

BIDIRECTIONAL POWER CONVERTER SYSTEM IMPLEMENTATION IN LIMITED POWER GRID

K. A. Vorobev¹, N. A. Poliakov¹, R. Strzelecki²

¹ — ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

² — Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland

Simulation analysis of bidirectional power converters system for charging station of electric vehicle in condition of limited power source in city infrastructure is considered in the paper. Electric vehicles can be automobiles, trucks or vessels with electric propulsion system. Power limitations may be caused by obsolescence of the electrical infrastructure, as well as the historical, architectural, or economic features of city or its districts infrastructure. To use charging stations matching the latest standards without global upgrade of infrastructure, these limitations need to be overcome, which is possible with external energy storage units delivered to the charging station. In general case, the energy from energy storage units can be used both to maximize load capacity and to transfer power to the AC power grid. The function of balancing power consumption between the grid and external energy storage units is connected to the system of bidirectional power converters, which consists of a three-phase dual active bridge converter on the side of energy storage units and an active front-end on the side of AC grid; both converters are working on the common DC link. To implement such a system, galvanic insulation between the converter terminals and the external energy storage units is required, which is provided by the presence of a high-frequency power transformer in a three-phase dual active bridge converter. The three-phase dual active bridge converter is controlled by a phase modulation algorithm with a single-phase shift (single-phase switching). The active front-end is controlled by a space vector modulation algorithm. System modes involve transferring energy from the AC grid to the DC link through the active front-end, transferring energy from the external energy storage units to the DC link through a three-phase dual active bridge converter, joint transmission of energy from the grid and external storage units to the common DC link and transfer energy from the energy storage units to the grid. The simulation study and analysis have confirmed the workability of the proposed bidirectional power converter system and revealed the specifics of working in the joint transmission of energy by converters to a common DC link, requiring the introduction of additional cross-feedback between converters.

Keywords: bidirectional power converter, power grid, phase modulation, single-phase switch, power converters system, dual active bridge, active front-end.

For citation:

Vorobev, Konstantin A., Nikolai A. Poliakov, and Ryszard Strzelecki. "Bidirectional power converter system implementation in limited power grid." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): xx–xx. DOI:

УДК 621.314.58

СИСТЕМА ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

К. А. Воробьев¹, Н. А. Поляков¹, Р. Стжелецки²

¹ — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Гданьский политехнический университет, Гданьск, Польша

Статья посвящена модельному исследованию системы двунаправленных полупроводниковых преобразователей электрической энергии для зарядных станций электротранспорта, функционирующих в условиях ограниченной мощности городских электрических сетей переменного тока. Отмечается, что ограничение мощности может возникать в связи с устареванием электроинфраструктуры, а также с историческими, архитектурными или экономическими особенностями инфраструктуры города или его районов. Для применения в такой инфраструктуре зарядных устройств, выполненных в соответствии с последними стандартами и обеспечивающих высокие скорости заряда батарей электротранспорта, такого как электромобили или суда на электротяге, требуется преодолеть эти ограничения, что пред-

ставляется возможным с помощью использования внешних по отношению к сети накопителей энергии, доставляемых на зарядную станцию. Обращается внимание на то, что в общем случае энергия из накопителей может использоваться как для обеспечения максимальной мощности нагрузки, так и для передачи мощности в сеть. Функция балансирования потребления между сетью и внешними накопителями возлагается на рассматриваемую систему двунаправленных преобразователей, состоящую из трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя со стороны накопителя и активного выпрямителя напряжения со стороны сети переменного тока, работающих на общее звено постоянного тока. Для реализации такой системы необходима гальваническая изоляция между терминалами преобразователя и внешним накопителем, которая обеспечивается за счет наличия высокочастотного силового трансформатора в трехфазном активном двунаправленном мостовом преобразователе, согласующего напряжения между терминалами. Отмечается, что трехфазный активный двунаправленный мостовой преобразователь управляется алгоритмом фазовой модуляции с коммутацией фазным сдвигом. Активный выпрямитель напряжения управляется алгоритмом пространственной векторной модуляции. Исследованы режимы работы системы, предполагающие передачу энергии из сети в звено постоянного тока через активный выпрямитель напряжения, передачу энергии из внешнего накопителя в звено постоянного тока через трехфазный активный двунаправленный мостовой преобразователь, совместную передачу энергии из сети и внешнего накопителя в общее звено постоянного тока и передачу энергии из накопителя в сеть. Проведенное модельное исследование показало работоспособность предложенной системы двунаправленных преобразователей и позволило выявить особенности работы при совместной передаче преобразователями энергии в общее звено постоянного тока, потребовавшие внедрения дополнительной перекрестной обратной связи между преобразователями.

Ключевые слова: двунаправленный полупроводниковый преобразователь, энергосистема, фазово-импульсная модуляция, коммутация фазным сдвигом, двунаправленный мостовой преобразователь, активный выпрямитель напряжения.

