

Новые подходы к проектированию высоковольтных преобразователей

Одна из наиболее интересных задач в преобразовательной технике — последовательное включение силовых модулей и каскадов, построенных на их основе. Увеличение выходного напряжения является единственным решением для сверхмощных применений, когда исчерпаны возможности параллельного соединения и токовая нагрузка на соединительные шины становится недопустимо высокой. Преимущество многоуровневой топологии (MLI — Multi Level Inverter)— возможность проектирования высоковольтных инверторов на основе стандартных низковольтных силовых ключей. В статье рассмотрены новые подходы к построению средневольтных (MV — Medium Voltage) многоуровневых преобразователей, обеспечивающих функцию коррекции коэффициента мощности (ККМ, или PFC). Это позволяет получить синусоидальный ток в MV-сети, упростить конструкцию трансформатора, снизить скорость изменения напряжения (dv/dt) на двигателе и обеспечить минимальные искажения формы выходного сигнала.

Наибольший интерес представляют две новые концепции MLI-системы: 2-квadrантный (2Q) и 4-квadrантный (4Q) конвертер с 3-фазным и однофазным питанием ячеек. В данном материале представлены особенности обоих вариантов построения схемы. Важным результатом исследований стал вывод о том, что отсутствует необходимость увеличить емкость конденсаторной батареи ячейки с однофазным выпрямителем.

Дайан Шрайбер
(Dejan Schreiber)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Самым перспективным вариантом MV-топологии считается так называемая «многоуровневая» схема. В MLI-инверторе несколько однофазных ячеек, питающихся от разделенных обмоток трансформатора, соединяются последовательно, обеспечивая многократное умножение выходного напряжения. Самый известный пример построения подобной ячейки, описанный в работе [1], требует применения трансформатора со сдвинутыми по фазе трехфазными вторичными обмотками [2]. Это необходимо для обеспечения синусоидального входного тока, что является обязательным требованием, предъявляемым к нагрузкам MV-сетей.

Средневольтные (т. е. свыше 1000 В) преобразователи с диапазоном выходных напряжений 2,2–35 кВ имеют большой потенциал на рынке мощных промышленных приводов. Они играют важную роль и в плане глобального энергосбережения, поскольку почти 40% общей мощности приводов приходится на средневольтный диапазон, хотя количество

MV-моторов, используемых в промышленности, составляет лишь небольшую часть от общего числа. Техническая сложность средневольтных приводов сдерживает их активное развитие, в настоящее время лишь несколько процентов MV-двигателей оснащено преобразователями. Однако их популярность непрерывно возрастает, что во многом связано с развитием MLI-технологий.

Мировой рынок общепромышленных и тяговых MV-приводов оценивается примерно в 5 млрд евро. В течение последних лет этот сектор растет в среднем на 8–10%. По прогнозам, к 2020 г. объем рынка средневольтных инверторов может увеличиться в три раза по сравнению с 2010 г. [3].

**Выбор силовых ключей
для MV-преобразователей**

Трехфазный инвертор (схема В6С1) MV-диапазона с синусоидальным выходным сигналом, построенный

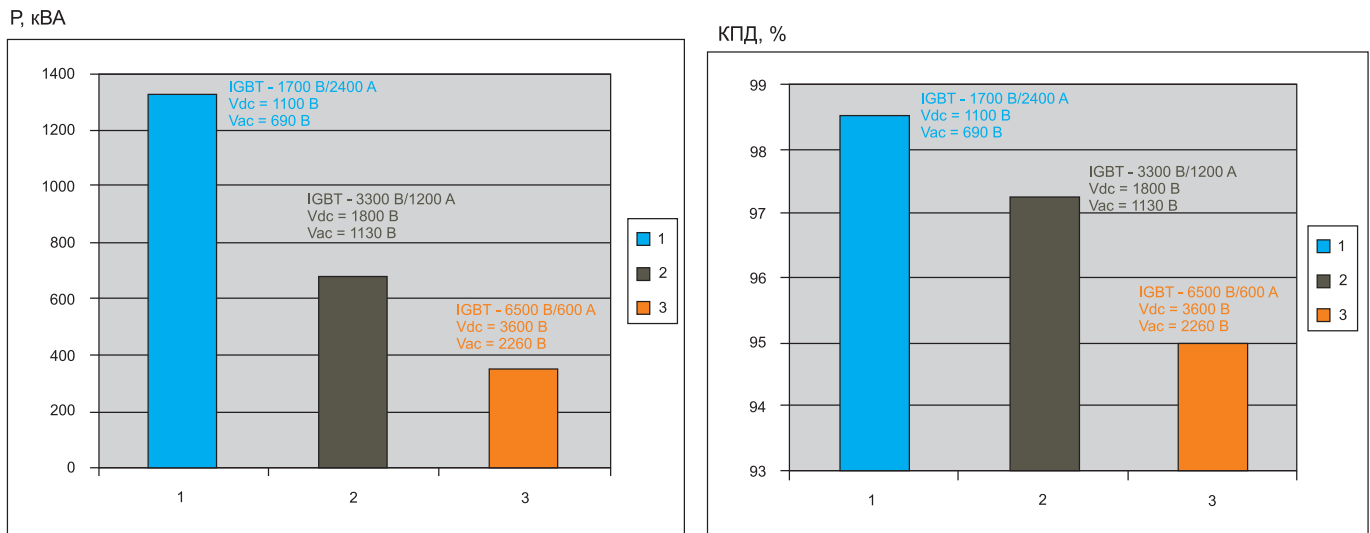


Рис. 1. Сравнение максимальной мощности и эффективности 3-фазного инвертора при использовании низковольтных и высоковольтных ключей с идентичной площадью кристаллов IGBT

