

# Преобразователи высокой мощности

## для возобновляемых источников энергии

**Развитие возобновляемых источников энергии является одним из основных факторов, стимулирующих рост рынка силовой электроники, требующих непрерывного повышения эффективности преобразования и надежности. По мнению автора, на сегодня силовые ключи с рабочим напряжением 1700 В обеспечивают максимальную техническую и экономическую эффективность и наилучшим образом подходят для решения подобных задач. Для работы в мегаваттном диапазоне мощностей, как правило, используется параллельное соединение модулей, каждый из которых, в свою очередь, содержит большое количество параллельных чипов. Нарращивание мощности может осуществляться за счет соединения инверторных блоков, однако при этом требуется дополнительное преобразование энергии низковольтного сигнала в средневольтный (MV) уровень. Новая концепция предусматривает использование многоуровневого инвертора, построенного на базе низковольтных ячеек и позволяющего непосредственно преобразовывать энергию MV-диапазона. Очевидным достоинством подобной схемы является возможность формирования многоуровневого сигнала, что позволяет снизить частоту коммутации, повысить эффективность преобразования и существенно упростить выходной фильтр.**

**Деян Шрайбер  
(Dejan Schreiber)**

**Перевод: Андрей Колпаков**

### Современное состояние

Наиболее перспективными источниками альтернативной энергии на сегодняшний день считаются ветроэнергетические установки (ВЭУ) и солнечные энергетические станции (СЭС). Мощность самых современных ВЭУ находится в диапазоне 2–5 МВт, отдача единичной солнечной установки за последние годы выросла до 0,5 МВт, в ближайшее время она должна быть доведена до 1 МВт. В эксплуатации находятся станции, рассчитанные на 10 МВт, а самая мощная из установленных способна развивать до 60 МВт. Во всех случаях подключение инвертора СЭС к сети осуществляется через синусоидальный фильтр, обеспечивающий требуемое значение коэффициента гармоник.

Современная ветрогенераторная установка содержит входной (генераторный) инвертор, выполняющий функцию активного выпрямителя, который преобразует изменяющийся АС-сигнал генератора в стабилизированное DC-напряжение, обеспечивая максимальную отдачу мощности выходного (сетевое) инвертора.

Элементы солнечной батареи вырабатывают ток, пропорциональный интенсивности света, окружающей температуре, току и мощности нагрузки. В результате этого диапазон изменения напряже-

ния инвертора превышает 1:2, при этом в солнечных станциях, как правило, отсутствует повышающий конвертор.

Эффективность преобразования является основным параметром для энергетических установок высокой мощности. Наиболее популярными силовыми ключами для применения в ВЭУ являются IGBT 12-го и 17-го класса, а в конверторах солнечных батарей чаще всего используются транзисторы с рабочим напряжением 1200 и 600 В.

Повышение КПД системы может быть достигнуто за счет снижения потерь силовых ключей, использования новейших полупроводниковых технологий. Очевидно, что, как это было все последние годы активного развития полупроводниковой техники, IGBT и в ближайшем будущем останутся «рабочей лошадью» силовой электроники.

Необходимо отметить, что ВЭУ на основе асинхронных генераторов с двойным управлением (DFIG), в которых через инвертор передавалась только часть мощности установки, уходят в прошлое. Практически во всех новых разработках используется принцип «полноразмерного» преобразователя с 4Q-конвертором [1]. КПД современной ветрогенераторной установки, включающей генератор с  $dv/dt$ -фильтром, активный выпрямитель, выходной инвертор, звено постоянного тока, выходной синус-

соидальный фильтр, находится в диапазоне 96–97%. Основными требованиями к подобным изделиям являются высокая плотность мощности и экономическая эффективность. Особое внимание уделяется обеспечению показателей надежности ВЭУ, которые, как правило, должны работать без обслуживания непрерывно не менее 15 лет. Именно поэтому в современных ветрогенераторных установках применяются новейшие материалы и технологии, что касается и технологий силовой электроники.

### Параллельная работа силовых ключей

Проектирование конверторов высокой мощности (сотни кВт – единицы МВт) невозможно без параллельного соединения модулей или функциональных блоков. Существует несколько вариантов построения подобных схем:

- Каждая фаза инвертора состоит из нескольких параллельно соединенных модулей, управляемых от одного драйвера. Все IGBT имеют индивидуальные резисторы затвора, соединение AC- и DC-цепей выполняется симметричным. Примером удачной реализации данной концепции является семейство приводных сборок SEMIKRON, получившее название SEMIKUBE [2].
- Параллельное соединение инверторных блоков, каждый из которых имеет собственную плату управления. Из-за разброса временных характеристик драйверов объединение AC-выходов должно производиться через уравнивающие индуктивности.
- Параллельное соединение инверторных блоков, содержащих параллельные модули и общую DC-шину. Каждый из инверторов имеет собственную плату управления, все они работают от одного ШИМ-контроллера [3]. Из-за разброса временных характеристик драйверов объединение AC-выходов должно производиться через уравнивающие индуктивности.
- Параллельное соединение инверторных блоков с общим ШИМ и дополнительным контролем распределения выходных токов инверторов. Данная идеология отличается достаточно сложной схемой управления.
- Концепция управления «ведущий-ведомый», обеспечивающая низкие времена задержки и высокую надежность. Драйвер имеет общий входной каскад и несколько изолированных выходных, каждый из которых работает со своим параллельным модулем. Дополнительные индуктивности не требуются, при отказе одного из силовых модулей остальные продолжают работать.
- Параллельная работа инверторов при наличии гальванической изоляции по входу или выходу. Каждый канал работает независимо от разных контроллеров (рис. 1) [4].

В некоторых вариантах исполнения ВЭУ генератор, преобразователь и MV-трансформатор расположены в гондоле. В результате суммарный вес оборудования оказывается очень большим, однако это единственный путь, позволяющий снизить потери при передаче

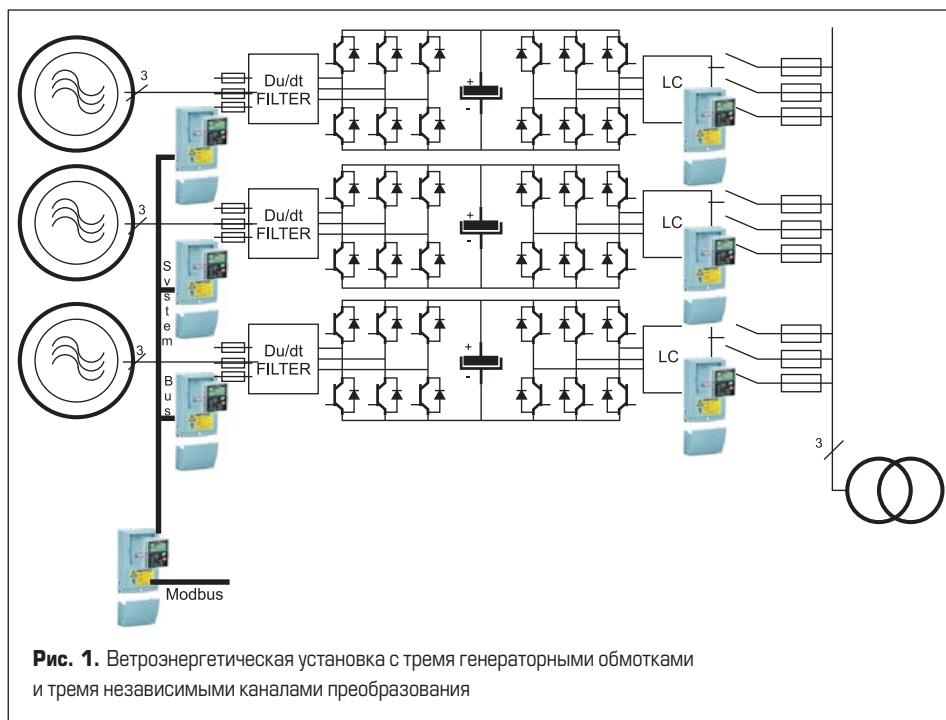


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка с тремя генераторными обмотками и тремя независимыми каналами преобразования

энергии от низковольтного (LV) генератора к средневольтовой (MV) сети. В ряде других проектов конвертор расположен в основании башни ВЭУ, при этом передача низковольтного напряжения на расстоянии около 100 м приводит к большим энергетическим потерям и снижению экономической эффективности.

Как правило, для построения преобразователя мощностью около 1 МВт используется параллельное соединение нескольких стандартных модулей IGBT 17-го класса, имеющих наилучшее сочетание технических и экономических параметров. На сегодня максимальная мощность единичного серийного 3-фазного инвертора составляет около 1,5 МВт [4]. Применение ВЭУ с несколькими генераторными обмотками упрощает задачу, поскольку при этом преобразование энергии может осуществляться независимыми конверторами (рис. 1). Подобная схема позволяет повысить надежность, поскольку отказ одного канала не приводит к выходу из строя всей установки.

### Генераторы ВЭУ

К генераторам ВЭУ предъявляется ряд специальных требований по массогабаритным показателям, пульсации момента и моменту короткого замыкания, что особенно критично для низкоскоростных, безредукторных электрических машин. Реализация данных требований привела к созданию многофазных генераторов, имеющих две, три и даже шесть 3-фазных обмоток.

Полифазные (5, 7 и более) электрические машины пока не находят применения в ВЭУ, поскольку это требует разработки новых нестандартных преобразователей и контроллеров. В области мощностей до нескольких мегаватт задача снижения токовой нагрузки решается за счет перехода на MV-диапазон выходных напряжений. Однако для построения

схемы с средневольтовым входом и выходом требуется применение силовых ключей 33-го и более высоких классов. При частоте коммутации в несколько килогерц подобные устройства имеют гораздо меньшую эффективность и большую цену за киловатт, чем конверторы на основе стандартных низковольтных IGBT.

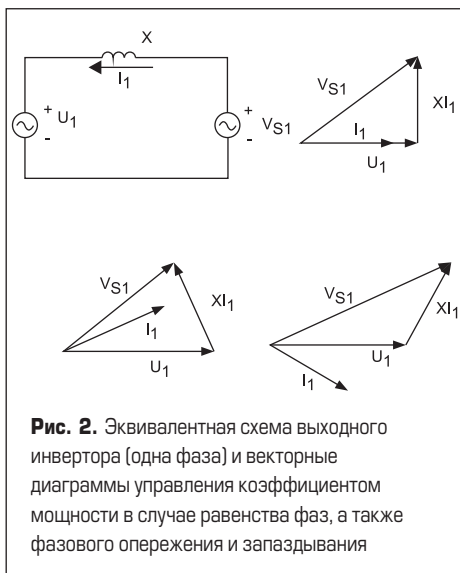
Преобразователи возобновляемых источников энергии, таких как ВЭУ или СЭС, должны осуществлять управление активной и реактивной мощностью. Существует и ряд специальных требований, таких как возможность работы при асимметричном сетевом напряжении [7]. Для контроля реактивной мощности необходимо повышать напряжение DC-шины выходного инвертора, что создает дополнительные технические проблемы.

### Работа выходного инвертора

Управление мощностью, проходящей через ШИМ-конвертор, осуществляется за счет изменения фазового угла  $\delta$  между напряжением питания  $U_1$  и соответствующим входным напряжением конвертора  $V_{s1}$ . Когда  $U_1$  опережает  $V_{s1}$ , активная мощность течет от AC-источника в конвертор. В случае, если напряжение питания отстает по фазе, энергия возвращается из DC-шины конвертора в AC-источник. Процесс передачи энергии описывается выражением (1).

$$P = (U_1 V_{s1} / X_1) \sin \delta. \quad (1)$$

Коэффициент мощности сетевого напряжения может регулироваться с помощью изменения амплитудного значения  $V_{s1}$ . Эквивалентная схема выходного инвертора (одна фаза) и векторные диаграммы управления коэффициентом мощности в случае равенства, а также фазового опережения и запаздывания приведены на рис. 2. Фазовая диаграмма показывает, что для получения еди-



**Рис. 2.** Эквивалентная схема выходного инвертора (одна фаза) и векторные диаграммы управления коэффициентом мощности в случае равенства фаз, а также фазового опережения и запаздывания

ничного коэффициента мощности величина  $V_{s1}$  должна удовлетворять формуле (2):

$$V_{s1} = \sqrt{U_1^2 + (X_1 I_1)^2}. \quad (2)$$

**Новые решения**

**Последовательное соединение ячеек для ВЭУ высокой мощности**

Концепция многообмоточного генератора ветротурбины с «полноразмерным» конвертором имеет ряд преимуществ и только один, но существенный недостаток. Для ее реализации требуется протяжка большого количества силовых кабелей между 3-фазными обмотками и преобразователем. Вся конверторная секция должна быть размещена в гондоле, в непосредственной близости от генератора, токи которого в низковольтной схеме могут достигать нескольких килоампер.

Гораздо более привлекательным решением является использование средневольтного синхронного генератора, вместе с которым в гондоле может находиться только диодный выпрямитель. Очевидно, что в этом случае конвертор также должен быть построен на силовых ключах MV-диапазона. Поскольку ВЭУ должна вырабатывать энергию даже при минимальных скоростях вращения турбины и, соответственно, минимальном

напряжении звена постоянного тока ЗПТ (например 1000 В DC), выходной сигнал MV-трансформатора также оказывается достаточно мал (например, 660 В AC). При этом с ростом скорости вращения напряжение на DC-шине может превышать значение 2 кВ.

Логичным решением проблемы средневольтного преобразования является применение линейки последовательно соединенных ячеек инверторов, разделяющих выходное напряжение генератора на уровни, соответствующие низковольтному диапазону. Выходы ячеек подключаются к первичным обмоткам сетевого трансформатора, при этом напряжение на ЗПТ каждой из них поддерживается за счет заряда и разряда конденсаторов DC-шины. При низкой скорости вращения турбины некоторое количество ячеек может быть зашунтировано байпасными ключами таким образом, чтобы эквивалентное суммарное напряжение конвертора соответствовало напряжению генератора.

Требования, предъявляемые к моменту ветротурбины и выходному току генератора, аналогичны — момент  $M$  соизмерим с истинным значением постоянного тока  $I_{DC}$ . Если это соотношение нарушается и  $M > I_{DC}$ , суммарное время шунтирования ячеек возрастает, большее их количество выводится из работы, в результате чего снижается эквивалентное значение противо-ЭДС, таким образом, ток увеличивается.

Напряжение ЗПТ каждого из инверторов, выходы которых подключены к первичным обмоткам трансформатора, поддерживается схемой управления на постоянном уровне (например 1000 В); если напряжение питания превышает заданное значение, увеличивается разрядный ток. Ячейки могут быть однофазными и 3-фазными, в первом случае инвертор работает на одну трансформаторную обмотку. Выпрямленное напряжение генератора, величина которого может составлять несколько киловатт, подается на линейку последовательно соединенных единичных модулей. Байпасные ключи, с помощью которых осуществляется дискретное регулирование DC-напряжения, могут быть установлены по входу некоторой части ячеек. Суммарное входное напряжение ячеек, не снабженных шунтирующими транзисторами, должно равняться минимальному напряжению генератора.

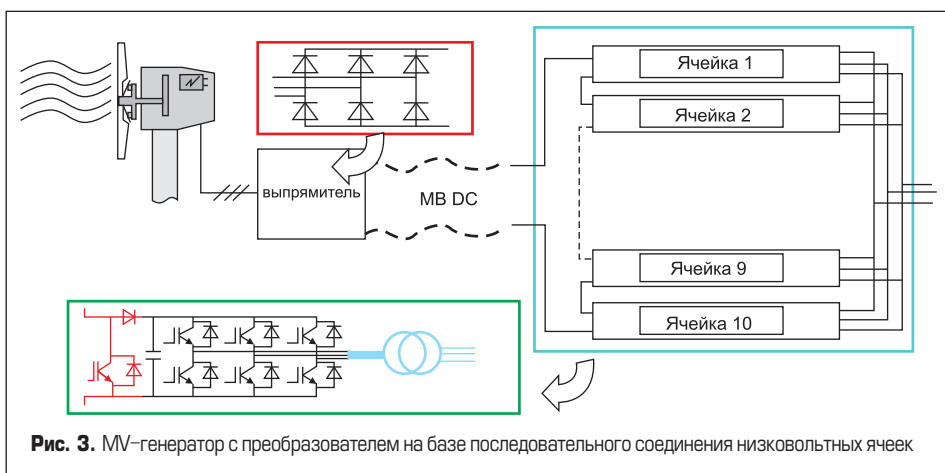
Мощная ВЭУ мегаваттного класса, рассматриваемая в статье, содержит средневольтный синхронный генератор с выпрямителем, а также многоуровневый инвертор, подключенный к высоковольтному сетевому трансформатору (рис. 3) [6]. В зависимости от выходного напряжения генератора в работе постоянно находится некоторое количество ячеек. Каждая их них содержит инвертор, нагруженный на однофазную или 3-фазную обмотку, и звено постоянного тока, конденсаторы которого заряжаются током генератора. Как было сказано выше, напряжение DC-шины поддерживается на постоянном уровне за счет заряда емкостей и их разряда при работе инвертора. Входы ячеек представляют собой чопперы, работающие как байпасные ключи, шунтирующие определенное количество инверторов при снижении выходного напряжения генератора. При уменьшении количества задействованных ячеек ток генератора соответственно повышается.

Основные особенности многоуровневого конвертора:

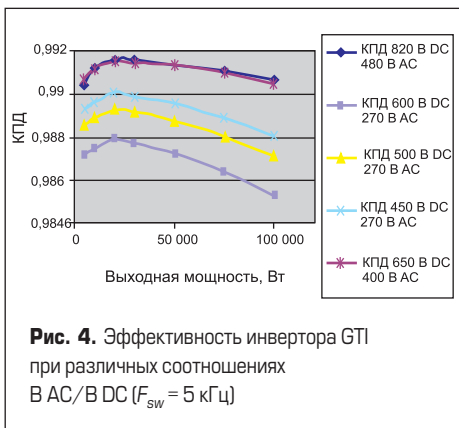
- Схема способна работать при выпрямленном напряжении генератора в диапазоне  $V_{dcmin} - V_{dcmax}$  — 1–10 кВ.
- Напряжение DC-шины ячейки  $V_{dcell} = 1100$  В (для IGBT 17-го класса), выходное напряжение — 3×690 В AC.
- Количество ячеек  $N_c = V_{dmax} / V_{dcell}$
- Мощность ячейки —  $P_{genmax} / N_c$
- Равномерное распределение мощности в ячейках.
- Ток MV DC регулируется количеством работающих и шунтированных ячеек.
- Время работы ячейки 0–100%.
- Отключенные ячейки могут вырабатывать полную реактивную мощность.
- Высокая эффективность при максимальной и минимальной мощности.
- Низкий коэффициент гармоник за счет сдвига фаз опорного напряжения ШИМ между ячейками.
- Частота пульсаций тока выходного сигнала —  $F_{sw} \times N_c$
- Нет зависимости от частоты сети (50/60 Гц).
- Новая концепция парка ВЭУ: ветротурбины и выпрямители, подключенные к преобразователю, располагаются в центре генераторного парка. Все ячейки размещаются в контейнерах вблизи подстанции.
- В инверторах используются только надежные и недорогие низковольтные ключи, что обеспечивает высокую техническую и экономическую эффективность системы.
- Практически нет ограничения по напряжению генератора, наращивание происходит за счет увеличения количества ячеек.

**Преобразователи для солнечных энергетических станций**

В преобразователях СЭС, как правило, используется только один инвертор, называемый GTI (Grid-Tie Inverter). Величина выходного сигнала GTI  $V_{out}$  пропорциональна минимальному входному напряжению постоянного тока, а пусковое напряжение солнечной батареи пропорционально минималь-



**Рис. 3.** MV-генератор с преобразователем на базе последовательного соединения низковольтных ячеек



**Рис. 4.** Эффективность инвертора GTI при различных соотношениях В AC/В DC ( $F_{sw} = 5$  кГц)

ному уровню освещенности. Если выбранное значение выходного сигнала ниже нормы, ток будет возрастать, однако в то же время ниже будет и пусковое напряжение. Таким образом, выбор величины  $V_{out}$  является компромиссным: как правило,  $3 \times 270$  В или  $3 \times 328$  В.

В подобных применениях инвертор по выходу используется только на ~50%, при этом ключи 12-го класса, способные обеспечивать напряжение до 480 В AC, работают в СЭС с уровнями 270–330 В. КПД, зависящий от коэффициента модуляции  $m$  и отношения В AC/В DC, при этом оказывается довольно низким. Как показано на рис. 4, при соотношениях 400 В AC/650 В DC или 480 В AC/800 В DC эффективность преобразования гораздо выше, чем при типовой для солнечных батарей величине 270 В AC (500–900 В DC).

**Конвертор СЭС с повышающим входным каскадом**

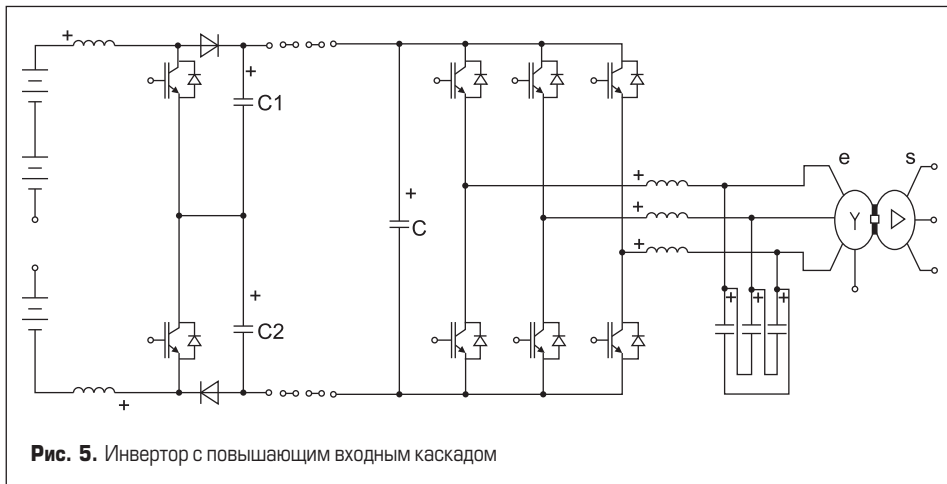
Схема, представленная на рис. 5, предназначена для работы в составе энергетической установки мегаваттного класса мощности. Кроме солнечной батареи, она содержит активный симметричный повышающий входной каскад на входе преобразователя, DC-шину, инвертор, синусоидальный фильтр и стандартный сетевой MV-трансформатор.

Повышающий каскад позволяет оптимизировать величину напряжения DC-шины и согласовать ее с уровнем входного сигнала трансформатора таким образом, чтобы коэффициент модуляции  $m$  был близок к 1.

$$m = 2 \times \sqrt{3} / 3 \times \sqrt{2} \times V_{AC} / V_{DC}$$

**Пример реализации схемы для рынка США**

Выходной сигнал солнечной батареи  $V_{PV}$  находится в диапазоне 200–600 В, напряжение ЗПТ поддерживается на уровне 800 В DC, выходное напряжение инвертора  $3 \times 480$  В, использован стандартный трансформатор. В схеме применяются 600-В силовые ключи во входном каскаде и IGBT-модули 12-го класса в инверторе. При  $V_{PV} = 400$  В и  $V_{DC} = 800$  В потери канала передачи постоянного тока оказываются примерно в 4 раза меньше, чем в стандартной схеме. Уровень пульсаций тока солнечной батареи должен быть как можно ниже, это достигается благодаря большой распределенной



**Рис. 5.** Инвертор с повышающим входным каскадом

индуктивности кабеля (примерно 0,1 мГн при длине кабеля 100 м), соединяющего фотогальванические элементы и вход конвертора. Кроме того, в СЭС используются более высокие частоты коммутации, чем в ВЭУ, что также способствует снижению уровня пульсаций.

**Пример реализации схемы для рынка Европы**

При  $V_{PV} = 400–900$  В повышающий каскад вырабатывает  $V_{DC} = 650$  В при выходном сигнале  $V_{out} = 3 \times 400$  В или 800 В при  $V_{out} = 3 \times 480$  В. Если напряжение батареи становится больше 650 В (или 800 В), бустер отключается и инвертор работает непосредственно от фотогальванических элементов.

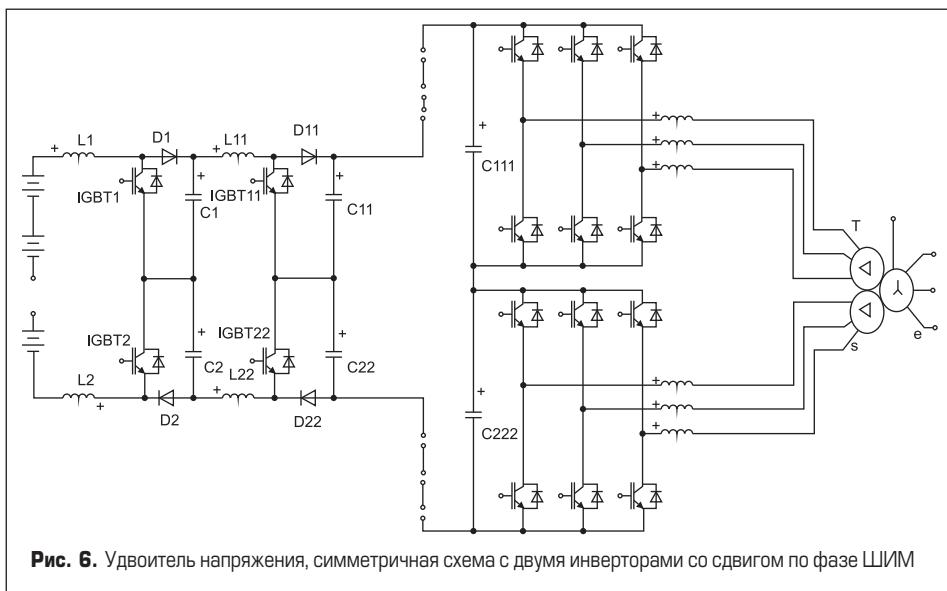
Схема устройства приведена на рис. 6. Входной симметричный каскад поочередно вырабатывает напряжение, соответствующее верхней или нижней половине выходного сигнала. Таким образом, когда TOP IGBT1 или BOT IGBT2 включаются на половину периода коммутации (электрический угол  $180^\circ$ ), схема работает как удвоитель напряжения. Подобный режим работы имеет очевидное преимущество, поскольку ток фотогальванических элементов постояен и отпадает нужда в высокой дополнительной индуктивности  $L1$  и  $L2$ . Длины кабеля 50–100 м при этом оказываются вполне достаточно.

Напряжение батареи всегда оказывается удвоенным, т. е. находится в диапазоне 800–1800 В. Поскольку при верхних значениях этого диапазона нельзя использовать низковольтные IGBT, инвертор состоит из 2 последовательных ячеек. При этом байпасные ключи, позволяющие выбирать оптимальную величину напряжения DC-шины, могут быть размещены непосредственно рядом с преобразователем. При использовании данной схемы выходное напряжение может в 4 раза превышать сигнал, поступающий от солнечной батареи.

Пример 1.  $V_{PV} = 400–900$  В, после схемы удвоения 800–1800 В. Выходное напряжение второго бустера и инвертора: 1600–1800 В (без усиления после 1600 В). Входное напряжение трансформатора  $2 \times 3 \times 480$  В, все IGBT 12-го класса.

Пример 2.  $V_{PV} = 400–900$  В, после схемы удвоения 800–1800 В. Выходное напряжение второго бустера и инвертора: 2200 В =  $2 \times 1100$  В. Входное напряжение трансформатора  $2 \times 3 \times 6900$  В. Силовые ключи удвоителя напряжения 12-го класса, остальные IGBT и диоды — 17-го класса. При  $F_{sw} < 4$  кГц эффективность преобразования в этом случае выше, чем в предыдущем примере.

При напряжении 2200 В потери преобразования оказываются в 16 раз ниже, чем в клас-



**Рис. 6.** Удвоитель напряжения, симметричная схема с двумя инверторами со сдвигом по фазе ШИМ

сической схеме при прямой передаче сигнала ( $V_{PV} = 550$  В). Верхний и нижний инверторы имеют одинаковую мощность и равные фазные токи, а их подключение к сети производится через различные обмотки. В такой схеме можно использовать сдвиг фазы ШИМ-сигнала на  $180^\circ$ , что позволяет существенно снизить уровень пульсаций и коэффициент гармоник, а также уменьшить индуктивность синусного фильтра. На рис. 7 показаны токи инверторов, полученные в результате моделирования при  $F_{sw} = 1$  кГц. Коэффициент гармоник по фазному сигналу в этом случае составляет 19%, а для сетевого тока с учетом сложения фаз значение THD оказывается очень низким — 3,8%!

Таким образом, использование фазового сдвига по ШИМ-сигналу дает ощутимый эффект и позволяет применять для фильтрации один небольшой дроссель. С учетом индуктивности рассеяния трансформатора (напряжения КЗ трансформатора составляет 4%) общее значение  $L_{total} = 12\%$ . Чтобы получить аналогичные результаты с одиночным сетевым инвертором, частоту коммутации необходимо увеличить до 6 кГц.

### Заключение

В подавляющем большинстве современных преобразователей ветроэнергетических установок используются модули IGBT с рабочим напряжением 1700 В, обеспечивающие наилучшее сочетание технических и экономических показателей. Популярность ВЭУ на основе генераторов с двойным управлением (DFIG) постоянно снижается, а основной архитектурой современных преобразователей ветротурбин становится 4-квadrантный инвертор, рассчитанный на полную мощность установки. Следует отметить, что новые ВЭУ проектируются с учетом отдачи в сеть не менее 3–5 МВт.

Применение генераторов с двумя, тремя и даже шестью 3-фазными обмотками и соответствующим количеством независимых каналов преобразования позволяет создавать модульные ВЭУ, отличающиеся максимальной эффективностью и надежностью. Использование подоб-

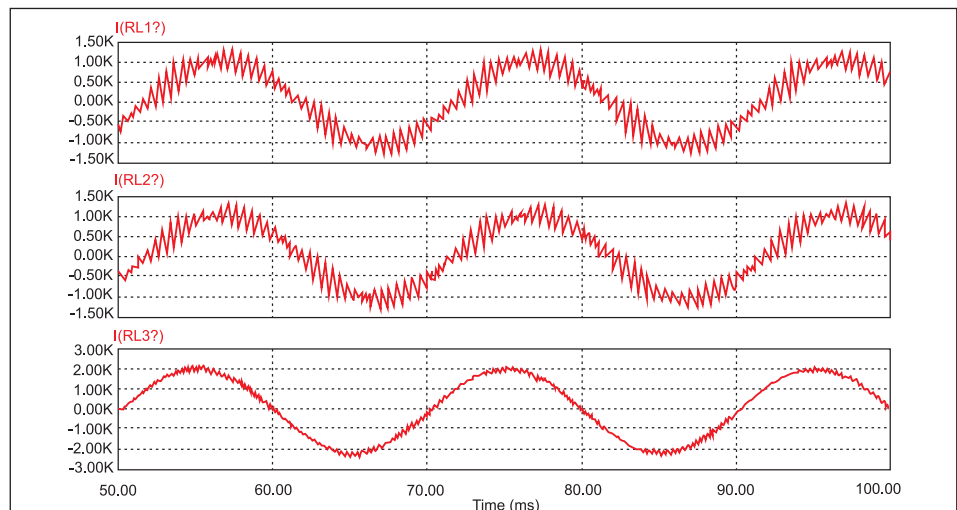


Рис. 7. Фазный ток инверторов верхнего и нижнего уровня. Индуктивность фильтра  $L_{total} = 12\%$ ;  $F_{sw} = 1$  кГц

ной концепции дает возможность сохранять работоспособность установки даже при отказе одного из каналов.

Новейшей архитектурой ВЭУ, обеспечивающей модульность и избыточность, является многоуровневая схема на основе низковольтных ячеек, осуществляющая передачу энергии от MV-генератора к независимым обмоткам выходного MV-трансформатора. Стабилизация напряжения сети при изменении скорости вращения турбины производится с помощью шунтирования некоторого количества ячеек.

В солнечных энергетических станциях мощностью до 1 МВт традиционно используется обычный 3-фазный инвертор, подключенный непосредственно к батарее фотогальванических элементов. С ростом мощностей подобная схема становится малоэффективной, поэтому все больше производителей использует новую концепцию схемы с удвоением напряжения. Подобное устройство с входным повышающим преобразователем и двумя последовательными инверторами может работать при оптимальных соотношениях переменного и постоянного напряжения при коэффициенте модуляции, близком к 1. Использование фазо-

вого сдвига между опорными ШИМ-сигналами позволяет существенно снизить коэффициент гармоник и упростить выходной синусный фильтр.

### Литература

1. Schreiber D. State-of-the-Art of Variable Speed Wind Turbines, 11<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics. 2001.
2. Колпаков А. Инверторная платформа SEMIKUBE — quadratisch, praktisch, gut // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
3. Schreiber D. Power Electronics for Windmill Application. Wind Power Asia 2007.
4. Schreiber D. Power Electronics for MW Wind Turbines. 15<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics. 2009.
5. Beckedahl P. SKiiP — An intelligent power module for wind turbine inverters. EPE Wind Energy Chapter. 2009.
6. Schreiber D., Beckedahl P., Staudt I. Medium voltage line side inverter for windmill applications. EPE Wind Energy Chapter. 2009.
7. Stankovic A. V., Schreiber D. Handbook of Renewable Energy Technology. World Scientific Publishing 2010.