



СЕМИНАР

**Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации**

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ НУЖД МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В.О. Самойленко

ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
г. Екатеринбург

Российский национальный комитет СИГРЭ,
г. Москва

2014



СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Полупроводниковые устройства.....	4
2.1. Диод.....	5
2.2. Запираемый тиристор (GTO) и тиристор с интегрированной системой управления (IGCT).....	5
2.3. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT).....	6
2.4. Схемы включения и принцип работы инвертора.....	8
2.5. Схемы включения и принцип работы выпрямителя.....	11
2.6. Особенности прямого преобразования напряжения на постоянном и переменном токе.....	11
3. Схема управления установкой малой генерации с преобразованием частот.....	13
4. Влияние полупроводниковых преобразователей на системные свойства малой генерации.....	15
4.1. Влияние преобразователей на частотные свойства энергосистемы.....	15
4.2. Влияние преобразователя на статическую устойчивость.....	16
4.3. Влияние преобразователя на динамическую устойчивость.....	17
5. Применение силовой электроники для нужд малой генерации.....	19
5.1. Применение силовой электроники в системах возбуждения.....	19
5.2. Коммутация цепей и согласование частот энергосистемы и генератора.....	20
5.3. Симметрирование фазных нагрузок генератора.....	21
5.4. Реализация воздействий РЗА.....	22
5.5. Пуск/останов генератора с помощью частотного привода.....	24
5.6. Перевод генератора в режим синхронного компенсатора без работы первичного привода.....	25
5.7. Интеграция больших массивов возобновляемых источников энергии.....	26
5.8. Интеграция различных источников энергии и разнородных нагрузок.....	29
6. Основные причины отказов силовых преобразователей.....	30
7. Международные стандарты на преобразовательную электронику для подключения объектов малой генерации.....	30
8. Выводы.....	31
Список использованных источников.....	32
Контактная информация.....	33



1. Введение

Полупроводниковая силовая электроника для нужд генерации начала широко применяться в 50-е гг. XX века в виде диодных выпрямителей систем возбуждения синхронных генераторов [1]. Быстрое совершенствование полупроводниковых устройств и их удешевление привело к появлению эффективных тиристорных систем возбуждения, использовавшихся с конца 60-х гг. [2]. Массовое внедрение больших объемов ветрогенерации в 90-х гг. привело к массовому внедрению полупроводниковых преобразователей (ПП) для развязки генераторов и энергосистемы по частоте [3]. Современные электрохимические и фотоэлектрические источники энергии работают преимущественно на постоянном токе и могут быть интегрированы в энергосистему с помощью преобразователей [4].

Изначально полупроводниковые преобразовательные силовые системы для нужд генерации ориентированы, прежде всего, на решение технологических вопросов конкретных установок, связанных с обеспечением функционирования систем возбуждения, нормальных пуска/останова, выдачи мощности и защиты установки от возмущений в сети. Эти основные функции отвечают интересам владельцев малой генерации (МГ).

Сетевые компании заинтересованы в уменьшении собственных трудозатрат по выдаче документации на технологическое присоединение разнородных установок МГ с различными свойствами. Важными для сетевых компаний являются беспроблемный характер функционирования МГ с точки зрения поддержания параметров качества электроэнергии в узле или локальном участке их сети, ограничение токов короткого замыкания и эффективная работа устройств РЗА [5]. Реализация вышеперечисленных типовых функций возможна при помощи ПП.

Разнородные установки МГ с различной физикой поведения в установившихся и переходных режимах меняют классические свойства электроэнергетической системы [4], являясь предметом заботы регулирующих органов, таких, как Системный оператор Единой энергетической системы. Особенно важны учет частотных и инерционных свойств энергосистемы с МГ, обеспечение балансов мощности и энергии, покрытие графиков нагрузки. Наиболее проработанным международным стандартом на свойства малой генерации является IEEE 1547 [6].

Выходом может быть подключение объектов МГ через ПП с типовыми унифицированными свойствами, обеспечивающими как улучшение технологического процесса производства электроэнергии, так и известное (прогнозируемое) изменение параметров энергосистемы. В соответствии с этим принципом создан международный стандарт UL 1741 на ПП для нужд подключения МГ [7]. Таким образом, силовые ПП для нужд МГ представляют интерес и для владельцев установок малой генерации, и для сетевых компаний, и для регулирующих органов.

Целью данного обзора является ознакомление всех субъектов энергетики и заинтересованных сторон с направлениями применения силовой полупроводниковой преобразовательной электроники для нужд малой генерации и с общими возможностями



такой электроники.

2. Полупроводниковые устройства

Для представления способов применения ПП для нужд МГ выполняется упрощенный краткий обзор принципов работы применяемой полупроводниковой электроники, ее возможностей и проблем, основных схем. В силовой электронике важным является понятие «идеальный ключ» (рис. 1) [4].

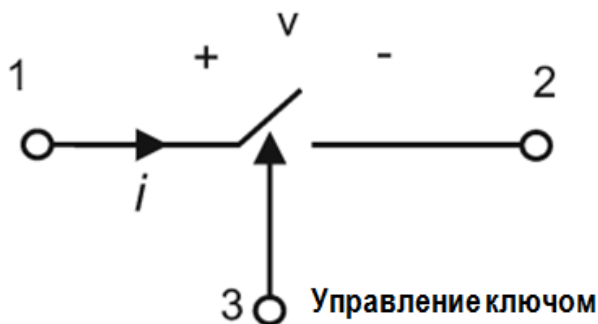


Рис. 1. Идеальный ключ

Идеальный ключ (ИК) обладает следующими свойствами:

- в замкнутом состоянии падение напряжения на ИК равно нулю и устройство может проводить бесконечный ток;
- в разомкнутом состоянии ток равен нулю и ИК может выдерживать бесконечное напряжение;
- время переключения ИК из одного состояния в другое равно нулю, нет собственных переходных процессов при переключении;
- отсутствуют потери и затраты энергии на переключение из одного состояния в другое;
- отсутствует влияние на качество электроэнергии.

К реальному ключу можно отнести любой полупроводниковый прибор – диод, тиристор, транзистор и др. В сравнении с идеальным ключом реальный ключ обладает следующими свойствами (в скобках приведен порядок величин ограничивающих факторов):

- у любого полупроводникового прибора существует ограничение по току (несколько кА), продиктованное, прежде всего, его тепловым режимом (десятки °C);
- имеется обратная проводимость (доли %), наличие конечного напряжения пробоя (несколько кВ);
- суммарное время переключения из одного состояния в другое и переходного процесса – порядка 5 мкс;
- КПД реального ключа - 98 %, частота системы управления составляет 0,5 - 3,5 кГц по соображениям ограничения потерь;
- доля высших гармоник в кривой напряжения может достигать 30 %, хотя обычно не превышает нескольких %.



Существует множество видов полупроводниковых приборов, но далее в обзоре рассматриваются только широко применяемые на сегодняшний день: диод, запираемый тиристор (GTO – Gate Turn-Off), тиристор с интегрированной системой управления (IGCT – Intergated Gate-Commutated Thyristor) и биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor). Кратко рассматривается ряд схем включения полупроводниковых устройств и их свойства, представляющие интерес с точки зрения использования для нужд МГ.

2.1. Диод

Диод является одним из простых и распространенных полупроводниковых приборов. Обозначение диода на схемах и его сторон приведено на рисунке 2, а.

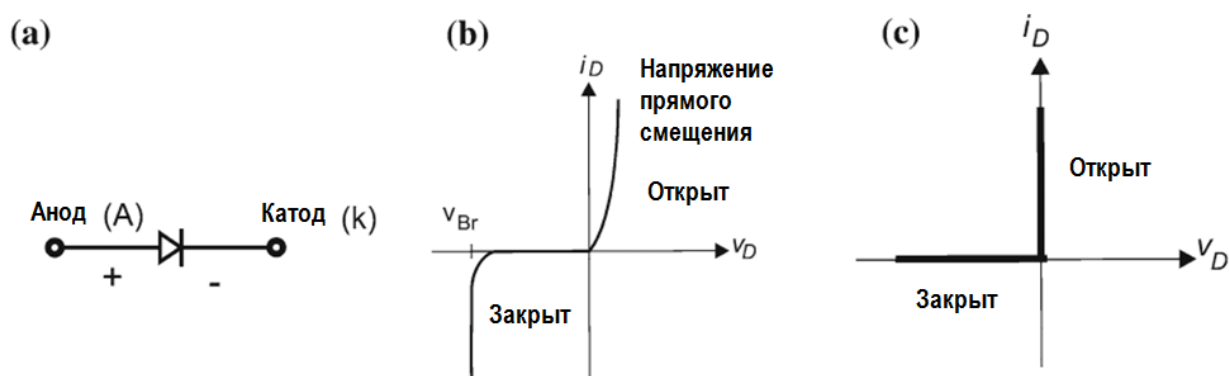


Рис. 2. Диод

Реальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода приведена на рисунке 2, б. При приложенном к диоду напряжении прямого смещения диод открыт и проводит электрический ток. При обратном напряжении диод закрыт, хотя имеется небольшой обратный ток величиной порядка десятых %. При увеличении обратного напряжения до величины пробоя V_{Br} обратный ток резко увеличивается. С учетом нормальных режимов работы диода вышеописанными свойствами можно пренебречь и использовать идеальную характеристику, приведенную на рисунке 2, с.

Диод прост и надежен, выдерживает токи до 10 кА и напряжения до 10 кВ, наработка на отказ (статистический параметр) лучших современных диодов составляет около 20 лет. К недостаткам относится практическая неуправляемость, т.к. напряжение «анод-катод» является внешним для диода и зависит от внешних параметров.

Диоды применяются в современных ПП в качестве простых выпрямителей и для антипараллельного включения с тиристорами и транзисторами в сложных схемах.

2.2. Запираемый тиристор (GTO – Gate Turn-Off) и тиристор с интегрированной системой управления (IGCT – Intergated Gate-Commutated Thyristor)

Обозначение запираемого тиристора (GTO) на схемах приведено на рисунке 3, а сверху. Ниже на рисунке 3, а приведено обозначение тиристора с интегрированной системой управления (IGCT).

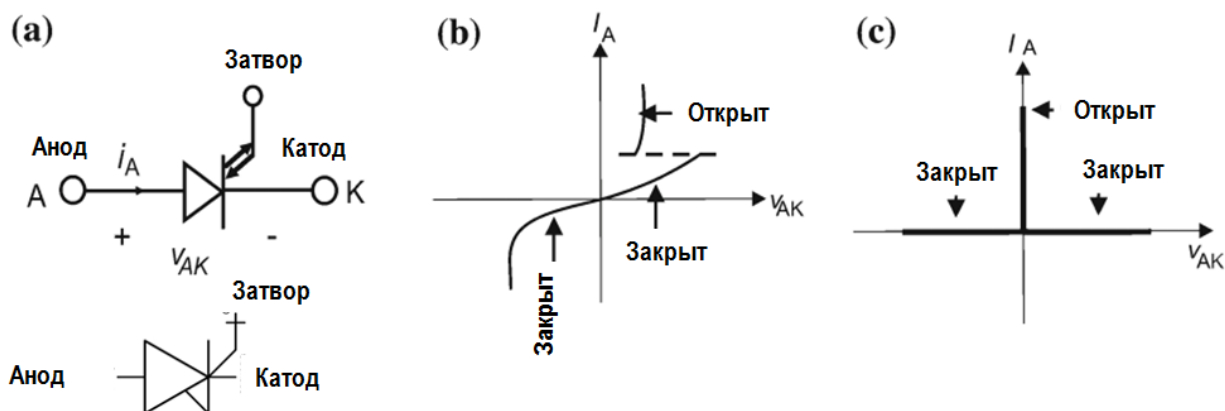


Рис. 3. Тиристоры типов GTO и IGCT

Оба вида тиристоров похожи по своей реальной ВАХ, приведенной на рисунке 3, б. В закрытом состоянии при приложении напряжения любой полярности тиристор проводит небольшой ток. В открытом состоянии тиристор проводит прямой ток подобно диоду. При увеличении обратного напряжения до величины пробоя V_{Br} обратный ток резко увеличивается. С учетом нормальных режимов работы тиристора вышеописанными свойствами можно пренебречь и использовать идеальную характеристику, приведенную на рисунке 3, с.

Открытие запираемых тиристоров (GTO) осуществляется с помощью инверсного тока, токовый сигнал обуславливает увеличенный уровень потерь на управление и низкое быстродействие (скорость переключения 200 - 300 Гц, до 0,5 кГц).

В отличие от запираемых тиристоров (GTO) управление тиристорами с интегрированной системой управления (IGCT) осуществляется с помощью *напряжения*, что обеспечивает снижение уровня потерь на управление и улучшенное быстродействие (скорость переключения порядка 1 кГц). В каждый тиристор типа IGCT встроен управляющий биполярный транзистор с изолированным затвором типа IGBT (рассматривается далее), что ведет к большой технологической сложности производства. Тиристор типа IGCT является совместной разработкой ABB и Mitsubishi Electric, в настоящее время только эти две компании обладают правами и технологиями по производству тиристоров данного типа [8].

Оба типа тиристоров стойки к возмущениям и перегрузкам, выдерживают токи до 5 кА и напряжения до 10 кВ, наработка на отказ (статистический параметр) лучших современных управляемых тиристоров составляет около 6 лет. Отказы тиристоров в основном обусловлены отказом системы управления.

