

Разработка токоограничивающего устройства для защиты электроэнергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии

АНТОНОВ Б.М., БАРАНОВ Н.Н.
ОИВТ РАН, Москва, Россия

КРЮКОВ К.В.
НИУ "МЭИ", Москва, Россия

Статья посвящена решению актуальной научно-практической задачи, направленной на повышение надёжности и безаварийности гибридных энергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии, функционирующих как автономно, так и совместно с электрической сетью. Рассмотрены возможные решения систем защиты от токов короткого замыкания и предупреждения аварийных ситуаций в зависимости от выходной электрической мощности энергоустановки. Для гибридного электроэнергетического комплекса, содержащего фотоэлектрическую и ветроэнергетическую установки, разработано токоограничивающее устройство. Физическая сущность устройства состоит в использовании двух магнитно-связанных реакторов, обмотки которых включены параллельно в цепь нагрузки, но встречно по направлению магнитного потока обмоток. Магнитные потоки реакторов при этом взаимно компенсируются. Ток же линии электропередачи делится по обмоткам реакторов строго пополам, так как при таком включении обмоток проявляется эффект делителя тока. Устройство позволяет ограничивать ударную амплитуду аварийного тока на интервале времени порядка 100–120 мс после отключения сетевого выключателя. Установившееся значение аварийного тока ограничивается на уровне, близком к значению номинального тока. На компьютерной модели проведены исследования электромагнитных процессов, происходящих в разработанном устройстве.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, возобновляемые источники энергии, ограничители токов короткого замыкания, надёжность электроснабжения

В современных электроэнергетических системах доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечные батареи и ветрогенераторы, ежегодно растет. В будущем эта тенденция будет лишь усиливаться, что подтверждается перспективными планами развития электроэнергетики в большинстве стран [1–3].

Внедрение ВИЭ в системы электроснабжения требует значительных финансовых затрат, поскольку технологии генерирования, передачи энергии и управления сетью, в состав которой входят ВИЭ, отличающиеся стохастическим характером генерации, заметно отличаются от классических и недостаточно отработаны [4, 5].

При характерных для ВИЭ неуправляемых отклонениях в режимах работы использование стандартных методов оптимального распределения потоков мощности может повлечь перегрузки на линиях электропередачи, вплоть до каскадных отключений. Частота и масштабы таких аварий с ВИЭ неуклонно растут по всему миру [6–9].

Необходимы разработки новых методов оптимизации энергосистем с учетом неопределенностей, прису-

щих ВИЭ (устойчивости их работы, непредсказуемых отклонений генерируемых мощностей, значительных изменений нагрузки во времени), а также принципиально новых подходов к управлению энергосистемами при увеличивающейся интеграции в них возобновляемых источников энергии.

Целью работы является разработка токоограничивающего устройства для защиты гибридного электроэнергетического комплекса (ГЭК), содержащего солнечную батарею, ветроэнергетическую установку и резервный дизель-генератор. В связи с этим необходимо решить следующие задачи: провести анализ возможных решений систем защиты от токов короткого замыкания (КЗ) и предупреждения аварийных ситуаций в зависимости от выходной электрической мощности ГЭК (с учётом требуемых эффективности, надёжности и стоимостных показателей); разработать структуру токоограничивающего устройства с магнитно-связанными реакторами и провести исследование электромагнитных процессов.

В состав ГЭК входят два первичных источника (ветроэнергетическая и фотоэлектрическая установки) и резервные дизель-генераторы. Все источники

могут работать параллельно на общую нагрузку как переменного, так и постоянного тока. Управление режимами работы источников проводится с помощью специализированных контроллеров, основными задачами которых является отслеживание оптимальной рабочей точки каждого из источников. Координация всех контроллеров ГЭК осуществляется центральным контроллером, основной задачей которого является обеспечение безаварийного энергоснабжения нагрузки посредством управления потоками мощности отдельных источников ГЭК. Обобщённая структурная схема единичного гибридного энергетического комплекса, предназначенного для работы в децентрализованной энергосистеме, представлена на рис. 1 [10].

Отдельные автономные энергокомплексы могут быть связаны между собой линиями электропередачи. При этом, несмотря на относительно небольшую мощность единичных автономных энергоблоков, сум-

марная мощность децентрализованной энергосистемы может быть значительной.

Возникающие в такой энергосистеме аварийные токи при КЗ, определяемые мощностью источника питания, могут во много раз превосходить рабочие токи внутри каждого ГЭК. Поэтому обеспечение надёжности электроснабжения потребителей в условиях возможных КЗ в цепях ГЭК приобретает первостепенное значение [11, 12].

Для снижения амплитуды токов КЗ служат ограничители токов короткого замыкания (ОТКЗ). Их используют в случаях чувствительных нагрузок с недопустимым перерывом в электроснабжении на время срабатывания устройства АПВ, а также установленных защитных электрических аппаратов, номинальные параметры которых перестают соответствовать возросшим токам КЗ.

Токоограничивающие устройства могут быть эффективно использованы также при развитии системы

