

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2025)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/NRPL3020>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/ORKU1028>***М. А. Джетписов¹, К. Т. Тергемес², С. К. Шерьязов³**^{1,2}Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;³Южно-Уральский государственный аграрный университет, Российская Федерация, г. Челябинск¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6589-7352>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4798-2817>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114>*e-mail: jetpissov@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ЛИНИИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Статья посвящена разработке селективного метода определения поврежденной линии при однофазном замыкании на землю, основанного на сравнении угла и амплитуды токов нулевой последовательности линий с учетом переходного сопротивления. Наличие переходного сопротивления существенно усложняет процесс обнаружения повреждения, так как приводит к снижению однофазного тока замыкания на землю на поврежденной линии или на шинах и емкостных токах неповрежденных линий. В работе особое внимание уделяется анализу токов нулевой последовательности, их амплитуды и угла, как основным диагностическим признакам, позволяющим осуществить селективное определение места замыкания – на шинах распределительных устройств или на отходящих фидерах линий. Проведен анализ влияния величины переходного сопротивления на параметры токов нулевой последовательности, что позволило выработать критерии выбора алгоритма работы защиты. Разработка принципов действия защиты основана на моделировании переходных процессов в программной среде Matlab, что обеспечило возможность детального исследования динамики аварийных режимов и оценки работоспособности предлагаемой релейной защиты от замыкания на землю. В результате были предложены алгоритмы, учитывающие не только амплитуду, но и угол токов нулевой

последовательности, что существенно повышает чувствительность и селективность защиты. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании централизованных систем релейной защиты от замыкания на землю с целью повышения селективности, чувствительности и быстродействия срабатывания направленной защиты от замыкания на землю, а также обеспечения бесперебойности электроснабжения в распределительных сетях, что в свою очередь позволит упредить повреждение или преждевременный выход из строя электрооборудования, снизить затраты на работы по техническому обслуживанию и ремонту электрооборудования, снизить риск электротравматизма для оперативного персонала.

Ключевые слова: изолированная нейтраль, однофазное замыкание, переходное сопротивление, релейная защита, селективность защиты, моделирование, переходные процессы, Matlab.

Введение

В настоящее время распределительные сети со средним напряжением 6–35 кВ осуществляют передачу электрической энергии потребителям от крупной энергосистемы. В сетях среднего напряжения используются в основном конфигурации с изолированной или компенсированной нейтралью и от надежности электроснабжения зависит эффективность эксплуатации электрической сети.

Достоинства изолированной нейтрали заключается в возможности сети с ОЗЗ работать в течение допустимого времени до восстановления поврежденной линии [1]; [2]. Анализ статистики повреждений в электрических сетях 6–35 кВ показывает, что до 70 % повреждений происходит из-за однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и до 50 % случаев профилактических испытаний завершаются пробоем электроизоляции.

Основными причинами ОЗЗ в электросетях 6–35 кВ являются износ изоляции кабельных линий, возникающие перенапряжения, особенно при коммутации высоковольтными вакуумными выключателями аварийных токов и при опасных резонансных, феррорезонансных процессах из-за повреждений электроприемников с индуктивным характером нагрузки.

Материалы и методы

Для защиты сети 6–35 кВ при ОЗЗ существуют различные методы определения повреждения. Существует метод определения остаточного напряжения, путем измерения напряжения и тока нулевой последовательности, на основе которых формируется поправочный коэффициент для кривой обратозависимой выдержки по времени, поскольку время срабатывания таких защит будет отличаться друг от друга [3]. Известен метод определения

поврежденного фидера по форме кривой заряд-напряжение при однофазном замыкании на землю [4]. Для определения поврежденного фидера можно использовать метод симметричных составляющих [5]. Также наиболее эффективным способом определения поврежденного фидера с хорошими результатами исследования – гибридные методы компенсации [6], которые не получили большого распространения. Исследование релейных защит на основе оценки амплитуды тока нулевой последовательности получили большее распространение [7]; [8].

Каждый метод и способ защиты имеет свои особенности, учитывающие отдельные факторы, влияющие на контролируемые параметры. Вместе с тем выявлены недостатки существующих методов и способов защит, которые проявляются при ОЗЗ через переходное сопротивление.

ОЗЗ через переходное сопротивление снижает чувствительность применяемых защит. В результате снижается надежность и эффективность электроснабжения потребителей по широко применяемой электрической сети с изолированной нейтралью. При ОЗЗ с переходным сопротивлением снижаются уровни тока и напряжения нулевой последовательности. Учитывая, что расчет уставок срабатывания токовых защит нулевой последовательности выполняется для металлических ОЗЗ, то не учет переходного сопротивления приведет к тому, что параметры срабатывания защиты могут не почувствовать появившийся ток ОЗЗ.

Переходное сопротивление является причиной отказа не только известных токовых защит от ОЗЗ, но и защит, реагирующих на высшие гармонические составляющие в установившемся токе замыкания на землю. Так, анализ защит показал, что при ОЗЗ с переходным сопротивлением в несколько Ом приводит к снижению чувствительности защит [9]; [10]. Направленные защиты, определяющие направление тока нулевой последовательности в установившемся режиме однофазной цепи, обладают лучшими характеристиками. Однако проведенный анализ эксплуатации данных устройств защиты свидетельствует о низкой селективности при ОЗЗ через переходные сопротивления 600–700 Ом и при максимальной емкости распределительной сети 6,5 мкФ [11].

Анализ ОЗЗ с переходными сопротивлениями

Анализ чувствительности защиты ОЗЗ выполнен на участке распределительной сети 10 кВ, ее однолинейная схема представлена на рисунке 1. Распределительная сеть содержит (рисунок 1) следующее:

Источник питания: мощность короткого замыкания $S_{кз} = 40$ МВА, напряжение: $U = 110$ кВ, соотношение реактивного сопротивления к активному: $X/R = 7$.

Режим нейтрали высокого напряжения: сеть с глухозаземленной нейтралью.

Силовой трансформатор: тип трансформатора: ТМ-60000/110/10, мощность полная $S = 60$ МВА, напряжение на первичной обмотке: $U_1 = 110$ кВ, напряжение на вторичной обмотке: $U_2 = 10$ кВ.

Режим нейтрали среднего напряжения: сеть с изолированной нейтралью, сеть с компенсированной нейтралью.

Фидер 1: поперечное сечение кабеля, $S = 240$ мм², напряжение: $U_1 = 6/10$ кВ, длина $l = 2$ км.

Фидер 2: поперечное сечение кабеля, $S = 240$ мм², напряжение: $U_1 = 6/10$ кВ, длина $l = 3$ км.

Фидер 3: поперечное сечение кабеля, $S = 240$ мм², напряжение: $U_1 = 6/10$ кВ, длина $l = 3$ км.

