

ТОПОЛОГИИ СИЛОВЫХ КАСКАДОВ ДЛЯ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

СЕРГЕЙ ГЛАДЫШЕВ, инженер

В статье описываются возможные топологии каскадов для двунаправленной передачи энергии. В трехкаскадных топологиях в качестве 3-го каскада, соединенного с сетью переменного тока, рассматриваются варианты многоуровневых инверторов.

Энергосбережение и повышение энергоэффективности уже давно вышли на первый план при разработке большинства проектов. Одним из способов решения этих задач является организация режима рекуперации энергии, когда энергия передается с нагрузки в сеть. В качестве примера можно привести торможение электропривода или аккумуляторные батареи ветро- и солнечных электростанций, которые отдают в сеть переменного тока избыток накопленной энергии (см. рис. 1). В этой схеме происходит двунаправленная передача энергии. Если аккумуляторная батарея разряжена и не может заряжаться от других источников, например от солнечных панелей, то ее заряд осуществляется от сети

переменного тока. Выбор режима и управление направлением перемещения энергии производится с помощью системы управления батареями BMS.

На рисунке 2 показана топология силовых каскадов, реализующих структурную схему рисунка 1. Силовые каскады в этой схеме соединены параллельно. Каждый из них может передать энергию в двух направлениях. Поскольку наибольший ток циркулирует в первом низковольтном каскаде, для уменьшения потерь на коммутацию в нем используется топология ZVS-преобразования. Этот каскад при возврате энергии в сеть работает в режиме высокочастотного инвертора, а при получении энергии из сети – в режиме выпрямителя.

