

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ ТОКА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

А. Ю. БАРУ, Е. А. ПЕДАН*, А. О. УС, В. В. ФИЛАТОВ, Ю. Л. ШИНДНЕС

НПП «ЭОС», Харьков, Украина
*e-mail: eugen@eosltd.com.ua

АННОТАЦИЯ Проведен анализ тенденций в ветроэнергетике в мире и Украине. Приведена сравнительная характеристика основных видов ветроэнергетических установок. Приведена сравнительная характеристика преобразователей частоты на основе автономных инверторов напряжения и автономных инверторов тока для ветроэнергетических установок. Проведен анализ существующих технических решений на основе автономных инверторов тока для ветроэнергетики и предложены меры по их усовершенствованию. Приведено сравнение силовых полупроводниковых приборов для инверторов тока и предложены конструктивные решения по размещению преобразователей в ветряной турбине.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; преобразователи частоты; автономный инвертор тока; SGCT; RB-IGBT

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF FREQUENCY CONVERTERS ON THE BASE OF CURRENT SOURCE INVERTORS FOR WIND POWER

A. BARU, E. PEDAN*, A. US, V. FILATOV, Y. SHINDNES

SPE EOS, Kharkiv, Ukraine
*e-mail: eugen@eosltd.com.ua

ABSTRACT An analysis was performed concerned trends in wind power industry in the world and in Ukraine. A comparison of types of wind turbines on the base of doubly-fed induction generators (DFIG), permanent magnet synchronous generators (PMSG), electrically excited synchronous generators (EESG) and squirrel-cage induction generator (SCIG) was given. SCIGs have good perspectives for application in wind industry. A comparison of frequency converters on the base of voltage source inverters (VSI) and current source inverters (CSI) in operation on the grid and on the generator was performed. CSI has some advantages comparing to VSI. An analysis of existing technical decisions on the base of current source inverters for wind power was performed and proposals for their improvement was proposed. Current decisions have a row of problems caused by low switching frequency. Increasing of switching frequency in the inverter causes reduction of inductance of a choke in DC-link and capacitance of a filter on the grid side. This allows to reduce DC-link power, shift in regulation of reactive power in the grid, increase dynamic performance of the inverter and simplify its control. RB-IGBT allows higher switching frequency than SGCT and open possibilities for practical application of CSI in wind industry. New design of a wind tower with installation of the converter on the platforms in the bottom of the tower allows increase reliability of the wind turbine.

Keywords: wind power; frequency converter; current source inverter; SGCT; RB-IGBT

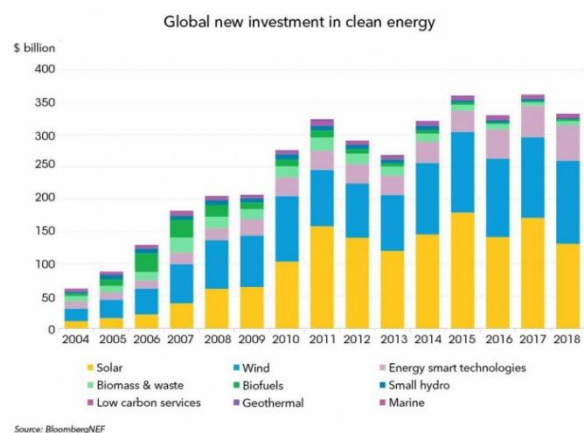
Введение

Тенденции в возобновляемой энергетике в мире и в Украине

С 2014 г. наблюдаются стабильные инвестиции в возобновляемые источники энергии в размере 320 – 360 млрд. долл. США/год. Для сравнения в 2015 г. инвестиции в ископаемое топливо составили 263 млрд долл США. Динамика инвестиций в чистую энергию приведена на рис. 1.

Однако при этом происходит рост объемов мощностей ветряной и солнечной фотоэлектрической (фотовольтаической) энергетики, вызванный снижением удельных капитальных затрат.

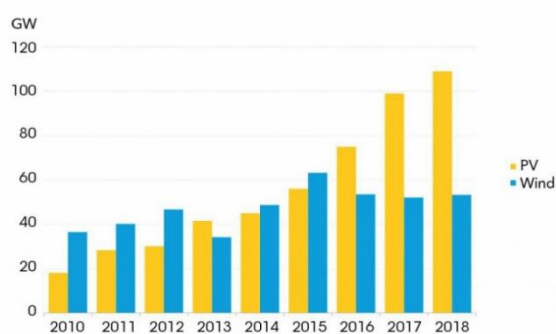
На рис. 2. показаны объемы вновь вводимых мощностей в ветроэнергетике и солнечной фотовольтаике.



