

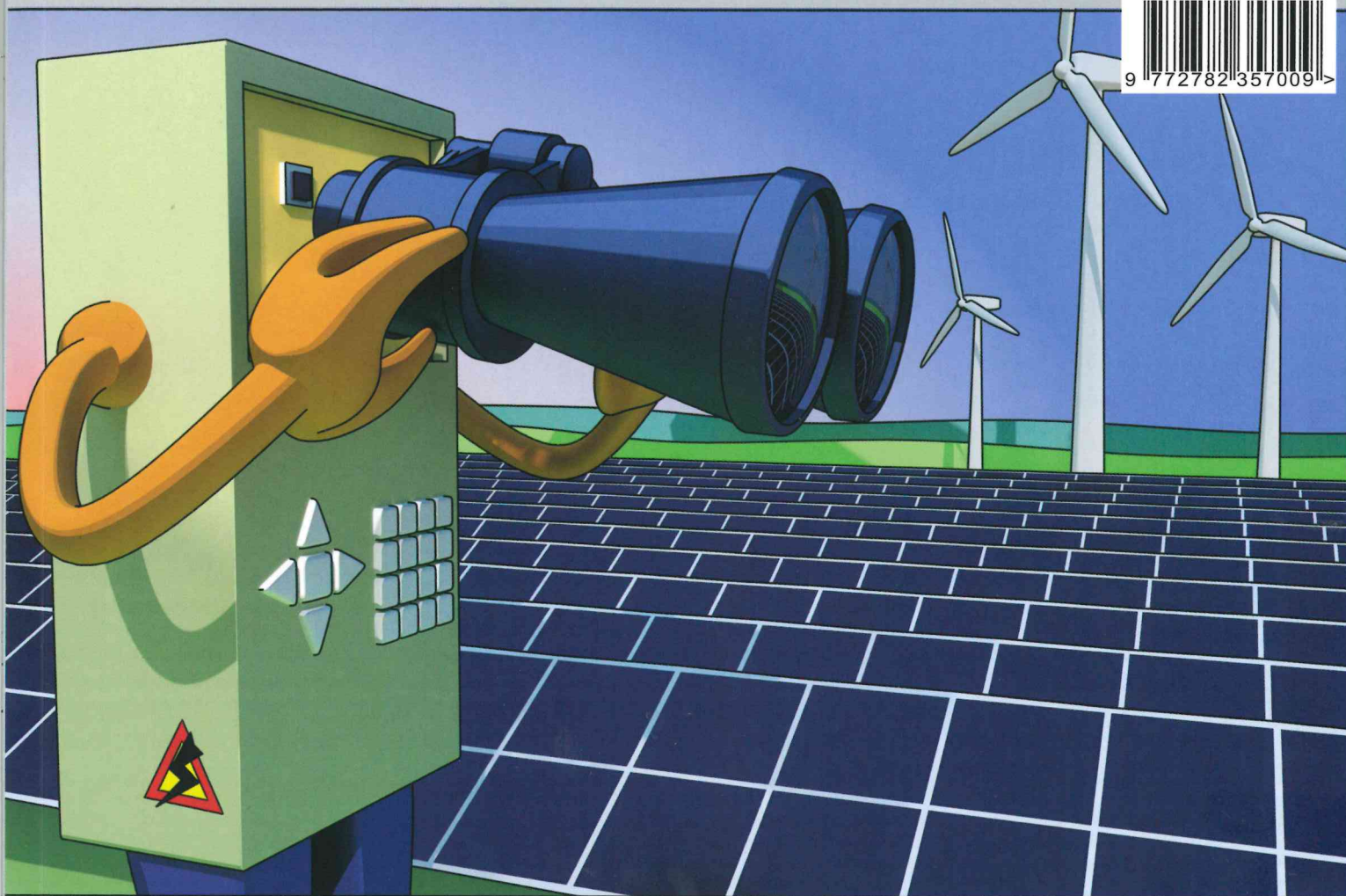
# Релейщик

Издательский дом «Вся электротехника»