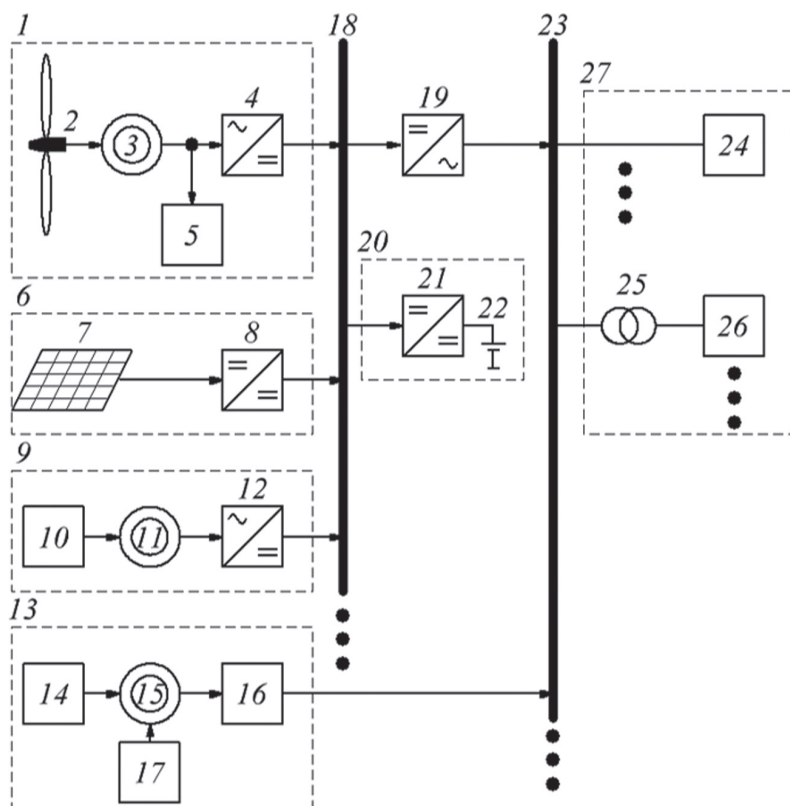


Рис. 1. Структурная схема гибридного блока энергоснабжения потребителей переменного тока от ВИЭ: 1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3, 11, 15 – синхронные электромашинные генераторы; 4, 12 – управляемые выпрямители; 5 – блок балластных нагрузок; 6 – фотоэлектрическая установка; 7 – солнечная панель; 8 – конвертор напряжения; 9, 13 – дизель-генераторы; 10, 14 – дизельные двигатели; 16 – устройство плавного пуска; 17 – регулятор тока возбуждения; 18 – шина постоянного тока; 19 – инвертор напряжения; 20 – буферный накопитель электроэнергии; 21 – двунаправленный импульсный преобразователь; 22 – блок аккумуляторных батарей; 23 – шина переменного тока 220/380 В, 50 Гц; 24 – потребители 220/380 В; 25 – силовой трансформатор; 26 – устройство присоединения к линии электропередачи децентрализованной энергосистемы; 27 – блок переменного тока объекта электроснабжения

Fig. 1. Structural diagram of a hybrid power supply unit for alternating current consumers from renewable energy sources: 1 – wind power plant; 2 – wind turbine; 3, 11, 15 – synchronous electric machine generators; 4, 12 – controlled rectifiers; 5 – ballast load unit; 6 – photovoltaic installation; 7 – solar panel; 8 – voltage converter; 9, 13 – diesel generators; 10, 14 – diesel engines; 16 – soft starter; 17 – excitation current regulator; 18 – DC bus; 19 – voltage inverter; 20 – buffer power storage; 21 – bidirectional pulse converter; 22 – battery pack; 23 – AC bus 220/380 V, 50 Hz; 24 – consumers 220/380 V; 25 – a power transformer; 26 – a device for connecting to a power transmission line of a decentralized power system; 27 – an alternating current unit of an electricity supply facility

электроснабжения и увеличении мощности электропотребителей.

Применение ОТКЗ позволяет эксплуатировать коммутационную аппаратуру с меньшими номинальными токами отключения и дает возможность использования компактных распределительных устройств.

Технические характеристики ограничителей токов короткого замыкания. Решение задачи ограничения тока КЗ в энергосистеме зависит от ряда факторов. В их числе необходимость обеспечения минимального перерыва в питании нагрузки, селективности систем защиты разветвлённой нагрузки, допустимого тока термической и динамической стойкости защищаемого оборудования.

В децентрализованных системах, состоящих из нескольких автономных ГЭЖ, инверторы которых питаются от аккумуляторов, скорость нарастания тока в аварийном ГЭЖ может быть очень высокой, что приведёт к ударному току с большой амплитудой.

Чтобы иметь эффективное ограничивающее действие защиты, элемент ограничения тока должен включаться в цепь через время от начала КЗ не более, чем 5 мс (оптимально < 1 мс) [13].

Однако в классическом исполнении защиты (в выключателях с номинальным током до 100 А) невозможно получить время отключения меньше 3–5 мс.

Известно четыре основных типа устройств, предназначенных для ограничения токов КЗ [14–20]:

- токоограничивающие реакторы;
- сверхпроводниковые ОТКЗ резистивной схемы;
- полупроводниковые ОТКЗ с параллельным импедансом;
- пиротехнические ОТКЗ.

Варьирование значения установившегося тока КЗ при наличии токоограничителей КЗ с ТО позволяет выявить влияние кратности (глубины) ограничения тока Когр, определяемого соотношением:

$$K_{\text{огр}} = I_{\text{КЗ без ТО}} / I_{\text{КЗ с ТО}}$$

Всё большее значение приобретают быстродействующие устройства глубокого токоограничения, обладающие в нормальных режимах малым (в идеале нулевым) сопротивлением, а при КЗ – требуемым. К ним относятся устройства токоограничения, выполненные на основе: полупроводниковых элементов, быстродействующих коммутационных элементов взрывного действия, высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

В качестве быстродействующих бесконтактных устройств защиты в электроэнергетических системах все чаще применяются силовые полупроводниковые приборы [21, 22]. Полупроводниковым прибором для системы ОТКЗ с прерыванием тока в цепи аварии может служить полностью управляемый тиристор.

Современные силовые транзисторы *IGBT* обеспечивают коммутацию токов до 1800 А и напряжений до

4,5 кВ. Эти приборы могут быть использованы для защиты цепей низкого и среднего напряжений.

Учитывая улучшенные характеристики современных полупроводниковых приборов по перегрузочной способности, можно для ограничения аварийных токов использовать регулирующие возможности инверторов и преобразователей постоянного тока, которые широко используются в системах электропитания от возобновляемых и нетрадиционных источников электроэнергии. Применение такого способа ограничения тока КЗ для энергосистем относительно небольшой мощности (порядка десятков киловатт) позволяет существенно упростить энергосистему и тем самым повысить её надёжность и снизить себестоимость. Для децентрализованных энергосистем, объединяющих несколько автономных систем общей мощностью в тысячи кВт, требуется использование специального быстродействующего ограничителя аварийного тока.

Существующая база полупроводниковых приборов (в том числе отечественная) по уровню параметров рабочих токов и напряжений может служить основой при разработке и создании новых быстродействующих ОТКЗ для широкого диапазона рабочих напряжений электрических сетей и мощностей энергосистем.

В таблице приведены сравнительные технические характеристики устройств с функцией токоограничения, анализируя которые можно выбрать требуемое устройство для конкретного ГЭЖ.

Как видно из таблицы, установка предохранителей целесообразна для защиты линий питания отдельных нагрузок. В координации с вышестоящими устройствами защиты это позволит ограничить влияние аварийных режимов на стабильность работы всей системы. Использование ВТСП или тиристорных токоограничивающих устройств является наиболее целесообразным для ограничения токов КЗ на общих шинах ГЭЖ. При этом то или иное решение должно приниматься на основе требований, предъявляемых к быстродействию защитных устройств.

