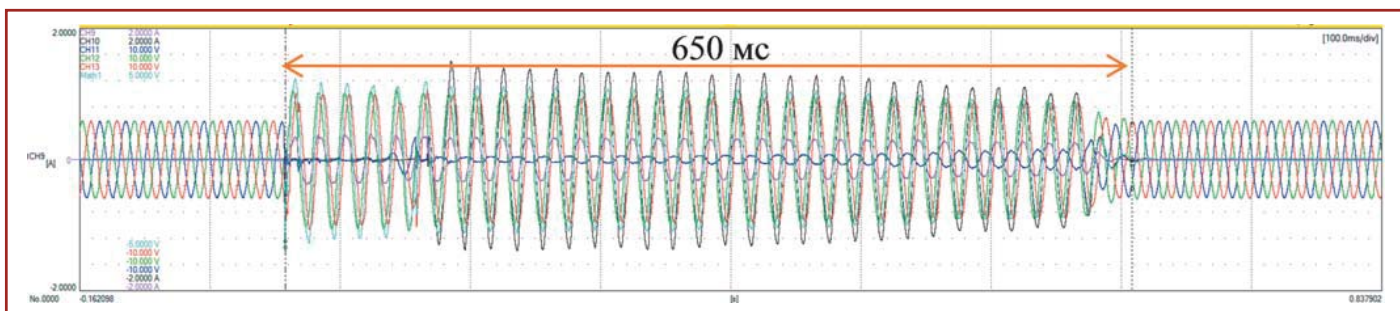


Рис. 5. Осциллограмма ОЗЗ, зафиксированная системой мониторинга, на кабельной линии ГТУ-ТЭС – ЦРП-6, цепь 1