Для цитирования:

Воробьев К. А. Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности / К. А. Воробьев, Н. А. Поляков, Р. Стжелецки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 812–823. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-812-823.

Введение (Introduction)

В настоящее время в связи с быстрым развитием электротранспорта растет потребность в быстрой передаче больших объемов электрической энергии на короткие расстояния. С учетом прогресса, достигнутого в течение последнего десятилетия в полупроводниковой технике, увеличивается спрос на импульсные силовые преобразователи, способные эффективно управлять перетоком мощности. Применение импульсных силовых преобразователей с высокой частотой коммутации позволяет обеспечить такие их преимущества, как малый удельный объем устройства на киловатт мощности, высокий КПД и быстродействие.

Внедрение и популяризация электротягового транспорта на сегодняшний день являются характерными тенденциями, полнота реализации которых напрямую связана с непрерывным обеспечением необходимой электрической мощностью зарядных станций, что требует от городов наличия развитой энергетической инфраструктуры. Тем не менее соблюдение норм энергетической инфраструктуры города не всегда возможно в полной мере выполнить по ряду причин, к которым относятся высокая степень урбанизации и наличие исторической застройки, препятствующие прокладке новых линий электропередач или модернизации старых. Эта проблема существует и в других странах. Например, когда лондонское подразделение логистической компании UPS решило увеличить флот грузового электротранспорта с 65 до 170 грузовых электромобилей, оказалось, что невозможно обеспечить достаточную электрическую мощность для заряда электромобилей в пределах центральной части города. Для решения этой задачи был создан проект Smart Electric Urban Logistics (SEUL) [1], заключающийся в разработке «умной» энергосистемы (Smart Grid), которая сможет решить проблемы за счет более рационального использования энергии, а также за счет привлечения к работе возобновляемых источников энергии. Тем не менее на данный момент предел загрузки электротранспортом определяется сетью города, мощность которой

в некоторых районах ограничена, что, в свою очередь, не позволяет в полной мере использовать возможности современных стандартов быстрой зарядки аккумуляторов электромобилей.

За последние 10 лет некоторые паромные и корабельные переправы местного судоходства Норвегии были модернизированы (MF Amrege — паром, выполненный исключительно на электро-тяге, запущен в эксплуатацию в 2014 г., MF Tucho Brahe — паром модернизированный в гибридный установкой дополнительно электропривода в 2013 г.) или запланированы к модернизации для работы от аккумуляторных накопителей. Такие паромы совершают рейсы в соответствии со строгим расписанием с ограниченным временем на зарядку аккумуляторов в течение посадки/высадки пассажиров или погрузки/разгрузки, что соответствует примерно 5–15 мин. Проблема, которая возникла при работе зарядных портовых станций, удаленных от центра города, связана с ограниченной мощностью местных энергосетей вблизи порта, т. е. невозможностью обеспечения требуемых зарядных токов для быстрой зарядки, и, соответственно, увеличением времени пребывания судна в порту. Для решения данной проблемы решено было использовать стационарные накопители на аккумуляторах в электростанции порта, которые заряжаются в течение времени простоя, что уравнивает нагрузку на городскую сеть в течение суток [2].

Для того, чтобы решить задачу увеличения энергоемкости станций без изменения допустимой мощности нагрузки сети, можно использовать мобильные внешние накопители энергии, доставляемые непосредственно к станции. Однако реализация такого решения потребует использования системы активных преобразователей, обеспечивающих двухсторонний обмен энергией с сетью через общее звено постоянного тока (ЗПТ) [3], [4].