Нагрузка 1, 2, 3 : потребляемая мощность $P = 7$ МВт, реактивная мощность: $Q = 2$ МВАр, номинальное напряжение: $U = 10$ кВ.

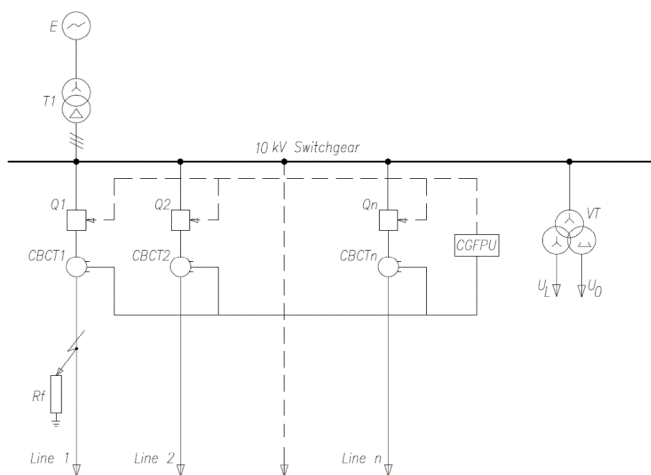


Рисунок 1 – Распределительная сеть 10 кВ с изолированной нейтралью

Для проведения анализа характеристики изменения токов ОЗЗ и емкостных токов при условии разных значений переходного сопротивления, необходимо оценить величину тока, протекающего в месте повреждения, напряжения нулевой последовательности и коэффициента неполноты замыкания на землю.

Таблица 1 – Ток ОЗЗ и емкостные токи в сети с изолированной нейтралью 10 кВ

Сопротивление R_n , Ом	Расчетный ток ОЗЗ, А	Общий ток ОЗЗ на фидере 1, А	Общий ток ОЗЗ на фидере 2, А	Общий ток ОЗЗ на фидере 3, А	Общий ток ОЗЗ на шинах, А	Коэффициент неполноты замыкания на землю β
1	19,13	19,74	19,70	19,72	19,89	1
100	18,1	18,59	18,55	18,56	18,73	0,949
500	9,91	9,68	9,65	9,66	9,76	0,516
1000	5,52	5,35	5,33	5,34	5,39	0,288
3000	1,91	1,84	1,84	1,84	1,86	0,1
5000	1,15	1,11	1,11	1,11	1,12	0,06
10000	0,57	0,56	0,55	0,55	0,56	0,03

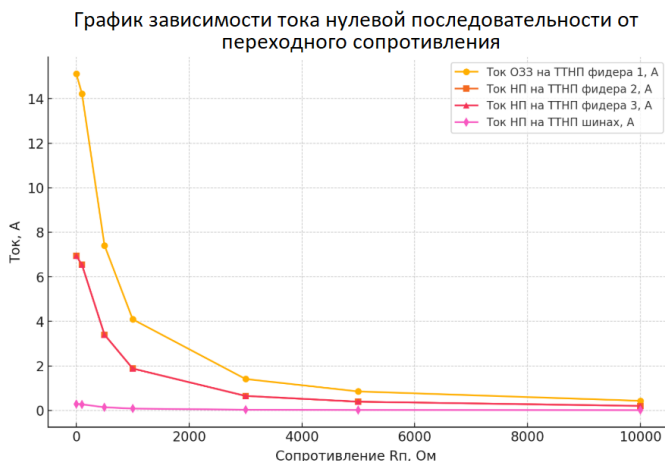


Рисунок 2 – Ток ОЗЗ на фидере №1 и емкостные токи в сети с изолированной нейтралью 10 кВ

Рисунок 2 показывает изменение тока ОЗЗ и емкостных токов при различных переходных сопротивлениях в диапазоне от 1 Ом до 10 000 Ом на фидере №1 подстанции. Суммарный ток ОЗЗ, ток в месте повреждения, емкостные токи резко изменяются и нелинейно при увеличении переходного сопротивления. При металлическом замыкании на землю на фидере №1 подстанции, ток ОЗЗ имеет максимальное значение и составляет порядка десятка ампер, когда как при ОЗЗ с самым большим переходным сопротивлением, ток ОЗЗ достигает десятые доли ампер.

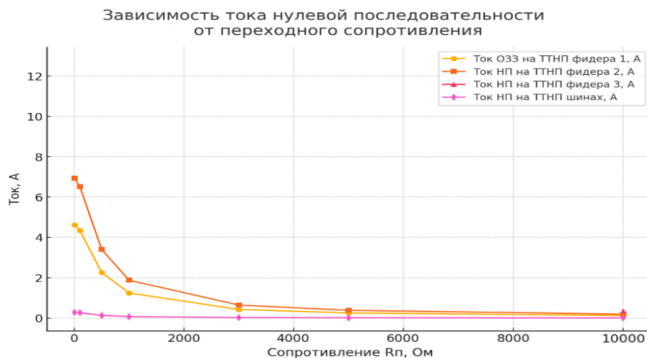


Рисунок 3 – Ток ОЗЗ на шинах и емкостные токи
в сети с изолированной нейтралью 10 кВ

На рисунке 3 показан график изменения тока ОЗЗ и емкостных токов при различных переходных сопротивлениях в диапазоне от 1 Ом до 10 000 Ом на шинах подстанции. Величины тока ОЗЗ, так же, как и емкостных токов имеют нелинейный характер и изменяются в зависимости от переходного сопротивления. При ОЗЗ емкостные токи пропорциональны собственным емкостям. При металлическом замыкании на землю на шинах ток ОЗЗ составляет около десятка ампер, а при ОЗЗ с наибольшим переходным сопротивлением, ток ОЗЗ достигает десятые доли ампер

Разработка алгоритма и устройства определения поврежденной линии при однофазном замыкании на землю

Предлагается способ определения поврежденной линии при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление. Способ предполагает централизованное устройство релейной защиты от ОЗЗ (ЦУРЗОЗЗ), которое является цифровым устройством для централизованного управления, контроля и защиты. Структурно-функциональная схема устройства представлена на рисунке 4.

