

БЕЗМОСТОВАЯ СХЕМА КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С ПОВЫШЕННЫМ КПД

ДЖОН ХЭНКОВ (JON HANCOCK), инженер Infineon Technologies

Безмостовой корректор коэффициента входной мощности (ККМ) может повысить эффективность работы схемы и, следовательно, уменьшить потребляемую мощность. Это особенно важно для импульсных источников питания. ККМ с широким диапазоном входных напряжений представляют собой одни из самых сложных схем в силовой электронике. Их входное напряжение может меняться от 75 до 265 В. Это довольно сложные условия работы, учитывая большой диапазон изменения рабочего тока нагрузки. Одно из решений проблемы — использование схемы безмостовой схемы ККМ.

Безмостовой способ коррекции коэффициента мощности разработан уже давно, однако до сих пор не получил широкого распространения. Первые схемы имели плохую электромагнитную совместимость и низкую устойчивость, а также были слишком сложны, поэтому развитие шло в основном направлении схем ККМ с выпрямительным мостом. По мере совершенствования компонентов эффективность их применения в мостовых ККМ росла, поэтому более сложные безмостовые схемы были временно забыты.

Однако непрерывное повышение требований к экономичности импульсных источников питания возродило интерес к безмостовым схемам. Обычно эффективность схем оценивалась при работе на верхней и нижней границах диапазона напряжений и полной нагрузке. Однако более современный подход — оценка эффективности источника питания на всем диапазоне рабочих напряжений и токов [1]. Таким образом, высокая эффективность ККМ должна поддерживаться на всем диапазоне нагрузок, включая «дежурные» режимы такой аппаратуры, как компьютерные серверы и устройства связи, т.е. при 10—50% номинальной мощности (см. рис. 1).

В итоге производители, например IBM, меняют свою позицию по отношению к определению и обеспечению мощности. Лучшие современные традиционные схемы компенсации коэффициента мощности соответствуют добровольным стандартам Green Grid ClimateSavers, однако в будущем требования еще более ужесточатся, и разработчикам придется искать другое решение. Подходящей альтернативой может оказаться безмостовая входная схема компенсации коэф-

фициента мощности, хотя, возможно, и ее ожидают исправления и дополнения.

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И БЕЗМОСТОВОЙ СХЕМ ККМ

Известная схема ККМ с мостом на выпрямительных диодах показана на рисунке 2а. Выпрямленное мостом напряжение поступает на преобразователь, состоящий из ключа S1, катушки индуктивности L1 и выпрямительного диода D1, который заряжает накопительный конденсатор Bus cap.

На рисунке 2б показана основная концепция безмостовой схемы, запатентованная в 1983 г. [2]. Здесь используется катушка с двумя обмотками на общем магнитопроводе. Полярность синусоидального сигнала постоянно меняется, а вместе с ней переключаются и диоды, соединяющие сток и исток МОП-транзисторов.

Такое решение позволяет сократить количество транзисторов с трех до двух,

что уменьшает потери в схеме примерно на величину падения напряжения на диоде (V_F). Транзисторы работают и как высокоскоростные переключатели, и как низкочастотные однополупериодные выпрямители. В результате потери мощности, которые прежде происходили в диодном мосте, теперь перенесены на транзисторы. Это может привести к дополнительному нагреву их переходов, что в свою очередь потребует увеличить размеры транзисторов.

У этой схемы есть некоторые особенности, которые ограничивают ее применение. В частности, из-за довольно высокого напряжения переключения могут создаваться электромагнитные помехи, вызванные перезарядкой паразитных емкостей, зависящих от физической конструкции преобразователя.

