Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT

Перспективные решения

Владислав Филатов

semikron@ptelectronics.ru

На современном этапе развития силовой электроники на IGBT-модулях строятся двух- и трехуровневые инверторы. Последние появились позже, устроены сложнее, не так просты в применении, но при этом имеют ряд преимуществ. В статье подробно рассмотрены инверторы указанных типов, описывается принцип их работы. Приведенная информация касается лишь некоторых частных вопросов, поэтому данный материал не следует рассматривать в качестве руководства по применению IGBT-модулей.

Общие сведения

В простейшем случае чтобы получить на выходе полумостового IGBT-модуля синусоидальное напряжение, достаточно иметь на его входе +V и –V и за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формировать из +V положительную полуволну, а из –V — отрицательную. Так работают двухуровневые инверторы, осциллограмма напряжений схематично показана на рис. 1.

Развитие инженерной мысли привело к появлению трехуровневых инверторов на IGBT-модулях. Две возможные схемотехнические реализации — со связью со средней точкой через диоды и с Т-образным мостом — показаны на рис. 2, 3. Принципиальное отличие трехуровневых инверторов на IGBT-модулях состоит в том, что при ШИМ для формирования выходного напряжения используются все три входных уровня. Иными словами, выход модуля поочередно соединяется с каждым из трех входных напряжений. Осциллограмма напряжений при таком способе коммутации схематически показана на рис. 4. Очевидно, что трехуровневый инвертор позволяет использовать полупроводники с максимальной эффективностью, практически с полной загрузкой по напряжению. Таким образом, возможно применение полупроводников, рассчитанных на меньшее номинальное напряжение. Это важное преимущество перед двухуровневым инвертором, причем данное свойство относится и к транзисторам, и к диодам, используемым в модуле. Кроме того полупроводники с меньшим рабочим напряжением имеют преимущества по всем остальным параметрам, важнейшие из которых — время переключения и падение напряжения в открытом состоянии. Трехуровневые инверторы имеют больший КПД, а в выходном сину-

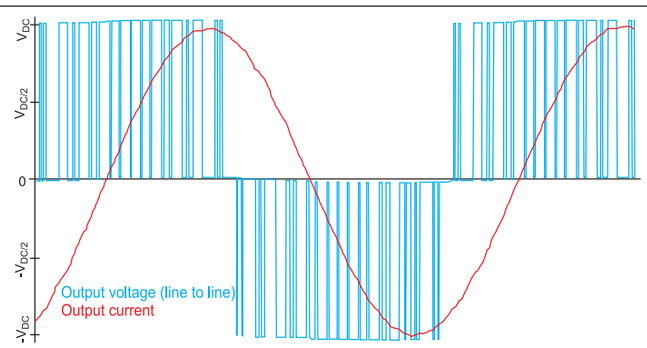

Рис. 1. Осциллограмма напряжений двухуровневого инвертора

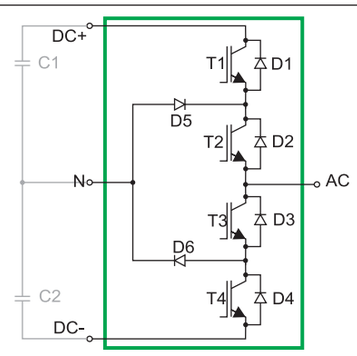

Рис. 2. Схемотехническая реализация трехуровневого инвертора со связью со средней точкой через диоды

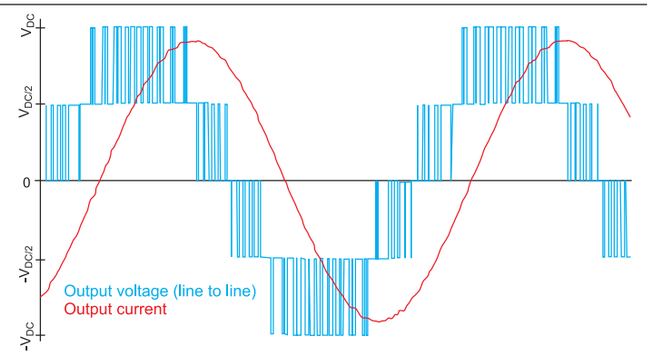

Рис. 4. Осциллограмма напряжений трехуровневого инвертора

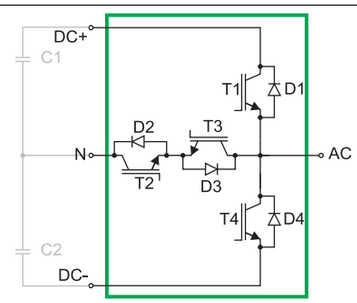

Рис. 3. Схемотехническая реализация трехуровневого инвертора с Т-образным мостом

соидальном сигнале содержится меньше неосновных гармоник, что позволяет сократить размеры фильтров.