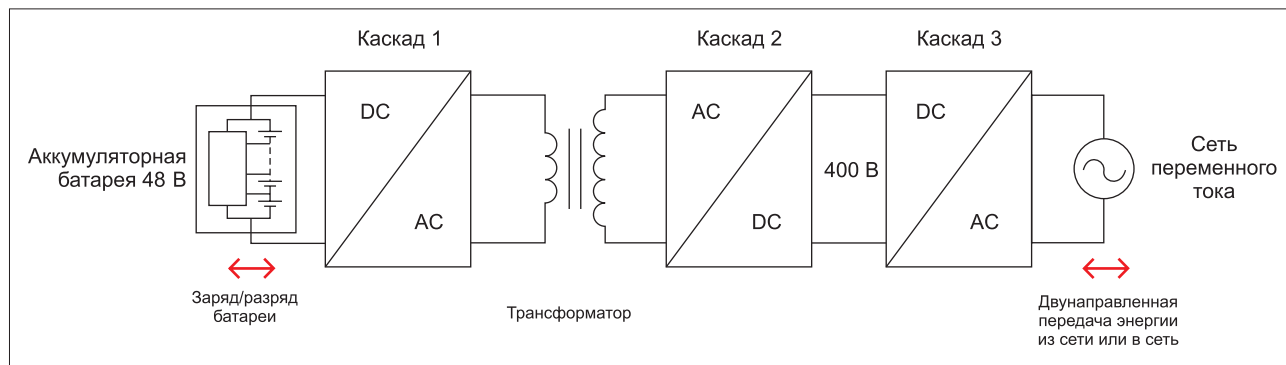


Рис. 1. Структурная схема двунаправленной передачи энергии

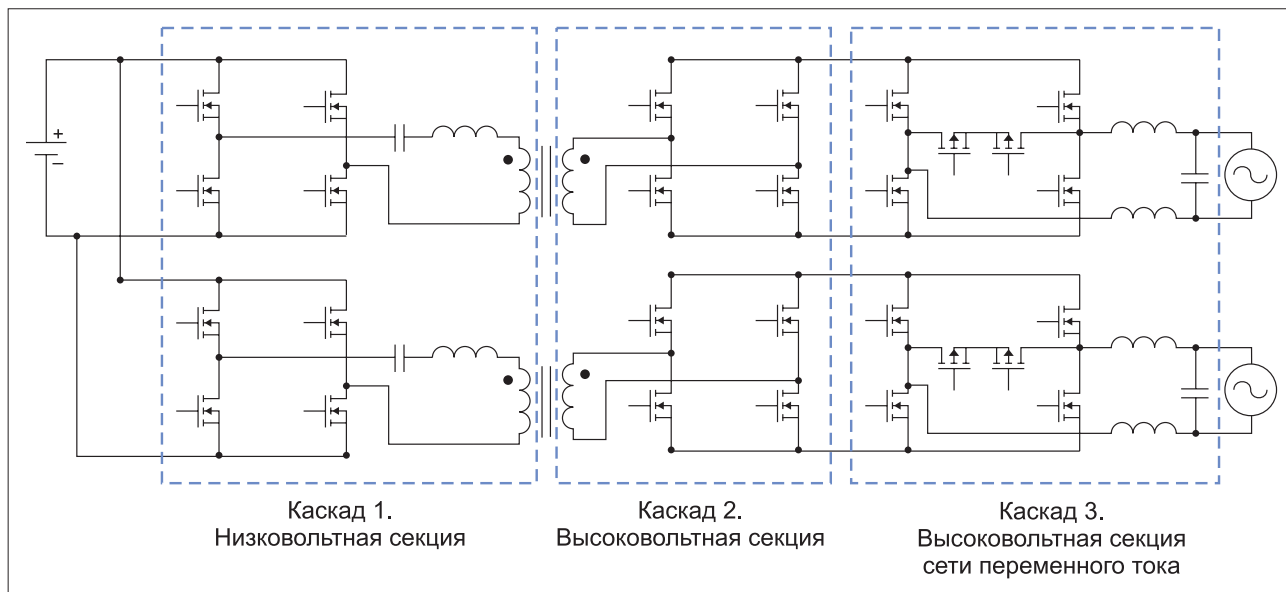


Рис. 2. Топология силовых каскадов, реализующих структурную схему на рисунке 1

Потери на проводимость минимизируются за счет выбора 60-В MOSFET с наименьшим сопротивлением открытого канала $R_{DS(ON)}$. Например, среди семейства OptiMOS MOSFET компании Infineon, крупнейшего на российском рынке производителя силовых полупроводниковых приборов, можно выбрать ключи с сопротивлением $R_{DS(ON)}$ в пределах 1–2 мОм. К тому же, эти ключи допускают параллельное соединение, что может быть необходимым при значительной мощности, возвращаемой в сеть или получаемой из нее.

Второй каскад при возврате энергии в сеть работает в режиме синхронного выпрямителя, а при заряде батареи, когда ток заряда поступает из сети, – в режиме высокочастотного инвертора. Обычно напряжение шины постоянного тока между вторым и третьим каскадом не превышает 400–500 В; при этом циркулирующий в этом каскаде ток гораздо меньше тока первого каскада. Для него подойдут MOSFET с нормируемым напряжением 600–650 В.

В этом диапазоне напряжений начинает проявляться преимущество карбидокремниевых (SiC) FET с широкой запрещенной зоной. При мощностях от нескольких сотен Вт и выше они имеют преимущества над традиционными кремниевыми MOSFET с суперпереходом (SJ). У SiC FET меньшее сопротивление открытого канала, чем у SJ MOSFET. К тому же, это сопротивление у SiC FET имеет меньшую температурную зависимость, чем у SJ MOSFET.

Вновь обратимся за примером к силовым ключам компании Infineon. В ее производственной линейке в семействе CoolSiC можно найти 650-В SiC FET с сопротивлением всего лишь 27 мОм. Этот результат недостижим для SJ MOSFET. Причем, при возрастании температуры ключа с 25 до 100°C сопротивление SiC FET увеличивается в 1,13 раз, а сопротивление SJ MOSFET семейства CoolMOS – в 1,67 раза. Заметим, что при более широкой запрещенной зоне SiC FET уменьшаются и токи утечки при высокой температуре. Добавим, что заряд Q_{OSS} SiC FET и заряд восстановления обратного сопротивления Q_{RR} внутреннего диода также ниже у SiC FET, чем у SJ MOSFET, что свидетельствует о лучших динамических характеристиках SiC FET.

