

Цифровые драйверы Firstack

для мощных высоковольтных инверторов

В последние годы мировая угледобывающая промышленность вновь вступила в период бурного развития, что вызвало увеличение спроса на приводы с рабочим напряжением 3300 В АС. Из-за суровых условий эксплуатации угольной шахты, ограниченного пространства и сложностей с техническим обслуживанием к таким устройствам предъявляются повышенные требования по надежности, габаритам и уровню интеллектуализации.

Данная статья продолжает серию публикаций, посвященных Firstack Technology и опубликованных в журнале «Силовая электроника» [1, 2].

Лэй Хонг (Lei Hong)¹

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

akolpakov@unirec.ru

Силовые модули IGBT и драйверы являются ключевыми компонентами мощных инверторов. На раннем этапе развития силовой электроники доминировали аналоговые схемы управления затворами, но по мере развития технологий все более популярными становятся цифровые устройства благодаря их более высокой надежности и степени интеллектуализации. Различия обеих концепций подробно описаны в [2].

Для реализации трехуровневой топологии NPC в инверторах с рабочим напряжением 3300 В АС компания Firstack разработала новое поколение интеллектуальных драйверов. Эти приборы решают проблему синхронизации отключения внутреннего и внешнего IGBT, эффективно ограничивают пик перенапряжения на внутреннем транзисторе, а также сокращают время задержки выключения высоковольтных IGBT. Кроме того, цифровые устройства

управления затворами Firstack упрощают задачу технического обслуживания привода благодаря использованию технологии интеллектуальной передачи данных.

Введение

Приводы с выходным напряжением 3300 В АС (рис. 1) используются для плавного пуска и регулирования скорости шахтных скребковых транспортеров, ленточных конвейеров, перегрузочных машин. Мощность этих устройств находится в диапазоне 500 кВт — 2,6 МВт [3], что относит их к высоковольтному силовому электронному оборудованию. Как правило, для создания таких инверторов применяется трехуровневая схема NPC I-типа (далее — NPC-I) на модулях IHV IGBT с рабочим напряжением 4500 В (рис. 2).



Рис. 1. Приводы с выходным напряжением 3300 В АС: а) шахтный привод 3300 В АС, б) двигатель с установленным на нем приводом

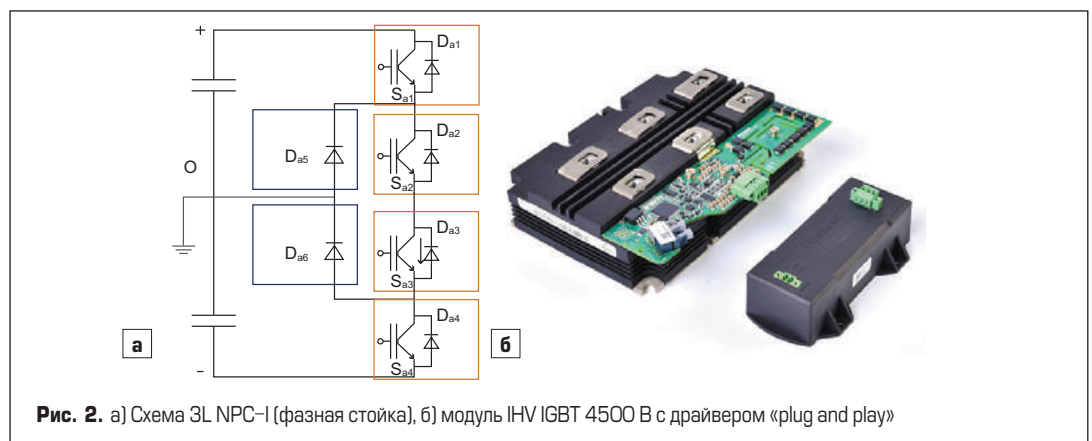


Рис. 2. а) Схема 3L NPC-I (фазная стойка), б) модуль IHV IGBT 4500 В с драйвером «plug and play»

¹Hangzhou Firstack Technology

Разработка инвертора 3L NPC-I с применением мощных IGBT требует решения следующих вопросов:

- Синхронизация моментов выключения внутреннего и внешнего IGBT. При отключении внешний транзистор всегда имеет приоритет перед внутренним, особенно при срабатывании защиты от короткого замыкания или снижения напряжения управления (UVLO). Время срабатывания защиты от КЗ по выходу из насыщения (DESAT) аналогового драйвера слишком велико, в результате чего внутренний IGBT будет находиться в состоянии перегрузки длительное время, превышающее допустимые пределы.
- Высокое перенапряжение при отключении внутреннего IGBT. Трехуровневая топология намного сложнее, чем традиционная двухуровневая, внутренний ключ работает в длинном контуре коммутации, кроме того, конструктив HV отличается большой паразитной индуктивностью, что может привести к пробое модуля из-за высокого перенапряжения при отключении. В некоторых системах из-за ограниченного пространства невозможно добавить дополнительные демпфирующие конденсаторы, что создает дополнительные проблемы, связанные с перенапряжением.
- Большая задержка переключения HV IGBT. Как правило, высоковольтные модули имеют очень высокое значение T_{d_off} , что усложняет настройку «мертвого времени» и контроль формы сигнала.
- Требования к техническому обслуживанию. Шахтные приводы с напряжением 3300 V AC обычно устанавливаются в шахтном стволе. При отказе силового модуля решающее значение имеет скорость обнаружения неисправности и устранения ее причины. Высокое качество и оперативность технического обслуживания дают преимущества производителям оборудования в условиях все более жесткой конкуренции.