Трехуровневый инвертор на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диоды (рис. 2) имеет в своем составе 10 полупроводников: четыре IGBT (T1–T4), по два в верхнем и нижнем плече; четыре диода (D1–D4) для гашения выбросов напряжения, по одному параллельно IGBT; два подтягивающих диода D5, D6, ток через которые может течь из линии 0V в нагрузку или из нагрузки в линию 0V. Для подключения к линиям питания и нагрузке модуль имеет четыре силовых контакта: три входа и один выход.

Трехуровневый инвертор на IGBT-модулях с Т-образным мостом (рис. 3) имеет в своем составе только восемь полупроводников: четыре IGBT (T1–T4) и четыре диода D1–D4. Так же, как и модуль со связью со средней точкой через диоды, модуль с Т-образным мостом имеет четыре силовых контакта, три из которых — входы, предназначенные для подключения к напряжению питания –V, 0, +V, и выход. Разница между двумя конструкциями в том, что в модуле с Т-образным мостом линия питания 0V соединяется с выходом модуля транзисторами. Это дает большую гибкость при реализации ШИМ, а возможность закрыть одновременно все ключи, соединяющие линии питания с нагрузкой, полезна для аварийного отключения. Конструкция IGBT-модуля с Т-образным мостом позволяет использовать полупроводники с различными максимальными рабочими напряжениями. Максимальное напряжение, которое при работе модуля может быть приложено к каждому из транзисторов T2 и T3, вдвое меньше напряжения, которое может быть приложено к транзисторам T1, T4.

Сравнение двухуровневых и трехуровневых инверторов, построенных на IGBT

Трехуровневым инверторам на IGBT-модулях присущ также и ряд недостатков. К примеру, они требуют более сложной схемы управления. Чтобы облегчить задачу выбора IGBT-модуля для конкретного применения, рассмотрим все «за» и «против» для каждого из решений.

Сравнение двух- и трехуровневых инверторов на IGBT-модулях:

- Для достижения такого же уровня неосновных гармоник в выходном синусоидальном сигнале для трехуровневых инверторов требуется меньшая частота переключения; как следствие — сокращаются потери при переключении.
- При работе на одинаковых частотах у трехуровневых инверторов уровень неосновных гармоник в выходном синусоидальном напряжении меньше.
- Для достижения одинакового уровня неосновных гармоник в выходном синусоидальном сигнале при одинаковой частоте переключения трехуровневый инвертор требует меньшие фильтры на выходе.
- В состав трехуровневых инверторов входят четыре транзистора, в то время как двухуровневый содержит только два. Таким образом, трехуровневый инвертор требует более сложной схемы управления, и энергопотребление его вдвое больше.

Сравним трехуровневые инверторы на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диоды с двухуровневыми:

- Количество полупроводников, через которые одновременно протекает электрический ток, в трехуровневых инверторах удвоено. Это увеличивает потери энергии.
- При одинаковых питающих напряжениях максимальные рабочие напряжения полупроводников в трехуровневых инверторах могут быть меньше. Например, если напряжение питания +V, –V 750 В, то для коммутации устройств можно использовать двухуровневый инвертор с максимальным рабочим напряжением 1200 В либо трехуровневый с максимальным рабочим напряжением 650 В. На полупроводниках в трехуровневом инверторе при этом напряжение составит лишь 375 В (750/2). Конечно, для этого необходимо, чтобы 750-В источник питания был двуполярным и имел среднюю точку. Иначе использование трехуровневых инверторов невозможно.

Проведем сравнение трехуровневого инвертора на IGBT-модулях с Т-образным мостом с двухуровневым:

- Количество проводников, через которые одновременно протекает электрический ток, либо такое же, как в двухуровневом инверторе (когда в трехуровневом открыт один из транзисторов T1 («верхний») или T4 («нижний»)), либо удвоено, когда ток течет через транзисторы, соединяющие выход модуля со средней точкой.