Третий силовой каскад построен по хорошо зарекомендовавшей себя топологии HERIC. При заряде батареи каскад работает в режиме повышения напряжения с корректором коэффициента мощности (ККМ). При поступлении энергии от батареи в сеть каскад с помощью высокочастотной ШИМ-последовательности формирует низкочастотное напряжение частотой сети переменного тока, которое затем поступает на низкочастотный фильтр для получения синусоидального напряжения.

В качестве третьего каскада можно использовать многоуровневый инвертор, который также работает в режиме двунаправленной передачи энергии. Многоуровневые инверторы позволяют уменьшить напряжение силового ключа в высоковольтном каскаде, что, в свою очередь, дает возможность использовать силовые ключи с меньшим нормируемым напряжением, а следовательно, с меньшими потерями на переключение и потерями на проводимость. Заметим, что при колебательных переходных процессах, вызванных крутыми фронтами переключения, на силовых ключах могут возникать перенапряжения.

Для уменьшения потерь разработчикам следует выбрать один из двух вариантов. Первый из них предполагает использование многоуровневых инверторов, а второй – применение 1200-В SiC FET. Если мы снова обратимся к производственной линейке компании Infineon, то увидим в ней несколько 1200-В SiC FET с сопротивлением $R_{DS(ON)}$ в диапазоне 30–60 мОм и очень неплохими динамическими показателями. Например, у 1200-В SiC FET IMBG120R030M1H при индуктивной нагрузке 40 нГн и токе нагрузки 25 А они таковы:

- время задержки на включение $t_{D(ON)}$: 11 нс;
- время нарастания t_r : 14 нс;
- время задержки на выключение $t_{D(OFF)}$: 25 нс;
- время спада t_f : 11 нс.

Выбор одного из двух перечисленных вариантов зависит от многих факторов, в т. ч. экономических; их перечисление и анализ в общем виде едва ли возможен.

Кратко рассмотрим многоуровневые инверторы. Начнем рассмотрение с трехуровневых вариантов нескольких типов. Все они построены либо на основе схемы с четырьмя последовательно соединенными силовыми ключами и двумя диодами, фиксирующими среднюю точку, либо с двумя последовательно соединенными силовыми ключами и с двумя ключами, фиксирующими среднюю точку. Обычно первый вариант носит название NPC (neutral point clamped), а второй вариант – TNPC (transistor neutral point clamped). Схема первого варианта (NPC) представлена на рисунке 3.

При использовании трехуровневых инверторов особое внимание уделяется алгоритму управления силовыми ключами: при некорректной последовательности управляющих импульсов могут возникать аварийные режимы вплоть до полного выхода из строя. В таблице 1 представлены допустимые и недопустимые состояния силовых ключей схемы, показанной на рисунке 3. Как видно из приведенной таблицы, Q1 и Q3, а также пара ключей Q2 и Q4 всегда должны быть включены в противофазе. При нежелательных состояниях ключей могут возникать перенапряжения на диодах или силовых ключах, что зависит от типа нагрузки. В аварийных случаях силовой ключ выйдет из строя.

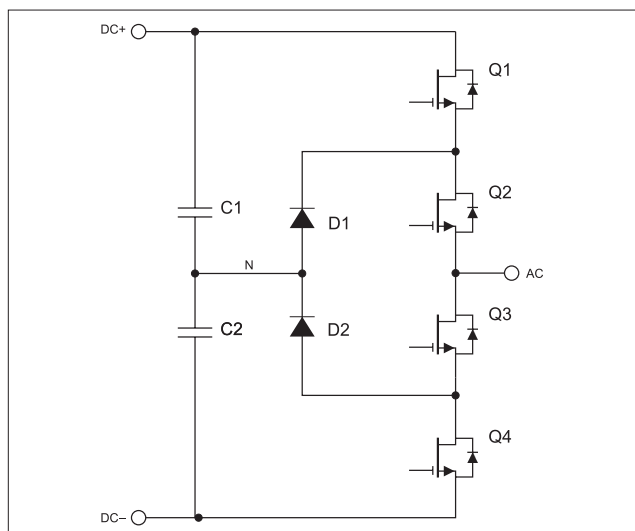


Рис. 3. Схема трехуровневого инвертора варианта NPC

Таблица 1. Допустимые и недопустимые состояния силовых ключей в двухуровневом инверторе NPC

Ключ	Безопасные состояния					Нежелательные состояния					Аварийное состояние					
Q1	0	00	00	00	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Q2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
Q3	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
Q4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1

Таблица 2. Допустимые и недопустимые состояния силовых ключей в двухуровневом инверторе TNPC

Ключ	Безопасные состояния								Аварийное состояние							
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Q1	0	11	00	00	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Q2	00	00	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
Q3	00	00	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
Q4	00	00	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1

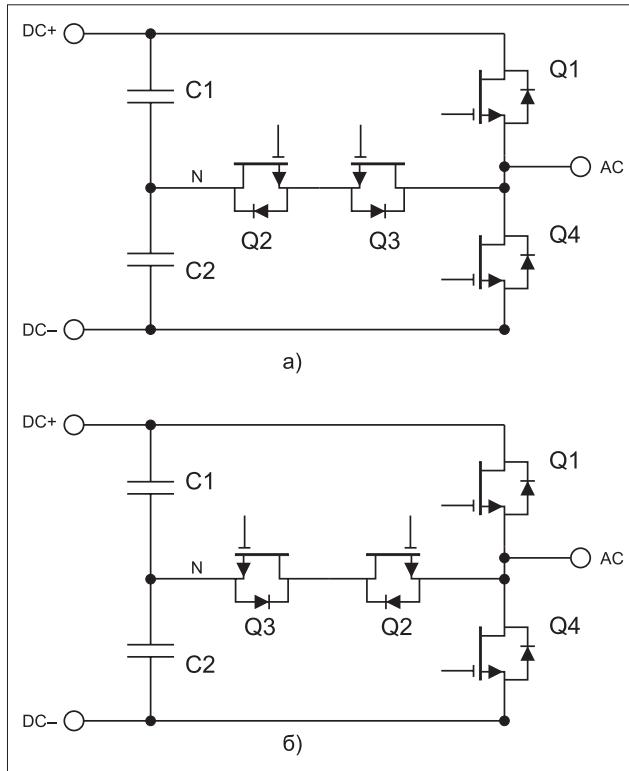


Рис. 4. Схема трехуровневого инвертора типа TNPC с общим: а) истоком; б) стоком

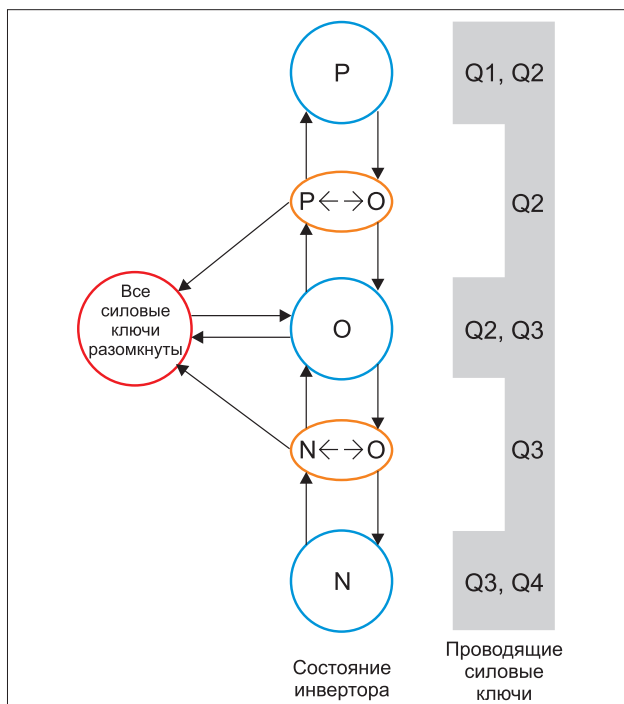


Рис. 5. Состояния трехуровневого инвертора TNPC и им соответствующие состояния силовых ключей

На рисунке 4 показаны силовые каскады двухуровневого инвертора типа TNPC. В этом случае возможна схема

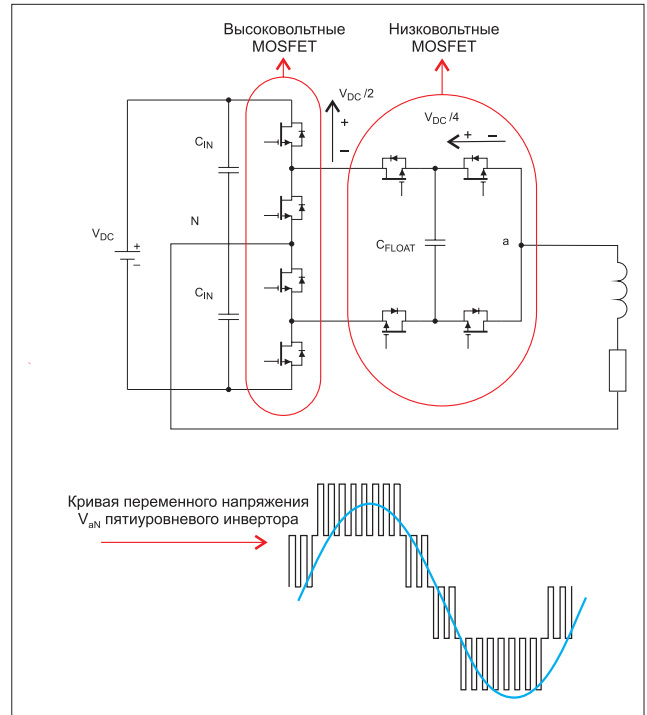


Рис. 6. Схема пятиуровневого инвертора

как с общим истоком (см. рис. 4а), так и с общим стоком (см. рис. 4б). Обе топологии (NPC и TNPC) обеспечивают одинаковую функциональность. К единственному преимуществу топологии TNPC относится ее схожесть с обычным инвертором, что облегчает построение системы управления на готовых компонентах. В таблице 2 показаны возможные состояния силовых ключей трехуровневого инвертора топологии TNPC.

На рисунке 5 показаны состояния трехуровневого инвертора TNPC и им соответствующие состояния силовых ключей. По этой диаграмме можно формировать временную диаграмму управления инвертором. В состояниях P, O, N отпираются силовые ключи Q1 и Q2, Q2 и Q3, Q3 и Q4, соответственно. В переходных состояниях между P и O и между O и N остаются открытыми ключи Q2 и Q3, соответственно. При переходе к состоянию O необходимо мертвое время, в течение которого выключены все силовые ключи. Подобную временную диаграмму легко реализовать с помощью встроенных в микроконтроллер модулей ШИМ.

Помимо рассмотренных выше трехуровневых инверторов, в третьем каскаде топологии, показанной на рисунке 2, можно использовать и инверторы более высоких порядков. Для примера на рисунке 6 показан пятиуровневый инвертор. В нем переменное напряжение V_{aN} между точками а и N состоит из пяти уровней:

- $V_{DC}/2$;
- $V_{DC}/4$;
- 0 В;
- $-V_{DC}/4$;
- $-V_{DC}/2$;

Силовые ключи высоковольтной секции должны быть рассчитаны на напряжение $V_{DC}/2$, а низковольтной секции – на напряжения $V_{DC}/4$. ◻