

Специализированные модули IGBT для 3-уровневых преобразователей

на основе кристаллов 650 В IGBT³ и ECD (Emitter Controlled Diode³) диодов

Чжан СИ (Zhang XI)
Уве ЙЕНСЕН (Uwe JANSEN)
Холгер РУТИНГ (Holger RUETHING)
Перевод: Евгений КАРТАШЕВ

Благодаря своим преимуществам топология 3-уровневых преобразователей со связанной нейтралью (NPC), широко используемая в сверхмощных преобразователях, может применяться в схемах низкой и средней мощности. Использование низковольтных IGBT позволяет улучшить спектральный состав и снизить уровень динамических потерь в применениях, где необходима фильтрация выходного сигнала. К ним относятся, например, источники бесперебойного питания или инверторы солнечных батарей. До настоящего времени 3-уровневая схема могла быть построена на основе как минимум трех дискретных ключей. Объединение в одном модуле элементов, входящих в стойку 3-уровневого инвертора, использование низковольтных чипов в высоковольтной схеме, а также применение простой специализированной схемы управления позволяют существенно повысить потребительские свойства готового решения.

Принципы работы 3-уровневой NPC-схемы

Трехуровневая фазная стойка NPC состоит из четырех последовательно соединенных IGBT с антипараллельными диодами и двух дополнительных диодов Dh и Db, соединяющих промежуточные узлы схемы

с нейтральной точкой DC-шины. Все используемые силовые ключи имеют одинаковое блокирующее напряжение. В зависимости от знака выходного напряжения и тока за один период выходного сигнала в схеме присутствуют 4 различных контура коммутации. При положительных знаках напряжения и тока T1 и Dh работают как по-

нижающий чоппер, при этом T2 проводит выходной ток без коммутации, как показано на рис. 1а. При изменении направления сигнала на отрицательное T4 и Db становятся повышающим чоппером, а ток протекает через T3. В описанных режимах работы только два ключа участвуют в контуре коммутации, который можно назвать «коротким».

Однако в случае отрицательного знака выходного тока при положительном напряжении токочный путь через T3 и Db должен быть переключен в D2 и D1, как показано на рис. 1б. Этот контур содержит четыре ключа, поэтому в дальнейшем он будет называться «длинным». Еще одно возможное состояние схемы также использует длинный путь коммутации. Обеспечение минимального значения распределенных индуктивностей и уровня коммутационных перенапряжений является одной из самых сложных задач при разработке 3-уровневой схемы.

Новые специализированные модули для 3-уровневой NPC-схемы на основе кристаллов IGBT³ и ECD³ с рабочим напряжением 650 В

Интеграция в одном модуле четырех IGBT и шести диодов для сверхмощных применений не представляется возможной. Однако

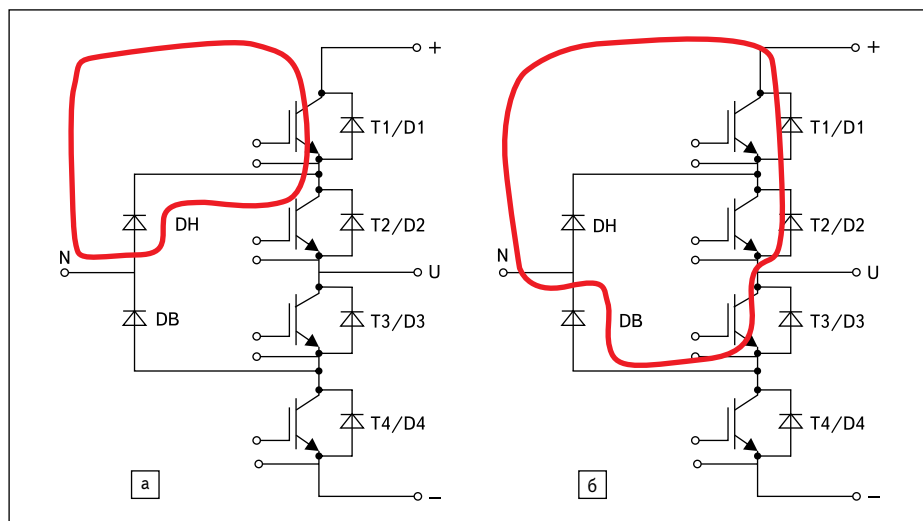


Рис. 1. Контур коммутации 1 фазы 3-уровневой схемы: а) короткий; б) длинный

создание подобных модулей для схем малой и средней мощности вполне целесообразно с учетом того, что все силовые и контрольные терминалы могут быть размещены в стандартном корпусе.

Специализированный модуль малого диапазона мощности создан на базе конструктива EasyPACK 2В (рис. 2), размеры DBC-подложки которого достаточны для размещения одной стойки 3-уровневого инвертора с током до 150 А. Сетка выводов этого модуля обеспечивает высокую гибкость как при подключении внешних терминалов, так и для реализации промежуточных соединений. У данного элемента доступны дополнительные сигнальные подключения эмиттера. Силовые терминалы объединяют до 8 стандартных контактов в параллель, что позволяет обеспечить требуемую плотность тока и минимизировать значение паразитной индуктивности.



Рис. 2. Корпус EasyPACK 2В

Для создания специализированного модуля среднего диапазона мощности оптимальным выбором представляется новый конструктив EconoPACK 4 (рис. 3). Три силовых терминала обеспечивают низкоиндуктивное подключение к разделенной в соответствии с 3-уровневой топологией DC-шине, а два параллельных вывода на противоположной стороне образуют фазный выход. Печатная плата драйвера может быть подключена непосредственно к сигнальным контактам, расположенным на рамке модуля. Силовой ключ на основе EconoPACK 4 предназначен для разработки преобразователя с током до 300 А.



Рис. 3. Корпус EconoPACK 4

Интеграция всех компонентов стойки в одном корпусе позволит существенно снизить распределенную индуктивность схемы, однако использование силовых ключей с обратным напряжением 600 В создает проблемы при решении следующих задач:

- точная балансировка напряжения DC-шины;
- высокая скорость переключения.

Для упрощения процесса разработки и обеспечения необходимого запаса по предельным режимам в модуле использованы улучшенные чипы с блокирующим напряжением 650 В. Новые кристаллы имеют те же потери проводимости и переключения, что и стандартные низковольтные чипы 600 В IGBT³. Неизменными остались также динамические характеристики и границы области безопасной работы (SOA, RBSOA, SCSOA). Это оказалось возможным за счет модернизации структуры выводов чипов IGBT и диодов, при этом их толщина сохранена на уровне 70 мкм. Напряжение насыщения новых 650-В кристаллов также не изменилось, оно составляет 1,45 В/1,7 В при температуре +25...+150 °С, а на динамические потери на частоте 16 кГц приходится примерно 30% общих потерь инвертора. У модернизированных чипов удалось обеспечить низкое значение «хвостового» тока во всем диапазоне рабочих режимов, включая критические [2]. Для диодов найдено оптимальное соотношение между прямым напряжением V_F (1,55 В/1,45 В при +25...+150 °С) и зарядом обратного восстановления Q_{rr} и обеспечен его плавный характер [1].

Проблемы разработки драйвера 3-уровневого инвертора IGBT

Особенности NPC-структуры в диапазоне малых и средних мощностей предъявляют ряд специфических требований к схеме управления, которая должна обеспечивать оптимальные характеристики системы в целом.

Например, высокая частота коммутации. Поскольку диапазон рабочих частот для 3-уровневых схем составляет 16–30 кГц, драйвер должен обеспечивать малое и согласованное время реакции, а также минимальное «мертвое время» t_{dt} . Для новых 650-В кристаллов длительность t_{dt} определяется в первую очередь разбросом времени задержки драйвера [3]. Если «мертвое время» окажется больше периода несущей частоты, это может привести к нелинейности в работе инвертора, что потребует соответствующего изменения алгоритма управления [4, 5].

Особенности топологии:

- Хотя в 3-уровневой схеме применены только низковольтные ключи (600 или 650 В), требования по изоляции должны соответствовать 12-му классу.
- Поскольку необходимое количество драйверов в данном случае в 2 раза больше, чем у классического 2-уровневого инвертора, плата схемы управления и источника

питания должна разрабатываться в соответствии с определенными требованиями по плотности монтажа.

- Защитные функции, такие как детектирование КЗ и отключение при падении напряжения управления (UVLO), должны быть адаптированы для использования в NPC-схеме. Раннее отключение средних IGBT (Т2, Т3 на рис. 1) может привести к отказу устройства, поскольку при этом к ним прикладывается полное напряжение DC-шины, превышающее их блокирующие свойства (границы, оговоренные SCSOA, RBSOA).

Драйверы IGBT новой серии EiceDRIVER удовлетворяют всем указанным требованиям [6, 7]:

- Встроенный микротрансформатор обеспечивает базовую изоляцию для повторяющегося напряжения 1420 V_{peak} .
- Режим активного подавления эффекта Миллера позволяет драйверу работать от одного источника питания на высокой частоте без риска ложного срабатывания [8].
- Использование микротрансформатора позволяет существенно снизить допуски на основные параметры драйвера и разброс времени задержки по сравнению с устройствами управления с оптической изоляцией.
- Встроенная защита по выходу из насыщения (V_{CEsat}) используется для «внешних» ключей, защита «внутренних» IGBT должна быть заблокирована.

Результаты лабораторных тестов

Далее представлены эпюры переключения 3-уровневого модуля EasyPACK 2В. При проведении испытаний использовался драйвер 1ED020112-F, измерение токов производилось датчиками, включенными в цепи питания DC+ и DC-.

Короткий контур коммутации

На рис. 4 приведены эпюры процессов, происходящих в «коротком» контуре при номинальном токе при напряжении DC-шины 400 В и температуре +25 °С. При пиковом уровне 550 В переходные напряжения остаются в допустимых пределах.