на высоковольтных IGBT-модулях, — очень дорогое решение. Подобные компоненты предлагают ряд фирм, в частности Mitsubishi, Infineon, Hitachi. В настоящее время производятся IGBT с рабочим напряжением 3,3, 4,5, 6,5 кВ, в разработке находятся ключи, рассчитанные на 10 кВ. Компания ABB выпускает высоковольтные тиристоры IGCT (Insulated Gate Controlled Thyristor) и преобразователи на их основе. Однако, по мнению специалистов компании SEMIKRON, такие решения, несмотря на кажущуюся схемную простоту, малоэффективны как с экономической, так и с технической точки зрения. Основные недостатки преобразователей, построенных на высоковольтных ключах, перечислены ниже:

- низкая эффективность;
- высокая стоимость;
- сложность обслуживания;
- отсутствие единых стандартов;
- небольшое количество производителей, сложность поиска аналогов.

Сказанное подтверждается расчетными диаграммами (рис. 1), позволяющими сравнить максимально достигаемую мощность и КПД преобразователей, построенных на силовых ключах трех классов напряжения (1700, 3300, 6500 В). При анализе рассматривались модули с одинаковой суммарной эффективной площадью кристаллов, чтобы сравнение было корректным. Как показывают приведенные данные, применение низковольтных транзисторов IGBT 17-го класса позволяет создавать преобразовательные устройства с большей мощностью и более высокой эффективностью.

Расчеты выполнены для 3-фазного инвертора при следующих условиях эксплуатации:

- напряжение DC-шины $V_{DC} = 1100/1800/3600$ В;
- выходное напряжение преобразователя $V_{AC} = 690/1130/2260$ В;
- частота коммутации $F_{sw} = 3,6$ кГц;
- $\cos(\varphi) = 0,9$.

Основными ограничениями выходной мощности являются суммарная энергия по-

терь и соответствующий перегрев кристаллов. При том же уровне потерь модуль 33-го класса с током 1200 А способен обеспечить только половину мощности, которую можно получить от силового ключа с номинальными характеристиками 1700 В/2400 А, а возможности 600-амперного модуля 65-го класса уже в четыре раза ниже, чем низковольтного ключа.

Выбор одинаковой частоты коммутации ($F_{sw} = 3,6$ кГц) для всех типов модулей связан с оптимизацией типоразмера фильтра. При F_{sw} от 3 до 4 кГц на синусоидальный фильтр приходится не более 5% от общих потерь инвертора, а его размеры и стоимость получаются примерно одинаковыми для различных вариантов схемы. Отметим, что при построении традиционных MV-приводов используются разные подходы. Например, самое высокое выходное напряжение (6,6 кВ) обеспечивает 3-уровневый инвертор с фиксированной нейтралью (3L NPC), содержащий 12 модулей IGBT 65-го класса.

Наиболее привлекательной и экономически эффективной является концепция многоуровневого преобразователя (MLI), содержащего низковольтные ячейки с активным выпрямителем. Основное преимущество такой топологии состоит в простоте конструкции многообмоточного трансформатора, питающего последовательно соединенные ячейки. Вариант MLI с неуправляемым выпрямителем [1, 2] требует использования чрезвычайно сложных сетевых трансформаторов с разной конфигурацией обмоток («звезда», «зигзаг» и «треугольник») [2].

Новые требования к MV-преобразователям предусматривают синусоидальную форму тока потребления. Такая задача может быть решена с помощью корректора коэффициента мощности (ККМ).

Существуют следующие варианты построения схемы с 3-фазным выпрямителем:

- инвертор 4Q с питанием ячеек от трехфазных обмоток («звезда» или «треугольник»), одинаковых для всех ячеек (рис. 2) [4];

