



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

### Силовые полупроводниковые системы для нужд малой генерации

Самойленко В. О., инж., Паздерин А. В., доктор техн. наук

**ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина”, Екатеринбург**

Рассмотрены способы применения силовых полупроводниковых преобразовательных систем для нужд малой генерации (МГ) и их полезные функции. Интеграция установки МГ в систему через полупроводниковые преобразователи (ПП) со стандартизированными типовыми свойствами позволяет упростить ее эксплуатацию и технологическое присоединение. Приведены также наиболее широко применяемые в преобразователях виды полупроводниковых приборов, их параметры и статистика отказов.

**Ключевые слова:** малая генерация, распределенная генерация, силовая электроника, полупроводниковый преобразователь, инвертор.

Полупроводниковые преобразовательные силовые системы для нужд МГ ориентированы прежде всего на решение технологических вопросов, связанных с обеспечением функционирования систем возбуждения установок, нормальных пусков/остановов генераторов и выдачи ими мощности, а также защиты от КЗ в сети [1]. Эти основные задачи отвечают интересам владельцев малой генерации. Далее под полупроводниковым преобразователем понимается последовательно подключаемый к генератору блок в составе инвертора и выпрямителя с системой управления, фильтрами гармоник и другим необходимым вторичным оборудованием, способный регулировать потоки мощности от генератора в сеть и обратно.

Для сетевых компаний важными в работе локального участка сети с МГ являются поддержание параметров качества электроэнергии, ограничение токов КЗ и эффективное действие устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) [2]. Реализация указанного возможна с помощью установок МГ с ПП с соответствующими стандартизированными свойствами. Также это позволяет установке соответствовать техническим условиям на подключение объекта малой генерации и косвенно упрощает для владельца процедуру подключения. Международным стандартом на преобразовательную электронику для подключения объектов малой генерации является UL 1741 [3].

Таким образом, подключение объектов МГ через ПП с типовыми унифицированными свойствами, соответствующими стандарту, способствует как улучшению технологического процесса производства электроэнергии, так и изменению (прогнозируемому) режима работы энергосистемы.

#### *Применение силовой электроники для МГ*

Возможно следующее применение ПП для нужд МГ: в системе возбуждения; для коммутации первичных цепей и обеспечения синхронной работы генератора и энергосистемы; для симметрирования нагрузки генератора по фазам; при реализации воздействий РЗА; при пусках и остановах генератора; при альтернативном ретрофите и переводе в режим синхронного компенсатора; при интеграции разнородных электроустановок и возобновляемых источников энергии в энергосистему.

*Применение силовой электроники в системах возбуждения.* Классическим примером такого ее использования является тиристорный выпрямитель. В целом, подобные системы аналогичны системам возбуждения “большой” генерации.

Следует отметить, что доля полупроводниковой электроники в системах возбуждения МГ не растет, а для генераторов малого диапазона мощностей (1 – 5 МВт) даже снижается вследствие перехода производителей на изготовление синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами вместо обмотки возбуждения [4]. В СГ до 1 МВт также иногда используется бесщеточная система возбуждения с ПП для отбора мощности и выпрямителем для питания обмотки возбуждения [4]. В ветро- и гидрогенераторах широко применяются асинхронные машины с двойным питанием [4], у которых трехфазная обмотка ротора подключена к ПП для изменения частоты. Распространение получили также бесщеточные асинхронные машины с двойным питанием.

