

УДК 621.314.5

МОДИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КВАЗИ-ИМПЕДАНСНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Д.В. Панфилов¹, И.А. Баховцев¹, А.А. Гусев^{2,3}

¹Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

²Черниговский национальный технологический университет,
Чернигов, Украина

³Таллиннский технический университет, Таллинн, Эстония

В данной статье предложена новая топология квази-импедансного инвертора, позволяющая автономной системе электроснабжения работать в режиме холостого хода без необходимости подключения балластной нагрузки. Описано применение импульсных повышающих преобразователей и квази-импедансных преобразователей в составе автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками электроэнергии. Рассмотрена проблема работы традиционного квази-импедансного инвертора напряжения в режиме малой нагрузки и на холостом ходу. Предложено схемотехническое решение данной проблемы для трехфазного двухуровневого квази-импедансного инвертора и трехфазного трехуровневого квази-импедансного инвертора. Приведены соотношения для загрузки дополнительных компонентов схемы по токам и напряжениям. Рассмотрен способ управления для модифицированного квази-импедансного инвертора. Приведены результаты моделирования и эксперимента для трехфазной трехуровневой топологии традиционного и модифицированного квази-импедансного инвертора, подтверждающие работоспособность предложенной схемы. Проведено сравнение внешней характеристики и зависимости КПД от мощности нагрузки предложенной схемы с аналогичными характеристиками традиционного квази-импедансного инвертора. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках предложенной топологии и о возможностях ее применения.

Ключевые слова: трехфазный трехуровневый инвертор напряжения, квази-импедансный инвертор, ШИМ, холостой ход, моделирование, эксперимент.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-105-117

Введение

Автономные системы электроснабжения с солнечными панелями и накопителями электроэнергии получили широкое распространение в удаленных регионах страны, где есть необходимость в бесперебойном электроснабжении малой мощности (до 10 кВт) [1]. Для стабилизации выходного напряжения системы обычно используются повышающе-понижающие преобразователи, поскольку выходное напряжение солнечных панелей может меняться в широком диапазоне в зависимости от окружающих условий и нагрузки [2]. В случае необходимости получения стандартного переменного выходного напряжения со стабилизированным действующим значением основной гармоники, при широком изменении входного напряжения, как правило, применяется инвертор напряжения с повышающим преобразователем [3–7].

Другим типом преобразователей, позволяющих выполнять аналогичные функции в автономных системах электроснабжения, являются квази-импедансные инверторы (КИИ) [8–11]. Топология типового трехфазного КИИ представлена на

рис. 1, а. Данные преобразователи сочетают в себе качества традиционных повышающих преобразователей, такие как широкий диапазон регулирования выходного напряжения, непрерывный входной ток, а также обладают собственными преимуществами: однократным преобразованием энергии и устойчивостью к короткому замыканию стоек инвертора [9, 10]. КИИ повышает выходное напряжение за счет увеличения напряжения в звене постоянного тока, при добавлении дополнительного состояния сквозной проводимости инвертора, в котором все ключи открыты, и энергия накапливается от источника в дросселях квази-импедансных цепей. В рабочих состояниях инвертора напряжение заряженных от дросселей конденсаторов складывается и подключается к нагрузке [10, 12].

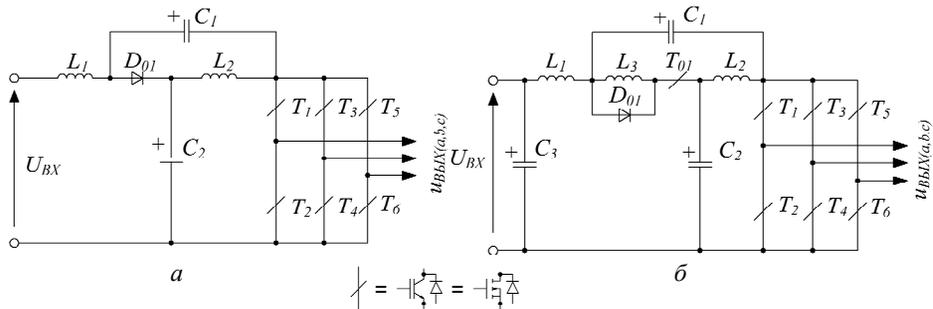


Рис. 1 – Топологии традиционного КИИ (а) и модифицированного КИИ (б)

Fig. 1 – Topology of conventional qZSI (a) and modified qZSI (b)

Однако, как и большинство импульсных повышающих преобразователей, КИИ обладают существенным недостатком. При работе на малую нагрузку, а также на холостом ходу данные преобразователи переходят в режим прерывистого входного тока, что приводит к неконтролируемому нарастанию напряжения в звене постоянного тока [13]. В настоящей статье предлагается схемотехническое решение данной проблемы. Предложенная топология КИИ изображена на рис. 1, б.

1. Работа КИИ в режиме холостого хода

На рис. 2 представлены схемы замещения для традиционного КИИ в рабочих состояниях инвертора (а) и в режиме короткого замыкания (б) [11].