Таблица. Состояния схемы 3L NPC

S1	S2	S3	S4	Шестнадцатеричный код	Выход
1	1	0	0	C	+1
0	1	0	0	4	+1
0	1	1	0	6	0
0	0	1	0	2	0
0	0	1	1	3	-1
0	0	1	0	2	0
0	1	1	0	6	0
0	1	0	0	4	+1
1	1	0	0	C	+1

Проблемы применения драйверов IGBT в трехуровневых инверторах

Синхронизация выключения внутреннего и внешнего IGBT

Как показано на рис. 3, трехуровневая схема 3L NPC-I содержит шесть силовых ключей в каждой фазе: четыре IGBT (S1, S2, S3, S4) и два диода (D5, D6). Существует несколько сочетаний и возможных режимов коммутации IGBT, при этом состояния ключей S1–S4 будут обозначены как 0 (выключение) и 1 (включение) соответственно. Положительный потенциал выходной шины представлен как +1, а отрицательный –1. Возможные комбинации режимов (при условии, что ток замыкается внутри инвертора) представлены в таблице.

Как видно из таблицы, инвертор 3L NPC-I может находиться в пяти состояниях, включая установившиеся (C, 6, 3) и переходные (4, 2), где в установившемся режиме реализуется принцип комплементарности ключей S1 и S3, а также S2 и S4. Для анализа проблемы временной синхронизации выбран режим 3 (S1–S4: 0011). При этом, как показано на рис. 3а, IGBT S3 и S4 открыты, ток течет от AC-выхода к шине DC–, потенциал выхода равен –1. Возникает вопрос: какой транзистор следует заблокировать в первую очередь при штатном отключении и срабатывании защиты — внутренний IGBT S3 или внешний IGBT S4?

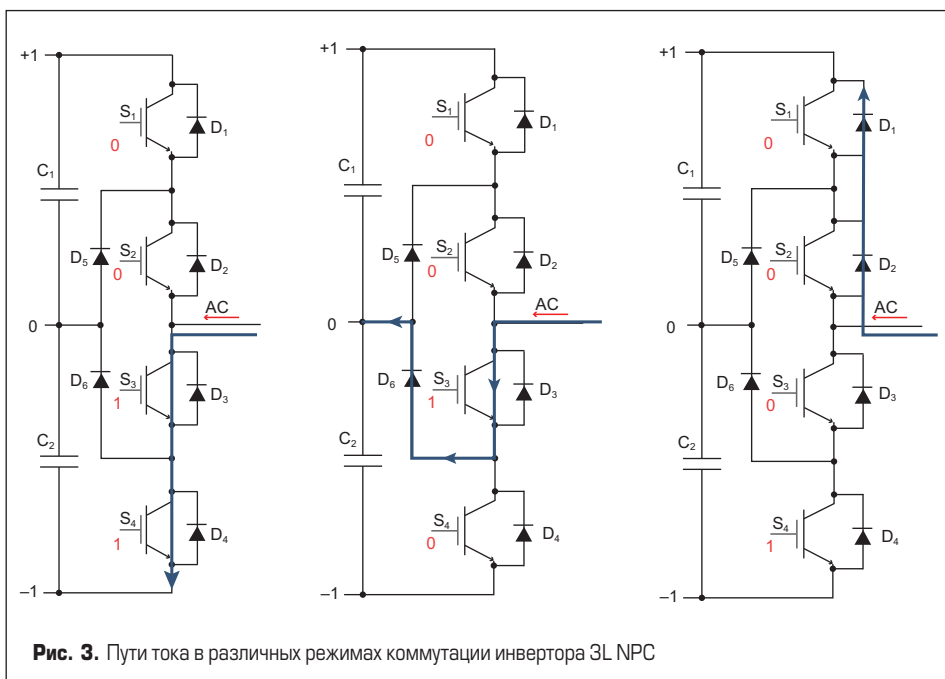


Рис. 3. Пути тока в различных режимах коммутации инвертора 3L NPC

На рис. 3б показано, что сначала блокируется внешний IGBT (S4 = 0), после чего ток течет обратно в среднюю точку 0 через D6 (потенциал AC-шины = 0). Затем закрывается внутренний IGBT (S3 = 0), после чего он будет находиться под напряжением $V_{DC}/2$.

На рис. 3в сначала отключается внутренний IGBT (S3 = 0), после чего ток течет через D1, D2 к шине DC+ (потенциал AC-выхода = +1). Затем блокируется внешний IGBT (S4 = 0), и напряжение на внутреннем модуле S3 становится равным V_{DC} в результате чего он может выйти из строя из-за перенапряжения.

Проведенный анализ показывает, что для безопасной работы 3L NPC-инвертора внешний транзистор должен блокироваться раньше, чем внутренний, как при нормальных условиях эксплуатации, так и при срабатывании защиты от перегрузки. В штатном режиме работы нужный алгоритм отключения реализуется управляющим контроллером, основные проблемы с синхронизацией возникают в условиях перегрузки. Для защиты от КЗ в обычных аналоговых схемах управления затвором, как правило, используется мониторинг напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$ IGBT (DESAT) в сочетании с функцией активного ограничения (active clamping). Формирование сигнала ошибки ERROR помогает управляющему контроллеру (CPU) координировать время отключения. В этом случае при срабатывании защиты внутренний IGBT блокируется независимо от состояния внешнего ключа, что может привести к его пробое из-за отсутствия синхронизации.

Схема active clamping внутреннего IGBT ограничивает напряжение на DC-выводах, одновременно управляющий контроллер должен получить информацию о состоянии КЗ. После этого CPU немедленно блокирует сначала внешний ключ, а затем внутренний, чтобы обеспечить временную синхронизацию, исключаящую перенапряжение на внутреннем IGBT.

В описанных условиях традиционный аналоговый драйвер столкнется с рядом проблем.