Source: BloombergNEF

Рис. 1 - Новые инвестиции в мире в чистую энергетику (млрд. долл. США)

New wind and solar PV capacity added worldwide



Source: BloombergNEF. Note that the capacity added figures in this chart are preliminary estimates.

Рис. 2 - Новые добавленные мощности в мире в ветроэнергетику и солнечную фотовольтаику

В 2019 г. году ожидается внедрение 70 ГВт новых мощностей ветроэнергетики. В Украине в 2019 г. на стадии строительства находятся 6 ветроэлектростанций. Ожидается, что до 2020 г. запустят в эксплуатацию около 800 МВт мощностей ветроэнергетики. Вступил в действие закон Украины «Про внесение изменений к некоторым законам Украины по обеспечению конкурентных условий производства электрической энергии из альтернативных источников энергии» № 2712-VIII от 25 апреля 2019 г., в котором с 2020 г. предусматривается проведение аукционов на внедрение альтернативных источников энергии и гарантируется оплата выработанной энергии в течение 20 лет по установленному в результате аукциона тарифу.

Цель работы

Целью работы является проведение аналитического анализа различных типов ветроэнергетических установок (ВЭУ) и выбор наиболее оптимального для практического применения, сравнение типов преобразователей для ВЭУ, проведение анализа существующих технических решений для ВЭУ на основе автономных инверторов тока (АИТ) с предложениями по их усовершенствованию, проведение сравнения типов силовых полупроводниковых приборов для АИТ, выполнение анализа конструктивных решений по размещению преобразователей в ветроэнергетических установках.

1. Сравнительная характеристика основных типов ветроэнергетических установок

Главной тенденцией развития ветроэнергетики является увеличение единичной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ). Наземные (оншорные) ВЭУ вводятся в эксплуатацию единичной мощностью свыше 3 МВт. Реализуются проекты на морские (оффшорные) ВЭУ мощностью до 12 МВт.

Основные типы ветроэнергетических установок большой мощности делятся следующим образом:

- С асинхронными генераторами двойного питания (doubly-fed induction generators (DFIG)), рис. 3.

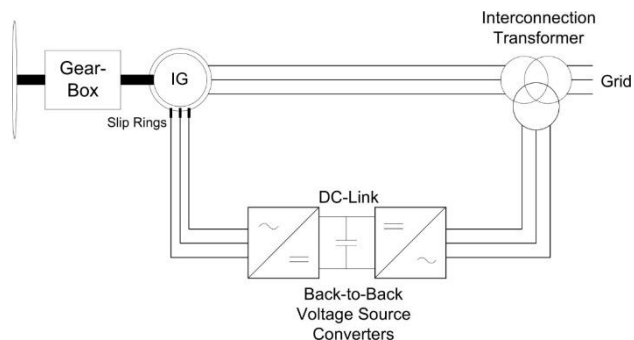


Рис. 3 - Ветряная турбина с асинхронным генератором двойного питания (doubly-fed induction generators (DFIG))

- С преобразователями на полную мощность (Full Power Converter), см. рис. 4

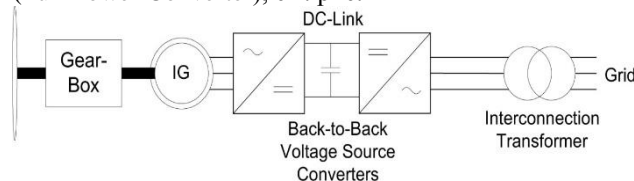


Рис. 4 - Ветряная турбина с преобразователями на полную мощность (Full Power Converter)

Они подразделяются в свою очередь на:

- с синхронными генераторами с постоянным магнитом (permanent magnet synchronous generators (PMSG))
- с синхронными генераторами с электрическим возбуждением (electrically excited synchronous generators (EESG)).
- с асинхронными генераторами с короткозамкнутым ротором (squirrel-cage induction generator (SCIG))