Журнал для специалистов в области цифровой техники и технологий для энергетики

01 (48) 2024

ISSN 2782-3571



## Релейная защита и автоматика распределительных сетей с ВИЭ

- |           |   |  |           |
|-----------|---|--|-----------|
| <b>6</b>  | Проблемы функционирования релейной защиты в электрических сетях 110–220 кВ с несимметричной тяговой нагрузкой                           | Результаты ОПЭ Интеллектуальной системы РЗА с миграцией функций на подстанции 110 кВ   | <b>20</b> |
| <b>12</b> | Контроль исправности цепей напряжения по величине векторной невязки напряжений «звезды» и «разомкнутого треугольника»                   | Применение устройств РЗА линий электропередачи, отходящих от ВИЭ   | <b>32</b> |
| <b>26</b> | Организация управления режимами виртуальной инерции ветроэлектрической станции, работающей в сети с возобновляемыми источниками энергии | Сравнение основных схмотехнических решений статических синхронных продольных компенсаторов на базе многоуровневых преобразователей   | <b>38</b> |
|           |   | Вопросы реализации встроенных криптографических средств защиты информации при межсетевом взаимодействии устройств ВАПС с использованием стека протоколов МЭК 61850-8-1 (GOOSE) | <b>42</b> |

# Применение устройств РЗА линий электропередачи, отходящих от возобновляемых источников электроэнергии

На сегодняшний день количество объектов генерации на принципах возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), внедряемых в энергосистему России, продолжает увеличиваться. Согласно статистике, объем электроэнергии, произведенной ВИЭ в ЕЭС России с 2018 по 2022 год, увеличился в 6 раз [1]. Значительную долю в электроэнергии, выработанной ВИЭ, занимают ветровые (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции [2]. ВЭС IV типа и СЭС подключены к электрической сети переменного тока через полупроводниковый инверторный преобразователь. Характерная особенность инверторных преобразователей – неизменность величины тока на его выходе при изменении величины внешнего сопротивления в широком диапазоне. Внутреннее сопротивление инверторного преобразователя значительно превосходит сопротивление внешней сети, то есть для внешней сети инверторные преобразователи являются источниками тока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** релейная защита и автоматика, возобновляемые источники энергии, защиты с абсолютной и относительной селективностью, информационные параметры для РЗА, симметричные и аварийные составляющие

**Авторы:**  
Ефремов В.А.,  
Ефремов А.В.,  
Таныгин С.А.,  
Смирнов С.Ю.

Согласно [3], величина тока подпитки от ВЭС и СЭС, подключенных к сети через инверторный преобразователь, в установившемся режиме КЗ может находиться в диапазоне от номинального тока  $I_{ном}$  до  $1,5I_{ном}$ . Такие величины тока значительно меньше тока подпитки КЗ от традиционных источников электроэнергии (синхронных машин). Значения токов подпитки КЗ от инверторного преобразователя зависят от его конструктивных особенностей, алгоритмов работы системы автоматического управления и технологических защит. Кроме того, токи подпитки КЗ в значительной степени зависят от способа подключения ин-

верторного преобразователя к сети. Еще одной характерной особенностью ВЭС и СЭС с инверторными преобразователями является возможность не только выдачи, но и потребления мощности из сети в зависимости от режимов генерации и электропотребления в узлах с ВЭС и СЭС. Это условие может привести к возникновению реверсивных потоков электроэнергии в распределительной сети [4].

Основные принципы работы существующего комплекса релейных защит (РЗ) линий построены на использовании в качестве источника электроэнергии источника электродвижущей силы, внутреннее сопротивление которого имеет

близкое к нулю значение. Применение инверторных преобразователей для интеграции ВЭС и СЭС в распределительные сети требует пересмотра принципов функционирования классических алгоритмов РЗ линий, так как значения тока подпитки КЗ на выходе инверторного преобразователя близки к рабочему току и практически не изменяются на протяжении всего переходного процесса [5]. Это условие может привести к снижению чувствительности или полному отказу в срабатывании классических функций РЗ, использующих ток в качестве основного или одного из основных информационных параметров для идентификации повреждения в защищаемой зоне. Таким образом, интеграция современных ВЭС и СЭС, подключаемых к электрической сети через инверторный преобразователь, приводит не только к существенным изменениям схемно-режимных условий работы распределительных сетей, но и к возникновению проблем с функционированием классических устройств РЗ линий, отходящих от подстанций с ВЭС и СЭС.

Селективное действие защит, установленных со стороны ВЭС и СЭС с инверторными преобразователями, может быть осуществлено при использовании в качестве информационных параметров фазных напряжений, их симметричных и аварийных составляющих.

В статье приведены способы использования измерительных органов тока и напряжения для защит линий, установленных на подстанциях с ВЭС и СЭС, подключенных к электрической сети напрямую через инверторный преобразователь. Определены информационные параметры, которые могут быть применены в алгоритмах защит объектов электроэнергетики, содержащих нестабильную генерацию, подключенную к сети с помощью инвертора. Предлагается гибридный способ построения защит и алгоритм, позволяющий определить повреждения на всей протяженности линии и за её пределами по направлению протекания аварийной мощности. Кроме того, в статье обоснована необходимость обмена логическими сигналами между комплектами защит линий на подстан-

ции с ВИЭ на базе инверторных преобразователей. Применение нового алгоритма функционирования защит линий, отходящих от подстанций с ВЭС и СЭС позволяет обеспечить выполнение всех основных требований, предъявляемых к релейной защите.

## ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С ВЭС И СЭС

### Особенности функционирования ВЭС и СЭС на базе инверторных преобразователей в режиме короткого замыкания

Преобладающая доля электроэнергии в мире и РФ генерируется синхронными машинами. Характерной особенностью токов короткого замыкания (КЗ) в традиционной энергетике является зависимость аварийных токов от физических характеристик энергосистемы: электрических параметров машины, сопротивления элементов сети до места КЗ. В данном случае характер и продолжительность переходного процесса обусловлены сопротивлениями элементов электрической цепи.

Основное отличие токов подпитки КЗ традиционных источников генерации от токов подпитки КЗ генераторных установок с инвертором (ГУИ) заключается в наличии у каждой такой электроустановки собственного контроллера с целым рядом заложенных в него алгоритмов (стратегий) управления открытием и закрытием силовых полупроводниковых ключей. В данном случае, ток подпитки короткого замыкания определяется не физическими характеристиками энергосистемы, а алгоритмами системы автоматического управления (САУ), заложенными в контроллер. Алгоритмы управления инвертером регулируют выдачу активной и реактивной мощности ГУИ в сеть, уровень выходного тока и напряжения (функция инжекции реактивного тока), а также частоту выходных электрических величин, как в нормальном, так и в аварийном режиме работы электрической сети [6,7].

На начальных этапах развития переходного процесса максимальное значение тока подпитки КЗ от ГУИ, в об-

щем случае (вне зависимости от типа ГУИ), не превышает  $2,5I_{ном}$  [8]. В частных случаях, величина тока подпитки в начальный момент КЗ может зависеть от способа подключения инверторного преобразователя к сети, а также от алгоритмов функционирования технологических защит инверторного преобразователя. Например, для ветроэлектрической установки (ВЭУ) III типа (асинхронный генератор двойного питания – АГДП) в начальный момент переходного процесса характерно увеличение тока КЗ до значений (4–6)  $I_{ном}$  [5, 8]. Это обусловлено тем, что ротор данной установки подключён к сети через полупроводниковый конвертер, а статор – напрямую, то есть поведение АГДП определяется совместной реакцией асинхронной машины и преобразователя. Близкие КЗ могут приводить к срабатыванию защиты полупроводникового преобразователя; при этом и форма, и значение токов в начальный момент КЗ изменяются: начальное значение тока и время затухания периодической составляющей тока статора кратковременно (20–40 мс) уменьшаются до значений, не превышающих (2–2,5)  $I_{ном}$ . Для ВЭУ IV типа и СЭС столь резкое увеличение тока подпитки КЗ в начальный момент времени не характерно, поскольку такие установки подключаются к сети напрямую через инвертор, ограничивающий величину выходного тока. Максимальное действующее значение тока подпитки КЗ от таких на начальном этапе переходного процесса не превышает  $1,5I_{ном}$  [10]. Кроме того, величина токов подпитки КЗ от ВЭУ в начальный момент переходного процесса может зависеть от скорости ветра, но через 15–20 мс данный фактор оказывает влияние в меньшей степени [9].

Значения токов, протекающих через инверторный преобразователь в режиме установившегося КЗ в прилегающей сети, ограничиваются алгоритмом САУ с целью недопущения превышения ими порога по термической стойкости силовых полупроводниковых ключей и составляют примерно (1,2–1,5)  $I_{ном}$  [3, 8].

Для регулирования уровня напряжения на выходе инверторного преобразователя современные ГУИ принято оснащать функцией инжекции реактивного тока. Регулирование напряжения

Ефремов В.А., Ефремов А.В., Таныгин С.А., Смирнов С.Ю., ООО «Релематика», ЧувГУ им. И.Н. Ульянова