Специфической особенностью аварийных процессов, протекающих в децентрализованной энергосистеме, объединяющей несколько гибридных энергокомплексов с ВИЭ, является то, что выходное переменное напряжение в них вырабатывается с помощью автономных инверторов напряжения, использующих широтно-импульсный метод формирования синусоиды. В силовой цепи такого инвертора последовательно включена индуктивность фильтра ограниченной величины. Учитывая, что источником постоянного тока в автономных инверторах являются аккумуляторы или конденсаторы большой ёмкости, амплитуда ударного тока при КЗ на выходе такого инвертора может иметь значительную кратность по отношению к номинальному току при высокой скорости его нарастания. В данном случае требует решения задача ограничения установившегося значения тока аварии. Естественным обра-

Особенности разных типов устройств с функцией токоограничения Features of different types of devices with current limiting function

| Параметр | Тип ОТКЗ | | |
|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | ВТСП | Предохранители | Тиристорный ключ |
| Уровень напряжения, кВ | 3,6–123 | 0,7–36 | 3,6–36 |
| Номинальные токи, кА | 0,6 – 4 | 1,25 – 4,5 | 1,5 / 3,0 |
| Ограничивает уровень ТКЗ | конструкция | параметры схемы | параметры схемы |
| Время срабатывания | < 1 мс | 0,5 мс | < 50 мкс |
| Ограничения диапазона токов | 0,1 – 1,0 Ином | – | – |
| Продолжительность пика тока, мс | 50 | < 5 | < 5 |
| Время восстановления | 1–2 с, предел – 200 мс | часы (смена предохранителя) | 100 мкс |
| Принцип коммутации | ограничитель тока | (пиро)предохранитель | отключение |
| Физический принцип | срыв СП – рост сопротивления | разрыв соединения | изменение сопротивления |
| Запуск от КЗ | свойства материала | триггерное включающее устройство | электронное управляющее устройство |

зом в цепь соединения инвертора с сетью необходимо включать индуктивность с минимальным импедансом, но существенно большей величины. Однако это ведёт к потерям напряжения в нормальном режиме работы.

Разработка и исследование токоограничивающего устройства с магнитно-связанными реакторами. С целью уменьшения установленной мощности реактора быстродействующего ОТКЗ и снижения потерь напряжения из-за него в нормальном режиме в ОИВТ РАН была разработана структурная схема ОТКЗ с минимальной заданной индуктивностью реактора при работе в нормальном режиме, но увеличивающейся при аварии [23]. Также в схеме предусмотрено ограничение установившегося тока КЗ за счёт введения в структуру устройства ОТКЗ конденсатора, включающегося при аварии параллельно реактору. Параллельное соединение конденсатора и индуктивности при соответствующей настройке параметров этих элементов является фильтром-пробкой на частоте сети, что и обеспечивает ограничение установившегося значения аварийного тока.

На рис. 2 представлена электрическая схема однофазного варианта разработанного ОТКЗ.

Физическая сущность устройства состоит в использовании двух магнитно-связанных реакторов, обмотки которых в нормальном режиме включены параллельно в цепь нагрузки, но встречно по направлению магнитного потока обмоток. При этом магнитные потоки реакторов взаимно компенсируются. Реактивное сопротивление реакторов в цепи тока нагрузки зависит только от потока рассеяния, который определяется конструкцией реакторов и может быть незначительным. Ток же линии электропередачи делится по обмоткам реакторов строго пополам, так как при таком включении обмоток проявляется эффект делителя тока.

При аварии система автоматики отключает быстродействующий выключатель *Switch 2* и в аварийный контур оказываются включёнными две параллельные

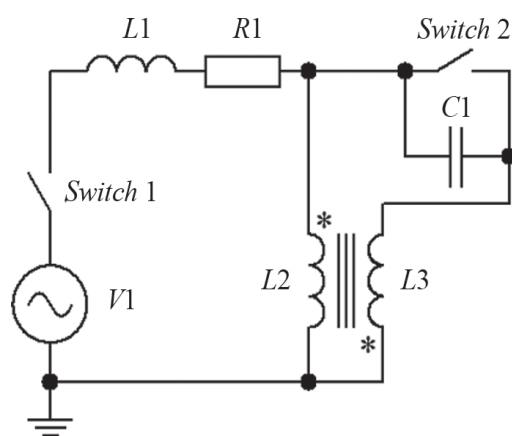


Рис. 2. Однофазная схема токоограничивающего устройства с магнитно-связанными реакторами: *V1* – источник переменного напряжения; *Switch 1* – сетевой выключатель; *Switch 2* – выключатель защитный; *L1*, *R1* – параметры линии электропередачи; *L2*, *L3* – магнитно-связанные реакторы; *C1* – конденсатор

Fig. 2. Single-phase block diagram of a current-limiting device with magnetically coupled reactors: *V1* – AC voltage source; *Switch 1* – mains switch; *Switch 2* – protective switch; *L1*, *R1* – power line parameters; *L2*, *L3* – magnetically coupled reactors; *C1* – capacitor

цепи ОТКЗ. В первой цепи через выключатель *Switch 1* включается конденсатор *C1*, последовательно соединённый с реактором *L3*; во второй цепи включён реактор *L2*. Токи обмоток первого и второго реакторов практически становятся противофазными.

На рис. 3 представлена схема системы электропитания с ОТКЗ (выполненным по структурной схеме рис. 2), предназначенная для компьютерного исследования и расчётов режимов КЗ при уровне сетевого напряжения 10 кВ и при токе нагрузки 1 кА.