Ветряные турбины с асинхронными генераторами двойного питания требуют преобразователей с мощностью около 30% от номинальной мощности турбины, что снижает стоимость преобразователя. Однако машина двойного питания имеет контактные кольца, которые снижают надежность и требуют повышенных затрат на обслуживание. Преобразователь имеет ограниченную мощность, подключен к роторным цепям генератора и не может напрямую воздействовать на статорную цепь генератора. При провалах и авариях в сети на преобразователе возникают перенапряжения и перегрузки по току, которые могут вывести его из строя. Раньше эта проблема решалась путем короткого замыкания роторных цепей генератора при помощи переключки (crowbar), и он превращался в короткозамкнутый асинхронный генератор [1]. Но в таком режиме он потребляет реактивную мощность из сети. А современные кодексы электрических сетей (grid code) требуют наоборот генерации реактивной мощности в сеть для восстановления напряжения в ней после провала или аварии [2]. Поэтому работа преобразователя в таких режимах требует специальных алгоритмов работы, которые не всегда позволяют избежать выводу из строя преобразо-

вателя. Согласно аналитике, доля на рынке ВЭУ с машиной двойного питания постоянно снижается, уступая место преобразователям на полную мощность и управлением генератором со стороны статора.

Одной из самых современных тенденций в ветроэнергетике является применение синхронных генераторов с постоянным магнитом (permanent magnet synchronous generators (PMSG)). Они могут использоваться в безредукторных (direct drive) ВЭУ. Такие генераторы не требуют дополнительного источника энергии для возбуждения. Однако необходимо учитывать, что в качестве материала для постоянных магнитов в PMSG используется сплав $Nd_2Fe_{14}B$, в состав которого входит редкоземельный элемент неодим (Nd). Для повышения стойкости к перегреву (повышения температуры точки Кюри) в сплав добавляют другие редкоземельные элементы – празеодим (Pr), диспрозий (Dy) и тербий (Tb) [3]. Практически монополистом на производство этих металлов является Китай (95% мировой добычи), которые рассматриваются правительством этой страны, как стратегические, и находятся под экспортным контролем. Обращение с магнитами из неодима требует особой осторожности ввиду их хрупкости, возможности размагничивания от перегрева. В связи с ростом производства гибридных автомобилей и электромобилей (hybrid and electric vehicles), в которых для электродвигателей также широко используются постоянные магниты, ожидаются проблемы с приобретением материалов для них на рынке.

На рынке существуют ВЭУ с синхронными генераторами с электрическим возбуждением (electrically excited synchronous generators (EESG)). Они имеют сложную конструкцию, очень большую массу и объем, и требуют возбудителя, что неблагоприятно сказывается на ценовых параметрах и конкурентоспособности таких ВЭУ.

ВЭУ асинхронными генераторами с короткозамкнутым ротором ((squirrel-cage induction generator (SCIG)) требуют преобразователя на полную мощность и редуктора для согласования скорости вращения ветряной турбины и генератора, а также потребляют реактивную мощность из преобразователя для возбуждения. Однако этот тип генераторов имеет такие преимущества, как высокая надежность, простота в конструкции, долговечность, низкая себестоимость, минимальные затраты на обслуживание, отсутствие дефицитных материалов. Поэтому данный тип ВЭУ может рассматриваться, как очень перспективный.

2. Сравнительная характеристика типов преобразователей частоты для ВЭУ

В настоящее время для ВЭУ широкое практическое применение получили преобразователи частоты на основе автономных инверторов напряжения (АИН) [4]. Они опираются на десятилетние опыты использования их для электроприводов, давно разработанные силовые полупроводниковые приборы,

например IGBT. Однако, применение АИН для возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности для ветроэнергетики, при их работе на сеть вызывает ряд проблем.

2.1. Работа на сеть

Энергия в звене постоянного тока в АИН накапливается в конденсаторах. Режим короткого замыкания для АИН является критическим. Для тока короткого замыкания практически нет ограничений. Поэтому в традиционных применениях АИН, например, в электроприводах, при коротком замыкании в сети срабатывает защита и АИН отключается от сети. Так было и для ВИЭ, пока они занимали небольшую долю в выработке электроэнергии. Однако, с ростом ВИЭ в энергосистеме защитное отключение преобразователей от сети вызывало аварийные процессы во всей системе. Поэтому операторами сетей были выработаны новые кодексы сетей (grid code), которые предписывали, чтобы преобразователь оставался подключенным к сети при провалах напряжения или даже при снижении его в результате короткого замыкания до нулевого значения определенное время, достаточное для защитного отключения источника аварии от сети. На рис. 5 показаны требования оператора электрических сетей Tennet TSO (правопреемник E.ON Netz) (Германия) по предельному времени нахождения в состоянии подключения к сети ВИЭ [5].

