

Основное отличие между стандартными IGBT и RB-IGBT — обратная запирающая способность

Эффективность преобразования энергии и снижение потерь мощности — основные задачи силовой электроники. В развитии трехуровневых инверторов создание технологии фиксированной нейтральной точки стало одним из важнейших шагов в повышении эффективности преобразования. Представленные силовые модули созданы по новой топологии T-Type NPC для минимизации потерь мощности на основе IGBT 6-го поколения и уникальных RB-IGBT.

**Даниель Хофманн
(Daniel Hofmann)**

**Перевод:
Тимур Паньков**

timur.pankov@fujielectric-europe.com

Введение

Ввиду роста потребления электроэнергии повышение эффективности преобразования и снижение мощностных потерь становится все более важной задачей. Одной из наиболее эффективных конфигураций преобразователей мощности для устройств постоянного тока является многоуровневая топология. Наиболее распространенным решением для повышения ее эффективности является трехуровневый преобразователь с топологией Neutral-Point-Clamped (NPC). Трехуровневая топология позволяет снизить потери на переключении, а также уменьшить размеры фильтра путем расширения спектрального состава выходного напряжения и увеличения частоты переключения.

Fuji исследовали тип силовых модулей NPC, называемый T-Type NPC. В этом поколении силовых модулей используются IGBT с обратной запирающей способностью (Reverse Blocking IGBT, RB-IGBT) для ограничения тока по нейтральной шине. Это решение снижает потери на переключении, уменьшает разме-

ры фильтров, достигая тем самым снижения потерь на проводимости.

В статье рассматриваются основные особенности кристаллов RB-IGBT и модулей на их основе, а также возможные применения для ветрогенераторов, фотоэлементов и систем электропривода.

Трехуровневые топологии

Решение с RB-IGBT от Fuji Electric — не единственный путь создания трехуровневой топологии. Две хорошо известные топологии, называемые NPC1 и NPC2, имеют сопоставимые характеристики с трехуровневым решением Fuji (рис. 1).

NPC1

Преимущество этой топологии в том, что кристаллы должны выдерживать только половину приложенного напряжения за счет последовательного соединения двух IGBT-кристаллов. Кроме того, напряжение пробоя V_{ces} всех ключей (VT1–VT4) составляет только половину от такого же напряжения в двухуровневом инверторе, что также приводит к снижению потерь на отдельных кристаллах. Недостатком топологии является использование большого количества ключей и, как следствие, множества компонентов. Напряжение насыщения во включенном состоянии увеличивается, так как все IGBT включены последовательно. Потери во включенном состоянии каждого отдельного IGBT вносят свой вклад в общие потери и приводят к тому, что суммарные потери во включенном состоянии выше, чем в двухуровневом инверторе.

NPC2

Эта топология имеет меньшее число компонентов, чем NPC1, и больше похожа на T-Type от Fuji. Вместо RB-IGBT в этой топологии используются два кристалла IGBT и два диода. Один IGBT присоединен последовательно с диодом в обратном направлении и антипараллельно с другим IGBT и диодом. Преимуществом этой топологии является снижение потерь во включенном состоянии ввиду использования только одного IGBT в последовательном включении и, следовательно,

