УДК 621.314.26

ОБЗОР МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ ТОКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Мальнев Алексей Иванович,
аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: malnev54@yandex.ru

Баховцев Игорь Анатольевич,
канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: igor_55@ngs.ru

Зиновьев Геннадий Степанович,
д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: genstep@mail.ru

Обзор посвящен однофазным и трехфазным многоуровневым инверторам тока для ветроэнергетических станций. Обзор выполнен в основном по материалам зарубежной печати. Во введении дается краткое обоснование актуальности использования многоуровневых инверторов в ветроэнергетических установках, а также сравнение автономных инверторов тока и напряжения. Перечислены достоинства инвертора тока и области его применения. Далее рассматриваются однофазные варианты. Такие топологии просты в реализации и понимании процесса формирования уровней выходного тока. Для них определяется базовая топология, на основании которой для некоторых топологий приводятся сравнительные характеристики по числу силовых элементов и системам управления. Отдельное внимание уделяется топологиям с уменьшенным числом силовых ключей. Кроме того, акцентируется внимание на однофазных многоуровневых инверторах тока, построенных с использованием неизолированных ключей. Рассмотрены особенности их управления, достоинства и недостатки. Применительно к трехфазным многоуровневым автономным инверторам тока также определяется базовая топология. Описываются два метода преобразования трехфазных схем при использовании принципа дуальности инверторов тока и напряжения и несколько топологий трехфазных многоуровневых инверторов тока, полученных с использованием данного принципа. В статье говорится о проблеме баланса токов в многоуровневых инверторах тока в отдельных каскадах и о принципах его реализации. Эта проблема аналогична проблеме баланса напряжений в многоуровневых инверторах напряжения. Приводятся трехфазные топологии, которые формируются из однофазных ячеек. Это актуально для мощных преобразователей. Рассмотрен новый класс многоуровневых топологий автономных инверторов тока, который называется квази-многоуровневые топологии. Описываются особенности их работы и достоинства. Для каждой из описанных в статье топологий приводится краткое описание способа управления. В конце статьи по итогам проведенного обзора предложена классификация различных топологий многоуровневых автономных инверторов тока с использованием нескольких критериев.

Ключевые слова:
Ветроэнергетическая станция, автономный инвертор тока, многоуровневый автономный инвертор тока, система управления, способ управления, принцип дуальности, квази-многоуровневые топологии, классификация топологий автономных инверторов тока.

Введение

Наиболее перспективными источниками возобновляемой энергии на сегодняшний день являются ветроэнергетика и солнечная энергия [1]. Причем первая характеризуется более быстрыми темпами развития и освоения генерируемых мощностей [1, 2]. Одной из областей техники, где проблема наращивания мощности особенно актуальна, является именно ветроэнергетика. В соответствии с европейскими стандартами к энергосистеме не может быть подключен генератор мощностью менее 1 МВт, а лучше, с целью снижения стоимости 1 кВт/ч ветроэнергии, 5–10 МВт [2].

Увеличение мощности неизбежно приводит к одновременному повышению напряжения сети, что обусловлено необходимостью снижения токовых нагрузок на линии электропередачи. Поэтому в современных ветроэнергетических станциях вместо низковольтного диапазона напряжений *LV* (*Low Voltage*) используется диапазон средних и высоких напряжений *MV* (*Medium Voltage*). По мнению специалистов компании SEMIKRON, в этом диапазоне напряжений, как с экономической, так и технической точек зрения, целесообразнее использовать многоуровневые топологии *dc-ac* преобразователей (инверторов) на базе силовых ключей с рабочим напряжением 1700 В [1, 2].

За всю историю силовой и преобразовательной техники было разработано и сконструировано множество различных по функциональности и областям применения автономных инверторов электрической энергии. Но всё это многообразие можно разделить на две группы: инверторы напряжения и инверторы тока.

Оптимальные массогабаритные показатели, низкая стоимость и простота реализации автономных инверторов напряжения (АИН) сделали их широко распространенными. В настоящее время

АИН находят применение во всех областях промышленности и техники. Так дело обстоит только для малых и средних мощностей до 1 МВт. Дело в том, что основной недостаток АИН – это высокое содержание гармоник высшего порядка в выходном напряжении и входном токе [3]. Для мощного электропривода необходимо применять различные фильтрующие устройства, которые подчас дороже и больше самого преобразователя.

Автономные инверторы тока (АИТ) характеризуются большими массогабаритными показателями, нежели АИН, ввиду наличия дросселя с большой индуктивностью в звене постоянного тока. Но у АИТ существуют и несомненные достоинства.

В статье [4] приведен сравнительный анализ АИТ и АИН. Можно выделить следующие основные преимущества АИТ перед АИН:

- на входе АИН установлен энергоёмкий емкостной фильтр, разряд которого при возможных нарушениях в работе инвертора приводит к закорачиванию звена постоянного тока и выходу из строя полупроводниковых ключей. Из-за частых отказов в динамических режимах конденсаторов само наличие фильтра снижает надежность АИН [5];
- в составе АИТ отсутствует относительно сложный реверсивный выпрямитель с раздельным управлением, наличие которого в АИН принципиально необходимо для обеспечения режима рекуперативного торможения асинхронного двигателя.

На основании анализа, представленного в [4], можно сделать вывод, что преобразователи тока обладают большей надежностью, нежели преобразователи напряжения. Несмотря на то, что технические возможности АИН шире, там, где применение АИТ возможно, должны использоваться именно они.

Данный обзор посвящен топологиям многоуровневых автономных инверторов тока, как однофазным, так и трехфазным. Проведенный авторами анализ показывает, что подобного рода статьи, за исключением работы [6], посвященной многоуровневым АИН, в отечественной технической литературе отсутствуют. Этот факт делает актуальным настоящий обзор на фоне всевозрастающего интереса к высокомощным многоуровневым топологиям автономных инверторов и проблемам электромагнитной совместимости мощных преобразователей [7].

Классическая топология однофазного многоуровневого автономного инвертора тока

Вначале необходимо определиться с базовой схемой, относительно которой будут выноситься некоторые заключения о рассматриваемых в дальнейшем топологиях. Это необходимо для проведения краткого сравнительного анализа между рассматриваемыми топологиями однофазных многоуровневых (МУ) АИТ. В настоящее время к подобным топологиям проявляется повышенный интерес. В первую очередь это связано с возможностью построения на их основе каскадных МУ-преобразователей [8], а также с возможностью разделения мощности по фазам для трехфазного электропривода, что особенно актуально при больших мощностях преобразуемой энергии [9, 10].

Опираясь на принцип дуальности инверторов напряжения и тока [11, 12], в качестве классической топологии однофазного МУ АИТ целесообразно выбрать схему, которая в трехуровневом варианте представлена на рис. 1, *а* и описана подробно в статье [12]. Здесь и далее используются рисунки из оригинальных статей. Если убрать токоразделяющие индуктивности L_P и L_N и добавить еще один источник постоянного тока, то получится более понятная и известная топология: две мостовые схемы АИТ, работающие параллельно на общую нагрузку (рис. 1, *б*).

По образу данной схемы можно создавать более сложные многоуровневые структуры. Несложно заметить, что для классической топологии справедливо следующее: для формирования n уровней выходного тока необходимо использовать $4(n-1)$ силовых ключей и $2(n-2)$ токоразделяющих индуктивностей. Например, схема трехуровневого АИТ будет содержать 8 ключей и 2 индуктивности, а схема четырехуровневого АИТ – 12 ключей и 4 индуктивности.