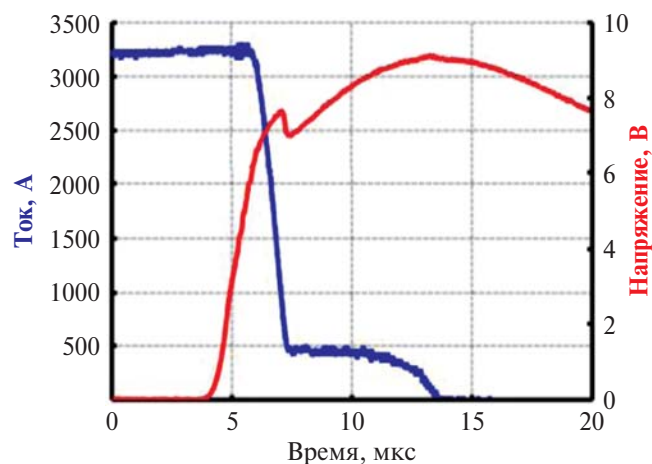


Рис. 1

*Коммутация первичных цепей и согласование частот энергосистемы и генератора.* Важным преимуществом установки преобразователей является возможность выбора первичного привода генератора, работающего на частоте, не являющейся промышленной. Это позволяет приводу работать в зоне оптимальных для него оборотов и исключает из состава установки редуктор (коробку передач), снижающий ее надежность и КПД. Так, газовые турбины эффективно работают при частотах вращения выше 6000 об/мин, газопоршневые двигатели — от 1000 об/мин, турбодизели — от 1800 об/мин, частота вращения ветродвигателей является величиной непостоянной и меняется от нескольких до сотен оборотов в минуту [4].

В настоящее время рабочие частоты ПП составляют 8 – 330 Гц. Как правило, в ПП используется трехуровневая схема со связанной нейтралью [4]. Для подключения солнечных панелей часто используются каскадные H-образные схемы. С целью исключения высших гармоник на всех уровнях многоуровневого инвертора применяют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), что позволяет получить приемлемую кривую напряжения для дальнейшего сглаживания ее LC-фильтрами.

Современные ПП являются также эффективными коммутационными аппаратами — единственный тиристор обеспечивает отключение тока примерно 3 – 4 кА на напряжении 6,6 кВ за 10 мкс (см. рис. 1) [5].

*Симметрирование фазных нагрузок генератора.* Генератор не может длительно работать на несимметричную по фазам нагрузку. Возникающие при этом токи обратной последовательности, протекая по обмотке статора, индуцируют поток реакции якоря, вращающийся с двойной частотой в обратную относительно ротора сторону. Данный поток

наводит пульсации двойной частоты в токе обмотки возбуждения и на поверхности ротора, что приводит к несинусоидальности фазных токов статора, вибрациям, нагреву различных элементов генератора токами высокой частоты. Типовые уставки (по доле тока обратной последовательности в полном токе [6]) сигнального элемента защиты генератора составляют 5 %, отключающего элемента — 9 %. Время отключения по интегральной характеристике — 0,5 – 4000 с, время охлаждения генератора — 500 – 2000 с. Преобразователь выравнивает фазные токи за счет промежуточного преобразования в постоянный ток.

*Реализация воздействий РЗА.* Наличие ПП видоизменяет логику работы защиты и уставки РЗА установки МГ [4]. На рис. 2 представлена реализуемая с помощью ПП типовая защитная характеристика по току. В ней можно выделить следующие области, в которых:

ПП может выдавать утяжеленный нагрузочный ток  $1,3 - 1,4I_{\text{ном}}$  (в зависимости от нагрева тиристоров или транзисторов защита от перегрузки срабатывает с выдержкой времени 10 – 100 с);

ток ПП может достигать  $1,6I_{\text{ном}}$  при снижении напряжения в близлежащей к генератору сети в результате КЗ. В этом случае приоритетно обеспечивается выдача активной составляющей тока, уставки по реактивной составляющей тока и коэффициенту мощности не реализуются. Выдержка времени на отключение по условию нагрева составляет 0,1 – 10 с;

при токе ПП, равном  $1,6 - 1,8I_{\text{ном}}$ , защита от снижения напряжения отключает установку с выдержкой времени 0,1 с, а при превышении им значения  $1,8I_{\text{ном}}$  — с выдержкой времени 1 – 6 мс;

ПП не отключается при кратковременных (не более 1 мс) бросках тока до  $4,5I_{\text{ном}}$ .

Кроме того, в составе РЗА установки МГ с ПП имеется защита по напряжению. В ее характеристике (см. рис. 3) можно выделить следующие области:

сброс мощности турбиной при останове подачи топлива в камеру сгорания вследствие снижения напряжения сети до 50 % или повышении до 120 % длительностью более 0,2 с;

отключение установки от сети при сбросе мощности турбиной из-за останова подачи топлива в камеру сгорания вследствие:

повышения напряжения сети до 110 % длительностью более 1 с;

снижения напряжения сети до 80 % продолжительностью более 3 с.