Обозначения на схеме (рис. 3): *V1* – источник переменного тока, с напряжением 10 кВ эффективных; *V2* – система управления выключателем *S3*, предназначенным для имитации КЗ; *V3* – система управления выключателем *S2*, обеспечивающим включение в цепь

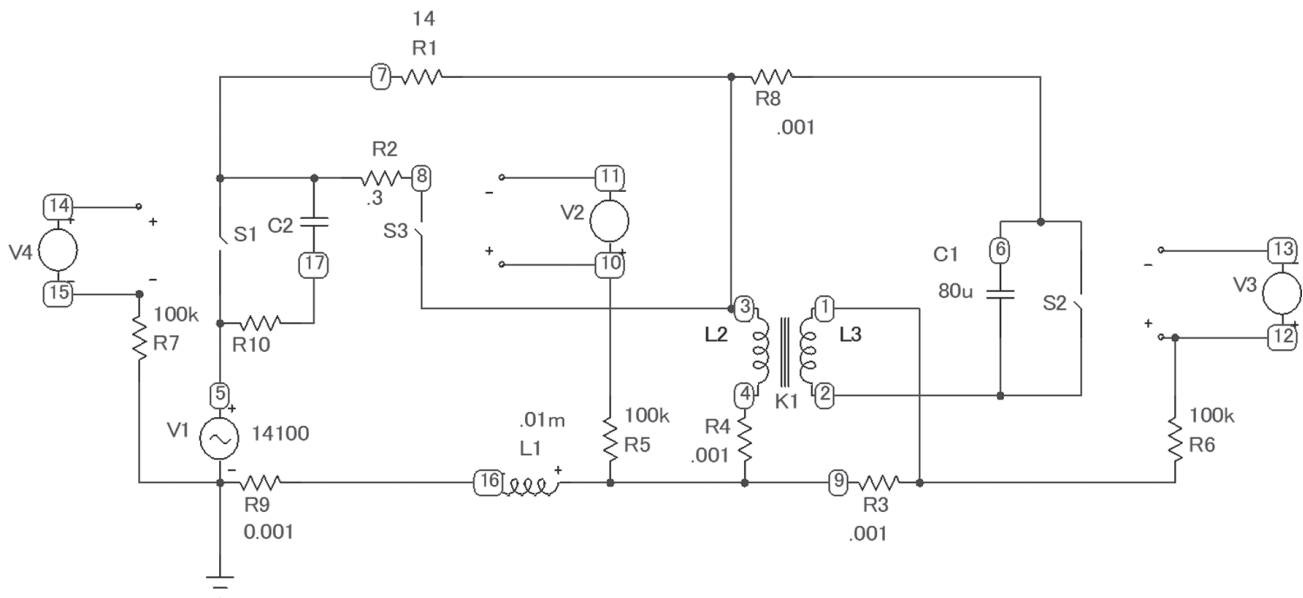


Рис. 3. Расчётная электрическая схема компьютерной модели ОТКЗ

Fig. 3. Design electrical diagram of the short-circuit current limiter computer model

обмотки второго реактора конденсатора $C1$; $V4$ – система управления выключателем $S1$, предназначенным для отключения нагрузки; индуктивность $L1$ имитирует реактанс источника энергии; сопротивление $R1$ определяет предаварийный ток нагрузки. Сопротивление $R2$ определяет уровень установившегося аварийного тока в сети (с учётом постоянных реактансов цепи). Остальные сопротивления являются шунтами для измерения токов в соответствующих цепях или обеспечивают потенциальную привязку точек в схеме для выполнения работы компьютера.

На рис. 4 и 5 представлены диаграммы процесса нарастания амплитуды ударного тока при возникновении аварии в нуле и в максимуме сетевого напряжения соответственно. Процесс рассматривается в случае на-

чала реакции системы защиты на аварийную ситуацию через 3 мс. В проводимом эксперименте магнитно-связанные реакторы имеют максимально возможную связь и, соответственно, минимальные потоки рассеивания. Это способствует повышению амплитуды ударного тока.

Сравнивая характер нарастания ударного тока, можно отметить, что при начале аварии в нуле сетевого напряжения (возникновение аварии в точке $t_1 - 50$ мс от начала работы) скорость нарастания аварийного тока более медленная, чем в случае начала аварии в максимуме сетевого напряжения (55 мс от начала работы). Так, через 1 мс в первом случае ток аварии достигает 9,51 кА, а во втором случае он равен 44,4 кА. Амплитуда тока также выше во втором случае и составляет

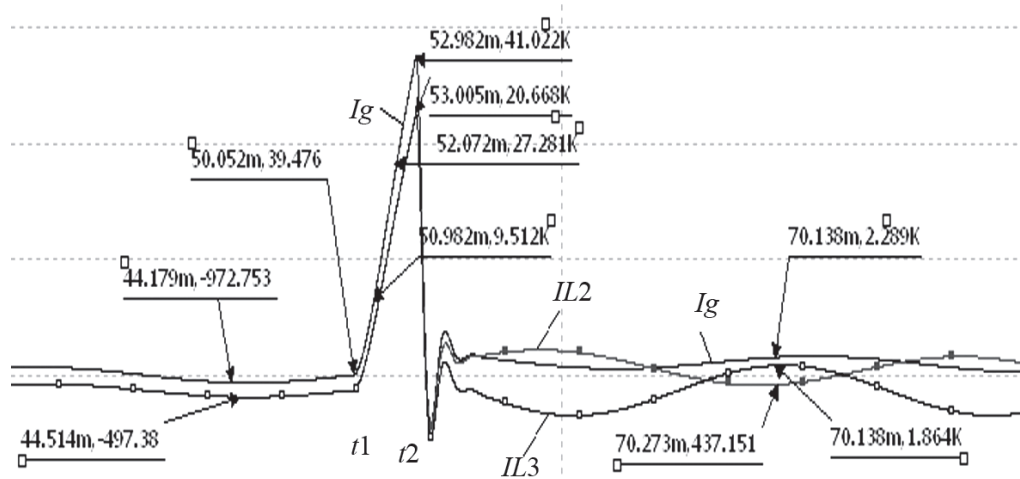


Рис. 4. Кривая нарастания тока КЗ при аварии в нуле сетевого напряжения

Fig. 4. The curve of the rise of the short circuit current in case of an accident at zero mains voltage

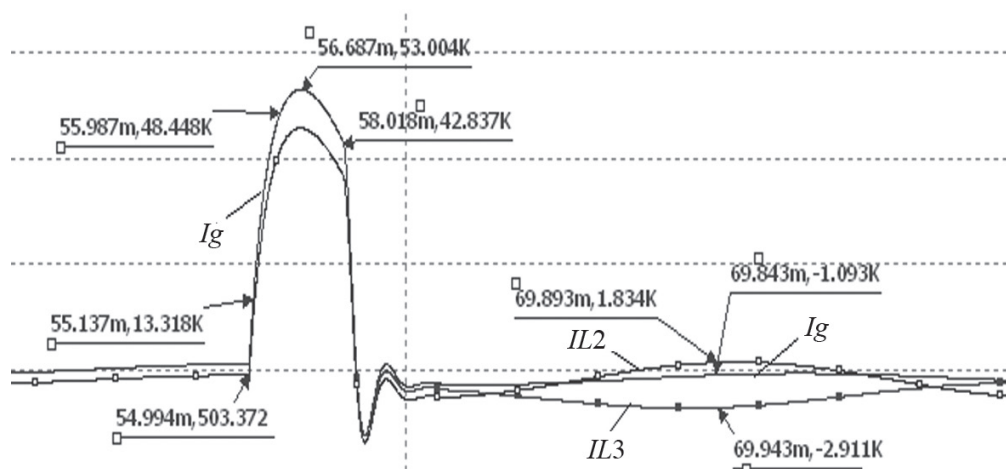


Рис. 5. Кривая нарастания тока КЗ при аварии в максимуме сетевого напряжения

Fig. 5. The curve of the short circuit current increase in case of an accident at the maximum of the mains voltage

