Работа силовых кремниевых полупроводниковых приборов в средневольтных электроприводах на основе каскадных Н-мостовых ячеек

Дэвид Левит (David Levett), Тим Фрэнк (Tim Frank), Infineon Americas
Марсио Сари (Márcio Sari), WEG
Уве Янсен (Uwe Jansen), Клаус Фогель (Klaus Vogel), Infineon Germany
E-mail: info@symmetron.ua

В стандартных низковольтных (≤690 В AC) приводах электродвигателей в основном используется двухуровневая топология преобразователей напряжения на основе IGBT. Однако при более высоких напряжениях (≥2400 В AC) ситуация меняется и существует множество различных топологий, каждая из которых обладает уникальными техническими и/или экономическими преимуществами. В последние годы стала популярной одна из этих топологий, часто называемая каскадной, или каскадной Н-мостовой (Cascade H Bridge — CHB).
В данной статье объяснены основные принципы работы CHB-инвертора и представлены некоторые новые силовые модули, соответствующие указанному типу преобразователя.

ВВЕДЕНИЕ

В электроприводах среднего напряжения (Middle Voltage Drive — MVD) применяется несколько конкурирующих технологий, из них самыми распространенными на сегодняшний день являются трехуровневые преобразователи первого типа с фиксируемой нейтралью (Neutral Point Clamp — NPC) с использованием высоковольтных силовых модулей [1], источники тока с несимметричными тиристорами [2], пятиуровневые преобразователи Т-типа [3] и модульные многоуровневые (M2L) преобразователи [4]. Что касается топологии CHB, то она была изобретена в начале 1970-х годов, но впервые использована в коммерческой продукции в начале 1980-х годов компанией Robicon USA (в настоящее время принадлежит компании Siemens). В последние годы многие компании предлагают электроприводы на базе CHB. Общая топология одной фазы показана на рисунке 1, а более подробная схема для отдельной ячейки — на рисунке 2.

КАСКАДНАЯ ТОПОЛОГИЯ

Ключевым элементом каскадной топологии является многофазный изолирующий трансформатор (см. рис. 1), показанный здесь с первичной обмоткой среднего напряжения и 5 изолированными вторичными обмотками, каждая на 750 В переменного тока. Одна вторичная обмотка трансформатора питает одну ячейку, а 5 ячеек соединены последовательно и образуют полную фазу. Две другие фазы используются для создания полного трехфазного инвертора, имеющего в общей сложности 15 изолированных вторичных обмоток (см. рис. 4).

Подробная схема типичной ячейки показана на рисунке 2. Она включает в себя:

- Трехфазный входной неуправляемый выпрямитель со схемой, обеспечивающей «плавный» заряд конденсаторной батареи при подаче питания. Заметим, что этот плавный заряд может осуществляться с помощью отдельной обмотки на силовом трансформаторе, что позволяет электроприводу «управлять питанием» без подключения к средней точке трансформатора трехфазного сетевого напряжения.
- Конденсаторную батарею для сглаживания выпрямленного напряжения и получения стабильного источника постоянного напряжения.
- Н-мост с использованием четырех IGBT и включенных встречно-параллельно защитных диодов. Они могут переключаться последовательно для получения на выходных клеммах положительного, нулевого или отрицательного напряжения, а общее фазное напряжение представляет собой сумму напряжений всех 5 ячеек.
- Источник низких напряжений, необходимых для драйверов и схем управления затворами. Эти напряжения могут быть сгенерированы локально с использованием импульсных преобразователей (SMPS), питаемых от шины постоянного тока.

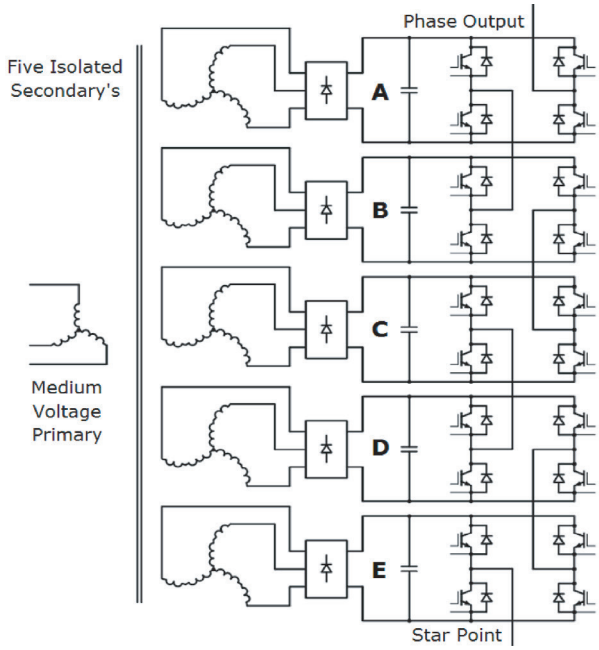

Рис. 1. Общая схема одной фазы CHB-преобразователя с 5 ячейками на фазу

Управляющие сигналы между центральным контроллером и драйвером передаются по оптоволоконным кабелям, что обеспечивает электрическую изоляцию. Это позволяет всему блоку электроники ячейки «плавать» относительно потенциала земли.