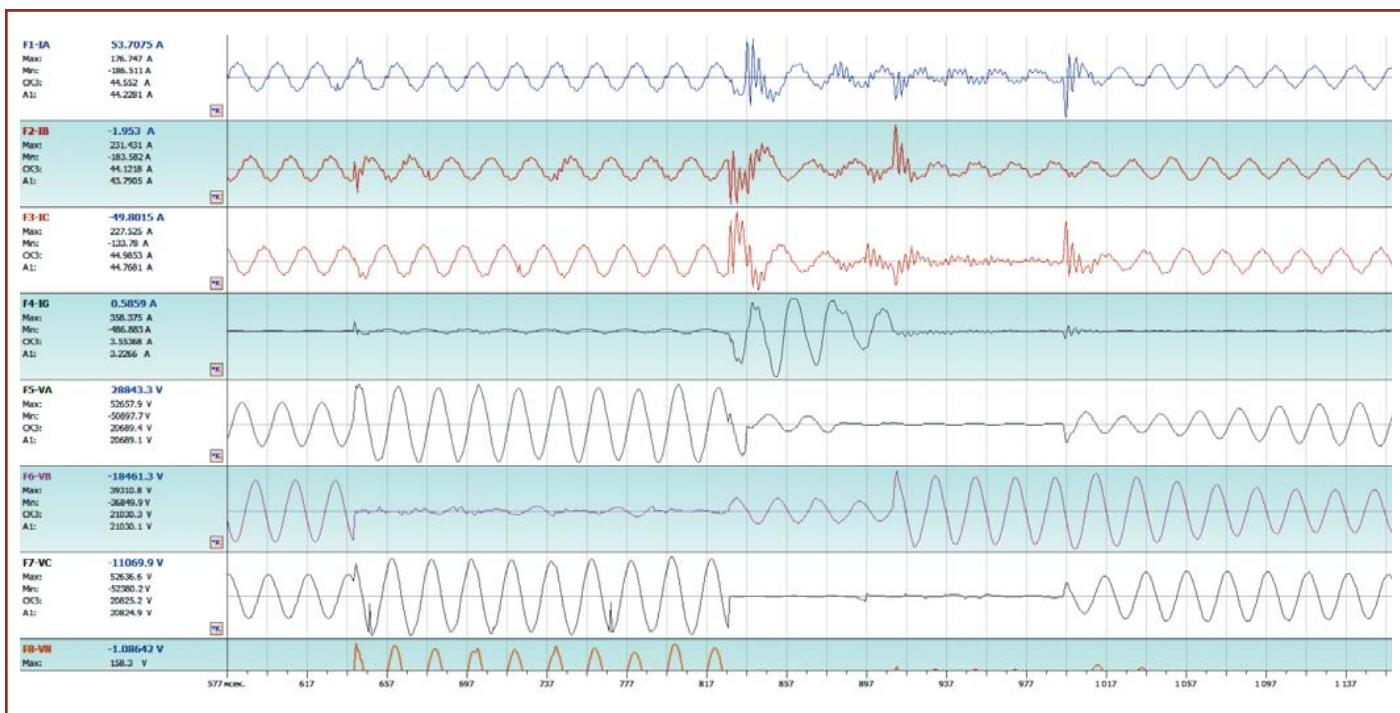


Рис. 6. Осциллограмма токов подпитки при трёхфазном КЗ

Система мониторинга переходных процессов при ОЗЗ

После ввода в эксплуатацию комбинированного заземления нейтрали совместно с коммутируемым низкоомным резистором для определения степени выполнения задач и достижения поставленных при проектировании целей на ГТУ–ТЭС в июне 2018 г. была установлена система мониторинга переходных процессов при ОЗЗ в электрической сети 35 кВ (рис. 4).

Система мониторинга включала в себя фиксацию величин перенапряжений при ОЗЗ с помощью высоковольтных ёмкостных делителей напряжений (рис. 4, б). Фиксация токораспределения по всему оборудованию системы заземления нейтрали осуществлялась с помощью токовых клещей, установленных на вторичных цепях трансформаторов тока.

Пятого июня 2018 г. в сети 35 кВ ГТУ–ТЭС ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» системой мониторинга зафиксировано ОЗЗ на КЛ ГТУ–ТЭС — ЦРП-6, цепь 1 длительностью 650 мс (рис. 5). Включение присоединения с низкоомным коммутируемым резистором произошло через 111 мс после возникновения ОЗЗ (соответствует уставке по времени на включение резистора). Время отключения релейной защиты присоединения с ОЗЗ яч. 10 ГТУ–ТЭС — ЦРП-6, цепь 1 составило 540 мс (соответствует уставке по времени).

Количество пробоев изоляции за время существования ОЗЗ — 3 шт. Первый — в момент возникновения ОЗЗ, второй — через 101 мс во время попытки восстановления напряжения на повреждённой фазе, третий — ещё че-

рез 10 мс во время включения низкоомного коммутируемого резистора. Всё время, в течение которого низкоомный резистор был подключён к сети 35 кВ ГТУ–ТЭС, ток ОЗЗ носил устойчивый характер. Максимальный уровень перенапряжений зафиксирован при первом пробое $k_n = 2,12$ (k_n — коэффициент кратности перенапряжений). Остальное время существования ОЗЗ фазное напряжение на неповреждённых фазах находилось в диапазоне 37,15 – 38,18 кВ, что соответствует $k_n = 1,84 – 1,89$.

Опыт эксплуатации

В процессе эксплуатации комбинированного заземления нейтрали с коммутируемым низкоомным резистором возникло несколько проблем.

При «близких» двух–трёхфазных КЗ на шинах ГТУ–ТЭС возникают несимметричные токи подпитки от синхронной двигательной нагрузки по напряжению 6 кВ с последующей трансформацией токов на напряжение 35 кВ и создаются условия пуска для защит от ОЗЗ (рис. 6). Для отстройки от таких несимметричных режимов принято решение об увеличении времени задержки на срабатывание защит от ОЗЗ отходящих линий с 0,1 с до 0,5 с, на линиях связи и линиях энергоблоков — с 0,4 с до 0,75 с.

Принято решение уменьшить время задержки автоматического включения низкоомного коммутируемого резистора с 0,1 с до 20 мс, так как полное время включения в этом случае как раз будет составлять 0,1 с. Это позволит снизить уровни перенапряжений в сети 35 кВ при первых пробоях изоляции, тем самым уменьшив вероятность перехода ОЗЗ в двух–трёхфазные КЗ.

Выводы

1. Выбор режима заземления нейтрали в сети напряжением 35 кВ нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» определялся требованиями: защита оборудования от перенапряжений и селективное быстрое выявление ОЗЗ.

2. Реализованный вариант заземления нейтрали объединяет достоинства комбинированного и низкоомного режимов заземления нейтрали.

3. Анализ осциллограммы, полученной системой мониторинга переходных процессов при ОЗЗ в электрической сети 35 кВ ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», подтверждает, что поставленные цели работы по выбору режима заземления нейтрали достигнуты.

4. Даже после реализации проекта по изменению системы заземления нейтрали необходимо совместно со специалистами ПРУ ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» продолжать сбор информации по возникающим в сети 35 кВ ОЗЗ для повышения надёжности электроснабжения нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Standard 142–2007. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 2007.
2. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. — М.: Высшая школа, 1991. — 496 с.
3. Шалин А. И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Расчет уставок ненаправленных токовых защит // Новости электротехники. 2005. № 5 (35).