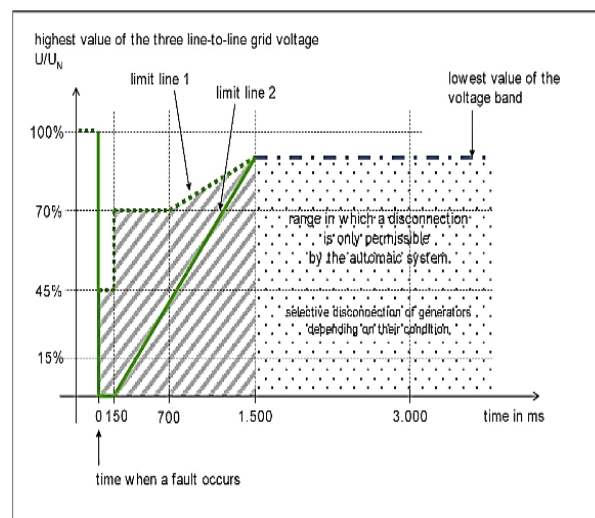


Рис. 5 - Предельные кривые для соотношения напряжение/время при подключении к сети для генерирующих устройств в случае аварии в сети

Так, при падении напряжения в сети до 0% генерирующее устройство, соединенное с сетью через преобразователь частоты, должно не отключаться от сети в течение 150 мс с момента начала аварии. Такое требование создает проблемы для АИН.

Для преобразователей частоты на основе автономных инверторов тока (АИТ) режим короткого замыкания не является большой проблемой, так как дроссель (индуктор) в звене постоянного тока эффек-

тивно ограничивает ток, а сама система АИТ управляет токами, как на входе, так и на выходе.

Поэтому технология на преобразователях частоты на основе АИТ является перспективной при работе на сеть, особенно в аварийных режимах.

2.2. Работа на генератор

Преобразователи частоты на основе АИН с транзисторными модулями типа IGBT имеют выходной ток, близкий к синусоидальному, но их выходное напряжение имеет вид импульсов прямоугольной формы с крутыми фронтами. Результатом является выброс пиков напряжения U_{peak} и крутые фронты нарастания напряжения dU/dt на электрогенераторе. При короткой длине кабеля (несколько метров) dU/dt достигает 1500 - 2000 В/мкс, а пиковое напряжение на генераторе в 2 – 2,3 раза выше номинального действующего значения U_{nom} . Поэтому для них нужны генераторы с усиленной изоляцией обмоток. При длине кабеля свыше 100 м dU/dt снижается, но при этом U_{peak} возрастает до 2,6 – 2,7 от U_{nom} . Для преодоления таких пиковых напряжений нужно использовать дорогостоящие и материалоемкие RLC-фильтры. Высота башни современных мощных ветряных турбин составляет более 100 метров. Поэтому для АИН обычно используется вариант с коротким расстоянием между преобразователем и генератором с усиленной изоляцией. Генератор всегда находится в верхней части башни ветряной турбины в гондоле, преобразователь частоты с АИН, как правило, устанавливается рядом с ним. Это имеет ряд существенных недостатков:

- наличие углеродной токопроводящей пыли от лопастей ветровой турбины
- высокий уровень вибраций
- специальные требования к защите от молний
- степень защиты IP54
- жидкостное охлаждение, которое имеет двухконтурный характер: контур жидкостного охлаждения и теплообменник жидкость-воздух, расположенный вне гондолы.

Все это крайне усложняет и удорожает преобразователь, а также снижает надежность его работы.

Преобразователи частоты на основе АИТ с ШИМ имеют на выходе импульсы тока прямоугольной формы, которые фильтруются конденсаторами переменного тока, поэтому их выходные формы близки к синусоидальным с низкими гармониками [6]. Они имеют низкие dU/dt и могут применяться с длинными кабелями. Это свойство дает гибкость размещения преобразователей в ветряных турбинах, или в гондоле, или на нижних платформах башни.

3. Анализ существующих технических решений по преобразователям частоты на основе автономных инверторов тока для ветроэнергетики и предложения по их совершенствованию

Опубликован ряд фундаментальных работ по преобразователям на основе АИТ для ветроэнергетики [6,7,8]. Все они основаны на использовании силовых полупроводниковых приборах с частотой коммутации, ограниченной в диапазоне до 420 – 600 Гц. Все это вызывает ряд проблем, затрудняющих практическую реализацию преобразователей на основе АИТ для ветроэнергетики.

