

Режим динамического управления затворами мощных высоковольтных IGBT

Концепция динамического управления затвором (Dynamic Gate Control, DGC) была разработана для применения в интеллектуальных модулях IGBT 4-го поколения. Она предназначена для повышения надежности управления силовой секцией инвертора и упрощения конструкции всей системы в целом.

Перевод: Евгений КАРТАШЕВ

Введение

Схема DGC в первую очередь ориентирована на применения, к которым предъявляются следующие требования:

- низкое время реакции схемы защиты;
- минимальные динамические потери IGBT при высокой частоте ШИМ;
- низкий уровень электромагнитного и радиоизлучения (EMI/RFI);
- надежная защита высоковольтных IGBT ($V_{CES} > 1600$ В) от перегрузок.

В отличие от традиционных биполярных ключей — тиристоров (SCR) и тиристорных выключателей по затвору (GTO), модули IGBT могут работать на больших частотах коммутации. Чтобы обеспечить при этом высокую эффективность преобразования, динамические потери транзисторов должны быть минимальны, однако чем выше мощность инвертора, тем сложнее выполнить это требование. С ростом номинальных характеристик IGBT увеличиваются размеры его корпуса и количество параллельно включенных чипов. Соответственно, больше становятся значения паразитных емкостей затвора и распределенных индуктивностей цепей коммутации L_S . Величина L_S в свою очередь ограничивает скорость переключения IGBT.

Чтобы удержать динамические характеристики транзистора в рамках области безопасной работы (ОБР или SOA — Safe Operating Area), приходится использовать снабберные цепи, ограничивающие значения dv/dt и di/dt на допустимом уровне. В простейшем случае в качестве снабберов применяются импульсные конденсаторы, устанавливаемые параллельно терминалам питания IGBT. Однако в высоковольтных схемах зачастую приходится применять RC-цепи, позволяющие уменьшить скорость нарастания напряжения на коллекторе при выключении транзистора. Снабберные резисторы рассеивают мощность даже в ненагруженной схеме, их приходится устанавливать на радиатор, что

увеличивает габариты и стоимость системы и снижает ее КПД.

Чтобы мощный высоковольтный IGBT-инвертор был конкурентоспособен с преобразователем на основе SCR или GTO, необходимо выполнить следующие условия:

- Конструктив силовой секции устройства должен быть предельно простым.
- Необходимо максимально полно использовать мощностные характеристики IGBT для компенсации их более высокой стоимости по сравнению с тиристорами. Для реализации этого требования следует применять высокоэффективные системы охлаждения.

Нужно отметить, что, несмотря на все усилия разработчиков, существующие в настоящее время высоковольтные преобразователи на основе IGBT не способны обеспечить заметные преимущества по частоте коммутации, технической или экономической эффективности по сравнению со стандартными тиристорными схемами.

Концепция DGC дает возможность использовать все достоинства быстрых IGBT в приме-

нениях высокой мощности, а также исключить снабберные цепи и обеспечить надежность работы инвертора в динамических режимах за счет «интеллектуального» алгоритма управления.

Реализация схемы DGC позволяет сократить до минимума номенклатуру компонентов силовой секции и ограничить ее на следующем уровне:

- IGBT-модули;
- контроллер DGC;
- низкоиндуктивная DC-шина с конденсаторами звена постоянного тока;
- радиатор.

Драйвер DGC способен контролировать динамические параметры IGBT, такие как dv/dt , di/dt , время задержки переключения t_d и процесс обратного восстановления оппозитного диода. Управление указанными характеристиками осуществляется независимо, в соответствии с заданными пользователем установками. Необходимые значения программируются для всех условий работы, включая режим холостого хода, полной нагрузки и аварийного отключения.