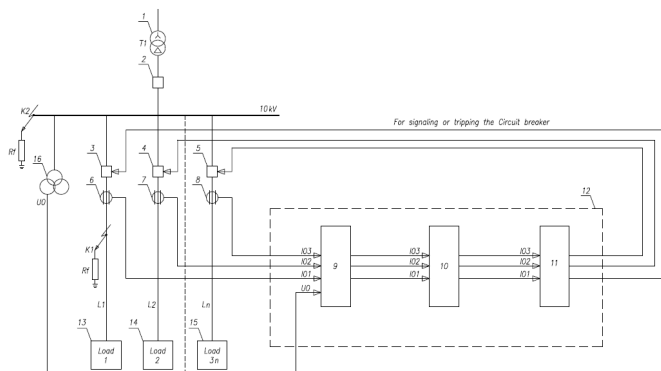


Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема централизованного устройства релейной защиты от ОЗЗ в сети изолированной нейтралью 10 кВ

На рисунке 4 представлены: 1 – силовой трансформатор, 2 – вводной выключатель, 3, 4, 5 – выключатели отходящих линий, 6, 7, 8 – трансформаторы тока нулевой последовательности, 9 – блок сравнения по углу, 10 – блок сравнения по амплитуде, 11 – выходной модуль, 12 – централизованное устройство защиты от ОЗЗ, 13, 14, 15 – нагрузки, 16 – трансформатор напряжения.

Функционирование ЦУРЗОЗЗ осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом действия, который представлен на рисунке 4 и работает следующим образом. В нормальном режиме работы электрической сети при небалансе или зарядных токах линий, если их уровень выше уставки срабатывания защиты с измерительных трансформаторов тока нулевой последовательности 6, 7, 8, поступают сигналы в виде I_0 в блок сравнения угла 9, где векторы токов нулевой последовательности будут иметь одинаковое направление и низкое значение токов нулевой последовательности. Таким образом, сигнала на срабатывание защиты не будет и выходной модуль 11 не будет подавать сигнал или команду на отключение одной из защищаемых линий, т.е. исключается ложное срабатывание защиты по причине появления токов небаланса сети или зарядных токов в нормальном режиме работы. При ОЗЗ через переходное сопротивление, появляется ток нулевой последовательности на поврежденной линии, который вместе с емкостными токами остальных линий поступает в блок измерения 9. В блоке 9 измеренные токи нулевой последовательности, поврежденной линий, сравниваются по углу. Наличие угла сдвига в 180° между током нулевой последовательности и емкостными токами неповрежденных фидеров

показывает наличие однофазного замыкания на землю на поврежденной линии. Затем измеренные токи нулевой последовательности и емкостные токи сравниваются в блоке 10 и выбирается ток нулевой последовательности линии с максимальным значением. В блоке 11 определяется номер поврежденной отходящей линии и формируется соответствующий сигнал об ОЗЗ или при необходимости соответствующее выходное реле подает команду на отключение выключателя. Так, если произошло однофазное замыкание на землю на одной из отходящих линий, например на первой линии L_1 (точка K_1 , рисунок 4), то направление вектора тока нулевой последовательности поврежденного присоединения L_1 , I_{L1} будет на 180° противоположно направлению емкостных токов неповрежденных линий (рисунок 5). На рисунке 5 показана векторная диаграмма тока нулевой последовательности и емкостных токов отходящих линий при повреждении на первом отходящем фидере. На векторных диаграммах приняты следующие обозначения: I_{L1} , I_{L2} , I_{Ln} – векторы емкостных токов первого, второго, линии n , соответственно.

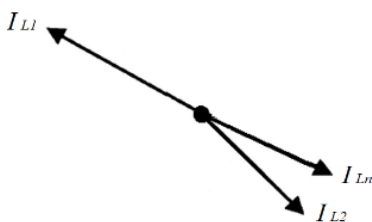


Рисунок 5 – Векторная диаграмма тока нулевой последовательности и емкостных токов при повреждении на линии

Если же однофазное замыкание на землю произошло на шинах подстанции (точка K_2 , рисунок 4), значение всех отходящих линий будут равно их емкостным токам и направления векторов емкостных токов всех линий при этом будут одинаковыми (рисунок 6). На третьей обмотке трансформатора напряжения, соединенной в разомкнутый треугольник, появится напряжение нулевой последовательности $3U_0$ и в модуль 11 будет определен сигнал «ОЗЗ на вводе». В зависимости от уставок, будет подан сигнал о наличии повреждения на шинах или же сигнал на отключение ввода. На рисунке 6 приведена векторная диаграмма емкостных токов и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ на шинах 10 кВ.



Рисунок 6 – Векторная диаграмма токов и напряжения нулевой последовательности при повреждении на шинах

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определить поврежденный фидер при однофазном замыкании на землю, также обеспечивает функционирование защиты в условиях, когда возможны повреждения на шинах подстанции, что в целом повышает надежность защиты при однофазном замыкании на землю, обеспечивает быстрдействие и высокую селективность защиты. Предлагаемый способ также обеспечивает защиту при замыкании на землю через переходное сопротивление. При этом необходимо определить параметры защитного устройства для обеспечения требуемой чувствительности защиты.

Описание схемы защиты централизованного устройства релейной защиты от ОЗЗ

С учетом вышеописанной структурно-функциональной схемы, составим схему защиты, основанной на сравнении угла и амплитуды токов нулевой последовательности, показанной на рисунке 7.

Токовые сигналы нулевой последовательности с трансформаторов тока нулевой последовательности (TR1 10kV CT1, Feeder 1 10kV CT1, Feeder 2 10kV CT, Feeder 3 10kV CT) фидеров 1, 2 и 3, а также сигналы напряжения нулевой последовательности с трансформатора напряжения (BUS-A 10KV VT) поступают в централизованное устройство релейной защиты от ОЗЗ ЦУРЗОЗЗ (рисунок 7). Сигналы обрабатываются в блоке измерения, усредняются и затем направляются в блок сравнения по углу (рисунок 8). Сигналы с фидеров направляются в блок угла и величины $\begin{bmatrix} |u| \\ \angle u \end{bmatrix}$, отсюда в блок сравнения по углу $\begin{bmatrix} + \\ - \end{bmatrix}$, там сумма угла сигналов например, фидеров №1 и №2 делятся на пополам $\frac{1}{2}$ и берется усредненное значение и затем в другом модуле сравнивается с фидером 3 $\begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix}$, и направляются в модуль расчета величин углов $\begin{bmatrix} \frac{\pi}{2} \\ \frac{\pi}{2} \end{bmatrix}$. Если угол равен $\pm 20\%$ от $+180^\circ$, то на выходе оператора ИЛИ $\begin{bmatrix} \text{OR} \end{bmatrix}$ появляется логическая единица 1 и сигнал дальше пойдет на мультипортовый переключатель $\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$. Оттуда сигнал пойдет на блок сравнения по амплитуде. В блоке сравнения по амплитуде, например амплитуда тока фидера № 3 сравнивается с амплитудой токов фидеров №1 и №2 $\begin{bmatrix} \text{max} \end{bmatrix}$ и если амплитуда у токового сигнала фидера №3 выше и угол

равен 180° , то на выходе оператора И $\boxed{\text{AND}}$ появляется логическая единица 1 и через мультипортовый переключатель сигнал $\boxed{1}$ будет направлен на еще один оператор И $\boxed{\text{AND}}$. Если уставка аварийного сигнала будет превышена $\boxed{1}$ $\rightarrow$ $\boxed{1}$, то появится сигнал об однофазном замыкании на землю (1) EF_Alarm. Если уставка срабатывания защиты на отключение будет превышена $\boxed{1}$ $\rightarrow$ $\boxed{1}$, то через 100 мс $\boxed{0.1004}$ $\rightarrow$ $\boxed{t_{\text{td_i02}}}$ появится сигнал отключения соответствующего фидера (2) EF_Trip.