Длинный контур коммутации

На рис. 5 приведены эпюры процессов, происходящих в «длинном» контуре при номинальном токе и при тех же режимах работы. Пиковый уровень переходного напряжения составляет 580 В, что всего на 30 В больше, чем в «коротком» контуре, и ниже предельно допустимого значения (650 А).

Первые результаты тестов показывают, что интеграция элементов 3-уровневой стойки в одном модуле позволяет сделать процесс коммутации «длинного» контура близким к процессу, происходящему в «коротком» контуре. Однако для того чтобы сделать переключение IGBT достаточно безопасным на больших токах, необходимо еще больше

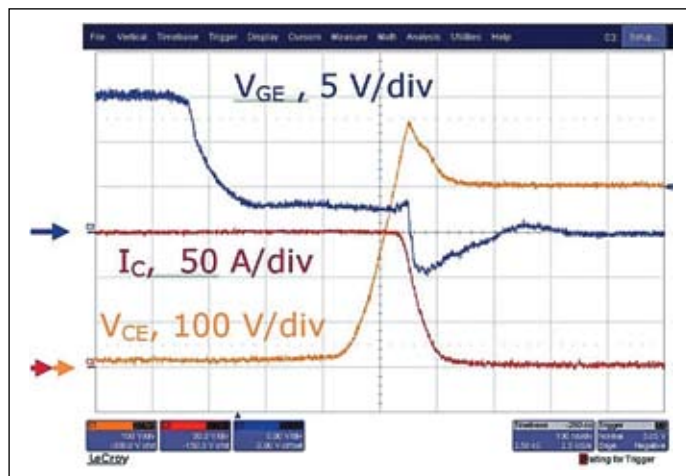


Рис. 4. Эпюры сигналов «короткого» контура коммутации

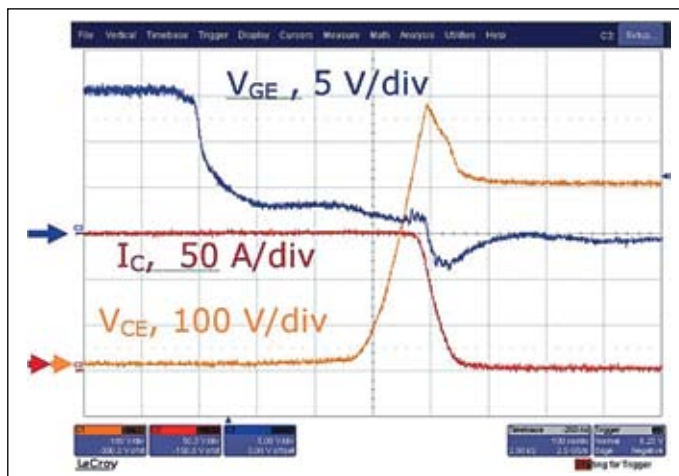


Рис. 5. Эпюры сигналов «длинного» контура коммутации

снизить значение распределенных индуктивностей L_S конструктива. Проще всего это достигается за счет использования нескольких параллельных конденсаторов и многослойной шины, что позволяет снизить расстояние между копланарными силовыми слоями, соединяющими модули и конденсаторы. Кроме того, необходимо учитывать, что в реальных применениях не используются трансформаторы тока в DC-соединениях. Их включение в состав тестовой схемы увеличивает общее значение L_S примерно на 15 нГ, что повышает уровень перенапряжений на 45 В.

Заключение

Объединение элементов 3-уровневой фазной стойки в одном модуле, повышение

блокирующей способности чипов до 650 В, а также применение специализированного драйвера делает использование 3-уровневых схем привлекательным для реализации некоторых типов преобразователей малой и средней мощности. В первую очередь к ним относятся высокочастотные устройства, которые при работе с выходным фильтром должны обеспечивать высокий КПД: UPS с двойным преобразованием и инверторы солнечных батарей.

Литература

1. Datasheet of FS6R06VE3_B2. www.infineon.com
2. Kanschat P., R uthing H., Umbach F., Hille F. 600 V IGBT: A detailed analysis of outstanding static and dynamic properties. Proceedings of ISPSD.
3. Infineon Technologies AG: AN 2007-04. How to calculate and minimize dead time requirement for IGBTs properly. May 2007. www.infineon.com
4. Holmes G., Lipo T. Pulse width modulation for power converters // IEEE Press. Piscataway. 2003.
5. Kalker T., Ackva A., Jansen U. Novel digital controller for induction machines considering the inverter swiching times and a fluctuating DC-link voltage // EPE. 1991. Vol. 2.
6. Strzalkowski B., Jansen U., Schwarzer U. High performance IGBT-driver in microtransformer technology providing outstanding insulation capability // PCIM. 2007.
7. Datasheet 1ED020I12-F. Oktober 2008. www.infineon.com
8. Infineon Technologies AG: AN 2006-01. Driving IGBTs with unipolar gate voltage. Dec. 2005. www.infineon.com