3.1. Влияние частоты коммутаций АИТ на параметры его индуктивных и емкостных элементов

Значение индуктивности дросселя в звене постоянного тока L_d зависит от частоты коммутаций f_s и допустимых пульсаций тока $\Delta I_{d,max}$ [9]:

$$L_d = \frac{\sqrt{2}V_{line}}{4f_s \cdot \Delta I_{d,max}}, \quad (1)$$

где V_{line} – напряжение в сети

Значение емкости конденсатора фильтра АИТ C на стороне сети зависит от частоты коммутаций f_s и допустимых пульсаций напряжения на конденсаторах, $\Delta V_{C,max}$:

$$C = \frac{1}{6f_s \cdot \Delta V_{C,max}} \cdot I_d, \quad (2)$$

где I_d – значение тока в звене постоянного тока.

Таким образом, при увеличении частоты коммутаций f_s в АИТ значения индуктивности дросселя в звене постоянного тока L_d и емкости конденсатора фильтра на стороне сети C уменьшаются.

Как было указано в [6], главным недостатком АИТ является ограниченность динамические характеристики, вызванные следующими причинами: 1) использование большого индуктора в звене постоянного тока, 2) схемы модуляции с ограниченными частотами коммутации и меньшей гибкостью. Увеличение частоты коммутации позволяет решить обе эти проблемы. Кроме того, это позволяет снизить массу и габариты дросселя.

3.2. Влияние величины емкости конденсатора фильтра на стороне сети C на работу АИТ

3.2.1. Влияние на минимальное значение тока в звене постоянного тока и регулирование реактивной мощности

Минимальное значение тока в звене постоянного тока, обусловленное работой преобразователя со стороны сети i_{dc_grid} , как функция мощности ветрогенератора P_g определяется по формуле [6]:

$$i_{dc_grid_min} = \sqrt{(1 - \omega_s^2 L_s C_i)^2 \left(\frac{P_g}{1,5V_{ds}}\right)^2 + \omega_s^2 C_i^2 \left(v_{sd} + \frac{R_s P_g}{1,5V_{ds}}\right)^2}, \quad (3)$$

где ω_s – частота основной гармоники, L_s – величина индуктивности на стороне сети, C_i – величина

конденсатора фильтра на стороне сети, v_{ds} – напряжение сети, R_s – сопротивление в сети.

Минимальные требования к току в звене постоянного тока для работы на стороне сети и на стороне генератора при изменяемой скорости ветра показаны на рис. 6.

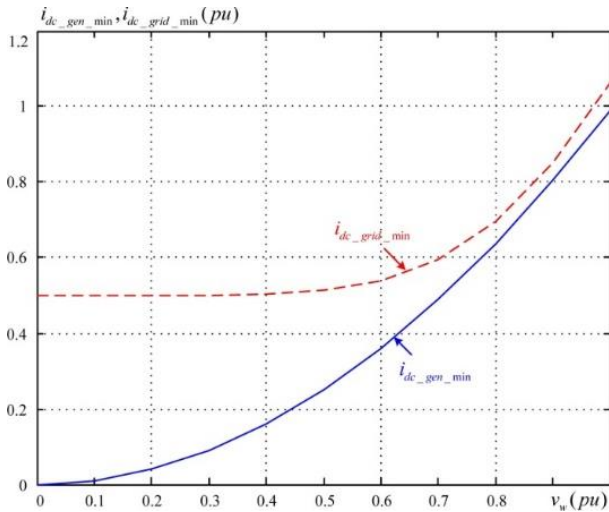


Рис. 6 - Требования к току в звене постоянного тока при изменении скорости ветра

Как можно видеть, во всем диапазоне скоростей ветра требования к величине тока в звене постоянного тока на стороне сети выше, чем на стороне генератора. Это обусловлено большим конденсатором фильтра, установленного на стороне сети, который генерирует большое количество реактивной мощности, и требует полной компенсации при помощи преобразователя, для поддержания коэффициента мощности, равным единице.

Величина емкости конденсатора фильтра также влияет на диапазон регулирования реактивной мощности. рис. 7. показывает влияние емкости конденсатора на максимально возможную подаваемую в сеть реактивную мощность [4]. Емкость конденсатора C_i выражена в относительных единицах (pu).