*Пуск/останов генератора с помощью частотного привода.* Наличие ПП дает возможность использовать его в качестве частотно-

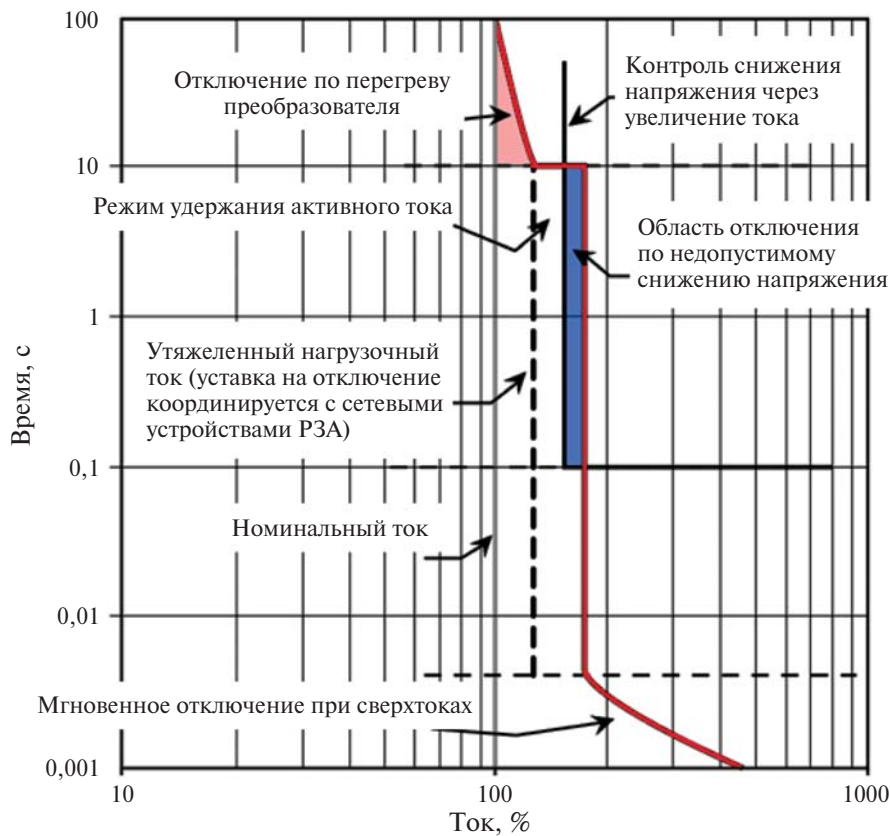


Рис. 2

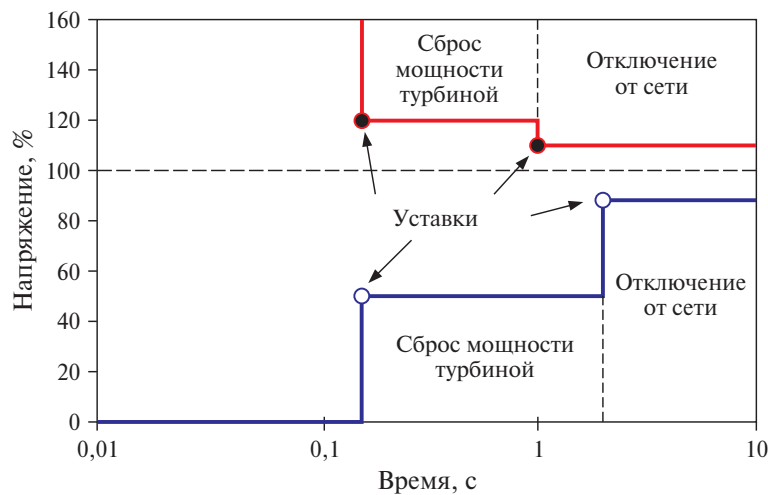


Рис. 3

регулируемого привода для пуска генератора. Это позволяет ускорять разворот установки и разгон генератора до подсинхронных частот вращения во время прогрева турбины, ввода установки в работу в зоне максимального крутящего момента турбины. Кроме того, по сравнению с токами при прямом асинхронном пуске значения токов статора генератора значительно меньше.

В современных ПП, используемых в качестве частотно-регулируемого привода, могут

быть предусмотрены следующие режимы пуска [7]:

*основной* — разгон ротора генератора с номинальной мощностью преобразователя до зоны высокого крутящего момента турбины при частоте 0,7 от номинальной (2100 об/мин);

*от резервного источника питания (например, дизель-генератора)* — разгон ротора генератора с минимально возможной мощностью до зоны высокого крутящего момента турбины при частоте 0,7 от номинальной (2100 об/мин);

*останов генератора путем снятия возбуждения* — полное отключение возбудителя при частоте вращения ротора генератора ниже 200 об/мин;

*имитация режима вращения ротора валоповоротом*;

*мойка газовой турбины* (технология фирмы “АЕG Industrial”) — заливка корпуса газовой турбины водой или моющим составом, вращение с частотами до 600 об/мин по специальной программе [7];

*пуск в режиме синхронного компенсатора* — разгон до частоты 1,05 от номинальной (3150 об/мин) и последующая синхронизация.