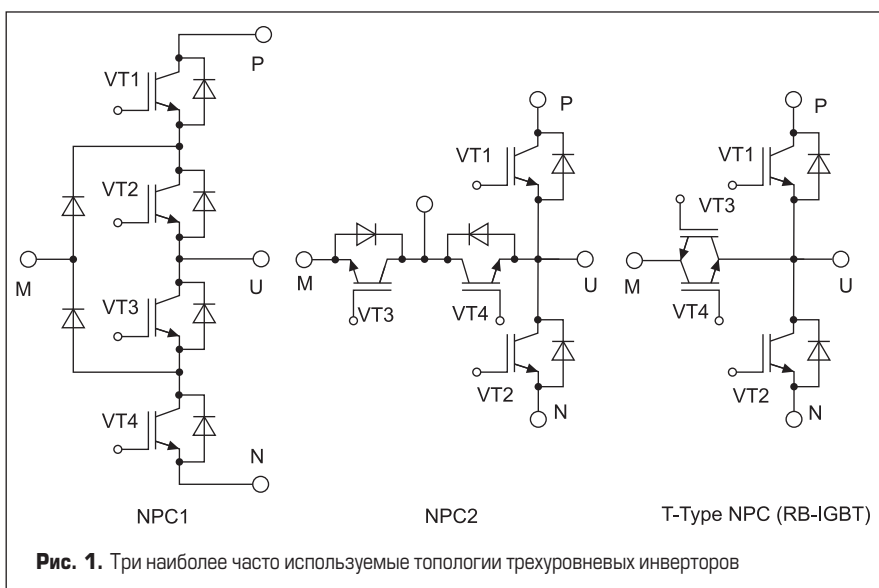


Рис. 1. Три наиболее часто используемые топологии трехуровневых инверторов

меньшее число компонентов. Поэтому основные кристаллы IGBT должны держать полное напряжение «коллектор–эмиттер». Вследствие этого кристаллы должны быть более высоко-го класса по напряжению, что предполагает повышенные потери на переключении. VT1 и VT2 имеют такое же пробивное напряжение, как и в двухуровневом инверторе без схемотехнических особенностей.

T-Type

Решение T-Type от Fuji имеет некоторые преимущества перед NPC2 относительно числа компонентов и снижения потерь во включенном состоянии благодаря только одному ключу, включенному последовательно. Дополнительным преимуществом этой топологии является снижение потерь вследствие использования RB-IGBT. Один RB-IGBT может заменить стандартный IGBT и диод, включенные последовательно, что приводит к уменьшению габаритов и снижению потерь. Недостатком топологии, как и у NPC2, является необходимость большого пробивного напряжения VT1 и VT2, как в двухуровневой конфигурации.

Если говорить о потерях разных топологий в зависимости от частоты переключения, то до 30 кГц T-Type имеет очевидное преимущество по сравнению со всеми другими топологиями (рис. 2). Свыше 30 кГц потери на переключения у T-Type становятся выше, чем у конфигурации NPC1.

Трехуровневый модуль представляет собой однофазный модуль в корпусе M403 с основанием 110x80 мм с оптимизированным расположением терминалов для конструирования T-Type-преобразователей. На рис. 3 показан внешний вид и электрическая схема модуля с силовыми терминалами U, N, M и P сверху и сигнальными выводами с одной из сторон модуля. На электрической схеме на рис. 3 показаны два силовых ключа VT1 и VT2 (V-серия IGBT 6 поколения Fuji) и ограничительные ключи VT3 и VT4 (RB-IGBT), соединенные антипараллельно. Например, для T-Type-модуля 4MBI300VG-120R-50 применяются силовые ключи класса 1200 В/300 А. Благодаря тому что только половина постоянного напряжения ограничивается от выхода U до нейтральной точки M, требуются RB-IGBT класса 600 В/300 А. Применение RB-IGBT-кристаллов в режиме двунаправленного переключения приводит к снижению потерь при коммутации. Стандартный IGBT не имеет достаточной стойкости к обратному напряжению и нуждается в применении последовательно включенного FWD. Иначе при приложении обратного напряжения между коллектором и эмиттером вдоль поверхности кристалла IGBT будет протекать большой ток утечки.

Главное отличие между стандартными IGBT и RB-IGBT состоит в обратной запирающей способности RB-IGBT. IGBT-структуры, изготовленные по NPT-технологии, были усовершенствованы введением дополнительной области изоляции p-n-переходом. Как показано на рис. 4б, RB-IGBT имеет область изоляции p-n-переходом, которая отсутствует у стандартного IGBT (рис. 4а). Поверхность разлома, или боковая поверхность образуются при производстве кристалла. Кристаллы отделяются друг

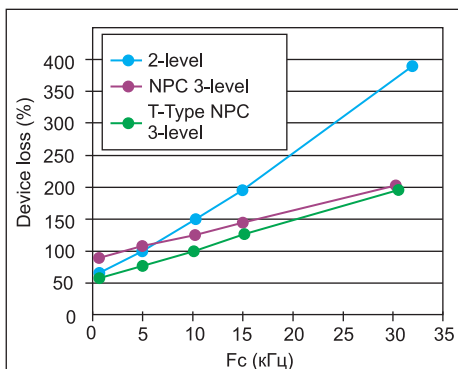


Рис. 2. Потери в модуле в зависимости от частоты переключения для двух- и трехуровневых NPC и T-Type конфигураций

от друга путем разлома с высокой плотностью дефектов кристаллической решетки. На боковой поверхности постоянно генерируются носители заряда от кристаллических дефектов, захватываются электрическим полем и приводят к повышенному току утечки при отрицательном напряжении на коллекторе. Вследствие приложенного обратного напряжения от эмиттера к коллектору генерируются дырки. Дополнительные дырки будут созданы границами ячейки, коллектором и p+ -областью. Вследствие генерации суммарный ток течет через базу в эмиттер и имеет место большой ток утечки.

При приложении положительного напряжения «затвор–эмиттер» ток утечки может быть снижен, как видно на рис. 5. Пока приложено $V_{ge} = +15$ В, RB-IGBT включен и генерация потока электронов благодаря обратному напряжению уменьшается. Остается весьма малый ток утечки. Характеристики пробоя транзисторов показаны на рис. 5. Синяя кривая показывает поведение RB-IGBT с закороченной цепью «затвор–эмиттер». Стойкость к прямому и обратному напряжению

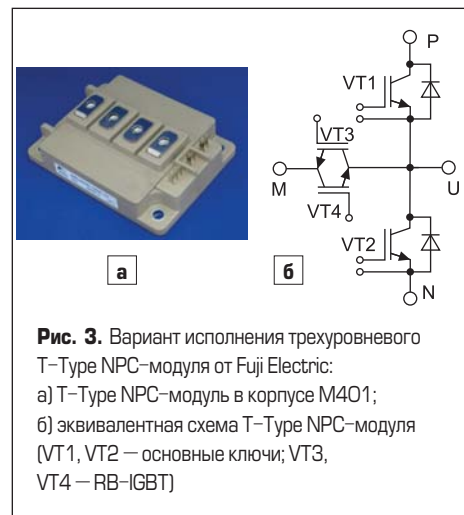


Рис. 3. Вариант исполнения трехуровневого T-Type NPC-модуля от Fuji Electric: а) T-Type NPC-модуль в корпусе M401; б) эквивалентная схема T-Type NPC-модуля (VT1, VT2 – основные ключи; VT3, VT4 – RB-IGBT)

«коллектор–эмиттер» соответствует 600-В кристаллу с некоторым значением обратного напряжения. Кривая, окрашенная в голубой цвет, показывает улучшение и расширение обратной запирающей способности RB-IGBT, когда положительное напряжение 15 В приложено между затвором и эмиттером. В дополнение красным показана характеристика NPT-IGBT также с $V_{ge} = 15$ В. По ней видно, что стандартный IGBT имеет недостаточную запирающую способность.

Несмотря на сильные различия, IGBT имеют одинаковую структуру активной зоны. Таким образом, кривые скорости включения и спада V_{on} выглядят аналогично. В случае переключения на обратное напряжение после прямого тока RB-IGBT ведет себя так же, как и стандартный IGBT, и кривые обратного восстановления похожи. Касательно зависимости между напряжением насыщения и энергией потерь при переключении для RB-IGBT и стандартного IGBT с последовательным диодом, преимущества можно увидеть на рис. 5

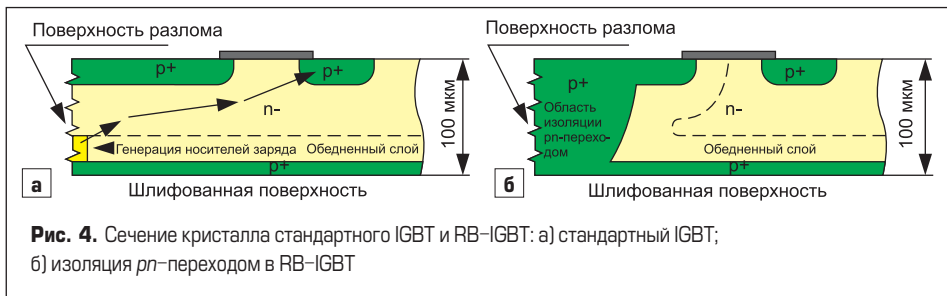


Рис. 4. Сечение кристалла стандартного IGBT и RB-IGBT: а) стандартный IGBT; б) изоляция p-n-переходом в RB-IGBT

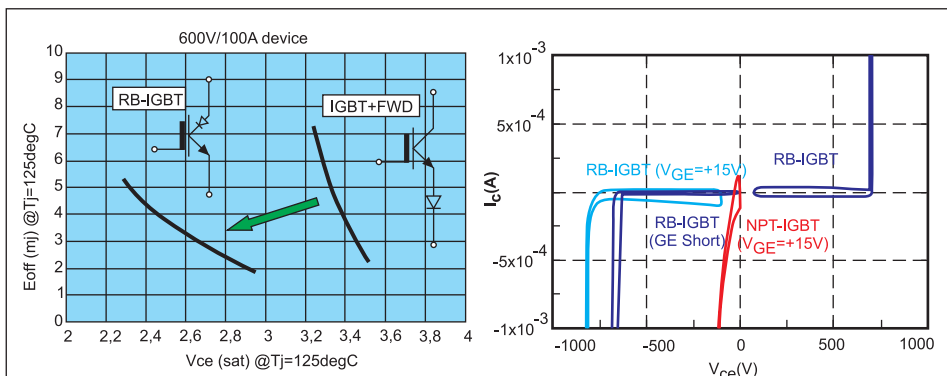


Рис. 5. Вольт–амперные характеристики в области пробоя, а также зависимость энергии включения от напряжения насыщения стандартного IGBT и RB-IGBT

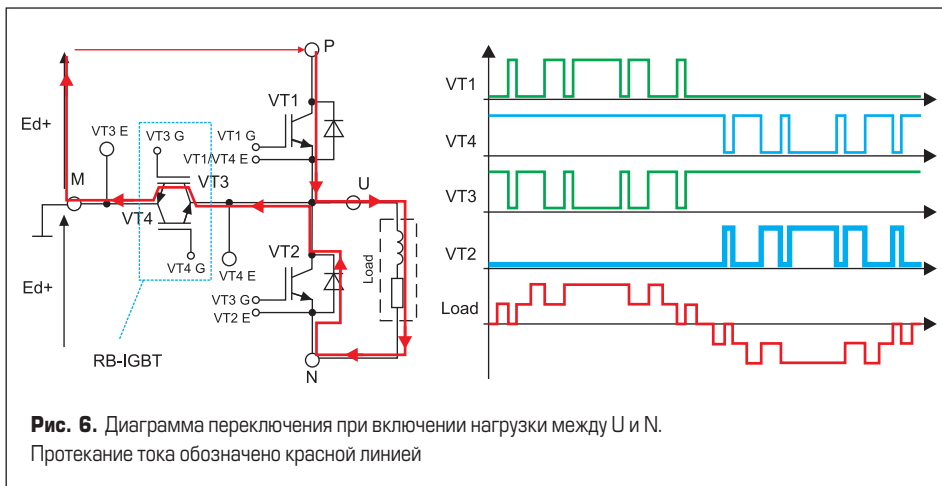


Таблица 1. Последовательность переключения для режимов А и В

Режим переключения	Нагрузка	VT1	VT2	VT3	VT4
А	М-У	SW	OFF	OFF	ON
	М-У	OFF	SW	ON	OFF
В	Р-У	OFF	OFF	SW	ON
	У-Н	OFF	OFF	ON	SW

Примечания: SW — подключен к драйверу и на затвор подается импульсный сигнал; ON — напряжение на затворе +15 В; OFF — напряжение на затворе -15 В; $V_{cc2} = V_{cc1}/2$.

VT4 включен, в то время как VT2 выключен весь период времени. Результирующая выходная мощность имеет три уровня (0, 1/2 и 1 — полная мощность) и профиль ближе к синусоидальному, чем в двухуровневой топологии.

Графики переключения RB-IGBT

На экспериментальной установке были записаны кривые включения, выключения, обратного восстановления и режим короткого замыкания RB-IGBT. В режиме включения, выключения и обратного восстановления задавались следующие условия: $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{cc} = 400\text{ В}$, $V_{ge} = \pm 15\text{ В}$, $R_g = +8,2/-39\text{ Ом}$. Со снаббером $C_s = 1,84\text{ мкФ}$, $L_s = 34\text{ нГн}$. Для режима короткого замыкания в экспериментальной установке задавались следующие условия: $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{cc} = 400\text{ В}$, $V_{ge} = +15/-0\text{ В}$, $R_g = +8,2/-100\text{ Ом}$. Со снаббером $C_s = 0,67\text{ мкФ}$.

Включение RB-IGBT происходит быстрее, чем выключение, если смотреть в одинаковом масштабе времени. Импульс тока через диод около 190 А, что не превышает норму. Кривая обратного восстановления RB-IGBT показана на рис. 7, где основной ключ IGBT VT1 с $R_{gon} = 10\text{ Ом}$ переключается, пока VT4 RB-IGBT открыт. На рис. 7 видно, что ключи RB-IGBT выдерживают режим короткого замыкания. Стойкость к короткому замыканию RB-IGBT 10 мкс.

Заключение

Новая технология, предложенная Fuji Electric, уникальна и очень многообещающая. В таких применениях, как фотоэлектрические преобразователи или системы бесперебойного питания, также используется эта топология и подтверждается высокая эффективность этой конфигурации. Модельный ряд силовых модулей для построения трехуровневых инверторов приведен в таблице 2.

Таблица 2. Модельный ряд трехуровневых силовых модулей

Наименование	Основные ключи	RB-IGBT
4МВі400VG-060R-50	600 В/400 А	600 В/400 А
4МВі300VG-120R-50	1200 В/300 А	600 В/300 А
4МВі200VG-170R-50 (на стадии разработки)	1700 В/200 А	1200 В/200 А

(для модуля 600 В, 100 А при температуре +125 °С). Кривые выключения для RB-IGBT и для IGBT с дополнительным диодом очень похожи. RB-IGBT имеет пониженное напряжение насыщения по сравнению с IGBT с последовательным диодом ввиду отсутствия диода. Это обстоятельство способствует минимизации энергетических потерь при использовании двустороннего ключа.

Режим переключения RB-IGBT

Существует три режима переключения трехуровневого модуля. В таблице 1 показана последовательность работы ключей в зависимости от выбранного режима переключения. Включенный ключ означает, что к затвору приложено постоянное напряжение +15 В. Соответственно, при выключенном ключе на затвор подано постоянное напряжение -15 В. Когда ключ обозначен «SW», это означает, что на затвор подан управляющий сигнал.

- Режим А. Режим А используется, когда нагрузка включена между М и U. VT1 переключается, пока VT3 выключен, и VT4 включен и используется в качестве FWD. В этом режиме VT2 выключен для ограничения нагрузки. В случае инверсии VT3 включается, пока VT4 выключен, и VT2 снова включается. VT1 выключен весь период времени.
- Режим В. В режиме В один из RB-IGBT переключается, пока остальные транзисторы выключены. Сначала VT3 включается, затем VT4 используется как FWD. Чтобы ток утечки T4 был как можно ниже, VT4 должен быть включен. В первую очередь нагрузка должна быть включена между Р и U, затем VT3 переключается, пока VT4 включен и используется как FWD.

Процесс переключения IGBT в однофазной испытательной установке приведен на рис. 6. Нагрузка включена между U и N. VT1 и VT2 работают, и протекающий в цепи ток обозначен красным цветом.

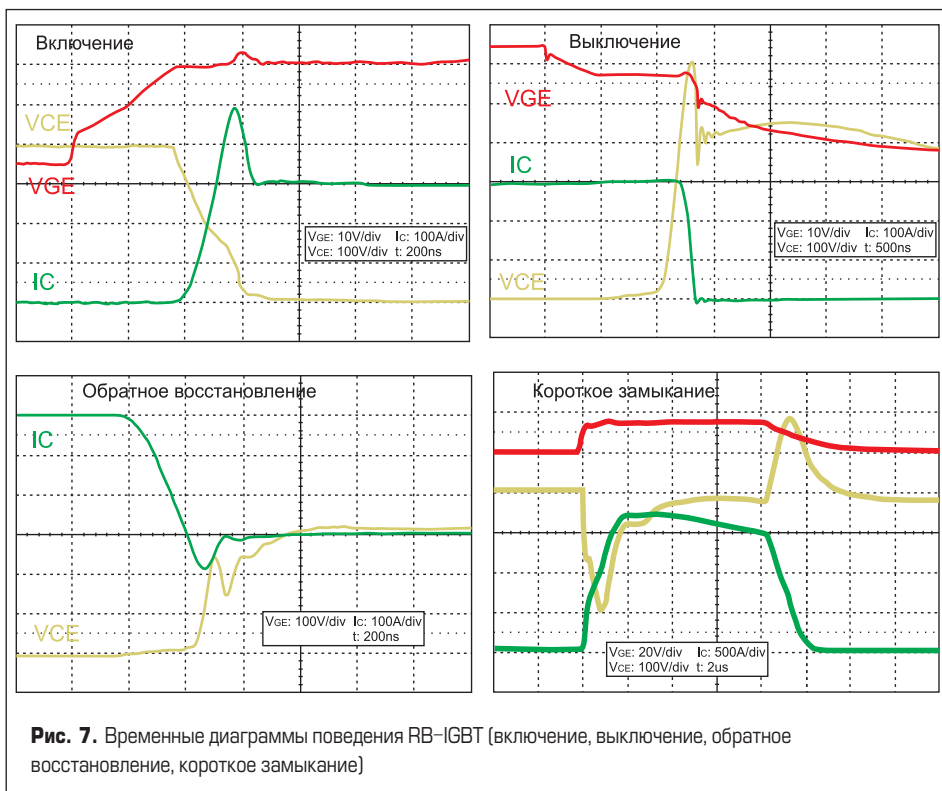


Рис. 7. Временные диаграммы поведения RB-IGBT (включение, выключение, обратное восстановление, короткое замыкание)