

УДК 621.316.722

Ю.М. Голембиовский, Д.Ю. Луков, М.Г. Коваль

Двунаправленный трехпортовый высокочастотный DC/DC-конвертор

Дается обзор схематехнических решений трехпортовых DC/DC-конверторов с двунаправленным потоком мощности, применяемых для построения сетей постоянного тока в гибридных системах электропитания на возобновляемых источниках энергии. Рассмотрен трехпортовый высокочастотный DC/DC-конвертор с управлением на основе смешанных режимов широтно импульсной и фазовой модуляции. Проведенный анализ электромагнитных процессов, протекающих в преобразователе, показывает перспективность применения его в задачах гибридного электропитания.

Ключевые слова: инвертор, трехпортовый инвертор, управление по методу фазового сдвига, широтно-импульсная модуляция.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-100-105

В последние годы значительный интерес вызывают сети энергоснабжения с распределенной генерацией. В отечественной литературе они получили название интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью. В зарубежной литературе их называют SMART GRID. Основу таких сетей составляет локальная сеть (микрогрид) с потребителями и источниками электрической энергии. Как правило, это возобновляемые источники энергии на основе фотоэлектрических преобразователей, ветрогенераторных установок, топливных элементов и накопителей электрической энергии для сглаживания пиковых нагрузок и несоответствия фаз генерации и потребления электрической энергии. Микрогриды могут работать как в автономном режиме, так и в составе централизованной сети энергоснабжения.

На сегодняшний день микрогриды работают, как правило, на переменном токе, специфика работы и схемы построения которых хорошо изучены и внедряются сейчас по всему миру. Однако, учитывая характер генерации ряда возобновляемых источников в виде постоянного тока, большой интерес проявляется и к схемам электропитания на постоянном токе и комбинированным с целью снижения количества преобразований и повышения эффективности систем передачи энергии [1, 2].

Типовая архитектура микрогрид на постоянном токе со смешанными потребителями показана на рис. 1.

Микрогрид включает в себя двунаправленные и однонаправленные AC/DC-, DC/DC- и DC/AC-преобразователи, которые связывают между собой (через шину постоянного тока) централизованную сеть переменного тока, ветрогенераторную установку, газопоршневую турбину, фотоэлектрические преобразователи (солнечные панели СП), накопитель электрической энергии, генератор на топливных элементах, а также потребители постоянного и переменного тока.

В микросетях мощностью до 10 кВт можно объединить DC/DC-конверторы фотоэлектрических преобразователей и двунаправленный DC/DC-конвертор накопителя электрической энергии на одном

вентильном комплекте с единой системой управления на основе трехпортового двунаправленного DC/DC-конвертора и тем самым сократить число преобразований, повысить эффективность использования энергии возобновляемых источников и увеличить надежность системы в целом.

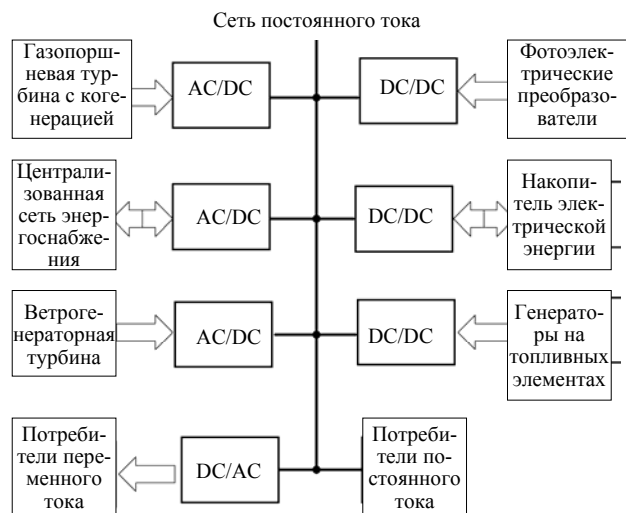


Рис. 1. Микрогрид на постоянном токе

В литературе [3] приводятся три возможные принципиальные структурные схемы трехпортовых преобразователей: неизоллированные трехпортовые конверторы (рис. 2, а), частично изоллированные трехпортовые конверторы (рис. 2, б) и полностью изоллированные трехпортовые конверторы (рис. 2, в).