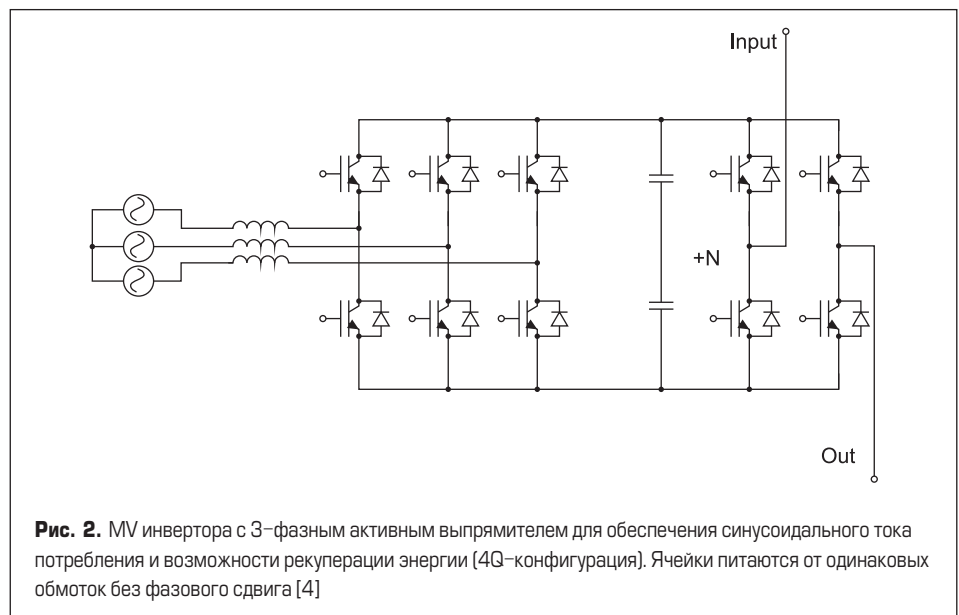


Рис. 2. MV инвертора с 3-фазным активным выпрямителем для обеспечения синусоидального тока потребления и возможности рекуперации энергии (4Q-конфигурация). Ячейки питаются от одинаковых обмоток без фазового сдвига [4]

Таблица. Количество ячеек со стабилизированным и нестабилизированным напряжением V_{dc} для различных вариантов MLI

Линейное напряжение, В	Фазное напряжение, В	Количество ячеек (расчетное)	Количество ячеек	Максимальное фазное напряжение, В	Максимальное линейное напряжение, В	Количество IGBT
$V_{dc, cell} = 830...1200$ В (DC); изменение линейного напряжения $\pm 15\%$, $V_{out, cell} = 585$ В (AC)						
2300	1329	2,26	3	1767	3057	36
3300	1908	3,24	4	2356	4076	48
4160	2405	4,08	4	2356	4076	48
6000	3468	5,89	6	3534	6114	72
7200	4162	7,07	7	4123	7133	84
$V_{dc, cell} = 1200$ В (DC, стабилизированное); $V_{out, cell} = 849$ В (AC)						
2300	1329	1,56	2	1702	2944	24
3300	1908	2,24	3	2553	4417	36
4160	2405	2,83	3	2553	4417	36
6000	3468	4,08	4	3404	5889	48
7200	4162	4,89	5	4255	7361	60