*Режим синхронного компенсатора без работы первичного привода.* Простой установок МГ по каким-либо причинам экономически невыгоден. Поэтому крупные компании, специализирующиеся на энергетическом машиностроении для тяжелой промышленности (“General Electric”, “АЕG Industrial”), предлагают в качестве альтернативы демонтажу, ретрофиту, простую турбогенератора переводить его в режим синхронного компенсатора без использования первичного привода [7, 8].

Для обеспечения работы турбогенератора в качестве синхронного компенсатора в обычных условиях требуются затраты на топливо на поддержание вращения, технологический минимум загрузки по устойчивому сгоранию топлива, отключение защит от реверса мощности.

Преимущества перевода турбогенератора в режим синхронного компенсатора [8]:

при возникновении наиболее частых неисправностей (в том числе износ турбины или изменение тепловой схемы в целом) в тепловой части установки электрическая часть, будучи исправной, может находиться в работе;

синхронный компенсатор является источником реактивной мощности и средством поддержания напряжения;

синхронный компенсатор с относительно большой постоянной инерцией (около 40 % даже в случае расцепки с турбиной) и мощной генераторной системой автоматического регулирования возбуждения пропорционального или сильного действия обеспечивает эффективную стабилизацию напряжения в точке подключения;

возможность загрузки компенсатора реактивным током на 30 % больше, чем генератора ввиду отсутствия активного тока, что позволяет разгрузить остальные установки от выработки реактивной мощности и догрузить их выработкой активной, при этом обеспечиваются большая прибыль и меньшие издержки.

Помимо указанного синхронный компенсатор является источником реактивной мощности и средством поддержания напряжения.

Кроме того, к достоинствам варианта относится наличие одного преобразователя частоты и одной системы управления с возможностью подключения любой из установок МГ, если в точке подключения их несколько.

Преобразователь частоты можно включать последовательно в расщепку между генератором и сетью, при этом он работает как частотный привод для мягкого пуска компенсатора в асинхронном режиме и его синхронизации. Демонтаж турбины, а иногда и расцепка валов в таком случае не требуется. При демонтаже турбины на ее месте в качестве привода устанавливают упорный подшипник и асинхронный двигатель (установка двигателя со стороны возбудителя проблематична, поскольку вал и подшипник с этой стороны не рассчитаны на механические усилия). Причем частотным приводом может оснащаться двигатель или сам синхронный компенсатор.

*Интеграция возобновляемых источников энергии в энергосистему и создание комбинированных силовых установок.* Ветрогенераторы из-за колебаний направления и силы ветра обладают резкопеременным характером графика выработки мощности. Существует тенденция создания крупных ветропарков из нескольких десятков генераторов. При этом в них возможны различные решения, касающиеся выдачи мощности и преобразования частот. Однако для большинства ветропарков характерно следующее [4]:

выдача мощности единичного ветрогенератора на переменном токе;

использование для морских ветропарков промежуточной коллекторной станции на морской платформе, обеспечивающей коммутацию отдельных генераторов и получение постоянного тока для выдачи мощности на берег по высоковольтной кабельной линии постоянного тока;

применение повышающей подстанции для компенсации реактивной мощности и выдачи электроэнергии.

Существует несколько десятков схем подключения солнечных панелей (преимущественно однофазных) в зависимости от их характеристик: мощности, классов напряжения преобразовательной электроники и сети, месторасположения панелей, размеров солнечной электростанции, наличия накопителей энергии [4]. Широкое распространение получила двухуровневая схема подключения солнечных панелей. В ней с помощью ПП первого уровня, контролирующего точку работы с максимальной мощностью, осуществляется управление каждым блоком, состоящим из нескольких последовательно соединенных сол-



нечных панелей. ПП второго уровня (в котором используется ШИМ и контролируется общий уровень искажения гармоник) обеспечивает повышение напряжения на постоянном токе и выдачу мощности всей солнечной электростанции в сеть. В составе установки могут быть аккумуляторные батареи, сглаживающие резкопеременный характер генерации.

