



PS1 – S3-03



Замыкания на землю в изолированных и компенсированных сетях среднего напряжения и их идентификация с помощью цифровых защитных реле

Ст. ВИЧЕВ¹, В. ГАБРОВСКИ²
Technical University¹, ROCON Research Center²
Болгария
export@roconbg.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Замыкание на землю, заземление нейтрали, цифровое защитное реле, сети среднего напряжения.

1 ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования были следующие направления:

- процессы замыкания на землю в сетях с заземлением нейтрали разных типов;
- методы и алгоритмы для разных функций защиты от замыкания на землю и их применение в цифровых реле;
- результаты действия алгоритмов.

Для разработки стратегии заземления нейтрали в сетях среднего напряжения были взяты за основу исследования многих авторов. Окончательный выбор определяется финансовыми и техническими соображениями.

Известны три основных типа заземления нейтрали – изолированное, компенсированное с катушкой Петерсона и заземление через активное сопротивление.

Изучение замыканий на землю имеет долгую историю. За последние 25 лет был накоплен значительный объем данных и проведены исследования с помощью цифровых осциллографов. Ввиду сложности процессов и отсутствия аппаратуры необходимого уровня проблемы, связанные с алгоритмами идентификации замыканий на землю, решались параллельно с развитием цифровой техники.

Возможности большинства современных устройств цифровой защиты ограничиваются частотой дискретизации аналоговых и дискретных входов. Обычно используется частота от 800 до 1000 Гц.

В последние годы с развитием микропроцессорной техники повышение частоты дискретизации в меньшей степени определяет приемлемость стоимости оборудования. Ввиду этой тенденции некоторые крупные компании, такие как ABB и Areva, сделали ряд успешных попыток вывести на рынок защитные реле с частотой в диапазоне 3 – 5 кГц. Это делает возможным применение уже существующих и разработку новых алгоритмов, использующих данные переходных процессов. В настоящий момент появление новых защитных реле с высокой частотой дискретизации является отправной точкой для развития исследований в двух основных направлениях – анализ начального момента и мониторинг содержания высших гармоник во время устойчивого рабочего состояния энергосистемы.

В ходе разработки алгоритмов, использующих содержание высших гармоник и величину тока замыкания на землю 3Io в устойчивом режиме, были приняты два направления –

централизация сбора данных и функции принятия решения [3] и децентрализация на локальном уровне, что более актуально.

Также существует концепция поиска универсального алгоритма для цифровых защитных устройств, действующего при неустойчивом и устойчивом состояниях замыкания на землю. Такой принцип находит применение в некоторых странах с развитыми энергосистемами, например, в России, и рекомендуется многими авторами [3][4][5], которые приводят хорошие результаты его использования. Этот подход особенно эффективен, когда он применяется в устройствах, ориентированных в основном или полностью на функции защиты от замыкания на землю.

Другая тенденция [9], более распространенная в настоящее время – использование отдельных алгоритмов для всех функций защиты. Они могут быть задействованы одновременно или в разные моменты процесса замыкания на землю. Этот подход дает возможность выбора и комбинаций различных функций и алгоритмов защиты в зависимости от конкретных характеристик замыкания и сети.

Согласно приведенным выше положениям основными целями данной работы являются:

- представление и анализ данных устойчивых и неустойчивых процессов замыкания на землю в сетях среднего напряжения, регистрируемых цифровыми защитными устройствами;
- представление и анализ различных алгоритмов функций защиты от замыкания на землю, реализованный в современных цифровых реле;
- анализ результатов работы этих алгоритмов;
- представление конечных выводов.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Общие сведения

В ходе разработки алгоритмов детектирования замыкания на землю авторами выполнен анализ процессов для различных параметров и типов заземления нейтрали. В связи со сложностью процессов и проблемами, связанными с их детектированием, исследование авторов направлено в основном на анализ замыканий на землю в компенсированных сетях. В работе представлен также анализ замыканий на землю и в изолированных сетях.

Так как существуют общеизвестные алгоритмы для сетей с заземлением через активное сопротивление, они не являются предметом обсуждения в данной работе.