Радиатор не может быть подключен к шине заземления, так как модули IGBT и другие компоненты не имеют требуемой изоляции. Обычно радиатор подключается либо к искусственной средней точке шины питания постоянного тока, либо к минусу шины питания через низкоомный резистор для подавления любых возможных высокочастотных колебаний. В случае жидкостного охлаждения необходимо использовать деионизированную воду, чтобы избежать возникновения токов утечки, электрокоррозии и отложения осаждений. Альтернативой является использование охлаждения по принципу фазового перехода [5].

На рисунке 3а показан типичный инвертор с трансформатором и 18 ячейками, на рисунке 3б — отдельная ячейка.

Преимущества:

- Из рисунка 2 видно, что конструкция ячейки питания очень похожа на стандартный преобразователь переменного тока за исключением того, что используются только два полумоста. Это позволяет применять компоненты, которые массово производятся для низковольтных преобразователей.
- Модульная конструкция обеспечивает гибкость, поскольку выходное напряжение может быть увеличено путем добавления дополнительных ячеек и обмоток трансформатора.
- Ячейки могут шунтироваться, что обеспечивает резервирование (см. рис. 4). Если по какой-либо причине одна ячейка не работает, то ее можно отключить с помощью байпасного переключателя (см. рис. 2). Этот переключатель может быть механическим (с прижимным контактом) или полупроводниковым (на основе тиристорного модуля). Пока есть запас по напряжению, драйвер еще может работать либо в несимметричном режиме (с дисбалансом), либо, при шунтировании одной ячейки на двух других фазах, в симметричном режиме.
- Очень низкие гармоники на входе, поскольку вторичные обмотки трансформатора могут быть сдвинуты по фазе, например при использовании так называемого зигзаг-трансформатора (трансформатор, у которого обмотки соединены по зигзагообразной схеме).
- Очень малы гармоники тока двигателя и уменьшено *dv/dt*, приложенное к обмоткам двигателя. Н-мост работает на низких частотах переключения, обычно в диапазоне 500 Гц...1 кГц, поскольку эффективная частота переключения обмоток двигателя умножается на количество ячеек.
- Упрощенное техническое обслуживание, так как отдельные ячейки сделаны подключаемыми и могут быть достаточно легкими для переноски двумя людьми (см. рис. 3б). К тому же, поскольку все ячейки идентичны, сокращается номенклатура запасных частей.

Недостатки:

- Большой и сложный трансформатор (см. рис. 3а).
- Ячейки должны быть изолированы друг от друга и заземлены. Это усложняет конструкцию и увеличивает размеры устройства (для обеспечения изоляционных промежутков).
- Требуются сглаживающие конденсаторы большой емкости из-за однофазной работы Н-мостовой ячейки.
- Более сложное жидкостное охлаждение.