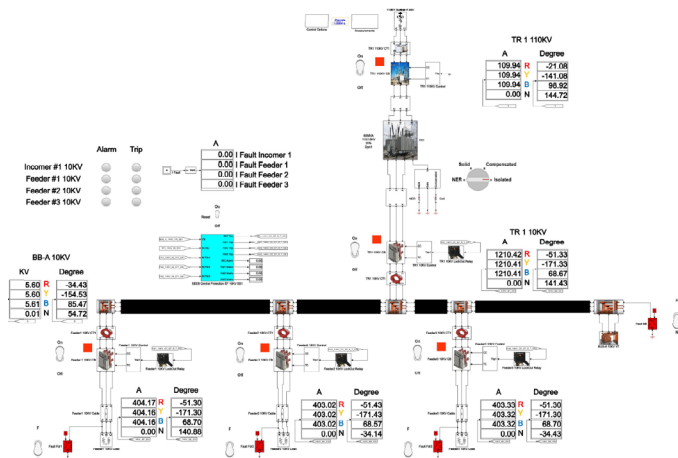


Рисунок 7 – Однолинейная схема 10 кВ в сети с изолированной нейтралью

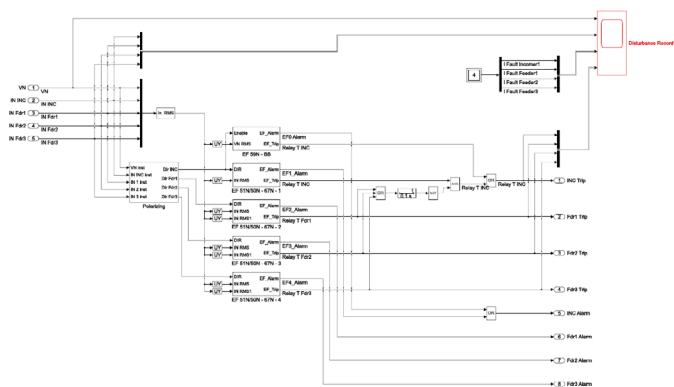


Рисунок 8 – Общая блок схема ЦУРЗОЗ в сети 10 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью

При ОЗЗ на шинах

После того, как были сигналы с фидеров №1,2,3 направлены через блок угла и величины $\frac{|u|}{\angle u}$, в блок сравнения по углу $\frac{\angle u}{\angle u}$ и $\frac{\angle u}{\angle u}$, затем в модуль расчета величин углов $\frac{\angle u}{\angle u}$ и если оказалось, что углы неповрежденных фидеров почти одинаковые, то появляется логический 0 на выходе оператора оператора ИЛИ OR. Этот сигнал затем будет конвертироваться в логическую единицу 1 через оператор И-НЕ NOR, который дальше через мультипортовый переключатель $\frac{1}{\angle u}$ будет подавать сигнал в блок сравнения амплитуды. Если уставка аварийного сигнала будет превышена $\frac{1}{\angle u} \rightarrow 1$, то появится сигнал об однофазном замыкании на землю на шинах $\frac{1}{\angle u}$ EF_Alarm. Если уставка срабатывания защиты на отключение будет превышена $\frac{1}{\angle u} \rightarrow 1$, то через 100 мс $\frac{t}{0.1004 s}$ появится сигнал на отключение выключателя.

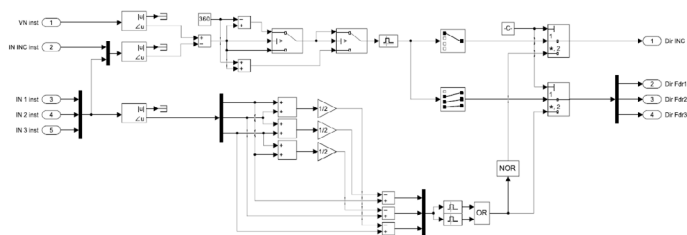


Рисунок 9 – Функциональная схема блока поляризации ЦУРЗОЗЗ в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

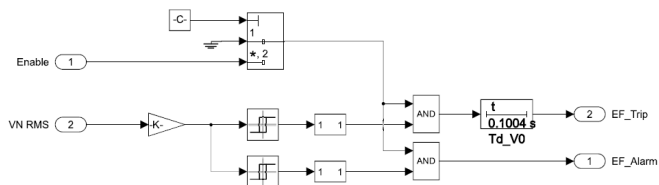


Рисунок – 10 Функциональная схема блока сравнения по амплитуде напряжения нулевой последовательности и направлению емкостных токов неповрежденных фидеров ЦУРЗОЗЗ в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

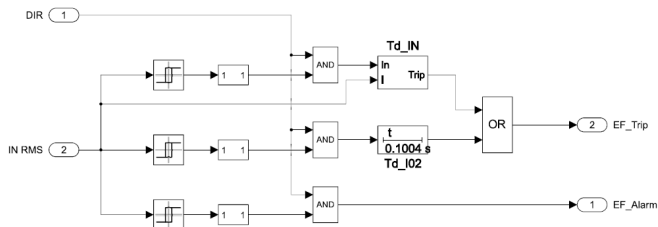


Рисунок 11 – Функциональная схема блока сравнения по амплитуде и углу токов ввода

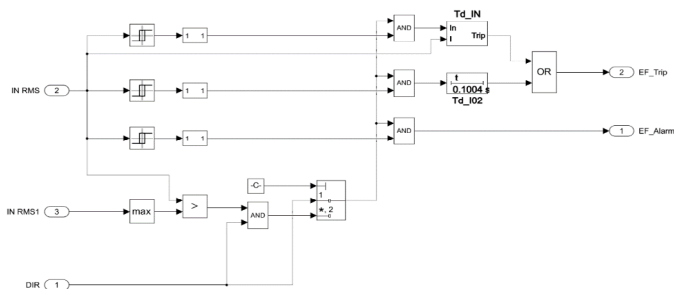


Рисунок 12 – Функциональная схема блока сравнения по амплитуде и углу токов фидера №1,2,3

Расчет уставок ЦУРЗОЗЗ при металлическом однофазном замыкании на землю

Рассмотрим уставки ЦУРЗОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{\text{п}} = 1 \text{ Ом}$, с воздействием на отключение присоединения, на котором произошло ОЗЗ.