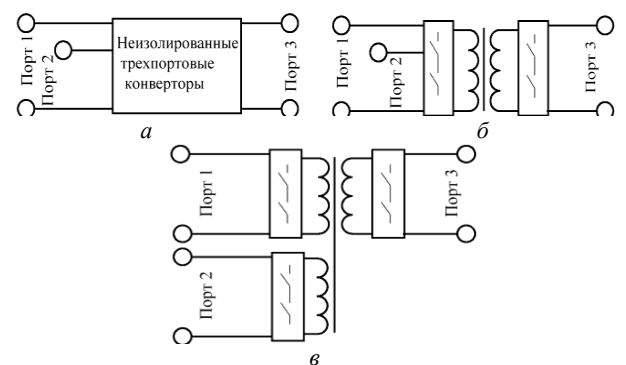


Рис. 2. Структурные схемы трехпортовых конверторов

В литературе [4] приводится наиболее популярная схемотехника силовых каскадов каждой из представленных структурных схем. Основу таких каскадов составляют полумостовые ячейки двухнаправленных понижающих-повышающих конверторов. Рассмотрим в нашем обзоре некоторые из них.

На рис. 3, а приведена схема неизолированного трехпортового DC/DC-конвертора на основе двух понижающих-повышающих двухнаправленных конверторов. Стабилизация тока или напряжения портов в этой схеме осуществляется двумя широтно-импульсно модулированными сигналами со сдвигом на 180° , показанными на рис. 3, б.

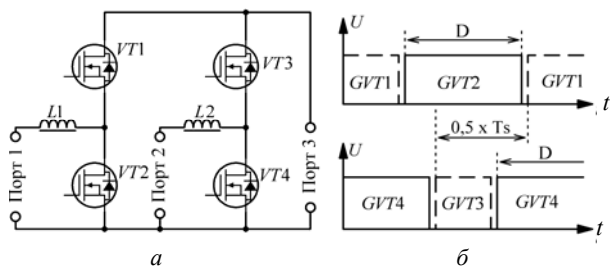


Рис. 3. Структура неизолированного трехпортового конвертора

На рис. 4, а приведена схема трехпортового DC/DC-конвертора с частичной изоляцией. Стабилизация напряжения и тока портов 1 и 2 осуществляется двумя широтно-импульсно модулированными (D) сигналами. Стабилизация тока или напряжения порта 3 осуществляется за счет фазового сдвига (Φ_1) этих сигналов управления. Двухнаправленный поток энергии в этой схеме осуществляется только между портами 1 и 2.

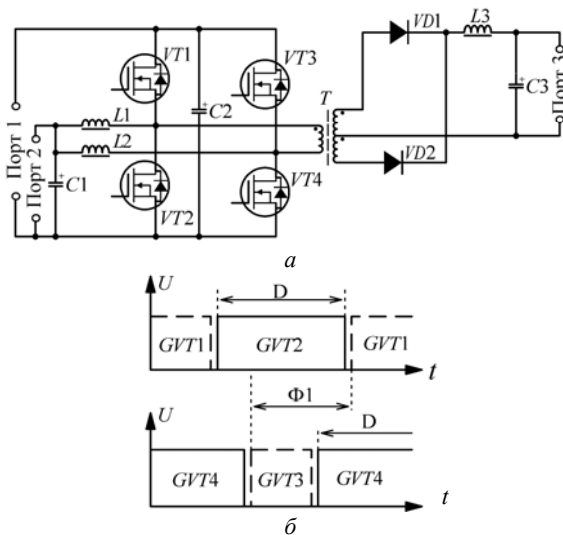


Рис. 4. Структура трехпортового конвертора с частичной изоляцией

На рис. 5, а приведена схема наиболее универсального мостового трехпортового DC/DC-конвертора с полной гальванической изоляцией всех портов.

Стабилизация тока и напряжения портов осуществляется на фиксированной частоте тремя импульсными сигналами со скважностью 0,5, один из которых является ведущим, а два ведомые. Система

управления изменяет фазовые сдвиги Φ_1 , Φ_2 ведомых сигналов и контролирует величину и направление потока энергии между портами. Трехпортовые конверторы с полной изоляцией могут выполняться как на основе инвертора напряжения, так и на основе инвертора тока.