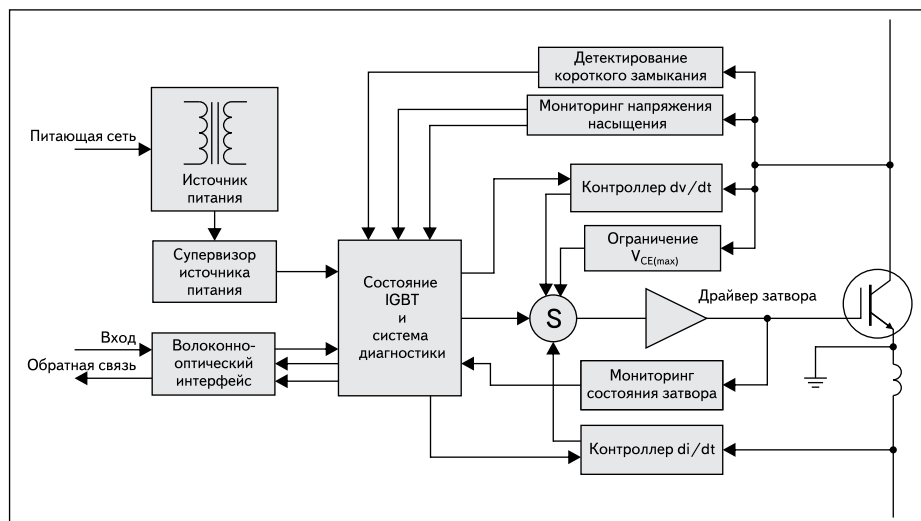


Рис. 1. Блок-схема DGC

Описание схемы

Базовая архитектура DGC показана на рис. 1, а на рис. 2 представлена схема контроля параметров, выполненная в стандартной топологии. Силовой ключ верхнего уровня блокирован отрицательным запирающим напряжением. Его антипараллельный диод, необходимый для контроля процесса обратного восстановления, является оппозитным для транзистора нижнего плеча. Модуль DGC подключается к сигнальным выводам коллектора, эмиттера и затвора модуля IGBT, а также к силовому терминалу его эмиттера.

Интерфейс схемы управления содержит стандартные адаптеры волоконно-оптического приемника и передатчика. При нормальной работе (например, в инверторном режиме) подача контрольного импульса соответствует открытому состоянию IGBT. В специальных режимах (включение тормозного каскада, ограничение напряжения DC-шины) может быть использована инверсия сигнала управления.

Выходной каскад DGC формирует напряжение управления затвором ±15 В (пиковый выходной ток ±15 А), модульная концепция устройства позволяет при необходимости наращивать мощность силовой секции драйвера. В отличие от стандартных схем управления IGBT, в которых динамические свойства силовых ключей определяются номиналами резисторов затвора, выходной ток $I_{G(on/off)}$ драйвера DGC можно регулировать. Величина $I_{G(on/off)}$ вычисляется исходя из требований, задаваемых областью безопасной работы (SOA) для режима включения и выключения.

На первый взгляд для минимизации энергии потерь E_{off} необходимо снижать время выключения IGBT (t_f) до минимально возможных пределов. Однако на практике неоправданное уменьшение значения t_f и соответствующее возрастание di/dt сопряжено с определенными трудностями и имеет ряд негативных последствий:

- Ускорение процесса коммутации требует увеличения скорости перезаряда емкостей затвора и соответствующего наращивания выходного тока и мощности рассеяния драйвера.
- Рост тока заряда, вызванный эффектом Миллера, может привести к непредсказуемым последствиям в процессе коммутации.
- Возрастание скорости выключения di/dt приводит к повышению уровня коммутационных перенапряжений на паразитных индуктивностях терминалов модуля и DC-шины. Ограничение этих всплесков напряжения во всех режимах работы, включая КЗ, является одной из главных проблем проектирования преобразователей высокой мощности.
- Увеличение скорости включения IGBT приводит к росту тока восстановления оппозитного диода и создает для него дополнительный стресс. Больше становится уровень электромагнитных и радиопомех, амплитуда которых тесно связана с di/dt .