Фидер №1

Суммарный ток однофазного замыкания на землю с переходным сопротивлением $R_{\text{п}} = 1 \text{ Ом}$, определяем по следующему выражению:

$$I_0 = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0\Sigma}}{\sqrt{1 + (3\omega C_{0\Sigma} R_{\text{п}})^2}} = \beta(t) I_{\text{с}\Sigma} = 19,1 \text{ А} \quad (1)$$

Ток ОЗЗ на фидере №1 с переходным сопротивлением $R_{\text{п}} = 1 \text{ Ом}$, будет равен:

$$I_{0 \text{ пов}} = \frac{3U_{\phi} \omega (C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ совс}})}{\sqrt{1 + (3\omega C_{0\Sigma} R_{\text{п}})^2}} = 3C_{0\Sigma} \omega \beta(t) U_{\phi} = \beta(t) I_{\text{с}\Sigma} = 14,3 \text{ А} \quad (2)$$

В неповрежденном присоединении фидера №2, емкостный ток равен:

$$I_{0 \text{ непов}} = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = 3C_{0 \text{ собс}} \omega \beta(t) U_{\phi} =$$

$$\beta I_{0 \text{ собс}} = 7,2 \text{ A} \quad (3)$$

Емкостный ток в неповрежденном присоединении фидера №3, будет равен:

$$I_{0 \text{ непов}} = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = 3C_{0 \text{ собс}} \omega \beta(t) U_{\phi} =$$

$$\beta I_{0 \text{ собс}} = 7,2 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_{c3} = \frac{3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega \beta(t) U_{\phi}}{K_{\text{отс}}} = 9,5 \text{ A} \quad (5)$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega \beta(t) U_{\phi}}{I_{c3}} = \frac{\beta(t)(I_{c\Sigma} - I_{c \text{ собс}})}{I_{c3}} = 1,5 \quad (6)$$

ОЗЗ на шинах

Суммарный ток однофазного замыкания на землю с переходным сопротивлением $R_n = 1 \text{ Ом}$, определяем по следующему выражению:

$$3I_0 = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0\Sigma}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \beta(t) I_{c\Sigma} = 19,1 \text{ A} \quad (7)$$

Емкостный ток в неповрежденном присоединении фидера №1, равен:

$$I_{0 \text{ непов}} = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = 3C_{0 \text{ собс}} \omega \beta(t) U_{\phi} =$$

$$\beta I_{0 \text{ собс}} = 4,8 \text{ A} \quad (8)$$

Емкостный ток в неповрежденном присоединении фидера №2, будет равен:

$$I_{0 \text{ непов}} = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = 3C_{0 \text{ собс}} \omega \beta(t) U_{\phi} =$$

$$\beta I_{0 \text{ собс}} = 7,2 \text{ A} \quad (9)$$

Емкостный ток в неповрежденном присоединении фидера №3, равен:

$$I_{0 \text{ непов}} = \frac{3U_{\phi} \omega C_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0 \Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{0 \text{ собс}}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0 \Sigma} R_n)^2}} = 3C_{0 \text{ собс}} \omega \beta(t) U_{\phi}$$

$$\beta I_{0 \text{ собс}} = 7,2 \text{ A} \quad (10)$$

$$I_{\text{сз}} = \frac{3(C_{0 \Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega \beta(t) U_{\phi}}{K_{\text{отс}}} = 12,7 \text{ A} \quad (11)$$

$$K_{\text{ч}} = \frac{3(C_{0 \Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega \beta(t) U_{\phi}}{I_{\text{сз}}} = \frac{\beta(t)(I_{\text{сз}} - I_{0 \text{ собс}})}{I_{\text{сз}}} = 1,5 \quad (12)$$

Определяем уставку по напряжению нулевой последовательности.

$$U_0 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0 \Sigma} R_n)^2}} = \beta U_{\phi} = 5,77 \text{ кВ} \quad (13)$$

При выборе уставки ЦУРЗОЗЗ с переходным сопротивлением $R_n = 1 \text{ Ом}$, выбираем наименьшую из расчета, $I_{\text{сз}} = 8 \text{ А}$ с коэффициентом чувствительности $K_{\text{ч}} = 1,5$ с действием на отключение. Угол между однофазным замыканием на землю на одном из присоединений и емкостными токами, выбираем ± 200 от 1800 . При однофазном замыкании на землю на шинах, угол между емкостными токами, выбираем ± 200 от 00 .

Моделирование ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_n = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

На рисунке 13 и рисунке 14 представлена однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_n = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью во время и после отключения ОЗЗ. На вводе ток $I_A = 1208,28 \text{ А}$, $\varphi = -50,73^\circ$, $I_B = 1215,20 \text{ А}$, $\varphi = -171,14^\circ$, $I_C = 1204,55 \text{ А}$, $\varphi = 68,77^\circ$. Ток нулевой последовательности равен $I_{\text{СВСТ}} = 0,29 \text{ А}$, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -129,09^\circ$. На фидере №1, ток $I_A = 400,31 \text{ А}$, $\varphi = -48,80^\circ$, $I_B = 405,36 \text{ А}$, $\varphi = -171,18^\circ$, $I_C = 402,86 \text{ А}$, $\varphi = 68,79^\circ$. Ток нулевой последовательности равен $I_{\text{СВСТ}} = 15,12 \text{ А}$, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -125,87^\circ$. На фидере №2, ток $I_A = 404,02 \text{ А}$, $\varphi = -51,75^\circ$, $I_B = 404,71 \text{ А}$, $\varphi = -171,22^\circ$, $I_C = 400,89 \text{ А}$, $\varphi = 68,68^\circ$. Ток нулевой последовательности равен $I_{\text{СВСТ}} = 6,94 \text{ А}$, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -54,19^\circ$. На фидере №3, ток $I_A = 404,29 \text{ А}$, $\varphi = -51,63^\circ$, $I_B = 405,01 \text{ А}$, $\varphi = -171,09^\circ$, $I_C = 401,19 \text{ А}$, $\varphi = 68,80^\circ$.