Оба типа тиристоров применяются в ПП как в инверторах, так и в выпрямителях.

2.3. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor)

Обозначение биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT) на схемах и его сторон приведено на рисунке 4, а.

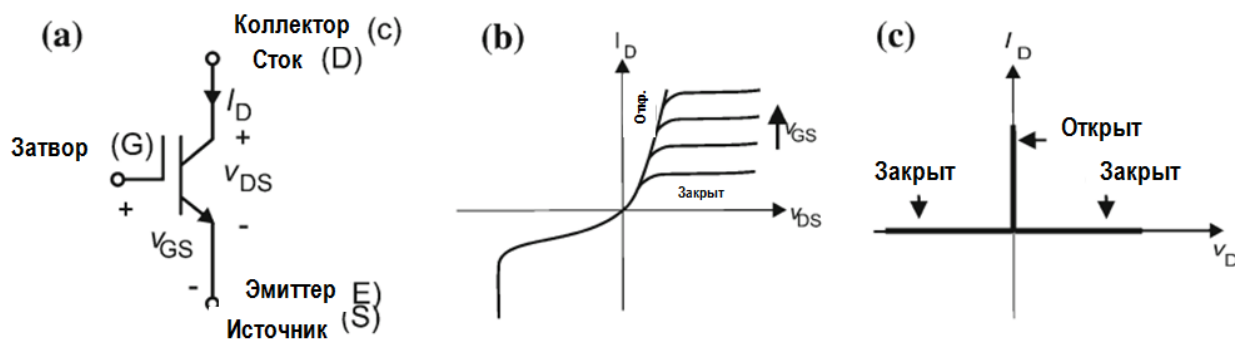


Рис. 4. Транзистор (IGBT)

Реальная ВАХ диода приведена на рисунке 4, б. В закрытом состоянии при приложении напряжения V_{DS} любой полярности тиристор проводит небольшой ток. При увеличении напряжения затвора V_{GS} транзистор открывается и при малых значениях V_{DS} работает в режиме простого проводника, при больших – в режиме усилителя. При увеличении обратного напряжения V_{DS} до величины пробоя V_{Br} обратный ток резко увеличивается. С учетом нормальных режимов работы транзистора вышеописанными свойствами можно пренебречь и использовать идеальную характеристику, приведенную на рисунке 4, с.

Транзистор типа IGBT выдерживает токи до 1 кА и напряжения до 10 кВ, наработка на отказ (статистический параметр) лучших современных транзисторов составляет около 3 лет. Данные особенности делают необходимым применение последовательно-параллельного соединения транзисторов в расчете на перегрузку и выход из строя ряда таких приборов. Тем не менее, достоинством IGBT является управляемость с частотами управляющих сигналов до 3,5 кГц и напряжением затвора порядка 12-15 В при напряжении самого транзистора 6 кВ, низкие потери. Ставку на транзисторы (IGBT) делают, например, Siemens [9], General Electric [10] и Semikron [11].

Транзисторы (IGBT) применяются в ПП как в инверторах, так и в выпрямителях.

Внешний вид и размеры современных полупроводниковых устройств шкафного и шинного исполнений приведен на рисунке 5.

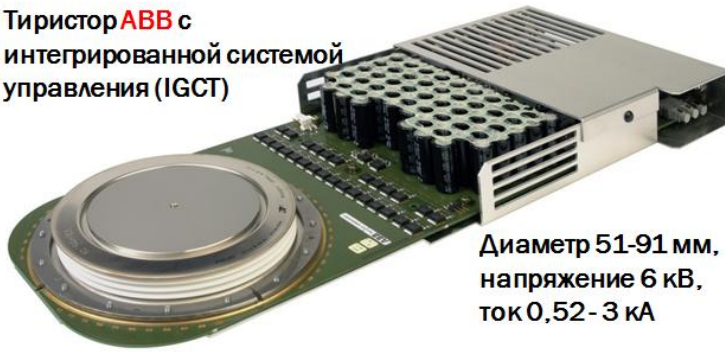
Исходя из больших мощностей и малых габаритов современных полупроводниковых приборов, удельная тепловая нагрузка и мощность их систем охлаждения представляют техническую проблему.



СЕМИНАР

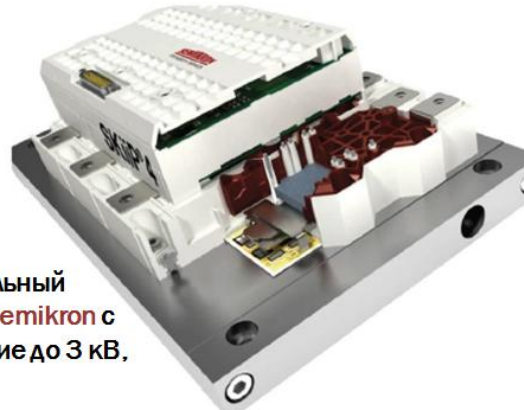
Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Тиристор **ABB** с
интегрированной системой
управления (IGCT)



Диаметр 51-91 мм,
напряжение 6 кВ,
ток 0,52 - 3 кА

Модульный
преобразовательный
шинный блок **Semikron** с
IGBT, напряжение до 3 кВ,
ток до 1 кА



Шкаф преобразователя **ABB**

Рис. 5. Внешний вид современных полупроводниковых устройств

2.4. Схемы включения и принцип работы инвертора

Назначением инвертора является преобразование напряжения постоянного тока в трехфазное переменное. Здесь и далее принято, что ПП работают в режиме источника напряжения, если не оговорено иное. Мостовая схема инвертора приведена на рисунке 6, а. Замыкаются ключи P положительной полувоны (рис. 6, b), затем с выдержкой времени данные ключи P размыкаются, на выходе $V_o(t)$ получается сигнал прямоугольной формы от источника постоянного напряжения V_i .

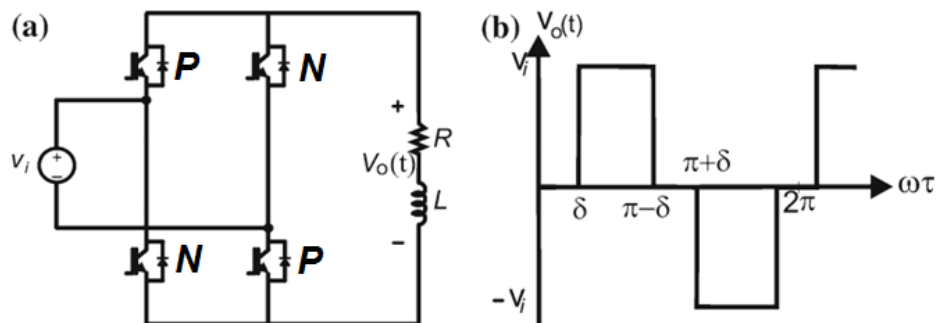


Рис. 6. Мостовая схема инвертора

Аналогично, при замыкании и последующем размыкании ключей N отрицательной полувоны получается сигнал отрицательной величины $-V_i$. Целесообразно размыкание ключей положительной полувоны и последующее замыкание ключей отрицательной полувоны производить с некоторой выдержкой времени (и наоборот), тогда сигнал на выходе будет в большей степени похож на синусоидальный, у которого мгновенное значение при углах, кратных π (180°), близко к нулю.



Выдержку времени в силовой электронике принято измерять в электрических градусах, введение выдержки времени является сдвигом момента коммутации ключей на электрический угол $\pm\delta$. С точки зрения борьбы с гармониками при $\delta=30^\circ$ обеспечивается подавление третьей гармоники.

Подобный эффект может достигаться при последовательном соединении двух мостовых инверторов, как представлено на рисунке 7, а. Коммутация ключей осуществляется со сдвигом на величину δ , форма кривой представлена на рисунке 7, б.

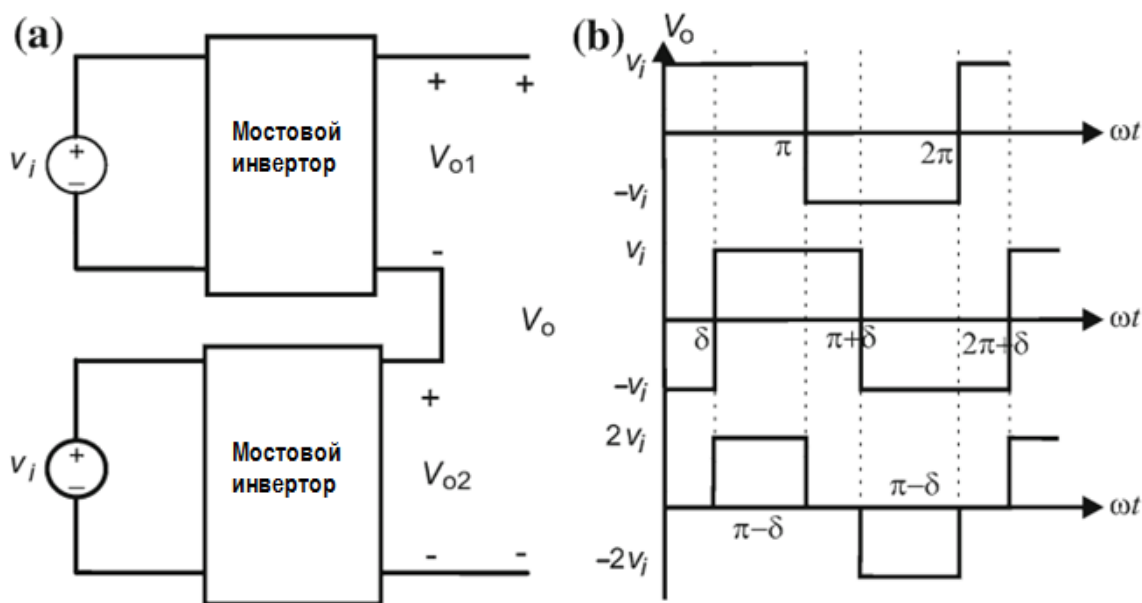


Рис. 7. Подавление гармоник при последовательном соединении двух мостов

Следует отметить, что при такой схеме включения двух инверторов общий инвертор рассчитан на двойное выходное напряжение.

Разделение прямоугольного импульса на два отдельных сегмента, сдвинутых относительно друг друга на угол $\gamma=12^\circ$, позволяет обеспечить подавление пятой гармоники (рис. 8, а). Дальнейшее развитие данной идеи приводит к принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Схема для осуществления ШИМ приведена на рисунке 8, б, результат ШИМ – на рисунке 8, с. Ключи HF работают на высокой частоте, известной как несущая, ключи LF – на низкой, модулирующей. Ширина импульса формируется с помощью схемы сравнения напряжений 8, d путем сравнения сигнала по напряжению треугольной формы на несущей частоте HF с сигналом по напряжению синусоидальной формы на модулирующей частоте LF. Под компаратором в данном случае можно понимать не только аналоговое устройство, но и совокупность программно-технических средств (включая алгоритмы), воспроизводящих логическую функцию сравнения напряжений. Для рассматриваемой схемы напряжение на выходе будет появляться при превышении значения сигнала на модулирующей частоте над значением сигнала на несущей частоте.



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

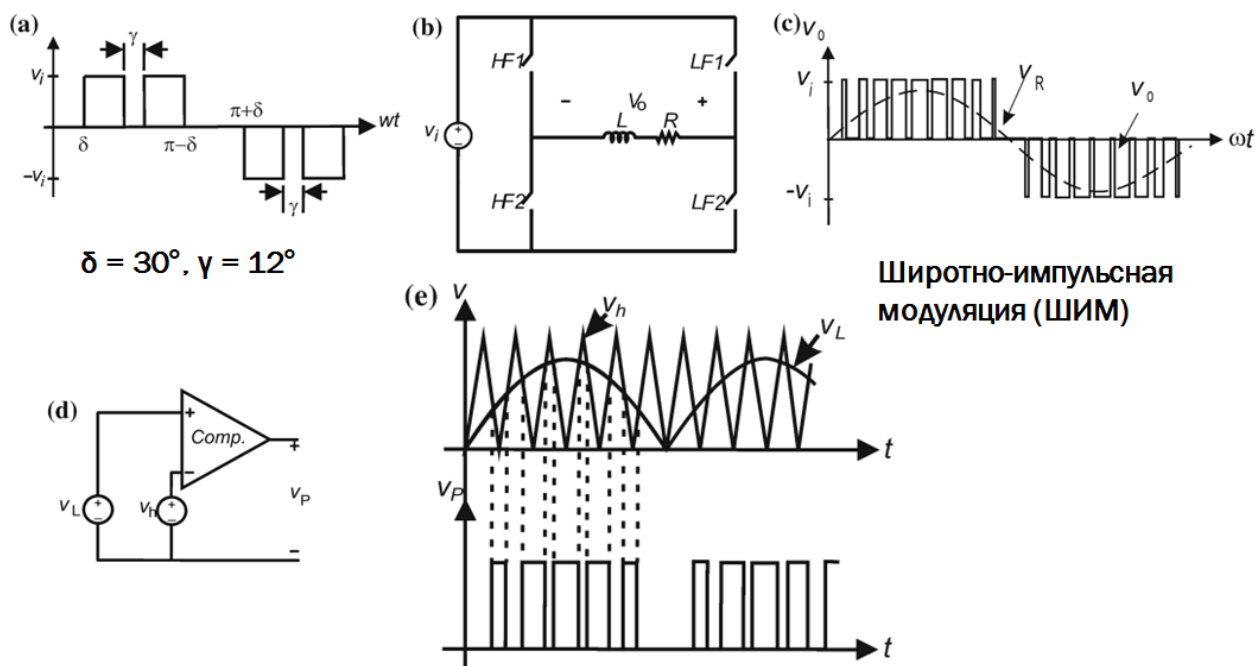
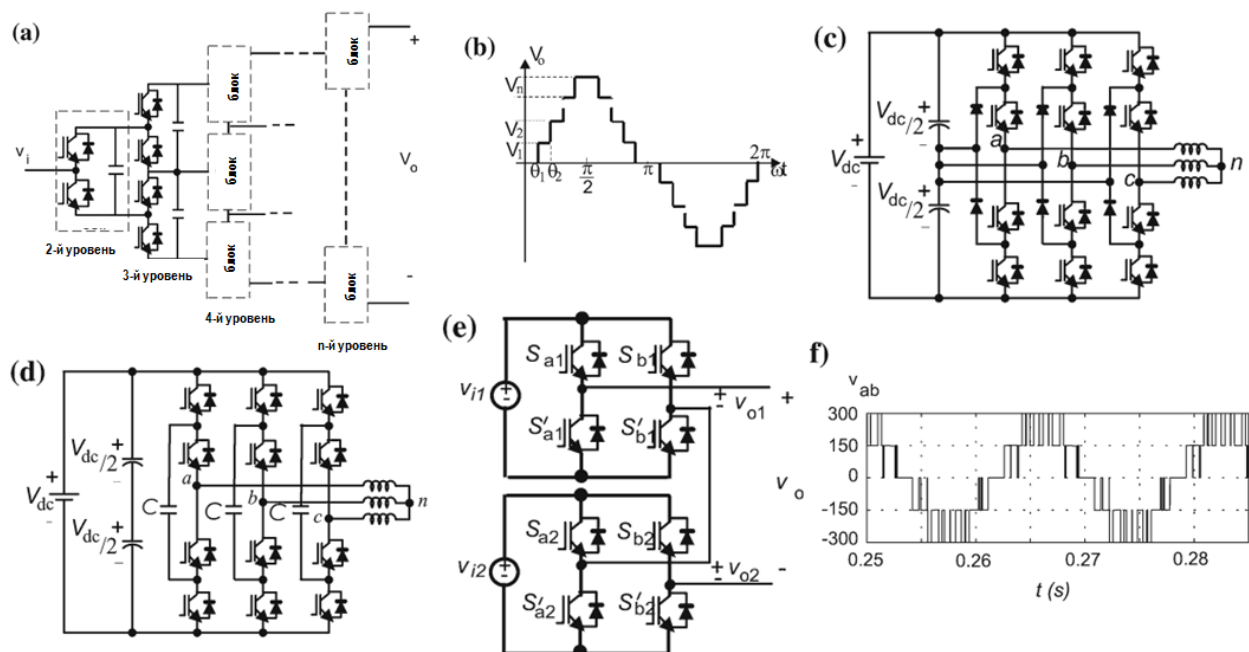


Рис. 8. Широтно-импульсная модуляция

Наиболее широко используемые схемы включения инверторов представлены на рисунке 9. При работе с высокими напряжениями используются многоуровневые инверторы (рис. 9, а), обеспечивающие формирование близкого к синусоиде сигнала (рис. 9, б). В настоящее время в ПП для электромеханических генераторов применяют схему со связанной нейтралью (рис. 9, с), существенно реже схему с навесными конденсаторами (рис. 9, d). Для подключения солнечных панелей и фотоэлектрических массивов часто используются каскадные H-образные схемы (рис. 9, е).



Используя ШИМ на всех уровнях многоуровневого инвертора, можно получить



приемлемую кривую напряжения, представленную на рис. 9, е, пригодную для дальнейшего сглаживания пассивными LC-фильтрами.

2.5. Схемы включения и принцип работы выпрямителя

Простой неуправляемый выпрямитель на диодах, включенных по шестипульсовой схеме выпрямления, представлен на рисунке 10, а. Результирующая форма кривой напряжения представлена на рисунке 10, б.

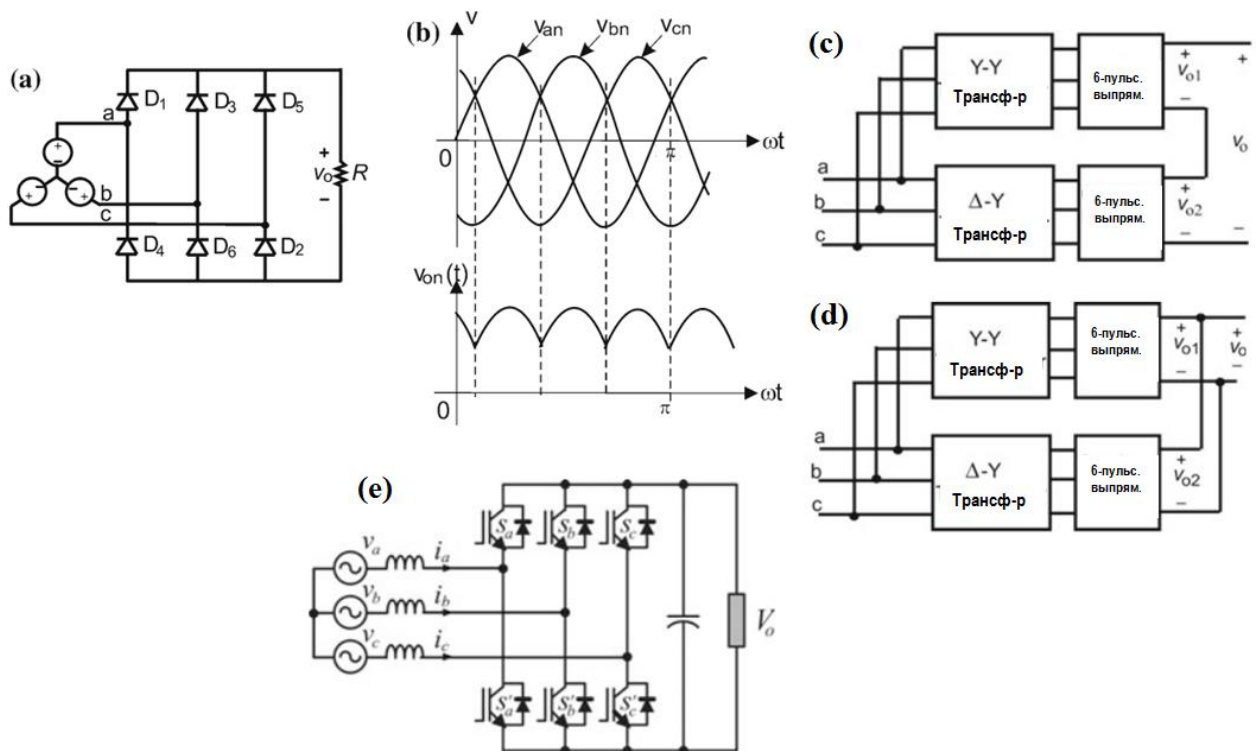


Рис. 10. Схемы включения выпрямителей

Для сглаживания пульсаций постоянного тока иногда применяют двенадцатипульсовую схему включения. Такое решение характерно при использовании для МГ универсальных ПП, основным назначением которых является частотно-регулируемый привод. Двенадцатипульсовая схема включения может быть получена последовательным или параллельным включением двух шестипульсовых схем в расчете на большое напряжение или большие токи, соответственно (рис. 10, с и d).

Рассмотренные выше неуправляемые выпрямители в связке с источниками тока (синхронные машины, обладающие большим внутренним индуктивным сопротивлением) работают тоже как источники тока. Современные управляемые выпрямители на транзисторах (тиристорах) снабжены емким накопителем на стороне постоянного тока, стабилизированы по напряжению и работают в режиме источника напряжения (рис. 10, е).

2.6. Особенности прямого преобразования напряжения на постоянном и переменном токе

Для подключения солнечных панелей, сбора энергии от разнородных источников



МГ на шину постоянного тока, повышения/понижения напряжения на постоянном токе используется прямое преобразование. Принцип действия преобразователя, включенного по вольтовывчитающей схеме, представлен на рисунке 11, а. Результирующая форма кривой напряжения представлена на рисунке 11, б. При замыкании ключей P и размыкании с выдержкой времени на выходе получается сигнал прямоугольной формы с положительным значением амплитудой V_i , аналогично при замыкании ключей N , но сигнал на выходе отрицательный. Изменяя соотношение длительности замкнутого состояния ключей P и ключей N , сгладив результирующую кривую $v_o(t)$ с помощью LC-фильтра, на выходе можно получить напряжение V_o любой полярности и величиной меньшей, чем V_i .

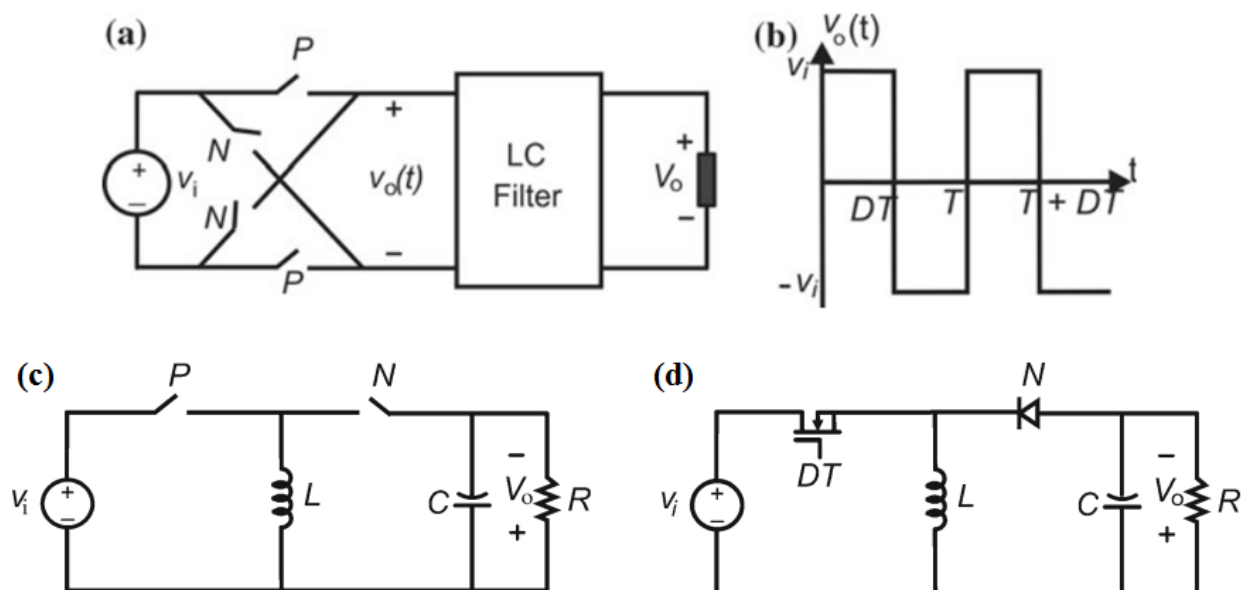


Рис. 11. Прямое преобразование напряжения на постоянном токе

Схема преобразователя, способного повышать или понижать напряжение, представлена на рисунке 11, с, а его реализация – на рисунке 11, d. С помощью контроля процесса в LC-контуре можно изменять напряжение на выходе V_o .

Для подключения МГ с непостоянными частотами (ветрогенерация, гидрогенерация) используется прямое преобразование на переменном токе. Схема с постоянной частотой и изменяемым модулем напряжения (за счет изменения среднеквадратичного значения) представлена на рисунке 12, а, кривая напряжения - на рисунке 12, б.

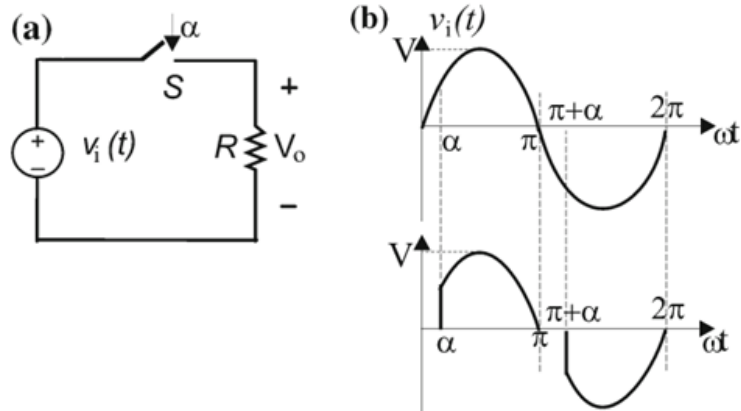


Рис. 12. Прямое преобразование напряжения на переменном токе

Преобразование частот с изменяемым модулем и изменяемой частотой представлено на рисунке 13: а – схема, б – кривая напряжения.

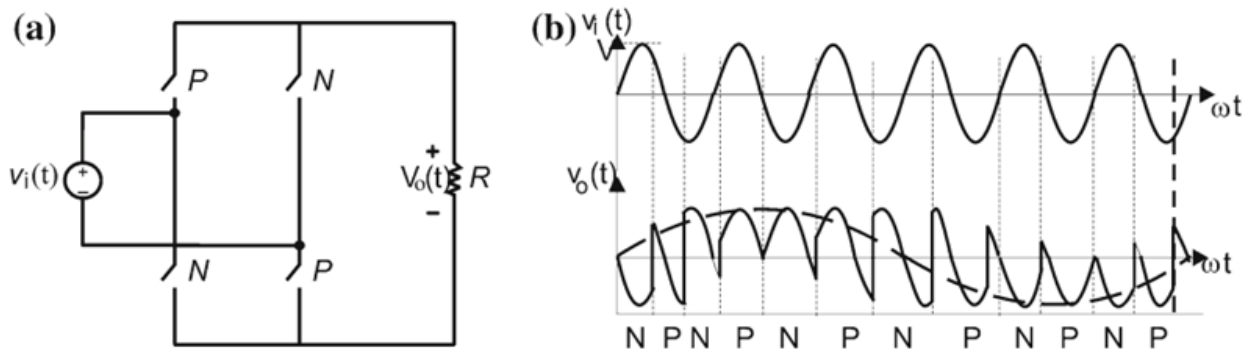


Рис. 13. Преобразование с изменяемым модулем и изменяемой частотой

Преобразование модуля и частоты осуществляется за счет коммутации пар ключей Р и N в различные моменты периода промышленной частоты.

3. Схема управления установкой малой генерации с преобразованием частот

Упрощенно рассматривается работа современного ПП и системы его управления на примере схемы работы газотурбинной установки (рис. 14) [4].

Текущая частота вращения турбины ω от датчика скорости вращения сравнивается с уставкой ω^* . Разница двух величин преобразуется в корректирующее воздействие по нагрузке турбины PI . Нагрузка турбины может определяться разными способами, в простых системах управления определяется как электрическая выработка с поправкой на КПД инвертора 93-94 % и КПД генератора 95 %. Сумма нагрузки турбины и корректирующего воздействия по нагрузке подается на вход регулятора подачи топлива по скорости. Регулятор формирует корректирующее воздействие и выдает на вход элемента сравнения.

Помимо уставки по частоте, существует уставка турбины по температуре T^* , соответствующая условиям работы турбины и задающая технологические ограничения по тепловому режиму. Корректирующее воздействие по температуре определяется как



разница между текущей температурой турбины T и уставкой T^* . Корректирующее воздействие подается на вход регулятора подачи топлива по температуре, затем на элемент сравнения.

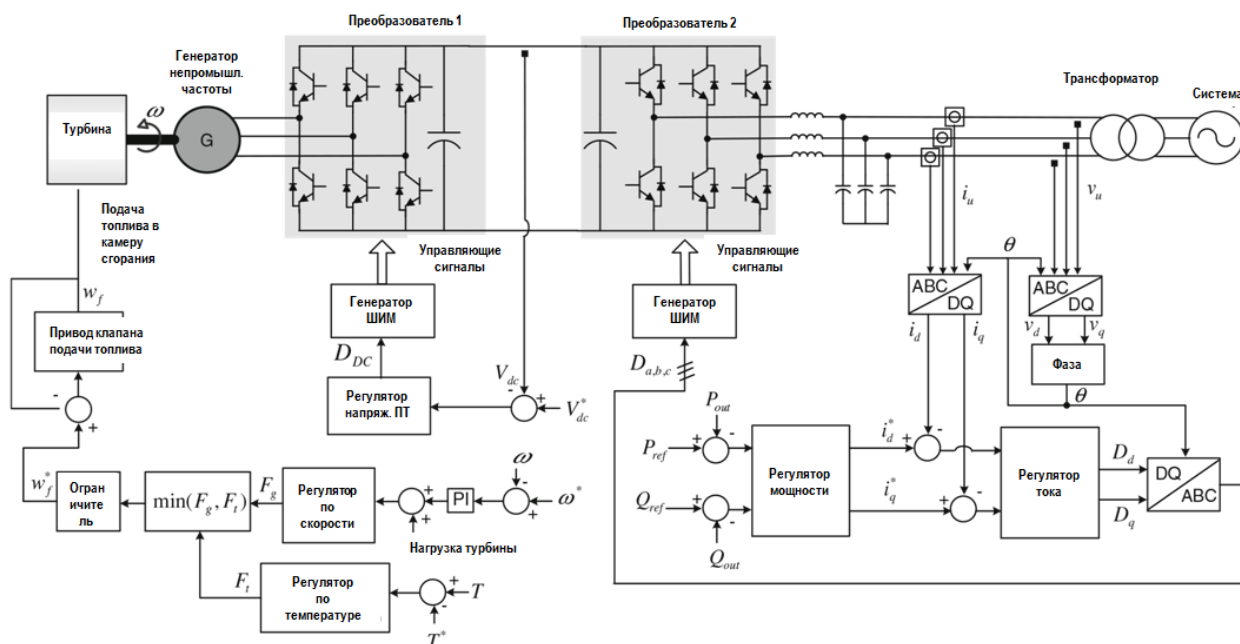


Рис. 14. Схема управления установкой малой генерации с преобразованием частот

Элемент сравнения обеспечивает сравнение значений, полученных от регуляторов, и через ограничитель подачи топлива выдает наименьшее значение на блок привода клапанов подачи топлива, снабженный собственной системой обратной связи по количеству подаваемого топлива. С помощью регулировки подачи топлива в камеру сгорания обеспечивается оптимальная скорость работы турбины.

Преобразователь 1 выполняет в схеме роль выпрямителя в режиме источника напряжения, его задачей является поддержание напряжения на стороне постоянного тока. Разность между напряжением V_{dc} и уставкой V_{dc}^* подается на вход регулятора напряжения на стороне постоянного тока. Регулятор напряжения на стороне постоянного тока через генератор сигналов ШИМ обеспечивает управление транзисторными ключами.

Преобразователь 2 выполняет в схеме роль инвертора, работающего в режиме выдачи постоянной мощности, его задачей является выдача мощности генератора на напряжении системы с соответствующей частотой и модулем. Измеренные значения модуля и частоты напряжения системы пофазно, выходного тока инвертора пофазно преобразуются для представления во внутренних DQ-координатах системы управления, определяется фаза напряжения, обеспечивается фазовая автоподстройка частоты. Регулятор мощности обеспечивает следование уставкам по активной P_{ref} и реактивной Q_{ref} мощностям, сигнал с соответствующими уставками по току и обратной связью подается на вход регулятора тока, который выполняет обратное преобразование из координат DQ в систему фаз ABC. Далее с помощью генератора сигналов ШИМ обеспечивается управление транзисторными ключами.



Трансформатор применяется в случае, когда необходима гальваническая развязка с системой.

Более подробно применение ПП для развязки по частоте приведено в п. 5.2.

4. Влияние полупроводниковых преобразователей на системные свойства малой генерации

4.1. Влияние преобразователей на частотные свойства энергосистемы

Типовая схема управления установкой малой генерации, приведенная в п. 3, а также рассмотрение стандартов IEEE 1547 [6] и UL 1741 [7] позволяет сделать ряд важных выводов по влиянию МГ с ПП на частоту энергосистемы и ее частотную инерцию:

- Инвертор практически безынерционен;
- Инвертор может выдавать мощность при отклонении частоты энергосистемы от номинальной порядка ± 5 Гц, частота генератора может меняться при этом от 8 до 330 Гц [12, 13, 14];
- В соответствии со стандартами IEEE 1547 и UL 1741 большинство инвертеров являются частотоведомыми;
- Звено обратной связи по частоте энергосистемы в составе системы управления установкой не всегда предусмотрено.
- Защитный алгоритм автоопределения неявной автономной работы может отключать установку при выделении части энергосистемы на автономную работу (подробнее см п. 5.4) [4].

Данные свойства ведут к уменьшению инерции (первичный отклик - быстрое изменение частоты в энергосистеме в результате какого-либо возмущения), а также к тому, что установка МГ не участвует даже в первичном регулировании частоты (не изменяет свою мощность при изменения частоты энергосистемы), в отличие от классической генерации.

Улучшение свойств может быть достигнуто:

- С помощью наращивания емкости накопителей в составе установки с реализацией функции виртуального синхронного генератора (VSG) [4];
- Возможна поддержка установками МГ с ПП классических частотно-мощностных свойств синхронной генерации [15]. Свойства реализуется на данный момент в ПП SIEMENS серии NetConverter, функция VSG находится в стадии опробирования [16].

Инерционные свойства энергосистемы по частоте приведены на рисунке 15.

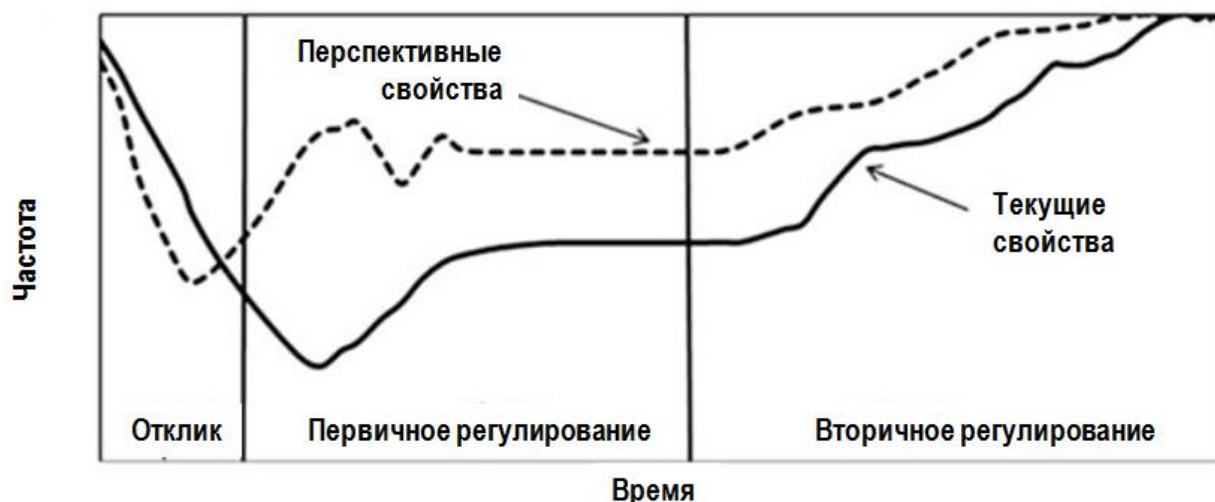


Рис. 15. Инерционные свойства энергосистемы по частоте

При рассмотрении текущих частотных свойств энергосистемы можно заметить, что системное возмущение сопровождается плавным глубоким понижением частоты, а также явно выраженными стадиями первичного отклика, первичного регулирования и вторичного регулирования. Наличие значительной доли МГ в системе, особенно с ПП (перспективные свойства), неизбежно приведет к уменьшению системной инерции и более резкому изменению частоты, в то же время, предположительно, позволит более оперативно реализовать управляющие воздействия по ее восстановлению и не допустить глубокого ее снижения.

4.2. Влияние преобразователя на статическую устойчивость

Ввиду того, что МГ подключается к распределительным сетям 0,4 - 110 кВ и установлена близко к месту потребления электроэнергии, проблемы запаса по мощности относительно максимума передаваемой мощности актуальны для нее в меньшей степени. Способность к генерации реактивной мощности инвертором и поддержанию напряжения положительно отражается на максимуме передаваемой мощности.

В то же время, могут существовать проблемы устойчивости при малых возмущениях, связанные с настройкой системы управления инвертором [4]. Область устойчивой работы инвертора зависит от электрических параметров связи системы, от алгоритма формирования выходного напряжения инвертора. Инвертор может формировать выходное напряжение одним из двух способов:

- Удержание среднеквадратичного значения напряжения, наиболее близкого к уставке;
- Формирование синусоидального напряжения с минимизацией гармонических составляющих.

На рисунке 16 представлены области работы регулятора в координатах R и X связи с системой, на которую через ПП работает генератор. Значения приведены в относительных единицах. Для каждого из случаев приведены осциллограммы напряжения на зажимах установки, ее тока, активной и реактивной мощностей.

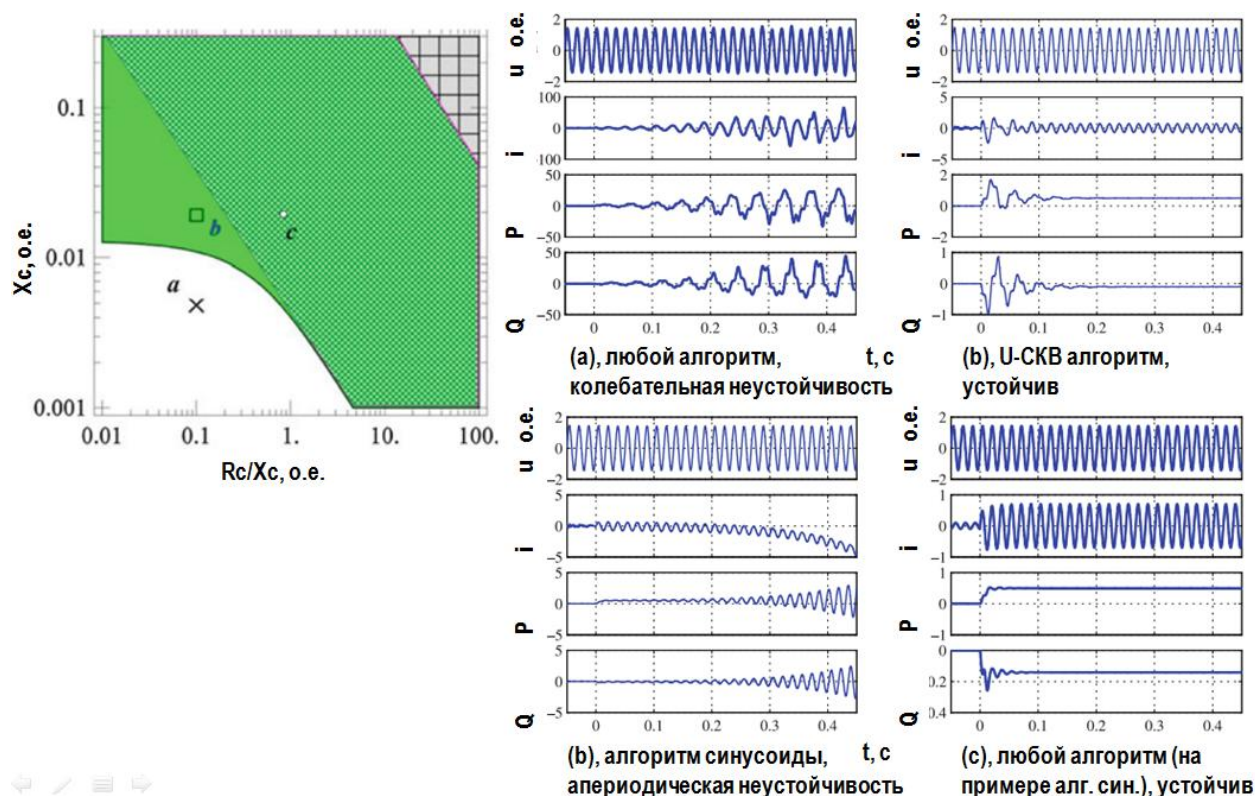


Рис. 16. Влияние ПП на статическую устойчивость

В области (a) с малыми сопротивлениями возможно самораскачивание ПП. Такой случай примерно соответствует подключению МГ на шины мощной подстанции высокого класса напряжения. Область (b) примерно соответствует режиму работы генерации в распределительной сети. При этом работа установки будет устойчивой при использовании ПП алгоритма удержания среднеквадратичного значения напряжения и может быть неустойчивой при формировании напряжения по алгоритму синусоиды. В области (c), примерно соответствующей работе МГ на близкую нагрузку с преимущественно активной мощностью.

4.3. Влияние преобразователя на динамическую устойчивость

Нейтрализация возмущений в сети, негативно влияющих на установку, - одно из основных назначений современных ПП. В первую очередь, к таким возмущениям относятся короткие замыкания (КЗ) и провалы напряжения в сети. Выдача мощности через ПП в переходных режимах обладает следующими особенностями [4]:

- Уменьшение влияния близких КЗ на СГ и его переходные параметры, устранение влияния удаленных КЗ;
- Средний уровень тока КЗ от СГ при близких замыканиях – около 2 о.е. вместо 10 о.е. (пятикратное уменьшение) за счет устранения сверхпереходных параметров;
- Выдача мощности в момент КЗ на пониженном напряжении.

На рисунке 17 представлены осциллограммы замыкания длительностью 0,2 с в распределительной сети 20 кВ, не приводящего к отключению установки [17].

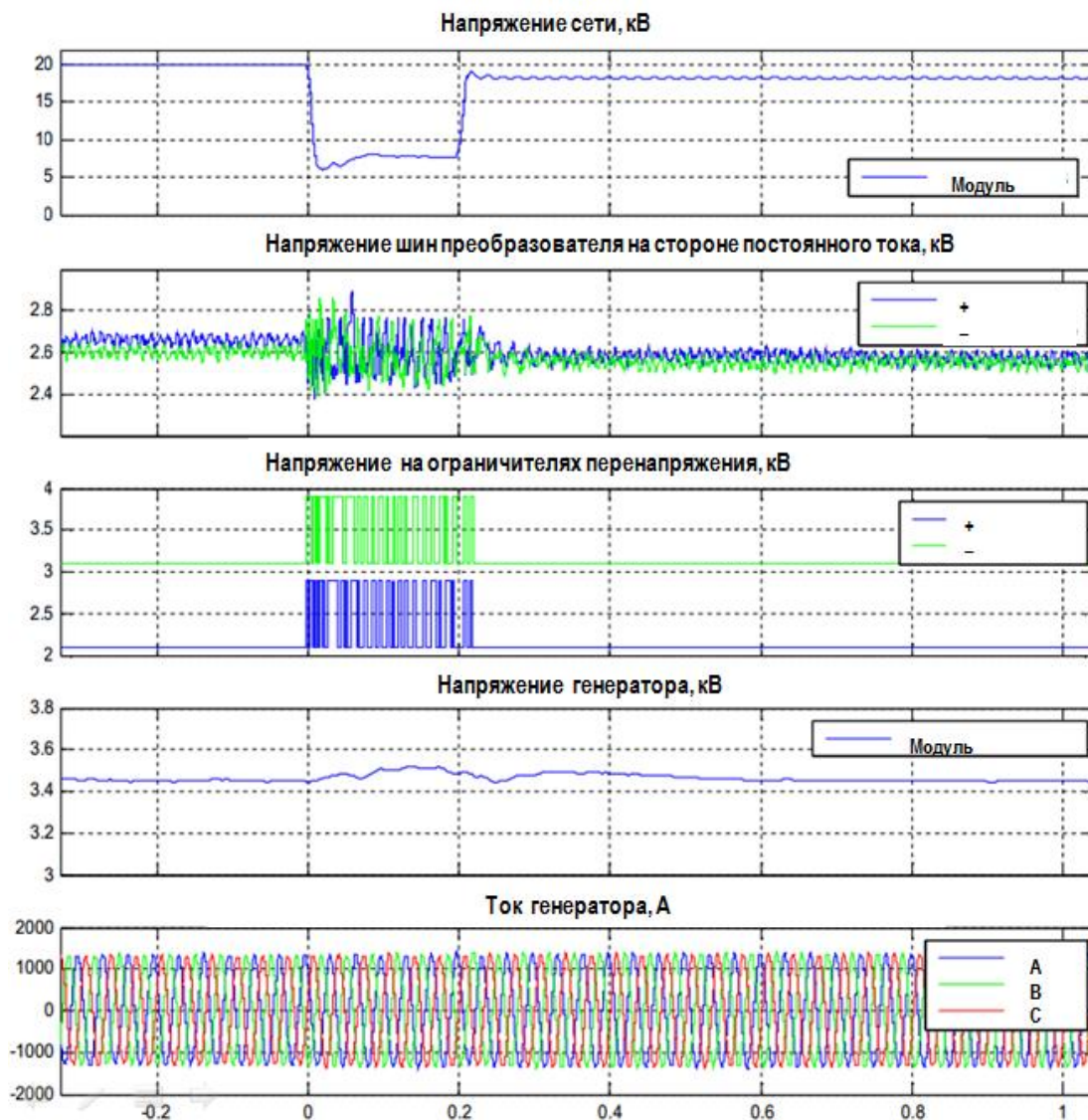


Рис. 17. Влияние ПП на динамическую устойчивость

В сеть 20 кВ через ПП (тиристорный, IGCT) и повышающий трансформатор выдает мощность генератор с номинальным напряжением 3,3 кВ. При замыкании остаточное напряжение сети составляет порядка 30% от номинального, тем не менее, за счет возможности ПП выдавать мощность на пониженном напряжении и стабилизации напряжения на стороне постоянного тока, напряжение на зажимах генератора на протяжении переходного процесса в рассматриваемом случае изменяется незначительно.

Следует отметить, что, по данным обследований ряда установок МГ, заводские уставки РЗА «по умолчанию» на отключение установки в случае понижения напряжения могут приводить к частым отключениям установки []. Хотя пуск современных генераторов малой мощности из горячего состояния не составляет труда, с учетом частоты таких отключений желательна более корректная настройка релейной защиты и автоматики.



5. Применение силовой электроники для нужд малой генерации

Возможно применение ПП для нужд МГ в следующих областях и направлениях:

- Системы возбуждения;
- Коммутация цепей, согласование частот энергосистемы и генератора;
- Симметрирование нагрузки генератора;
- Реализация воздействий РЗА;
- Пуски и остановки генератора;
- Альтернативный ретрофит и перевод генератора в режим синхронного компенсатора;
- Интеграция больших массивов возобновляемых источников энергии;
- Интеграция различных источников энергии и разнородных нагрузок.

5.1. Применение силовой электроники в системах возбуждения

Классическим применением силовой полупроводниковой электроники в системах возбуждения является тиристорный выпрямитель [2]. В целом такие системы аналогичны системам возбуждения большой генерации, поэтому в данном обзоре не рассматриваются.

Доля полупроводниковой электроники в системах возбуждения МГ не растет, а для малого диапазона мощностей в 1-5 МВт даже снижается вследствие постепенного перехода производителей на изготовление СГ с постоянными магнитами на роторе вместо обмотки возбуждения. Такого подхода придерживается, например, Caterpillar [18, 19].

В синхронных генераторах до 1 МВт часто используется бесщеточная система возбуждения с ПП для отбора мощности и выпрямителем для питания обмотки возбуждения [18]. Схема такого устройства приведена на рисунке 18.

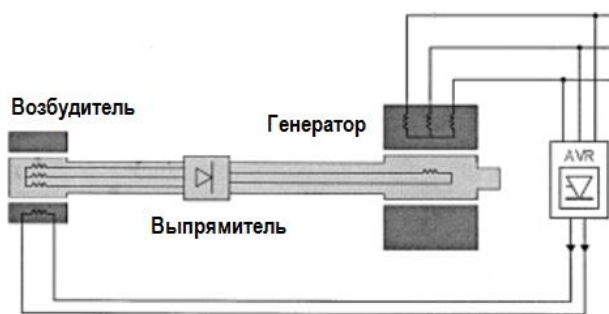


Рис. 18. СГ с бесщеточной системой самовозбуждения

В ветрогенераторах и гидрогенераторах широко используются асинхронные машины с двойным питанием. У таких машин трехфазная обмотка ротора подключена к ПП для изменения частоты. Схема такого устройства приведена на рисунке 19.

Аналогично, все шире получают распространение бесщеточные асинхронные машины с двойным питанием.

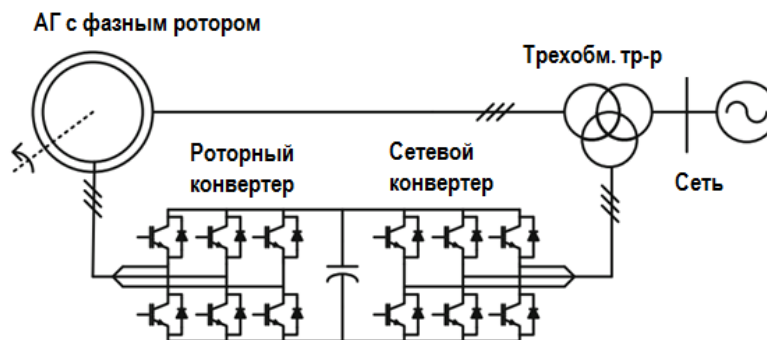


Рис. 19. АГ с двойным питанием

5.2. Коммутация цепей и согласование частот энергосистемы и генератора

Важным преимуществом установки преобразователей является возможность выбора первичного привода генератора, работающего на частоте, не являющейся промышленной. Такое решение позволяет работать приводу в зоне оптимальных по физическим особенностям оборотов и исключает из состава установки редуктор (коробку передач), понижающий надежность и КПД. Так, газовые турбины эффективно работают при частотах выше 6000 об/мин, газопоршневые двигатели – при частотах от 1000 об/мин, турбодизели – от 1800 об/мин, скорость ветродвигателей является величиной непостоянной и меняется от нескольких об/мин до сотен об/мин []. Применение многополюсных тихоходных синхронных генераторов усложняет конструкцию со всеми вытекающими технико-экономическими последствиями, а также не всегда приемлемо по массогабаритным параметрам. Для установок с частотами выше 3000 об/мин, установок с непостоянной частотой, установок постоянного тока работа на промышленной частоте 50 Гц при непосредственном включении невозможна.

Подробная схема установки с преобразованием частот приведена на рисунке 20 [13].