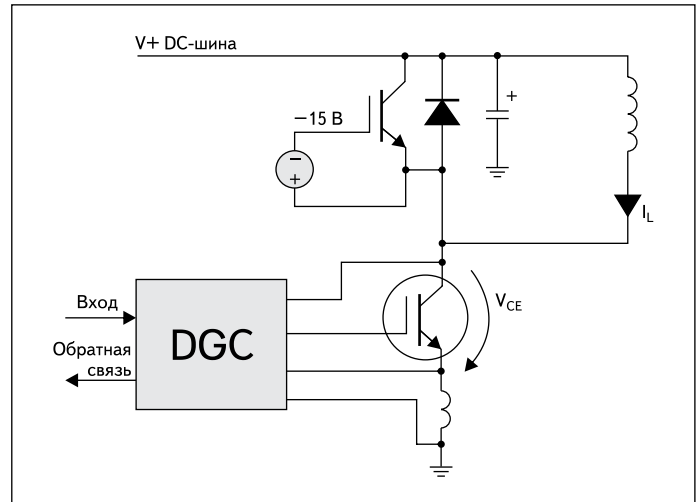


Рис. 2. Схема проверки DGC

- Скорость изменения напряжения dv/dt на двигателе ограничена требованиями к изоляции обмоток. Возникновение частичного разряда должно быть исключено для всех условий работы: от холостого хода до полной нагрузки.

Современная концепция управления затвором IGBT, подразумевающая контроль динамических режимов и ограничение величин di/dt и dv/dt за счет резисторов затвора $R_{G(on/off)}$, не позволяет оптимизировать динамические характеристики инвертора во всем диапазоне изменения нагрузки. Номиналы R_G необходимо выбирать таким образом, чтобы IGBT не выходил за рамки ОБР при всех условиях эксплуатации, включая короткое замыкание и последующее отключение. Однако динамические характеристики силового ключа зависят от условий эксплуатации и резко отличаются для случаев минимальной и максимальной нагрузки.

Применение концепции DGC позволяет оптимизировать следующие характеристики:

- пиковый ток затвора;
- скорость изменения напряжения dv/dt при выключении IGBT;
- скорость выключения оппозитного диода di_F/dt при его обратном восстановлении;
- максимальное значение напряжения на коллекторе IGBT.

Управление указанными параметрами может осуществляться независимо друг от друга и от условий нагрузки. Это означает, что при всех условиях эксплуатации от холостого хода до режима перегрузки