53 кА против 41 кА в первом. Необходимость высоко-го быстродействия видна по кривой I_g нарастания тока аварии (рис. 5). В момент времени 55,137 мс (через 0,137 мс от начала аварии) ток аварии достиг значения 13,318 кА (т.е. кратность тока более 13) и продолжал нарастать с той же скоростью.

Для ограничения амплитуды ударного тока было предпринято уменьшение связи индуктивностей $L2$ и $L3$. Дальнейшие замеры проводились при увеличенных потоках рассеяния реакторов.

На рис. 6 и 7 представлены диаграммы электромагнитных процессов отключения КЗ в сети 10 кВ (эффективных) при токе нагрузки порядка 1 кА. Значение установившегося тока КЗ в этой сети без использования устройства ограничения аварийного тока – выше 40 кА. Расчёты выполнялись с помощью программы MICRO-CAP 9. Рассматривались процессы для двух моментов начала аварии: 1) в максимуме сетевого напряжения; 2) в нуле сетевого напряжения. При этом задавалось различное время реакции защиты на нарастающий аварийный ток – от 3 до 0,125 мс.

Время 3 мс выбрано по быстродействию взрывных выключателей. Время 0,125 мс выбрано исходя из возможностей выключения полупроводниковых приборов. Время отключения сетевого выключателя определено в 120 мс, что является минимальным значением для станционных выключателей.

В экспериментах фиксировались значения максимальной амплитуды напряжения U на выключателе $S2$ и амплитудные значения импульсов тока I_{gmax} источника питания при изменении времени реакции защиты на момент начала аварии. Результаты замеров уровней токов и напряжений на соответствующих графиках тока источника I_g и напряжения $UC1$ на контактах выключателя $S2$ для крайних режимов диапазона исследования представлены на рис. 6 и 7.

По данным экспериментов получено, что при срабатывании защиты через 3 мс уровень перенапряжения

на ключе $S2$ составляет 51,2 и 58,4 кВ для моментов аварии в нуле и в максимуме напряжения соответственно. При срабатывании защиты через 0,25 мс этот уровень снижается до значений 25,9 и 36,68 кВ. При срабатывании защиты через 0,125 мс перенапряжение устанавливается на уровне 25,9 и 34,4 кВ, что мало отличается от предыдущих показателей. Кратность перенапряжения на выключателе $S2$ составила 1,83 при аварии в нуле напряжения и 2,44 при аварии в максимуме напряжения для случая срабатывания защиты через 0,125 мс.

Амплитуда ударного тока с увеличением скорости срабатывания защиты от 3 до 0,125 мс уменьшилась с 31 до 4,8 кА для случая возникновения аварии в нуле напряжения и с 43,1 до 13,7 кА в случае аварии в максимуме напряжения. При этом установившийся ток КЗ, отключаемый сетевым выключателем в момент времени $t3$, уменьшается до значения, близкого к номинальному (что прослеживается по графикам I_g на диаграммах № 2 (рис. 6 и 7)).

Проведенные исследования на компьютерной модели ОТКЗ показали, что время реакции защиты на аварийную ситуацию существенно сказывается на значениях ударного тока перенапряжения для случаев начала срабатывания защиты более 0,25 мс от начала аварии и мало сказывается при дальнейшем сокращении времени реакции защиты. Отсюда следует, что повышать быстродействие защиты целесообразно до уровня сотен микросекунд. Дальнейшее увеличение быстродействия не способствует заметному уменьшению уровня перенапряжения на выключателе $Switch 2$ и снижению амплитуды ударного тока.

Анализ результатов исследований. Особенность протекания аварийных процессов в энергосистемах с ВИЭ заключается в том, что данные источники, как правило, объединяются в звене постоянного тока на шинах аккумулятора. Нагрузки переменного тока питаются от шины аккумулятора через автономный инвер-