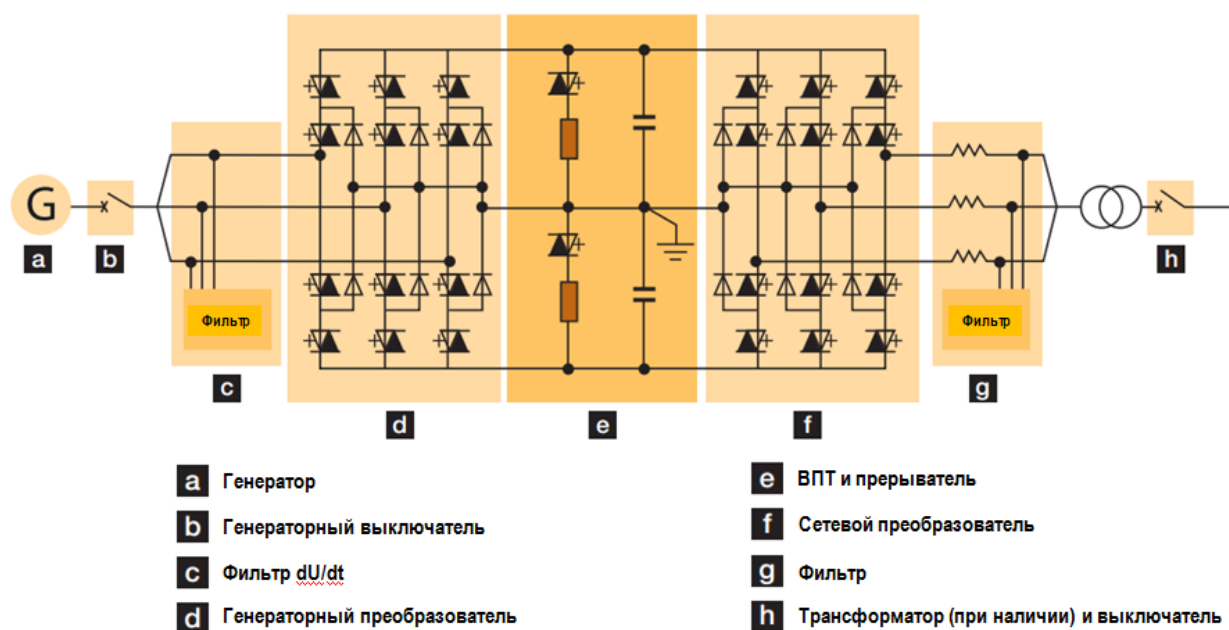


Рис. 20. Схема установки с преобразованием частот



В настоящее время охватываемые универсальными ПП частоты для преобразования составляют примерно 8 - 330 Гц [12, 13, 14].

В ПП используется трехуровневая схема со связанной нейтралью. В составе установки имеются ограничители перенапряжения – сопротивления, включаемые через соответствующие тиристоры.

Помимо развязки частот, современные ПП могут хорошо справляться с ролью коммутационных аппаратов – на рисунке 21 приведен коммутационный процесс цепи с помощью тиристора в составе полупроводникового преобразователя [17].

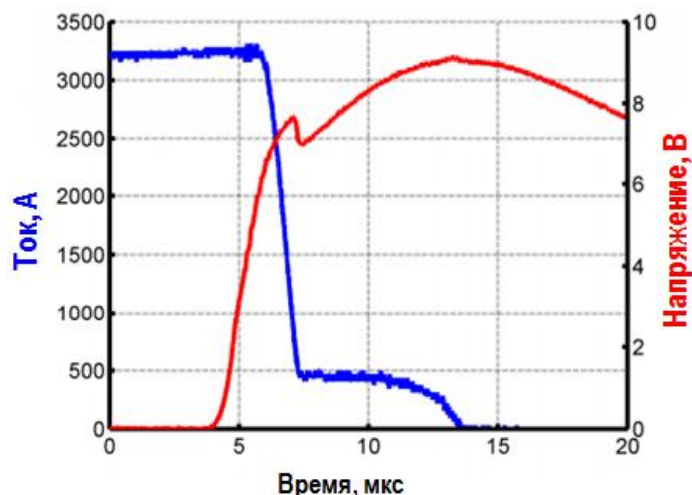


Рис. 21. Процесс коммутации цепи тиристором ПП

Единый тиристор обеспечивает отключение тока 3,2 кА на напряжении 6,6 кВ за 10 мкс. При этом коммутируемая мощность составляет более 20 МВт.

5.3. Симметрирование фазных нагрузок генератора

Преобразователь выполняет перераспределение мощности по фазам. Генератор не может длительно работать на несимметричную нагрузку (особенно актуально при выделении части энергосистемы).

На рисунке 22 приведены причины возникновения пульсаций двойной частоты в токе обмотки возбуждения и на поверхности ротора. В нормальном симметричном трехфазном режиме существует только прямая последовательность фазных токов. При несимметричной нагрузке в полном токе к прямой последовательности добавляется обратная. Крайний случай – при неправильном порядке чередования фаз ток обратной последовательности составляет 100 % от полного тока. Токи обратной последовательности, протекая по обмотке статора, индуцируют поток реакции якоря, вращающийся с двойной частотой в обратную сторону. Данный поток наводит пульсации двойной частоты в токе обмотки возбуждения и на поверхности ротора, что приводит к несинусоидальности фазных токов статора, вибрации, нагрев различных элементов генератора (особенно ротора) токами высокой частоты и т.д.



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

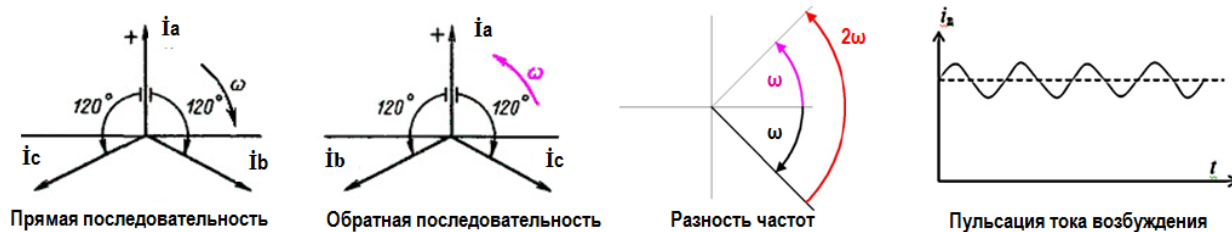


Рис. 22. Причины недопустимости несимметричной нагрузки генератора

Типовые уставки защиты генератора по току обратной последовательности от полного тока генератора [20]:

- Сигнальный элемент - 5 %;
- Отключающий элемент - 9 %;
- Время отключения по интегральной хар-ке - $0,5 \div 4000$ с;
- Время охлаждения генератора - $500 \div 2000$ с.

В отсутствие ПП несимметричная нагрузка может являться основной причиной отключения МГ при автономной работе.

5.4. Реализация воздействий РЗА

Наличие ПП видоизменяет логику работы защиты и уставки РЗА установки МГ [4]. На рисунке 23 представлена защитная характеристика по току, реализуемая с помощью ПП.

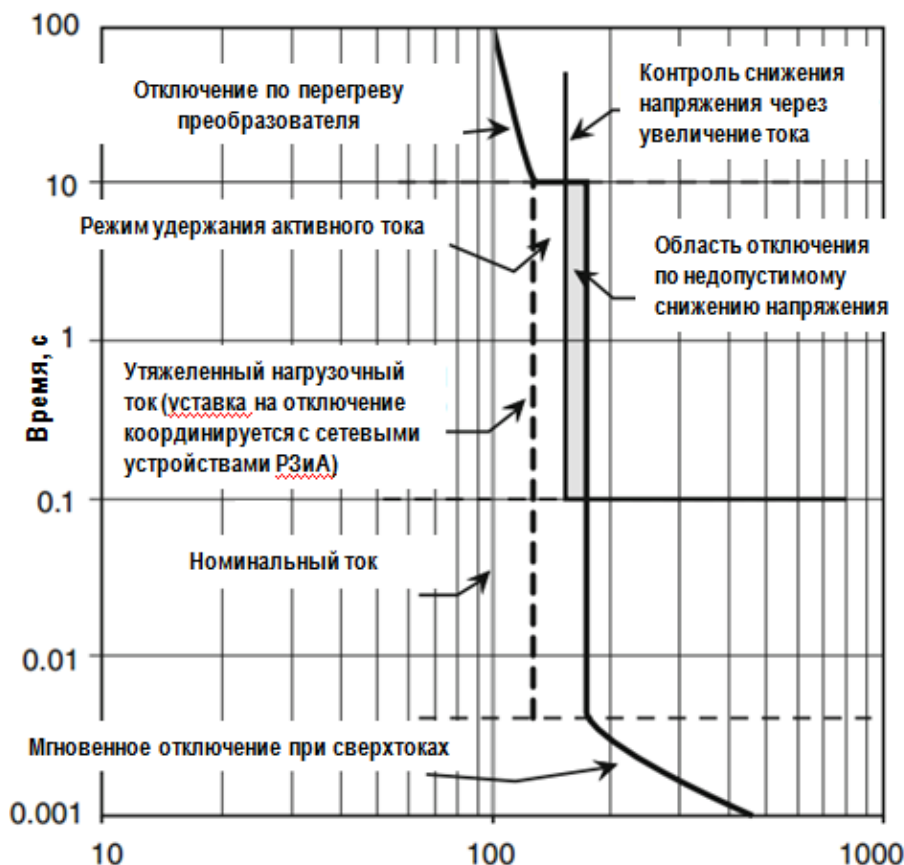


Рис. 23. Защитная характеристика по току



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

В характеристике можно выделить следующие области:

- ПП может выдавать утяжеленный нагрузочный ток величиной $1,3-1,4 I_{ном}$. Ограничивающим фактором является перегрев тириستоров или транзисторов, в зависимости от их нагрева защита от перегрузки срабатывает с выдержкой времени 10-100 с;
- При снижении напряжения в сети в результате КЗ ПП может выдавать ток величиной до $1,6 I_{ном}$. При этом обеспечивается выдача активного тока (мощности), уставка по реактивному току (мощности) и коэффициенту мощности не выдерживается. В таком режиме выдержка времени на отключение явно не устанавливается, но по условию перегрева тиристоров или транзисторов составляет 0,1-10 с;
- При величине тока ПП $1,6-1,8 I_{ном}$ защита от снижения напряжения отключает установку с выдержкой времени 0,1 с;
- При превышении током ПП величины $1,8 I_{ном}$ происходит отключение установки с выдержкой времени 1-6 мс;
- ПП не отключается при кратковременных бросках сквозного тока до $4,5 I_{ном}$ продолжительностью до 1 мс.

Кроме того, для маневренных установок имеется защита по напряжению от аварийных и послеаварийных режимов. Ее характеристика представлена на рисунке 24.

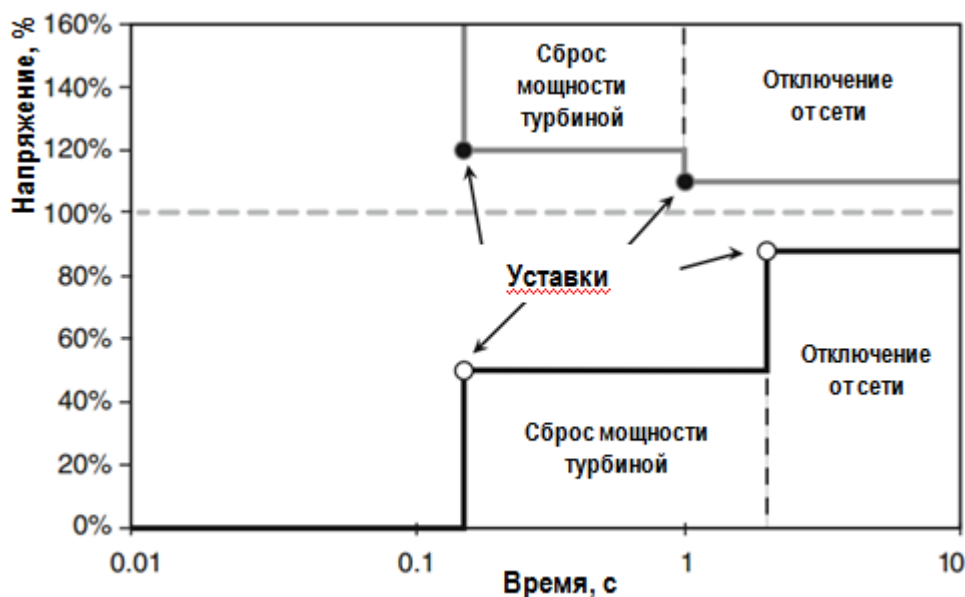


Рис. 24. Защитная характеристика по напряжению

В характеристике можно выделить следующие области:

- При снижении напряжения сети до 50 % или повышении до 120 % длительностью более 0,2 с происходит останов подачи топлива в камеру сгорания и соответствующий сброс мощности турбиной;
- При повышении напряжения сети до 110 % длительностью более 1 с происходит останов подачи топлива в камеру сгорания, соответствующий сброс мощности турбиной и отключение установки от сети;
- При снижении напряжения сети до 80 % длительностью более 3 с происходит останов подачи топлива в камеру сгорания, соответствующий сброс мощности турбиной

и отключение установки от сети.

5.5. Пуск/останов генератора с помощью частотного привода

Наличие ПП дает возможность использовать его в качестве частотно-регулируемого привода для пуска генератора. Это дает возможность ускорить разворот установки и разгон до подсинхронных скоростей, дает возможность прогреть турбину и ввести ее в работу в зоне максимального крутящего момента. Также, по сравнению с прямым асинхронным пуском при полном напряжении, величины токов значительно меньше. Как правило, ПП, используемый в качестве частотно-регулируемого привода, устанавливается в шкафном исполнении одним комплектом с возбудителем [21, 22]. Схема такого устройства приведена на рисунке 25.

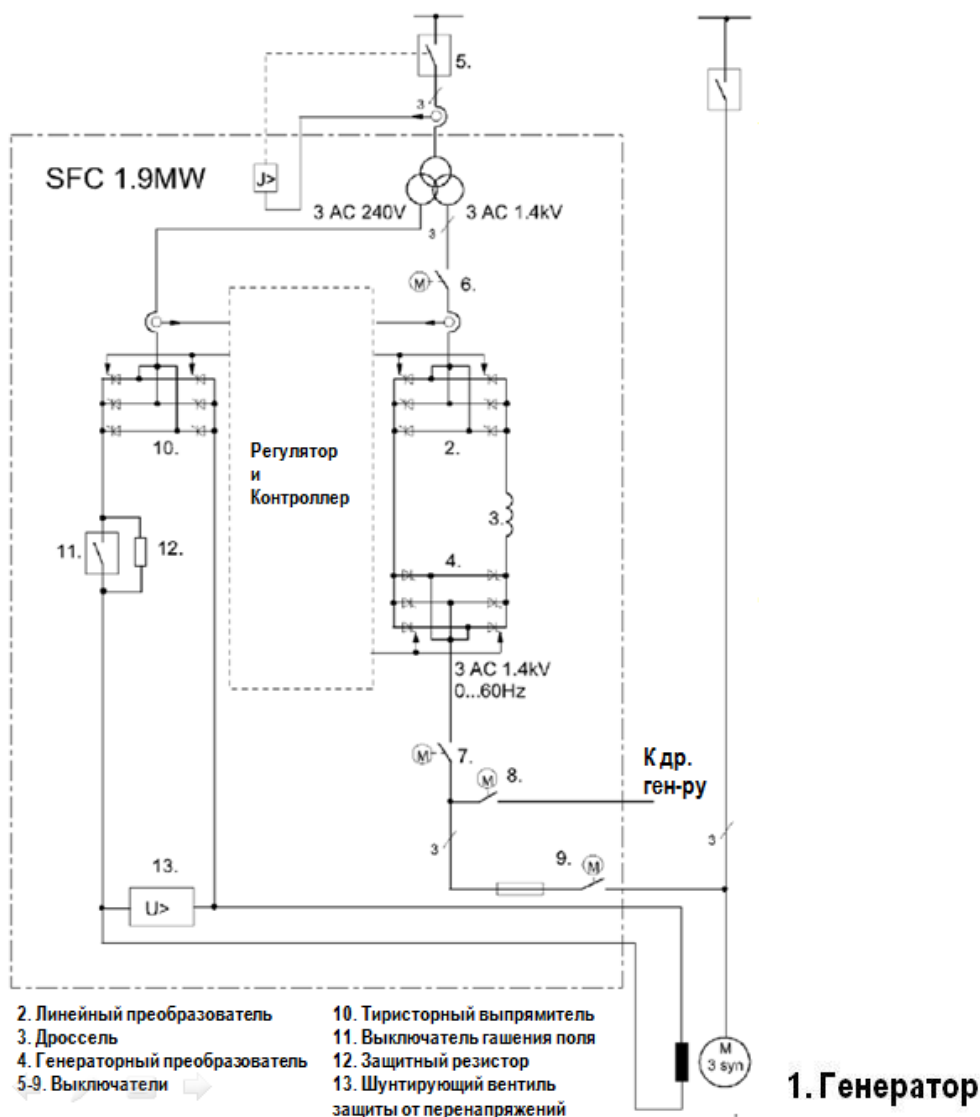


Рис. 25. Комбинированный блок ПП-возбудитель

В современных ПП, используемых в качестве частотно-регулируемого привода, могут быть предусмотрены следующие режимы [21]:

- Основной. Разгон 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 генератора с минимально возможной мощностью до зоны высокого крутящего момента турбины при частоте 0,7 от номинальной (2100 об/мин);
- Останов генератора снятием возбуждения. С полным отключением возбудителя при частоте ниже 200 об/мин;
- Имитация режима валоповорота. Требуется наличия датчиков положения вала и параметров ротора;
- Режим мойки газовой турбины (технология AEG Industrial). Заливка корпуса газовой турбины водой или моющим составом, вращение с частотами до 600 об/мин по специальной программе.
- Пуск в режиме синхронного компенсатора. Разгон до частоты 1,05 от номинальной (3150 об/мин) и последующая синхронизация.

5.6. Перевод генератора в 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, AEG Industrial) предлагают в качестве альтернативы демонтажу, ретрофиту, простоя турбогенератора переводить его в режим синхронного компенсатора без работы первичного привода [22].

Сложность работы турбогенератора в качестве синхронного компенсатора в обычных условиях:

- Затраты на топливо на поддержание вращения;
- Наличие технологического минимума загрузки по устойчивому сгоранию топлива;
- Необходимость отключения защит от двигательного/беспарового режимов.

Преимущества наличия синхронного компенсатора вместо простоя или демонтажа генератора:

- Оборудование уже установлено;
- Проблемы возникают чаще с тепловой частью, в то время как электрическая может находиться в работе (в т.ч. износ турбины или изменение тепловой схемы в целом);
- Источник реактивной мощности и средство поддержания напряжения в узле;
- Синхронный компенсатор с относительно большой постоянной инерции (сохраняет около 40% даже в случае расцепки с турбиной) и мощной генераторной системой АРВ ПД или АРВ СД обеспечивает эффективную стабилизацию напряжения узла в затяжных переходных режимах;
- Возможность загрузки компенсатора реактивным током до 30% выше таковой для генератора (ввиду отсутствия активного тока), что позволяет разгрузить остальные агрегаты от выработки реактивной мощности и догрузить их выработкой активной –



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

выше доход, меньше издержки;

- Устанавливается один преобразователь частоты и одна система управления с возможностью подключения любого из блоков.

Для перевода существует два варианта.

- Временное решение. Актуально для владельцев малой генерации с несколькими блоками и блоков небольшой мощности. Преобразователь частоты подключается в рассечку между генератором и сетью, выполняя роль частотного привода для мягкого пуска компенсатора в асинхронном режиме и его синхронизации. При этом демонтаж турбины, а в ряде случаев и расцепка валов не требуется. Необходимо отключение электрической защиты от двигательного режима и технологической защиты от беспарового режима турбины.

- Постоянное решение. Необходим демонтаж турбины, установка упорного подшипника и асинхронного двигателя в качестве привода на ее месте (установка двигателя со стороны возбудителя проблематична, поскольку вал и подшипник с этой стороны не рассчитаны на механические усилия). При этом частотным приводом может оснащаться двигатель, сам синхронный компенсатор или обе машины сразу, - зависит от конкретных условий. Необходимо отключение электрической защиты от двигательного режима. Вариант применяется в качестве альтернативы ретрофиту блоков. Подход эффективен для ТЭЦ с некоторым количеством малых генераторов.

Схема вариантов переоборудования на рисунке 26.

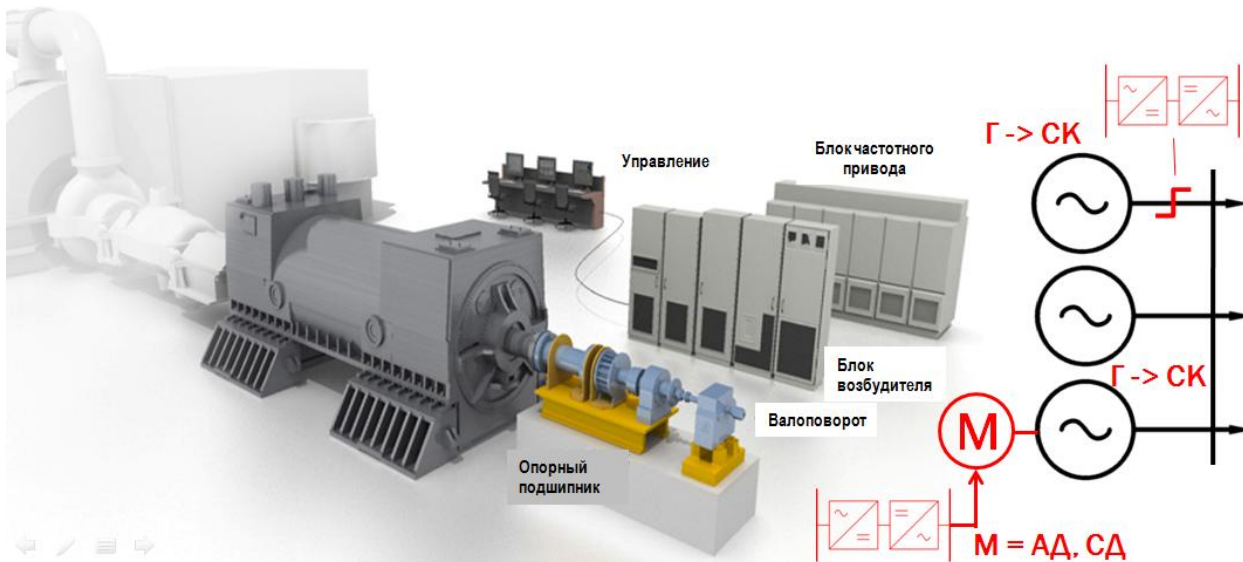


Рис. 26. Перевод генератора в режим
синхронного компенсатора без работы первичного привода

5.7. Интеграция больших массивов возобновляемых источников энергии

Ветрогенераторы в силу естественных причин обладают резкопеременным характером выработки электроэнергии. Кроме того, существует тенденция к размещению крупных ветропарков на несколько десятков генераторов в прибрежной морской зоне. Для них возможны различные решения по выдаче мощности и



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

преобразованию частот. В качестве примера рассматриваются два подобных решения от ABB [23] и от Siemens [24] (рис. 27 и 28, соответственно).



Рис. 27. Вариант решения по выдаче мощности ветропарка от ABB



Рис. 28. Вариант решения по выдаче мощности ветропарка от Siemens

Оба решения обладают следующими общими чертами:

- Выдача мощности единичного ветрогенератора на переменном токе.
- Использование коллекторной станции, обеспечивающей коммутацию отдельных генераторов и преобразование на постоянный ток для выдачи мощности на берег высоковольтной кабельной линией постоянного тока.

Интеграция больших фотоэлектрических массивов (солнечных панелей) обладает рядом особенностей [25]. Солнечная панель – сама по себе сложное полупроводниковое устройство с квазипостоянными электрическими параметрами. Существует несколько десятков схем подключения солнечных панелей в зависимости от характеристик панелей, мощности, классов напряжения преобразовательной электроники и сети, расположения панелей, размера солнечной электростанции, наличия накопителей. Схемы преимущественно однофазные. Схемы преобразователей для подключения солнечных панелей существенно отличаются от таковых для подключения электромеханических преобразователей энергии.

В связи с вышесказанным, рассмотрение особенностей солнечных панелей требует отдельного обзора. В данном обзоре приводится пример распространенной двухуровневой схемы подключения солнечной панели с батареей, сглаживающей резкопеременный характер выдачи мощности (рис. 29).



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

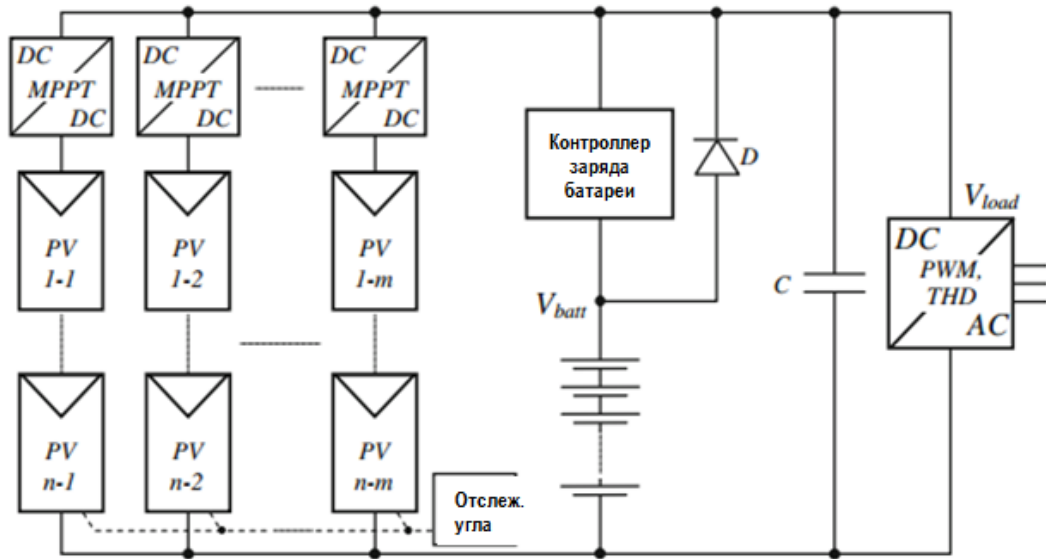


Рис. 29. Двухуровневая схема подключения солнечных панелей с батареями

MPPT – отслеживание точки максимальной мощности, PWM – ШИМ

THD – отслеживание общего уровня искажения гармоник

Для контроля выдачи солнечных панелей используются различные алгоритмы определения точки максимальной мощности, в том числе расчетный (рис. 30) и практический – подбором длительности импульса ШИМ системы управления ПП (рис. 31) [4].