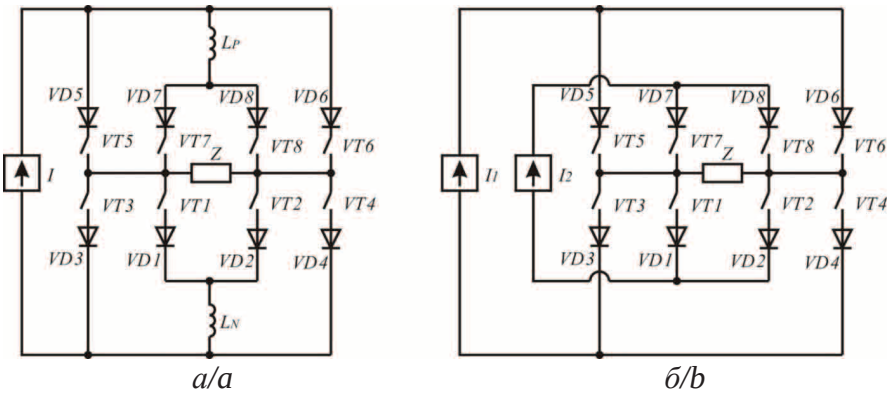


Рис. 1. *Классическая (базовая) топология трехуровневого однофазного АИТ*

Fig. 1. *Classical (basic) topology of three-level one-phase current source converter (CSC)*

В качестве алгоритма управления для базовой схемы (рис. 1, *б*) можно выбрать скалярную синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (СШИМ). Опорные сигналы для разных групп ключей (относящиеся к источнику тока I_1 и I_1) следует сдвинуть на соответствующий угол (для трехуровневой схемы это половина периода) для получения явно выраженной многоуровневой кривой тока в нагрузке [13].

Для схемы с токоразделяющими индуктивностями алгоритм так же основан на СШИМ, но с некоторым усложнением. Здесь необходимо следить за симметричностью амплитуды токов, протекающих через «внешние» (VT_3, VT_5, VT_6 и VT_4) и «внутренние» (VT_7, VT_1, VT_8 и VT_2) транзисторы [14].

Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с уменьшенным числом ключей

Вариант 1

Авторами работы [15] была предложена новая топология МУ АИТ с уменьшенным числом силовых ключей. Данная топология уже содержит n+3 силовых ключей и n–1 токоразделяющих индуктивностей для формирования n уровней выходного тока.

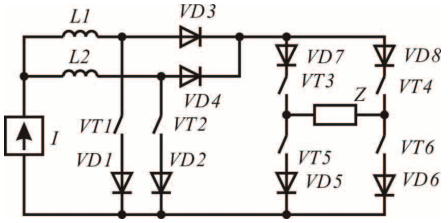


Рис. 2. *Трехуровневый АИТ с уменьшенным числом силовых ключей (вариант 1)*

Fig. 2. *Three-level CSC with reduced number of power tongs (version 1)*

Например, схема трехуровневого АИТ (рис. 2) будет содержать 6 силовых ключей и 2 токоразделяющие индуктивности, а схема четырехуровневого АИТ – 7 ключей и 3 индуктивности. Очевидна выгода в сравнении с базовой топологией.

К преимуществам данной топологии можно отнести следующее:

1) минимальное число силовых ключей на дополнительный уровень выходного тока;
2) при должном алгоритме управления функцию источника постоянного тока может выполнять следующая цепочка (DC-DC понижающий преобразователь со стабилизацией выходного тока): $L_1VT_1VD_1VD_3$ для первого канала и соответственно $L_2VT_2VD_2VD_4$ для второго канала. Это обстоятельство позволяет подключать преобразователь напрямую к источнику постоянного напряжения без каких-либо дополнительных устройств и элементов (в настоящей статье рассмотрено не будет).

Самым простым в реализации алгоритмом управления для данной схемы будет следующее сочетание:

- транзисторы выходного моста задают полярность тока, протекающего в нагрузке (частота коммутации равна полупериоду частоты тока в нагрузке);
- входные транзисторы, диоды и дроссели формируют ШИМ кривую каждого полупериода тока нагрузки (частота коммутации соответствует частоте опорного сигнала).

Но в этом случае схема корректно работает только на активную нагрузку [15, 16].

Вариант 2

В работе [16] была предложена другая топология однофазного МУ АИТ с уменьшенным числом силовых ключей. Схема трехуровневого АИТ приведена на рис. 3. Данная топология аналогична классической (рис. 1, *б*), если две мостовые схемы объединить катодными группами (VT_3VD_3 и VT_1VD_1, VT_2VD_2 и VT_4VD_4) и исключить параллельные элементы. Это приводит к усложнению алгоритма управления, но снижает количество силовых ключей.

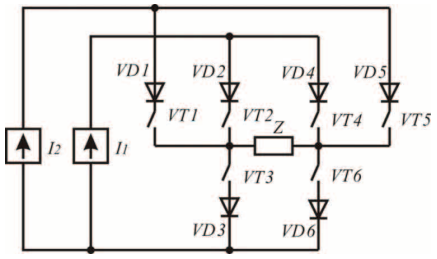


Рис. 3. *Трехуровневый АИТ с уменьшенным числом силовых ключей (вариант 2)*

Fig. 3. *Three-level CSC with reduced number of power tongs (version 2)*

Данная топология содержит 2n силовых ключей и n–1 источников постоянного тока для формирования n уровней выходного тока. Например, схема трехуровневого АИТ будет содержать 6 силовых ключей и 2 источника тока, а схема четырехуровневого АИТ – 8 силовых ключей и 3 источника тока. Очевидна выгода (по количеству силовых элементов) в сравнении с классической топологией.

В качестве алгоритма управления для данной топологии можно использовать СШИМ с модифицированными импульсами управления [16].

В отличие от предыдущей топологии здесь нагрузка может быть любой.

К преимуществам данной топологии можно отнести следующее:

1) уменьшенное число ключей на дополнительный уровень выходного тока;
2) простота в построении алгоритма управления (скалярная СШИМ);
3) корректная работа на нагрузку любого характера.

Следует упомянуть о возможности анализа данной схемы на основании принципа дуальности инверторов тока и напряжения. В монографии [17] приведена топология многоуровневого однофазно-

го автономного инвертора напряжения (рис. 4), которая подходит для подобного анализа совместно с описанной выше топологией МУ АИТ.

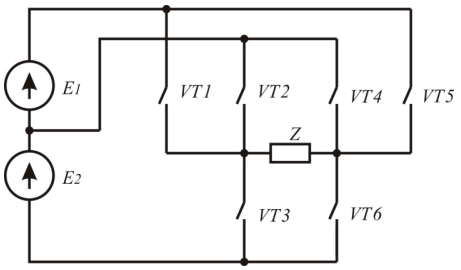


Рис. 4. *Топология однофазного многоуровневого инвертора напряжения*

Fig. 4. *Topology of one-phase multi-level voltage inverter*

Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с неизолированными ключами

На рис. 5, *а* приведена топология двухуровневого АИТ [18]. Все силовые ключи (Q_1–Q_4) подсоединены эмиттерами в общую точку. Это существенно упрощает создание и подключение управляющей системы, нет необходимости изолировать драйверы ключей один от другого в одной стойке.

На рис. 5, *б* приведена базовая топология двухуровневой ячейки АИТ, ключи которой (Q_5, Q_6) также эмиттерами подключены к одной точке.