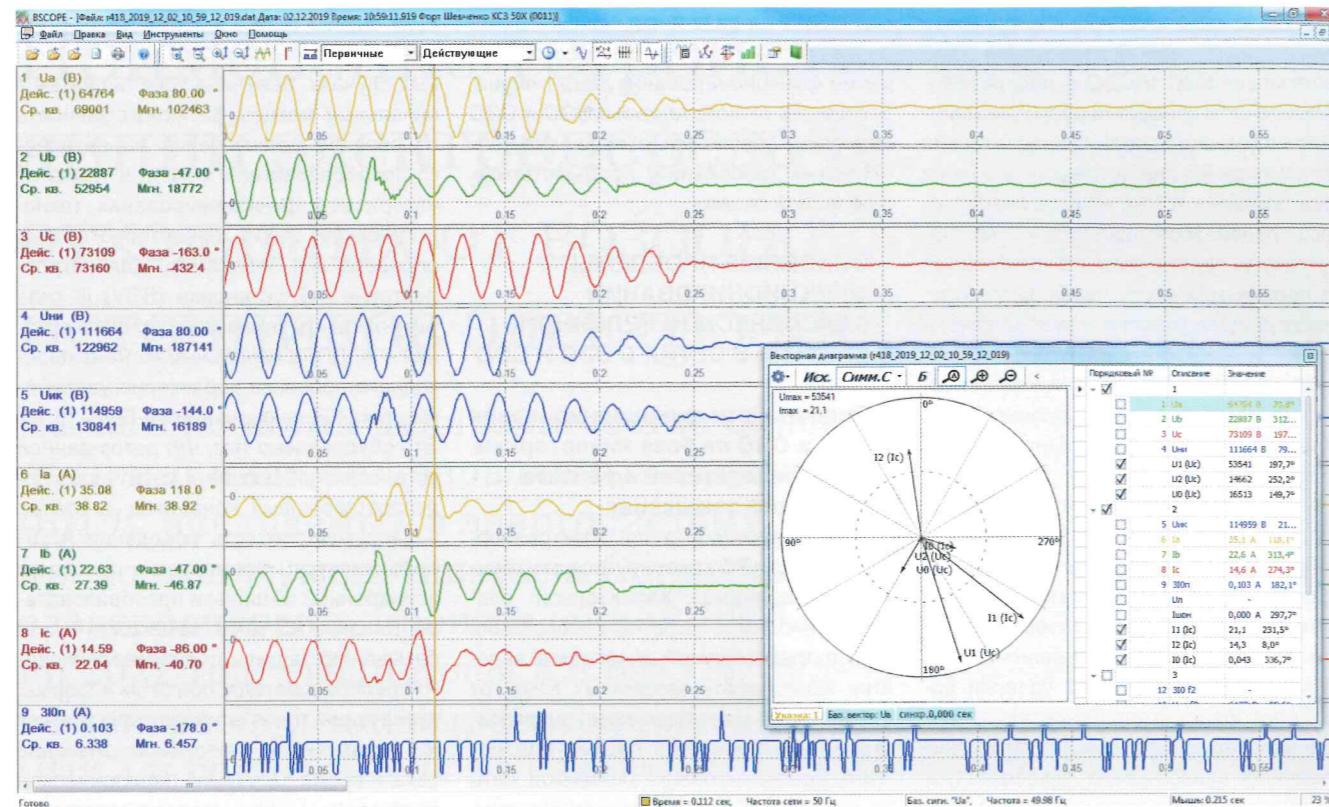


Рис. 1. Осциллограмма токов и напряжений при КЗ в фазе В, замеряемых на подстанции с подключенной ВЭС

осуществляется посредством инъекции в сеть симметричного реактивного тока (тока прямой последовательности [11]) пропорционального снижению напряжения на выходе инвертора. Напряжение регулируется в течение одного периода промышленной частоты согласно определённому, зависящему от объекта, графику инъекции реактивного тока от глубины просадки напряжения при КЗ в прилегающей сети. Помимо инъекции реактивного тока прямой последовательности, в работу вводится функция инъекции тока обратной последовательности [11]. Данная функция необходима для предотвращения возникновения перенапряжений в неповреждённых фазах в режимах несимметричных КЗ в прилегающей сети.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что приведённые особенности работы ГУИ в режимах коротких замыканий оказывают существенное влияние на характер переходного процесса при возникновении КЗ в сети и обуславливают различие токов подпитки КЗ от энергосистемы, содержащей традиционные источники электроэнергии, и токов подпитки от ВЭС или СЭС.

**Анализ режимов сети, содержащей ВЭС/СЭС**

В ходе анализа осциллограмм аварийных режимов на линии, отходящей от подстанции с ВЭС, была выявлена характерная особенность токов подпитки КЗ от ВЭС на базе инвертора. Согласно приведённой на рис. 1 осциллограмме токов и напряжений, токи неповреждённых фаз в значительной степени превосходят ток повреждённой фазы. При КЗ фазы В на землю, токи в неповреждённых фазах А и С составляют 35.1 А и 14.6 А соответственно, ток повреждённой фазы В составляет всего 22.63 А, то есть ток неповреждённой фазы В примерно в 1.5 раза меньше тока в неповреждённой фазе А. Данная ситуация возникает в результате значительного снижения напряжения в повреждённой фазе В, напряжение падает до значения 22.87 кВ. Возможно, что значительное расхождение между током повреждённой фазы В и неповреждённой фазы А обусловлено стратегией управления, выбранной алгоритмом, заложенным в инвертор.