Рис. 4. КЗ-тест высоковольтного модуля с 3L-топологией

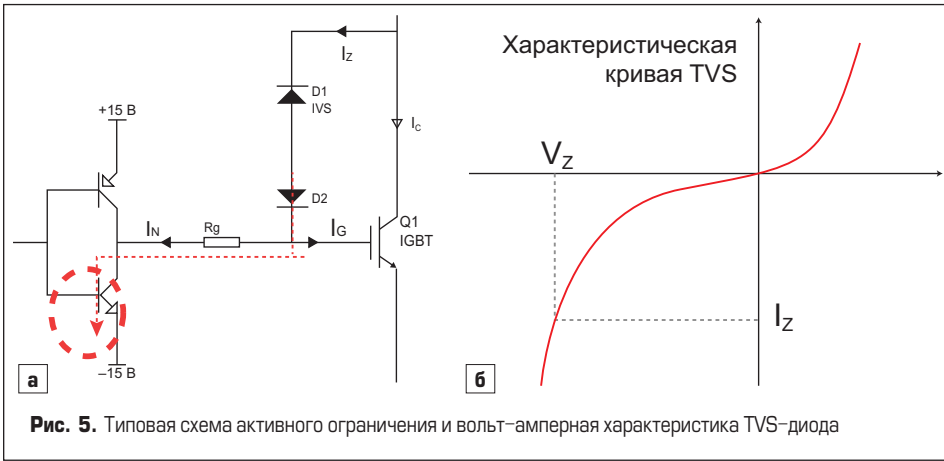


Рис. 5. Типовая схема активного ограничения и вольт-амперная характеристика TVS-диода

Прежде всего, время срабатывания схемы защиты после обнаружения состояния DESAT может достигать 8 мкс, в экстремальных случаях это приведет к тому, что внутренний IGBT будет находиться в состоянии КЗ в течение недопустимо долгого времени. На рис. 4 показаны эпюры КЗ-теста модуля IHV 4500 В/1200 А, управляемого от стандартного драйвера PI [2], в трехуровневом инверторе NPC-I (S3 — внутренний IGBT, S4 — внешний IGBT). В соответствии с требуемым алгоритмом управления, сначала блокируется внешний ключ, а затем внутренний, но при этом S4 находится в состоянии перегрузки 14 мкс, что превышает безопасный предел (10 мкс) и ведет к отказу.

Кроме того, в стандартных драйверах используется базовая схема Active Clamping, где напряжение ограничения определяется характеристиками TVS-диодов в цепи «коллектор-затвор» (рис. 5а) и имеет достаточно большой разброс. Когда уровень перенапряжения при отключении IGBT превышает пороговое значение, TVS-супрессоры переходят в состояние пробоя и в затвор подается ток, повышающий напряжение V_{GE} и частично открывающий IGBT. При этом силовой транзистор находится в линейном режиме и рассеивает очень большую энергию в течение времени ограничения.

В процессе запирания IGBT нижний транзистор выходного двухтактного каскада драйвера подключен к источнику питания -15 В, что создает низкоимпедансный путь для тока TVS и приводит к его большим флуктуациям.

Согласно вольт-амперной кривой, показанной на рис. 5б, резкие колебания тока TVS сопровождаются соответствующими колебаниями напряжения.

Чтобы устранить проблемы, присущие базовой технологии активного ограничения, компания PI представила усовершенствованную схему DA2C (Dynamic Advanced Active Clamping), показанную на рис. 6а. По сравнению с традиционным решением ток TVS в момент пробоя измеряется блоком CS, и в зависимости от этого настраивается управление выходным каскадом драйвера. Если ток TVS меньше установленного порогового значения, двухтактная схема на рис. 6 подключается к источнику питания -15 В.

Если же ток TVS превышает заданный порог, выходной каскад драйвера отключается от источника -15 В, что устраняет проводимость по низкоимпедансному пути. Это позволяет контролировать состояние супрессоров и, таким образом, эффективно управлять напряжением ограничения, то есть делать его уровень более точным. На рис. 6б представлена тестовая форма сигналов при срабатывании защиты от короткого замыкания аналогового драйвера PI, управляющего модулем FF1400R12IP4. Уровень ограничения напряжения V_{CE} в момент блокировки IGBT фиксируется на уровне около 750 В.

Усовершенствованная схема динамического активного ограничения DA2C эффективно подавляет перенапряжение и решает проблему флуктуаций тока TVS. Однако этот процесс

сопровождается многократным включением и выключением затвора в течение очень короткого периода времени, что приводит к нежелательной генерации электромагнитных колебаний внутри модуля. В режиме ограничения ток и мощность рассеяния TVS-диодов по-прежнему велики, и если схема работает в течение длительного времени, это создает серьезные проблемы с точки зрения ресурса и надежности.

Перенапряжение при отключении внутреннего IGBT

Как показано на рис. 7а, полумостовой каскад инвертора 3L NPC-I работает в режиме 6 (состояние ключей S1~S4: 0110), в котором ток протекает от AC-выхода к средней точке O через S3, D6. В этот момент при переключении в режим 4 (состояние S1~S4: 0100) ток будет проходить от AC-шины через S2, D1 к шине DC+. При отключении S3 (рис. 7б) процесс коммутации идет через элементы C1, D1, S2, S3, D6, которые образуют длинный контур с большой паразитной индуктивностью L_S .

Трехуровневый инвертор, созданный с применением IHV IGBT, содержит шесть модулей IGBT, соединенных многослойными шинами (рис. 7в). Контур коммутации, проходящий через силовые ключи и шину, имеет высокую распределенную индуктивность. Измерения показывают, что величина L_S может достигать 200 нГн — это намного больше рекомендуемого значения (20–30 нГн). В результате уровень перенапряжения при отключении IGBT получается аномально высоким, способным вывести модуль из строя.

В некоторых приложениях, имеющих жесткие ограничения по габаритам, невозможно установить дополнительный демфирующий конденсатор, поэтому традиционные аналоговые драйверы могут полагаться только на функцию Active Clamping. При использовании базовой технологии активного ограничения фактический результат будет зависеть от колебаний напряжения питания, температуры и некоторых других факторов. Из-за большой паразитной индуктивности режим ограничения может активизироваться и в нормальных условиях коммутации, что создает риск отказа TVS-супрессоров и модулей IGBT из-за высокого рассеяния энергии.

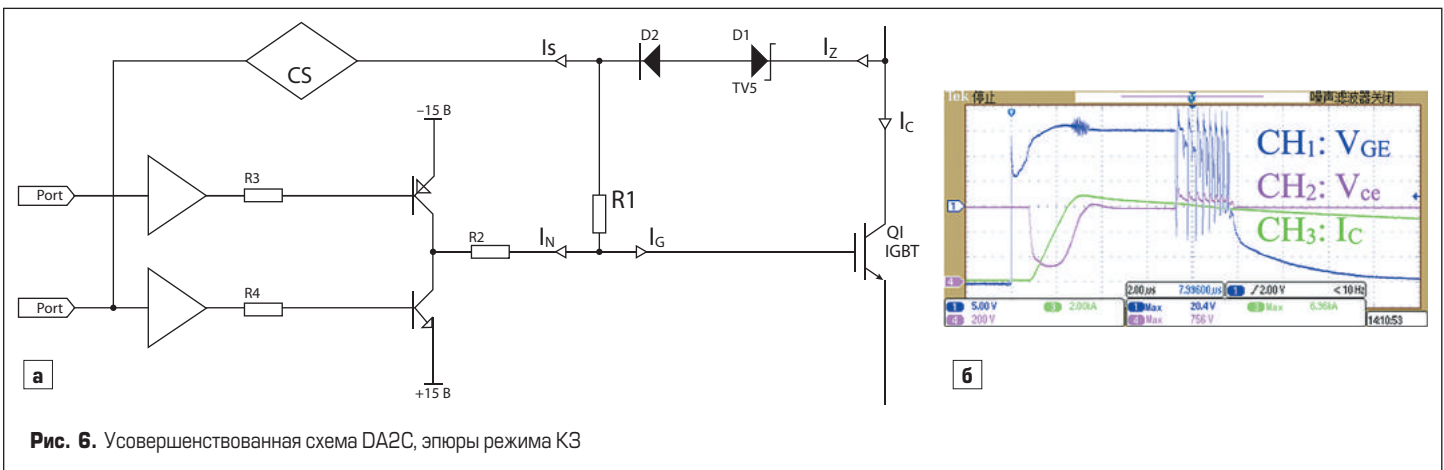


Рис. 6. Усовершенствованная схема DA2C, эпюры режима КЗ

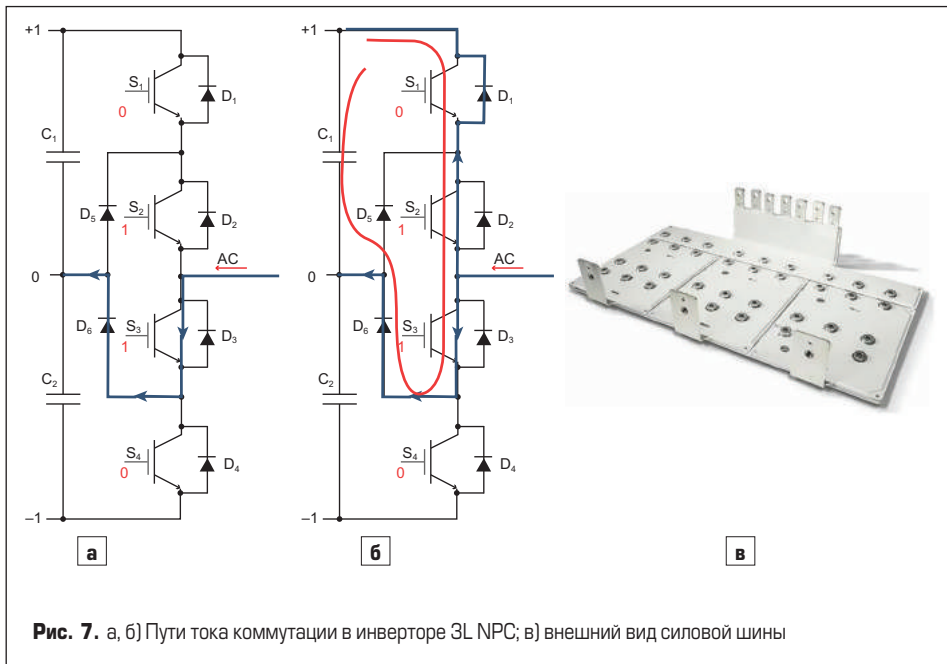


Рис. 7. а, б) Пути тока коммутации в инверторе 3L NPC; в) внешний вид силовой шины

Большая задержка переключения высоковольтных IGBT

Модуль IHV IGBT, используемый в инверторе 3300 V AC, относится к высокотехнологичным приборам промышленной силовой электроники, продуктов такого класса на рынке достаточно мало. Поэтому в условиях растущей потребности в мощном высоковольтном оборудовании предложение будет отставать от спроса.

Вследствие технологических особенностей для силовых IGBT характерны большие задержки выключения, например, типовое значение $T_{d,off}$ модуля 4500 В/1200 А составляет около 7 мкс (рис. 8). При этом от системы управления обычно требуется, чтобы длительность «мертвого времени» T_{di} не превышала 4 мкс.

Послепродажное обслуживание, потребность в интеллектуальных технических средствах

Трехуровневый инвертор 3L NPC содержит 12 активных ключей, то есть вдвое больше, чем традиционная двухуровневая схема. При этом по каждому IGBT необходимо анализировать не менее двух аварийных режимов: снижение напряжения управления (UVLO) и короткое замыкание (SC), то есть в общей сложности 24 сценария неисправности. Традиционный драйвер не способен их различить, что создает

большие трудности при разработке или анализе состояния устройства в полевых условиях, поскольку система способна генерировать только обобщенный сигнал неисправности.

В настоящее время большинство выпускаемых устройств управления затворами, используемых в инверторах 3300 V AC, — это стандартные аналоговые драйверы. Отсутствие информации о конкретном сценарии отказа затрудняет послепродажное обслуживание и не соответствует пожеланиям производителей оборудования, которые стремятся проводить ремонт техники с помощью интеллектуальных технических средств.

Ключевые технологии интеллектуального цифрового драйвера IGBT

Для решения описанных проблем при разработке инверторов с применением высоковольтных IGBT компания Firststack создала новое поколение интеллектуальных драйверов класса plug-and-play: — HV1027P. В отличие от традиционных аналоговых устройств управления затворами HV1027P выполняет ряд важных функций, описанных далее.

Быстрый мониторинг КЗ по di/dt

Временная синхронизация работы внутреннего и внешнего IGBT, особенно в режи-

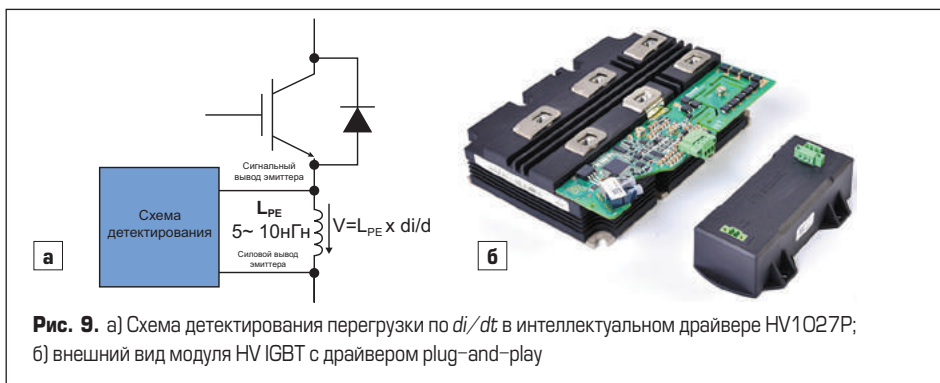


Рис. 9. а) Схема детектирования перегрузки по di/dt в интеллектуальном драйвере HV1027P; б) внешний вид модуля HV IGBT с драйвером plug-and-play

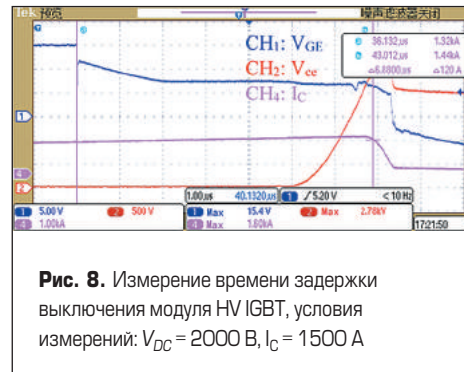


Рис. 8. Измерение времени задержки выключения модуля HV IGBT, условия измерений: $V_{DC} = 2000$ В, $I_C = 1500$ А

ме КЗ, чрезвычайно важна. Чем раньше прерывается состояние перегрузки, тем надежнее и безопаснее эксплуатация инвертора, в том числе трехуровневого. В интеллектуальном драйвере HV1027P использована технология быстрого обнаружения состояния КЗ, основанная на измерении скорости коммутации di/dt (рис. 9а).

Корпус модуля имеет паразитную индуктивность L_{PE} между силовым и сигнальным выводом эмиттера IGBT, ее типовая величина около 5–10 нГн. Фронт тока di/dt , возникающий при открывании IGBT, создает на L_{PE} перепад напряжения dV :

$$dV = L_{PE} \times di/dt.$$

Скорость коммутации тока в нормальном режиме работы IGBT обычно не превышает 10 А/мкс, а в состоянии КЗ величина di/dt может достигать 1000 А/мкс. Результирующая разница в градиенте напряжения dV оказывается достаточно большой, поэтому драйвер может оперативно определить состояние перегрузки и обеспечить быструю и эффективную защиту. На рис. 9б показан модуль IGBT с драйвером plug-and-play и дополнительным блоком, устанавливаемым на силовом терминале E и предназначенным для детектирования di/dt и защиты от КЗ.

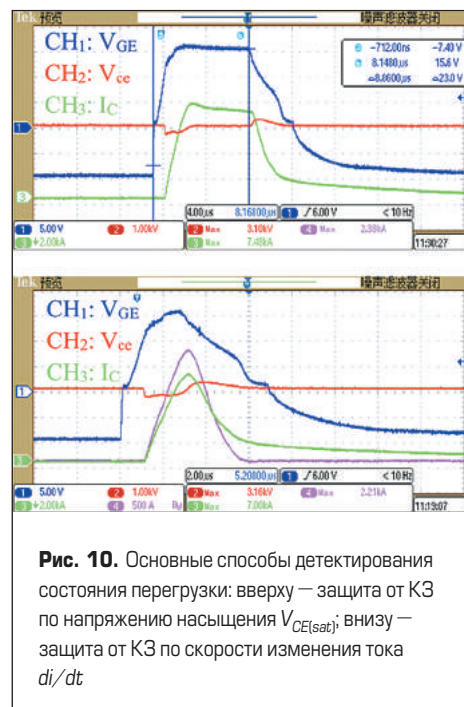


Рис. 10. Основные способы детектирования состояния перегрузки: сверху — защита от КЗ по напряжению насыщения $V_{CE(sat)}$; внизу — защита от КЗ по скорости изменения тока di/dt

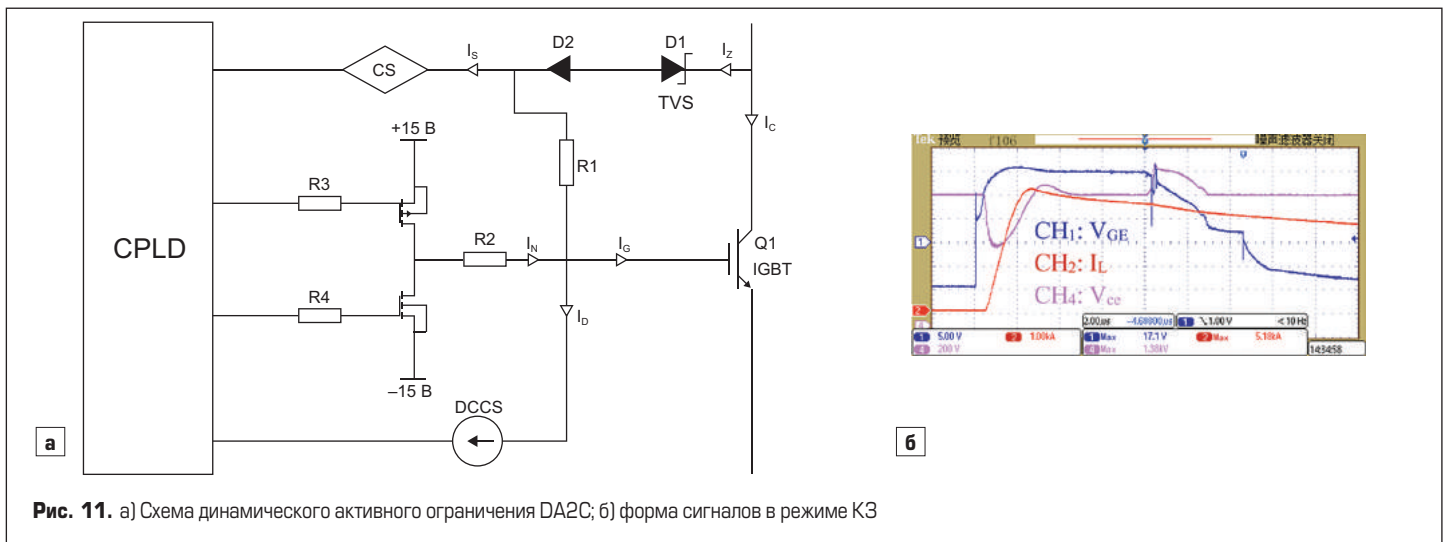


Рис. 11. а) Схема динамического активного ограничения DA2C; б) форма сигналов в режиме КЗ

На рис. 10 показано, как работают две основные концепции защиты от короткого замыкания: по напряжению насыщения $V_{CE(sat)}$ (DESAT) и скорости изменения тока di/dt . Как видно из графиков, время срабатывания защиты в первом случае составляет около 8,9 мкс, а во втором — около 2,7 мкс, то есть меньше почти на 70%. Таким образом, при синхронизации ключей трехуровневого модуля NPC-I, в режиме КЗ внутренний IGBT будет находиться в состоянии перегрузки гораздо меньшее время, не превышающее допустимые пределы.

Усовершенствованная технология динамического активного ограничения D2A2C

Ошибка в алгоритме отключения внутреннего и внешнего IGBT может привести к отказу силового модуля. Особенно это опасно в состоянии КЗ: если внутренний IGBT закроется раньше, чем внешний, то результатом будет перенапряжение и пробой ключа. Для предотвращения такой ситуации используется схема AC (Active Clamping), ограничивающая напряжение на DC-выводах транзистора при блокировке внутреннего IGBT. В связи с этим точность поддержания порога ограничения, а также надежность самой цепи AC имеют ре-

шающее значение. Чтобы устранить проблемы, присущие типовой схеме Active Clamping, и решить вопросы, связанные с паразитными осцилляциями и рассеянием диодов-супрессоров (TVS), компания Firststack представила инновационную технологию динамического активного ограничения D2A2C (Dynamic Advanced Active Clamping) [5].

Принцип работы схемы D2A2C представлен на рис. 11а: процессор CLPD измеряет ток пробоя TVS с помощью блока CS и управляет цифровым источником тока, подключенным к затвору IGBT. Если ток TVS превысит установленный порог, двухтактный каскад CPLD отключит источник питания -15 В, устранив таким образом низкоимпедансный канал. Соответственно, происходит регулировка тока цифрового источника, в результате чего изменяется напряжение на затворе, а также проводимость TVS. Такой метод позволяет эффективно управлять состоянием диодов-супрессоров, поэтому напряжение ограничения задается гораздо точнее. На рис. 11б представлена форма тестовых сигналов при коротком замыкании модуля FF1000R17IP4, управляемого от интеллектуального цифрового драйвера HV1027P. Напряжение V_{ce} в момент выключения фиксируется на уровне око-

ло 1380 В, процесс выключения идет плавно, без резких осцилляций.

На рис. 12 приведено сравнение мощности потерь TVS в режимах ограничения D2A2C [4] и DA2C в зависимости от величины тока отключения. Как видно на рисунке, при большом токе пробоя потери TVS в схеме D2A2C составляют около 30% от DA2C, а при повышении тока отключения величина энергии E_{TVS} практически не изменяется, что увеличивает срок службы и надежность цепи активного ограничения.

Технология многоуровневого отключения

Для большинства технологий IGBT с увеличением затворного резистора R_G снижается скорость коммутации и, соответственно, пик перенапряжения при отключении. Данный эффект используется в схемах защиты от КЗ для реализации режима плавного отключения (Soft Turn-Off) за счет использования большого номинала R_{G_off} при блокировке тока перегрузки. Однако это неизбежно ведет к увеличению задержки выключения T_{d_off} и энергии потерь E_{off} что, соответственно, влияет на настройку «мертвого времени» и тепловые характеристики системы.

Решить проблему помогает технология многоуровневого отключения, использующая общий механизм влияния R_{G_off} на характеристики IGBT, но разделяющая процесс отключения транзистора на три этапа. В отличие от традиционного метода, в такой схеме предусмотрено три резистора затвора, активируемых

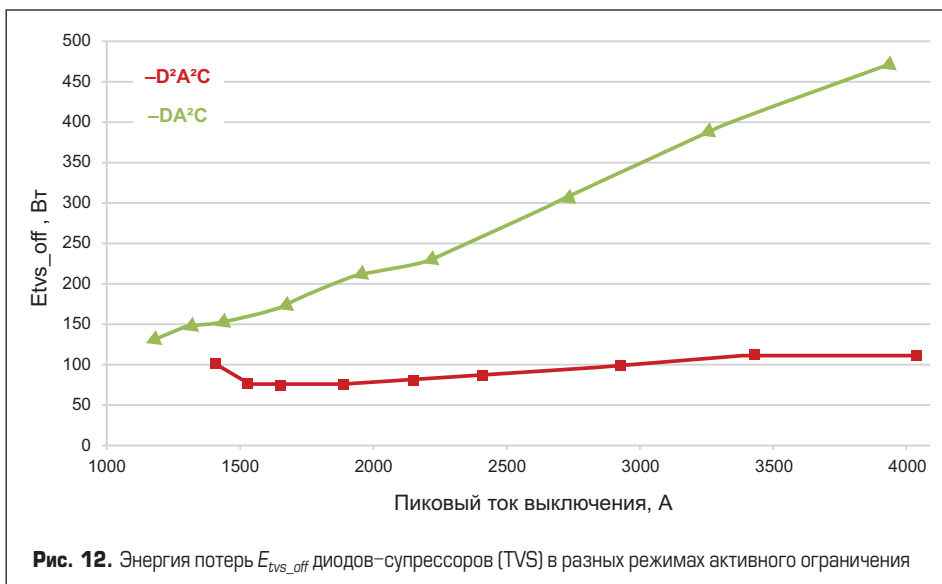


Рис. 12. Энергия потерь E_{TVS_off} диодов-супрессоров (TVS) в разных режимах активного ограничения

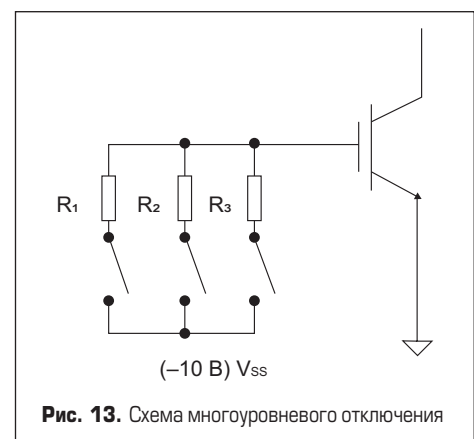


Рис. 13. Схема многоуровневого отключения

в разные моменты времени, как показано на рис. 13. Управление ими производит микроконтроллер цифрового драйвера, задающий алгоритм включения R1, R2, R3.

Величина каждого из трех резисторов, так же как и момент его активации, оптимизирована для достижения наиболее эффективного подавления скачков напряжения и уменьшения времени задержки и потерь выключения в зависимости от типа и режима работы IGBT.

Подавление коммутационных перенапряжений

Для проверки эффективности метода многоуровневого отключения проведен соответствующий сравнительный тест. На рис. 14 показаны эпюры сигналов (включая коммутационное перенапряжение V_{CE_MAX}) внутреннего IGBT S3 с использованием технологии многоуровневого отключения и без нее.

Сравнительные испытания показывают, что при одних и тех же условиях эксперимента величина V_{CE_MAX} в обычном режиме выключения составляет около 1630 В, а при многоуровневом отключении она снижается до 1330 В, то есть почти на 20%. Таким образом, при оптимальном выборе режимов пик перенапряжения на IGBT можно эффективно подавить, даже если паразитная индуктивность цепи коммутации достигает 200 нГн. Кроме всего прочего, использование подобной многоуровневой технологии позволяет уменьшить величину снабберных конденсаторов или вообще отказаться от них.

Оптимизация задержек переключения

Для проверки эффекта оптимизации времени задержки был проведен соответствующий сравнительный тест. На рис. 15 представлены эпюры сигналов, полученных в обычном режиме отключения IGBT и с использованием многоуровневой технологии. Результаты теста показывают, что в одинаковых условиях эксперимента значение T_{doff} составляет 6,9 и 4,8 мкс соответственно, то есть при многоуровневом отключении задержка снижается почти на 30%. Это позволяет уменьшить длительность «мертвого времени» и, следовательно, улучшить качество выходного сигнала инвертора.

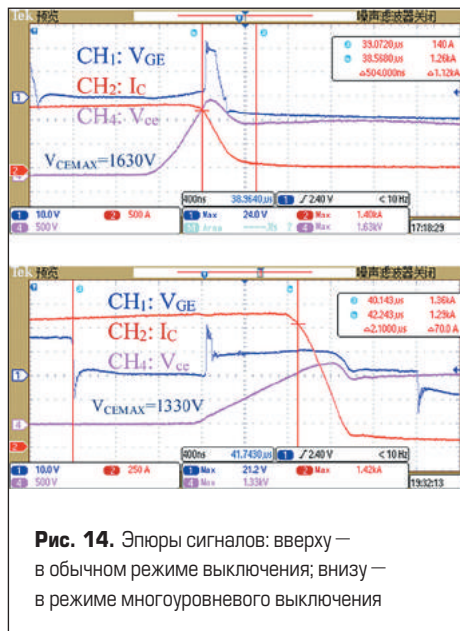


Рис. 14. Эпюры сигналов: вверху — в обычном режиме выключения; внизу — в режиме многоуровневого выключения

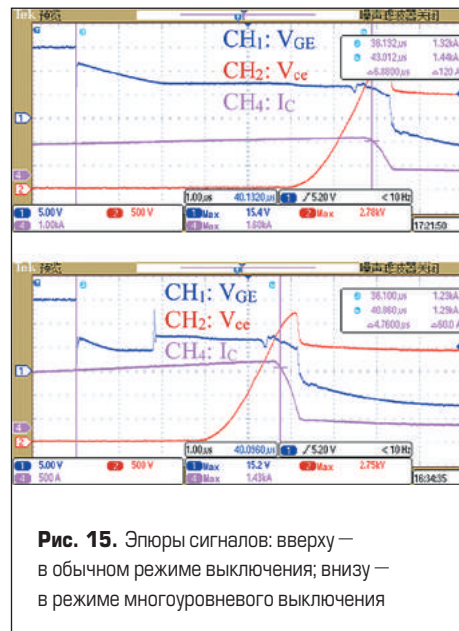


Рис. 15. Эпюры сигналов: вверху — в обычном режиме выключения; внизу — в режиме многоуровневого выключения

Технология интеллектуальной обработки сигнала ошибки

Стандартный аналоговый драйвер формирует обобщенный сигнал ошибки (как правило, логический 0) при падении напряжения питания (UVLO), коротком замыкании или перегреве. Таким образом, если сигнал неисправности имеет низкий уровень, то управляющий контроллер MCU определяет, что произошла ошибка, но не может различить ее конкретный тип или предоставить какую-либо дополнительную информацию.

Технология интеллектуальной передачи данных о неисправностях основана на использовании MCU в составе цифрового устройства управления затвором. Контроллер драйвера формирует мультиплексный порт, информация об ошибках передается в виде последовательного кода, как показано на рис. 16. Таким образом, управляющий компьютер получает данные о типе отказа и порядке его возникновения. Это во многом облегчает и ускоряет процесс диагностики и ремонта системы. При этом коммуникационный порт может быть настроен с помощью протокола шифрования главного компьютера таким образом, чтобы максимально упростить процесс технического обслуживания.

Заключение

Инверторы с выходным напряжением 3300 В AC становятся все более востребованными в различных отраслях промышленности, в частности угледобывающей. Силовые модули IGBT и драйверы затворов являются основными узлами мощных высоковольтных систем, поэтому улучшение их характеристик чрезвычайно важно для производителей оборудования. Обычные аналоговые устройства управления затворами не могут обеспечить необходимый уровень надежности и интеллектуализации подобных систем.

Компания Firststack разработала новое поколение цифровых драйверов, обладающих возможностями быстрого обнаружения перегрузок по di/dt , многоуровневого отключения, интеллектуального формирования сигнала ошибки. Они способны решить проблему синхронизации внутреннего и внешнего IGBT в трехуровневых инверторах, ограничить скачки перенапряжения на безопасном уровне, снизить задержки переключения высоковольтных IGBT и определить сценарий неисправности, что отвечает современным требованиям по надежности, миниатюризации и интеллектуализации силовых высоковольтных преобразователей.

Литература

1. Колпаков А. Разворот на Восток и доступная функциональность. Firststack Technology // Силовая электроника. 2023. № 2.
2. Колпаков А. Разворот на Восток и доступная функциональность. Firststack Technology // Силовая электроника. 2024. № 1.
3. Колпаков А. Цифровые драйверы и адаптеры нового поколения // Силовая электроника. 2020. № 2.
4. Qingdao Tianxin Inverter Quick Selection Manual.pdf.
5. PI Technical documentation: 1SP0335 Description & Application Manual.pdf
6. Firststack Technical documentation: HV1027P.pdf.

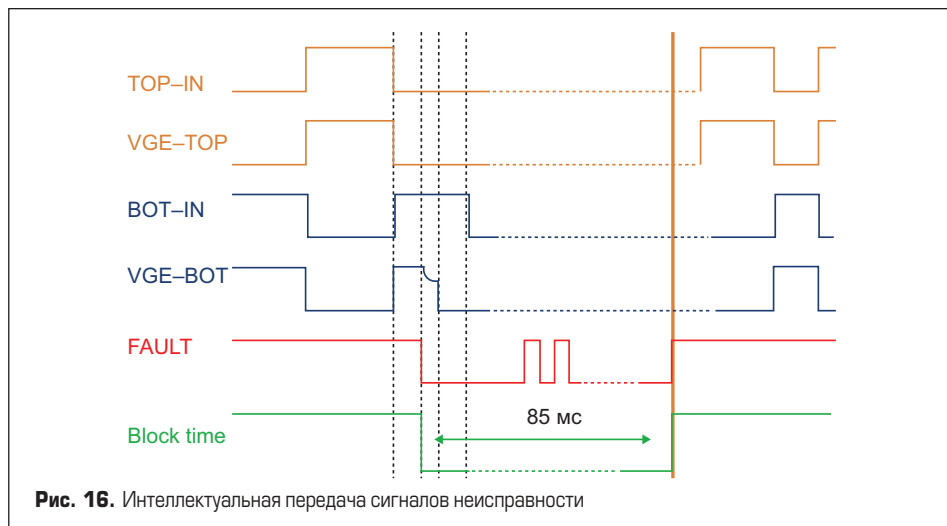


Рис. 16. Интеллектуальная передача сигналов неисправности