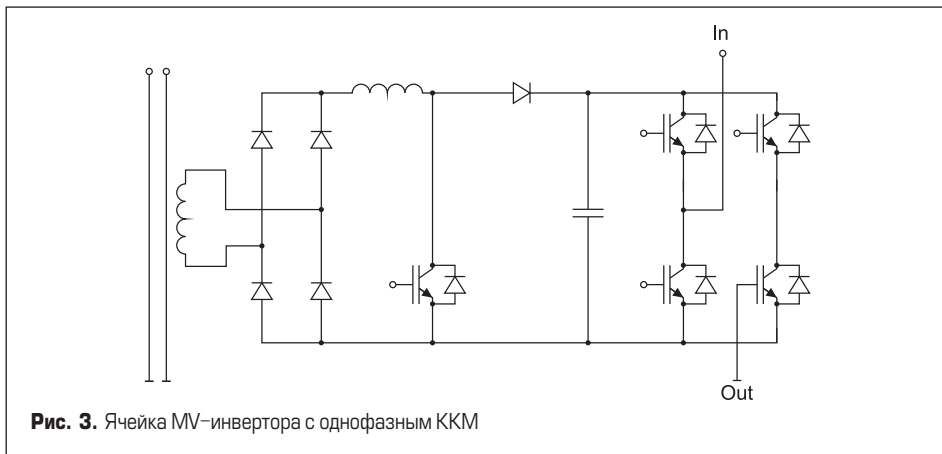


Рис. 3. Ячейка MV-инвертора с однофазным ККМ

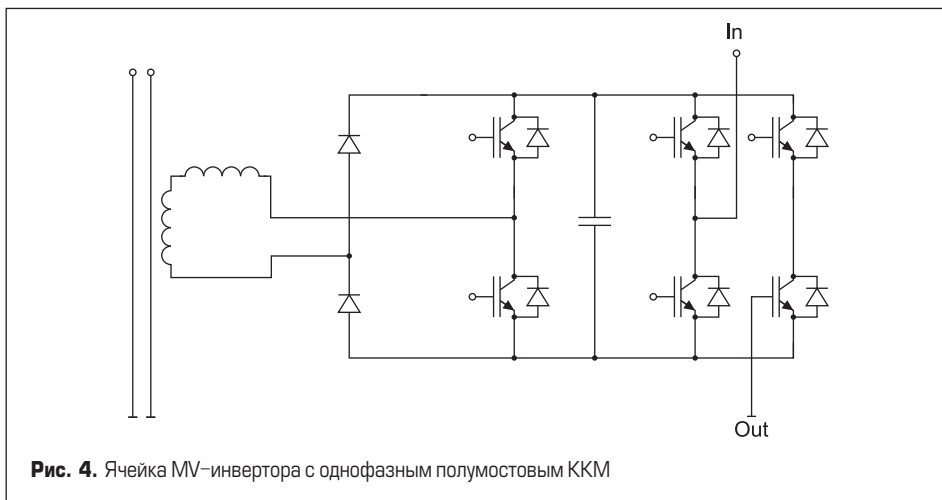


Рис. 4. Ячейка MV-инвертора с однофазным полумостовым ККМ

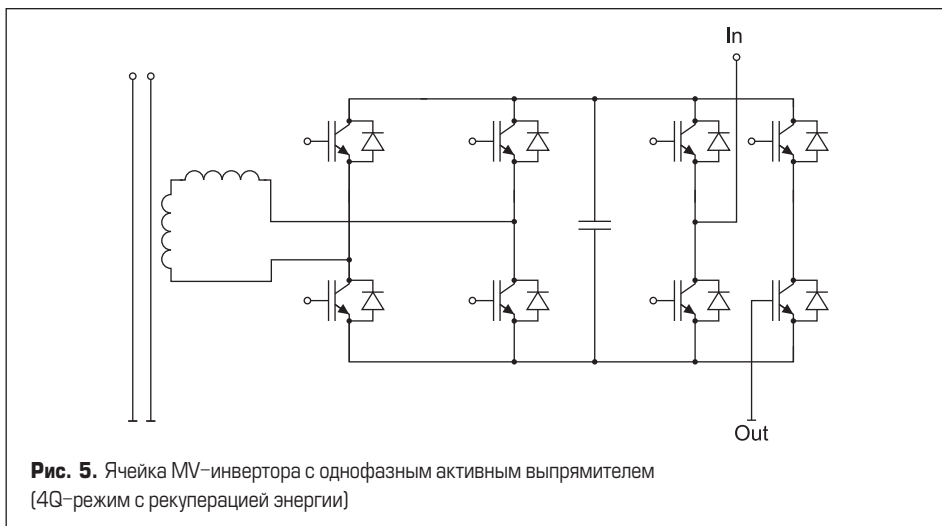


Рис. 5. Ячейка MV-инвертора с однофазным активным выпрямителем (4Q-режим с рекуперацией энергии)

- инвертор 2Q без рекуперации энергии в сеть с питанием ячеек от трехфазных обмоток; синусоидальный сетевой ток обеспечивается с помощью ККМ [5].

активным выпрямителем для обеспечения синусоидального тока потребления и возможности рекуперации энергии (4Q конфигурация). Ячейки питаются от одинаковых обмоток без фазового сдвига [4]

В обоих случаях напряжение звена постоянного тока V_{DC} контролируется. Оно может поддерживаться на постоянном уровне, независимо от колебаний сети. Выходное напряжение таких однофазных ячеек всегда будет выше, чем при питании от неуправляемого 3-фазного диодного моста [1, 2]. Это позволяет существенно сократить количество последовательных элементов в MLI-системе (табл. 1).

Еще одним способом решения проблемы является питание ячейки от однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности. Конструкция трансформатора с одинаковыми выходными обмотками в этом случае получается очень простой, а число обмоток уменьшается втрое. Синусоидальный ток сети обеспечивается в результате использования ККМ на входе устройства (рис. 3).

В состав схемы входят однофазный выпрямительный мост, чопперный каскад корректора с дросселем в DC-цепи и однофазный выходной инвертор. Благодаря использованию ККМ ячейки могут питаться от простых одинаковых обмоток без смещения по фазе. Дальнейшее упрощение достигается вследствие перемещения индуктора из DC в AC входную цепь, как показано на рис. 4. Более того, в ряде случаев можно использовать индуктивность рассеяния трансформатора и вообще отказаться от дросселя. Интересной особенностью такой топологии является возможность применения стандартного трехфазного модуля IGBT (конфигурация GD).

Эта идея не нова: в схеме ККМ [6] использованы следующие компоненты: индуктор в AC-цепи, диодный полумост и IGBT-полумост. Два других полумостовых каскада образуют однофазный выходной инвертор. Таким образом, в качестве ячейки MLI можно применить готовый трехфазный частотный преобразователь с неуправляемым выпрямителем, в котором к сети подключена только одна диодная стойка.

В данной конфигурации первый полумост управляется по алгоритму ККМ, причем каждый ключ здесь коммутирует только половину

тока. Дроссель на входе создает часть индуктивности рассеяния обмотки трансформатора. Дальнейшим развитием описанной концепции стала 4Q-схема с возможностью рекуперации энергии и формирования синусоидального тока на входе и выходе инвертора (рис. 5).

На рис. 6 показана ячейка с трехфазным выпрямительным мостом, каскадным корректором с дросселем в DC-цепи и однофазным трехуровневым (3L) инвертором. Применение такой топологии позволяет сократить количество ячеек. Один такой блок, построенный на стандартных IGBT 17-го класса, формирует выходное напряжение $V_{out} = 3,3$ кВ. Топология инвертора кажется довольно сложной, однако появление специализированных 3L-модулей (конфигурация MLI) [9] позволяет разрешить эту проблему.

Еще один вариант подобной ячейки представлен на рис. 7, где дроссели KKM перемещены из DC- во входную AC-цепь. Такая схема обеспечивает лучший контроль токов короткого замыкания выпрямителя, а индуктор здесь является частью индуктивности рассеяния трансформатора.

В таблице показано, как сокращается число ячеек MLI при переходе на контролируемое и стабилизированное напряжение DC-шины. При использовании неуправляемого диодного выпрямителя (B6U) величина V_{dc} повторяет изменения напряжения сети. Предположим, что они составляют $\pm 15\%$, тогда максимальное напряжение звена постоянного тока на холостом ходу будет 1200 В с учетом 15%-го допуска. Таким образом, $V_{ac_max} = 1200/\sqrt{2} = 849$ В, номинальное значение $V_{ac_nom} = 849 \times 0,85 = 721$ В, а минимальная величина $V_{ac_min} = 721 \times 0,85 = 613$ В, следовательно, $V_{dc_min} = 1,35 \times 613 = 828$ В. Напряжение на DC-шине ячейки с диодным выпрямителем меняется в пределах $V_{dc_cell} = 830...1200$ В, т. е. с учетом 15%-го допуска $V_{out_cell} = 585$ В.