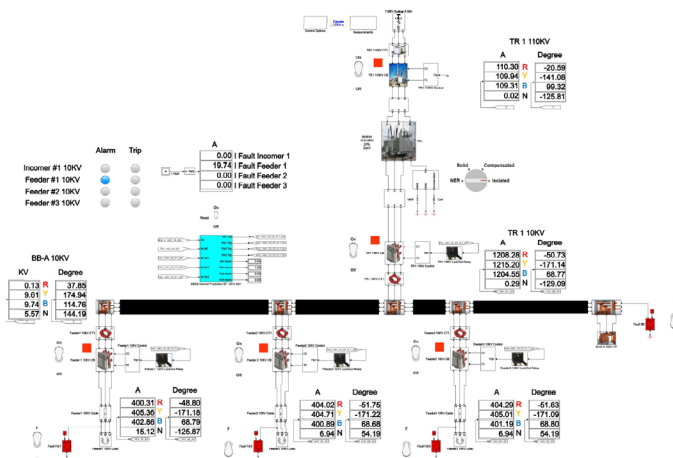


Рисунок 13 – Однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью (во время ОЗЗ)

Ток нулевой последовательности равен $I_{CBCT} = 6,94 \text{ А}$, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -54,19^\circ$. Суммарный ток однофазного замыкания на фазе А в точке ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 5000 \text{ Ом}$ составил $19,74 \text{ А}$ и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -125,87^\circ$. Ток однофазного замыкания на фазе А в точке ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$, имеет большее значение по амплитуде, чем емкостные токи неповрежденных фидеров линий №2 и №3 и имеет сдвиг около $180\text{--}185^\circ$ от вектора емкостных токов неповрежденных фидеров линий №2 и №3. В связи с тем, что ток ОЗЗ превысил уставку ОЗЗ, появляется сигнал отключения ОЗЗ на фидере №1.

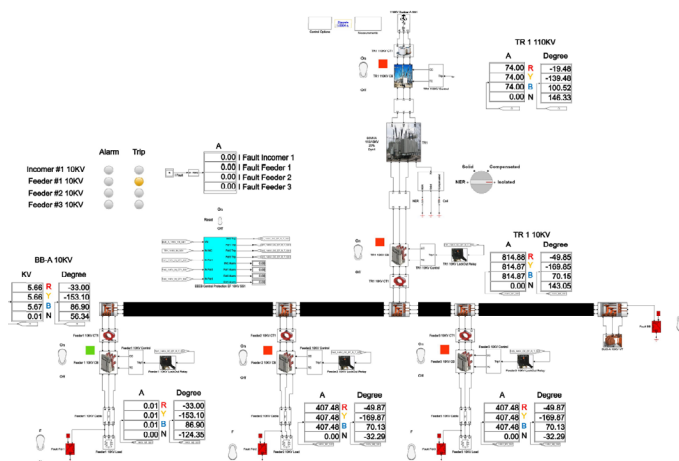


Рисунок 14 – Однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью (после отключения ОЗЗ)

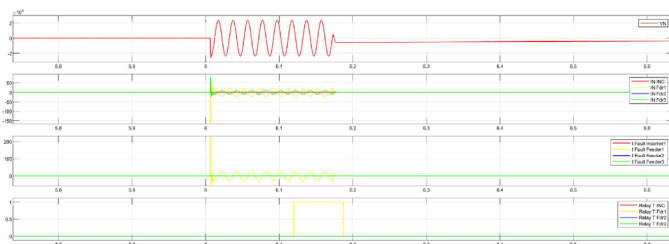


Рисунок 15 – Осциллограмма ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

На рисунке 15 представлена осциллограмма ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$ на фидере №1 в сети 10 кВ с изолированной нейтралью. Ток нулевой последовательности на фидере №1 имеет большее значение по амплитуде и находится в противофазе от токов нулевой последовательности неповрежденных фидеров линий №2 и №3 около $180-185^\circ$. Появляется сигнал на бинарном выходе реле и подается сигнал отключения ОЗЗ на фидере №1.

Моделирование ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_p = 1 \text{ Ом}$ на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

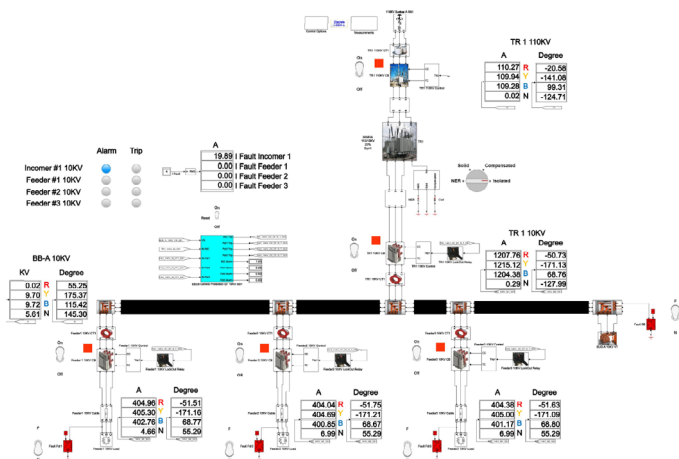


Рисунок 16 – Однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1$ Ом на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью (во время ОЗЗ)

На рисунке 16 и рисунке 17 представлена однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1$ Ом на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью во время и после отключения ОЗЗ. На вводе ток нулевой последовательности равен $I_{CBCT} = 0,29$ А, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -127,99^\circ$. На фидере №1, нулевой последовательности равен $I_{CBCT} = 4.66$ А, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = 55,29^\circ$. На фидере №2, ток нулевой последовательности равен $I_{CBCT} = 6.99$ А, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = -55,29^\circ$. На фидере №3, ток нулевой последовательности равен $I_{CBCT} = 6.99$ А, и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = 55,29^\circ$. Суммарный ток однофазного замыкания на фазе А в точке ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1$ Ом составил 19,89 А и угол тока нулевой последовательности равен $\varphi = 127,99^\circ$. При однофазном замыкании на землю на секции шин, фазы А в точке ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1$ Ом, емкостные токи неповрежденных фидеров линий №1, №2 и №3 имеют значения равные своим собственным емкостям и имеют одинаковое направление. Сигнал напряжения нулевой последовательности используется как опорный сигнал наличия ОЗЗ на шинах. При ОЗЗ на шинах, используя алгоритм направления векторов емкостных токов и сигнала напряжения нулевой последовательности, появляется сигнал отключения ввода.