2.2 Замыкания на землю в изолированных сетях

Изолированные сети имеют применение в России и некоторых других европейских и азиатских странах, таких как Италия, Испания и Япония.

На рис. 1 показана запись $3U_0$ (первый ряд сверху), $3I_0$ (второй ряд) и $9Q_0$ (третий ряд) при замыкании одной фазы на землю с сопротивлением на землю $R=0$ и начальным углом для поврежденной фазы в момент появления замыкания на землю $\varphi=200^\circ$.

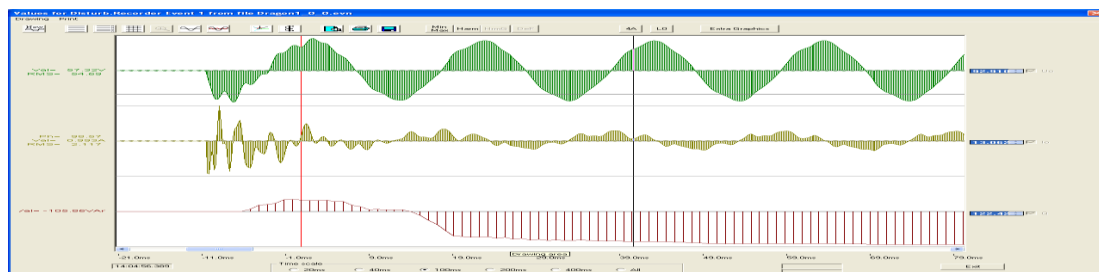


Рис. 1

Как можно видеть, наблюдается выраженный переходный процесс на время 20-30 мс, после чего процесс становится стабильным со значительным содержанием высших гармоник, в основном в токе. Реактивная мощность до 30-40 мс не является установившейся характеристикой.

На рис. 2 показана запись замыкания на землю с относительно высоким активным сопротивлением и начальным фазовым углом 90° в изолированной сети.

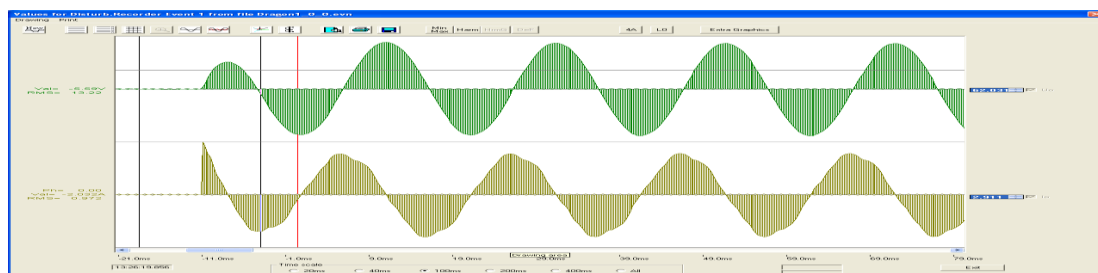


Рис. 2

Форма кривых для $3U_0$ и $3I_0$ показывает, что переходные процессы содержат только короткие и не очень высокие пиковые значения тока $3I_0$ с длительностью несколько миллисекунд. Установившийся процесс характеризуется значительным уменьшением содержания высших гармоник в токе $3I_0$ и практически отсутствии их в напряжении $3U_0$.

Эти и другие эксперименты авторов и результаты многих исследований подтверждают, что даже относительно низкое сопротивление замыкания на землю около $1 \text{ k}\Omega$ имеет значительное влияние на начальный момент переходных процессов. Начальный угол для неисправной фазы при замыкании на землю также влияет в основном на величину первого пикового значения тока $3I_0$.

2.3 Замыкания на землю в компенсированных сетях

Компенсированные сети широко распространены во многих странах Восточной и Северной Европы. Известно, что для этого вида заземления нейтрали используется катушка Петерсона, индуктивное сопротивление которой должно соответствовать емкости сети. На рис. 3 представлена запись с данными для $3U_0$, $3I_0$ и $9P_0$ во время процесса замыкания на землю в компенсированных сетях при начальном значении фазового угла 40° и значении активного сопротивления замыкания на землю $R = 0$.