Выбор той или иной схемы будет зависеть: от требования электробезопасности, от разности уровней напряжения между источниками и требования к качеству энергии для потребителей.

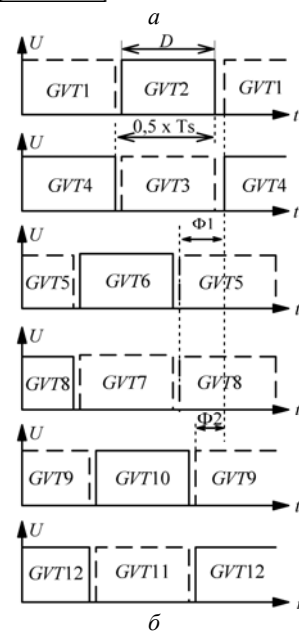
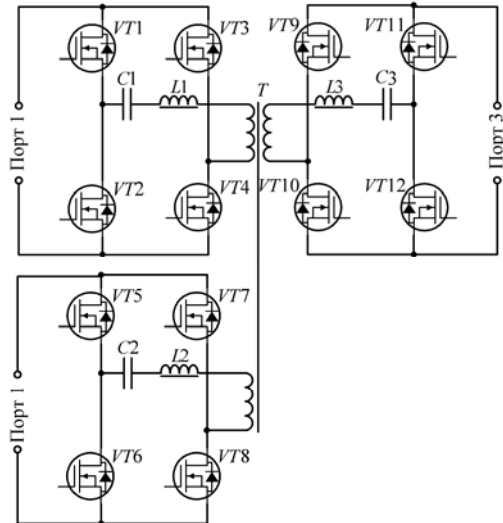


Рис. 5. Структура трехпортового конвертора с полной изоляцией между источниками

В литературе [6, 7] дан анализ работы трехпортового конвертора с частичной изоляцией, схемотехника которого показана на рис. 4. Описываются алгоритм работы ключей и временные диаграммы электромагнитных процессов в преобразователе. Из временных диаграмм следует, что в предлагаемом алгоритме управления ключами трансформатор будет работать с током подмагничивания, что требует введения воздушного зазора в сердечник и как следствие увеличения полей рассеяния и его габаритных

размеров. Кроме того, двунаправленный поток энергии в таком преобразователе осуществляется только между двумя портами 1 и 2. Перетоку энергии от порта 3 к порту 2 (даже в случае замены диодов D1, D2 транзисторами) будет препятствовать индуктивность L3 сглаживающего фильтра L3C3. Исключение из схемы сглаживающей индуктивности L3 приведет к треугольной форме тока в трансформаторе T, а значит, к значительным потерям на скин-эффект. В этой статье мы попытаемся расширить функциональные возможности схемотехнического решения, предлагаемого в [6], и устранить недостатки данного технического решения.

Трехпортовый двунаправленный DC/DC-конвертор

Проведем анализ двунаправленного трехпортового DC/DC-конвертора, у которого один порт будет портом подключения солнечных панелей (СП), второй порт будет портом подключения накопителя электрической энергии (НЭЭ), а третий порт используется для подключения к общей шине постоянного тока (DC микрогрид).

Предлагаемое схемотехническое решение (рис. 6) основано на двух полномостовых инверторах как наиболее универсальных с точки зрения направления потоков энергии и дополнительно включает два индуктора L1, L2, трансформатор T, входные емкости C1–C3 портов 1–3 соответственно, индуктор Lac, роль которого может выполнять индуктивность рассеяния трансформатора T. Ключи S1, S2 предназначены для подключения к сети постоянного тока. К первому порту подключается накопитель электрической энергии (АКБ), который может быть как потребителем, так и источником энергии. Ко второму порту подключаются солнечные батареи (PV), которые могут быть только источниками энергии. К третьему порту подключается шина постоянного тока.

