

Авторы:

Рычков А.В.,

Пермское региональное управление
ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ»,
г. Пермь, Россия,
Валов В.Н.,
ООО «Болид»,
г. Новосибирск, Россия.

РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ УЧАСТКОВ МЕЖСЕКЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ КРУЭ 35 КВ ГТУ-ТЭС-200 ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЗАЩИТЫ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

Аннотация: в статье изложены вопросы, связанные с повышением надежности работы защиты от замыканий на землю в сети с комбинированным заземлением нейтрали. На основе анализа случаев работы релейной защиты и автоматики (РЗА) разработан алгоритм работы защиты, исключающий влияние перемежающейся дуги на время действия защиты. Рассмотрен вопрос организации защиты участков межсекционных связей от замыканий на землю.

Ключевые слова: релейная защита, замыкание на землю, перемежающееся дуговое замыкание, защита межсекционных связей.



Рычков

Алексей Викторович

Дата рождения: 23.03.1989.

В 2011 г. окончил Пермский государственный технический университет (ПГТУ), кафедра «Микропроцессорные средства автоматизации». Инженер-электрик I категории ТЭС, ПРУ ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ».

Надежное и безаварийное электроснабжение абонентов нефтегазовой отрасли, в том числе нефтеперерабатывающих предприятий, является одной из ключевых задач Пермского регионального управления ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ».

При строительстве электростанции для собственных нужд ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» (ГТУ-ТЭС-200) с установленной мощностью 200 МВт и вводе ее в эксплуатацию в октябре 2015 г. была полностью модернизирована распределительная кабельная сеть 35 кВ завода, ее протяженность увеличена более чем в 9 раз. Новые линии передачи электроэнергии выполнены кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена. Общая протяженность электрически связанной заводской распределительной кабельной сети 35 кВ составила 90,33 км. Основным видом повреждений в данной сети являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Максимальный емкостной ток ОЗЗ составляет 441,5 А.

Система электроснабжения сети 35 кВ нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) получает питание от трех основных источников (рис. 1):

- шины 35 кВ ГТУ-ТЭС-200;
- шины 35 кВ ПС 110 кВ «Комплекс»;
- шины 35 кВ ПС 110 кВ «Устиново».

На ГТУ-ТЭС установлены 8 блоков «Генератор-Трансформатор» мощностью 25 МВт.

Комплектное распределительное устройство элегазовое (КРУЭ) 35 кВ ГТУ-ТЭС выполнено в виде двух секционированных систем шин, связанных межсекционными и шиносоединительными выключателями. Для ограничения токов короткого замыкания (КЗ) между секциями шин установлены токоограничивающие реакторы Р1-Р4 (типа РТСТГ-35-2500-2,03).

Сеть 35 кВ ГТУ-ТЭС связана с открытым распределительным устройством (ОРУ) 35 кВ ПС 110/35/6 кВ «Комплекс» по двум кабельным линиям (КЛ) 35 кВ. Электроснабжение сети 35 кВ ПС 110/35/6 кВ «Комплекс» осуществляется со стороны КРУЭ-35 ГТУ-ТЭС и со стороны 110 кВ через трехобмоточные трансформаторы Т1 и Т2 мощностью 63 МВА.

Сеть 35 кВ ГТУ-ТЭС также связана с комплектным распределительным устройством (КРУ) 35 кВ ПС 110/35/6 кВ «Устиново». От секций шин 35 кВ ГТУ-ТЭС отходит четыре КЛ 35 кВ. Электроснабжение сети 35 кВ ПС 110/35/6 кВ «Устиново» осуществляется со стороны КРУЭ-35 ГТУ-ТЭС и со стороны 110 кВ через четырехобмоточные (110/35/6/6 кВ) трансформаторы Т1 и Т2 мощностью 40 МВА и трехобмоточные трансформаторы Т3 и Т4 мощностью 16 МВА.

Для решения проблем, связанных с возникновением ОЗЗ в сети 35 кВ нефтеперерабатывающего предприятия, в 2016 г.

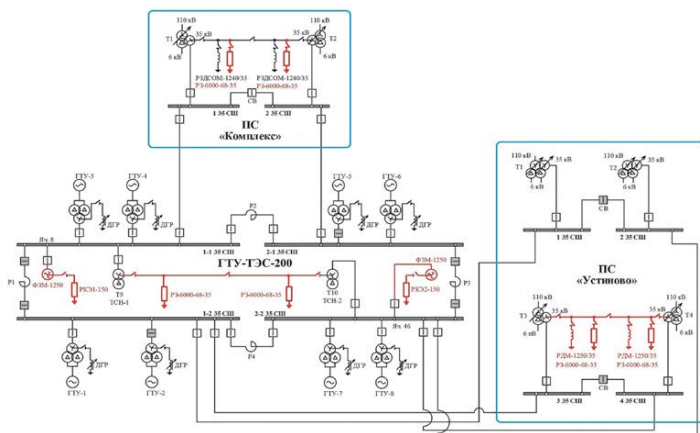


Рис. 1. Схема электроснабжения НПЗ

компанией ООО «Болид» был разработан проект по внедрению системы комбинированного заземления нейтрали в совокупности с кратковременно подключаемым низкоомным резистором и защитой от ОЗЗ. В декабре 2017 г. данное решение реализовано и введено в эксплуатацию. В основе данного режима заземления нейтрали сети лежит идея объединения режимов комбинированного и низкоомного заземления нейтрали с той особенностью, что подключение низкоомного резистора РКЭ1(2)-150 (рис. 1) в режиме ОЗЗ происходит кратковременно. Данное техническое решение позволяет сохранить все преимущества комбинированного режима нейтрали в части компенсации емкостного тока ОЗЗ и снижения кратности перенапряжений, гарантирует определение поврежденного присоединения в режиме ОЗЗ и обеспечивает безопасность персонала предприятия.

После выявления и отключения поврежденного присоединения низкоомный резистор отключается автоматически и схема возвращается в исходное положение: в нейтрали остаются всегда подключенные высокоомные резисторы (для уменьшения кратности перенапряжений, снижения напряжения смещения нейтрали и предотвращения возникновения феррорезонансных явлений), а также дугогасящие реакторы

(ДГР) для компенсации емкостного тока.

Для установленных на ГТУ-ТЭС-200 низкоомных резисторов РКЭ номинальным сопротивлением 150 Ом ток во время существования ОЗЗ составляет – 134,7 А. Для высокоомных резисторов РЗ номинальным сопротивлением 6000 Ом на ГТУ-ТЭС-200 (в нейтрали ТСН), на ПС «Комплекс» и ПС «Устиново» (в нейтрали силовых трансформаторов) – 3,4 А.

За первые два года эксплуатации системы комбинированного заземления нейтрали произошло восемь ОЗЗ, при которых РЗ на ГТУ-ТЭС-200 по активной составляющей тока от установленных резисторов в сети 35 кВ отключила поврежденные линии и предотвратила переход ОЗЗ в междуфазные КЗ. Провалов напряжения в сети 35 кВ, критичных для технологических установок, удалось избежать.

Также в процессе эксплуатации произошел один отказ защиты от ОЗЗ сети 35 кВ. В декабре 2018 г. произошло перемежающееся ОЗЗ на КЛ 35 кВ связи с ПС «Устиново» с последующим переходом в междуфазное КЗ. С момента возникновения ОЗЗ до отключения двухфазного КЗ действием дифференциальной защиты линии прошло 270 с, т.е. защита от ОЗЗ не отключила поврежденное присоединение.

Из осциллограммы ОЗЗ (рис. 2) видно, что через 108 мс после начала ОЗЗ в соответствии с заданным алгоритмом вклю-