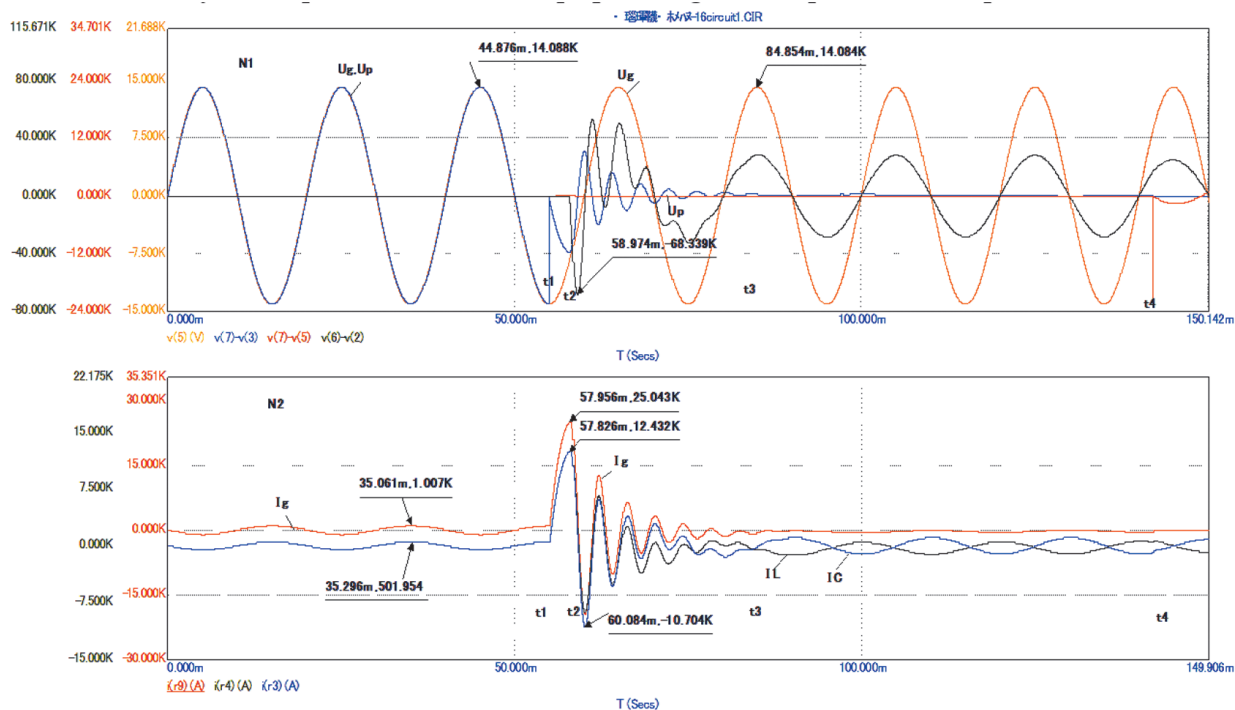


Рис. 6. Диаграммы переходных процессов в блоке электропитания при отключении ТКЗ при аварии в максимальной точке напряжения через 3 мс

Fig. 6. Diagrams of transients in the power supply unit when the short-circuit current is switched off in case of an accident at the maximum voltage point after 3 ms

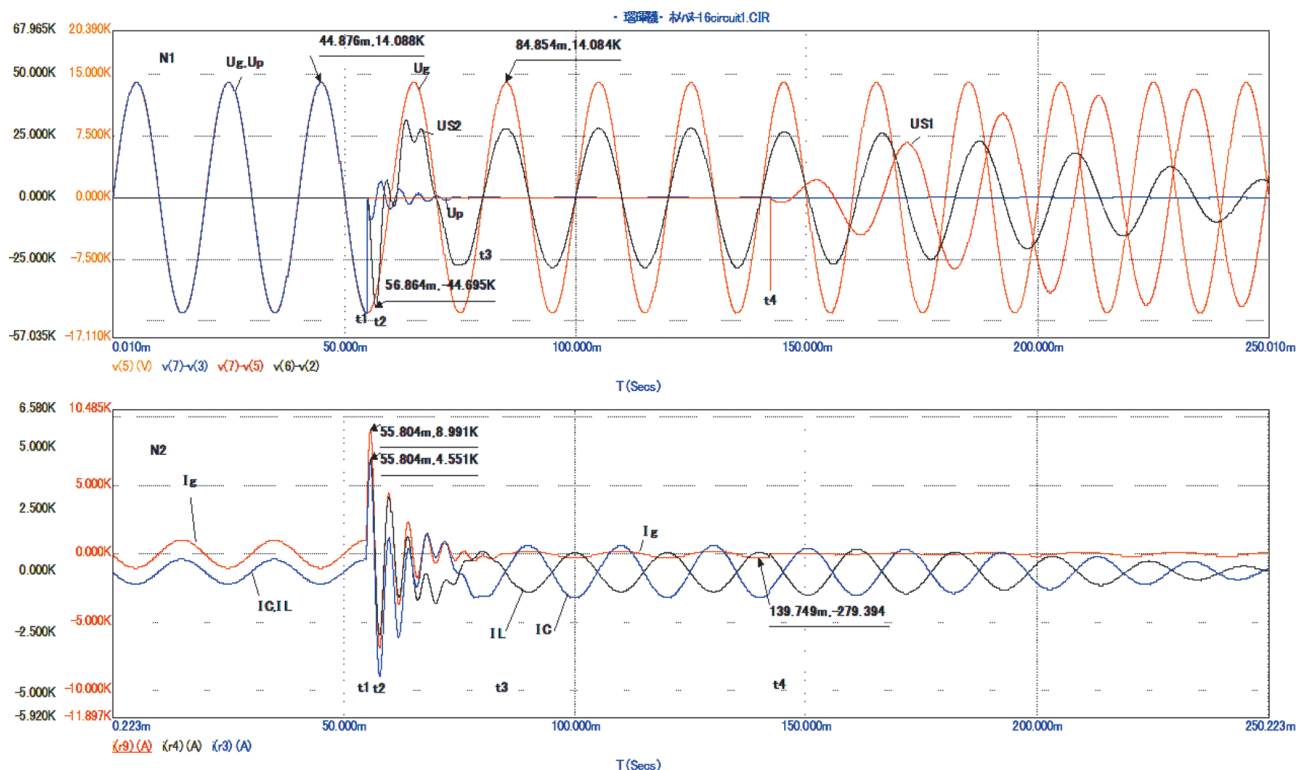


Рис. 7. Диаграммы переходных процессов в блоке электропитания при отключении ТКЗ при аварии в максимальной точке напряжения через 0,125 мс

Fig. 7. Diagrams of transients in the power supply unit when the short-circuit current is switched off during an accident at the maximum voltage point after 0,125 ms

тор, выходное синусоидальное напряжение которого формируется с использованием широтно-импульсной модуляции на частоте значительно более высокой, чем частота промышленной сети. В связи с этим выходные фильтры имеют последовательно включенные индуктивности небольшого значения, не обеспечивающие существенного ограничения ударной амплитуды аварийного тока, нарастание которой происходит с высокой скоростью.

В рамках выполненных исследований рассмотрены способы ограничения аварийных токов, в том числе с высокой скоростью. Разработан и исследован новый ограничитель КЗ, структура которого позволяет ограничивать ударную амплитуду и установившееся значение аварийного тока. При этом потери напряжения на нагрузке практически незаметны (в проведенных расчётах они находились в пределах 5 В при рабочем напряжении 10 кВ и нагрузке около 1000 А).

Рассмотрен процесс формирования ударной волны аварийного тока при возникновении аварии в характерные моменты времени – в нуле и в максимуме питающего напряжения, по результатам которого сделан вывод о необходимости увеличения величины постоянно включённой индуктивности в цепи электропитания.

Исследовано влияние быстродействия защиты на величину амплитуды аварийного тока и величину перенапряжения на выключателе, отключение которого изменяет структуру цепи нагрузки. Выявлен предел влияния скорости реакции защиты на уровень негативного воздействия аварийного тока и напряжения на элементы системы. Так, при скорости реакции защиты выше 0,25 мс амплитуда аварийного тока и перенапряжение на выключателе защиты практически не уменьшаются. Таким образом, увеличение быстродействия защиты выше нескольких сотен микросекунд не даёт дополнительного эффекта снижения воздействия этих факторов на элементы системы.

На базе выполненной авторской разработки возможно создание эффективной системы защиты децентрализованных энергосистем большой мощности с возобновляемыми и нетрадиционными первичными источниками электроэнергии. Ограничение установившегося значения аварийного тока обеспечивается тем, что в контур аварийного тока при отключении выключателя системы защиты вводятся последовательно индуктивность и конденсатор, соединённые между собой параллельно. Настраивая этот параллельный контур на частоту, близкую к частоте сети, можно получить режим, близкий к резонансу токов, что ограничивает аварийный ток в сети. Однако в резонансном контуре колебательный процесс может продолжаться нежелательно долгое время при достаточно высокой добротности контура даже после отключения сетевого выключателя. Чтобы обеспечить быстрое затухание колебательного процесса, в контур включены две параллельные цепочки конденсаторов, в одной из кото-

рых конденсатор имеет последовательный резистор небольшой величины. Такое схемное решение обеспечивает затухание колебательного процесса на интервале времени порядка 100-120 мс после отключения сетевого выключателя. При этом амплитуда ударного тока ограничивается на 34-кратном уровне по отношению к номинальному току, допускаемому для электросетей данного класса напряжения. Установившееся значение аварийного тока ограничивается на уровне, близком к уровню номинального тока, что обеспечивает надёжную работу сетевого выключателя.

В полупроводниковых бесконтактных токоограничивающих выключателях (ПБТВ), предназначенных для использования в системах электроснабжения, содержащих гибридные энергокомплексы с автономными инверторами, должны быть предусмотрены меры для ограничения амплитуды ударного аварийного тока.

Обзор существующих моделей современных силовых полупроводниковых приборов показывает, что по значениям мощности и быстродействию они могут быть использованы в ограничителях тока КЗ, работающих в широких диапазонах уровней сетевого напряжения и передаваемой мощности.

Выводы. Характерной особенностью энергоустановок с возобновляемыми источниками энергии является отсутствие собственных систем регулирования электрических режимов нагрузки. Функции регуляторов потока мощности, стабилизации выходного напряжения, а также защитные функции при авариях выполняют полупроводниковые преобразовательные устройства, включаемые между энергоустановкой и потребителем.

Разработан и исследован новый ограничитель тока КЗ, структура которого позволяет снижать ударную амплитуду и установившееся значение аварийного тока. При этом потери напряжения на нагрузке практически незаметны (в проведенных расчётах они находились в пределах 5 В при рабочем напряжении 10 кВ и нагрузке около 1000 А).

Исследовано влияние быстродействия защиты на амплитуду тока КЗ и перенапряжение на выключателе, отключение которого изменяет структуру цепи нагрузки. Показано, что увеличение быстродействия защиты меньше нескольких сотен мс не даёт дополнительного эффекта снижения воздействия этих факторов на элементы системы.

На базе выполненной разработки токоограничивающего устройства с магнитно-связанными реакторами возможно создание эффективной системы защиты децентрализованных энергосистем большой мощности с возобновляемыми и нетрадиционными первичными источниками электроэнергии разного типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 19-08-00018-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (Утв. распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-п).

2. **Annual Energy Outlook 2020 with Projections to 2050.** U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2020.

3. **Rouch D.A.** Electricity power plan to 2050: replacing coal-fired plants with renewable energy plants & better energy efficiency. – Clarendon Policy & Strategy Group, Melbourne, Australia, 2021, Working Paper No. 28.

4. **Liserre M., Sauter T., Hung J.Y.** Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics. – IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, vol. 4, No. 1, pp. 18–37, DOI: 10.1109/MIE.2010.935861.

5. **Kroposki B., et al.** Achieving a 100 % Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. – in IEEE Power and Energy Magazine, 2017, vol. 15, No. 2, pp. 61–73, DOI: 10.1109/MPE.2016.2637122.

6. **Keller J., Kroposki B.** Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources, 2010, DOI:10.2172/971441.

7. **Behnke M., Ellis A.** Contribution of Photovoltaic Power Generation Systems to AC Short Circuits – a Survey of Current Modeling Practices and Challenges. – IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), Tampa, 2013, pp. 3128–3133.

8. **Shuai Z., et al.** Comparative Study of Short-Circuit Fault Characteristics for VSC-Based DC Distribution Networks With Different Distributed Generators. – IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, vol. 7, No. 1, pp. 528–540, DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2834542.

9. **Meskin M., Domijan A., Grinberg I.** Impact of Distributed Generation on the Protection Systems of Distribution Networks: Analysis and Remedies. – IET Gener. Transm. Distrib., 2020, No. 14, pp. 5944–5960, DOI:10.1049/iet-gtd.2019.1652.

10. **Антонов Б.М. и др.** Гибридная система децентрализованного электроснабжения, реализуемая на основе возобновляемых источников энергии разных видов. – Электричество, 2018, № 1, с. 8–13.

11. **Karaliolios P., et al.** Overview of Short-Circuit Contribution of Various Distributed Generators on the Distribution Network. – 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padua, Italy, 2008, DOI: 10.1109/UPEC.2008.4651553.

12. **Coster E.J., et al.** Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. – in Proceedings of the IEEE, 2011, vol. 99, No. 1, pp. 28–39, DOI: 10.1109/JPROC.2010.2052776.

13. **BS EN60898-1:2019.** Electrical Accessories, Circuit Breakers for Overcurrent Protection for Household and Similar Installations. Part 1: Circuit-Breakers for A.C. Operation, 2019.

14. **Антипов К.М. и др.** О проблеме координации уровней токов короткого замыкания в энергосистемах. – Электрические станции. 2005, № 4, с. 19–32.

15. **Алексеев Б.А.** Полупроводниковые ограничители токов короткого замыкания. – Электро, 2008, № 3, с. 50–56.

16. **Paul W., et al.** Superconducting Fault Current Limiter Applications, Technical and Economical Benefits, Simulations and Test Results. CIGRE, 13–201, 2000.

17. **Samet H., et al.** Fault Current Limiter Versus Series Reactor. – IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Italy, 2017, DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977495.

18. **Prigmore J., Uzelac N.** Fault Current Limiting (FCL) devices and techniques. In: Ito, H. (Ed.): 'switching equipment CIGRE green books' – Germany, 2019, pp. 399–432.

19. **Okedu K.E., et al.** Wind Farms Fault Ride Through Using DFIG with New Protection Scheme. – IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, No. 3, pp. 242–254.

20. **Guo W., et al.** Evaluation of the Performance of BTFCs for Enhancing LVRT Capability of DFIG. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, No. 30, pp. 3623–3637.