Авторами работы [19] предложена новая схема МУ АИТ. Она формируется посредством соединения основной схемы двухуровневого АИТ с одной или несколькими ячейками АИТ, создающими 2 уровня выходного тока. Эти блоки развязаны диодами, как показано на рис. 6.

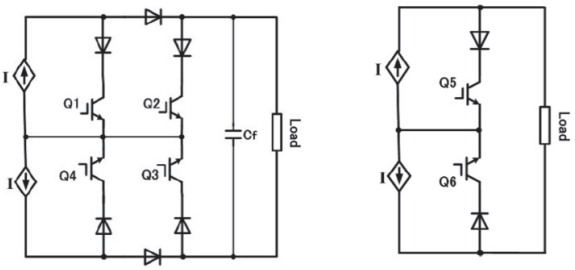


Рис. 5. *Основная схема двухуровневого однофазного АИТ с неизолированными ключами (а) и базовая топология двухуровневой ячейки (б)*

Fig. 5. *Basic circuit of two-level one-phase CSC with non-insulated keys (a) and base topology of two-level cell (b)*

Уникальной данную топологию делает следующий момент: силовые ключи соединяются эмиттерами в общей точке. Зависимость между числом уровней выходного тока АИТ и количеством ячеек, создающих два уровня тока, может быть записана следующим образом:

$$M=3+2n,$$

где M – число уровней выходного тока, n – количество двухуровневых ячеек.

Главным недостатком данной топологии является удвоенное число источников тока в сравнении с классической топологией однофазного МУ АИТ, принятой за таковую в данном обзоре (п. 1), т. е. для увеличения уровней выходного тока с 3 до 5 необходимо использовать 6 источников тока против 3 для классической топологии.

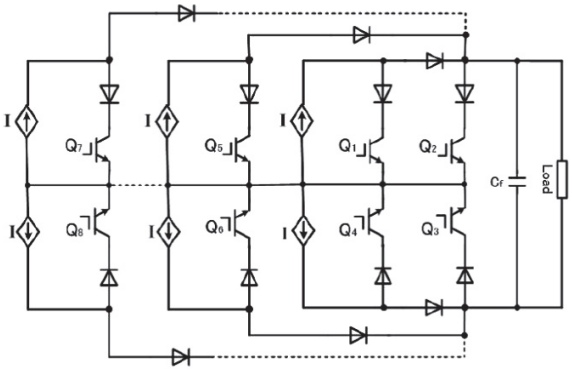


Рис. 6. *Обобщенная топология n-уровневого однофазного АИТ с неизолированными ключами*

Fig. 6. *Generalized topology of n-level one-phase CSC with non-insulated keys*

В качестве алгоритма управления можно использовать СШИМ со многими опорными сигналами: каждый опорный сигнал для своей двухуровневой ячейки.

Многоуровневый трехфазный автономный инвертор тока. Базовая топология

Напомним, что в качестве классической топологии для однофазных многоуровневых АИТ была выбрана схема, включающая две однофазные мостовые ячейки АИТ, работающие параллельно на общую нагрузку. Ее можно распространить и на трехфазный вариант, и в итоге получить классическую схему многоуровневого трехфазного АИТ [20], которая представлена на рис. 7.

В качестве алгоритма управления для (например) трехуровневого трехфазного АИТ (две трехфазные мостовые схемы) целесообразно выбрать пространственную векторную ШИМ (SVPWM), опорные сигналы для двух схем должны быть сдвинуты на 180° для достижения пятиуровневого тока в нагрузке [21].

СШИМ в классическом варианте для данной схемы неприменима. Необходимо выполнить несложные манипуляции с импульсами управления для того, чтобы они могли корректно управлять ключами схемы для получения ШИМ тока [13].

Топологии многоуровневого автономного инвертора тока, основанные на принципе дуальности

Доказано, что принцип дуальности – полезный инструмент в силовой электронике [11]. Дуальное преобразование может быть применено как для «плоских» силовых схем [22], т. е. для тех, которые могут быть нарисованы без пересечения проводников друг относительно друга, за исключени-

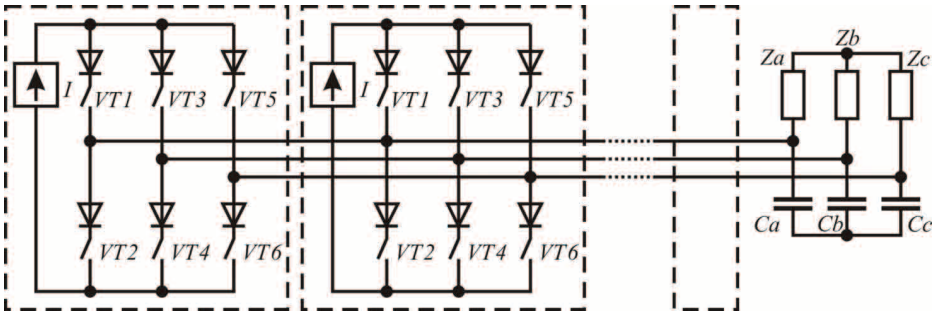


Рис. 7. *Схема многоуровневого трехфазного АИТ (классическая топология)*

Fig. 7. *Circuit of multilevel three-phase CSC (classical topology)*

ем мест соединений, так и для таких силовых схем, которые не могут быть преобразованы к плоскому виду [23]. В настоящем обзоре будет рассмотрен только первый случай, как наиболее простой.

Для того чтобы осуществить синтез схемы многоуровневого инвертора тока, используя известные знания о многоуровневом инверторе напряжения, необходимо определить оригинальные топологии трехфазного инвертора напряжения, представить их в плоском виде, а затем использовать теорию дуальности.

Ниже представлены два метода преобразования топологии к плоскому виду инвертора напряжения в плоском виде.

1. Метод, основанный на добавлении дополнительной стойки [22].

Из общепринятой топологии трехфазного шести-ключевого двухуровневого инвертора напряжения посредством добавления дополнительной стойки (ключ S_1^* последовательно с ключом S_4^*) и установления, что ключи S_1 и S_1^*, S_4 и S_4^* управляются одинаково, следует топология нового трехфазного двухуровневого инвертора напряжения в плоском виде, как показано на рис. 8, *а*. Следовательно, дуальное преобразование может быть непосредственно применено к получившейся схеме. На рис. 8, *б* приведена соответствующая схема инвертора тока.

2. Метод, основанный на добавлении дополнительного источника энергии [22].

Другой способ для получения схемы в плоском виде из традиционной топологии трехфазного шести-ключевого двухуровневого инвертора напряжения возможен посредством добавления дополнительного источника напряжения V_{dc2} в третью стойку (ключ S_5 включен последовательно с S_2). Модифицированная топология инвертора напряжения в плоском виде приведена на рис. 9, *а*. Аналогично легко получить соответствующую ей дуальную топологию посредством использования дуального преобразования. На рис. 9, *б* приведена дуальная схема двухуровневого инвертора тока.