Данная особенность работы ВЭС на базе инверторного преобразователя позволяет сделать вывод о том, что

токи подпитки КЗ со стороны ВЭС недостаточно информативны и не могут быть использованы в качестве информационных параметров для целей РЗА.

**Особенности функционирования РЗА линий, отходящих от ПС с ВЭС и СЭС на основе инверторных преобразователей**

На основе приведённых особенностей функционирования ВЭС и СЭС на базе инверторных преобразователей и анализа аварийных осциллограмм с подстанции с ВЭС, можно сделать ряд выводов относительно вероятных особенностей работы устройств РЗ, устанавливаемых на линиях, отходящих от подстанций с ВЭС (СЭС).

**Дифференциально-фазная защита линии (ДФЗ)**

Дифференциально-фазная защита линии электропередачи – это основная защита с абсолютной селективностью, состоящая из двух и более связанных каналов связи и устанавливаемых по концам линии электропередачи устройств (полукомплектов), принцип действия которой основан на сравне-

нии фазовых углов сигналов, получаемых с выхода комбинированного фильтра токов каждого полукомплекта. Оба полукомплекта сравнивают фазы комбинации токов прямой и обратной последовательностей. При КЗ на защищаемой линии фазы токов по концам линии совпадают (при условно-положительном направлении тока от шин в линию), в результате орган сравнения фаз срабатывает и действует на отключение линии. При внешнем КЗ токи по концам защищаемой линии находятся в противофазе, орган сравнения фаз при этом не срабатывает и ДФЗ не действует на отключение линии.

Для ЛЭП, отходящих от ВЭС/СЭС, в случае подавления инвертором тока обратной последовательности, разности фаз токов с выходов комбинированных фильтров обоих полукомплектов могут, при внутреннем КЗ, оказаться несоответствующими ожидаемым и привести к ошибкам в работе. Поэтому в классическом исполнении функция ДФЗ неприменима на линиях, отходящих от ВЭС/СЭС на базе инверторов, так как в случае подавления токов обратной последовательности инвертором, пропадает возможность формирования токов манипуляции ВЧ-передатчика.

**Направленная высокочастотная защита (НВЧЗ)**

Пусковые органы НВЧЗ используют в качестве основных информационных параметров – напряжение и ток обратной последовательности (ОП). Для повышения чувствительности, в качестве пусковых органов совместно с реле тока ОП и РНМ ОП используются реле сопротивления. Из приведённого ранее анализа функционирования ДФЗ линий с ВЭС/СЭС следует, что в случае подавления токов обратной последовательности инвертором, возможность формирования пусковых сигналов НВЧЗ пропадает. Применение реле сопротивления в качестве одного из пусковых органов также не даёт гарантии корректного срабатывания защиты, поскольку работа реле сопротивления в значительной степени зависит от тока в месте установки защиты, характер изменения которого, с учётом наличия ГУИ непредсказуем. Однако, как показано в [14] использование НВЧЗ на таких объектах возможно в том случае,

если в качестве защиты применить гибридную защиту с абсолютной селективностью с использованием логических сигналов от НВЧЗ на питающем конце линии. Особенностью такой защиты, как показано в [14] является использование ИО напряжения для пуска защиты, а также изменённая логика работы ВЧ-связи, которая со стороны питающего конца выполняет разрешающие функции, а со стороны ПС с ВЭС/СЭС – блокирующие.

**Защиты с высокочастотной блокировкой**

По принципу действия эти защиты схожи с НВЧЗ. Их информационная база также соответствует НВЧЗ, что предполагает аналогичные решения при защите линий с ВЭС.

**Дифференциальная защита линии (ДЗЛ)**

При наличии волоконно-оптической линии связи на линии с ВЭС, существует возможность применения дифференциальной защиты линии. Дифференциальная защита линии является основной защитой линии с абсолютной селективностью, которая, как правило, состоит из двух и более объединённых каналов передачи информации и устанавливаемых по концам линии электропередачи устройств (полукомплектов), принцип действия которой основан на постоянном сравнении векторной суммы комплексных токов, измеряемых полукомплектами, со значением заданной пороговой величины. При внешних повреждениях, по отношению к защищаемому объекту, векторная сумма токов близка к нулю, а при повреждениях внутри защищаемого объекта величина дифференциального тока равна току в месте повреждения. Для отстройки от небалансов в дифференциальном токе при внешних повреждениях, зависящих от величины тока, вызванных, в основном, различием условий работы и характеристик трансформаторов тока, применяется торможение. Торможение – это увеличение пороговой величины срабатывания в зависимости от тока торможения.