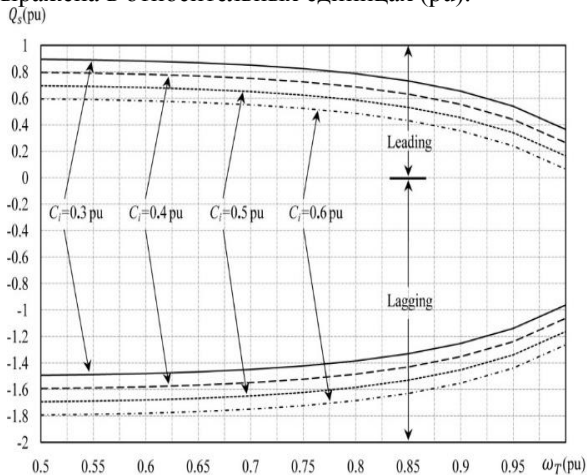


Рис. 7 - Эффект емкости на максимально подаваемую реактивную мощность

Отсюда можно сделать вывод, что уменьшение емкости конденсатора фильтра уменьшает потери в преобразователе и снижает перекося при регулировании реактивной мощности.

3.2.2. Влияние на управление преобразователем на стороне сети

При прямоугольной системе координат dq , вращающейся с синхронной скоростью, и с осью d , совпадающей по направлению с вектором напряжения сети, активная P_o и реактивная Q_o мощности могут управляться независимо друг от друга соответственно при помощи составляющей тока сети по оси d i_{sd} и по оси q i_{sq} [6]:

$$i_{sd} = \frac{P_o}{1,5v_{sd}}; \quad (4)$$

$$i_{sq} = -\frac{Q_o}{1,5v_{sd}}. \quad (5)$$

Но на общий ток преобразователя на стороне сети оказывает влияние ток, потребляемый конденсаторами. Общий выходной ток преобразователя i_{wi} равен сумме тока сети i_s и тока конденсаторов i_{ci} :

$$i_{wid} = i_{cid} + i_{sd} = (1 - \omega_s^2 L_s C_i) i_{sd} - \omega_s R_s C_i i_{sq} - \omega_s C_i v_{sq}; \quad (6)$$

$$i_{wiq} = i_{ciq} + i_{sq} = \omega_s R_s C_i i_{sd} + (1 - \omega_s^2 L_s C_i) i_{sq} + \omega_s C_i v_{sd}. \quad (7)$$

Обозначения, как в формуле (3).

Поэтому для управления реактивной мощностью в контроллер нужно вводить составляющую $\omega_s C_i v_{sd}$ для компенсации тока конденсатора [6]. Аналогично на регулирование активной мощности влияет составляющая $\omega_s C_i v_{sq}$. Уменьшение величины емкости конденсатора фильтра на стороне сети снижает влияние его токов на управление системой, упрощает ее, и делает максимально близкой к простому управлению активной и реактивной мощностью для АИТ на основе формул (4) и (5).

Таким образом, увеличение частоты коммутаций АИТ и соответствующее снижение индуктивности дросселя в звене постоянного тока и емкости конденсатора фильтра на стороне сети улучшают быстродействие и динамические характеристики системы, уменьшают массу и габариты реакторного оборудования, уменьшают величину тока в звене постоянного тока и соответствующие потери, снижают перекося в регулировании реактивной мощности в сети и упрощают структуру системы управления.

4. Силовые полупроводниковые приборы для АИТ

В АИТ ток протекает в одном направлении, но напряжения могут принимать обе полярности [10]. Поэтому для АИТ нужны силовые приборы, которые способны блокировать напряжение, как в прямом, так и в обратном направлении. АИТ, описанные в [6] – [8], рассчитаны на использование симметричных тиристоров, коммутируемых затвором (Symmetric Gate-Commutated Thyristor (SGCT)). Несмотря на ряд преимуществ по сравнению с ранее применявшимися

приборами, SGCT позволяют частоту коммутаций 420 – 520 Гц [10].

В связи с развитием технологий биполярных транзисторов с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)), в больших объемах, используемых в силовой электронике, появилась новая модификация – IGBT с обратной блокирующей способностью (Reverse Blocking IGBT (RB-IGBT)) [11]. RB-IGBT имеют характеристики симметричного блокирующего напряжения. Это означает, что он может блокировать как прямое, так и обратное напряжение в своем выключенном состоянии. В результате может быть упрощен двухсторонний коммутационный элемент, так как устраняются диоды, последовательно соединенные с обычным IGBT.

RB-IGBT подобен обычному IGBT за исключением того, что имеет стену коллектора с глубокой диффузией, окружающую активную площадь чипа (рис. 8).