Применяя два метода для построения плоской схемы, которые описаны выше, эквивалентная схема трехфазного инвертора напряжения в плоском виде может быть получена из традиционной топологии трехфазного шестиключевого двухуровневого инвертора напряжения. Это позволяет напрямую применить для инверторов тока все изобилие существующих знаний о законах модуляции для инверторов напряжения. Однако, с точки зрения практичности, способ подсоединения трехфазной нагрузки в дуальной схеме на рис. 8, *б* встречается очень редко в сравнении со схемой на рис. 9, *б*. Следовательно, метод, основанный на добавлении дополнительного источника электрической энер-

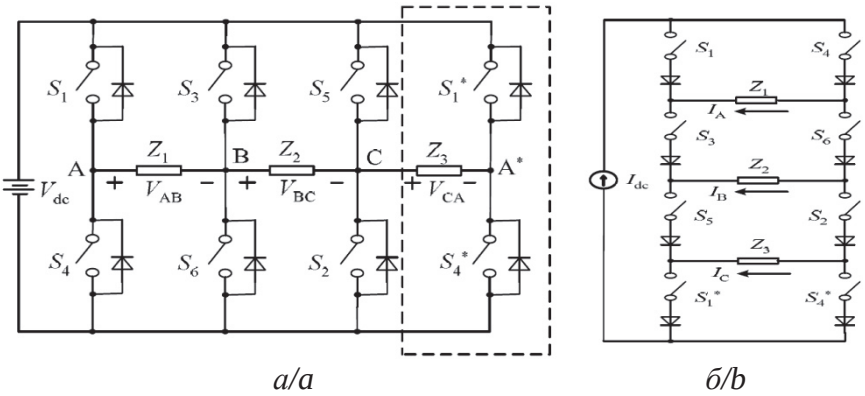


Рис. 8. *Двухуровневый инвертор напряжения (а) с четырьмя стойками и двухуровневый инвертор тока (дуальная схема, б)*

Fig. 8. *Two-level voltage inverter (a) with four props and two-level current inverter (dual circuit, b)*

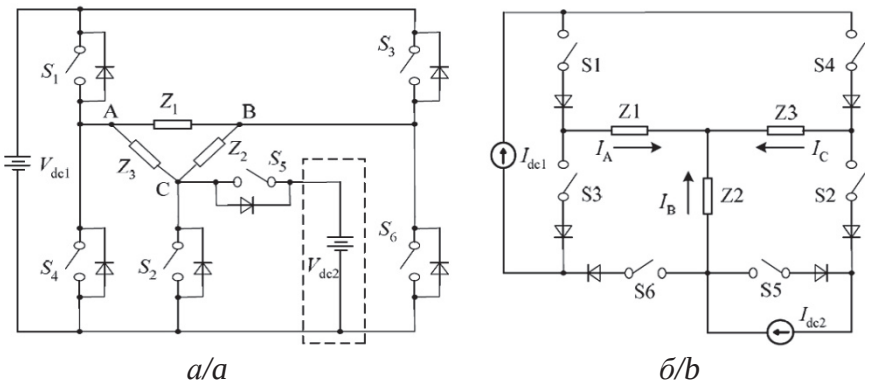


Рис. 9. *Двухуровневый инвертор напряжения с двумя источниками напряжения (а), дуальная схема инвертора тока (б)*

Fig. 9. *Two-level voltage inverter with two voltage sources (a), dual circuit of current inverter (b)*

гии, более привлекательный и его можно модифицировать, чтобы применять к трехфазным многоуровневым инверторам напряжения [22].

Для каскадного многоуровневого автономного инвертора напряжения (МУ АИН) на Н-мостах и МУ АИН с фиксирующими диодами, в силу особенностей структуры их схемы, очень сложно получить эквивалентную топологию, используя дополнительную стойку или источник электрической энергии. Однако для схемы МУ АИН с плавающими конденсаторами, посредством добавления источника напряжения в третью стойку, можно получить трехфазную эквивалентную схему в плоском виде. На рис. 10 приведена усовершенствованная схема трехуровневого инвертора напряжения с плавающими конденсаторами в плоском виде [22]. Дуальное преобразование может быть напрямую применено к данной схеме. На рис. 11 приведена соответствующая дуальная схема трехфазного трехуровневого инвертора тока.

В данной схеме ключи двухсторонней проводимости преобразованы в ключи односторонней проводимости. В соответствии с принципом дуальности в каждой фазе имеются две пары дополнительных ключей – (S_{x2},S_{x3}), (S_{x1},S_{x4}), $(x=a,b,c)$. Источник постоянного тока $2I_{dc}$ поровну делится разделительными индуктивностями L_y $(y=a,b,c)$ так, что ток через каждую индуктивность равен I_{dc}. К тому же соединения в схеме в каждой фазе подобны соединениям в однофазном трехуровневом инверторе тока [12].

Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с автоматически регулируемым током

Несмотря на все особенности топологий многоуровневых АИТ, общим спорным вопросом для этих инверторов является следующее: как эффективно управлять амплитудой промежуточного уровня постоянного тока (токи через токоразделяющие индуктивности) [14]. Без контроля баланса ток не может оставаться на постоянном уровне. Подобная проблема существует для промежуточного уровня постоянного напряжения в трехуровневом инверторе напряжения с фиксированной ну-

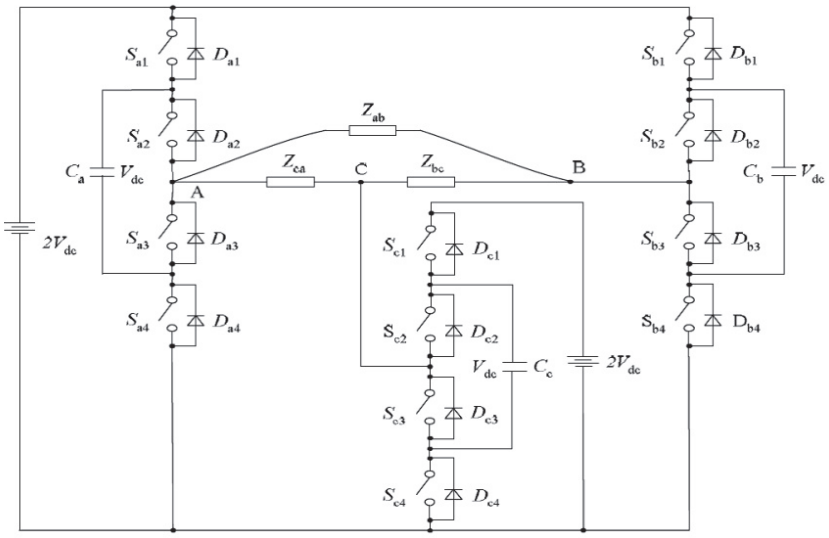


Рис. 10. *Усовершенствованная схема трехуровневого инвертора напряжения с плавающими конденсаторами (в плоском виде)*

Fig. 10. *The advanced circuit of three-level voltage inverter with floating capacitors (flat form)*