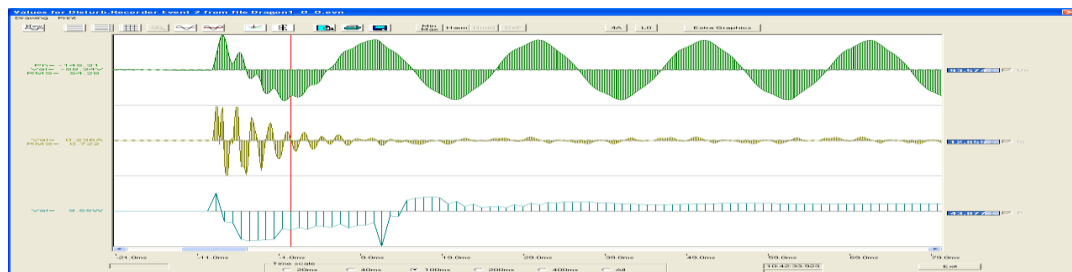


Рис. 3

Анализ показывает, что в отношении изолированных сетей, переходные явления в компенсированных сетях имеют малую продолжительность и характеризуются в основном высокими начальными пиками тока замыкания на землю в течение первых 15-20 миллисекунд.

На рис. 4 представлены кривые для $3U_0$, $3I_0$ и $9P_0$ при замыкании на землю через относительно высокое активное сопротивление и с начальным углом 0° .

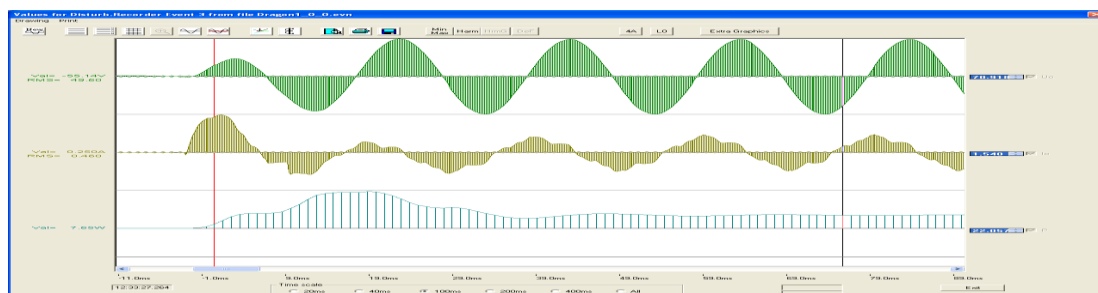


Рис. 4

Как показывает запись, влияние величины сопротивления на параметры замыкания на землю очевидно – практически отсутствуют переходные процессы, за исключением начального не очень высокого пика тока $3I_0$. В то же время анализ результатов показывает, что в случае высокоомных замыканий на землю активная мощность $9P_0$ устойчива даже в начальный момент замыкания.

2.5 Замыкания на землю в кабелях среднего напряжения через перемежающую дугу

Процесс замыканий на землю такого рода характеризуется очень короткими повторяющимися пиками тока $3I_0$, который оказывает тепловой эффект, и пиками напряжения нейтрали, которые могут вызывать пробой изоляции в других точках кабеля и последующее двухточечное замыкание на землю. Этот тип повреждения встречается главным образом в компенсированных сетях.

Развитие замыкания на землю через перемежающую дугу представлено на рис. 5.

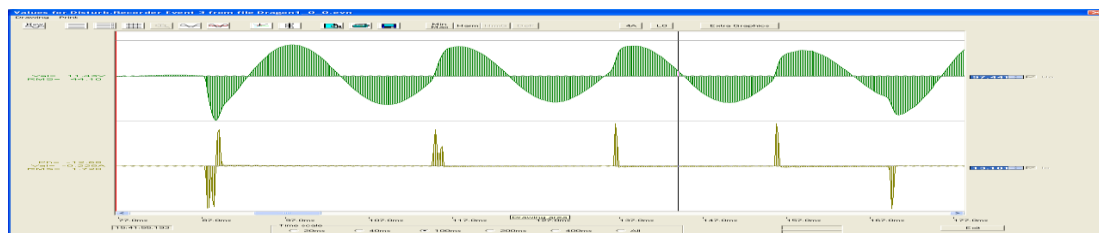


Рис. 5

Вид процесса на рис. 5, исследования авторов и другие работы [9] показывают, что величина пиков тока находится в диапазоне 0,1 – 5 кА, они имеют длительность 400–800 мкс, и пауза между ними 5–300 мс.