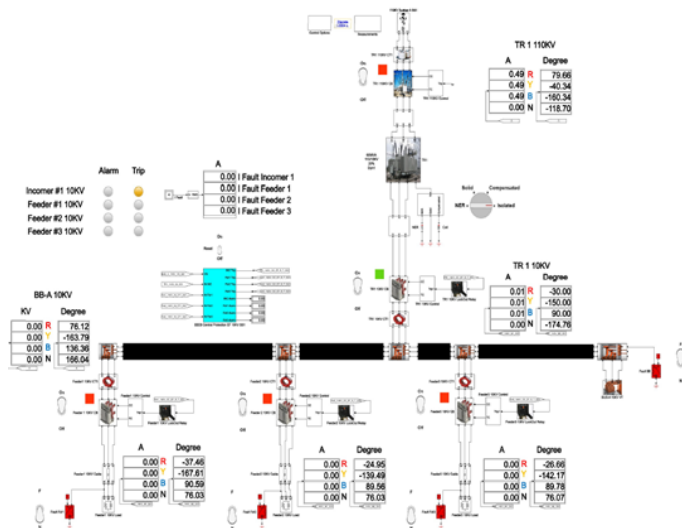


Рисунок 17 – Однолинейная схема с ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1 \text{ Ом}$ на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью нейтралью (после отключения ОЗЗ)

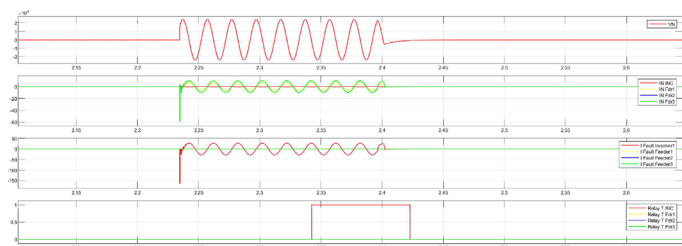


Рисунок 18 – Осциллограмма ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1 \text{ Ом}$ на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

На рисунке 18 представлена осциллограмма ОЗЗ с переходным сопротивлением $R_{п} = 1 \text{ Ом}$ на шинах в сети 10 кВ с изолированной нейтралью. По осциллограмме, заметно, что амплитуды линий №1, №2 и №3 имеют одинаковое направление и имеют значения равные своим собственным емкостям. По осциллограмме, также заметно, что применяется алгоритм направления векторов емкостных токов и сигнала напряжения нулевой последовательности, появляется сигнал на бинарном выходе реле и подается сигнал отключения ввода.

Результаты и обсуждение

В результате проведённого исследования был разработан алгоритм определения поврежденной линии или шин при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление. Моделирование однофазных замыканий на землю в среде Matlab позволило получить зависимости амплитуды и угла сдвига токов нулевой последовательности от величины переходного сопротивления.

Анализ показал, что при однофазном замыкании на землю при различных переходных сопротивлениях, ток однофазного замыкания на землю поврежденной линии или шин и емкостные токи неповрежденных линий изменяются нелинейно и сдвиг их угла несущественно изменяется, что делает предлагаемую защиту от замыканий на землю более устойчивой, чувствительной и эффективной.

Таким образом, предложенный принцип позволяет значительно повысить надёжность работы релейной защиты от замыкания на землю в условиях сложных переходных процессов, характерных для сетей с изолированной или компенсированной нейтралью.

Выводы

В статье определено влияние переходных сопротивлений на характеристики срабатывания защиты от однофазного замыкания на землю, определены значения переходных сопротивлений и уставки защиты от однофазного замыкания на землю, выполнена симуляция переходных процессов и оценена работа защиты от замыкания на землю. Разработаны схема и алгоритм обнаружения и защиты сети при однофазных замыканиях на землю через переходное сопротивление.

По результатам симуляции в Matlab можно сделать следующие выводы:

- в нормальном режиме работы сети по проводам протекают емкостные токи одинаковой величины, смещенные на 120 электрических градусов относительно друг друга;
- вектор тока однофазного замыкания на землю в поврежденном фидере отстает от векторов емкостных токов на 180° градусов, что означает, что фазы углов неповрежденных фидеров совпадают по направлению;
- централизованное устройство релейной защиты от замыканий на землю работает селективно и не действует при токах небаланса, бросках тока.
- централизованное устройство релейной защиты от замыканий на землю оказалось чувствительным и функционирует с широким диапазоном переходных сопротивлений, определяет внутренние и внешние замыкания на землю.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Методические указания по выбору режима заземления нейтралей в сетях напряжением 6 и 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром». СТО Газпром 2-1.11-070-2006. 2006. – 24 с.

2 **Ильиных, М. В., Сарин, Л. И.** Комплексный подход к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях 6, 10 кВ крупных промышленных предприятий целлюлозобумажной и металлургической промышленности. Труды Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2006. – С. 55–62.

3 **Lin, X., Ke, S, Gao, Y., Wang, B., Liu, P.** A selective single phase-to-ground fault protection for neutral uneffectively grounded systems // IJEPES. – 2011. – Vol. 33. – P. 1012–1017.

4 **Henriksen, T.** Faulty feeder identification in high impedance grounded network using charge-voltage relationship // Electr. Power Syst. Res. – 2011. – Vol. 81. – P. 1832–1839.

5 **Huang, S. J., Wan, H. H.** A Method to enhance ground-fault computation// IEEE Power Eng. Lett. // IEEE Trans. Power Syst. – 2010. – Vol. 25. – P. 1190–1191.

6 **Lin, W. M., Ou, T. C.** Unbalanced distribution network fault analysis with hybrid compensation // IET Gener. Transmiss. Distrib. – 2011. – Vol. 5. – P. 92–100.

7 **Ou, T. C.** A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid distribution systems // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2012. – Vol. 43. – P. 1017–1024.

8 **Ou, T. C.** Ground fault current analysis with a direct building algorithm for microgrid distribution // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2013. – Vol. 53. – P. 867–875.

9 **Шалин, А. И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – №6 (36).

10 **Шалин, А. И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – №1 (37).

11 **Ustinov, D., Nazarychev, A., Pelenev, D., Babyr, K., Pugachev, A.** Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the Electrical Networks of Mining Enterprises // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 9. – P. 3690. – <https://doi.org/10.3390/en16093690>.

REFERENCES

1 Metodicheskie ukazaniya po vyboru rezhima zazemleniya neytraley v setyakh napryazheniem 6 i 10 kV dochernikh obshchestv i organizatsiy OAO «Gazprom» [Guidelines for selecting the grounding mode of neutrals in 6 and 10 kV networks of subsidiaries and organizations of OAO «Gazprom»]. STO Gazprom 2-1.11-070-2006. – 2006. – 24 p.

2 **Ilyinykh, M. V., Sarin, L. I.** Kompleksnyy podkhod k vyboru sredstv ogranicheniya perenapryazheniy v setyakh 6, 10 kV krupnykh promyshlennyykh predpriyatiy tsellulozobumazhnoy i metallurgicheskoy promyshlennosti [Integrated approach to the selection of overvoltage limiting devices in 6, 10 kV networks of large pulp and metallurgical enterprises] // Trudy Chetvyortoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii – Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific and Technical Conference. – Novosibirsk, 2006. – P. 55–62.

3 **Lin, X., Ke, S., Gao, Y., Wang, B., Liu, P.** A selective single phase-to-ground fault protection for neutral uneffectively grounded systems // IJEPES. – 2011. – Vol. 33. – P. 1012–1017.

4 **Henriksen, T.** Faulty feeder identification in high impedance grounded network using charge-voltage relationship // Electr. Power Syst. Res. – 2011. – Vol. 81. – P. 1832–1839.

5 **Huang, S. J., Wan, H. H.** A Method to enhance ground-fault computation// IEEE Power Eng. Lett. // IEEE Trans. Power Syst. – 2010. – Vol. 25. – P. 1190–1191.

6 **Lin, W. M., Ou, T. C.** Unbalanced distribution network fault analysis with hybrid compensation // IET Gener. Transmiss. Distrib. – 2011. – Vol. 5. – P. 92–100.

7 **Ou, T. C.** A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid distribution systems // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2012. – Vol. 43. – P. 1017–1024.

8 **Ou, T.C.** Ground fault current analysis with a direct building algorithm for microgrid distribution // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2013. – Vol. 53. – P. 867–875.

9 **Shalin A.I.** Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennyye zashchity. Kharakteristiki, osobennosti primeneniya [Single-phase earth faults in 6–35 kV networks. Directional protections: characteristics and application features] // Novosti Elektrotehniki. – 2005. – No. 6(36).

10 **Shalin, A. I.** Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennyye zashchity. Vliyanie elektricheskoy dugi na napravlennyye zashchity [Single-phase earth faults in 6–35 kV networks. Directional protections: the influence of electric arc on directional protections] // Novosti Elektrotehniki, 2006. – No. 1(37).

11 Ustinov, D., Nazarychev, A., Pelenev, D., Babyr, K., Pugachev, A. Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the Electrical Networks of Mining Enterprises // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 9. – P. 3690. – <https://doi.org/10.3390/en16093690>.

Поступило в редакцию 27.04.25.

Поступило с исправлениями 29.04.25.

Принято в печать 03.06.25.

*М. А. Джетписов¹, К. Т. Тергемес², С. К. Шерьязов³

^{1,2}Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Оңтүстік Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Ресей Федерациясы, Челябинск қ.

27.04.25 ж. баспаға түсті.

29.04.25 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

БІР ФАЗАЛЫ ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАУ КЕЗІНДЕ ЗАҚЫМДАЛҒАН ЖЕЛІНІ АНЫҚТАУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада өтпелі кедергіні ескере отырып, нөлдік тізбектегі токтардың амплитудасы мен фазалық бұрышын салыстыруға негізделген, жерге бір фазалық қысқа тұйықталу кезінде зақымдалған желіні селективті анықтау әдісін әзірлеу мәселесі қарастырылады. Өтпелі кедергінің болуы зақымды анықтау процесін айтарлықтай қиындатады, себебі зақымдалған желіде немесе ииналарда жерге ағатын бір фазалық токтың және зақымдалмаған желілердің сыйымдылық токтарының азаюына әкеледі. Жұмыста негізгі диагностикалық белгілер ретінде нөлдік тізбектегі токтардың амплитудасы мен фазалық бұрышының талдауына ерекше көңіл бөлінген, бұл ииналарда немесе желілердің тарайтын фидерлерінде қысқа тұйықталу орнын селективті анықтауға мүмкіндік береді. Өтпелі кедергінің шамасының нөлдік тізбектегі ток параметрлеріне әсері талданып, қорғау алгоритмін таңдау критерийлері жасалды. Қорғау принциптерін әзірлеу Matlab бағдарламалық ортасында өтпелі процестерді модельдеуге негізделді, бұл апаттық режимдер динамикасын егжей-тегжейлі зерттеуге және ұсынылатын жерге қысқа тұйықталудан қорғау құрылғысының жұмысқа қабілеттілігін

бағалауға мүмкіндік берді. Нәтижесінде, тек амплитуданы ғана емес, сонымен қатар фазалық бұрышты да ескеретін алгоритмдер ұсынылды, бұл қорғаудың сезімталдығы мен селективтілігін айтарлықтай арттырды. Алынған нәтижелер жерге қысқа тұйықталудан бағытталған қорғаныс жүйелерін жобалауда қолданыла алады, бұл селективтілікті, сезімталдықты және әрекет ету жылдамдығын арттыруға, сондай-ақ тарату желілерінде электрмен жабдықтаудың үздіксіздігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде электр жабдықтарының зақымдануын немесе мерзімінен бұрын істен шығуын алдын алады, техникалық қызмет көрсету және жөндеу шығындарын азайтады және жедел персонал үшін электр жарақаттары қаупін төмендетеді.

Кілтті сөздер: оқшауланған нөлдік нүкте, бір фазалық жерге тұйықталу, өтпелі кедергі, релейлік қорғау, қорғау селективтілігі, модельдеу, өтпелі процестер, Matlab.

* M. A. Jetpissov¹, K. T. Tergemes², S. K. Sheryazov³

^{1,2}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after Gumarbek Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³South Ural State Agrarian University, Russian Federation, Chelyabinsk.

Received 27.04.25.

Received in revised form 29.04.25.

Accepted for publication 03.06.25.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING A DAMAGED LINE DURING A SINGLE PHASE GROUND FAULT

This article is devoted to the development of a selective method for identifying the faulty line during a single-phase-to-ground fault based on comparing the angle and amplitude of zero-sequence currents, taking into account the effect of transient resistance. The presence of transient resistance significantly complicates the fault detection process by reducing the single-phase-to-ground fault current on the damaged line or at the busbars and by affecting the capacitive currents of undamaged lines. Special attention is paid to analyzing the amplitude and phase angle of zero-sequence currents as key diagnostic indicators for selectively identifying the fault location—either on the switchgear busbars or on the outgoing feeder lines. An analysis of the influence of transient resistance magnitude on the parameters of zero-sequence currents was carried out, leading to the development of criteria for selecting protection algorithms.

The principles of protection operation were developed based on modeling transient processes in the Matlab software environment, enabling a detailed study of the dynamics of fault conditions and the evaluation of the proposed ground fault protection's performance. As a result, algorithms considering not only the amplitude but also the phase angle of zero-sequence currents were proposed, significantly improving the sensitivity and selectivity of the protection. The obtained results can be applied in the design of centralized ground fault protection systems to enhance selectivity, sensitivity, and the response speed of directional ground fault protection, ensuring uninterrupted power supply in distribution networks. This, in turn, helps to prevent equipment damage or premature failure, reduce maintenance and repair costs, and lower the risk of electric injuries for operating personnel.

Keywords: isolated neutral, single-phase-to-ground fault, transient resistance, relay protection, protection selectivity, modeling, transient processes, Matlab.

Теруге 09.06.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 25,6. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4417

Сдано в набор 09.06.2025 г. Подписано в печать 30.06.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 25,6. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4417

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

Е-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz