

Навстречу ветру

Еще в 1928 г. Владимир Иванович Вернадский написал, что человечество становится «геологической силой», то есть его влияние на процессы, происходящие на планете, соизмеримо с природными катаклизмами. Состояние цивилизации зависит от решения многих вопросов, но практически каждый из них в какой-то степени связан с проблемами энергетики. Вся история цивилизации, по сути, это история развития энергетики.

**Райнер Вайс
(Rainer Weiss)
Ральф Херрманн
(Ralf Herrmann)
Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Сегодня человечество впервые столкнулось с первым пределом — экологической емкостью среды обитания. Наша планета предоставляет нам, как это ни парадоксально, практически неисчерпаемые источники энергии, главным из которых является ветер. Ресурсы ветровой энергии во много раз больше, чем все запасы биогенного топлива в земной коре, накопившиеся за миллионы лет. Мы живем на дне океана энергии. Пока существует планета и ее газовая оболочка, нагреваемая Солнцем, будет происходить перемещение воздушных масс.

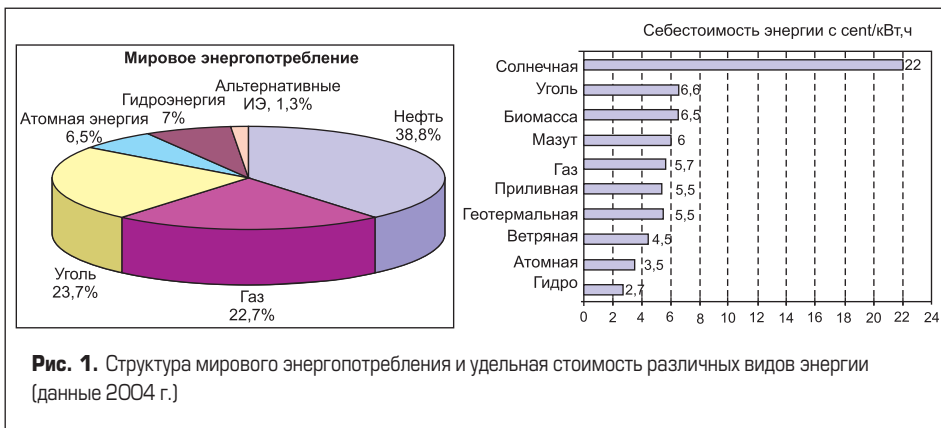
В конце 2009 г. суммарная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ), установленных во всем мире, превысила 122 ГВт, и по прогнозам к 2020 г. эта величина удвоится. По подсчетам специалистов, стоимость выработки 1 кВт мощности традиционным ветрогенератором при условии решения технических проблем

должна быть ниже, чем стоимость 1 кВт тепловой или атомной энергии (рис. 1). Эта разница оказывается еще более существенной, если учесть экологическую чистоту и безотходность ветроэнергетики.

В 2001 г. наименьшая себестоимость производства электроэнергии на ветроэнергетической установке составляла \$0,0361 за 1 кВт·ч при цене 1 кВт установленной мощности \$765. Учитывая увеличение средней мощности ВЭУ и повышение коэффициента ее использования, можно ожидать снижение себестоимости производства 1 кВт·ч электроэнергии к 2020 г. до \$0,0211 (при стоимости 1 кВт установленной мощности до \$447 долларов).

Популярность ветроэнергетических установок увеличивается во всем мире, особенно ярко эта тенденция наблюдается в Азии и США, где основную часть парка ветряков составляют оффшорные установки.





С точки зрения стабильности и скорости ветра установка ветротурбин в море считается оптимальной, однако условия их эксплуатации являются при этом наиболее жесткими. Не будем также забывать о том, что стандартный срок гарантии на ветротурбины, как правило, составляет 15-20 лет, в течение которых установка должна безотказно работать практически в режиме полной нагрузки.