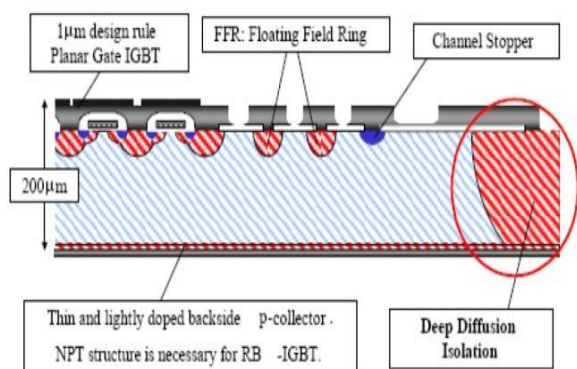


Рис. 8 – Структура чипа RB-IGBT

Эта изоляция коллектора позволяет блокировать обратное напряжение. Изоляция создается, используя специальный процесс, рассчитанный поддерживать высокое напряжение пробоя и стабильные характеристики тока утечки при повышенных температурах.

Однако результирующий внутренний диод имеет худшее поведение при коммутации, чем стандартный диод с быстрым восстановлением (fast-recovery diode) [12].

Это создает проблему коммутации при перекрытии (overlapping), когда ток нагрузки принудительно коммутируется из выключаемого RB-IGBT к включаемому RB-IGBT. При этих условиях включенный прибор уже включен, в то время как выключаемый RB-IGBT все еще включен. На выключаемом RB-IGBT будет происходить обратное восстановление и пиковое значение тока обратного восстановления и время выключения будут зависеть от поведения внутреннего диода при коммутации прибора RB-IGBT. Количество носителей заряда в переходе и его емкость, di/dt тока через выключаемый ключ влияют на ток обратного восстановления и время коммутации.

Однако для АИТ дроссель в звене постоянного тока обеспечивает практически постоянное значение тока в звене постоянного тока и, следовательно, суммарного тока через включаемый и выключаемый RB-IGBT. RB-IGBT обеспечивают намного меньшие времена включения-выключения, чем SGCT, и поэтому позволяют значительно большую частоту коммутаций.

Поэтому с развитием технологии RB-IGBT появляются возможности для практического применения АИТ для ветроэнергетики.

5. Конструктивное размещение преобразователей на основе АИТ

Как было указано в 2.2, преобразователи на основе АИТ размещают в гондоле, в неблагоприятных условиях эксплуатации. Применяемое жидкостное охлаждение преобразователя позволяет охлаждать силовые полупроводниковые приборы, но для остальных частей, например силовых шин, все равно используется внутреннее воздушное охлаждение, тепло от которого трудно вывести наружу. Выведенное из преобразователя тепло затем охлаждают при помощи теплообменника жидкость-воздух, расположенного вне помещения гондолы.

Для преобразователей на основе АИТ нет ограничений на расстояние между ним и электрической машиной (генератором). Поэтому такие преобразователи можно размещать в более комфортных условиях, например на нижних платформах башни. Преобразователи выполняются с воздушным охлаждением, позволяющим охлаждать не только СПП, но другие тепловыделяющие элементы. Для вывода тепла и поддержания комфортных температур на платформе башни предлагается система климат контроля на основе воздушного кондиционирования. Таким образом, создаются наиболее благоприятные условия не только для работы оборудования, но и для обслуживающего персонала. Это повышает общую надежность работы ВЭУ.

Обсуждение результатов

Одним из наиболее практичных и надежных вариантов ветроэнергетических установок представляются ВЭУ на основе асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором. Использование АИТ для ВЭУ дает ряд преимуществ, как со стороны сети, так и со стороны генератора, и в целом позволяет повысить надежность работы оборудования. Использование RB-IGBT открывает возможности для практического применения преобразователей на основе АИТ для ветроэнергетики.

Выводы

Использование RB-IGBT открывает возможности для практического применения преобразователей на основе АИТ для ветроэнергетики.