Необходимо учесть не только уменьшение количества единичных блоков MLI, но и тот

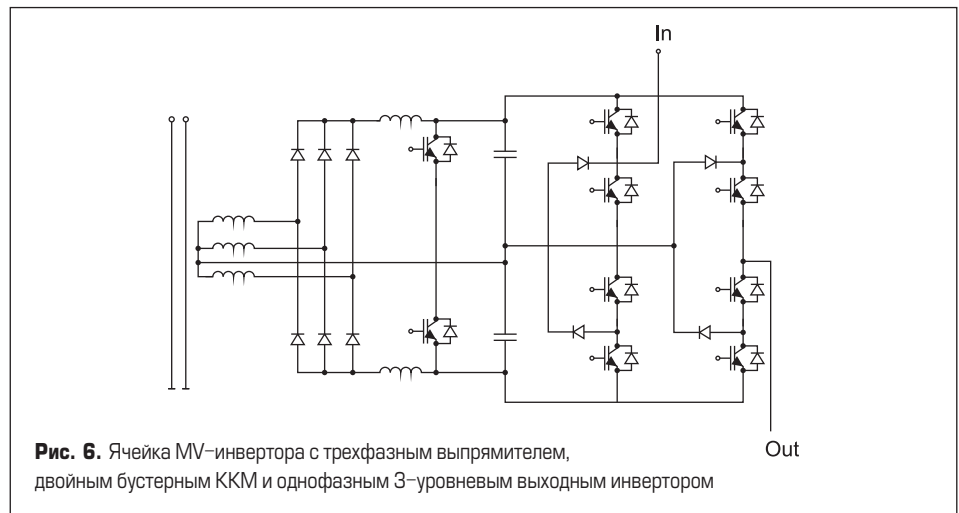


Рис. 6. Ячейка MV-инвертора с трехфазным выпрямителем, двойным бустерным KKM и однофазным 3-уровневым выходным инвертором

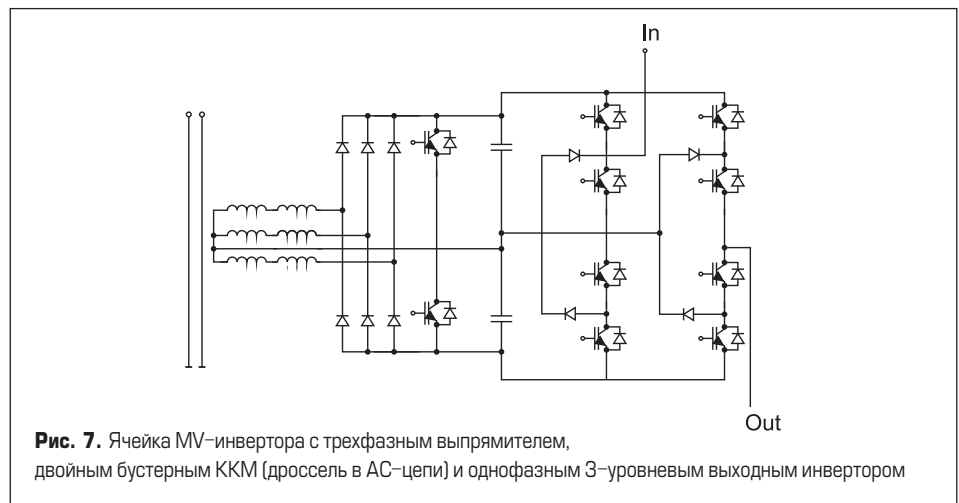


Рис. 7. Ячейка MV-инвертора с трехфазным выпрямителем, двойным бустерным KKM (дроссель в AC-цепи) и однофазным 3-уровневым выходным инвертором

факт, что для питания каждого из них нужна только одна обмотка трансформатора. В результате и сам трансформатор, и его подключение при использовании ячеек с контролиру-

емым напряжением DC-шины становятся гораздо проще. Например, MV-преобразователь на 7,2 кВ, показанный на рис. 8, включает пять последовательных инверторов на фазу (в об-