Многолетний опыт работы ведущих мировых производителей ВЭУ подтвердил, что интеллектуальные силовые ключи семейства SKiIP наилучшим образом подходят для данного применения. Это обусловлено рекордными показателями плотности мощности, хорошими тепловыми характеристиками, а также высоким уровнем интеграции. Как правило, IPM SKiIP используются в «полноразмерных» 4-квadrантных преобразователях современных ветротурбин. Мощность единичной установки при использовании одного модуля третьего поколения на фазу достигает 1,5 МВт. Внедрение четвертой генерации SKiIP позволит довести этот показатель до 2 МВт, а дальнейшее нара-

щивание энергии ВЭУ будет производиться с помощью параллельного соединения инверторов или использования многоуровневой схемы средневольтного диапазона.

Примерно в 80% ВЭУ используются так называемые асинхронные генераторы с двойным регулированием (Double Fed Induction Generator, DFIG), в которых силовой блок управляет током ротора (рис. 3а). При этом на инвертор поступает не более 20% мощности, вырабатываемой генератором, что является основным достоинством подобных машин. Остальные 80% генерируются статорной обмоткой, непосредственно подключенной к сети. К недостаткам таких устройств относятся низкая надежность скользящих кольцевых контактов ротора, необходимость использования механического редуктора, наличие контактора в статорной цепи, а также плохая управляемость системы из-за косвенного способа контроля. При возникновении перегрузки в сети необходимо резко повышать ток ротора, чтобы стабилизировать сетевое напряжение. Большая электромеханиче-

ская постоянная времени мощных генераторов неизбежно вносит запаздывание в контур регулирования.

Рост популярности возобновляемых источников энергии неразрывно связан с бурным развитием технологий силовой электроники, наблюдаемым в последние годы. Не менее важным фактором является и стремление промышленно развитых стран к диверсификации и снижению зависимости от поставщиков нефти и газа. Наиболее активный рост ветроэнергетики наблюдается в странах с высоким потреблением электричества — Китае, США, Германии (рис. 2), где стали появляться парки ветряков площадью более 35 км².

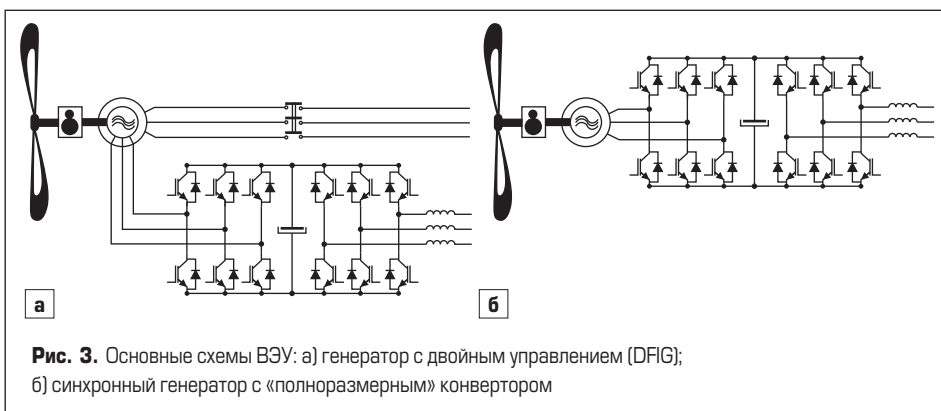
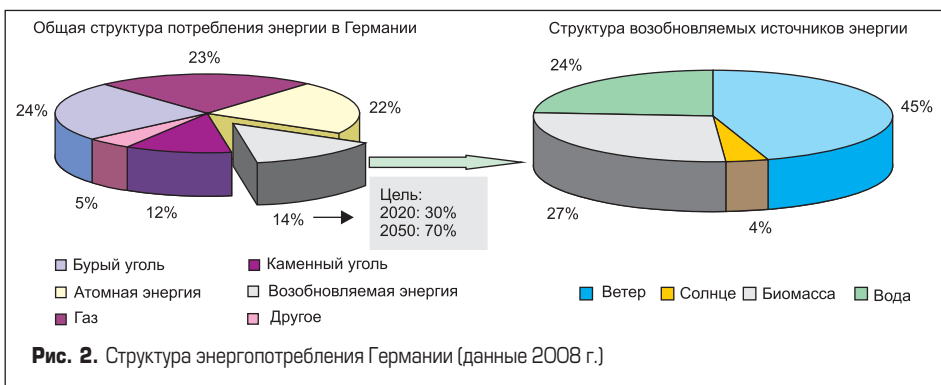
В последние годы резко возросли требования по управлению реактивной мощностью и обеспечению стабильности сетевых характеристик при провалах напряжения в сети. Это обусловило массовый переход на новый тип генераторов, синхронных и асинхронных, с «полноразмерными» электронными конверторами, способными быстро реагировать на изменение нагрузки и преобразующими 100% вырабатываемой мощности (рис. 3б). В этом случае система оказывается полностью контролируемой, обеспечивающей синхронизацию с сетью 50 или 60 Гц, способной компенсировать гармоническую реактивную мощность и вырабатывать ее.