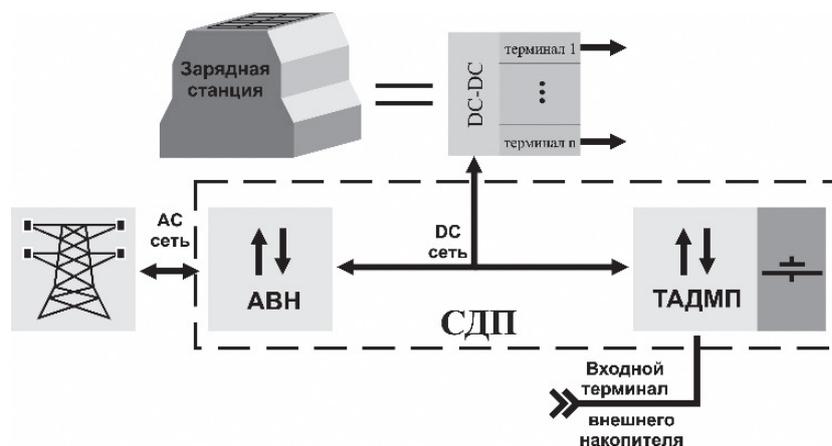


Рис. 1. Упрощенная структура энергосистемы

В данной работе выполнено модельное исследование системы двунаправленных преобразователей (СДП) электрической энергии, состоящей из трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя (ТАДМП, англ. — TPDAV (Three-Phase Dual Active Bridge)) [5]–[8] и активного выпрямителя напряжения (АВН) [9]–[11], работающих на общее звено постоянного тока. Использование активного двунаправленного мостового преобразователя (АДМП) обусловлено гальванической изоляцией терминалов с помощью высокочастотного трансформатора. По сравнению с сетевыми низкочастотными трансформаторами АДМП имеет существенное преимущество в массогабаритных показателях. Использование трехфазной топологии ТАДМП также обусловлено аналогичным преимуществом, а кроме того, способностью работать в режиме «мягкой» коммутации при нагрузке, равной или близкой к номинальной. Сравнительный анализ топологий приводится в источниках [12]–[17]. Результирующая структура энергосистемы показана на рис. 1.

Методы и материалы (Methods and Materials)

ТАДМП является ключевым преобразователем в СДПУ, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.

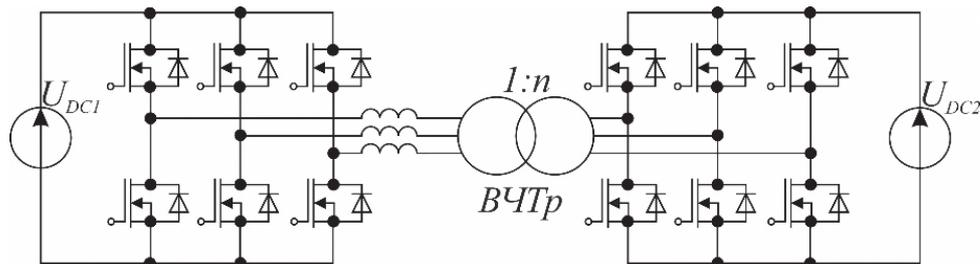


Рис. 2. Упрощенная схема трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя

В состав ТАДМП входят два трехфазных инвертора, трехфазный высокочастотный трансформатор (ВЧТр) и накопительная индуктивность, в качестве которой может выступать как отдельное устройство, так и индуктивность рассеивания вторичной обмотки трансформатора. Для обеспечения симметричных процессов коммутации индуктивность L должна иметь равное значение для всех фаз. В качестве источника U_{DC1} выступает накопитель электрической энергии.

Математическое описание ТАДМП дано в источниках [6], [8], [13]. Диаграмма коммутаций в течение одного периода приведена на рис. 3. Вентили обоих инверторов коммутируются с одинаковым коэффициентом заполнения 0,5, со сдвигом между фазами на $\frac{\pi}{3}$ (рис. 3, а). В качестве алгоритма коммутации используется фазово-импульсная модуляция (ФИМ) ([18], [19]). Сдвиг между управляющими сигналами двух инверторов $\theta = 2\pi \frac{t}{T_s}$, где T_s — период коммутации (рис. 3, б).

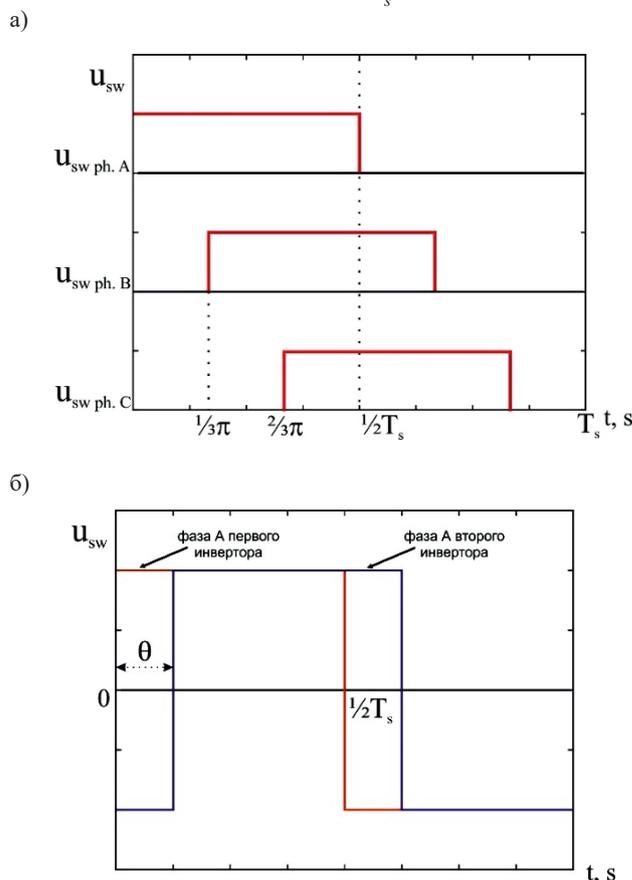


Рис. 3. Период коммутации трехфазного активного двунаправленного мостового преобразователя