Интеграция разнородных генерирующих источников в единую установку широко распространена в условиях изолированных энергосистем (например, на Крайнем Севере) [9]. Связь всех электроприемников обеспечивается через единую шину постоянного тока среднего или низкого класса напряжения. Разнородные генерирующие источники и нагрузки подключаются через модульные ПП непосредственно к шине установки, что является преимуществом такой схемы. В рассматриваемой установке выработку обеспечивают, как правило, ветрогенераторы, солнечные панели, дизель-генераторы. Резервное питание в зависимости от длительности перерыва осуществляют маховики, аккумуляторные батареи. Общая нагрузка установки может включать различные нагрузки переменного и постоянного тока.

#### *Полупроводниковые устройства в составе силовых преобразователей и статистика отказов ПП*

В настоящее время в ПП в качестве основных элементов применяются [4]: тиристор с интегрированной системой управления (IGCT — Intergated Gate-Commutated Thyristor) и биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT — Insulated-Gate Bipolar Transistor). Тиристор типа IGCT является совместной разработкой фирм “ABB” (Швейцария) и “Mitsubishi Electric” (Япония). Ставку на транзисторы IGBT делают, например, фирмы “Siemens” и “Semikron” (Германия), а также “General Electric” (США). Все производители широко применяют простые диоды и запираемые тиристоры (GTO — Gate Turn-Off) [4]. Обычно ПП представляют собой блоки шкафного или шинного исполнения.

Основными направлениями развития полупроводниковых приборов для силовых преобразователей являются повышение рабочего тока единичного прибора (транзистора — до 1 кА, тиристора — до 5 кА, диода — до 10 кА), увеличение максимального напряжения единичного прибора (до 10 кВ) и наработки на отказ при максимальной нагрузке (сейчас у транзистора — 3–4 года, у тиристора — до 6 лет, у диода — до 20 лет). Относительно невысокая наработка на отказ приводит к необходимости применения из-

бытка полупроводниковых приборов в схеме. Для управляемых тиристоров GTO, IGCT и транзисторов IGBT важно повысить скорость переключения (в настоящий момент до 1 кГц у тиристора и до 3,5 кГц у транзистора) и снизить потери на управление (5–7%). Накопленная статистика отказов универсальных полупроводниковых силовых преобразователей [10] свидетельствует о том, что основными их причинами являются неисправности: системы управления ПП (35%), тиристора/транзистора/диода (25%), системы охлаждения (18%), элементов пассивных LC-фильтров (11%), вторичных цепей ПП (10%) и других компонентов (1%).

По результатам обзора применения силовой полупроводниковой электроники для нужд малой генерации можно сделать вывод о том, что интеграция установки МГ через ПП со стандартизированными типовыми свойствами может облегчить процессы эксплуатации установки МГ и ее технологического присоединения.

#### Список литературы

1. **Периодический** открытый семинар НП РНК СИГРЭ “Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации” ([www.cigre.ru/activity/conference/seminar\\_c6](http://www.cigre.ru/activity/conference/seminar_c6)).
2. **Научные** проблемы распределенной генерации / С. А. Ерошенко, А. А. Карпенко, С. Е. Кокин, А. В. Паздерин. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2010, № 11–12.
3. **UL 1741.** Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources, 2005.
4. **Chakraborty S., Simoes M. G., Kramer W. E.** Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems. — Green Energy and Technology, Springer-Verlag, London, 2013.
5. **Grüning H.** IGCT Technology — A Quantum Leap for High-power Converters. — ABB Industrie, Switzerland, 2003.
6. **Федотов В. П., Федотова Л. А.** Проектирование микропроцессорных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор. — Екатеринбург: УрФУ, 2013.
7. **Start-up inverter of gas turbo-sets.** Integrated compact units. — AEG Industrial Engineering GmbH, 2007.
8. **Fogarty J. M., LeClair R. M.** Converting Existing Synchronous Generators into Synchronous Condensers. — Power Engineering, October, 2011.
9. **Обухов С. Г.** Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: Автореф. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. Томск, 2013.
10. **Bala S., Pan J., Das D. O.** Apeldoorn and S. Ebner. Lowering Failure Rates and Improving Serviceability in Offshore Wind Conversion-Collection Systems. — ABB Corporate Research, Raleigh, USA; ABB Power Electronics and Medium Voltage Drives, Switzerland, 2013.