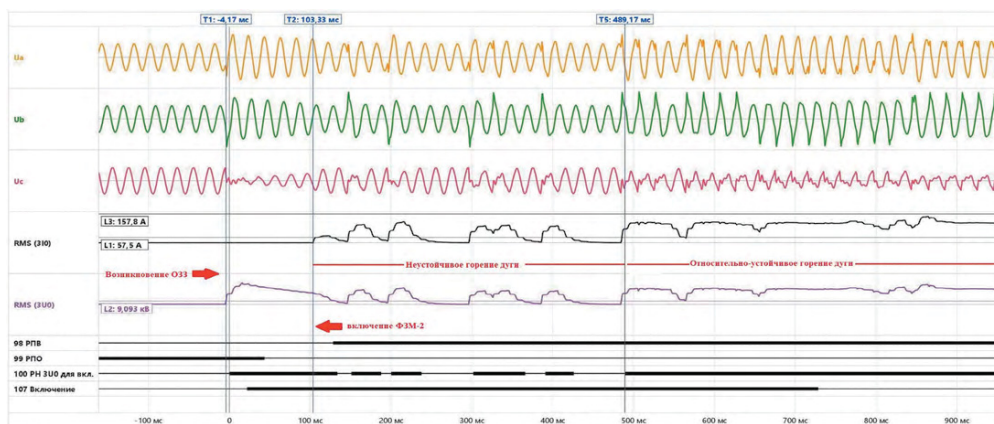


Рис. 2. Осциллограмма ОЗЗ (записано РЗА РКЭ2-150)



Валов

Владимир Николаевич

Дата рождения: 05.02.1993.

В 2010 г. окончил Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), кафедра «Электрические станции».

Инженер РЗА отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».

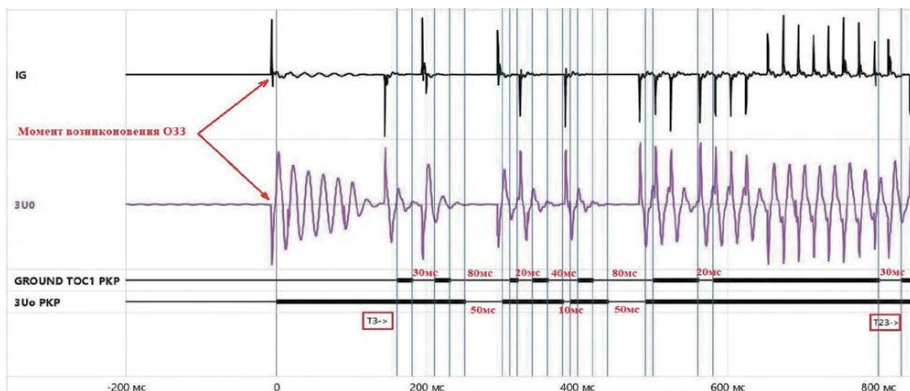


Рис. 3. Осциллограмма ОЗЗ (записано РЗА поврежденной КЛ 35 кВ)

чился выключатель нейтралеобразующего трансформатора ФЗМ, тем самым был подключен низкоомный резистор заземления нейтрали. После подключения резистора в течение 385 мс замыкание носило неустойчивый характер. За этот период дуга зажигалась и гасла 4-5 раз.

Ток нулевой последовательности поврежденной линии и напряжение нулевой последовательности имели прерывистый характер (рис. 3). Наблюдаются паузы длительностью 20-80 мс для $3I_0$ (I_G) и 10-50 мс для $3U_0$. Из-за наличия данных пауз таймеры элементов защиты от ОЗЗ КЛ 35 кВ ПС «Устиново» сбрасывались при снижении тока и напряжения нулевой последовательности ниже значений возврата и отсчет времени выдержки срабатывания ($t_{cp} = 750$ мс) начинался вновь. Проведенный анализ работы РЗА позволил сделать вывод, что для обеспечения срабатывания защиты при неустойчивых ОЗЗ требуется изменение существующей логики защиты.

По итогам изучения условий развития и результатов события на КЛ 35 кВ связи с ПС «Устиново» было предложено ввести выдержку времени на возврат для пусковых элементов (ПКР) защиты, реализованной в устройствах General Electric F35, F60 и L90. Это изменение позволяет удерживать таймер с выдержкой на срабатывание в моменты появления пауз в токе и на-



Рис. 4. Измененная логическая схема

пряжении нулевой последовательности (рис. 4). Предложенный вариант логики работы защиты от ОЗЗ прошел лабораторную (симуляционную) проверку током и напряжением аварийного режима на реальном устройстве РЗА с применением испытательного комплекса РЕТОМ-61. При данном ОЗЗ защита показала корректную работу.

Начиная с февраля 2019 г. ведутся работы по внедрению защит с новой логической схемой. В период с 2019 по 2020 г. в се-

ти 35 кВ на присоединениях с уже измененной логической схемой работы защиты произошло два ОЗЗ с неустойчивым характером. В обоих случаях паузы в токе нулевой последовательности были скомпенсированы введенной выдержкой времени на возврат элемента $3I_0$, тем самым обеспечено своевременное формирование сигнала на отключение выключателя.