Выходная мощностная характеристика ТАДМП в зависимости от θ [6], [20], представленная на рис. 4, описывается следующими выражениями:

$$P(\theta) = \frac{U_{DC1}^2}{\omega L} d \theta \left(\frac{2}{3} - \frac{\theta}{2\pi} \right) \quad \text{для } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}; \quad (1)$$

$$P(\theta) = \frac{U_{DC1}^2}{\omega L} d \left(\theta - \frac{\theta^2}{\pi} - \frac{\pi}{18} \right) \quad \text{для } \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f_s$, $f_s = \frac{1}{T_s}$ — частота коммутации, $d = \frac{U_{DC2}}{nU_{DC1}}$ — отношение напряжений между терминалами ТАДМП, n — коэффициент трансформации.

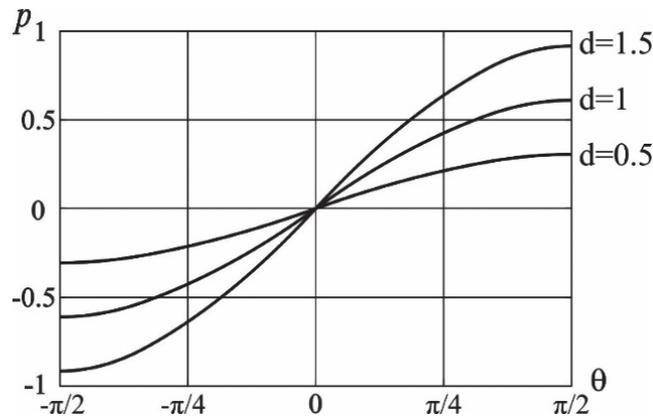


Рис. 4. Выходная мощностная характеристика ТАДМП, нормированная к $\frac{U_{DC}^2}{\omega L}$

В качестве алгоритма коммутации АВН выбрана двухмерная пространственно-векторная модуляция (ПВМ), описание которой дано в источниках [9], [10], [21], [22]. Рассматриваемая система преобразователей должна обеспечивать работу в следующих режимах: передача энергии из сети в ЗПТ через АВН (рис. 5, а), передача энергии из внешнего накопителя в ЗПТ через ТАДМП (рис. 5, б), совместная передача энергии из сети и внешнего накопителя через АВН и ТАДМП в общее ЗПТ (рис. 5, в), утилизация недоиспользованной энергии внешнего накопителя (передача энергии из накопителя в сеть) — рис. 5, г. На основе необходимости обеспечения ранее указанных режимов была предложена СДП, структурная схема которой представлена на рис. 5, д.

Параметры СДП, а также базовые величины, по которым в дальнейшем будет произведено нормирование, представлены в таблице. Исходя из условия максимально мощности, равной 35 кВт, в соответствии с выражениями (1) и (2), накопительная индуктивность ТАДМП должна быть $L \approx 6,2 \mu\text{H}$.

Параметры СДП

Параметр	Значение	Единица измерения
U_{DC1}	320	В
U_{DC2}	700	В
U_{AC}	220	В

I_n	50	А
P_{out}	35	кВт
$f_{sw\ TPDAB}$	60	кГц
$f_{sw\ AFE}$	20	кГц
Коэффициент трансформации n	2	–
$I_{AFEbase} = \frac{P_{out}}{\sqrt{2}U_{AC}}$	113	А
$U_{DCbase} = U_{DC2}$	700	В
$U_{ACbase} = U_{AC}$	220	В