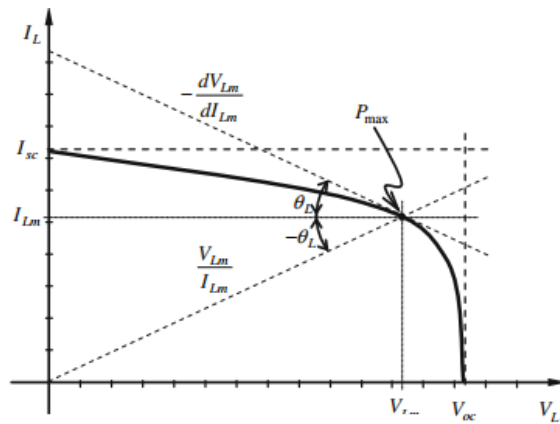


Рис. 30. Алгоритм определения точки максимальной мощности

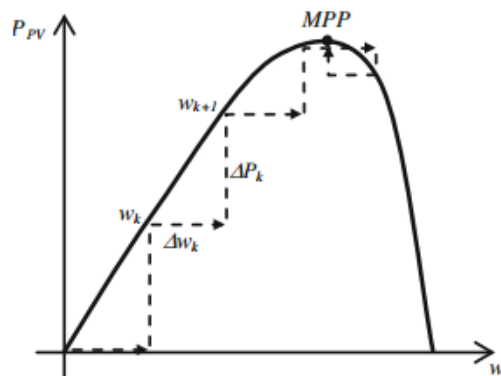


Рис. 31. Алгоритм «подъема на холм» для определения длительности импульса ШИМ, соответствующего точке максимальной мощности

5.8. Интеграция различных источников энергии и разнородных нагрузок

Идея интеграции всех видов энергоресурсов в общую установку получает широкое распространение в условиях изолированных энергосистем (например, крайний север) [26]. Возможно подключение разнородных нагрузок через ПП непосредственно к шине установки. Применение модульных ПП шинного исполнения (внешний вид приведен на рис. 5) для всех видов источников и потребителей энергии также является преимуществом такой схемы.

На рисунке 32 приведена структура рассматриваемой установки [4].

Шина постоянного тока среднего напряжения

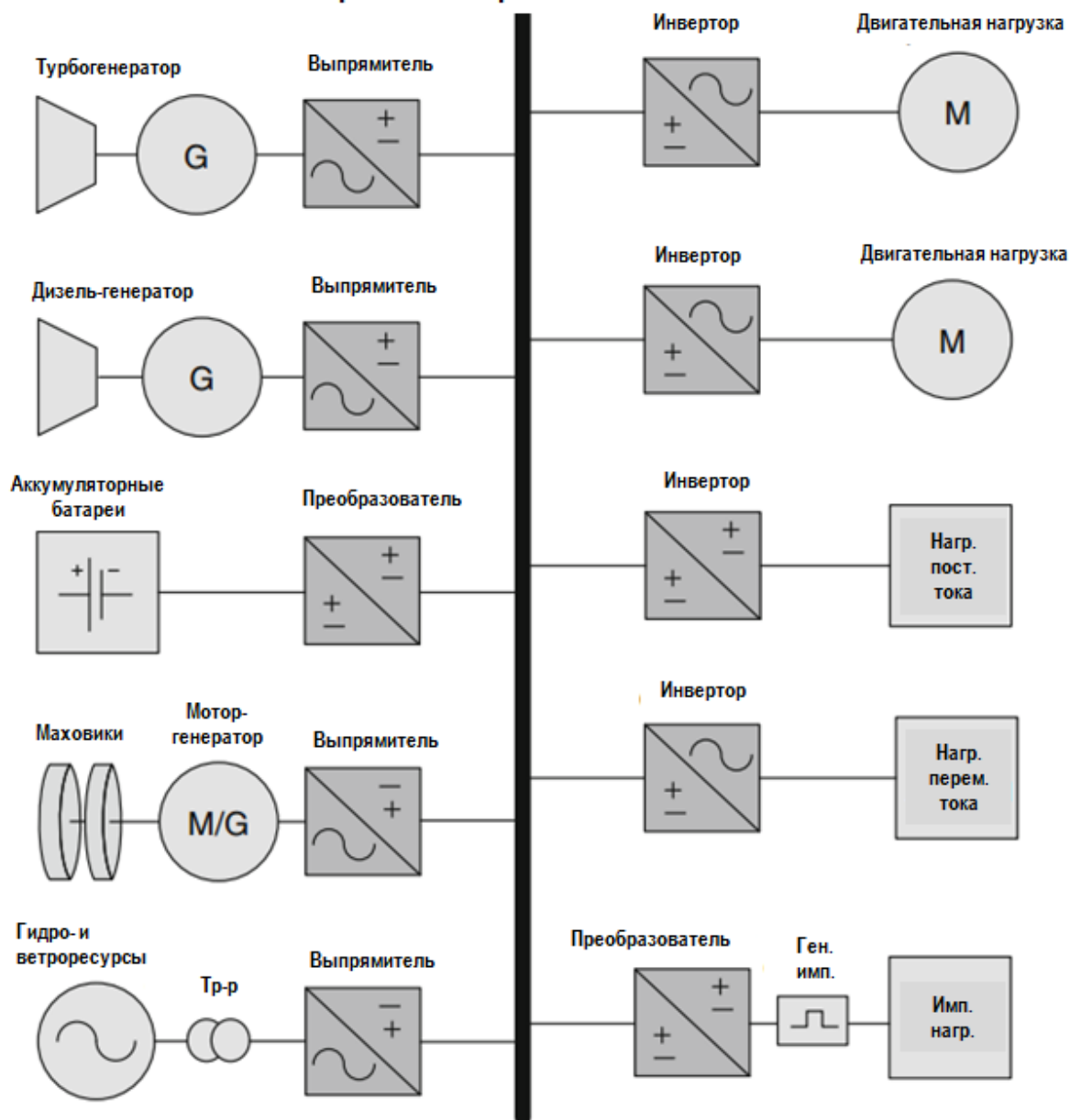


Рис. 32. Интеграция различных источников энергии и разнородных нагрузок

В рассматриваемой установке выработку обеспечивают гидро- и ветро-ресурсы, турбогенерация. Резервируют питания в зависимости от длительности перерыва



маховики, аккумуляторные батареи и дизель-генераторы. Общая нагрузка установки включает различные нагрузки переменного и постоянного тока, двигатели и специальные виды (например, импульсные). Связь всех электроприемников обеспечивается через единую шину постоянного тока.

6. Основные причины отказов силовых преобразователей

Универсальные полупроводниковые силовые преобразователи на полную мощность генератора массово устанавливаются с 1995 г., накоплена статистика причин отказов (рис. 33) [27].



Рис. 33. Основные причины отказов силовых преобразователей

Также крупные компании часто публикуют расчетные показатели надежности своей полупроводниковой продукции, отдельных устройств и компонентов в ее составе [17].

7. Международные стандарты на преобразовательную электронику для подключения объектов малой генерации

Международным стандартом является на преобразовательную электронику для подключения объектов малой генерации является UL 1741 «Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources» [7]. Стандарт разработан в США компанией Underwriters Laboratories, специализирующейся с XIX в. на экспертизе сложных технических систем. Актуальная версия стандарта – 2005 г., отдельные пункты датированы 2011 г. Документ по структуре схож с ПУЭ и регламентирует:

- Область применения стандарта;
- Конструктивно-строительные и компоновочные решения;
- Общие аспекты взаимодействия с сетью (ссылкой на стандарт IEEE 1547)
- Электрические параметры, свойства и влияние на сеть преобразователя и



установки в целом;

- Формы паспорта установки по данным испытаний и заводским данным;
- Электробезопасность, маркировку частей преобразователя;
- Требования к накопителям в составе установки, если имеются.

Некоторые регламентируемые характеристики преобразователей:

- Диапазоны входных и выходных сопротивлений;
- Диапазоны напряжений и токов на входе и выходе;
- Параметры качества электроэнергии;
- Частотные характеристики;
- Способность к автономной работе/работе на выделенную нагрузку;
- Способность к работе в случае частичного отказа системы управления;
- Электробезопасность в аварийных режимах (КЗ, перегрузки).

Стандарт нормирует в этой части только конструктив, общие результирующие параметры и характеристики преобразователя, но не структурно-функциональные схемы электрических компонентов и не алгоритмы работы преобразователя. Эти характеристики нормируются авторитетным международным стандартом IEEE 1547 [6]. Таким образом, стандарт UL 1741 выполнен по принципу комплементарности со стандартом IEEE 1547.

8. Выводы

По результатам обзора применения силовой полупроводниковой электроники для нужд малой генерации можно сделать следующие выводы.

1. Прогресс полупроводниковых силовых преобразователей обусловлен усовершенствованием полупроводниковых устройств, конденсаторов и алгоритмов управления работой преобразователей.

2. Полупроводниковые преобразователи осуществляют эффективное уменьшение негативного влияния возмущений в сети на генератор и расширение возможностей по выдаче мощности в сеть.

3. Установки с полупроводниковыми преобразователями отличаются по свойствам от синхронной генерации. В частности, улучшают характеристики по регулированию напряжения и поддержанию выдачи мощности, но ухудшают инерционные и частотные характеристики энергосистем.

4. Современные полупроводниковые преобразователи представляют многофункциональные (3-4 функции для установки) унифицированные блоки шкафного или шинного исполнения.

5. Полупроводниковые преобразователи дают возможность более эффективно использовать первичные приводы малой генерации, осуществляя развязку по частотам.

6. Большинство зарубежных полупроводниковых силовых преобразователей отвечает стандартам UL 1741 и IEEE 1547 в плане конструктива, функционала и общих особенностей работы.

7. Интеграция установки МГ через ПП со стандартизированными типовыми свойствами может облегчить процессы технологического присоединения, управления установкой и учета системного эффекта для различных субъектов электроэнергетики.

Список использованных источников

1. T. Figiel, J. Bothwell, W. Moore. Preventive Maintenance and Overhaul Experience for Rotating Brushless Exciters and other Excitation Systems / EPRI Utility Generator Predictive Maintenance and Refurbishment Conference, Phoenix, 1998. p. 1
2. РД 34.45.620-96. Правила технического обслуживания тиристорных систем возбуждения. Приложение 3: Краткая характеристика применяемых в эксплуатации тиристорных систем независимого возбуждения / Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России», Департамент науки и техники, 1998.
3. Some Investigations on Recent Advances in Wind Energy Conversion Systems / IACSIT Coimbatore Conferences, IPCSIT vol. 28, Singapore, 2012. p. 1-2
4. S. Chakraborty, M. G. Simoes, W. E. Kramer (eds.). Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems / Green Energy and Technology, Springer-Verlag, London, 2013. 609 ps.
5. Н.А. Новиков. Инновационные решения по интеграции распределенной генерации, включая ВИЭ, в электроэнергетические системы / Презентация новых электросетевых технологий от 23.10.2013, М., ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2013.
6. IEEE 1547. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems / 2011.
7. UL 1741. Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources / 2005.
8. H. Grüning. IGCT Technology – A Quantum Leap for High-power Converters / ABB Industrie, Switzerland, 2003.
9. J. Weidauer. Elektrische Antriebstechnik / 3., überarbeitete Auflage, Siemens Aktiengesellschaft, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2013. 413 ps.
10. MV4000. The compact, high performance medium voltage drive / GE Power Conversion, 2013.
11. D. Seng. Modular and Powerful Inverters up to 1MW / Power Electronics Europe, Issue 8, 2008, p.p. 25-29
12. Modular concept for tailored solutions. LOHER Dynavert XL wind converters / Siemens AG, 2012.
13. PCS 6000 for large wind turbines. Medium voltage, full power converters up to 9 MVA / ABB Automation Products GmbH, 2012.
14. ROBICON Perfect Harmony. The Water-Cooled Medium-Voltage Drive of Choice / Siemens AG, 2009.
15. R. Nelson. Active Power Control in Siemens Wind Turbines / Presentation, Siemens Energy, 2011.
16. H. Yildirim. Siemens NetConverter. The enabling technology for the integration of wind power in the grid / Presentation, Siemens AG, 2009.
17. B. Backlund, S. Ebner. The wind power converter for tomorrow is already here / ABB Switzerland Ltd., 2009.



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

18. Caterpillar – Россия: Спецификации дизельных электрогенераторных установок / <http://rossiya.cat.com/cda/layout?m=333515&x=97>.
19. Caterpillar – Россия: Спецификации газопоршневых электрогенераторных установок / <http://rossiya.cat.com/cda/layout?m=333535&x=97>.
20. В.П. Федотов, Л.А. Федотова. Проектирование микропроцессорных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор / Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 200 с.
21. Start-up inverter of gas turbo-sets. Integrated compact units / AEG Industrial Engineering GmbH, 2007.
22. J. M. Fogarty, R. M. LeClair. Converting Existing Synchronous Generators into Synchronous Condensers / Power Engineering, October, 2011.
23. Medium voltage for wind power. PCS 6000 full-scale converters up to 9 MVA / ABB Automation Products GmbH, 2009.
24. Oceans of opportunities. Complete solutions for the entire life cycle of offshore wind farms / Siemens AG, 2011.
25. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, Z. Chen and M. Liserre. Power Converters and Control of Renewable Energy Systems / Aalborg University, Institute of Energy Technology, Denmark; Politecnico di Bari, CEMD research group Italy, 2006.
26. С.Г. Обухов. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук, специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, Томск, 2013.
27. S. Bala, J. Pan, D. Das, 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.

Контактная информация

• Периодический открытый семинар «Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации» - некоммерческая платформа для осуществления научно-исследовательской, инженерно-технической и образовательной деятельности.

Контакты Оргкомитета семинара:

Web: http://cigre.ru/activity/conference/seminar_c6/

E-mail: seminar-malgen@yandex.ru

Телефон: +7(912)033-33-35 (Станислав),
+7(912)267-52-88 (Владислав)

Факс: +7(343)359-16-15

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. Э-217

• Владислав Олегович Самойленко – инженер кафедры «Автоматизированные электрические системы» УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Координатор исследовательского комитета С6 «Системы распределения электроэнергии и распределенная генерация» РНК СИГРЭ.

E-mail: seminar-malgen@yandex.ru