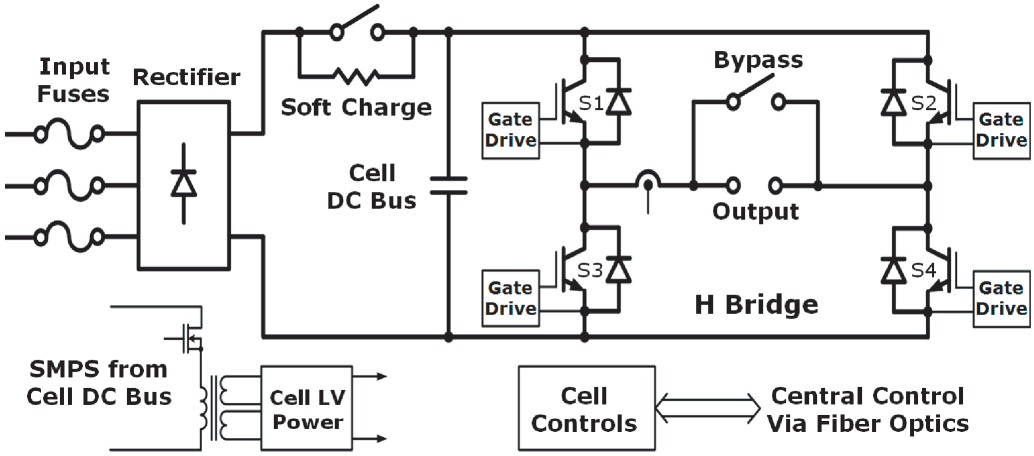

Рис. 2. Пример схемы типичной CHB-ячейки

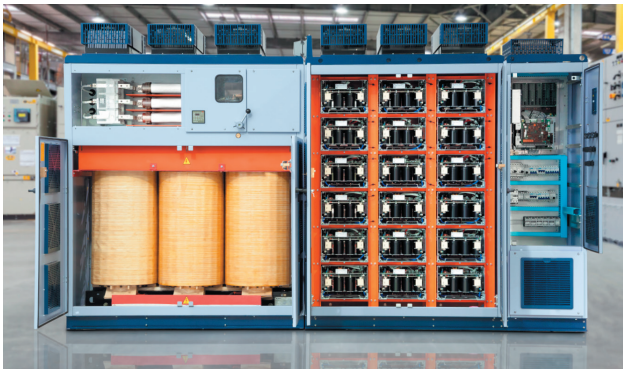

Рис. 3а. Общая схема одной фазы CHB-преобразователя с 5 ячейками на фазу

Рис. 3б. Ячейка с воздушным охлаждением, в центре видны выпрямительные модули (черные), справа и слева — 62-мм модули (белые)

ДИАГРАММА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

С помощью Н-моста можно генерировать три разных напряжения на выходе: положительное напряжение — включены S1 и S4 (см. рис. 2), отрицательное напряжение — включены S2 и S3, нулевое напряжение — могут быть включены S1 и S2 или S3 и S4.

В простейшем режиме работы синусоидальное выходное напряжение может быть получено, например, путем запуска каждой ячейки последовательно: сначала ячейка E, затем D и так вплоть до A; с каждым шагом выходное напряжение увеличивается примерно на 1000 В DC, а ШИМ-коммутация позволяет на каждом уровне получать синусоидальную форму напряжения. Такой режим называется модуляцией со сдвигом уровня, но он имеет недостаток, заключающийся в том, что потери в силовых полупроводниках в каждой ячейке, а также токи в обмотках трансформатора будут разные, что не позволяет минимизировать гармоники входного тока.

Другой способ, называемый модуляцией с угловым или фазовым сдвигом, показан на рисунке 5. Он позволяет выровнять потери по ячейкам. При данной диаграмме используется стандартный опорный синусоидальный сигнал, общий для всех ячеек, но опорная точка ШИМ в соседних ячейках сдвигается по фазе на величину, равную результату деления 180° на количество ячеек. В случае с 5 ячейками сдвиг будет равен 36°. Происходит смещение ШИМ-сигналов и предотвращается одновременное переключение двух ячеек. Кроме того, обеспечивается формирование нулевого напряжения на выходе ячейки, в равной мере используя оба возможных варианта коммутации пар ключей S1–S2 и S3–S4.

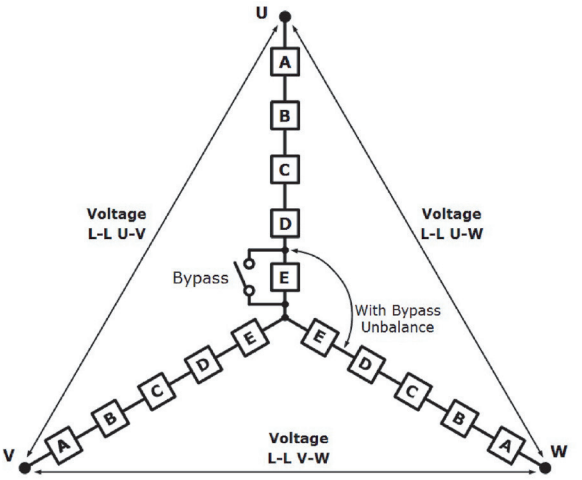

Рис. 4. Трехфазная система, показан дисбаланс при байпасном шунтировании ячейки на одной фазе

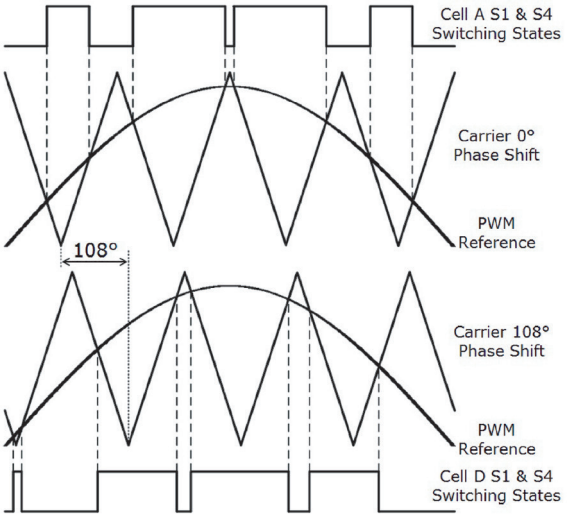

Рис. 5. Работа ячейки по диаграмме с угловым или фазовым сдвигом для положительной полуволны сетевого напряжения

На рисунке 5 показан сдвиг фаз между ячейками A и D при 3×36 = 108°. Здесь, как и в обычных инверторах, существует множество вариантов генерации диаграммы ШИМ (например, пространственно-векторная модуляция), каждый из которых имеет свои технические преимущества.