21. **Шурупов А.В. и др.** Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов. Опыт создания токоограничивающего устройства на напряжении 220 кВ. – Энергия единой сети, 2013, № 2(7), с. 54–65.

22. **Пат. RU 132270 U1.** Токоограничивающее устройство для высоковольтных линий электропередач / Б.М. Антонов и др., 2013.

23. **Пат. RU 88861 U1.** Токоограничивающее устройство на базе магнитно-связанных реакторов / Б.М. Антонов, 2009.

[23.07.2021]



Авторы: Антонов Борис Михайлович – доктор техн. наук, Ведущий научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия.



Баранов Николай Николаевич – доктор техн. наук, главный научный сотрудник ОИВТ РАН, Москва, Россия.



Крюков Константин Викторович – старший преподаватель кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.

A Current Limiting Device for Protection of Electric Power Complexes with Renewable Energy Sources

ANTONOV Boris M. (*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*)
– *Leading Researcher; Dr. Sci. (Eng.).*

BARANOV Nikolay N. (*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*) – *Chief Researcher; Dr. Sci. (Eng.).*

KRYUKOV Konstantin V. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia*) – *Senior Lecturer of the Electrical Machines, Electrical and Electronic Apparatuses Dept.*

The article addresses an urgent scientific and practical problem aimed at achieving more reliable and trouble-free operation of hybrid energy complexes with renewable energy sources operating both autonomously and in parallel with the electric grid. Possible solutions of protection systems against short-circuit currents and for preventing the occurrence of emergencies depending on the power plant electric power output capacity are considered. A current limiting device for a hybrid electric power complex containing photovoltaic and wind power installations has been developed. The device physical principle consists of using two magnetically coupled reactors, the windings of which are connected in parallel to the load circuit, but oppositely in the winding magnetic flux directions. The magnetic fluxes of the reactors are mutually compensated. The power line current is strictly equally divided between the reactor windings, because the current divider effect manifests itself with exactly such connection of the windings. By using the device, the fault current peak amplitude is limited on a time interval of about 100–120 ms after disconnection of the mains circuit breaker. The steady-state fault current is limited at a level close to the rated current value. The electromagnetic processes occurring in the developed device have been studied on a computer model.

Key words: *hybrid power plant, renewable energy sources, short-circuit current limiters, power supply reliability*

The work was carried out with the support of the RFBR. Grant No. 19-08-00018-a.

REFERENCES

1. **Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda** (*Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r*) (Energy strategy of the Russian Federation up to 2035 (Approved by the order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 No. 1523-p)).
2. **Annual Energy Outlook 2020 with Projections to 2050**. U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2020.
3. **Rouch D.A.** Electricity power plan to 2050: replacing coal-fired plants with renewable energy plants & better energy efficiency. – Clarendon Policy & Strategy Group, Melbourne, Australia, 2021, Working Paper No. 28.
4. **Liserra M., Sauter T., Hung J.Y.** Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics. – IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, vol. 4, No. 1, pp. 18–37, DOI: 10.1109/MIE.2010.935861.
5. **Kroposki B., et al.** Achieving a 100 % Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. – in IEEE Power and Energy Magazine, 2017, vol. 15, No. 2, pp. 61–73, DOI: 10.1109/MPE.2016.2637122.
6. **Keller J., Kroposki B.** Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources, 2010, DOI:10.2172/971441.
7. **Behnke M., Ellis A.** Contribution of Photovoltaic Power Generation Systems to AC Short Circuits – a Survey of Current Modeling Practices and Challenges. – IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), Tampa, 2013, pp. 3128–3133.
8. **Shuai Z., et al.** Comparative Study of Short-Circuit Fault Characteristics for VSC-Based DC Distribution Networks With Different Distributed Generators. – IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, vol. 7, No. 1, pp. 528–540, DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2834542.
9. **Meskin M., Domijan A., Grinberg I.** Impact of Distributed Generation on the Protection Systems of Distribution Networks: Analysis and Remedies. – IET Gener. Transm. Distrib., 2020, No. 14, pp. 5944–5960, DOI:10.1049/iet-gtd.2019.1652.
10. **Antonov B.M., et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 1, pp. 8–13.
11. **Karaliolios P., et al.** Overview of Short-Circuit Contribution of Various Distributed Generators on the Distribution Network. – 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padua, Italy, 2008, DOI: 10.1109/UPEC.2008.4651553.
12. **Coster E.J., et al.** Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. – in Proceedings of the IEEE, 2011, vol. 99, No. 1, pp. 28–39, DOI: 10.1109/JPROC.2010.2052776.
13. **BS EN60898-1:2019**. Electrical Accessories, Circuit Breakers for Overcurrent Protection for Household and Similar Installations. Part 1: Circuit-Breakers for A.C. Operation, 2019.
14. **Antipov K.M., et al.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Electrical Power Plants)*, 2005, No. 4, pp. 19–32.
15. **Alekseev B.A.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2008, No. 3, pp. 50–56.
16. **Paul W., et al.** Superconducting Fault Current Limiter Applications, Technical and Economical Benefits, Simulations and Test Results. CIGRE, 13–201, 2000.
17. **Samet H., et al.** Fault Current Limiter Versus Series Reactor. – IEEE International Conference on Environment and Electrical

Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Italy, 2017, DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977495.

18. **Prigmore J., Uzelac N.** Fault Current Limiting (FCL) devices and techniques. In: Ito, H. (Ed.): 'switching equipment CIGRE green books' – Germany, 2019, pp. 399–432.

19. **Okedu K.E., et al.** Wind Farms Fault Ride Through Using DFIG with New Protection Scheme. – IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, No. 3, pp. 242–254.

20. **Guo W., et al.** Evaluation of the Performance of BTFCLs for Enhancing LVRT Capability of DFIG. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, No. 30, pp. 3623–3637.

21. **Shurupov A.V., et al.** *Energiya edinoy seti – in Russ. (Unified Grid Energy)*, 2013, No. 2(7), pp. 54–65.

22. **Pat. RU 132270 U1.** *Tokoogranichivayushchee ustroystvo dlya vysokovol'tnyh liniy elektropredach (Current Limiting Device for High-Voltage Power Lines)* / B.M. Antonov, et al, 2013.

23. **Pat. RU 88861 U1.** *Tokoogranichivayushchee ustroystvo na baze magnitno-svyazannyh reaktorov (Current Limiting Device Based on Magnetically Coupled Reactors)* / B.M. Antonov, 2009.

[27.07.2021]