Для измерения и контроля входного тока и напряжения обычно требуются схемы гальванической развязки. Могут

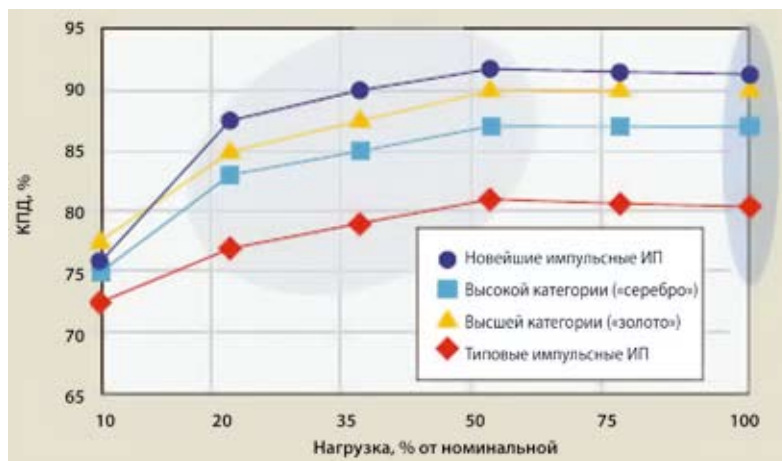


Рис. 1. В некоторых устройствах источник питания должен иметь высокую эффективность как при малой нагрузке (10—50%), так и при полной

также потребоваться двойные трансформаторы тока (для контроля тока переключения и тока через индуктивность). В этом случае затруднительно также реализовать предварительную зарядку выходного конденсатора для исключения пускового броска тока.

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

На основе базовой конфигурации безмостовой схемы в сотрудничестве с Isle Engineering (немецкой независимой консалтинговой компанией) была разработана модифицированная версия экспериментальной высокоэффективной безмостовой схемы ККМ с максимальной выходной мощностью 1500 Вт [4]. Она показана на рисунке 3. Задача состояла в повышении эффективности при работе на полную нагрузку до 99%.

На практике полученная эффективность достигла 98,8%.

При использовании контроллера ККМ, основанного на одноканальном управлении, впервые примененном Smedley и Cuk [5], измерять входное напряжение нет необходимости. Такие контроллеры можно заказать у дистрибьюторов [6]. Ток контролируется широкополосным датчиком Холла LAH25 с гальванически развязанным выходом. Применение подобного датчика позволило избежать потерь на измерительном резисторе и применения трансформаторов тока в быстро переключающихся цепях.

Выпрямительные диоды изготовлены из карбида кремния и имеют совмещенную структуру PiN-диодов и диодов Шоттки, сочетая их преимущества — малое прямое падение напряжения и малый заряд обратного восстановления (Q_{RR}).

Переключающие МОП-транзисторы были выбраны из-за малой выходной емкости C_{OSS} , которая позволяет снизить потери при включении. Благодаря нелинейности выходной емкости [7] транзистор отключается при почти нулевом напряжении, что также снижает потери.

На выходе ШИМ стоит схема управления, состоящая из детектора перехода через ноль и логической схемы. Эта схема в зависимости от фазы коммутации управляет управляющим сигналом, поступающим на транзисторы S1 и S2. Напряжение питания ± 12 В для схемы контроллера ККМ и датчика Холла поступает с отдельного обратного преобразователя.

Данная схема наглядно демонстрирует способы повышения эффективности схемы ККМ, хотя и не лишена недостатков, например, вырабатывает сильные электрические помехи. Эти недостатки устранены в следующей рассматриваемой схеме.

ОДНОПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМА

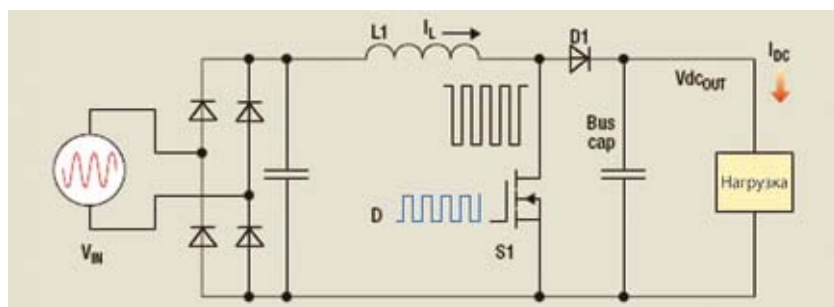
Для устранения перечисленных недостатков была разработана безмостовая схема на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) и снабберными (демпфирующими) цепями для уменьшения потерь переключения [8]. Другой вариант этой схемы, с использованием полевых транзисторов, показан на рисунке 4. Здесь нет снабберных цепей и добавлены диоды для подзарядки конденсатора.