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ

Потери зависят от типа используемой диаграммы переключений. Однако можно упрощенно оценить потери в предположении однофазной работы с помощью такого онлайн-инструмента, как Iposim компании Infineon. Грубое «эмпирическое правило» гласит, что при частоте сети 60 Гц и частоте коммутации 1 кГц модули IGBT на радиаторе с воздушным охлаждением должны быть способны выдать на выходе среднеквадратический ток, равный 0.6...0.7 от номинального постоянного (DC) тока модуля. Таким образом, для модуля на 300 А среднеквадратическое значение тока может достигать величины ≈ 180...210 А (rms).

Рис. 6. Выпрямительные модули Infineon шириной 20, 34 и 50 мм

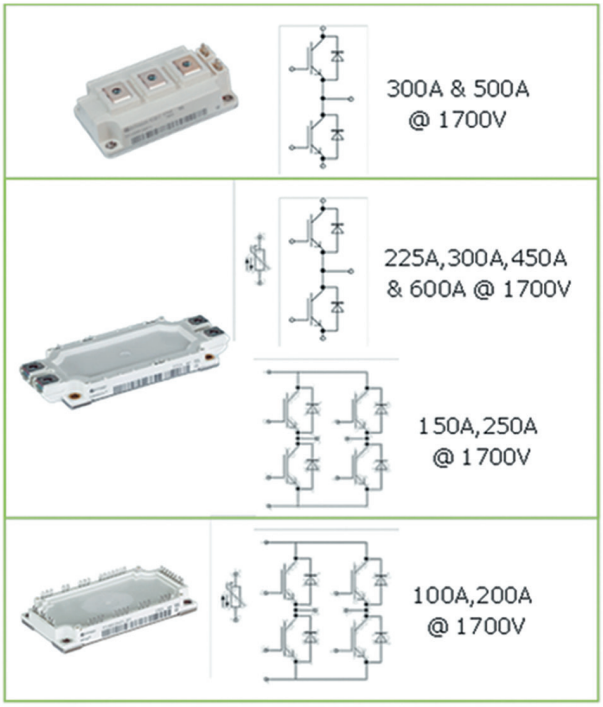

Рис. 7. Варианты модулей, предлагаемые компанией Infineon для использования в каскадных Н-мостовых ячейках

ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Для трехфазного выпрямителя выпускаются стандартные сдвоенные диодные модули шириной 20, 34 и 50 мм с выводами под пайку или с прижимными контактами (см. рис. 6).

Для Н-моста часто выбирают IGBT на 1700 В, так как они допускают более высокое напряжение на ячейке, вплоть до ≈1200 В DC, что уменьшает число последовательно включенных ячеек. В то же время широко доступны кремниевые и периферийные компоненты на 1700 В, такие как выпрямители и конденсаторы, поскольку они используются в приводах на 690 В AC. Компания Infineon расширила линейку своих IGBT-модулей в стандартных промышленных корпусах, чтобы соответствовать требованиям к CHB-инверторам (см. рис. 7). Имеются сдвоенные модули в 62-мм корпусах или корпусах EconoDUAL™3 на токи до 600 А и более компактные полные Н-мосты в корпусах EconoDUAL™3 и Econo 3. Последние подходят для монтажа на печатные платы с использованием технологии запрессовки.

ВЫВОДЫ

Для разработчиков силовой электроники использование CHB-топологии упростило выход на рынок оборудования среднего напряжения за счет применения массово производимых базовых компонентов силовых преобразователей, рассчитанных на более низкое напряжение. Это и другие перечисленные преимущества способствовали росту данной топологии на рынке средневольтных инверторов.

Более детальную информацию можно получить в компании «Симметрон-Украина»:
тел.: (044) 494-25-25,
e-mail: info@symmetron.ua,
http://www.symmetron.ua

Литература:

1. Nabae, A. et.al., «A new neutral-point-clamped PWM inverter»; IEEE IAS Annual Meeting 1981.
2. Zargari, N. et.al., «A New Current-Source Converter Using a Symmetric Gate-Commutated Thyristor (SGCT)»; IEEE IAS May/June 2001.
3. Basler, M. et.al., «A new medium voltage drive system based on ANPC-5L topology»; IEEE-ICIT Chile 2010.
4. Lesnicar, A.; R. Marquardt, R.,«A new modular voltage source inverter topology»; EPE 2003.
5. Saums, D. DS&A, «Vaporizable dielectric fluid cooling for IGBT power semiconductors»; IMAPS 2009.

CNY