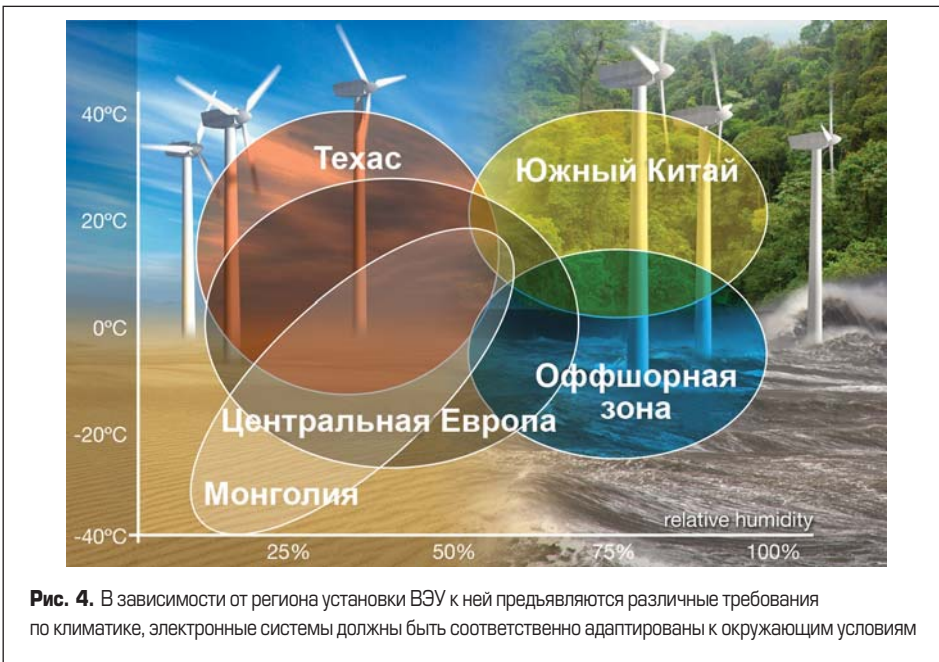
Кроме того, синхронная машина с постоянными магнитами может быть выполнена с большим количеством пар полюсов (>50), что позволяет отказаться от применения механического редуктора, являющегося одним из наименее надежных узлов турбины.

Силовые инверторы, работающие в любых видах электронных преобразователей, как правило, строятся на модулях 17-го класса и работают при напряжении АС 690 В, что является на сегодня оптимальным с точки зрения технической и экономической эффективности. В некоторых случаях применяются гораздо более дорогие силовые ключи с рабочим напряжением 3,3 кВ, это связано с требованиями, предъявляемыми к выходному трансформатору.

Для снижения удельной стоимости проектируются и вводятся в действие все более мощные турбины, что требует разработки соответствующих преобразовательных устройств. Огромное значение имеет и регион установки ВЭУ. Для монтируемых на суше ВЭУ экономически выгодно применять турбины мощностью 3 МВт, при оффшорной установке оптимальной считается мощность 5 МВт и выше.

Если выходное напряжение ВЭУ формируется «полноразмерным» конвертором, то его мощность должна соответствовать энергетическим возможностям генератора, т. е. быть в пять раз выше, чем в случае, описанном в начале статьи. Соответственно, для реализации такой схемы требуются гораздо более мощные силовые ключи. В отношении синхронных/асинхронных машин эти рассуждения полностью справедливы. Однако если принять во внимание низкую выходную частоту генератора DFIG, то на самом деле мощность преобразователя надо в этом случае повысить только в 3-3,5 раза.





Бурное развитие альтернативной энергетики предъявляет новые, все более жесткие требования к преобразовательным устройствам, силовым модулям и схемам защиты от электрических и тепловых перегрузок. Экстремальные климатические условия эксплуатации современных ВЭУ являются еще одним фактором, требующим повышения надежности преобразовательной техники (рис. 4). Оффшорные ветротурбины работают в условиях повышенной влажности, в то время как ВЭУ, устанавливаемые, например, в Техасе, подвержены воздействию высоких температур. Экстремальные климатические условия (температура, влажность) наблюдаются в Южном Китае. Вследствие этого возрастает важность систем охлаждения электронных преобразователей, которые должны обеспечивать высокую эффективность отвода тепла и проектироваться с учетом указанных факторов.

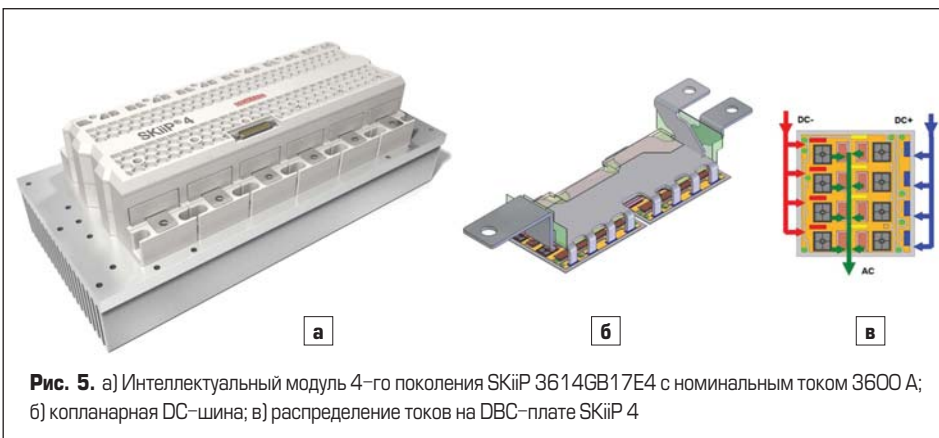
Общие проблемы и пути решения

КПД современных преобразователей в оптимальном режиме работы находится в диапазоне 98–99%, таким образом, потери мощности «полноразмерного» конвертора мощностью 6 МВт могут превышать 100 кВт. Необходимость рассеяния большого коли-

чества тепла является одной из основных проблем, которые приходится решать проектировщикам подобных систем. Если же температура окружающей среды оказывается слишком низкой, это может привести к образованию конденсата и последующему пробою высоковольтных цепей. Данная проблема наиболее актуальна для регионов с высокой влажностью.

Следующей реальной опасностью являются коммутационные перенапряжения, генерируемые при выключении больших токов, особенно в режимах перегрузки. Модули, рассчитанные на работу с токами 500 А и выше, имеют достаточно большие размеры, их внутренние силовые терминалы, как и внешние подводящие шины, обладают ненулевой распределенной индуктивностью L_S . Ее наличие приводит к возникновению динамических всплесков напряжения, амплитуда которых dV определяется выражением $dV = L_S \times di/dt$. Для преодоления этой проблемы необходима оптимизация дизайна DC-шины с целью обеспечения ее копланарности.

Как уже говорилось, общая мощность ВЭУ, установленных на конец 2009 г., составила 122 ГВт. Из них 57 ГВт преобразуется конверторами на базе модулей SKiIP, они установлены в 88% оффшорных ВЭУ. Богатый



опыт, накопленный SEMIKRON за годы работы на рынке возобновляемых источников энергии, и мировое лидерство в этом секторе стимулируют дальнейшие исследования в области проектирования специализированных конверторов для ВЭУ и интеллектуальных модулей высокой мощности. Неоценимое значение имеют исследования в области обеспечения защиты IPM от аварийных режимов, к которым относятся токовые перегрузки, перегрев, перенапряжения.

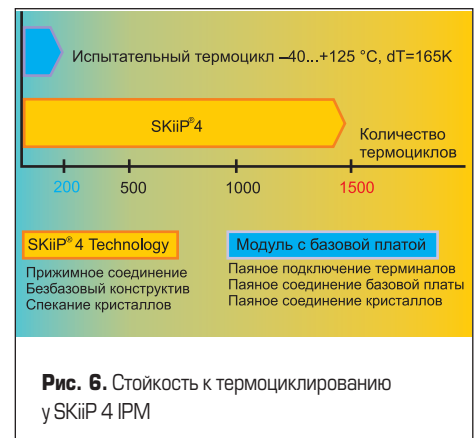
Совершенствование конструкции силовых модулей

Различия в климатических условиях работы ВЭУ в разных точках планеты обуславливают отличия в технических требованиях, предъявляемых к электронным устройствам, и пути решения этих проблем. Данные факторы в обязательном порядке учитываются SEMIKRON при проектировании силовых модулей.

В 2010 г. начался выпуск 4-го поколения IPM SKiIP (рис. 5), спроектированного с целью повышения плотности мощности, расширения срока службы и улучшения показателей надежности. Поставленные цели являются ответом на ключевые требования рынка ветроэнергетики, они обусловлены тем фактом, что обслуживание ВЭУ является чрезвычайно сложным и дорогим делом, а каждая сервисная остановка турбины приводит к большому финансовым потерям. Срок службы современной ветроэнергетической установки должен составлять не менее 15–20 лет, это требование распространяется и на все узлы электронной системы, самым ответственным из которых является силовой конвертор.

В модулях SKiIP 4-й генерации полностью переработан дизайн терминалов постоянного тока. Применение новой концепции «много-точечного» доступа к чипам позволило снизить значение паразитной индуктивности L_{CE} и активного сопротивления R_{CE} до физического минимума (12 нГн и 0,3 мОм). Для сравнения укажем, что средние показатели L_{CE}/R_{CE} для стандартного корпуса 62 мм IGBT составляют 20 нГн и 1,1 мОм.

Индивидуальный доступ каждого кристалла IGBT/FWD к силовым терминалам, симметрирование топологии каскадов верхнего и нижнего уровня позволило обеспечить



равномерное распределение токов, улучшить динамические характеристики и минимизировать уровень переходных напряжений.

Напомним, что компоненты семейства SKiP представляют собой законченную электронную систему, включающую силовой каскад, схему управления и защиты, датчики тока, напряжения, температуры и радиатор. В зависимости от выбранной заказчиком системы охлаждения теплоотвод, согласованный с силовой секцией по тепловым характеристикам, может быть воздушного или жидкостного типа.

Одним из основных требований, предъявляемых к силовым ключам, используемым в инверторах ВЭУ и на транспорте, является высокая стойкость к термоциклированию. Этот показатель для прижимных модулей семейства SKiP более чем в 7,5 раза (рис. 6) выше, чем у стандартных компонентов с базовой платой.

Основные тенденции

Вклад ВЭУ в общий баланс выработки электроэнергии растет с каждым годом. Особенно наглядно развитие ветроэнергетики наблюдается в странах, где данный сектор субсидируется государством. В Китае и США дефицит растущего потребления энергии покрывается за счет ввода в действие новых, все более мощных турбин. Например, в Китае только в 2009 г. было запущено новых установок на общую мощность 13,7 ГВт, что позволило довести объем «альтернативной» энергии до 25,8 ГВт (источник: *BTM Consult APS*, March 2010).

Общемировой тенденцией является также отказ от асинхронных машин с двойным управлением и переход на использование «полноразмерных конверторов», позволяющих удовлетворить все требования сетевых операторов по качеству напряжения и перегрузочной способности.

Больше мощность, выше эффективность

В июле 2010 г. Федеральное министерство образования и науки Германии (BMBF) одобрило создание объединенного исследовательского центра компаний SEMIKRON, Power Converter Solutions (PCS) и Технического

университета Дрездена. Первый совместный проект получил название «Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии с многоуровневыми преобразователями» (EEMT). Работа, на которую BMBF выделило €1,2 млн, должна продлиться три года и закончиться в марте 2013-го. Целью проекта является развитие инновационных технологий силовой электроники для повышения эффективности использования энергии возобновляемых источников.

Растущие цены на энергию являются острой проблемой не только для обычных потребителей, этот показатель становится одним из самых важных конкурентных факторов для рынка Германии и всей Европы. В то же время климатические условия и экологические требования подталкивают производителей к более ответственному использованию ресурсов. Сегодня 40% производимой в мире энергии является электрической, ожидается, что эта величина к 2040 г. достигнет 60%.

Проект EEMT, в частности, предусматривает разработку инновационных схем конверторов для преобразования постоянного тока, вырабатываемого ветротурбиной или солнечной батареей, в сетевое напряжение переменного тока. Используемые в настоящее время двухуровневые устройства требуют применения сложных фильтров для обеспечения качества электроэнергии. Они достаточно дороги и громоздки, кроме того, генерируемые ими потери мощности снижают эффективность работы всей системы.

Многоуровневая топология инверторов, которая должна внедряться в рамках проекта EEMT, позволит существенно снизить требования к выходным синусоидальным фильтрам. Кроме того, благодаря применению этой схемы можно будет свести к минимуму потери мощности в фильтрах и обеспечить максимальную эффективность работы энергетической установки. Аппаратная реализация подобных устройств несколько сложнее, чем традиционных двухуровневых инверторов, однако более высокая эффективность работы многоуровневых схем делает их привлекательными и с коммерческой точки зрения.

В ходе реализации проекта компаниями SEMIKRON должны быть разработаны новые

интеллектуальные силовые модули, предназначенные для работы в составе конвертора, проектирование которого является задачей Power Converter Solutions. Устройство управления и защиты будет разрабатываться кафедрой Электротехнического института (ETI), входящего в состав Технического университета Дрездена.

Проект получил одобрение BMBF в рамках программы «Силавая электроника для повышения эффективности использования энергии», которая является частью высокотехнологической стратегии немецкого правительства, а также инициативы «Коммуникационные и ИТ-технологии 2020» (ICT 2020). Задачей ICT является расширение областей применения силовой электроники с целью повышения эффективности использования энергии и снижения выбросов загрязняющих веществ.

Компания PCS специализируется на разработке оборудования для рельсового транспорта. В течение 10 лет она проектирует, производит и поставляет конвертеры и электрооборудование для всех видов рельсовых тележек. Имея большой опыт в области силовой электроники, PCS работает над созданием специализированной стендовой аппаратуры и ветротурбин.

ETI является частью Факультета электротехники и информационных технологий, одного из самых известных исследовательских центров Германии, и занимается обучением и исследованиями в области силовой электроники, приводов и теории электротехники. Институт славится более чем 100-летними традициями в данных областях.

Литература

1. www.renewableenergyworld.com
2. www.semikron.com
3. Колпаков А. Альтернативная энергетика и SEMIKRON // Электронные компоненты. 2003. № 9.
4. Колпаков А. Энергия, принесенная ветром // Силавая электроника. 2005. № 3.
5. Колпаков А. SKiP 4 — новая серия IPM высокой мощности // Силавая электроника. 2009. № 4.