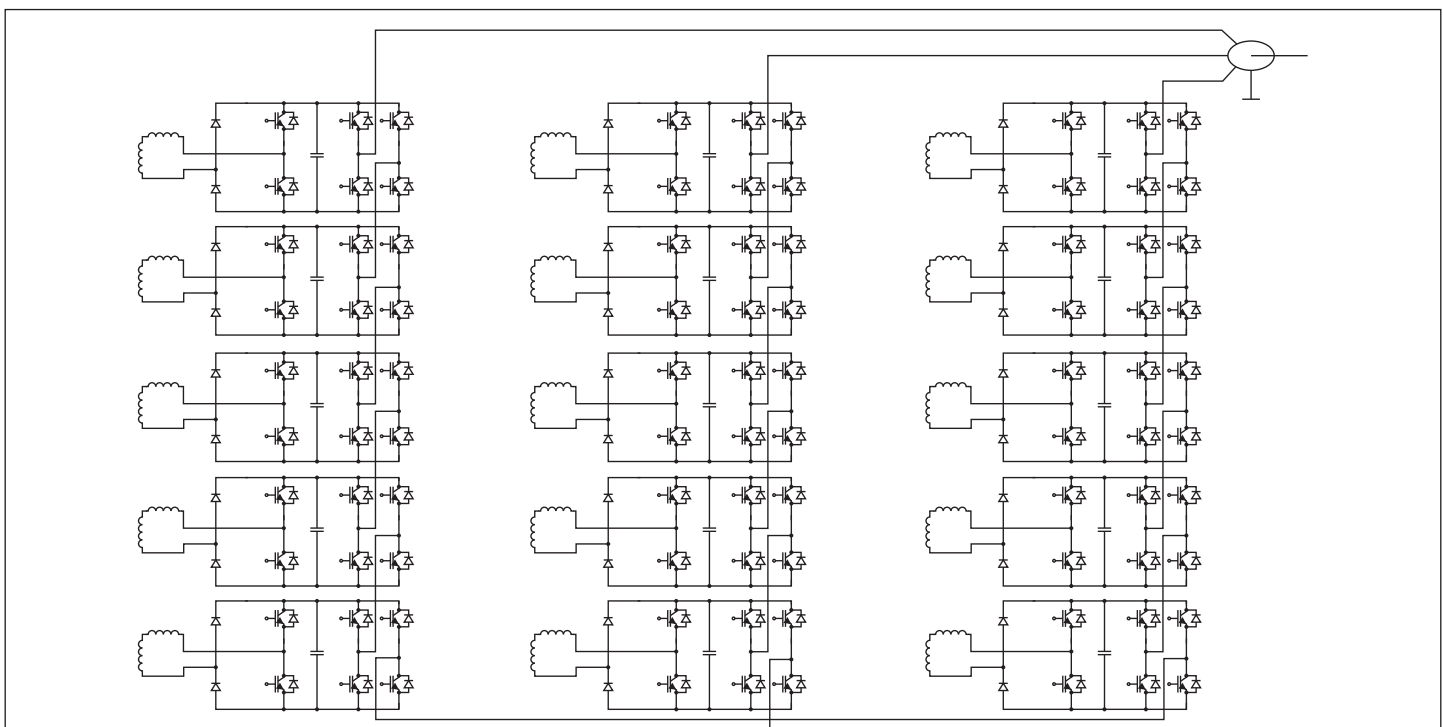


Рис. 8. Схема 2Q-привода с напряжением 7,2 кВ: 3×5 ячеек, 5×3 = 15 однофазных обмоток, 90 IGBT



Рис. 9. Многоуровневый трансформатор производства компании «Электрофизика» (С.-Петербург)

шей сложности, 15 ячеек) и такое же количество однофазных обмоток.

Чтобы реализовать традиционную MLI-схему на 7,2 кВ [1, 2], требуются семь единичных блоков на фазу, т. е. 21 ячейка и 21 сложная трехфазная обмотка, или $3 \times 21 = 63$ одиночные обмотки (в случае если используются только «звезда» и «треугольник»; «зигзаг» же сама по себе содержит несколько обмоток).

Основные преимущества топологии MLI с активным выпрямителем:

- стандартные, низковольтные, надежные полупроводниковые элементы;
- реализация 4Q- или 2Q-режима;
- синусоидальный ток трансформатора, простая конструкция обмоток;
- хороший коэффициент мощности;
- синусоидальный ток электродвигателя;

- низкая амплитуда перепадов напряжения на двигателе;
- высокая эффективность преобразования;
- модульная конструкция, простота монтажа и обслуживания системы;
- стандартный алгоритм контроля момента и скорости (как в низковольтных приводах).

Трансформатор многоуровневого инвертора

Для работы схемы MLI необходим многообмоточный трансформатор, рассчитанный на полную мощность инвертора (рис. 9). Однако следует отметить, что почти во всех вариантах MV-привода также требуется «полноразмерный» входной трансформатор. Необратимые (2Q) инверторы, разработанные с применением высоковольтных IGBT- или IGCT-ключей, имеют на входе диодный мост, работающий как 12-, 18- или 24-пульсный выпрямитель. Поэтому входной трансформатор может содержать две, три или четыре вторичные трехфазные обмотки. Попытки реализации бестрансформаторной схемы приводят к появлению дополнительных и практически непреодолимых трудностей, связанных с изоляцией MV-мотора и его защитой от перенапряжения.

Звено постоянного тока

Одной из главных проблем разработки многоуровневого инвертора является нормирование параметров звена постоянного тока между выпрямителем и выходным H-мостом ячейки. Минимальная мощность обеспечивается на низкой выходной частоте (1–2 Гц) при частоте входного сигнала 50 или 60 Гц. Кроме того, выпрямитель может быть 3-фазным или однофазным, как предполагается в данной работе. Конденсаторы DC-шины должны

компенсировать разницу между входной и выходной мощностью в течение всего рабочего цикла.

Необходимо определить, требует ли однофазное питание (однофазная цепь КKM на входе) большей емкости в звене постоянного тока, чем у обычной ячейки с трехфазным выпрямителем [1, 2]? Ответ на этот вопрос можно найти с помощью моделирования и расчетов. Следует сравнить уровень пульсаций тока и напряжения DC-шины (V_{DC}) при питании от источника постоянного тока (в этом случае они минимальны) и AC сети 50 Гц при низкой (например, 2 Гц) и высокой (например, 48 Гц) частоте выходного сигнала.