Все записи, которые показаны на рис. 1, 2, 3, 4 и 5, сделаны на цифровом защитном реле при частоте дискретизации 5 кГц для аналоговых и дискретных входов.

3 АЛГОРИТМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТНЫХ РЕЛЕ

3.1 Общие сведения

На основе предварительного анализа текущей ситуации, представленной в п.1, способы детектирования замыканий на землю можно разделить на несколько категорий.

Методы использования данных переходных процессов:

- метод для переходных процессов с использованием данных первого момента процесса замыкания в компенсированных и изолированных сетях среднего напряжения;
- для неустойчивых процессов – метод детектирования перемежающей дугой повторяющихся замыканий на землю в подземных кабелях в компенсированных сетях.

Методы использования данных устойчивого режима работы:

- ваттметрический метод – для компенсированных сетей
- метод полной проводимости (активная проводимость, реактивная проводимость) – для компенсированных и изолированных сетей
- метод использования содержания высших гармоник в токах короткого замыкания

3.2 Защитные функции, использующие переходные процессы во время замыкания на землю

3.2.1 Защита по переходным процессам

В алгоритме защиты по переходным процессам используются значения тока и напряжения $3I_0$ и $3U_0$ в начальный момент переходного процесса.

Как видно из данных, относящихся к исследованиям замыканий на землю, приведенным в п. 2.2 и 2.3, на величину тока во время переходных процессов влияет в основном активное сопротивление заземления в точке замыкания и в некоторой степени начальный фазовый угол неисправной фазы. Исследования переходных явлений в компенсированных сетях, как можно видеть из анализа, приведенного в п. 2.3, показывают, что в начальный момент переходный ток

замыкания на землю $3I_0$ имеет значительную величину, которая достигает 10-кратного номинального значения тока линии питания. Другой особенностью, которую отражают рис. 3 и рис. 4, является весьма малая длительность – менее 1 мс. Анализ также показывает, что базовым критерием для локализации замыкания на землю является знак тока нейтрали $3I_0$ и напряжения $3U_0$ в начальный момент.

На основе исследований авторов и анализа данных статей [7][8][9] разработан алгоритм работы защиты. В первый момент замыкания проверяются значения $3I_0$ и $3U_0$ и их знак. В зависимости от знака (если двое с одноименным, или разноименным знаком) алгоритм определяет местонахождение неисправности – в защищаемой линии или вне ее.

Другой важной характеристикой является определение типа замыкания на землю в отношении длительности – устойчивый или переходный процесс. Мониторинг выполняется по значениям основной гармоники напряжения, и в то же время он должен быть нечувствительным к моменту включения линии.

Термин «начальный момент», используемый в работе, означает мгновенные значения тока и напряжения и их знаки при первом измерении после момента, когда ток нейтрали становится больше заданного порога.

Проведенный авторами анализ защиты по переходным процессам в реальном цифровом устройстве показывает, что этот тип алгоритма защиты является надежным и чувствительным для детектирования низкоомных переходных и устойчивых замыканий на землю.

На рис. 6 приведены данные процесса и работы защиты в случае устойчивого низкоомного замыкания на землю в компенсированной сети. Данные замыкания на землю включают в себя ход изменения значений $3U_0$ и $3I_0$ и активацию выхода «старт» защиты в начальный момент переходного процесса.