В случае внешнего КЗ сложение значений токов по сторонам линии одинаковые, поэтому оба полукомплекта ДЗЛ получают близкий к нулевому результат их сложения. В результате устройство

ДЗЛ не выдаст команду на отключение линии.

В режиме внутреннего КЗ значение тока подпитки места замыкания со стороны энергосистемы будет существенно больше значения рабочего тока, а ток подпитки со стороны подстанции с ВЭС/СЭС будет ограничен значением не более 1–1,5 максимального рабочего тока. При этом на обоих полукомплектах будет получен результат «высокое значение тока» вне зависимости от сценария управления характеристиками тока и напряжения со стороны инвертора. В результате устройство ДЗЛ выдаст команду на отключение линии.

Таким образом, малая величина тока от ГУИ не должна оказывать влияния на работу ДЗЛ до тех пор, пока сумма токов превышает величину порога срабатывания. Это условие обеспечивается при работе ГУИ на мощную энергосистему с малым эквивалентным сопротивлением, что обеспечивает основной вклад в величину тока КЗ. Возможное изменение, в переходном процессе при КЗ, фазового угла тока от ГУИ не должно приводить, ввиду малости этого тока, к ложной работе устройств.

Таким образом, из всех защит с абсолютной селективностью, применяемых для защиты ЛЭП, в классическом варианте может быть использована только ДЗЛ. При этом не рекомендуется использовать пофазное сравнение токов из-за недостаточной информативности токов с подстанции с ВЭС. Вместо этого рекомендуется перейти на сравнение токов ДЗЛ, по прямой и обратной последовательностям.

**Максимальная токовая защита (МТЗ) и токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП)**

Рассматривая защиты, основанные на применении в качестве основного информационного параметра тока, протекающего в месте установки защиты (МТЗ, ТЗНП), следует отметить, что их классическое применение с реле максимального действия не может быть реализовано на линиях, отходящих от ВЭС и СЭС, поскольку, как уже было определено ранее – ток подпитки КЗ от ГУИ в значительной степени зависит от стратегии управления инверторным преобразователем.

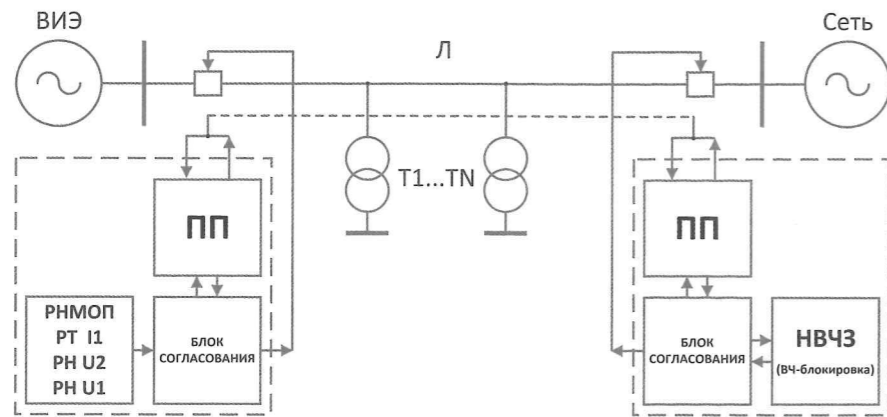


Рис. 2. Структурная схема защиты

Это означает, что предсказать характер изменения токов в повреждённых и неповреждённых фазах при КЗ в зоне действия ступени защиты невозможно. Возможность применения адаптивных защит линий [12] также ограничена из-за соизмеримых величин аварийных составляющих в повреждённых и неповреждённых фазах, при КЗ в зоне действия ступени защиты. На приведённой на рисунке 1 осциллограмме токов и напряжений показаны величины аварийных составляющих при КЗ в зоне действия защиты. Малая величина аварийных составляющих при КЗ обусловлена тем, что токи подпитки КЗ, протекающие в месте установки защиты, являются токами от ГУИ. Использование аварийных симметричных составляющих не может быть рекомендовано из-за того, что в случае возникновения КЗ «за спиной» защиты, ток, протекающий через защиту, в десятки раз превышает ток при КЗ в зоне действия защиты. Возникающие небалансы токов будут значительно превышать информационные аварийные токи при КЗ в зоне действия защиты.