В установившемся режиме конденсаторы C_1 и C_2 заряжены таким образом, что сумма их напряжений соответствует требуемому напряжению в звене постоянного тока. Причем напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 соответственно выражаются соотношениями (1) и (2) [9]:

$$U_{C_1} = U_{ВХ} \left(\frac{Ds}{1-2Ds} \right); \quad (1)$$

$$U_{C_2} = U_{ВХ} \left(\frac{1-Ds}{1-2Ds} \right), \quad (2)$$

где $U_{ВХ}$ – напряжение источника питания, Ds – отношение длительности короткого замыкания к периоду коммутации (причем $Ds < 0,5$). При номинальной нагрузке, на интервале короткого замыкания (рис. 2, б), когда все ключи инверто-

ра открыты, нагрузка не потребляет энергию. Диод D_{01} закрыт под действием приложенного к нему обратного напряжения, так как

$$U_{C_2} > U_{C_1}. \tag{3}$$

В индуктивности L_1 накапливается энергия под действием тока от источника питания, в индуктивности L_2 накапливается энергия от конденсатора C_2 , конденсатор C_1 разряжается под действием напряжения источника питания, приложенного к нему в обратном направлении.

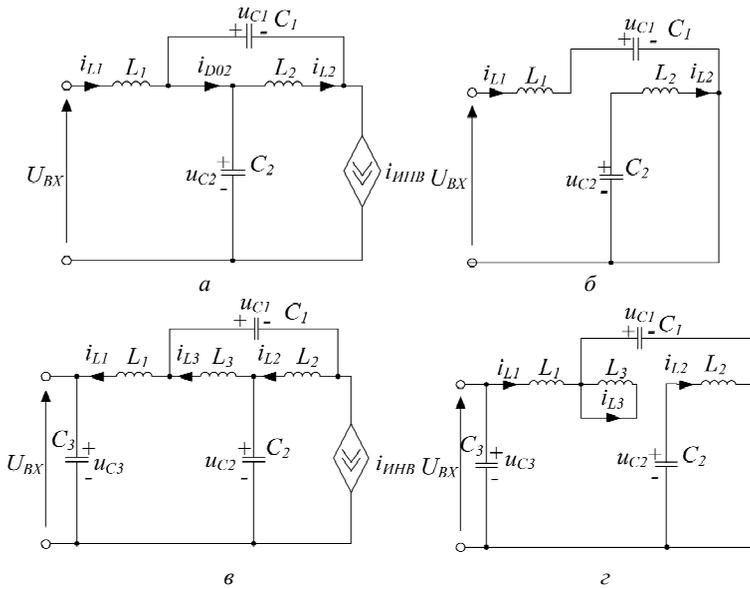


Рис. 2 – Схемы замещения КИИ в рабочих состояниях инвертора (а), в состоянии короткого замыкания (б) и модифицированного КИИ в состоянии обратной проводимости (в) и короткого замыкания (г)

Fig. 2 – Equivalent circuits of qZSI in active states of inverter (a) and in short-through state (b) and of modified qZSI in reverse conduction state (c) and in short-through state (d)

На рабочем интервале (рис. 2, а) инвертор напряжения находится в одном из состояний, когда нагрузка тем или иным образом подключена к звену постоянного тока. Диод D_{01} открыт, поскольку к его аноду приложена сумма напряжений источника питания и индуктивности L_1 :

$$U_{BX} + (-U_{L_1}) > U_{C_2}. \tag{4}$$

Сумма напряжений конденсаторов C_1 и C_2 имеет место на входе инвертора напряжения. ЭДС индуктивностей L_1 и L_2 меняет знак и прикладывается к конденсаторам C_1 и C_2 . Накопленная энергия потребляется нагрузкой. Конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются.

В режиме холостого хода в рабочих состояниях инвертора напряжения энергия, накопленная в индуктивностях L_1 и L_2 , не потребляется нагрузкой. Это приводит к нарастанию значения напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 после каждо-

го интервала короткого замыкания, когда ЭДС индуктивностей меняет знак и прикладывается к конденсаторам. Постоянное нарастание напряжения на конденсаторах приводит к нарастанию напряжения звена постоянного тока инвертора и, как следствие, выходного напряжения инвертора.

Предложенное схемотехническое решение описанной выше проблемы основано на топологии, предложенной в [14, 15] для Z -инверторов. Основная цель модификации топологии состоит в том, чтобы при нарастании напряжения на конденсаторах была возможность для сброса накопленной энергии в дополнительный входной конденсатор или в аккумуляторную батарею через дополнительную цепь. Для этого в КИ-звено преобразователя добавляется транзистор T_{01} со встречно-параллельным диодом, а параллельно диоду D_{01} подключается дроссель L_3 , как показано на рис. 1, б.

Добавление возможности протекания тока по обратному контуру через встречно-параллельный транзистор позволяет сформировать дополнительные состояния КИИ. Схемы замещения для данных состояний приведены на рис. 2, в и рис. 2, з.