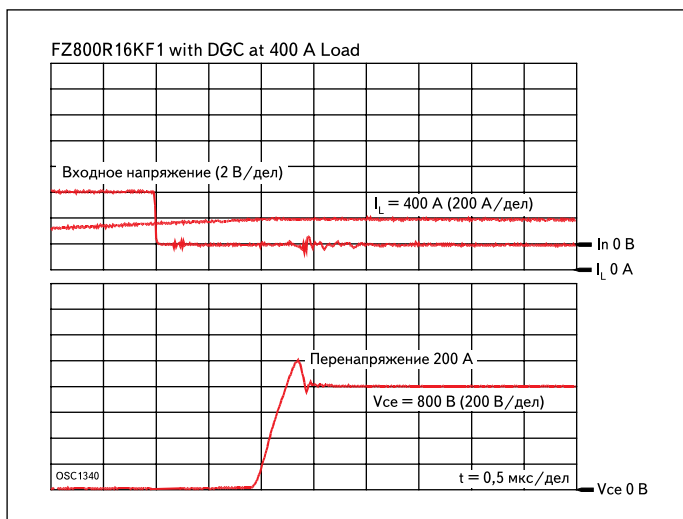


Рис. 3. Выключение IGBT при малом токе коллектора

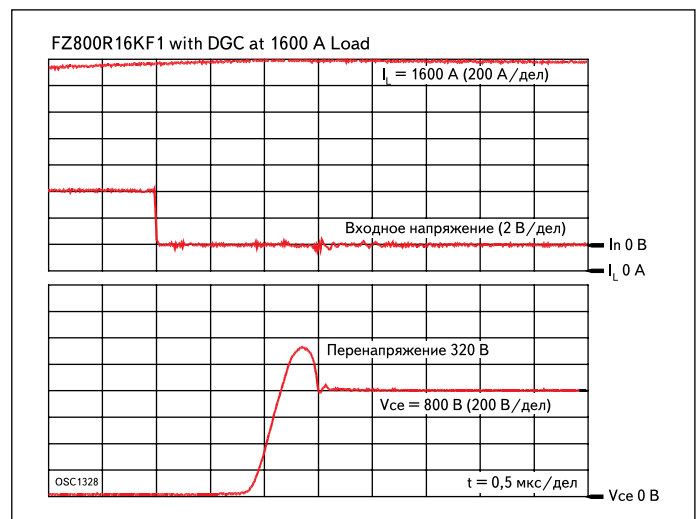


Рис. 4. Выключение IGBT в режиме перегрузки

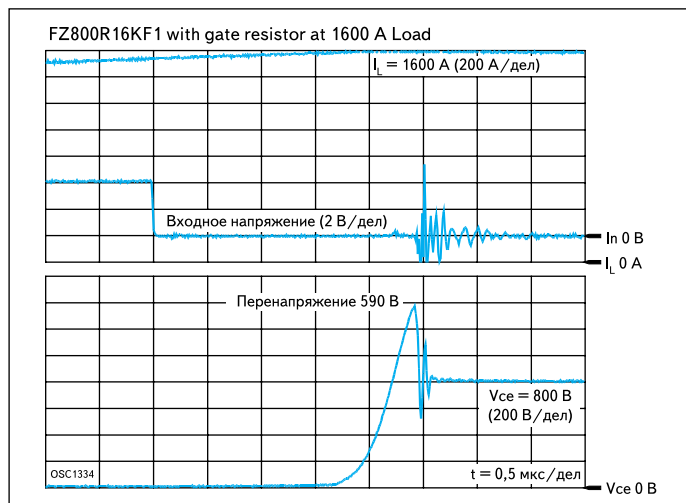


Рис. 5. Выключение IGBT с фиксированным резистором затвора

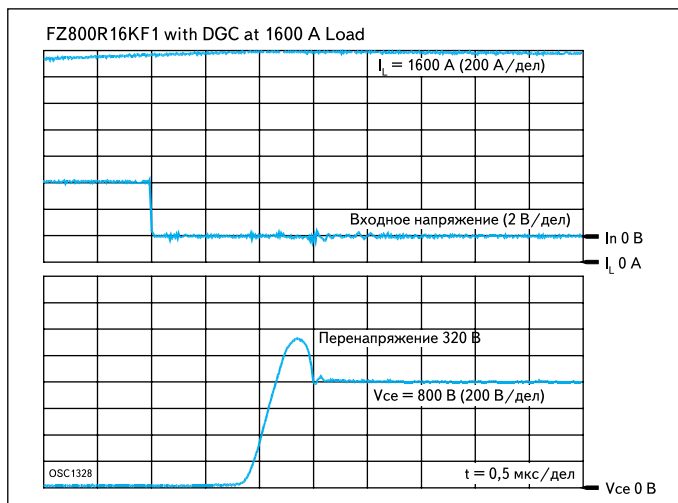


Рис. 6. Выключение IGBT с использованием DGC

коммутация силовых ключей производится при одних и тех же заданных значениях di/dt , dv/dt . На рис. 3 и 4 представлены эпюры процесса выключения IGBT с рабочим напряжением 1600 В при малом токе коллектора и в режиме перегрузки. Как видно на графиках, значения di/dt и dv/dt при этом практически не отличаются. Таким образом, как и было отмечено выше, концепция DGC позволяет контролировать динамические свойства IGBT независимо от нагрузки и напряжения DC-шины.

Контроллер DGC способен также управлять процессом включения IGBT. В отличие от предыдущего случая, основное влияние на который оказывают емкости затвора, эффект Миллера и паразитные индуктивности DC-шины, проблемы включения в первую очередь связаны с обратным восстановлением оппозитного диода. Характеристики этого процесса накладывают жесткие ограничения на скорость отпириания IGBT (рис. 5, 6). Эта проблема наиболее остро стоит при использовании высоковольтных ($V_{RRM} > 1600$ В) быстрых диодов, отличающихся большим током I_{RR} и зарядом Q_{RR} обратного восстановления. Высокий уровень I_{RR} при быстром выключении диода образуют крутые фронты dv/dt , что приводит к резкому возрастанию уровня электромагнитных и радиопомех (EMI/RFI). Использование концепции DGC в этом случае позволяет контролировать процесс обратного восстановления оппозитного диода, ограничить скорость его выключения di_p/dt и, соответственно, скорость спада напряжения dv/dt на IGBT.

Применение концепции DGC позволяет существенно снизить эмиссию EMI/RFI шумов силового каскада инвертора за счет постоянного контроля фронтов тока и напряжения. Это дает возможность уменьшить требования к фильтрам и таким образом снизить стоимость всего преобразователя. Управление инвертором с учетом требований по подавлению помех приводит к некоторому увеличению динамических потерь, однако общее значение рассеиваемой преобразователем мощности при этом снижается. Повышение эффективности преобразования достигается за счет исключения снабберных цепей и снижения потерь на выходном фильтре.

Новая концепция детектирования состояния КЗ позволяет снизить время реакции при обнаружении состояния перегрузки (рис. 7, 8). Алгоритм защиты DGC обеспечивает следующие преимущества:

- Мониторинг режима КЗ и перегрузки по току осуществляется независимо.
- Быстрое отключение тока КЗ снижает термомеханический стресс для кремниевого чипа и его контактов, что позволяет повысить допустимое количество срабатываний защиты в течение срока службы силового каскада.
- Динамическое управление скоростью отключения позволяет снизить уровень коммутационных перенапряжений при срабатывании защиты.

Определение состояния КЗ производится традиционным способом по выходу IGBT из насыщения, контролируемому по напряжению

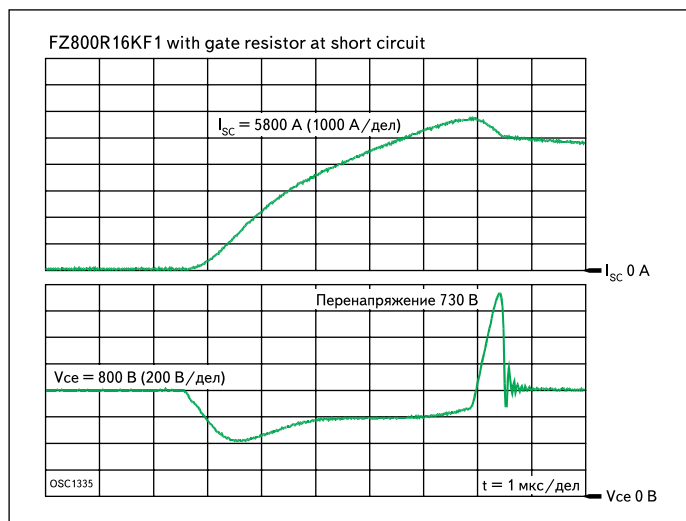


Рис. 7. Отключение тока КЗ с фиксированным резистором затвора

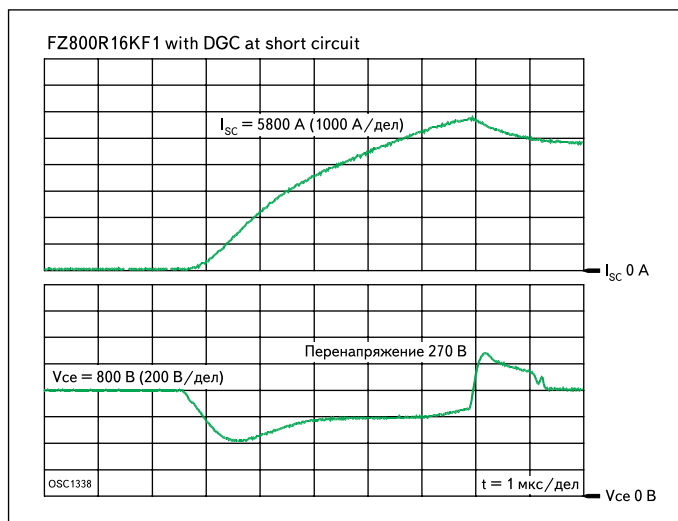


Рис. 8. Отключение тока КЗ с использованием DGC

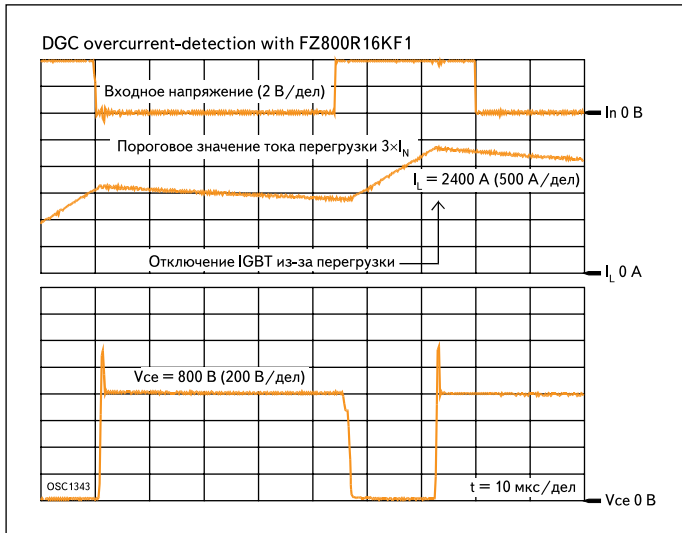


Рис. 9. Детектирование состояния перегрузки и отключение IGBT

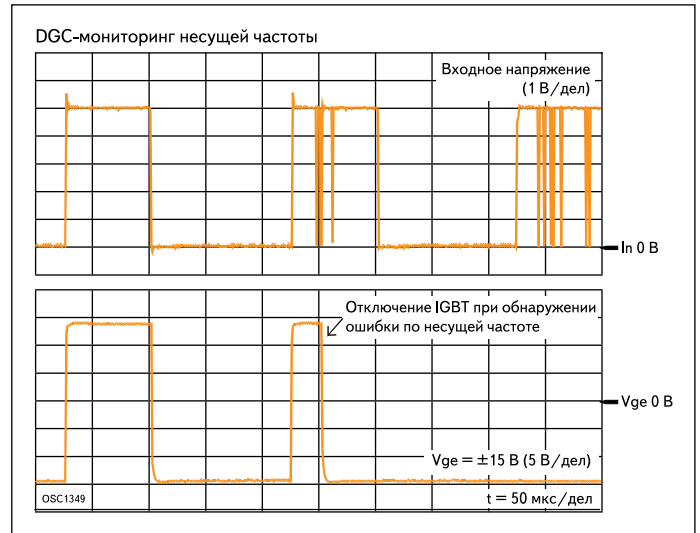


Рис. 10. Отключение IGBT при обнаружении ошибки по несущей частоте

«коллектор – эмиттер» $V_{CE(sat)}$. Пороговая величина $V_{CE(sat)}$ выбирается по прямой характеристике транзистора при токе, превышающем номинальное значение в 2–3 раза (рис. 9). Это значение можно корректировать в зависимости от условий работы.

Одной из защитных функций DGC является мониторинг несущей частоты и отключение IGBT в случае превышения максимально допустимого значения. Это позволяет исключить перегрев силового ключа, вызванный резким возрастанием динамических потерь при сбое контроллера ШИМ или возникновении неуправляемого высокочастотного дрейфа в цепи затвора (рис. 10).

Схема диагностики, названная ISDS (IGBT Status and Diagnostic System), позволяет формировать и передавать центральному процессору различную информацию о состоянии силового ключа. В первую очередь это обобщенный сигнал неисправности FAULT, формируемый стандартными драйверами IGBT. Наличие этого сигнала говорит о том, что силовой каскад отключен из-за обнаружения какой-либо неисправности. Кроме того, система ISDS обеспечивает расширенный контроль силового каскада. Она способна формировать раздельный цифровой код для следующих случаев:

- Отсутствие питания DGC (критический отказ системы).
- IGBT выключен (информация в реальном времени).
- IGBT включен (информация в реальном времени).
- IGBT был выключен вследствие перегрузки по току.
- IGBT был выключен вследствие короткого замыкания.

- IGBT был выключен вследствие критического повышения несущей частоты.

С помощью ISDS центральный процессор получает информацию о текущем состоянии каждого силового ключа. Это позволяет, в частности, снизить длительность «мертвого времени» t_{dt} , разрешая включение IGBT не по истечении фиксированного интервала времени, а после получения информации о том, что оппозитный транзистор полностью закрыт. Уменьшение значения t_{dt} позволяет:

- Увеличить коэффициент модуляции и повысить амплитуду выходного напряжения.
- Улучшить динамические характеристики системы, что особенно важно для рекуперативного 4Q-инвертора, поскольку магнитный поток двигателя при этом можно поддерживать на постоянном уровне в моторном и генераторном режиме.
- Минимизировать уровень осцилляций на коллекторе IGBT.

На рис. 11 показана блок-схема 3-фазного инвертора привода, управляемого с помощью специализированного мультифазного контроллера (MPC) от центрального процессора со стандартной архитектурой шин.

Питание модуля DGC осуществляется по шине переменного тока на частоте 16 кГц, которая обычно используется в драйверах тиристорных GTO. Источник AC-сигнала разрабатывается пользователем, он также доступен в качестве аксессуара. Гальваническая изоляция обеспечивается высокочастотным трансформатором, входящим в состав DGC.

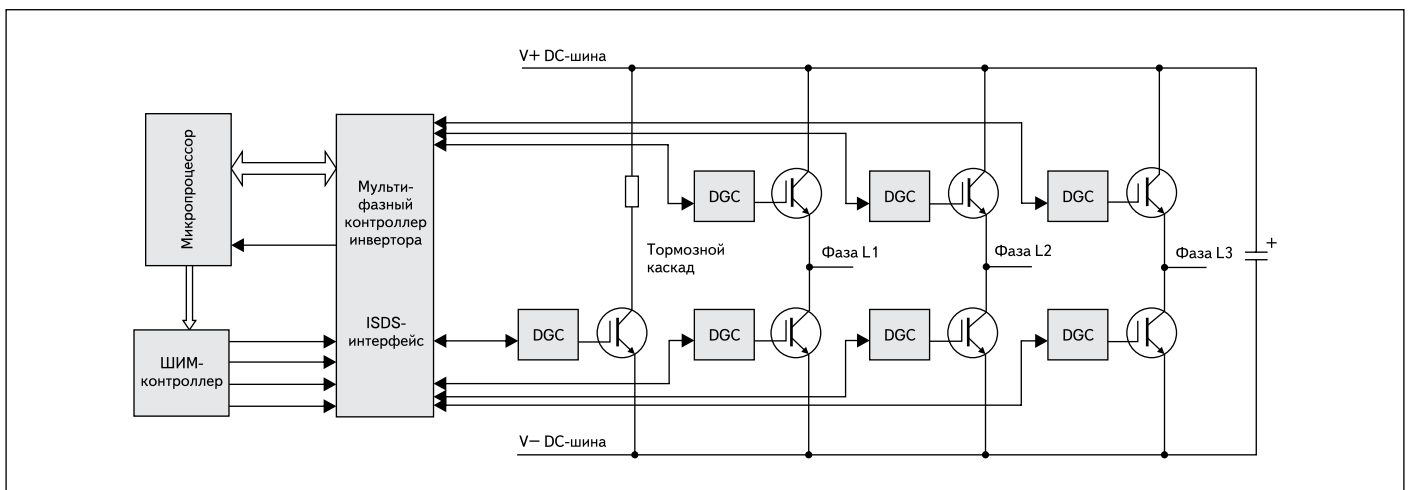


Рис. 11. Мощный инвертор с DGC и MPC

Заключение

В статье представлена концепция динамического управления DGC, предназначенная для построения драйверов затворов IGBT с рабочим напряжением более 1700 В и диапазоном рабочих токов 400–1200 А и выше. Возможность контроля процессов включения и выключения IGBT позволяет улучшить динамические характеристики всей системы, обеспечить надежную работу силовых ключей без применения цепей формирования траектории переключения — снабберов, снизить уровень излучаемых электромагнитных и радиопомех. Программируемый

интерфейс и широкие возможности системы защиты и мониторинга дают возможность применять DGC-драйверы для управления преобразовательными устройствами различного назначения. Новая «открытая концепция» архитектуры позволяет достаточно легко адаптировать драйвер DGC для управления высоковольтными IGBT новых поколений даже с учетом их параллельного соединения. ■

Литература

1. CT-Concept IGBT Application Hints.