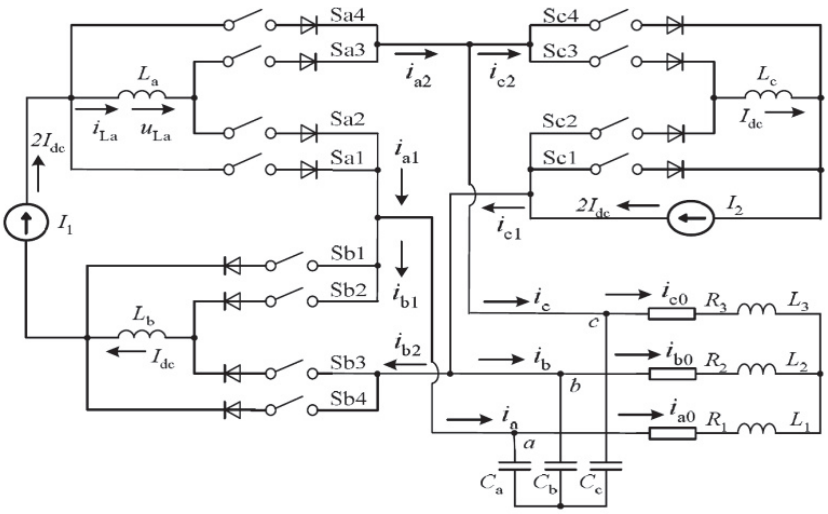


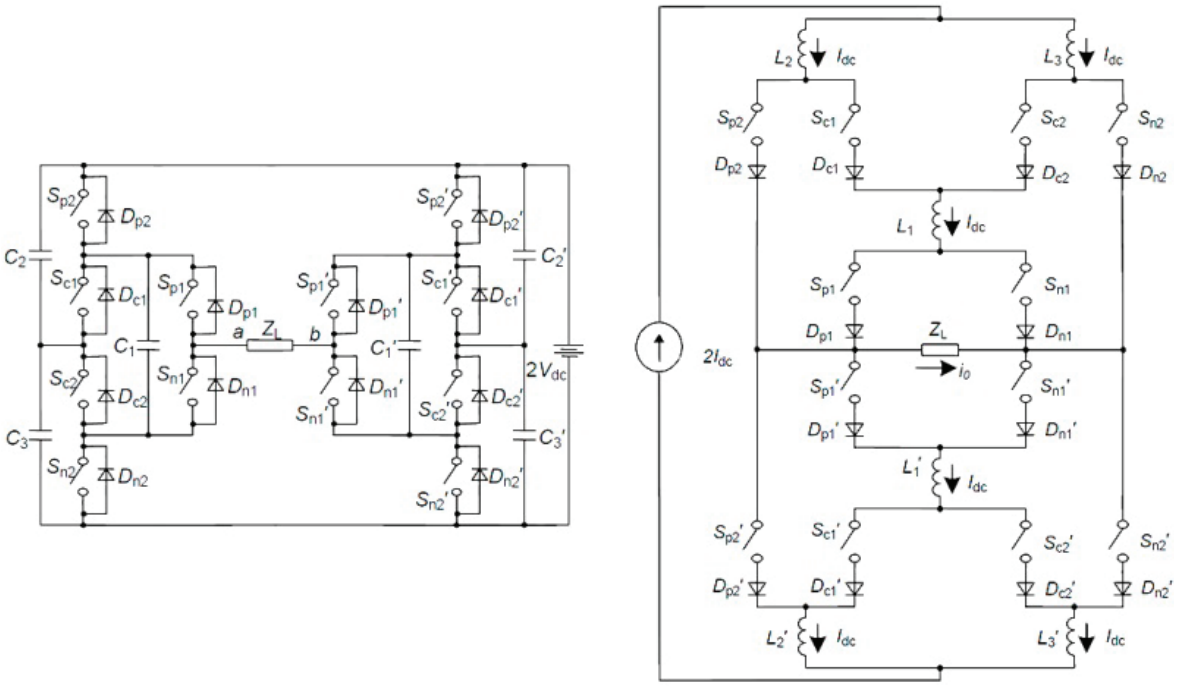
Рис. 11. *Трехфазный трехуровневый инвертор тока (дуальная схема)*

Fig. 11. *Three-phase three-level current inverter (dual circuit)*

левой точкой (*NPC*), если не введено алгоритмов компенсации.

На рис. 12, *а* приведена обобщенная схема однофазного трехуровневого АИН в плоском виде, поэтому дуальное преобразование может быть применено к данной схеме. Соответствующая дуальная структура, называемая обобщенной структурой однофазного трехуровневого АИТ, приведена на рис. 12, *б*. Здесь ключи и параллельные диоды преобразуются в ключи с последовательным диодом – ключи односторонней проводимости. Разделительные индуктивности, выступающие в качестве источников тока, являются дуальным аналогом фиксирующих конденсаторов.

Для достижения характерной формы многоуровневого тока на выходе инвертора токи, протекающие через все разделительные индуктивности, должны быть выровнены. В обобщенном МУ АИН все уровни напряжений должны быть выровнены благодаря фиксирующим ключам и диодам. Согласно дуальности, в обобщенном МУ АИТ все уровни токов должны быть выровнены благодаря



а/*a* *б*/*b*

Рис. 12. *Обобщенная топология однофазного трехуровневого инвертора напряжения (а) и инвертора тока (б)*

Fig. 12. *Generalized topology of one-phase three-level voltage inverter (a) and current inverter (b)*

токоразделительным переключениям, т. е. используя избыточные состояния. Следовательно, механизм выравнивания токов в индуктивностях подобен выравниванию напряжений на конденсаторах в инверторе напряжения [14].

Трехуровневый автономный инвертор тока на базе однофазных топологий

В работе [24] представлена обобщенная топология *n*-уровневого АИТ и проведен анализ на примере восьми-ключевого трехуровневого АИТ. На основе этой топологии авторы работы [25] предложили топологию шести-ключевого однофазного трехуровневого АИТ, которая приведена на рис. 13.

К преимуществам данного подхода стоит отнести существенное упрощение схемотехники источника тока. В некоторых случаях, например для высокомощных областей применения, это очень важный момент. На основе топологии шести-ключевого однофазного трехуровневого АИТ могут быть созданы два вида топологи трехфазного трехуровневого АИТ: с нулевым проводом (соединение нагрузки звезда с нулем – рис. 14, *а*) и без нулевого провода (рис. 14, *б*) [26].

Наиболее подходящим алгоритмом управления для каждой однофазной трехуровневой ячейки является метод *POD-PWM* (*Phase opposition disposition PWM* – ШИМ с противофазным положением опорных сигналов – выше и ниже нуля) [27]. Рис. 15 поясняет процесс формирования импульсов управления для одной фазы: модулирующий сигнал W_m сравнивается с 4-мя опорными сигналами WC_1–WC_4.

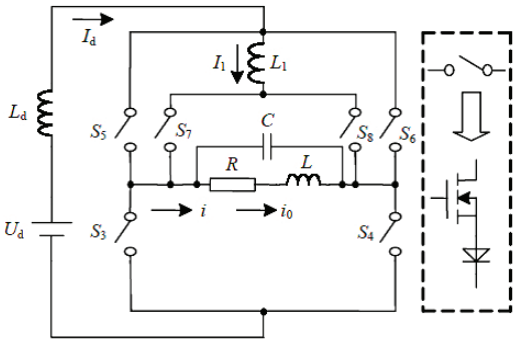


Рис. 13. *Шести-ключевой однофазный трехуровневый АИТ*

Fig. 13. *Six-keys one-phase three-level CSC*

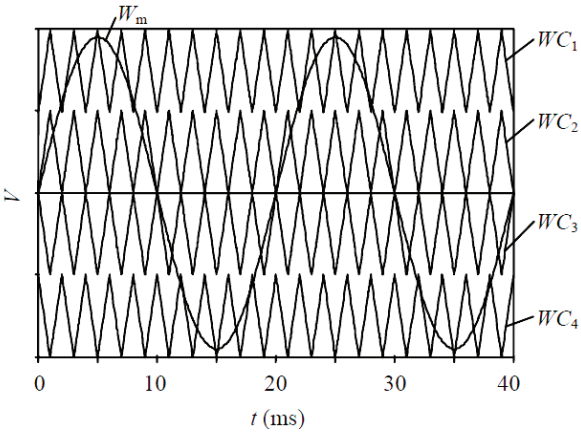
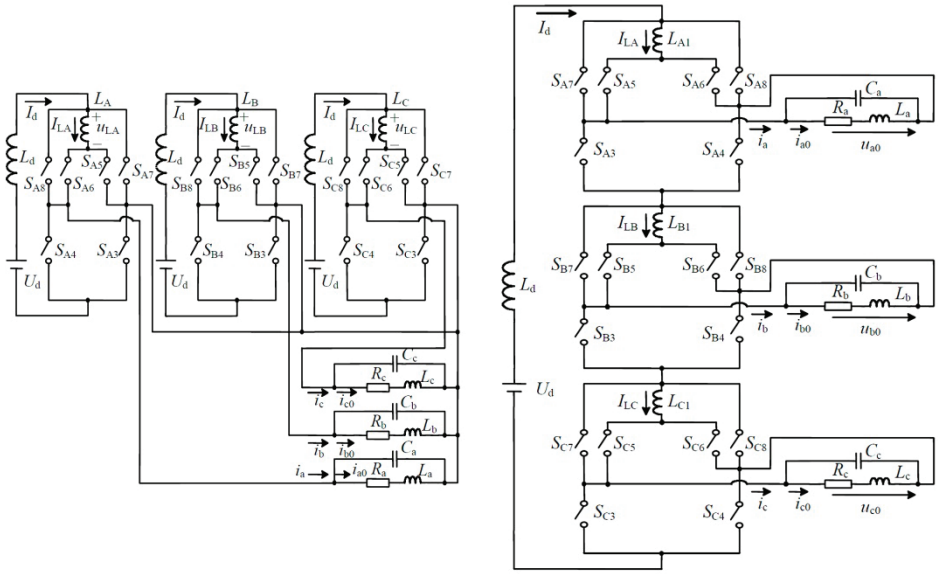


Рис. 15. *Пояснения к методу POD-PWM*

Fig. 15. *Explanation to the method POD-PWM*



а/a *б/b*

Рис. 14. *Силовая схема трехфазного трехуровневого АИТ (разделение по типу соединения обмоток асинхронного двигателя): звезда с нулем (а) и электрически несвязанные фазные обмотки (б)*

Fig. 14. *Power circuit of three-phase three-level CSC (induction motor winding connection separation): star with zero (a) and electrically uncoupled phase windings (b)*

Как было упомянуто выше, в качестве источников тока служит источник ЭДС и развязывающие дроссели (количество зависит от схемы включения (рис. 14)). Поэтому при работе преобразователя будет наблюдаться несимметрия токов в дросселях. Данный негативный эффект в большинстве случаев решается незначительным усложнением алгоритма управления, который использует избыточные состояния многоуровневого АИТ для выравнивания токов в дросселях [14].

Квази-многоуровневые топологии

В отечественной литературе под «уровнями преобразователя» понимается число уровней тока в звене постоянного тока [17]. В то же время можно ввести понятие «число уровней тока (напряжения) в нагрузке». Второе понятие, согласно классическим представлениям, должно вытекать из первого. Но это не всегда происходит. В современной промышленности существуют запатентованные топологии МУ АИТ, которые при наличии одного уровня тока в звене постоянного тока могут формировать три (классический случай) и более уровней тока (напряжения) в нагрузке. Такие топологии относятся к классу квази-многоуровневые топологии.

Многозонный инвертор тока (рис. 16) [28] является одним из примеров такого класса схем. В данной схеме применяются переключения внешнего емкостного импеданса нагрузки для получения разных уровней напряжения на коммутируемой нагрузке [29]. Несомненным преимуществом данной топологии является отсутствие дополнительных источников постоянного тока на входе инвертора.

Для управления данным преобразователем применялся метод СШИМ [29].

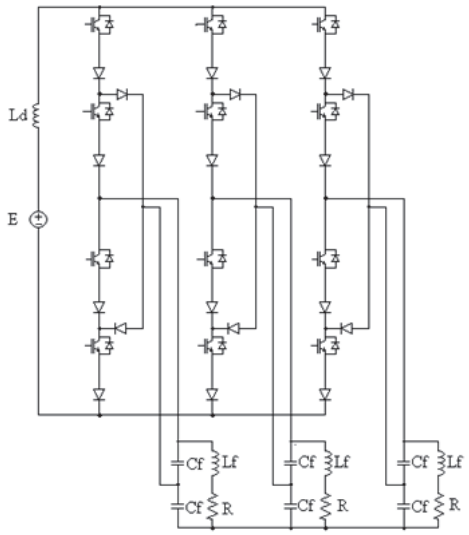


Рис. 16. *Схема трехуровневого многозонного инвертора тока*

Fig. 16. *Circuit of three-level multizone current inverter*

Классификация многоуровневого автономного инвертора тока

По результатам проведенной работы целесообразно систематизировать полученные данные и сформировать классификацию топологий МУ АИТ. Авторы настоящего обзора попытались проделать данную работу, результат которой приведен на рис. 16. Очевидно, возможны и другие классификации, основанные, в частности, на показателях энергоэффективности многоуровневых АИТ [30].

Все МУ АИТ удобно разделить по числу фаз формируемого тока. Это однофазные и трехфазные топологии. Последние также делятся на трехпроводные и четырехпроводные линии. Между топологиями для 3- и 4-проводных линий имеется кардинальное отличие – возможность формировать несимметричный трехфазный ток, как по амплитуде, так и по сдвигу фаз. Это порождает некоторое усложнение схемотехники данных топологий (особенно для многоуровневых вариантов) и значительное усложнение алгоритмов управления. Но данная тема выходит за рамки настоящего обзора.

Однофазные МУ АИТ можно разделить на топологии, полученные путем параллельного соединения однофазных 2-уровневых ячеек (из которых можно получить топологию с уменьшенным числом силовых ключей, относительно базовой) и путем применения принципов дуальности к однофазным МУ АИТ.

Трехфазные топологии для 3-проводной линии можно разделить следующим образом:

- топологии, полученные путем каскадного соединения 1-фазных МУ АИТ, формируемых кривые выходного тока с требуемым сдвигом по фазе. В результате можно получить топологии для схем соединения нагрузки звезда без нуля и треугольник;
- топологии, полученные по результатам применения принципов дуальности к 3-фазным МУ АИН;
- топологии, полученные путем параллельного соединения 3-фазных 2-уровневых АИТ.

Заключение

В результате проведенного исследования было выполнено следующее:

- проведен обзор наиболее известных однофазных и трехфазных топологий многоуровневых АИТ применительно к ветроэнергетическим станциям. В том числе приведены топологии, полученные в результате использования принципов дуальности автономных инверторов тока и напряжения;
- для некоторых топологий приведен сравнительный анализ по числу дополнительных ключей и источников тока на каждый новый уровень выходного тока преобразователя, простоты создания (использования) алгоритма управления и корректности работы;
- предложена классификация топологий МУ-АИТ.

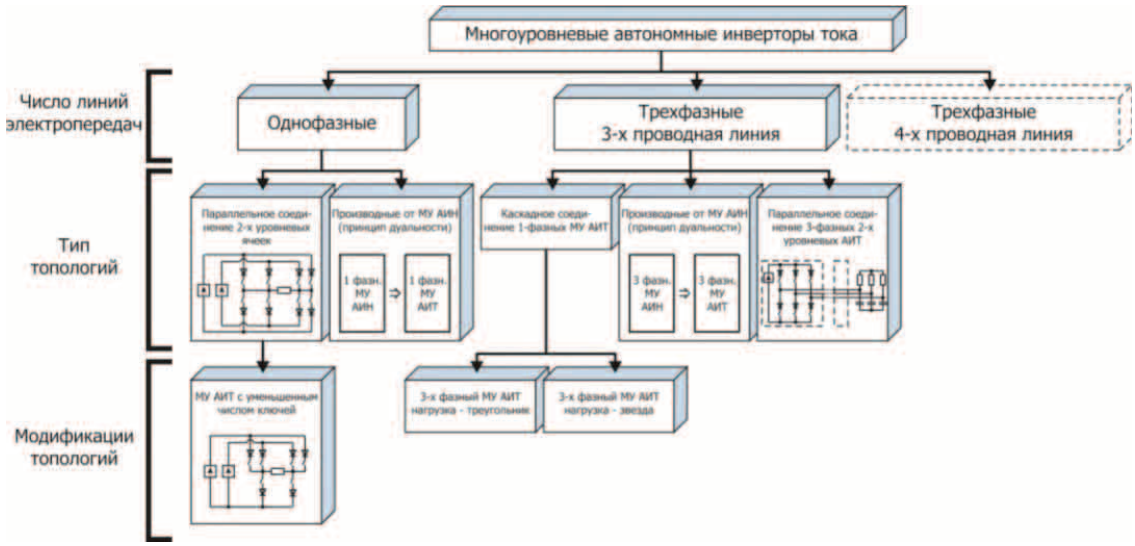


Рис. 17. *Классификация МУ АИТ*

Fig. 17. *Classification of multilevel CSC*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрайбер Д. Преобразователи высокой мощности для возобновляемых источников энергии // Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 90–94.
2. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силовая электроника. – 2007. – № 2. – С. 53–59.
3. Кумаков Ю.А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. – 2005. – № 5. – С. 11–16.
4. Деревяшкин А.В. Технико-экономическое сопоставление преобразователей частоты с автономным инвертором тока и автономным инвертором напряжения // Интеллект и наука: Труды XII Междунар. науч. конф. – Железногорск, 2012. – С. 198–199.
5. Клевцов А.В. Преобразователи частоты для электропривода переменного тока. – Тула: Гриф и К°, 2008. – 224 с.
6. Zinoviev G.S., Lopatkin N.N. Evolution of multilevel voltage source inverters // On actual problems of electronic instrument engineering. APEIE-08. – Novosibirsk, 2008. – V. 1. – P. 125–136.
7. Зиновьев Г.С. Итоги решения проблем электромагнитной совместимости вентильных преобразователей // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 12–16.
8. Dash P.P. A high-performance three-phase grid-connected PV system based on multilevel current source inverter // A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Canada, 2013. – 140 p.
9. Modeling of a three phase SPWM multilevel VSI with low THD using Matlab/Simulink / I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir, G. Bal // 13th European Conference IEEE Power Electronics and Applications EPE'09. – Barcelona, Spain, 2009. – P. 1–10.
10. Karuppanan P., Makapatra K.K. FPGA based single-phase cascaded multilevel voltage source inverter FED ASD application // Journal of Electrical Engineering. – 2011. – V. 11. – P. 102–106.
11. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle / J. Bao, W. Bao, S. Wang, Z. Zhang // Applied power electronics conference and exposition APEC. – Palm Springs, 2010. – P. 1097–1100.
12. Antunes F.L.M., Brada H.A.C., Barbi I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 1999. – V. 46. – № 1. – P. 31–38.
13. Aguirre M.P., Calvino L., Valla M.I. Multilevel current-source inverter with FPGA control // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2013. – V. 60. – № 1. – P. 3–10.
14. Bao J., Bao W., Zhang Z. Generalized multilevel current source inverter topology with self-balancing current // Journal of Zhejiang University-Science. – 2010. – V. 11. – P. 555–561.
15. Hosseini S.H., Kangarlu M.F., Sadigh A.K. A new topology for multilevel current source inverter with reduced number of switches // International conference on electrical and electronics engineering. – Bursa, Turkey, 2009. – P. 273–277.
16. A different multilevel current-source inverter / N. Vazquez, H. Lopez, C. Hernandez, E. Vazquez, R. Osorio, J. Arau // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2010. – V. 57. – № 8. – P. 2623–2632.
17. Тонкаль В.Е. Синтез автономных инверторов модуляционного типа. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 207 с.
18. Noguchi S., Noguchi T. Three-level current-source PWM inverter with no-isolated switching devices for photovoltaic conditioner // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Cambridge, United Kingdom, 2008. – P. 2580–2585.
19. Noguchi S., Noguchi T. New generalized multilevel current-source PWM inverter with no-isolated switching devices // International conference on power electronics and drive systems. – Taipei, Taiwan, 2009. – P. 314–318.
20. Pulse wide modulated buck-boost five-level current source inverters / F. Gao, P.C. Loh, F. Blaabjerg, D.M. Vilathgamuwa // Applied power electronics conference and exposition. – Lima, Peru, 2008. – P. 469–475.
21. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
22. Freeland S.D. Techniques for the practical application of duality to power circuits // IEEE Transactions on power electronics. – 1992. – V. 7. – № 2. – P. 374–384.
23. Wolf P.J., Ledwich G.F., Kwong K.C. The Application of the Duality Principles to Nonplanar Circuits // IEEE Transactions on power electronics. – 1993. – V. 8. – № 2. – P. 104–111.

24. A new three-phase 5-level current-source inverter / J. Bao, Z. Bai, Q. Wang, Z. Zhang // Journal of Zhejiang University-Science. – 2006. – V. 7. – P. 1973–1978.
25. A New Single-phase Multilevel Current-source Inverter / Y. Xiong, D.J. Chen, S.Q. Deng, Z.C. Zhang // IEEE. APEC2004. – Santiago, Chile, 2004. – P. 1682–1685.
26. A New Three-phase Five-level Current-source Inverter / Y. Xiong, Y.L. Li, X. Yang, K. Wei, Z.C. Zhang // IEEE. APEC2005. – Busan, South Korea, 2005. – P. 424–427.
27. McGrath B.P., Holmes D.G. Multilevel PWM strategies for multilevel inverters // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2002. – V. 49. – № 4. – P. 858–867.
28. Многозонный преобразователь постоянного тока в переменный: пат. Российская Федерация 2523001, МПК H02M7/217, заявл. 19.11.2012; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 7 с.
29. Волков А.Г., Зиновьев Г.С. Анализ электромагнитных процессов в трехфазном многозонном инверторе тока // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1 (54). – С. 134–142.
30. Зиновьев Г.С. Расширение набора показателей энергоэффективности устройств силовой электроники // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 54–58.

Поступила 20.03.2015 г.

UDC 621.314.26

REVIEW OF MULTILEVEL CURRENT SOURCE INVERTERS OF WIND POWER STATIONS

Aleksey I. Malnev,
Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: malnev54@yandex.ru

Igor A. Bakhovtsev,
Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: igor_55@ngs.ru

Gennady S. Zinoviev,
Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: genstep@mail.ru

The review deals with single and three-phase multilevel current source inverters for wind power stations. The review is mainly based on the foreign press. The introduction gives brief justification of significance of using multilevel inverters in wind power stations and comparison of autonomous voltage and current inverters. The accomplishments of current source inverter and its use have been listed. The single-phase versions are considered further. This type of converters is characterized by noncomplex topology (as a rule) and easy studying of forming levels of output current. The base topology is determined for them. For some topologies in comparison with the base one the comparative characteristics are considered for a number of power switches and control systems. Special attention is given to topologies with reduced number of power switches. In addition, the focus is on single-phase multilevel current source inverters, based on no-isolated switches. The features of their management, strengths and weaknesses are considered. The base topology is determined for three-phase multilevel current source inverters. Two three-phase circuit transfer methods using duality principles of current source and voltage source inverters are described. Then some topologies, which had been derived using these principles, are described as well. The paper refers to the problem of the current balance in some cascades of multilevel current source inverters and to the methods of its implementation. This problem is similar to the problem of voltage balance in the multilevel voltage source inverters. The three-phase topologies, which had been acquired from several one-phase cells, are described. It is important for high powerful converters. The paper considers a new class of multilevel current source inverters topologies, which is named a quasi-multi-zone topology. The authors describe its characteristics and advantages. For each topology, described in the paper, the brief descriptions of control algorithms is given. At the end of the article by the results of the prepared review the authors propose the classification of different topologies of multilevel current source inverters by several criteria.

Key words:
Wind power station, current source invertor, multilevel current source converter, control system, control method, duality principle, quasi-multi-zone topologies, current source inverter classification.

REFERENCES

1. Shrayber D. Preobrazovateli vysokoy moshchnosti dlya vozobnovlyaemykh istochnikov energii [A high-power converters for renewable energy]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2010, no. 5, pp. 90–94.
2. Kolpakov A. Skhemotekhnika moshchnykh vysokovoltnykh preobrazovateley [A high-power converter circuitry]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2007, no. 2, pp. 53–59.
3. Kumakov Yu.A. Invertory napryazheniya so stupenchatoy modulyatsiey i aktivnaya filtratsiya vysshikh garmonik [Voltage inverters with step-modulation and active filtering of high order harmonics]. *Novosti elektrotekhniki*, 2005, no. 5, pp. 11–16.
4. Derevyashkin A.V. Tekhniko-ekonomicheskoe sopostavlenie preobrazovateley chastoty s avtonomnym invertorom toka i avtonomnym invertorom napryazheniya [Technological and economic comparison of converters with current source inverter and voltage source inverter]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Intellekt i nauka* [Intelligence and science. Proc. of XII International scientific conference]. Zheleznogorsk, 2012. pp. 198–199.
5. Klevtsov A.V. *Preobrazovateli chastoty dlya elektroprivoda peremennogo toka* [Converters for AC electric drive]. Tula, Grif i K° Publ., 2008. 224 p.
6. Zinoviev G.S., Lopatkin N.N. Evolution of multilevel voltage source inverters. *On actual problems of electronic instrument engineering*. Novosibirsk, 2008. Vol. 1, pp. 125–136.
7. Zinoviev G.S. Itogi reshenia problem electromagnitnoy sovmestimosty ventilnykh preobrazovateley [The results of solving the

problems of electromagnetic compatibility of electronic power converters]. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2000, no. 11, pp. 12–16.
8. Dash P.P. *A high-performance three-phase grid-connected PV system based on multilevel current source inverter. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering*. Waterloo, Canada, 2013. 140 p.
9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R., Bal G. Modeling of a three phase SPWM multilevel VSI with low THD using Matlab/Simulink. *13th European Conference IEEE Power electronics and applications EPE'09*. Barcelona, Spain, 2009. pp. 1–10.
10. Karuppanan P., Makapatra K.K. FPGA based single-phase cascaded multilevel voltage source inverter FED ASD application. *Journal of electrical engineering*, 2011, vol. 11, pp. 102–106.
11. Bao J., Bao W., Wang S., Zhang Z. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle. *Applied power electronics conference and exposition*. Palm Springs, 2010. pp. 1097–1100.
12. Antunes F.L.M., Brada H.A.C., Barbi I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 1999, vol. 46, no. 1, pp. 31–38.
13. Aguirre M.P., Calvino L., Valla M.I. Multilevel current-source inverter with FPGA control. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 3–10.
14. Bao J., Bao W., Zhang Z. Generalized multilevel current source inverter topology with self-balancing current. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2010, no. 11, pp. 555–561.
15. Hosseini S.H., Kangarlu M.F., Sadigh A.K. A new topology for multilevel current source inverter with reduced number of switches. *International conference on electrical and electronics engineering*. Bursa, Turkey, 2009. pp. 273–277.
16. Vazquez N., Lopez H., Hernandez C., Vazquez E., Osorio R., Arau J. A different multilevel current-source inverter. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2010, vol. 57, no. 8, pp. 2623–2632.
17. Tonkal V.E. *Sintez avtonomnykh invertorov modulyatsionnogo tipa* [Synthesis of stande-alone inverters of modulation type]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 207 p.
18. Noguchi S., Noguchi T. Three-level current-source PWM inverter with no-isolated switching devices for photovoltaic conditioner. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, United Kingdom. 2008. pp. 2580–2585.
19. Noguchi S., Noguchi T. New generalized multilevel current-source PWM inverter with no-isolated switching devices. *International conference on power electronics and drive systems*. Taipei, Taiwan, 2009. pp. 314–319.
20. Gao F., Loh P.C., Blaabjerg F., Vilathgamuwa D.M. Pulse wide modulated buck-boost five-level current source inverters. *Applied power electronics conference and exposition*. Lima, Peru, 2008. pp. 469– 475.
21. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s polu-provodnikovymi preobrazovatelyami chastity* [Mathematical modeling of AC drives with solid-state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Press, 2000. 654 p.
22. Freeland S.D. Techniques for the practical application of duality to power circuits. *IEEE Transactions on power electronics*, 1992, vol. 7, no. 2, pp. 374–384.
23. Wolf P.J., Ledwich G.F., Kwong K.C. The Application of the Duality Principles to Nonplanar Circuits. *IEEE Transactions on power electronics*, 1993, vol. 8, no. 2, pp. 104–111.
24. Bao J., Bai Z., Q. Wang Q., Zhang Z. A new three-phase 5-level current-source inverter. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2006, vol. 7, pp. 1973–1978.
25. Xiong Y., Chen D.J., Deng S.Q., Zhang Z.C. A new single-phase multilevel current-source inverter. *IEEE*. Santiago, Chile, 2004. pp. 1682–1685.
26. Xiong Y., Li Y.L., Yang X., Wei K., Zhang Z.C. A new three-phase five-level current-source inverter. *IEEE*. Busan, South Korea, 2005. pp. 424–427.
27. McGrath B.P., Holmes D.G. Multilevel PWM strategies for multilevel inverters. *IEEE. Trans. on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
28. Volkov A.G., Zinoviev G.S. *Multi-zone dc-to-ac converter*. RF patent, no. 2523001, 2012.
29. Volkov A.G., Zinoviev G.S. Analiz elektromagnitnykh protsessov v trekhfaznom mnogozonnom invertore toka [Analysis of electromagnetic processes in a three-phase multi-zone current source inverter]. *Nauchny vestnik NGTU – Scientific Bulletin of NSTU*, 2014, no. 1 (54), pp. 134–142.
30. Zinoviev G.S. Rasshirenie nabora pokazateley energoeffectivnosti ustroystv silovoy elektroniky [A wider range of performance of power electronic devices]. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 54–58.

Received: 20 March 2015.