Токовые защиты нулевой последовательности применяются для защиты ЛЭП от КЗ на землю и включаются на токи и напряжения нулевой последовательности. Токовые защиты нулевой последовательности согласно [13] должны иметь орган направления мощности (ОНМ) нулевой и (или) обратной последовательности. Работа ОНМ, использующего токи обратной последовательности, может оказаться некорректной ввиду того, что эти токи подавляются инвертором.

**Дистанционная защита (ДЗ)**

В ДЗ вычисление сопротивления до места КЗ выполняется в зависимости от определения вида повреждения и поврежденных фаз. Поскольку в алгоритмах решения этих задач могут использоваться симметричные составляющие, то, с учетом рассмотренного выше влияния инверторов на токи и напряжения в переходном процессе, результат решения может оказаться некорректным.

Таким образом, говоря о защитах с относительной селективностью для линий 110 кВ и выше с ВИЭ на базе инверторных преобразователей, следует отметить, что в классическом исполнении все они основываются на токовых информационных параметрах, которые в аварийных режимах не несут достаточной информации для принятия конкретного решения алгоритмом РЗ. Поэтому следует искать иные решения, основывающиеся в первую очередь на использовании в качестве основного информационного параметра – напряжения сети.

**РЕКОМЕНДАЦИИ И СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТ ЛИНИИ, ОТХОДЯЩЕЙ ОТ ПОДСТАНЦИИ С ВЭС/СЭС**

**Дифференциальная защита линий с ВЭС/СЭС**

Линии электропередачи, отходящие от подстанций с ВЭС/СЭС, как правило, имеют множество ответвленных подстанций. Как следствие, защиты таких энергообъектов имеют низкую чувствительность к аварийным токам. Алгоритм работы комплекта ДЗЛ,

установленного на подстанции с ВЭС/СЭС, в режиме внутреннего КЗ использует для формирования отключающего сигнала лишь токи противоположного питающего конца линии. Как уже отмечалось ранее, токи подпитки от ВЭС в неповреждённых фазах могут в значительной степени превышать токи повреждённых фаз. В то же самое время из-за наличия многочисленных ответвлений на линии предполагается отстройка от их суммарного нагрузочного тока, а также отстройка от коротких замыканий за трансформаторами подстанций на ответвлениях линии. Поэтому при применении ДЗЛ в качестве основной защиты линий, отходящих от ВЭС, рекомендуется использовать в качестве информационных параметров измерительных органов ДЗЛ аварийные значения токов  $I_v$  в прямой последовательности для отстройки от симметричных повреждений и токи обратной последовательности  $I_2$  для реагирования на несимметричные повреждения. Для повышения чувствительности в ИО ДЗЛ может быть рекомендовано использование величин аварийной составляющей обратной последовательности  $I_{2ав}$ , однако такое решение должно обеспечивать селективную работу защиты при внешних КЗ. Селективная работа при внешних КЗ за питающей подстанцией должна обеспечиваться с помощью применения реле направления мощности. При обеспечении достаточной чувствительности и отсутствии обходных связей на питающей подстанции возможна отстройка по току, величина которого определяется практической суммарной мощностью ВЭС. Для отстройки от внешнего КЗ за шинами подстанции с ВЭС используется ДЗЛ, токи через которую будут близки токам на питающей подстанции и дифференциальный ток в защите не должен превышать уставку срабатывания ДЗЛ.

Кроме того, обеспечение селективной работы защиты со стороны ВЭС требует дополнительных мер, например использования информации с удалённого конца линии со стороны питающей энергосистемы. При КЗ «за спиной» защит, установленных на подстанции с ВЭС, в зоне чувствительности, аварийные токи значительно превышают рабочие токи, следовательно,

могут быть использованы для определения направления на КЗ относительно шин подстанции.

Для обеспечения абсолютной селективности защиты линии с ответвленными подстанциями, соединяющей питающую подстанцию энергосистемы и подстанцию с ВЭС, была разработана специальная логика ВЧ-отключения, представленная на рис. 2 [15]. Логика ВЧ-отключения предполагает, что при КЗ в зоне срабатывания НВЧ3 на питающей ПС формируется разрешающий сигнал и, при отсутствии блокирующего сигнала с ПС ВЭС производится отключение как со стороны ВЭС, так и со стороны питающей энергосистемы. Селективную работу защиты обеспечивает РНМОП, формирующее блокирующий сигнал в случае КЗ «за спиной» защит со стороны ВЭС.