При моделировании использованы следующие исходные данные: суммарная емкость звена постоянного тока — 10 мФ, напряжение $V_{DC} = 1000$ В, пиковое значение выходного тока $I_{out_peak} = 300$ А. Этот пример соответствует реальной ячейке мощностью 200 кВА на базе модуля SKiiP513GD172-3DUL, в звене постоянного тока которой последовательно-параллельно (3/3) установлены девять конденсаторов емкостью по 3,3 мФ. Ток DC и AC источника составляет $I_{DC} = I_{AC_av} = 2 \times 300 / \pi = 190$ А, причем в обоих случаях $I_{out_peak} = 300$ А. Результаты моделирования показаны на рис. 10.

При работе на низких частотах мощность ячейки гораздо ниже, чем в номинальном режиме (50/60 Гц), выходное напряжение также пропорционально меньше. Например, при $F_{out} = 2$ Гц преобразователь обеспечивает только 10% от номинальной мощности (около 20 кВА) в режиме работы с постоянными моментом и током, а выходное напряжение H-моста при этом составляет примерно 10% от номинального значения. Результаты моделирования для этого случая приведены на рис. 11.

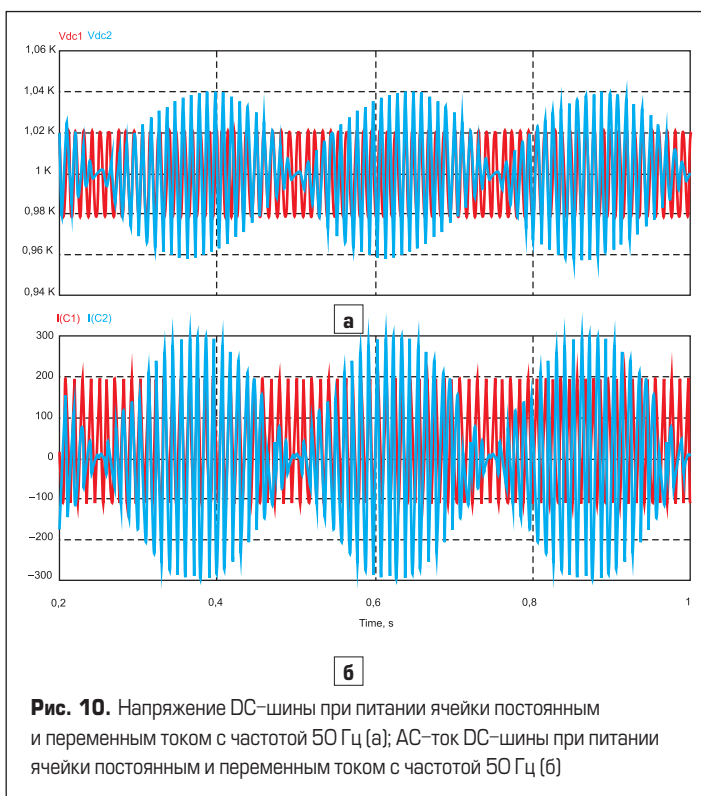


Рис. 10. Напряжение DC-шины при питании ячейки постоянным и переменным током с частотой 50 Гц (а); AC-ток DC-шины при питании ячейки постоянным и переменным током с частотой 50 Гц (б)

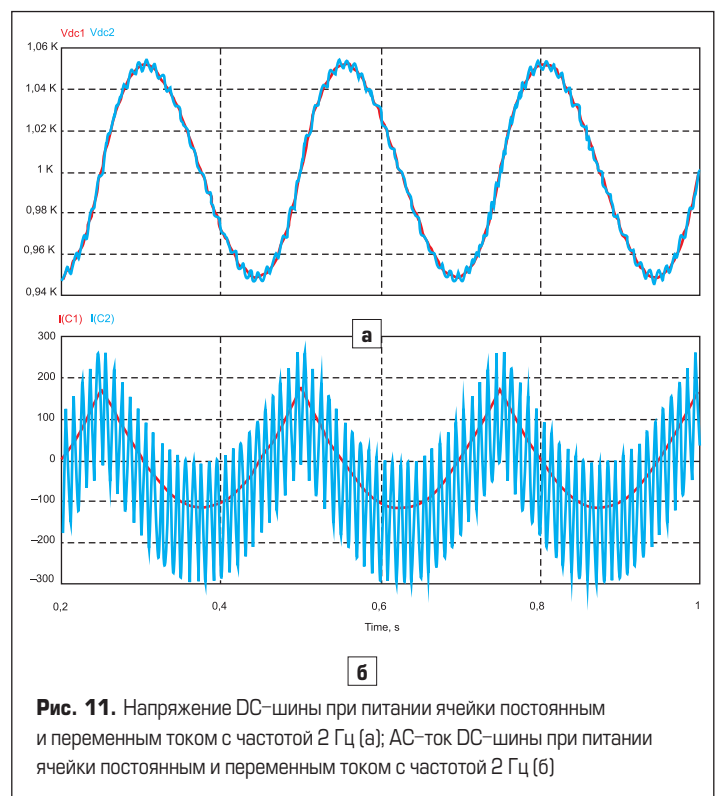


Рис. 11. Напряжение DC-шины при питании ячейки постоянным и переменным током с частотой 2 Гц (а); AC-ток DC-шины при питании ячейки постоянным и переменным током с частотой 2 Гц (б)