Алгоритм управления трехуровневым инвертором на IGBT-модулях

Управление трехуровневым инвертором на IGBT-модулях сложнее, чем двухуровневым. В двухуровневом два ключа, то есть четыре возможных состояния: оба ключа открыты, оба закрыты, открыт только верхний, открыт только нижний. Допустимыми являются только три из них: когда ключи окажутся открытыми одновременно, произойдет короткое замыкание. Если не считать режима, когда оба ключа закрыты, то есть модуль просто выключен, управление двухуровневым инвертором сводится к тому, что в каждый момент времени должен быть открыт либо верхний, либо нижний ключ. В трехуровневых инверторах четыре ключа, т. е. 16 возможных состояний. Моменты времени, в которые следует открывать ключи T2 и T3, соединяющие выход модуля с уровнем 0V питающего напряжения, рассчитываются исходя из фазы переменного напряжения на выходе.

На рис. 5 показана таблица возможных состояний ключей для трехуровневых инверторов со связью со средней точкой через диоды. Зеленым выделены безопасные состояния, желтым — потенциально опасные, красным — недопустимые.

T1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
T2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
T3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
T4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
state	allowed						potentially destructive					destructive				

Рис. 5. Таблица возможных состояний ключей для трехуровневых инверторов

Безопасные состояния:

- все ключи закрыты, модуль выключен;
- открыт один из ключей T2, T3;
- одновременно открыта любая пара ключей (T1–T2, T2–T3, T3–T4).

Потенциально опасные состояния:

- открыт один из ключей T1, T4 либо оба одновременно;
- открыта одна из пар ключей (T1–T3, T2–T4).

Недопустимые состояния:

- Одновременно открыта любая тройка ключей: T1, T2, T3; T2, T3, T4. В первом случае происходит короткое замыкание линии +V на 0V, во втором — короткое замыкание линии 0V на –V.
- Одновременно открыта любая тройка ключей: T1, T2, T4; T1, T3, T4. В первом случае напряжение с размахом +V –V оказывается приложено к ключу T3, во втором — к T2.
- Одновременно открыты все четыре ключа. Происходит короткое замыкание.

Таблица возможных состояний ключей для трехуровневых инверторов с Т-образным мостом показана на рис. 6. Зеленым выделены безопасные состояния, красным — недопустимые.

Безопасные состояния:

- все ключи закрыты, модуль выключен;
- открыт любой из четырех ключей;
- одновременно открыта любая пара ключей (T1–T2, T2–T3, T3–T4).

Недопустимые состояния:

- Одновременно открыта любая пара ключей: T1–T3; T2–T4; T1–T4. Происходит короткое замыкание в первом случае линии +V на 0V, во втором — линии 0V на –V, в третьем — +V на –V.
- Одновременно открыты все четыре ключа, происходит короткое замыкание.

T1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
T2	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
T3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
T4	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
state	allowed								destructive							

Рис. 6. Таблица возможных состояний ключей для трехуровневых инверторов на IGBT-модулях с Т-образным мостом

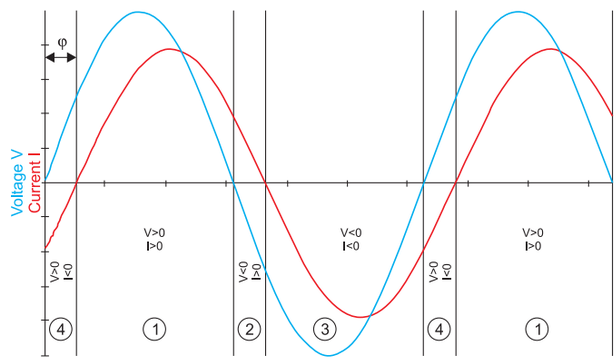

Рис. 7. Диаграмма токов и напряжений на индуктивной нагрузке, подключенной к выходу инвертора, преобразующего постоянное напряжение в переменное

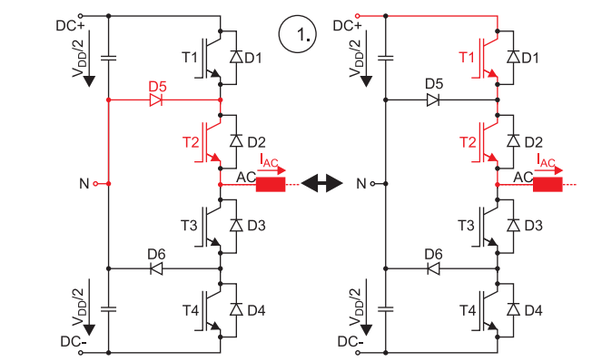

Рис. 8. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диод в области 1

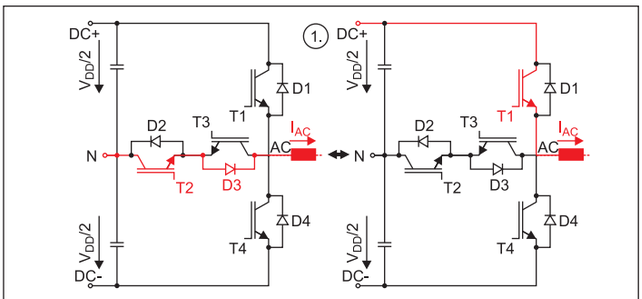

Рис. 9. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях с Т-образным мостом в области 1

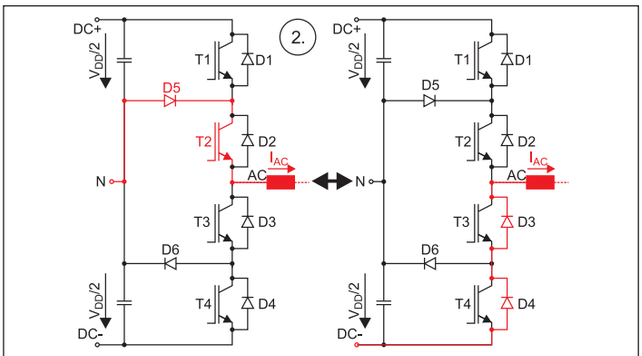

Рис. 10. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диод в области 2

Работа IGBT-модуля при формировании синусоидального напряжения

Типовая схема инвертора, преобразующего постоянное напряжение в переменное, состоит из IGBT-модуля, работающего в режиме ШИМ, и RLC-фильтра, напряжение на выходе которого близко к синусоидальному. На рис. 7 показана диаграмма токов (красная линия) и напряжений (синяя линия) на индуктивной нагрузке, подключенной к выходу такого инвертора. Предполагается, что в нагрузке есть и омическая составляющая, поэтому ток и напряжения изображены сдвинутыми друг относительно друга не на 180°, а на меньший угол. Частота ШИМ много больше частоты изображенного на диаграмме переменного напряжения. За каждый период выходного напряжения ключи в IGBT-модуле успевают переключиться многократно. С точки зрения работы ключей в IGBT-модуле и протекания через них токов, диаграмму можно разделить на четыре области. В областях 1 и 3 ток и напряжение находятся в фазе, в областях 2 и 4 — в противофазе. В каждой из областей переключения IGBT-модуля, за счет которых и создается ШИМ, происходят в соответствии с таблицей.

В работе трехуровневого инвертора на IGBT-модулях можно выделить ряд закономерностей. В модуле с Т-образным мостом ток во время ШИМ поочередно течет то через два последовательно соединенных

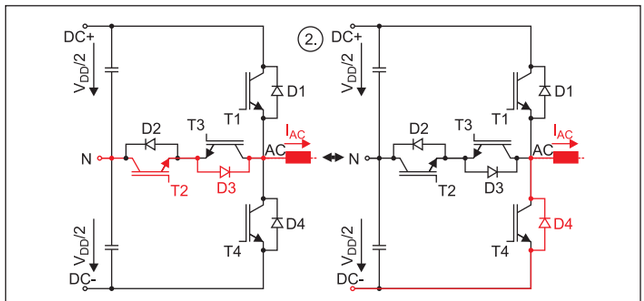

Рис. 11. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях с Т-образным мостом в области 2

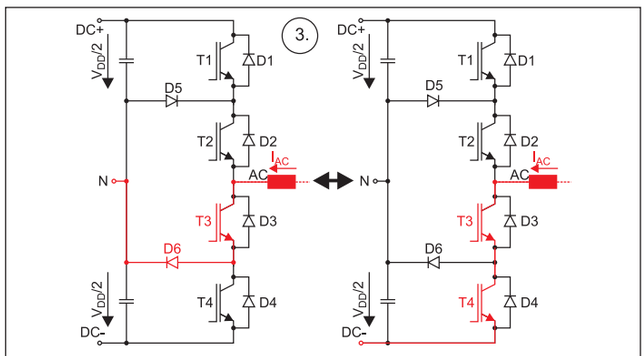

Рис. 12. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диод в области 3

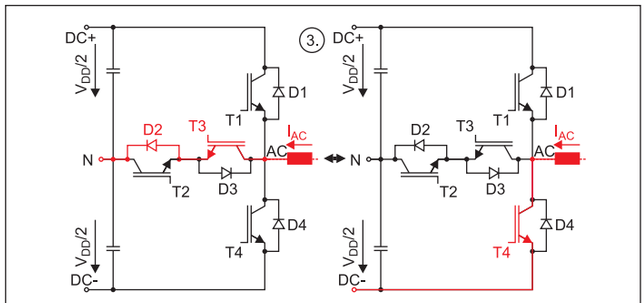

Рис. 13. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях с Т-образным мостом в области 3

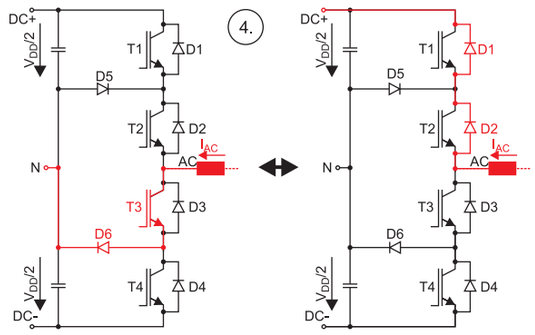

Рис. 14. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях со связью со средней точкой через диод в области 4

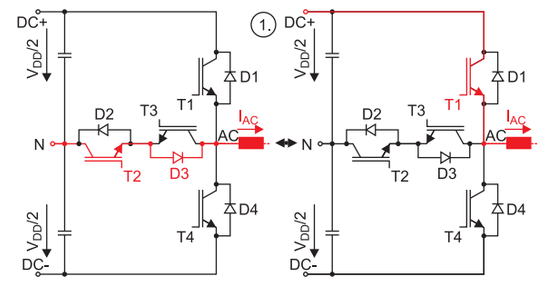

Рис. 15. Переключения в трехуровневом инверторе на IGBT-модулях с Т-образным мостом в области 4

полупроводника, то через один. В модуле со связью со средней точкой через диод ток всегда течет через два последовательно соединенных полупроводника. По этой причине потери энергии в первом случае несколько меньше. А во втором случае при переключении ток пропадает/появляется лишь в одной паре полупроводников, если выходные ток и напряжение одного знака (см. таблицу). Если же работа модуля происходит в области, где ток и напряжение имеют разный знак, при каждом переключении появление/исчезновение тока затрагивает четыре полупроводника. Отметим, что описанный алгоритм работы и схема протекания токов справедливы только в случае работы IGBT-модуля на индуктивную нагрузку. При работе на чисто омическую нагрузку схема существенно упростилась бы.

Таблица. Схема переключений IGBT-модулей в двух- и трехуровневых инверторах

Области переключения IGBT-модуля	Двухуровневый инвертор	Трехуровневый инвертор на IGBT-модулях	
		Со связью со средней точкой через диод	С Т-образным мостом
Ток и напряжение >0	«верхний» ключ↔ «нижний» диод	T1–T2↔D5–T2 (рис. 8)	T1↔D3 (рис. 9)
Напряжение <0, ток >0		D5–T2↔D3–D4 (рис.10)	T2–D3↔D4 (рис. 11)
Ток и напряжение <0	«нижний» ключ↔ «верхний» диод	T3–T4↔T3–D6 (рис.12)	T4↔T3–D2 (рис. 13)
Напряжение >0, ток <0		T3–T4↔T3–D6 (рис.14)	T4↔T3–D2 (рис. 15)

Литература

1. http://www.semikron.com/skcompub/ko/AN11001-rev03_3L_NPC_TNPC_Topology.pdf
2. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors. ISLE Verlag. 2011.
3. Lamp J. IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification. Semikron Application Note. AN-7006. Nuremberg. 2008.
4. Staudt I. et al. Numerical loss calculation and simulation tool for 3L NPC converter design. PCIM. Nuremberg. 2011.
5. Sprenger M. et al. Characterization of a new 1.2kV IGBT 3L-NPC phase-leg module for low voltage applications. EPE 2011.