Как и любая защита с ВЧ-блокировкой, указанная защита использует измерительные органы (ИО) РС и реле тока нулевой последовательности, т.е. может применяться и как ступенчатая защита с относительной селективностью, например, в случае, когда защита на другом конце не в работе.

В рассматриваемом случае защита имеет абсолютную селективность и защищает линию целиком (от измерительных трансформаторов тока (ИТТ) питающей ПС до ИТТ ВЭС) с высоким быстродействием, т.е. защита выполняет функции защиты абсолютной селективности. Так как такая защита не попадает ни под один из четырех классических видов защит абсолютной селективности, было рекомендовано называть данную защиту аналогом защиты с абсолютной селективностью.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующий комплекс защит в своем классическом исполнении, за исключением дифференциальных защит линий, не применим на линиях, отходящих от подстанций с ВЭС/СЭС.

Для построения РЗА со стороны ВЭС следует рассмотреть варианты гибридных защит с фиксацией появления КЗ в системе по наличию напряжения нулевой (обратной) последовательностей и реле направления мощности для выявления направления перетоков аварийной мощности в системе. При этом важную роль в защите линии занимают

устройства, установленные на шинах питающей подстанции. Передачу информации от этих устройств можно выполнить по определённой фазе линии, по специальному ВЧ-каналу через существующие приёмопередатчики либо через ВОЛС.

Для обеспечения абсолютной селективности на линиях, отходящих от подстанций с ВЭС/СЭС, применена комбинация из разрешающих и блокирующих ВЧ-сигналов. Без обмена информацией между концами линии, отключение со стороны инверторных преобразователей возможно только при использовании в качестве информационного параметра напряжения линии, снижение которого, в любой из фаз вызывает формирование отключающего импульса от внешнего источника.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Электроэнергия. Передача и распределение. Ежеквартальный выпуск №4 (27), декабрь 2022. с. 40–44.
2. Электроэнергия. Передача и распределение. № 6 (69) 2021, с. 36–41.
3. IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents, <https://webstore.iec.ch/publication/24100>.
4. Илюшин П.В., Вольный В.С. Обзор методов решения проблемных вопросов функционирования устройств защиты в microgrid напряжением до 1 кВ с распределёнными источниками энергии. Релейная защита. № 04, декабрь 2022, с. 6–20.
5. G. Molina Zubiri, S. Lopez Barba I. De La Fuente Del Castillo – 21, rue d’Artois, F-75008 PARIS – B5\_204\_2010 (Сборник докладов конференции CIGRE 2010).
6. Tsili M., Papathanassiou S. Review of grid code technical requirements for wind farms // IET Renewable Power Generation. 2009. Vol. 3. Is. 3. pp. 308–332. DOI: 10.1049/iet-rpg.2008.0070
7. Short circuit contribution of new generating units connected with power electronics and protection behaviour // Pan European sub group on protection equipment. ENSTO-E. 2019.
8. Impact of Inverter Based Generation on Bulk Power System Dynamics and Short-Circuit Performance / IEEE PES Report PES-TR68. 2018. 2018.
9. Симонов А.В. Моделирование генерирующих установок ВИЭ и СНЭЭ

для настройки работы устройств РЗ и ПА в распределительной сети // Сборник докладов Международной конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2021». 2020. IV том. С. 50–59.

10. Fault Current Contributions from Wind Plants // Joint Working Group Report to the Transmission & Distribution Committee, the Electric Machinery Committee, and the Power System Relaying Committee of the IEEE Power and Energy Society 2013.

11. Wijnhoven T., Deconinck G., Neumann T., Erlich I. Control aspects of the dynamic negative sequence current injection of type 4 wind turbines //IEEE PES General Meeting on 7–31 July 2014. DOI: 10.1109/PESGM.2014.6938931

12. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Таныгин С.А. Адаптивные уставки для реле тока и напряжения. Релейная защита. № 01, март 2023.

13. ГОСТ Р 58887–2020 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Дистанционная и токовые защиты линий электропередачи и оборудования классом напряжения 110–220 кВ. Функциональные требования.

14. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Петрушков М.Ю., Широкина Е.В. Особенности выполнения защит линии при наличии ветряных электростанций, Сборник докладов Международной конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2020».

15. Терминал направленной высокочастотной защиты с функцией КЗ3 линий 110–220 кВ типа «ТОР 300 НВЧ3 54Х». Руководство по эксплуатации. Описание устройства и работы терминала АИПБ.656122.011-044 РЭЭ ver.18.1.