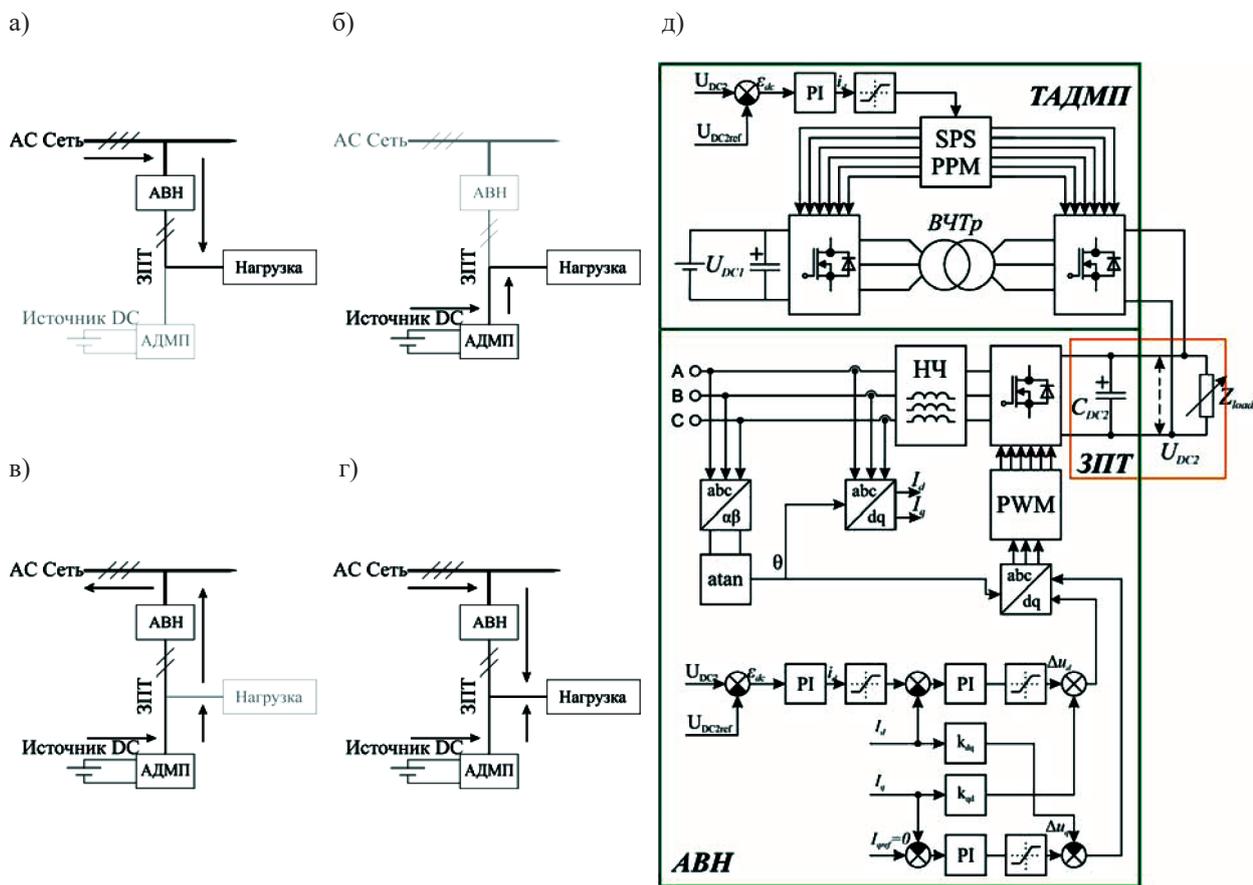


Рис. 5. Режимы работы СДП (а)–(с) и структурная схема двунаправленных преобразователей (д)

Результаты (Results)

Моделирование системы производилось для режимов работы СДП, представленных на рис. 5, а–г. Режим работы с питанием от внешнего источника представлен на рис. 6. Система выходит на установленный уровень напряжения в течение 2 мс с перерегулированием менее чем 2,5 %. АВН в данном эксперименте отключен. Работа в остальных режимах представлена

на рис. 7. Величина $i_{AC\ mag}$ нормирована относительно $I_{AFE\ base}$, а величина u_{DC2} — относительно величины U_{DC2} согласно данным таблицы, и на рис. 6 и 7 они представлены в относительных единицах (о. е.).