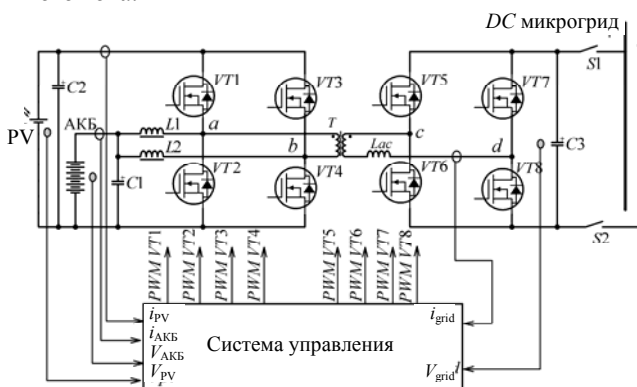


Рис. 6. Трехпортовый DC/DC-конвертор

Система управления конвертора должна обеспечить выдачу энергии в период дефицита или запасаение энергии в накопителе в период избыточной генерации других источников. Таким образом, в схеме возможно шесть режимов работы, которые показаны на рис. 7. Стрелками указаны направления потоков энергии. Рисунки 7, а-в – иллюстрируют ситуацию, когда все источники используются, на-

пример, в дневное время. Рисунки 7, з, д показывают направление потоков энергии характерное для ночного времени. Рисунок 7, е соответствует ситуации когда НЭЭ заряжен, а потребители питаются только энергией солнечных батарей (СП).

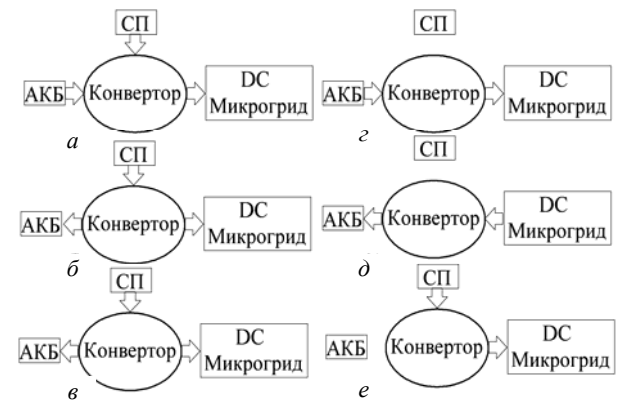


Рис. 7. Режимы работы трехпортового DC/DC-конвертора

Из диаграмм потоков энергии видно, что в отличие от обычных преобразователей, у которых, как правило, предусмотрен один вход и один выход (англ. single-input single-output (SISO)), в данном преобразователе возможны еще варианты состояний: один вход и два выхода (англ. single-input-dual-output (SIDO)), и два входа и один выход (англ. dual-input-single-output (DISO)). Кроме того, система управления конвертором должна обеспечить поиск и поддержание точки максимальной мощности генерации солнечной батареи.

Принцип управления ключами

На рис. 8 показаны идеализированные сигналы управления ключами и образующееся напряжение на обмотках трансформатора T в точках a–b. Регулирование напряжения и тока портов 1 и 2 осуществляется четырьмя сигналами управления GVT1–GVT4 ключей VT1–VT4 соответственно, причем два сигнала управления работают в комплементарной паре с широтно-импульсным регулированием D1 (ШИР). Пара сигналов управления GVT1–GVT2 является ведущей, а остальные сигналы управления GVT3–GVT8 ведомые и синхронизируются от ведущей пары. Сигналы управления GVT3, GVT4 имеют постоянный фиксированный фазовый сдвиг Ф1, равный 180 градусам. Идеальная регулировочная характеристика стабилизатора портов 1 и 2 имеет вид

$$V_{DC2} = \frac{V_{DC1}}{(1-D1)}, \tag{1}$$

где V_{DC1} – напряжение на входе АКБ, V_{DC2} – напряжение на входе PV, D1 – коэффициент заполнения импульсов управления ключами VT2 и VT4, который равен отношению длительности импульса к периоду.

Сигналы управления GVT5–GVT8 имеют широтно-импульсное регулирование D2 с парафазным режимом управления. Коэффициент заполнения D2 определяется как логическое произведение сигналов управления диагонально расположенных ключей, т.е.

$$GVT5 = GVT8 = GVT1 \& GVT4,$$

$$GVT6 = GVT7 = GVT2 \& GVT3.$$

Сигналы управления $GVT5$, $GVT6$ ключей $VT5$, $VT6$ имеют начальный фазовый сдвиг от ведущей пары, равный нулю, а сигналы управления $GVT7$, $GVT8$ ключей $VT7$, $VT8$ имеют фиксированный фазовый сдвиг, равный 180° относительно пары сигналов $GVT5$, $GVT6$.

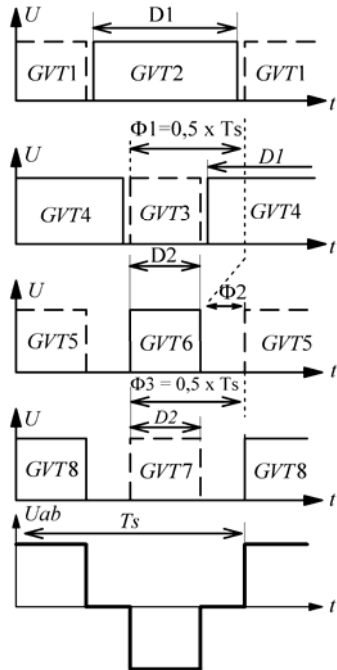


Рис. 8. Сигналы управления ключами двухнаправленного трехпортового DC/DC-конвертора

Стабилизация напряжения и тока порта 3 осуществляется за счет фазового сдвига $\Phi 2$ между группой сигналов управления $GVT1$ – $GVT4$ и $GVT5$ –

$GVT8$. Фазовый сдвиг $\Phi 2$ определяет поток энергии между накопителем (НЭЭ) и шиной постоянного тока (DC микрогрид). Отставание по фазе сигналов управления $GVT5$ – $GVT8$ приводит к передаче потока энергии от накопителя к шине постоянного тока, а опережение – к обратному направлению потока от шины постоянного тока к накопителю.

Моделирование двухнаправленного трехпортового DC/DC конвертора

Моделирование работы конвертора проводилось в среде MATLAB/Simulink. Модель рис. 9 содержит: источники $DC1$ – $DC3$, развязывающие диоды $VD1$ и $VD2$, входные сопротивления R_{in1} – R_{in3} , имитирующие импеданс подводящих проводов, нагрузочное сопротивление RL , индукторы $L1$ – $L3$, трансформатор T , два инверторных моста, систему управления Control System реализующую сигналы управления в соответствии с рис. 8. Блоки Constant 1, 2 служат для задания коэффициента заполнения $D1$ и фазового сдвига $\Phi 2$ соответственно.

На рис. 10–12 показаны временные диаграммы электромагнитных процессов режимов работы преобразователя, полученные в результате моделирования, которые соответствуют состояниям рис. 7, а–в при следующих параметрах модели: частота преобразования $F_s = 50$ кГц, напряжение $DC1 = 12$ В, $DC2 = 33$ В, $DC3 = 385$ В, реакторы $L1 = L2 = 30$ мкГн, $L3 = 50$ мкГн, коэффициент трансформации $n = 6:74$, сопротивление нагрузки $RL = 250$ Ом. На рисунках обозначено: $Iw1$, $Uw1$ – ток и напряжение первичной обмотки трансформатора; $Ivt3$, $GVT3$ – ток и сигнал управления ключа $VT3$; $Ivt4$, $GVT4$ – ток и сигнал управления ключа $VT4$; $Ivt7$, $GVT7$ – ток и сигнал управления ключа $VT7$; $Ivt8$, $GVT8$ – ток и сигнал управления ключа $VT8$.

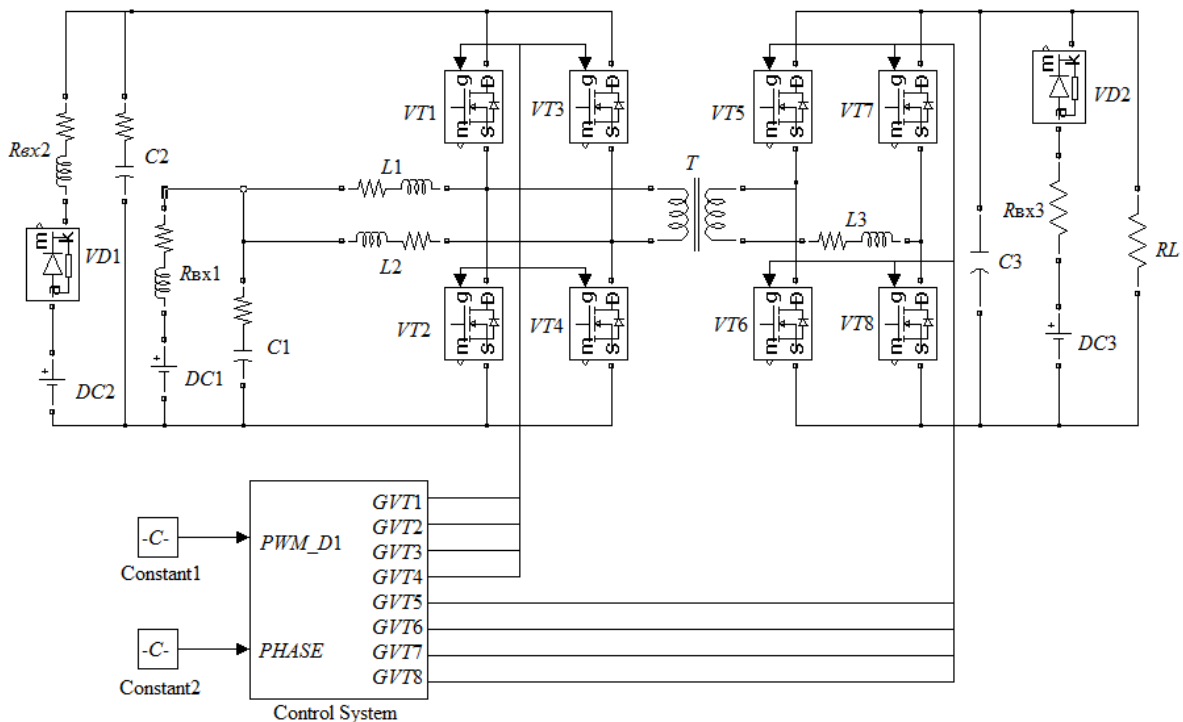


Рис. 9. Схема Simulink модели трехпортового DC/DC-конвертора

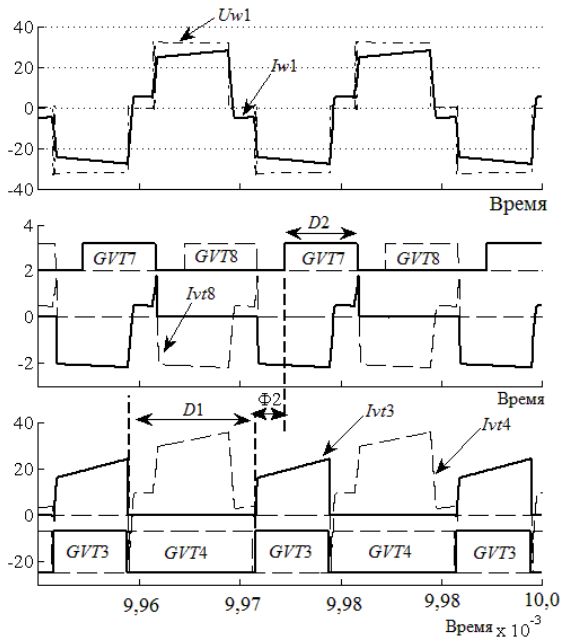


Рис. 10. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя в режиме НЭЭ + СП => DC микрогрид.
Коэффициент заполнения $D1 = 62\%$; $D2 = 37\%$,
 $\Phi2 =$ минус 52 электрических градуса

При этих параметрах токи портов 1, 2 и 3 распределились следующим образом: $-12,6$; $-14,9$ и $+1,58$ А соответственно. Минус означает исходящий ток от порта, плюс – входящий ток порта.

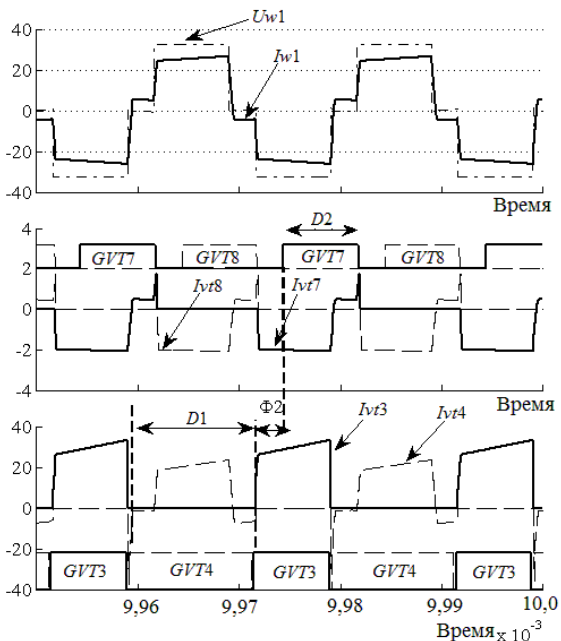


Рис. 11. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя в режиме СП => DC микрогрид + НЭЭ.
Коэффициент заполнения $D1 = 61\%$, $D2 = 38\%$,
 $\Phi2 =$ минус 52 электрических градуса

При этих параметрах токи портов 1, 2 и 3 распределились следующим образом: $+12,6$; $-21,4$ и $+1,6$ А соответственно.

При этих параметрах токи портов 1, 2 и 3 распределились следующим образом: $+49,48$, $-8,76$ и $-0,85$ А соответственно

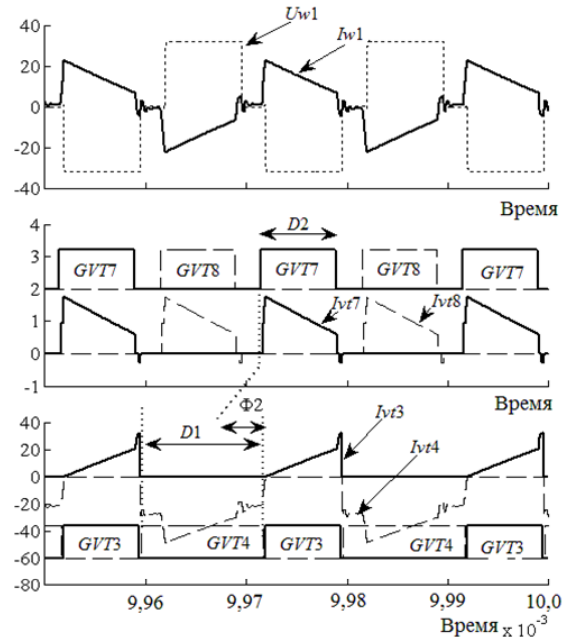


Рис. 12. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя в режиме СП + DC микрогрид => НЭЭ.
Коэффициент заполнения $D1 = 61\%$, $D2 = 38\%$,
 $\Phi2 =$ плюс 9 электрических градуса

Выводы

Модифицирована схема трехпортового двунаправленного DC/DC-конвертора, позволяющего сократить число преобразований, повысить эффективность использования энергии возобновляемых источников и увеличить надежность системы электропитания в целом. Предложен оригинальный способ управления трехпортовым DC/DC-конвертором, который реализует двунаправленный поток энергии в любом из трех портов, на основе смешанного широтно-импульсного и фазового управления. Временные диаграммы электромагнитных процессов подтверждают достоверность разработанного алгоритма управления ключами.

Литература

- Trigueiro dos Santos L. Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints / L. Trigueiro dos Santos, M. Sechilariu, F. Locment // MDPI journal, buildings. – 2016. – № 6(4):50. – URL: <http://www.mdpi.com/2075-5309/6/4/50/pdf> (дата обращения: 09.09.2016).
- Sechilariu M. Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid / M. Sechilariu, F. Locment, B. Wang // MDPI journal, Energies. – 2015. – № 8. – P. 7945–7967. – URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/8/7945/pdf> (дата обращения: 31.07.2015).
- Gao L. A DC microgrid coordinated control strategy based on integrator current sharing / L. Gao, Y. Liu, H. Ren Guerrero, M. Josep // MDPI journal, energies. – 2017. – Vol. 10, № 8. – P. 1116. – URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1116/pdf> (дата обращения: 1.08.2017).
- Wang C.S. An isolated three-port bidirectional DC-DC-converter with enlarged ZVS region for HESS applications in DC microgrids / C.S. Wang, W. Li, Y.F. Wang, F.Q. Han, Z. Meng, G.D. Li // MDPI journal, Energies. –

2017. – Vol. 10, № 8. – P. 446. – URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/446/pdf> (дата обращения: 1.04.2017).

5. Zhao C. Isolated tree-port bidirectional DC-DC converter: a dissertation submitted to for the degree of doctor of sciences. – Zhejiang, 2010. – 152 p.

6. Zhang Z. Interleaved boost-half-bridge dual-input DC-DC converter with a PWM plus phase-shift control for fuel cell applications / Z. Zhang, M.A.E. Andersen // *IECON-2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2013. – P. 1679–1684.

7. Li W. PWM Plus Phase Angle Shift (PPAS) Control Scheme for Combined Multiport DC/DC Converters / W. Li, J. Xiao, Y. Zhao, X. He // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2012. – Vol. 27. – P. 1479–1489.

Голембиовский Юрий Мичиславович

Д-р техн. наук, профессор каф. «Системотехника» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина (СарГТУ)
 Политехническая ул., 77, г. Саратов, Россия, 410054
 Тел.: + 7-917-627-85-38
 Эл. почта: yugol@sstu.ru

Луков Дмитрий Юрьевич

Аспирант каф. «Системотехника» СарГТУ
 Политехническая ул., 77, г. Саратов, Россия, 410054.
 Тел.: + 7-927-912-70-58
 Эл. почта: lukov-d@yandex.ru

Коваль Михаил Генрихович

Инженер-программист
 научно-производственной фирмы «Вымпел»
 Московская ул., 66, г. Саратов, Россия, 410002
 Тел.: +7-906-154-44-88
 Эл. почта: milds@bk.ru

Golembiovsky Y.M., Lukov D.Y., Koval M.G.

Bidirectional three-port high-frequency DC/DC-converter

The paper gives an overview of circuit solutions of three-port DC-DC converters with bi-directional power flux used to build DC networks in hybrid power systems on renewable energy supplies. A three-port high-frequency DC-DC-converter with control based on mixed modes of pulse width and phase modulation is considered. The analysis of electromagnetic processes occurring in the converter shows the prospects of its application in the tasks of hybrid power supply.

Keywords: inverter, three-port inverter, control by the method of phase shift, pulse width modulation.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-100-105

References

1. Dos Santos L.T., Sechilariu M., Locment F. Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints. *MDPI journal, buildings*, 2016, 6(4), 50. Available at <http://www.mdpi.com/2075-5309/6/4/50/pdf> (accessed: 09 Dec. 2016).

2. Sechilariu M., Locment F., Wang B. Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid. *MDPI journal, Energies*, 2015, 8, pp. 7945–7967. Available at <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/8/7945/pdf> (accessed: 31 July 2015).

3. Gao L., Liu Y., Ren Guerrero H., Josep M. A DC microgrid coordinated control strategy based on integrator current sharing. *MDPI Journal, Energies*, 2017, № 10(8), P. 1116. Available at <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1116/pdf> (accessed: 1 Aug. 2017).

4. Wang C.S., Li W., Wang Y.F., Han F.Q., Meng Z., Li G.D. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with enlarged ZVS region for HESS applications in DC microgrids. *MDPI Journal, Energies*, 2017, 10(4), 446. Available at <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/446/pdf> (accessed 1 April 2017).

5. Zhao C. Isolated tree-port bidirectional DC-DC converter. A dissertation submitted to for the degree of doctor of sciences, 2010. Zhejiang, 2010. 152 p.

6. Zhang Z., Andersen M.A.E. Interleaved boost-half-bridge dual-input DC-DC converter with a PWM plus phase-shift control for fuel cell applications. *IECON-2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 1679–1684.

7. Li W., Xiao J., Zhao Y., He X. PWM Plus Phase Angle Shift (PPAS) Control Scheme for Combined Multiport DC/DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, Vol. 27, pp. 1479–1489.

Yuriy. M. Golembiovsky

Doctor of Engineering Sciences, Professor
 Department. «Sistemotekhnika» Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin
 77, Politekhnikeskaya st., Saratov, Russia, 410054
 Phone: +7-917-627-85-38
 E-mail: yugol@sstu.ru

Dmitry Y. Lukov

PhD student Department. «Sistemotekhnika»
 Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin
 77, Politekhnikeskaya st., Saratov, Russia, 410054
 Phone: +7-927-912-70-58
 E-mail: lukov-d@yandex.ru

Mikhail G. Koval

Engineer, NPO Vympel
 66, Moscovskaya St., Saratov, Russia, 410002
 Phone: +7-906-154-44-88
 E-mail: milds@bk.ru