Низкочастотные однополупериодные выпрямители (диоды D5 и D6) поочередно соединяют сеть с отрицательной обкладкой конденсатора. Диоды D3 и D4 подзаряжают конденсатор. Вместе диоды D3, D4, D5 и D6 образуют обычный низкочастотный мост.

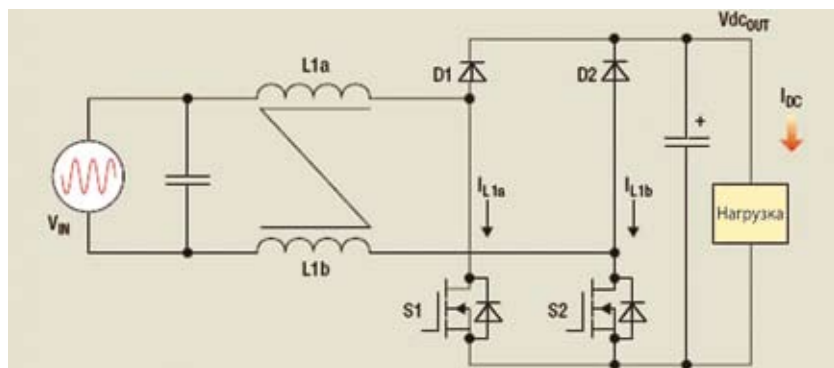
Ключи S1 и S2 управляют напряжением на несвязанных катушках L1 и L2. Связанные катушки вносят меньше потерь, чем несвязанные, однако последние имеют меньший размер и стоимость за счет того, что высокочастотное возбуждение и индукционный нагрев действуют только в течение половины цикла.

Большая часть тока протекает через диоды D5 и D6. Это способствует уменьшению рассеиваемой мощности транзисторов, что уменьшает их нагрев, а следовательно — и сопротивление в открытом состоянии ($R_{DS(on)}$), которое увеличивается вдвое при изменении температуры от комнатной до максимальной рабочей. Таким образом, чем ниже температура перехода, тем меньше потери.

Благодаря тому, что в этой схеме датчик тока находится под тем же потенциалом, что и нагрузка, подойти к выбору схемы контроля тока можно более гибко. Конечно, резистивная схема измерения вносит дополнительные потери, но насколько они велики?



a)



б)

Рис. 2. Сравнение традиционной (а) и безмостовой (б) схем ККМ

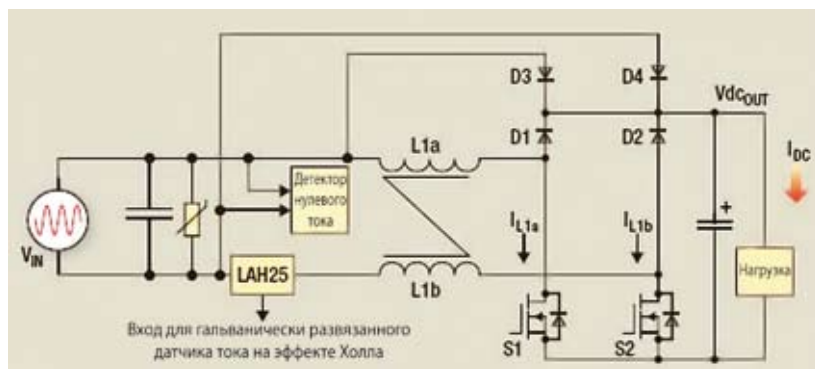


Рис. 3. Безмостовая схема компенсации КМ с датчиком Холла и подзарядкой конденсатора. Эффективность достигает около 98,8% при полной нагрузке

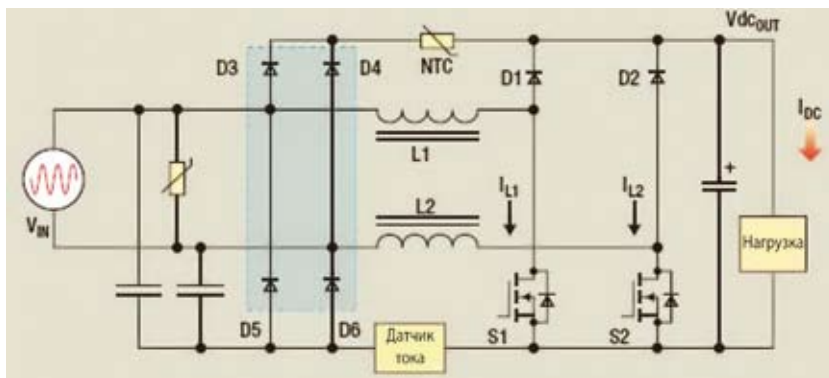


Рис. 4. Безмостовая однополупериодная схема ККМ

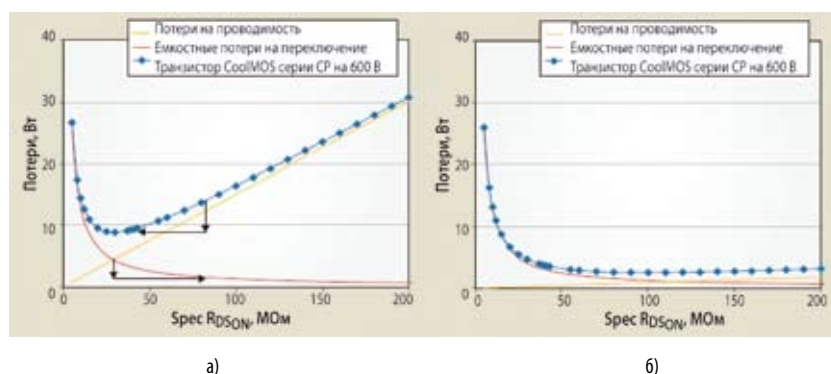


Рис. 5. Потери на МОП-транзисторах меняются с изменением сопротивления $R_{DS(on)}$. При входном напряжении 90 В минимум потерь наблюдается при $R_{DS(on)} = 30 \text{ МОм}$ (а). При высоком входном напряжении (208 В) минимальные потери получаются при использовании более высокого сопротивления и меньшей емкости C_{oss} (б)

Рассчитаем преобразователь мощностью 1 кВт с КПД 90% и входным напряжением 90 В. Пусть для получения максимального измерительного напряжения требуется сопротивление 26 МОм, тогда максимальный ток равен:

$$I_{PK} = \frac{P_{OUT} \cdot \sqrt{2}}{\eta \cdot V_{INMIN}} = 17,64 \text{ А.} \quad (1)$$

На резисторе рассеивается мощность:

$$P_{SENSE} = \left(\frac{I_{PK}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R_{SENSE} = 4,365 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Таким образом, потери при малом напряжении составляют 0,5%. Однако при работе на более высоком напряжении потери будут меньше. Так, при входном напряжении 208 В мощность P_{SENSE} будет всего лишь 0,755 Вт, то есть менее 0,1%. В большинстве случаев такие потери приемлемы. Заметим, что исключение силового выпрямительного моста позволяет экономить от 5 до 8 Вт.

На первый взгляд может показаться, что данная схема содержит почти вдвое больше компонентов, чем на рисунке 2а. Тем не менее, при использовании полупроводниковых изделий той же ценовой категории безмостовая схема более эффективна (см. рис. 1) из-за того, что сигнал делится на две фазы.

Попробуем понять, почему так происходит. На рисунке 5 приведены характе-

ристики работы MOSFET в современных схемах ККМ с наименьшими потерями при работе на полной нагрузке и наименьшем входном напряжении (данные взяты из справочных листов). КПД 800-ваттной схемы составляет 85% при частоте переключения 130 кГц. Входное напряжение равно 90 В (график а) и 208 В (график б). По оси х отложены номинальные значения $R_{DS(on)}$ при температуре 105°C.

Поскольку потери при выключении MOSFET с быстрым восстановлением (super-junction) пренебрежимо малы [7], то будем рассматривать неизбежные динамические потери, возникающие из-за разряда C_{oss} при включении схемы. При использовании традиционных диодов эти потери могут быть незаметны на фоне потерь в Q_{RR} и C_{oss} выпрямительных диодов. Однако при использовании более современных диодов на карбиде кремния и даже ультрабыстрых кремневых диодов потерями на выходной емкости транзистора нельзя пренебречь [9].

Из рисунка 5а видно, что потери минимальны при сопротивлении $R_{DS(on)}$ 25...30 МОм. При максимальной нагрузке и минимальном сетевом напряжении потери на проводимость и переключение сбалансированы и минимальны. Для получения такого сопротивления можно параллельно включить два 75-МОм транзистора в корпусе TO-247.

Однако это не лучший способ с точки зрения эффективности, особенно если схема безмостовая, где независимо от величины тока и напряжения будут присутствовать потери при переключении C_{oss} . Учитывая, что в безмостовой схеме меньше потерь, можно ослабить требования к транзисторам.

Однако более важно то, что при использовании одиночного транзистора с сопротивлением 75 МОм вместо транзистора с сопротивлением 25...30 МОм потери при переключении C_{oss} уменьшаются вдвое. Следовательно, потери при переключении других элементов также становятся меньше. На рисунке 5б приведена характеристика работы на полную нагрузку при входном сигнале 208 В, когда оптимальное сопротивление транзистора равно 100 МОм. На практике получается так, что даже при сопротивлении 25...30 МОм, идеальном для работы при низком напряжении сети, общие потери в схеме удваиваются из-за больших потерь на переключение C_{oss} при напряжении 208 В. При работе на более низкую нагрузку (50% и менее) характеристики ухудшаются еще сильнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Janick, J., «IBM Technology and Solutions», IBM Power and Cooling Symposium, October 2007, Raleigh, N.C., proceedings at www-03.ibm.com/procurement.
2. Mitchell, D.M., «AC-DC Converter Having an Improved Power Factor», U.S. Patent 4,412,277, Oct. 25, 1983.
3. Moriconi, U., «A Bridgeless PFC Configuration Based on L4981 PFC Controller», Application Note AN 1606, STMicroelectronics, November 2002.
4. Hancock, J., «Meeting the Challenge for Offline SMPS Through Improved Semiconductor Current Density», IBM Power and Cooling Symposium, 2005, proceedings at www-03.ibm.com/procurement.
5. Smith, K.M., Jr.; Lai, Z.; and Smedley, K.M., «A New PWM Controller with One-Cycle response», IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 14, Issue 1, January 1999, pp. 142—150.
6. Lu, B.; Brown, R.; and Soldano, M., «Bridgeless PFC Implementation Using One Cycle Control Technique», IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 2005 proceedings, pp. 812-817.
7. Bjoerk, F.; Hancock, J.; and Deboy, G., «CoolMOS CP: How to Make Most Beneficial Use of the Latest Generation of Super Junction Technology Devices», AN-CoolMOS CP-01, www.infineon.com.
8. Souza, A.F., and Barbi, I., «High Power Factor Rectifier with Reduced Conduction and Commutation Losses», International Telecommunication Energy Conference (INTELEC) proceedings, June 1999, session 8, paper 1.
9. Lu, B.; Dong, W.; Shao, Q.; and Lee, F., «Performance Evaluation of CoolMOS and SiC Diode for Single Phase Power Factor Correction Applications», IEEE APEC 2003 proceedings.