Защита участков межсекционных связей КРУЭ 35 кВ ГТУ-ТЭС от ОЗЗ

В течение 2020 г. на ГТУ-ТЭС-200 имели место неоднократные повреждения изоляции Т-образных соединительных муфт DURESCA производства «MGC Moser-Glaser AG», сопровождающиеся замыканиями на землю на участках между секционными и шиносоединительными выключателями КРУЭ 35 кВ (рис. 1). В результате ОЗЗ было повреждено шесть Т-образных соединительных муфт и токоограничивающий реактор.

В ходе анализа осциллограмм ОЗЗ на участках межсекционных связей КРУЭ 35 кВ ГТУ-ТЭС за 2020 г. было выявлено два типовых варианта пробоя изоляции Т-образных муфт. Первый вариант характеризуется возникновением импульса емкостного тока сети в момент

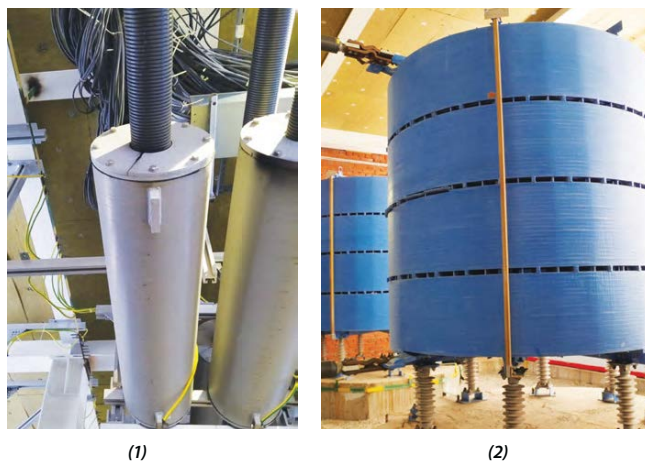


Рис. 5. Соединительная муфта (1) и токоограничивающий реактор (2)

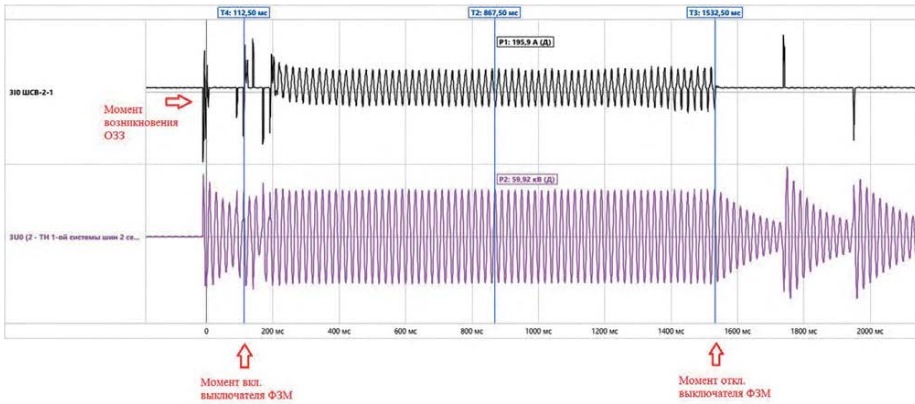


Рис. 6. Первый вариант развития ОЗЗ

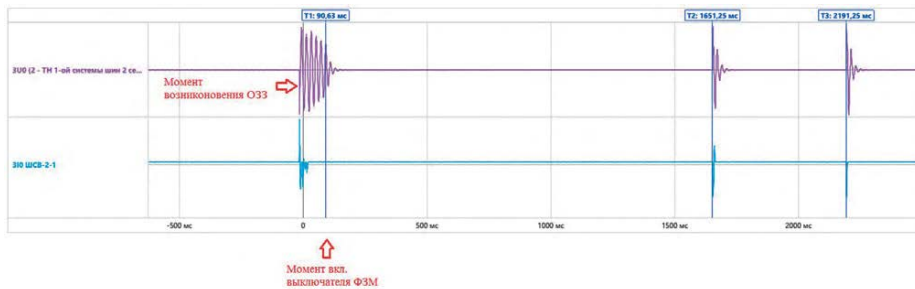


Рис. 7. Второй вариант развития ОЗЗ

возникновения ОЗЗ и далее сопровождается возникновением устойчивого тока ОЗЗ в период включенного положения выключателя 35 кВ нейтралеобразующего трансформатора ФЗМ. После отключения ФЗМ, в оставшее время существования ОЗЗ, наблюдается наличие импульсов емкостного тока сети (рис 6).

Второй вариант развития ОЗЗ характеризуется возникновением импульса емкостного тока сети в момент возникновения ОЗЗ и отсутствием перехода ОЗЗ в устойчивую форму при включении ФЗМ (рис. 7).

Описанные варианты развития ОЗЗ общеизвестны, однако необходимо принять их во внимание при

разработке защиты участков межсекционных связей КРУЭ 35 кВ, особенно при выдержке времени срабатывания защиты.

В 2020 г. первому варианту развития ОЗЗ соответствовало пять случаев включения ФЗМ при ОЗЗ на участках межсекционных связей КРУЭ 35 кВ, второму варианту соответствовало семь случаев. Таким образом, была выявлена особенность пробоя RIP изоляции Т-образных муфт, а именно, малое количество случаев перехода ОЗЗ в устойчивую форму.

Очевидно, что участки межсекционных связей КРУЭ 35 кВ ГТУ-ТЭС, включающих в себя токопроводы с литой изоляцией, соединительные муфты и токоограничивающие реакторы, необходимо защитить от ОЗЗ.

Существующая РЗА токоограничивающих реакторов реализована в микропроцессорных (МП) устройствах Т35 и F60 производства General Electric (рис. 8). Защита реакторов включает в себя: дифференциальную защиту реактора (ДЗР), максимальную токовую защиту (МТЗ), также функции автоматического ускорения МТЗ (АУ МТЗ) и оперативного ускорения МТЗ (ОУ МТЗ).

Для устранения участков КРУЭ 35 кВ, не охваченных защитой от ОЗЗ, были предложены следующие варианты выполнения защиты:

- Дифференциальная защита от замыканий на землю с применением трансформаторов тока (ТТ) нулевой последовательности (рис. 9).

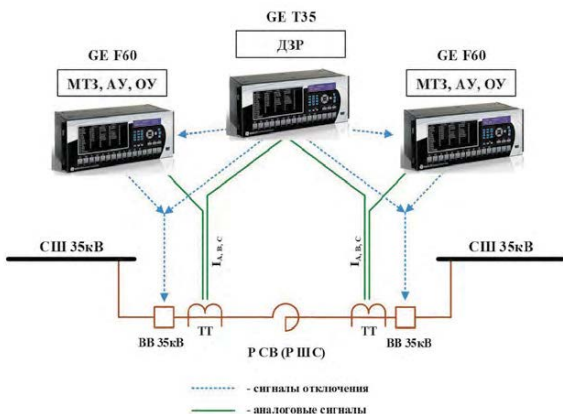


Рис. 8. Структурная схема защит токоограничивающих реакторов

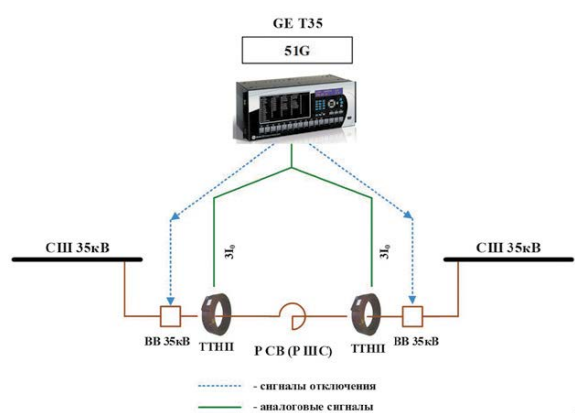


Рис. 9. Структурная схема защиты с ТТНП

По существующему проектному решению ячейки секционных и шиносоединительных выключателей 35 кВ не оснащены трансформаторами тока нулевой последовательности (ТНП). Предлагается дополнительно установить в каждую из таких ячеек ТНП (всего 8 штук). Выполнить подключение вторичным кабелем данных ТТ к соответствующим МП устройствам защиты General Electric T35 таким образом, что на входе будет присутствовать дифференциальный ток нулевой последовательности. При внешнем замыкании на землю оба ТНП будут обтекаться суммарным (емкостным, индуктивным и активным) током одной величины, а при внутреннем – разными. Проведенные расчеты и результаты проверки защиты свидетельствуют о ее правильной работе при внешних и внутренних КЗ.

К достоинствам данного варианта организации защиты относятся: малые токи небаланса ТНП; необходимая и достаточная чувствительность защиты при ОЗЗ на защищаемом участке; возможность реализации защиты в существующих МП устройствах РЗА. К недостаткам можно отнести: необходимость покупки и монтажа ТНП в количестве 8 единиц; необходимость прокладки вторичных кабельных линий от каждого ТНП до соответствующего устройства защиты.

• Дифференциальная защита от замыканий на землю, реализованная с применением «гибкой логики» МП устройства защиты (рис. 10).

Схема данной защиты отличается от существующей только наличием дискретных сигналов пуска $3U_0$ от соответствующих секций шин. Наличие данных сигналов объясняется тем, что у МП устройства защиты General Electric T35 отсутствуют входы для подключения цепей напряжения.

Отключение выключателей межсекционных связей при этом варианте защиты будет происходить при условии наличия напряжения нулевой последовательности на любой из контролируемых секций шин и

появлении дифференциального тока нулевой последовательности на участке, ограниченном трансформаторами тока, что свидетельствует о существовании ОЗЗ на данном участке. Проведенные расчеты и результаты проверки защиты подтверждают правильность ее работы при внешних и внутренних КЗ.

К достоинствам данного варианта организации защиты относятся: отсутствие дополнительных материальных затрат; простота реализации защиты в МП устройстве РЗА; незначительные изменения во вторичных цепях; возможность реализации в рамках годового цикла ТО РЗА. К недостаткам можно отнести: увеличенные по сравнению со схемой с ТНП токи небаланса; отсутствие функции торможения в дифференциальной защите.

• Защита от замыканий на землю с ограниченной зоной действия (ANSI 87RGF).

Данная защита является стандартным решением General Electric, предназначенным для защиты обмоток трансформаторов от замыканий на землю. Защита представляет собой дифференциальную защиту нулевой последовательности с торможением и может быть реализована в устройствах General Electric T35, но при условии замены процессорных модулей.

При применении данной защиты необходимо изменить подключение токовых цепей (рис. 11), а именно включить в разрыв нулевого провода «звезды» одного из плеч ДЗР вход I_n .

Дифференциальный ток определяется как разность между током нейтрали, измеренном в нулевом провод-

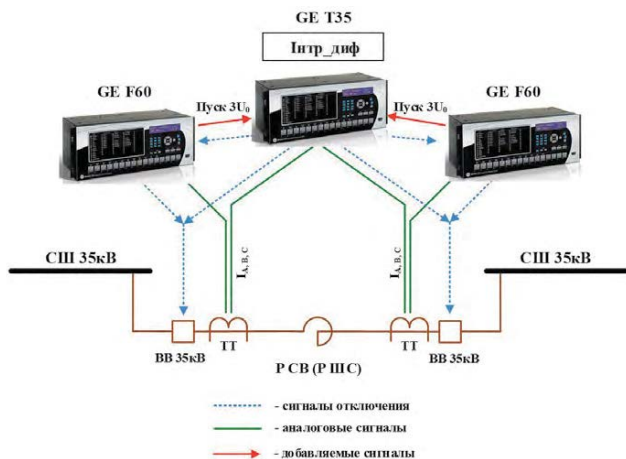


Рис. 10. Структурная схема защиты на «гибкой логике»

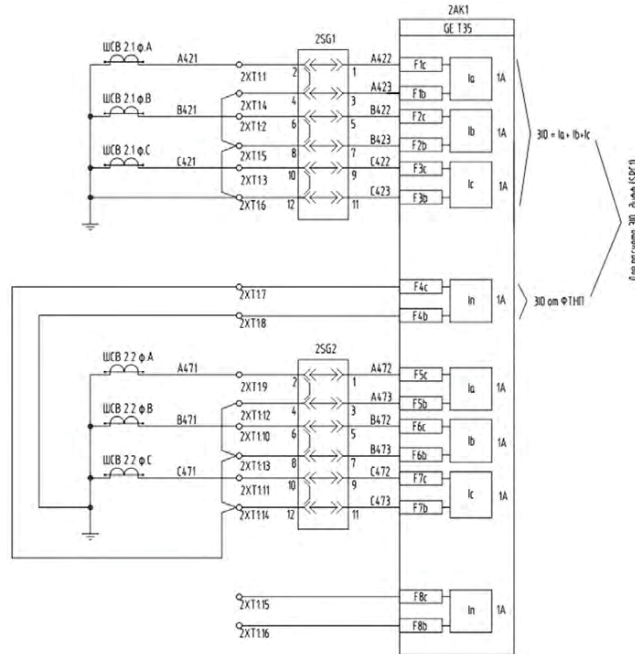


Рис. 11. Токовые цепи защиты

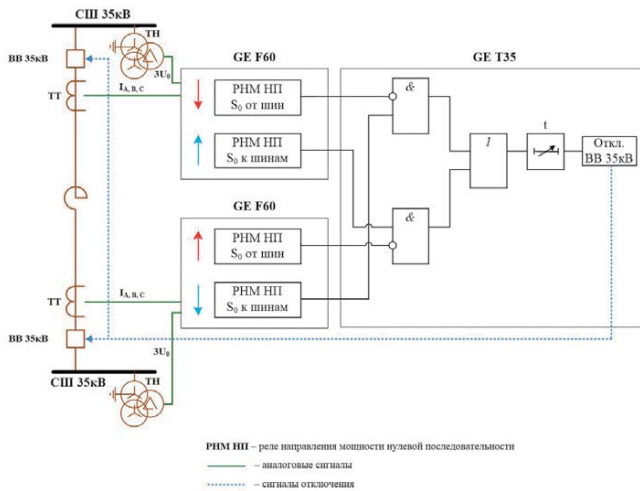


Рис. 12. Структурная схема защиты

нике ТТ, соединенных по схеме «полная звезда» с одной стороны, и током нулевой последовательности, рассчитанным из фазных ТТ, с другой стороны.

Тормозной сигнал обеспечивает устойчивость защиты к условиям насыщения ТТ и определяется как максимальное значение между тремя составляющими токов нулевой, обратной и прямой последовательности трех фазных ТТ.

К достоинствам данного варианта организации защиты относятся: отсутствие необходимости покупки и монтажа ТНП; незначительные изменения во вторичных цепях; наличие торможения в дифференциальной защите. К недостаткам можно отнести: значительно большие по сравнению со схемой с ТНП токи небаланса; необходимость покупки и установки процессорных модулей во все устройства General Electric T35.

- Защита от замыканий на землю с применением реле направления мощности нулевой последовательности (рис. 12).

Элемент направленной ваттметрической защиты нулевой последовательности (ANSI 32N) работает по мощности, рассчитанной из напряжения и тока нулевой последовательности в направлении, определяемом характеристическим углом элемента. Этот угол можно выставить во всех четырех квадрантах. Поэтому элемент можно использовать для выявления замыканий на землю как «вперед», так и «за спиной» в сетях с током ОЗ индуктивного, емкостного или резистивного характера.

К достоинствам данного варианта организации защиты относятся: отсутствие необходимости покупки дополнительного оборудования; незначительные изменения во вторичных цепях. К недостаткам можно отнести: сложность выбора уставок РЗА и правильной настройки терминалов РЗА, увеличенные по сравнению со схемой с ТНП токи небаланса.

Выводы

1. Разработана логическая схема защиты от ОЗЗ, включающая влияние перемежающейся дуги на время действия защиты. Данное предложение внедрено в промышленную эксплуатацию и уже доказало свою эффективность. Представленное решение может быть использовано для доработки защит от ОЗЗ на существующих объектах.

2. Предложены и рассмотрены четыре варианта реализации защиты участков межсекционных связей КРУЭ 35 кВ ГТУ-ТЭС от ОЗЗ. С точки зрения специалистов Пермского регионального управления ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГОСЕТИ» наиболее предпочтительным является вариант №1 с применением ТНП, т.к. токи небаланса в данном случае минимальны и защита обладает высокой чувствительностью.