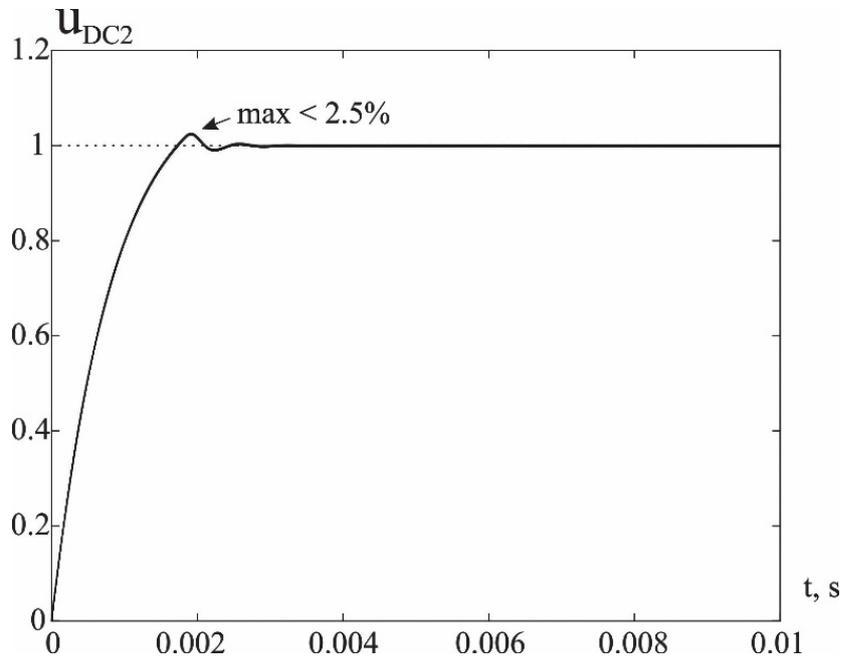


Рис. 6. Режим работы от внешнего источника, нормировано к U_{DC2}

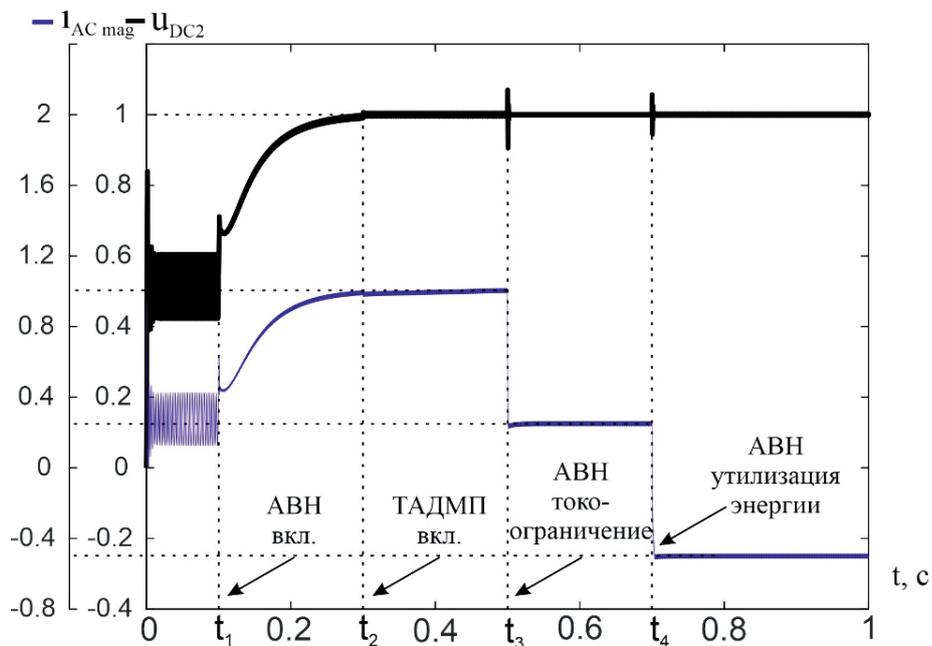


Рис. 7. Результат моделирования системы:
 $i_{AC\ mag}$ — амплитудное значение переменного тока, о. е.,
 u_{DC2} — напряжение в ЗПТ, о. е.

На интервале $t \in [0; 0,1)$ происходит включение системы, системы управления обоих преобразователей отключены, АВН работает как неуправляемый выпрямитель напряжения. В момент

$t = 0,1$ с происходит включение системы управления АВН. Напряжение в ЗПТ, согласно закону управления, приходит к установившемуся значению U_{DC2} , нагрузка в ЗПТ потребляет мощность P_{out} только от сети переменного тока. Включение ТАДМП происходит в момент $t = 0,3$ с. При этом потребление мощности от внешнего накопителя не происходит. Незначительное уменьшение тока, потребляемого АВН из сети, происходит из-за переходных процессов в ТАДМП. В момент $t = 0,5$ с для снижения нагрузки на сеть уменьшается уровень токоограничения АВН. Ток в фазах АВН, уменьшаясь до нового уровня токоограничения, составляет 27 А. Поскольку мощность нагрузки остается на номинальном уровне, недостаток мощности из сети сбалансирован передачей в ЗПТ мощности из накопителя посредством ТАДМП. Начиная с $t = 0,7$ с происходит отключение нагрузки от ЗПТ и передача энергии со стороны внешнего накопителя в сеть, при этом уровень токоограничения для тока рекуперации АВН равен половине номинального тока и составляет 56 А.

Обсуждение (Discussion)

Моделирование показало возможность реализации всех режимов работы СДП, заявленных ранее. Однако при совместной передаче энергии из сети и внешнего накопителя через АВН и ТАДМП в общее ЗПТ была выявлена особенность согласованной работы преобразователей в данном режиме: в случае отдельных и независимых контуров управления АВН и ТАДМП преобразователь, имеющий меньшее время установки напряжения, будет определять мощность потребления, и, таким образом, после окончания переходного процесса вся требуемая мощность, передаваемая в ЗПТ, будет обеспечиваться тем преобразователем, который быстрее достигнет установившегося значения напряжения. При модельном исследовании это произошло с ТАДМП, который в результате быстрого парирования изменения напряжения обеспечил большую часть мощности, при этом токи в фазах АВН имели значения меньше уровня токоограничения.

Полученный результат может быть несущественным для краткосрочных режимов работы, однако длительный режим требует оптимального распределения нагрузки между преобразователями, что подразумевает необходимость обеспечения из накопителя только той части мощности для зарядки электротранспорта, которую невозможно получить от сети, потребляя электрический ток в пределах допустимого токоограничения.

Решением данной проблемы служит введение перекрестной связи между преобразователями, которая уменьшает задание по напряжению ТАДМП ниже уровня его пульсаций при условии работы АВН в области допустимых токов. Задание ТАДМП устанавливается на уровне номинального значения при достижении током АВН уровня токоограничения. Таким образом, при увеличении нагрузки дополнительная обратная связь не позволит ТАДМП передавать требуемую мощность в ЗПТ, если ее может обеспечить АВН.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведено модельное исследование работы СДП в основных режимах передачи энергии между преобразователями и источниками.
2. Продемонстрированы возможности балансирования мощности между внешним источником и сетью переменного тока с учетом допустимых ограничений максимального тока в случае перегрузки сети.
3. Данное модельное исследование, являясь частью СДП, требует последующей отработки алгоритмов управления на прототипе СДП и разработки стратегии переключения между режимами в зависимости от условий потребления электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SMART ELECTRIC URBAN LOGISTICS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://crossriverpartnership.org/projects/smart-electric-urban-logistics/> (дата обращения: 01.07.2020).
2. *Karimi S.* Evaluation of Energy Transfer Efficiency for Shore-to-Ship Fast Charging Systems / S. Karimi, M. Zadeh, J. A. Suul // 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). — IEEE, 2020. — Pp. 1271–1277. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152219.
3. *Poliakov N.* Three Phase Dual Active Bridge Power Converter Implementation in Power Supply System of Telescope Rotary Support Device / N. Poliakov, K. Vorobev // 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). — IEEE, 2019. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982360.
4. *Zhao Z.* Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery / Z. Zhao, J. Hu, H. Chen // 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). — IEEE, 2017. — Pp. 349–354. DOI: 10.1109/ICEI.2017.68.
5. *Baek S.* Isolation Transformer for 3-Port 3-Phase Dual-Active Bridge Converters in Medium Voltage Level / S. Baek, S. Bhattacharya // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — Pp. 19678–19687. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895818.
6. *De Doncker R. W. A. A.* A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications / R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, M. H. Kheraluwala // IEEE transactions on industry applications. — 1991. — Vol. 27. — Is. 1. — Pp. 63–73. DOI: 10.1109/28.67533.
7. *Walter J.* High-power galvanically isolated DC/DC converter topology for future automobiles / J. Walter, R.W. De Doncker // IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist. — IEEE, 2003. — Vol. 1. — Pp. 27–32. DOI: 10.1109/PESC.2003.1218269.
8. *Yazdani F.* Analysis of a three-phase dual active bridge converter during the deadband / F. Yazdani, S. Haghbin, T. Thiringer, M. Zolghadri // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). — IEEE, 2017. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977811.
9. *Albatran S.* Hybrid 2D-3D Space Vector Modulation Voltage Control Algorithm for Three Phase Inverters / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna, R. Schrader, M. Mazzola // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2013. — Vol. 4. — Is. 3. — Pp. 734–744. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2245689.
10. *Albatran S.* A hybrid 2D-3D SVM control algorithm for three phase voltage source inverters / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. — IEEE, 2012. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316357.
11. *Neacsu D.O.* Switching Power Converters: Medium and High Power / D. O. Neacsu. — Second Edition. — New York: CRC Press, 2014. — 592 p.
12. *Jimichi T.* Comparison of single-phase and three-phase dual-active bridge DC-DC converters with various semiconductor devices for offshore wind turbines / T. Jimichi, M. Kaymak, R. W. De Doncker // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 – ECCE Asia). — IEEE, 2017. — Pp. 591–596. DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992105.
13. *Segaran D.* Comparative analysis of single-and Three-Phase Dual Active Bridge Bidirectional DC-DC Converters / D. Segaran, D. G. Holmes, B. P. McGrath // Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering. — 2009. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 329–337. DOI: 10.1080/1448837X.2009.11464251.
14. *Van Hoek H.* Comparison of a single-phase and a three-phase dual active bridge with low-voltage, high-current output / H. van Hoek, M. Neubert, A. Kroeber, and R. W. De Doncker // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). — IEEE, 2012. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477466.
15. *Inoue S.* A Bidirectional Isolated DC–DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions on Power Electronics. — IEEE, 2007. — Vol. 22. — Is. 2. — Pp. 535–542. DOI: 10.1109/TPEL.2006.889939.
16. *Inoue S.* A Bidirectional DC–DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions Power Electron. — 2007. — Vol. 22. — Is. 6. — Pp. 2299–2306. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248.