В режиме холостого хода и при малой нагрузке напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 могут быть ограничены за счет введенного дополнительного контура протекания тока. При условии

$$U_{ВХ} + (-U_{L_1}) < U_{C_1} + U_{C_2} \quad (5)$$

и включении дополнительного транзистора T_{01} ток i_{L_2} будет протекать от инвертора через данный транзистор, индуктивность L_3 и конденсатор C_3 (см. рис. 2, в). При переходе схемы из состояния обратной проводимости в состояние короткого замыкания возникает кратковременное включение конденсаторов C_1 и C_2 в последовательную цепь, поскольку время выключения транзистора T_{01} больше времени включения транзисторов T_1 – T_6 . Индуктивность L_3 вводится для ограничения токов конденсаторов C_1 и C_2 , при включении их в последовательную цепь. Таким образом, среднее значение напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 снижается до заданного уровня: напряжения источника питания, умноженного на коэффициент повышения. При переходе из состояния обратной проводимости в состояние короткого замыкания (рис. 2, з) ток, который протекает через индуктивность L_3 , замыкается через диод D_{01} .

Расчетные формулы для элементов КИ-звена традиционного КИИ, а также требования к силовым полупроводниковым компонентам по току и напряжению получены и приведены в [16–18]. К добавленному силовому ключу T_{01} приложено то же напряжение, что и к диоду D_{01} [18]:

$$U_{VT01} = U_{VD01} = \frac{U_{ВХ}(1 - D_s)}{(1 - 2D_s)} - U_{ВХ}. \quad (6)$$

В номинальном режиме в активных состояниях модифицированного КИИ ток КИ-звена протекает через диод D_{01} и встречно-параллельный диод ключа T_{01} и определяется как

$$I_{VD01} = I_{VT01} = \frac{P_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}, \quad (7)$$

где $P_{ВЫХ}$ – номинальная выходная мощность.

В режиме малой нагрузки ток КИ звена может протекать от инвертора (АИН) ко входному источнику или конденсатору C_3 через транзистор T_{01} и дроссель L_3 . Этот ток будет определяться величиной нагрузки, однако в режиме малой нагрузки и холостого хода он много меньше номинального. Таким образом, и индуктивность дросселя L_3 должна выбираться много меньше индуктивностей L_1, L_2 , чтобы не влиять на переходные процессы при переключении между состояниями схемы.

Принцип управления традиционным КИИ с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией подробно описан в [19]. Чтобы сформировать дополнительное состояние обратной проводимости в модифицированном КИИ, импульсы управления силовым транзистором T_{01} формируются постоянно, путем инверсии импульсов формирования состояния короткого замыкания, как описано в [14]. Временные диаграммы, поясняющие формирование импульсов управления T_{01} , приведены на рис. 3, где U_{ma}, U_{mb}, U_{mc} – модулирующие сигналы для трех фаз, $U_{оп}$ – опорный сигнал, U_{DS+}, U_{DS-} – задающие сигналы для формирования длительности короткого замыкания.

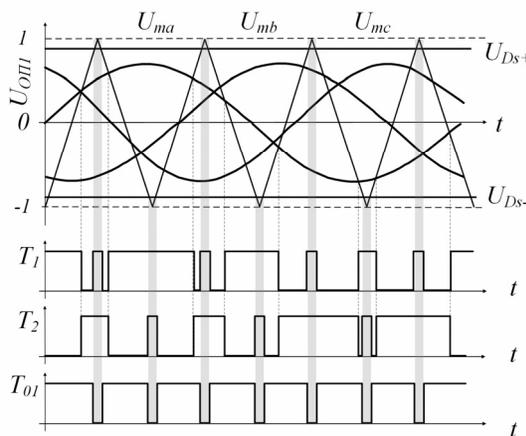


Рис. 3 – Формирование импульсов управления ключами модифицированного КИИ

Fig.3 – Timing diagrams of control pulses of modified qZSI

2. Трехуровневый КИИ

В [12, 16, 20] была описана топология трехуровневого трехфазного КИИ (рис. 4, а), а также указаны основные ее достоинства, такие как высокое качество выходного напряжения, низкая нагрузка активных и пассивных элементов.

Топология КИИ, позволяющая ему работать в режиме холостого хода без нарастания напряжения в звене постоянного тока, может быть применена и к трехуровневой схеме инвертора. Для этого в каждое КИ-звено преобразователя включается контур обратного протекания тока, описанный ранее. Данная топология показана на рис. 4, б.

Управление трехуровневым трехфазным КИИ соответствует способу модуляции, описанному в [19–21]. Для управления инвертором используются два опорных сигнала, сдвинутых относительно друг друга на 180 градусов [15]. Импульсы

состояний короткого замыкания формируются путем сравнения одного задающего сигнала U_{Ds} с одним опорным [12, 20].