Рис. 12. а) готовая MV-система (1,3 МВт, 3 кВ); б) внешний вид MLI-ячейки SEMİKRON (200 А),

В обоих случаях производится сравнение уровня пульсаций напряжения V_{DC} и АС-тока в конденсаторах. На низких частотах колебания напряжения в DC-шине остаются неизменными при постоянном входном токе. Такая же ситуация наблюдается при питании от выпрямленного сигнала частотой 50 Гц. При работе на F_{out} близкой к частоте сети, в напряжении и токе DC-шины может наблюдаться эффект «биений». Как правило, это не приводит к существенному увеличению потерь конденсаторов.

Экономические показатели MV-приводов

Многоуровневая топология с последовательным соединением низковольтных ячеек позволяет создавать MV-инверторы практически без ограничения выходного напряжения и частоты. Это решение является оптимальным при V_{out} свыше 6 кВ. Других вариантов практически не существует — максимальное напряжение трехуровневого инвертора (схема 3L NPC) с применением самых высоковольтных IGBT 65-го класса составляет 6,6 кВ.

Кроме того, принцип работы схемы MLI дает возможность формировать выходной сигнал частотой до нескольких сотен герц, что делает ее пригодной для скоростных приводов. При использовании высоковольтных IGBT- или IGCT-модулей, имеющих очень большие динамические потери, это невозможно.

Удельные экономические показатели многоуровневых MV-приводов незначительно отличаются от параметров низковольтных изделий аналогичной мощности. Ячейка MLI, по сути, представляет собой стандартный преобразователь частоты, построенный на IGBT с рабочим напряжением 1700 В. В отличие от 3-фазного инвертора, такая ячейка обеспечивает 2/3 своей номинальной мощности (поскольку на выходе установлен H-мост, формирующий однофазное напряжение). В каждой из трех фаз

преобразователя последовательно включены N элементов, т. е. суммарная мощность 3-фазной MLI-схемы увеличивается в $3 \times N$ раз. Установленная мощность MLI-инвертора с корректором коэффициента мощности на 1/3 выше выходной. Эта разница используется для реализации функции ККМ.

Особенности конструкции

Компания SEMİKRON, один из ведущих европейских производителей компонентов силовой электроники, имеет большой опыт проектирования специализированных силовых сборок, предназначенных, наряду с прочим, и для применения в многоуровневых инверторах. В частности, на основе популярного конструктива SEMIKUBE разработана серия ячеек MLI мощностью 100–800 кВт. Кроме силового каскада (схема В6U + В4С1), такие сборки включают систему охлаждения, плату драйвера, датчики тока и температуры.

Особенность конструкции ячеек MLI состоит в том, что она должна обеспечивать удобство секционной установки в шкаф, простоту подключения к обмоткам трансформатора и последовательного соединения выходов. Вариант исполнения такой ячейки, рассчитанной на ток до 200 А, приведен на рис. 12. Там же показана конструкция готового многоуровневого инвертора производства компании ЧЭАЗ-ЭЛПРИ.

Заключение

Развитие многоуровневых технологий обусловлено возрастающими требованиями к увеличению мощности, снижению потерь, а также повышению надежности преобразовательной техники. Нарастивание выходного тока (например, в результате параллельного соединения модулей и инверторов) имеет физические пределы, связанные с ростом потерь и ограничением токовой нагрузки силовых цепей и коммутационных устройств.

Многоуровневая архитектура высоковольтных преобразователей обеспечивает следующие преимущества:

- широкий диапазон напряжений и мощностей, модульную конструкцию изделия на основе унифицированных ячеек;
- использование стандартных недорогих низковольтных элементов (силовых ключей, конденсаторов DC-шины, элементов коммутации), обеспечивающих высокую экономическую эффективность;
- возможность работы в 2Q- и 4Q-режимах;
- высокую эффективность преобразования;
- низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения благодаря увеличению эквивалентной частоты и многупенчатой форме сигнала;
- отсутствие больших перепадов напряжения на двигателе;
- малые искажения входного тока;
- простоту управления выходными параметрами преобразователя (скоростью, моментом, током, $\cos \varphi$).

Литература

1. www.siemens.com/robicon-perfect-harmony.
2. US Patent Number 5625545.
3. Klug R. D., Klaassen N. High Power Medium Voltage Drives Innovation, Portfolio, Trends // Conf. Rec. of EPE Dresden. Germany. 2005.
4. Patentschrift DE 101 43 279 A1.
5. US Patent Number 6747881.
6. D. Srajber. How the find the best solution for single phase rectifier design using basic types of power converters // Power Conversion Nürnberg. Proceeding. 1991. June.
7. Rufer, Schibli N., Briguet Ch. A direct coupled 4-Quadrant multilevel converter for 16 2/3 Hz traction systems // IEE. Sept. 1996. No 429.
8. Briag A., Sargos F. Medium Voltage Converter // SEMİKRON International, 2003.
9. Колпаков А. И. 3-уровневые инверторы. Специализированные модули и тепловой расчет // Компоненты и технологии. 2011. № 5.