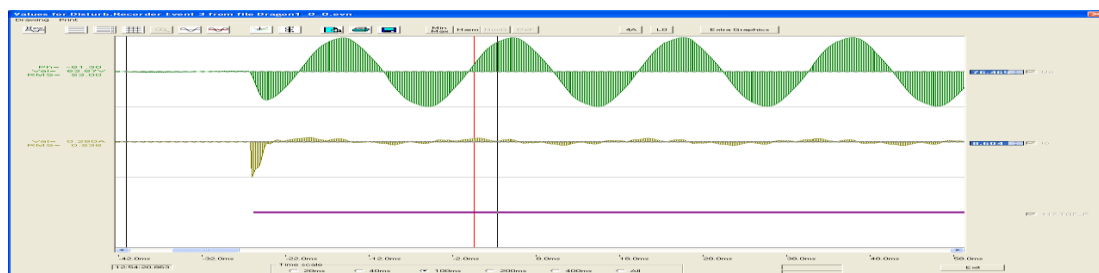


Рис. 6

Развитие относительно низкоомного замыкания на землю в изолированной сети представлено на рис. 7.

Многочисленные эксперименты, проведенные авторами, а также кривые на рис. 7 показывают, что защита по переходным процессам при замыкании на землю может применяться не только для компенсированных, но также для изолированных сетей.

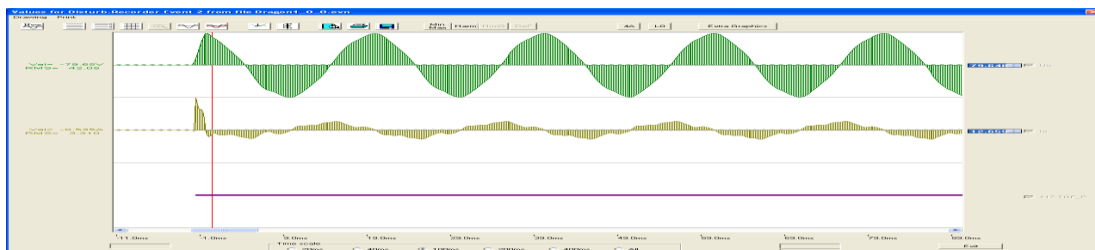


Рис. 7

Функция детектирования переходных процессов при замыкании на землю, помимо генерации аварийного сигнала, может активировать другой выход, который может быть назначен для команды отключения. Это будет выполнено в случае, если длительность замыкания больше соответствующей заданной задержки. Для этой цели предназначена вторая степень.

3.2.2 Защита от перемежающейся дугой

Это функция предназначена для защиты подземных кабелей среднего напряжения от перемежающейся дугой на землю, вызванных нарушением изоляции. Исследования показывают, что сопротивление замыкания на землю в этом случае имеет малую величину в диапазоне нескольких ом и очень высокие пиковые значения токов короткого замыкания – до нескольких кА.

В случае повторяющихся пробоев изоляции в кабеле среднего напряжения пики тока обычно присутствуют не только в неисправной линии, но также в других линиях. Разница заключается в том, что в неисправной линии значения могут быть в несколько раз выше, чем в исправных линиях. Пики тока и напряжения нейтрали $3I_0$ и $3U_0$ в первый момент каждого последующего пробоя в неисправной линии практически находятся в фазе (знаки одинаковы – обе переменные являются положительными или отрицательными).

В защите используется алгоритм определения наличия, знака, числа импульсов и интервала между ними. Защита активируется специальным функциональным блоком для идентификации переходных процессов при замыкании на землю с использованием значений $3U_0$ и $3I_0$. В этом блоке находится счетчик импульсов для неустойчивых замыканий на землю. Счетчик увеличивает число 1, если функциональный блок записывает новый импульс переходного процесса замыкания на землю, который отвечает предварительно заданному критерию.

Как и для защиты от переходных процессов при замыкании на землю, и здесь успешная работа алгоритма сильно зависит от скорости дискретизации, которая должна быть достаточной для регистрации достаточного числа точек, для надежной идентификации величины и длительности импульсов. Данные для $3I_0$ и $3U_0$ и для работы функции во время замыкания на землю через перемежающейся дугой в компенсированных сетях приведены на рис.8.

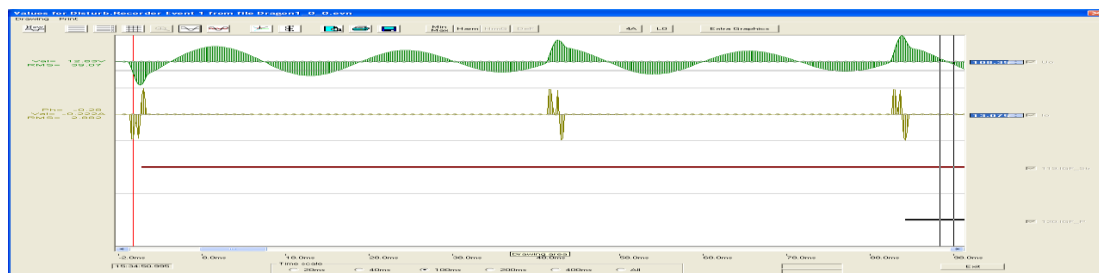


Рис. 8

Момент запуска защиты, от первого пика, и затем непрерывное срабатывание после определенного числа импульсов (в данном случае трех), можно видеть на рис. 8. В зависимости от числа зарегистрированных импульсов защита может запустить дополнительную вторую ступень. Вторая ступень может использоваться для генерации команды отключения для выключателя неисправной линии.

3.3 Защитные функции, использующие данные устойчивого процесса замыкания на землю

3.3.1 Защита с оценкой содержания высших гармоник в токе замыкания на землю $3I_0$

Основным критерием для этого типа защиты является то что в неисправной линии ток нейтрали с отфильтрованной основной гармоникой есть наибольшее значение. Применение данного алгоритма ограничено, так как амплитуда высших гармоник тока и их содержание могут быть разными в разных случаях. Алгоритм, разработанный авторами, в значительной степени позволил уменьшить эти ограничения через относительного сравнения токов высших гармоник в разных линиях в один и тот же момент. Нет необходимости в центральном устройстве для относительного сравнения токов замыкания на землю, так как используется один и тоже тип характеристики зависимой выдержки времени для всех линий и блокировка всех остальных линий от линии, в которой первой срабатывает защита по высшей гармонике.

3.3.2 Защита по активной мощности при детектировании замыкания на землю

Защита подходит для работы только в компенсированных сетях. В алгоритме, который применяется авторами в конкретной цифровой защите, используются три основных параметра – величина и знак активной мощности $P_0 = 3U_0 I_0 \cos \varphi_0$ и величина напряжения нейтрали $3U_0$.

3.3.3 Защита по реактивной мощности при детектировании замыкания на землю

Алгоритм для защиты по реактивной мощности является разновидностью защиты по активной мощности и подходит для детектирования замыканий на землю в изолированных сетях. Основная разница заключается в том, что в этом алгоритме защиты используется реактивная мощность $Q_0 = 3U_0 I_0 \sin \varphi_0$.

3.3.4 Защита по полной проводимости

Практический опыт авторов с устройствами цифровой защиты и работами других авторов подтверждает, что алгоритмы, использующие величины основной гармоники тока I_0 и напряжения $3U_0$, дают лучшие результаты, особенно для устойчивого состояния замыканий на землю.

В течение последних лет многие авторы [1][2][9] часто рекомендуют для современных цифровых реле новый эффективный алгоритм, использующий данные устойчивого замыкания на землю – защиту по полной проводимости.

В настоящее время обычный вариант с использованием полной проводимости Y_0 имеет множество недостатков, связанных с необходимостью в данных для Y_0 со всех линий, соединенных с одним шинопроводом, и с необходимостью автоматического регулирования для катушки Петерсона [1][2].

Некоторым улучшением алгоритма является включение направленного узла за счет использования активной проводимости G_0 как основной переменной. Главным недостатком защиты по активной проводимости, который может иметь место также в функции защиты по активной мощности, является то, что чувствительность зависит от текущего небаланса сети. Решением проблемы является применение алгоритма, использующего значения активной проводимости, рассчитанные через отношение приращений тока I_0 и напряжения U_0 .

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} [\Delta I_0 / \Delta U_0]$$

где ΔG_0 , ΔI_0 , ΔU_0 являются приращением проводимости, тока нейтрали и напряжения, соответственно.

Этот метод известен как Приращение активной проводимости [1]. Дополнительным развитием метода является Адаптивное приращение активной проводимости [2], в котором приращения находятся в диапазоне между текущим значением ΔG_0 и его значением перед несколькими периодами и дополнительно одновременным сравнением с текущим записанным максимальным значением.

В результате оценки упомянутых вариантов и анализа результатов различных исследований и экспериментов авторов алгоритм, основанный на методе Адаптивного приращения активной проводимости был принят для практического приложения. Это решение позволило значительно улучшить чувствительность защиты и снизить до минимума влияние небаланса в нормальном режиме работы энергосистемы.

4 ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов исследований, выполненных авторами, сделаны следующие выводы.

В случае нулевого или нискоомного сопротивления замыкания на землю в изолированных или компенсированных сетях можно наблюдать быстрые переходные процессы, которые характеризуются в основном очень короткими пиками тока с высокой амплитудой и длительностью менее 1 мс.

Основным критерием детектирования неисправной линии во время переходных процессов являются только величина и знак тока и напряжения нейтрали в первый момент неисправности.

Для успешной работы алгоритмов защиты по переходным и неустойчивым процессам и по содержанию высших гармоник рекомендуется частота дискретизации 5 кГц или более.

Согласно результатам проведенных экспериментов и исследований замыканий на землю с различными параметрами можно утверждать, что защита от замыкания на землю по переходным процессам имеет существенное преимущество для быстрого и адекватного детектирования кратковременных и устойчивых низкоомных замыканий на землю. В этой связи можно рекомендовать использовать эту защиту в сочетании с другими, более чувствительными к высокоомным замыканиям на землю, такими как защита по активной проводимости и по полной проводимости.

Эффективная совместная работа разных алгоритмов при продолжительном замыкании на землю может быть достигнута через подходящие настройки отдельных защитных функций. Таким образом, устройство обладает гибкостью и возможностью быстрого необходимого изменения текущего рабочего алгоритма в зависимости от конкретных характеристик замыкания на землю и сети.

Возможна реализация защиты по содержанию высших гармоник без необходимости в центральном устройстве. Единственным требованием является наличие защитных устройств, которые поддерживают один тип характеристик зависимой выдержки времени.

Эксперименты, проведенные авторами, подтверждают, что защита по активной проводимости имеет преимущества над другими видами защиты от замыкания на землю, использующими данные устойчивого процесса. Это особенно относится к случаю высокоомных замыканий на землю, поскольку в алгоритме активной проводимости используется отношение тока нейтрали и напряжения, в отличие от защиты по мощности, в которой используется их произведение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Roberts J., Altuve H., Hou D. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems / Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA/.
- [2] Roberts J., Hou D., Calero F., Altuve H. New directional ground fault elements improve sensitivity in ungrounded and compensated networks/ Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA/.
- [3] Гусенков А., Шуин В. О принципах выполнения селективной сигнализации и защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ/ Ивановский государственный энергетический университет.
- [4] Шалин А.И. д.т.н., профессор, ведущий специалист релейная защита от замыканий на землю в сетях с резистивным заземлением нейтрали/ООО «ПНП БОЛИД», г. Новосибирск, Россия.
- [5] Shuin V., Solodov V. Principles of microprocessor devices running for single-phase ground faults protection and selective warning in average voltage networks with resonant neutral ground / Ivanovo State Power University Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems Cheboksary, September 9-13, 2007).
- [6] Lorenc J., Musierowicz K., Kwapisz A. Detection of the Intermittent Earth Faults in Compensated MV Network /IEEE Bologna Power tech Conference, June 23th – 26th 2003.
- [7] Transient earth-fault relay SIPROTEC 7SN600 Instruction Manual Order No. E50417-G1176-C128.
- [8] Lukac M. Determination of earth faulted line with transient method / HEP-ODS Elektra Zagreb – Croatia 20th International Conference on Electricity Distribution Prague, 8-11 June 2009.
- [9] REF 6xx Technical Manual 2009/Section 4 Protection functions.