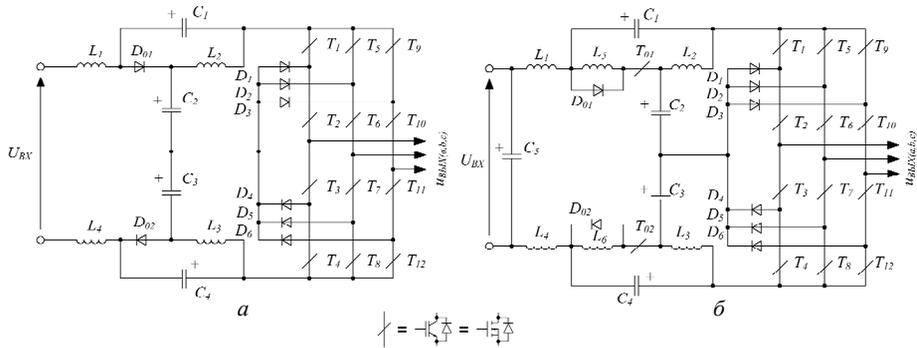


Рис. 4 – Топология трехфазного трехуровневого традиционного КИИ (а) и модифицированного КИИ (б)

Fig. 4 – Topology of three-phase three-level conventional qZSI (a) and modified qZSI (b)

В дальнейшем будет проанализирована схема трехфазного трехуровневого КИИ.

3. Моделирование

Для сравнения были промоделированы топологии традиционного и модифицированного трехфазного трехуровневого КИИ. Моделирование проводилось в программной среде PowerSim. Модели силовых схем соответствуют топологиям, представленным на рис. 4. Параметры компонентов силовых схем были рассчитаны по соотношениям, полученным в [16], [17], и приведены в табл. 1. В модели был использован LC-фильтр на выходе инвертора [22]. Его параметры, параметры входного и выходного напряжений, а также частоты коммутации тоже представлены в табл. 1. Данные параметры были выбраны для соответствия условий моделирования условиям физического эксперимента. Нагрузка активная, соединенная в звезду без нулевого провода.

Таблица 1 / Table 1

Параметры КИИ
QI parameters

| Параметры моделирования | Повышение напряжения | Дроссели | Конденсаторы | Фильтр |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Входное напряжение $U_{вх} = 240$ В | Коэффициент повышения выходного напряжения $G = 1,33$ $B = 1,66$ $D_S = 0,2$ | Коэффициент пульсаций входного тока $K_L = 0,7$ $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 900$ мкГн $L_5 = L_6 = 47$ мкГн | Коэффициент пульсаций напряжения на конденсаторах $K_C = 0,0001$ $C_1 = C_4 = 1000$ мкФ $C_2 = C_3 = 470$ мкФ $C_5 = 470$ мкФ | Емкость $C_\Phi = 0,47$ мкФ Индуктивность $L_\Phi = 1000$ мкГн |
| Выходное линейное напряжение $U_{ab(эфф)} = 190$ В | | | | |
| Выходная мощность $P_{вх} = 700$ Вт | | | | |
| Частота выходного напряжения $f = 50$ Гц | | | | |
| Частота коммутаций $f_S = 50$ кГц | | | | |

Для анализа работы преобразователей в режиме малой нагрузки и холостого хода были получены диаграммы напряжения звена постоянного тока и входного тока на нескольких периодах коммутации. Данные диаграммы для обоих преобразователей приведены на рис. 5.

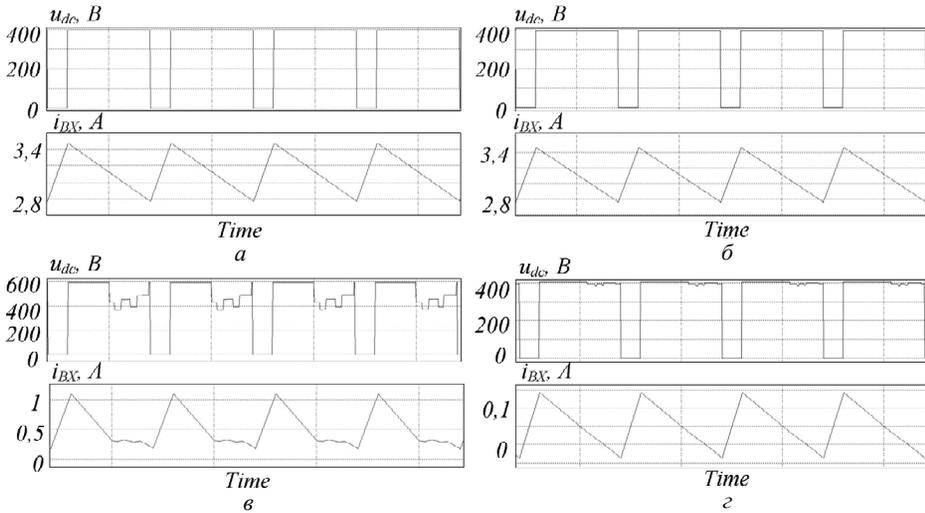


Рис. 5 – Временные диаграммы напряжения звена постоянного тока и входного тока в номинальном режиме традиционного КИИ (а) и модифицированного КИИ (б), в режиме холостого хода традиционного КИИ (в) и модифицированного КИИ (г)

Fig. 5 – Timing diagrams of dc-link voltage and input current at nominal load in conventional qZSI (a) and modified qZSI (b), at idle in conventional qZSI (c) and modified qZSI (d)

На представленных временных диаграммах видно, что в традиционном КИИ при переходе в режим, близкий к режиму прерывистого тока (рис. 5, в), напряжение звена постоянного тока значительно возрастает по сравнению с номинальным режимом (рис. 5, а). Модифицированный КИИ поддерживает требуемый уровень напряжения в обоих режимах (рис. 5, б, г).

4. Эксперимент

Для экспериментального подтверждения работоспособности предложенного КИИ и правильности полученных результатов моделирования были собраны макеты традиционного КИИ и модифицированного КИИ на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения. Параметры используемых компонентов соответствуют значениям, приведенным в табл. 1. Параметры полупроводниковых приборов приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Полупроводниковые приборы Semiconductor devices

| | |
|------------------------------------|-------------------------|
| Система управления (ПЛИС) | Cyclone II EP4CE22E22C8 |
| Драйверы транзисторов | ACPL-H312 |
| Транзисторы $T_{01}, T_1 - T_{12}$ | C2M0080120 |
| Диоды $D_{01}, D_{02}, D_1 - D_6$ | C3D10065A |

В эксперименте была использована регулируемая трехфазная резистивная нагрузка, соединенная в звезду без нулевого провода. В качестве входного источника напряжения был использован регулируемый источник постоянного напряжения «ТДК-Lambda». Напряжение источника было установлено равным 240 В для обоих преобразователей, ток ограничен на 3 А. Измерения проводились с помощью осциллографа «Tektronix» MSO4034В, датчиков тока «Tektronix» TCP0150 и датчиков напряжения «Tektronix» TRA-BNC.

В ходе эксперимента были сняты осциллограммы на нескольких периодах коммутации для анализа работы в режиме малой нагрузки. Данные осциллограммы приведены на рис. 6, в, г. Полученные осциллограммы также совпадают с диаграммами моделирования и показывают, что модифицированная топология КИИ поддерживает номинальное напряжение звена постоянного тока во всем диапазоне выходных мощностей. Напряжение звена постоянного тока традиционного КИИ в режиме малой нагрузки, при выходном токе 0,34 А возросло с 315 до 465 В.

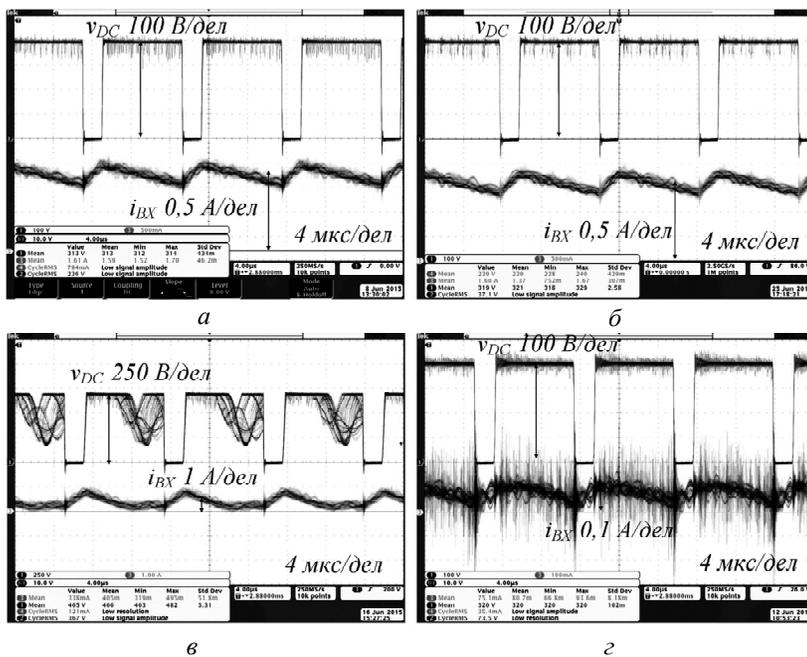


Рис. 6 – Осциллограммы напряжения звена постоянного тока и входной мощности тока в номинальном режиме традиционного трехуровневого КИИ (а), модифицированного КИИ (б) и в режиме малой нагрузки для традиционного КИИ (в) и модифицированного КИИ (г)

Fig. 6 – Oscillograms of dc-link voltage and input current at nominal load in conventional qZSI (a), modified qZSI (b) and at low load in conventional qZSI (c) and modified qZSI (d)

Были сняты внешняя характеристика и зависимость КПД от выходной мощности с исследуемых преобразователей. Внешняя характеристика приведена на рис. 7, а. Данная характеристика снята при тех же условиях, что и при моделировании, и совпадает с уже полученной характеристикой по характеру и количественным показателям.

Зависимость КПД от выходной мощности представлены на рис. 7, б.

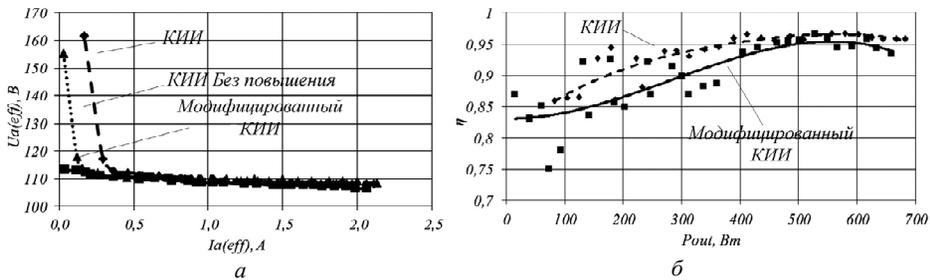


Рис. 7 – Внешняя характеристика исследуемых топологий (а) и зависимости КПД от мощности нагрузки (б)

Fig. 7 – Output characteristic of the topologies investigated (a) and efficiency dependence on output power (b)

Данные зависимости соответствуют ожидаемым. КПД модифицированной топологии КИИ ниже, в среднем на 2,5...3 % за счет добавления дополнительных ключей, являющихся основными источниками потерь в данном преобразователе.

Заклучение

В данной работе была предложена модифицированная топология квази-импедансного инвертора, обеспечивающая работу системы в режиме холостого хода без нарастания напряжения в звене постоянного тока. Проведено сравнение предложенной топологии с традиционной на примере трехфазного трехуровневого КИИ. На основании проведенного анализа были выявлены основные достоинства и недостатки предложенной схемы.

Достоинства предложенной схемы.

1. Возможность работы схемы в режиме холостого хода без нарастания выходного напряжения и без необходимости подключать балластную нагрузку. Реализация жесткой внешней характеристики КИИ во всем диапазоне изменения нагрузки без подключения балластных резисторов.

2. Нет необходимости вводить мертвое время между состояниями короткого замыкания и рабочими состояниями.

3. Изменения в системе управления по сравнению с традиционным преобразователем минимальны и легко реализуемы. Наличие дополнительных ключевых элементов практически не усложняет систему управления.

К недостаткам можно отнести следующее.

Дополнительные элементы являются источниками дополнительных потерь. Соответственно имеет место некоторое уменьшение коэффициента полезного действия.

Приложением предложенной топологии может быть автономная система электроснабжения с широким диапазоном входного напряжения источника питания и большим диапазоном изменения мощности нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic system with energy management in isolated areas / S. Simoui, A.H. Arab, S. Bacha, B. Azoui // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 36. – P. 358–368.
2. Ribeiro E.F.F., Cardoso A.J.M., Boccaletti C. Uninterruptible energy production in standalone power systems for telecommunications [Electronic resource] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'09), Valencia (Spain), 15–17 April 2009. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.475.7814> (accessed: 17.12.2015).

3. **Kikuchi J., Lipo T.A.** Three-phase PWM boost-buck rectifiers with power-regenerating capability // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – Vol. 38, iss. 5. – P. 1361–1369.
4. Topological and modulation design of a buck-boost three-level dual inverter / F. Gao, P.C. Loh, D.M. Vilathgamuwa, F. Blaabjerg, C.K. Goh, J.Q. Zhang // *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 6–10 November 2006. – P. 2408–2413.
5. **Chakraborty S., Annie S.I., Razzak M.A.** Design of single-stage buck and boost converters for photovoltaic inverter applications // *International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 23–24 May 2014. – Dhaka, Bangladesh, 2014. – P. 1–6.
6. **Sudev V., Parvathy S.** Switched boost inverter based Dc nanogrid with battery and bi-directional converter // *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 20–21 March 2014. – Nagercoil, India, 2014. – P. 461–467.
7. **Rodríguez-Rodríguez J.R., Moreno-Goytia E.L., Venegas-Rebollar V.A.** Transformerless, single DC-Input, DC-AC 7-Levels boost converter for PV applications // *North American Power Symposium (NAPS)*, 4–6 August 2011. – Boston, Massachusetts, 2011. – P. 1–6.
8. Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 1. A topological review / Y.P. Siwakoti, F.Z. Peng, F. Blaabjerg, P.C. Loh, G.E. Town // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015. – Vol. 30, iss. 2. – P. 699–716.
9. **Anderson J., Peng F.Z.** Four quasi-Z-Source Inverters // *39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC–2008)*, 15–19 June 2008. – Rhodes, Greece, 2008. – P. 2743–2749.
10. **Yushan Liu, Abu-Rub H., Baoming G.** Z-source/Quasi-Z-source inverters: derived networks, modulations, controls, and emerging applications to photovoltaic conversion // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – 2014. – Vol. 8, iss. 4. – P. 32–44.
11. **Nagaraj M., Sasikumar Dr.M.** Simulation study of quasi impedance source isolated DC/DC converter fed drives // *International Journal of Engineering Research and Applications*. – 2012. – Vol. 2, iss. 2. – P. 167–171.
12. **Баховцев И.А., Панфилов Д.В.** Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя // *Научный вестник НГТУ*. – 2013. – № 4 (53). – С. 144–149.
13. CCM operation analysis of the single-phase three-level quasi-Z-source inverter / O. Husev, C. Roncero-Clemente, S. Stepenko, D. Vinnikov, E. Romero-Cadaval // *Proceedings of the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*, 4–6 September 2012. – Novi Sad, Serbia, 2012. – P. DS1b.21-1–DS1b.21-6.
14. A high-performance Z-source inverter operating with small inductor at wide-range load / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Peng // *Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC 2007*, 25 February – 1 March 2007. – Anaheim, California, USA, 2007. – P. 615–620.
15. A new adjustable-speed drives (ASD) system based on high-performance Z-source inverter / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Peng // *Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference. 42nd IAS Annual Meeting*, 23–27 September 2007. – New Orleans, Louisiana, USA, 2007. – P. 2327–2332.
16. Three-level three-phase quasi-Z-source neutral-point-clamped inverter with novel modulation technique for photovoltaic application / O. Husev, C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, T. Jalakas // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 130. – P. 10–21.
17. **Bakhovtsev I.A., Panfilov D.V.** Three-phase three-level voltage source inverter construction based on quasi-Z-source cells // *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM): proceedings, Erlagol, Altai*, 1–5 July 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 322–327. – doi: 10.1109/EDM.2013.6642005.
18. **Баховцев И.А., Панфилов Д.В.** Сравнение трехуровневых инверторов напряжения с повышением напряжения в звене постоянного тока // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП–2014: труды XII международной конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т.* – Новосибирск, 2014. – Т. 7. – С. 159–165.
19. Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 2. Review of control and modulation techniques / Y.P. Siwakoti, F.Z. Peng, F. Blaabjerg, P.C. Loh, G.E. Town,

- S. Yang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Vol. 30, iss. 4. – P. 1887–1905.
20. Single phase three-level neutral-point-clamped quasi-Z-source inverter / O. Husev, C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, S. Stepenko // IET Power Electronics. – 2015. – Vol. 8, iss. 1. – P. 1–10.
21. Voltage distortion approach for output filter design for off-grid and grid-connected PWM inverters / O. Husev, A. Chub, C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov // Journal of Power Electronics. – 2015. – Vol. 15, iss. 8. – P. 278–287.

QUASI-Z-SOURCE INVERTER TOPOLOGY MODIFICATION FOR STAND-ALONE POWER SYSTEMS

Panfilov D.V.¹, Bakhovtsev I.A.¹, Husev O.O.^{2,3}

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine*

³*Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia*

In this paper proposes a new topology quasi-Z-source inverter is proposed. This new topology allow to stand-alone power system to operate at idle without ballasting load. The application of pulse boost converters and quasi-Z-source converters in the stand-alone power systems with renewable energy sources is presented. There is a description of quasi-Z-source inverter operating at low load and idle issue. The topology solution to this problem for three-phase two-level quasi-Z-source inverter and three-phase three-level quasi-Z-source inverter is based on the same solution for Z-source converters. There are the ratios for voltage and current stresses of additional components are derived. The new topology of quasi-Z-converter requires a new control method, but it is the same as for Z-source inverter modified topology. The simulation and experimental verification of new topology were conducted. Also the new topology was compared with conventional quasi-Z-source inverter by output and efficiency characteristics. In conclusion there are advantages and disadvantages of topology proposed compared with conventional topology.

Keywords: three-phase three-level inverter, quasi-Z-source inverter, PWM, idle, simulation, experimental setup.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-105-117

REFERENCES

1. Simoui S., Arab A.H., Bacha S., Azoui B. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic system with energy management in isolated areas. *Energy Procedia*, 2013, vol. 36, pp. 358–368.
2. Ribeiro E.F.F., Cardoso A.J.M., Boccaletti C. Uninterruptible energy production in standalone power systems for telecommunications. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09), Valencia (Spain), 15–17 April 2009*. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.475.7814> (accessed 17.12.2015)
3. Kikuchi, J., Lipo T.A. Three-phase PWM boost-buck rectifiers with power-regenerating capability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38, iss. 5, pp. 1361–1369.
4. Gao F., Loh P.C., Vilathgamuwa D.M., Blaabjerg F., Goh C.K., Zhang J.Q. Topological and modulation design of a buck-boost three-level dual inverter. *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 6–10 November 2006, pp. 2408–2413.
5. Chakraborty S., Annie S.I., Razzak M.A. Design of single-stage buck and boost converters for photovoltaic inverter applications. *3rd International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, Dhaka, Bangladesh, 23–24 May 2014, pp. 1–6.
6. Sudev V., Parvathy S. Switched boost inverter based Dc nanogrid with battery and bi-directional converter. *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, India, 20–21 March 2014, pp. 461–467.
7. Rodríguez-Rodríguez J.R., Moreno-Goytia E.L., Venegas-Rebollar V.A. Transformerless, single DC-Input, DC-AC 7-Levels boost converter for PV applications. *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, Massachusetts, 4–6 August 2011, pp. 1–6.
8. Siwakoti Y.P., Peng F.Z., Blaabjerg F., Loh P.C., Town G. Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 1. A topological review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, iss. 2, pp. 699–716.

9. Anderson J., Peng F.Z. Four quasi-Z-Source Inverters. *39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC-2008)*, Rhodes, Greece, 15–19 June 2008, pp. 2743–2749.
10. Yushan Liu, Abu-Rub H., Baoming G. Z-Source/Quasi-Z-Source inverters: derived networks, modulations, controls, and emerging applications to photovoltaic conversion. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, vol. 8, iss. 4, pp. 32–44.
11. Nagaraj M., Sasikumar Dr.M. Simulation study of quasi impedance source isolated DC/DC converter fed drives. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 167–171.
12. Bakhovtsev I.A., Panfilov D.V. Postroenie trekhfaznogo trekhurovneвого инвертора napryazheniya na baze kvazi-impedansnogo preobrazovatelya [Three-phase three-level inverter of voltage based on a quasi-z-source network]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 4 (53), pp. 144–149.
13. Husev O., Roncero-Clemente C., Stepenko S., Vinnikov D., Romero-Cadaval E. CCM operation analysis of the single-phase three-level quasi-Z-source inverter. *Proceedings of the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCCE Europe*, Novi Sad, Serbia, 4–6 September 2012, pp. DS1b.21-1–DS1b.21-6.
14. Ding X., Qian Z., Yang S., Cui B., Peng F. A high-performance Z-source inverter operating with small inductor at wide-range load. *Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC 2007*, Anaheim, California, USA, 25 February – 1 March 2007, pp. 615–620.
15. Ding X., Qian Z., Yang S., Cui B., Peng F. A new adjustable-speed drives (ASD) system based on high-performance Z-source inverter. *Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference. 42nd IAS Annual Meeting*, New Orleans, Louisiana, USA, 23–27 September 2007, pp. 2327–2332.
16. Husev O., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Vinnikov D., Jalakas T. Three-level three-phase quasi-Z-source neutral-point-clamped inverter with novel modulation technique for photovoltaic application. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 130, pp. 10–21.
17. Bakhovtsev I.A., Panfilov D.V. Three-phase three-level voltage source inverter construction based on quasi-Z-source cells. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM): proceedings*, Erlagol, Altai, 1–5 July 2013, pp. 322–327. doi: 10.1109/EDM.2013.6642005
18. Bakhovtsev I.A., Panfilov D.V. [Comparison of three-level VSI with voltage elevation in the direct current link] *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP-2014: trudy XII mezhdunarodnoy konferentsii* [12th International conference on Actual problems of electronic instrument engineering: proceedings APEIE-2014], Novosibirsk, 2–4 October 2014, vol. 7, pp. 159–165.
19. Siwakoti Y.P., Peng F.Z., Blaabjerg F., Loh P.C., Town G.E., Yang S. Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 2. Review of control and modulation techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, iss. 4, pp. 1887–1905.
20. Husev O., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Vinnikov D., Stepenko S. Single phase three-level neutral-point-clamped quasi-Z-source inverter. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, iss. 1, pp. 1–10.
21. Husev O., Chub A., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Voltage distortion approach for output filter design for off-grid and grid-connected PWM inverters. *Journal of Power Electronics*, 2015, vol. 15, iss. 8, pp. 278–287.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Панфилов Дмитрий Валерьевич – родился в 1989 году, магистр техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника», аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, микропроцессорные системы управления. Опубликовано 9 научных работ. (Адрес: 630501, Россия, п. Краснообск, 214. Email: Dmitry89@ngs.ru).

Panfilov Dmitry Valerievich (b. 1989) – M.S. in electronics and microelectronics, postgraduate of Electronics and Electrical Engineering department

of Novosibirsk State Technical university. His research interests are currently focused on power electronics, microprocessor control systems. He is author of 9 scientific papers. (Address: 214, Krasnoobsk, 630501, Russian Federation. Email: Dmitry89@ngs.ru).



Баховцев Игорь Анатольевич – родился в 1955 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, способы управления с ШИМ, микропроцессорные системы управления. Опубликовано 70 научных работ. (Адрес: 630136, Россия, Новосибирск, ул. Широкая, 127. Email: igor_55@ngs.ru).

Bakhovtsev Igor Anatolievich (b. 1955) – Ph. D., associate prof. of Electronics and Electrical Engineering department of Novosibirsk State Technical university. His research interests are currently focused on power electronics, PWM methods, microprocessor control systems. He is author of 70 scientific papers. (Address: 127, Shirokaya st., Novosibirsk, 630136, Russian Federation. Email: igor_55@ngs.ru).



Гусев Александр Александрович – родился в 1986 году, канд. техн. наук, доцент кафедры биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем Черниговского Национального технологического университета. Старший научный сотрудник института электротехники Таллинского технологического университета. Область научных интересов: силовая электроника, разработка новых топологий и систем управления. Опубликовано 74 научные работы. (Адрес: 14005, Украина, Чернигов, Пятницкая, 68. Email: gsfki@ukr.net).

Husev Oleksandr Oleksandrovich (b. 1986) – Ph. D., associate prof. of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems department of Chernihiv National University of Technology and senior researcher of Electrical Engineering department of Tallinn University of Technology. His research interests are currently focused on power electronics, design of novel topologies and control systems. He is author of 74 scientific papers. (Address: 68, Pyatnizkaya, Chernihiv, 14005, Ukraine. Email: gsfki@ukr.net).

Статья поступила 30 сентября 2015 г.

Received September 30, 2015

To Reference:

Panfilov D.V., Bakhovtsev I.A., Husev O.O. Modifikatsiya topologii kvazi-impedansnogo invertora dlya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya [Quasi-z-source inverter topology modification for stand-alone power systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 105–117. doi: