

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.314.58

ПОЛНОМОСТОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МЯГКОЙ
КОММУТАЦИЕЙ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ НАГРУЗКИ

© 2020 С.А. Баран, Г.П. Сметанкин

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Разработка преобразователей с мягкой коммутацией для ЭПС позволит улучшить вопросы излучения помех и электромагнитной совместимости, снизить массогабаритные показатели за счет увеличения КПД и частоты преобразования. Значительное уменьшение коммутационных потерь позволяет использовать мощные IGBT – модули на повышенных частотах, которые они не способны выдержать в традиционных преобразователях с широтно-импульсной коммутацией.

Ключевые слова: IGBT-транзисторы, частотное преобразование, коммутация, электромагнитная совместимость.

Поступила в редакцию 02.08.2019

После доработки 04.10.2019

Принята к публикации 17.10.2019

Стремительное развитие элементной базы для силовой электроники в начале XXI века привело к появлению нового поколения IGBT с улучшенными характеристиками, дающими возможность снизить прямые потери проводимости и коммутационные потери. Это позволяет повысить КПД преобразователей и, как следствие, удельную мощность, что особенно важно для ЭПС.

Дальнейшее снижение массогабаритных показателей преобразовательной техники ЭПС возможно при значительном увеличении частоты коммутации, что заставляет разработчиков применять различные схемотехнические решения, позволяющие увеличить удельную мощность преобразователей по сравнению с традиционными схемами с широтно-импульсным регулированием за счет уменьшения коммутационных потерь IGBT (рис. 1).

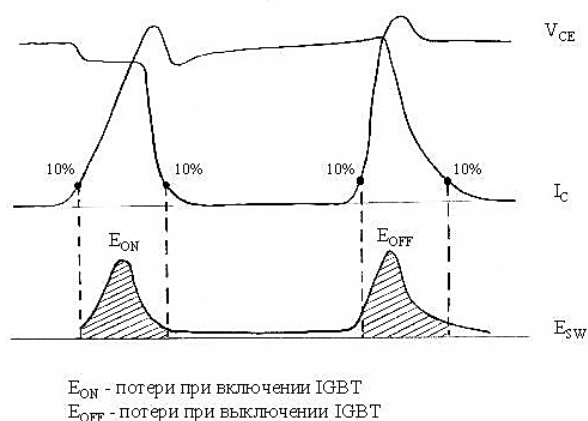


Рисунок 1 – Динамические потери IGBT при жесткой коммутации [Dynamic IGBT losses with hard commutation]

Одно из таких решений – это применение полномостового преобразователя с квазирезонансной коммутацией [1-2], в котором переходные процессы на временных интервалах переключения IGBT протекают при колебательном изменении токов и напряжений за счет паразитных и дополнительных реактивных элементов цепей коммутации. Включение и выключение IGBT в таких преобразователях осуществляется при малом или нулевом значениях тока и (или) напряжения на них, таким образом, имеет место так называемая «мягкая коммутация», что существенно снижает коммутационные потери и перенапряжения на силовых элементах.

На рисунке 2 представлена схема полномостового преобразователя с последовательным резонансным индуктором, способного работать в режиме мягкой коммутации. Выключение IGBT осуществляется при нулевом напряжении на них, а включение – при нулевых значениях тока и напряжения за счет колебательного перезаряда параллельного конденсатора в интервале коммутации.

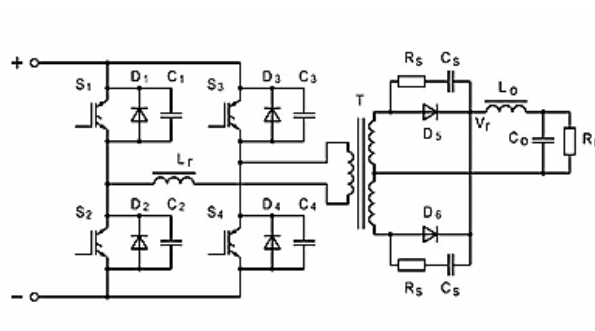


Рисунок 2 – Полномостовой преобразователь с мягкой коммутацией с последовательным резонансным индуктором [Full bridge soft-commanded converter with series resonant inductor]

Для управления мостового каскада используется метод сдвига по фазе момента переключения одной половины моста относительно другой (рис. 3). Особенностью фазосдвигающей технологии является то, что два IGBT, соединенные последовательно с трансформатором, могут быть открыты, а напряжение, приложенное к трансформатору, равно нулю. Это возможно потому, что эти IGBT не являются диагональными, а представляют собой или два верхних, или два нижних силовых ключа. В этом режиме первичная обмотка трансформатора по существу закорочена и имеет потенциал соответствующей шины входного напряжения. Значение тока первичной обмотки поддерживается на предыдущем уровне, так как не имеется напряжения, вызывающего изменение его значения.

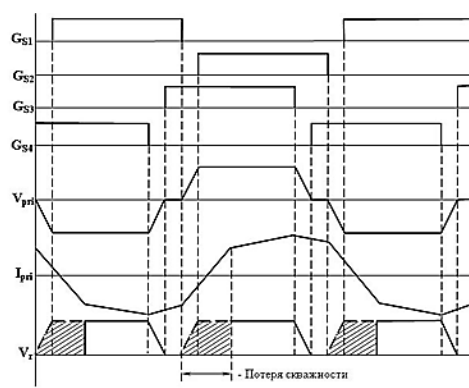


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы преобразователя с последовательным резонансным индуктором [Timing diagram of a converter with a series resonant inductor]

Когда один из IGBT выключается, ток первичной обмотки начинает протекать через снабберную емкость ключа, порождая резонансный процесс между стоком ключа

и противоположной шиной входного напряжения, что позволяет противоположному IGBT того же самого плеча моста включиться при нулевом напряжении.

Энергия, необходимая для перезаряда снабберных конденсаторов $C_1 \div C_4$ накапливается в резонансном индукторе L_r , который может быть собственной индуктивностью рассеяния силового трансформатора L_{Lk} . Энергия, запасенная в резонансной индуктивности, должна быть больше, чем энергия, требуемая, чтобы заряжать и разряжать снабберные емкости IGBT во время резонансного процесса в пределах его длительности.

$$W_L = \frac{(L_r + L_{Lk}) I_{pri}^2}{2},$$

где I_{pri} – ток первичной обмотки,

$$W_C = \frac{C_r V_{pri}^2}{2},$$

где V_{pri} – напряжение первичной обмотки, C_r – суммарная емкость паразитных выходных емкостей IGBT и снабберных конденсаторов одного плеча.

Отсюда следует требование к величине резонансной индуктивности:

$$L_r > \frac{C_r V_{pri}^2 - I_{pri}^2 L_{Lk}}{I_{pri}^2},$$

т.е. при большой величине индуктивности рассеяния отпадает необходимость в дополнительном индукторе L_r .

Нами был испытан макетный образец данного преобразователя, с выходной мощностью 3 кВт с питанием от сети 3-фазного напряжения ~380В. Он показал высокую надежность, низкий уровень излучения помех, достаточно высокий КПД (до 91-92 %). Однако данная топология преобразователя имеет и ряд серьезных недостатков.

Во-первых, невозможность обеспечения переключения ключей при малой нагрузке или в отсутствии нагрузки. Минимальный ток первичной обмотки определяется выражением:

$$I_{pri(min)} = V_{pri} \sqrt{\frac{C_r}{L_r + L_{Lk}}}.$$

Во-вторых, эффект «потери скважности» – уменьшение эффективной скважности из-за переманивания резонансного индуктора (см. рис. 3):

$$D_{eff} = \frac{D}{1 + \frac{4(L_r + L_{Lk})f_{sw}}{k^2 R_o}},$$

где D – скважность на первичной обмотке трансформатора;

f_{sw} – частота коммутации, коэффициент трансформации;

R_o – сопротивление нагрузки.

Это ведет к необходимости уменьшения значения k с вытекающими отсюда последствиями – увеличение амплитудных значений тока в первичной цепи и напряжений на выпрямительных диодах, увеличение индуктивности выходного дросселя для уменьшения пульсаций тока.

В-третьих, значительная величина L_r и L_{Lk} приводит к значительным паразитным колебаниям между резонансной индуктивностью первичной цепи и паразитной емкостью выпрямительных диодов, что ведет к увеличению интенсивности излучения помех и требует демпфирования диодов снабберными цепями.

Для преодоления указанных недостатков целесообразно использовать схему полномостового преобразователя с дополнительными LCC-цепями (рис. 4), которая способна обеспечить мягкое переключение IGBT во всем диапазоне нагрузки, в т.ч. без нагрузки [3-4].

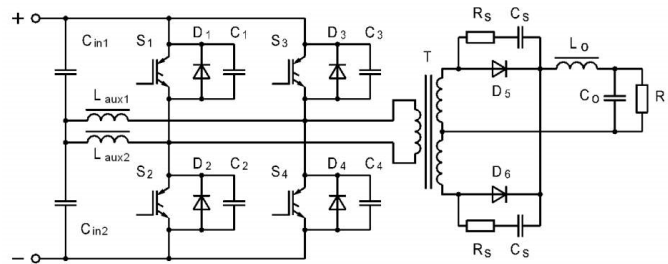


Рисунок 4 – Полномостовой преобразователь с мягкой коммутацией с дополнительными LCC-цепями [Full-bridge soft-commutation converter with optional LCC circuits]

Дополнительные цепи состоят из емкостного делителя напряжения и двух индукторов, подключенных между средней точкой емкостного делителя и средней точкой каждого из плеч моста. Ток, циркулирующий в дополнительных индукторах, помогает разрядить снабберные емкости при переходных процессах в мосту, обеспечивая, таким образом, мягкое переключение во всем диапазоне нагрузки, даже без введения резонансного индуктора L_r [5-7].

Энергия, запасенная в дополнительном индукторе, равна:

$$W_L = \frac{I_o^2}{2k^2} L_{Lk} + \frac{V_{pri}^2}{32f_{sw}^2 L_{aux2}}.$$

Мягкая коммутация обеспечивается при условии $W_L > W_C$.

Как показали расчеты, для применений с высоким входным напряжением, например, выпрямленное 3-фазное напряжение $\sim 380\text{В}$, вклад тока дополнительных индукторов в общий ток через ключи очень велик, что ухудшает КПД и требует применения IGBT-модулей с большим запасом по току. Для таких применений целесообразно оставить в первичной обмотке резонансный индуктор L_r , что значительно увеличивает требуемые индуктивности дополнительных дросселей и снижает ток через ключи, т.е. необходим компромисс между потерей скважности из-за перезаряда L_r и величинами L_{aux1} и L_{aux2} . Правильное решение этого вопроса позволяет создать преобразователь с высоким КПД и, как следствие, большой удельной мощности, низким уровнем электромагнитного излучения, высокой частотой коммутации [8-9].

Был создан и испытан макет преобразователя (рис. 5). Трансформатор – ГМ14ДС 200x100x20, $k = 1,3:1$, намотка бифилярная, $L_{Lk} = 3 \mu\text{H}$, IGBT-модули – Mitsubishi PM75DSA120, $L_r = 3.5 \mu\text{H}$, $L_{aux1} = 210 \mu\text{H}$, $L_{aux2} = 610 \mu\text{H}$, $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$, $C_3 = C_4 = 5 \text{ nF}$, $R_s = 150 \text{ Ом}$, $L_o = 1,3 \text{ мГн}$, $f_{sw} = 20 \text{ КГц}$, $R_H = 8,7 \text{ Ом}$.

КПД преобразователя на полной нагрузке около 95% ($I_o = 34,4 \text{ А}$, $U_o = 300 \text{ В}$, мощность $\approx 10,3 \text{ кВт}$, потеря скважности $\approx 20\%$).

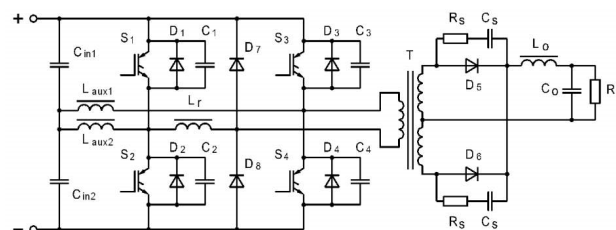


Рисунок 5 – Схема макетного образца преобразователя [Converter prototype layout]

Введенные в схему диоды D_7 и D_8 шунтируют индуктивность L_r при закрытии выпрямительных диодов D_5 и D_6 , что значительно снижает паразитные колебания на них (интенсивность их определяется только величиной L_{Lk}) и уменьшает потери в снаббере C_S-R_S . При $C_S=1\text{ нФ}$ выброс напряжения на диодах составлял $\sim 18\%$ от амплитудного значения, при $C_S=3,3\text{ нФ}$ - $\approx 5\%$ [10-11].

Увеличить удельную мощность преобразователя можно, заменив L_r на насыщаемый индуктор, что уменьшит потерю скважности на полной нагрузке, при условии решении вопроса охлаждения насыщаемого индуктора [12].

Таким образом, разработка преобразователей с мягкой коммутацией для ЭПС позволит улучшить вопросы излучения помех и электромагнитной совместимости, снизить массогабаритные показатели за счет увеличения КПД и частоты преобразования. Значительное уменьшение коммутационных потерь позволяет использовать мощные IGBT – модули на повышенных частотах, которые они не способны выдержать в традиционных преобразователях с широтно-импульсной коммутацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vlatcovic V, Ridley R. B. Considerations for high-voltage high-power full-bridge ZVS-PWM converter. Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1990. (IEEE Catalog No. CH2853-0/90/0000-0265) P. 275-284.
2. Jovanovich M. M., Tabisz W. A., Lee F. C. Zero-Voltage Switching Technique in High-Frequency Off-Line Converters. IEEE Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1988.
3. Jain D.K., Jain P.K., Haibo Zhang Analysis and Design of an Auxiliary Commutated Full Bridge DC/DC Converter Topology Including the Effect of Leakage Inductance. Telecommunications Energy Conference. 2002. ISBN: 0-7803 -7512-2. P. 240-247.
4. Borges B.V., Beirante J.P. A Full Bridge Zero Voltage Switched Phase Shifted DC-DC Converter with Enlarged Duty Cycle and ZVS Range. On Power Electronics and Applications. 2000. № 2. P. 2.1-2.6.
5. Шевырёв, Ю. В. Повышение качества электрической энергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями / Шевырёв Ю. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № S4. – 2011. – С. 234-241.
6. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Чэпмэн Д. // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66-69.
7. Добрусин, Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л.А. Добрусин – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 84 с.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200006034>
9. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии / Розанов Ю. К., Рябчицкий М.В. // Электротехника. – 1998. – № 3. – С. 10-17.
10. Солодухо, Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы / Я. Ю. Солодухо. – Москва : Информэлектро, 1987. – 50 с.
11. Парфёнов, Б. М. Статические режимы фильтро-компенсирующих устройств в системах электропривода соизмеримой мощности / Б. М. Парфёнов, Ю. В. Шевырёв // Автоматизированный электропривод. – Сборник научных трудов. – ОАО «Электропривод», 2002. – С. 134-153.
12. Шевырёв, Ю. В. Методы моделирования и повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок / Ю. В. Шевырёв – Москва : Московский государственный геологоразведочный университет, 2005. – 177 с.

REFERENCES

- [1] Vlatcovic V, Ridley R.B. Considerations for High-Voltage High-Power Full-Bridge ZVS-PWM Converter. Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1990. (IEEE Catalog No. CH2853-0/90/0000-0265) P. 275-284.
- [2] Jovanovich M.M., Tabisz W.A., Lee F.C. Zero-Voltage Switching Technique in High-Frequency Off-Line Converters. IEEE Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1988.

- [3] Jain D.K., Jain P.K., Haibo Zhang Analysis and Design of an Auxiliary Commutated Full Bridge DC/DC Converter Topology Including the Effect of Leakage Inductance. Telecommunications Energy Conference. 2002. ISBN: 0-7803 -7512-2. P. 240-247.
- [4] Borges B.V., Beirante J.P. A Full Bridge Zero Voltage Switched Phase Shifted DC-DC Converter with Enlarged Duty Cycle and ZVS Range. On Power Electronics and Applications. 2000. № 2. P. 2.1-2.6.
- [5] Shevryev Yu.V. Povy'shenie kachestva e'lektricheskoy e'nergii v setyax s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami [Improving the Quality of Electrical Energy in Networks with Semiconductor Converters]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-texnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. № S4. 2011. P. 234-241 (in Russian).
- [6] Chapman D. Cena nizkogo kachestva e'lektroe'nergii [Price of Low Quality Electricity]. E'nergoberezhenie [Energy Saving]. 2004. №1. P. 66-69 (in Russian).
- [7] Dobrusin L.A. Fil'tro-kompensiruyushhie ustrojstva dlya preobrazovatel'noj tekhniki [Filter Compensating Devices for Converter Equipment]. Moskva [Moscow]: NTF «Energoprogress», 2003. 84 p. (in Russian).
- [8] GOST 13109-97. Normy kachestva e'lektricheskoy e'nergii v sistemax e'lektrosnabzheniya obshhego naznacheniya [Quality Standards of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006034> (in Russian).
- [9] Rozanov Yu.K., Ryabchitsky M.V. Sovremennyye metody uluchsheniya kachestva e'lektroe'nergii [Modern Methods of Improving the Quality of Electricity]. E'lektrotexnika [Electrical Engineering]. 1998. №3. P. 10-17 (in Russian).
- [10] Soloduh I.Yu. Tendencii kompensacii reaktivnoj moshhnosti. Ch.1. Reaktivnaya moshhnost' pri nesinusoidal'nyx rezhimakh raboty [Reactive Power Compensation Trends. Part 1. Reactive Power during Non-Sinusoidal Operation]. Moskva: Informe'lektro [Moscow: Informelectro]. 1987. 50 p. (in Russian).
- [11] Parfenov B.M., Shevryov Yu.V. Sticheskie rezhimy fil'tro-kompensiruyushhix ustroystv v sistemax e'lektroprivoda soizmerimoy moshhnosti [Static Modes of Filter-Compensating Devices in Electric Drive Systems of Comparable Power]. Avtomatizirovannyj e'lektroprivod [Automated Electric Drive]. Sbornik nauchnyx trudov [Collection of scientific works]. OAO «E'lektroprivod» [«Elektroprivod» OJSC]. Moscow. 2002. P. 134-153 (in Russian).
- [12] Shevryov Yu.V. Metody modelirovaniya i povyseniya e'lektroe'nergeticheskix pokazatelej e'lektrotexnicheskix kompleksov burov'x ustanovok [Methods of Modeling and Improving the Electric Power Indices of Electrical Engineering Complexes of Drilling Rigs]. Moskva: Moskovskij gosudarstvennyj geologorazvedochnyj universitet [Moscow: Moscow State Geological Prospecting University]. 2005. 177 p. (in Russian).

Full-Bridge Converter with Soft Commutation in All Load Range

S.A. Baran¹, G.P. Smetankin²

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0002-3232-4072

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

²ORCID iD: 0000-0002-8191-6496

e-mail: nvo_@mail.ru

Abstract – The development of converters with soft commutation improves issues of radiation interference and electromagnetic compatibility, reduce weight and size parameters by increasing efficiency and conversion frequency. A significant reduction in commutation losses allows the use of high-power IGBT modules at higher frequencies which they are not able to withstand in traditional converters with pulse-width commutation.

Keywords: IGBTs, frequency conversion, commutation, electromagnetic compatibility.