Список литературы/ References

1. **T. Ackermann.** Wind Power in Power Systems. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. *John Wiley & Sons*, 2005.
2. **ENERGINET.DK.** Technical regulation 3.2.5 for wind power plants above 11 kW. Approved 22.07.2016.
3. **KRESSE.** Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) . Förderkennzeichen: 0325324. Projektleitung Dr. Peter Viebahn . *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie*. Wuppertal. Deutschland. 19.12.2014.
4. **Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu.** Power converters for wind turbines: Current and future development. Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments (A. Méndez-Vilas, Ed.). *Centre for Electrical Machines and Power Electronics, University of Technology Sydney*. Australia. 2013.
5. **Tennet TSO GmbH.** Grid Code - High and extra high voltage -. Status: 1st November 2015.
6. **Jingya Dai.** Current source converters for megawatt wind energy conversion systems. *A dissertation presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the program of Electrical and Computer Engineering*. Toronto, Ontario, Canada, 2010.
7. **Miteshkumar Nandlal Popat.** Current Source Converter Based Offshore Wind Farm: Configuration and Control. *A dissertation presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the program of Electrical and Computer Engineering*. Toronto, Ontario, Canada, 2013.
8. **Xiatian Tan.** A novel configuration and control of CSI wind energy system with diode rectifier and buck converter. *A thesis presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science in the Program of Electrical and Computer Engineering*. Toronto, Ontario, Canada, 2011.
9. **M. Mohr, M. Bierhoff, F.W. Fuchs.** Dimensioning of a Current Source Inverter for the Feed-in of Electrical Energy from Fuel Cells to the Mains. *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Chair for Power Electronics and Electrical Drives*. Kiel, Germany. 2004.
10. **Navid R. Zargari, Steven C. Rizzo, Yuan Xiao, Hideo Iwamoto, Katsumi Satoh, John F. Donlon.** A New Current-Source Converter Using a Symmetric Gate-Commutated Thyristor (SGCT). *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 3, May/June 2001*.
11. **Dejan Schriber.** New power semiconductor technology for renewable energy sources applications. Презентация SEMIKRON. Sevilla. Mai 12.2005.
12. **Christian Klumpner, Frede Blaabjerg.** Using Reverse-Blocking IGBTs in Power Converters for Adjustable-Speed Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 3, May/June 2006*.

Сведения об авторах (About authors)

Бару Александр Юрьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, технический директор НПП «ЭОС», г. Харьков, Украина
Alexandr Baru – Candidate of Technical Science (Ph. D), Senior Staff Scientist, Technical Director of SPE EOS, Kharkiv, Ukraine

Педан Евгений Аркадьевич – зам. директора по ВЭД НПП «ЭОС», г. Харьков, Украина e-mail: eugen@eosltd.com.ua
Eugene Pedan – Deputy Director on Foreign Economic Activities of SPE EOS, Kharkiv, Ukraine

Ус Андрей Олегович - ведущий инженер НПП «ЭОС», г. Харьков, Украина
Andrew Us - Leading Engineer of SPE EOS, Kharkiv, Ukraine

Филатов Владислав Васильевич – главный конструктор НПП «ЭОС», г. Харьков, Украина
Vladislav Filatov - Chief Designer of SPE EOS, Kharkiv, Ukraine

Шинднес Юрий Львович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор НПП «ЭОС», г. Харьков
Yury Shindnes – Candidate of Technical Science (Ph. D), Senior Staff Scientist, Director of SPE EOS, Kharkiv, Ukraine

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бару, А. Ю. Перспективы применения преобразователей частоты на основе автономных инверторов тока для ветроэнергетики / **А. Ю. Бару, Е. А. Педан, А. О. Ус, В. В. Филатов, Ю. Л. Шинднес** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 65-71. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.09.

Please cite this article as:

Pedan, E., Baru, A., Us, A., Filatov, V., Shindnes, Y. Perspectives of Application of Frequency Converters on the Base of Current Source Inverters for Wind Power. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 65-71, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.09.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бару, О. Ю. Перспективи застосування перетворювачів частоти на основі автономних інверторів струму для вітроенергетики / **О. Ю. Бару, Е. А. Педан, А. О. Ус, В. В. Филатов, Ю. Л. Шинднес** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 65-71. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.09.

АНОТАЦІЯ. Наведений аналіз тенденцій у вітроенергетиці у світі і в Україні. Наведена порівняльна характеристика основних видів вітроенергетичних установок. Наведена порівняльна характеристика перетворювачів частоти на основі автономних інверторів напруги та автономних інверторів струму для вітроенергетичних установок. Наведений аналіз існуючих технічних рішень на основі автономних інверторів струму та запропоновані засоби по їх удосконаленню. Наведено порівняння силових напівпровідникових приборів для інверторів струму та запропоновані конструктивні рішення по розміщенню перетворювачів у вітряній турбіні.

Ключові слова: вітроенергетична установка; перетворювачі частоти; автономний інвертор струму; SGCT; RB-IGBT

Надійшла (received) 25.07.2019