17. Núñez R. O. A comparative study of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for renewable energy applications / R. O. Núñez, G. G. Oggier, F. Botterón, G. O. García // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. — 2017. — Vol. 23. — Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.seta.2017.07.004.
18. Zhao B. Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System / B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun // *IEEE Transactions on power electronics*. — 2013. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 4091–4106. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
19. Choi H. A Novel Switching Algorithm to improve Efficiency at light load conditions for Three-Phase DAB Converter in LVDC Application / H. Choi, S. Jung, J. Jung // *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*. — IEEE, 2018. — Pp. 383–387. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507840.
20. Prasad A. R. A three-phase resonant PWM DC-DC converter / A.R. Prasad, P.D. Ziogas, S. Manias // *PESC '91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. — IEEE, 1991. — Pp. 463–473. DOI: 10.1109/PESC.1991.162716.
21. Albatran S. Comparative harmonic analysis of hybrid 2D-3D SVM and conventional 2D SVM / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. — IEEE, 2013. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626441.
22. Albatran S. Switching function notation for hybrid 2D-3D space vector modulation / S. Albatran, Y. Fu, A. Albanna // *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. — IEEE, 2013. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785636.

REFERENCES

1. Smart electric urban logistics. Web. 1 July 2020 <<https://crossriverpartnership.org/projects/smart-electric-urban-logistics/3/>>.
2. Karimi, Siamak, Mehdi Zadeh, and Jon Are Suul. “Evaluation of Energy Transfer Efficiency for Shore-to-Ship Fast Charging Systems.” *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, 2020. 1271–1277. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152219.
3. Poliakov, Nikolai, and Konstantin Vorobev. “Three Phase Dual Active Bridge Power Converter Implementation in Power Supply System of Telescope Rotary Support Device.” *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. IEEE, 2019. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982360.
4. Zhao, Zhongtian, Jian Hu, and Hongtao Chen. “Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid based on AC power grid and battery.” *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. IEEE, 2017. 349–354. DOI: 10.1109/ICEI.2017.68.
5. Baek, Seunghun, and Subhashish Bhattacharya. “Isolation Transformer for 3-Port 3-Phase Dual-Active Bridge Converters in Medium Voltage Level.” *IEEE Access* 7 (2019): 19678–19687. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895818.
6. De Doncker, Rik WAA, Deepakraj M. Divan, and Mustansir H. Kheraluwala. “A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications.” *IEEE transactions on industry applications* 27.1 (1991): 63–73. DOI:10.1109/28.67533.
7. Walter, Joerg, and Rik W. De Doncker. “High-power galvanically isolated DC/DC converter topology for future automobiles.” *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC'03*. Vol. 1. IEEE, 2003. 27–32. DOI:10.1109/PESC.2003.1218269.
8. Yazdani, Farzad, Saeid Haghbin, Torbjorn Thiringer, and Mohammadreza Zolghadri. “Analysis of a Three-Phase Dual Active Bridge Converter during the Deadband.” *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2017. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977811.
9. Albatran, Saher, Yong Fu, Ahmad Albanna, Robin Schrader, and Michael Mazzola. “Hybrid 2D-3D Space Vector Modulation Voltage Control Algorithm for Three Phase Inverters.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 4.3 (2013): 734–744. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2245689.
10. Albatran, Saher, Yong Fu, and Ahmad Albanna. “A hybrid 2D-3D SVM control algorithm for three phase voltage source inverters.” *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*. IEEE, 2012. 1–6. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316357.

11. Neacsu, Dorin O. *Switching Power Converters: Medium and High Power*. Second Edition. New York: CRC Press, 2014.
12. Jimichi, Takushi, Murat Kaymak, and Rik W. De Doncker. "Comparison of single-phase and three-phase dual-active bridge DC-DC converters with various semiconductor devices for offshore wind turbines." *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)*. IEEE, 2017. 591–596. DOI:10.1109/IFEEC.2017.7992105.
13. Segaran, D., Donald Grahame Holmes, and Brendan Peter Mcgrath. "Comparative analysis of single- and three-phase dual active bridge bidirectional dc-dc converters." *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering* 6.3 (2009): 329–337. DOI: 10.1080/1448837X.2009.11464251.
14. van Hoek, Hauke, Markus Neubert, Albert Kroeber, and Rik W. De Doncker. "Comparison of a Single-Phase and a Three-Phase Dual Active Bridge with Low-Voltage, High-Current Output." *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2012. 1–6. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477466.
15. Inoue, Shigenori, and Hirofumi Akagi. "A Bidirectional Isolated DC-DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System." *IEEE Transactions on Power Electronics* 22.2 (2007): 535–542. DOI: 10.1109/TPEL.2006.889939.
16. Inoue, Shigenori, and Hirofumi Akagi. "A Bidirectional DC-DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation." *IEEE Transactions on Power Electronics* 22.6 (2007): 2299–2306. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248.
17. Núñez, R. O., G. G. Oggier, F. Botterón, and G. O. García. "A Comparative Study of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for Renewable Energy Applications." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23 (2017): 1–10. DOI: 10.1016/j.seta.2017.07.004.
18. Zhao, Biao, Qiang Song, Wenhua Liu, and Yandong Sun. "Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System." *IEEE Transactions on Power Electronics* 29.8 (2013): 4091–4106. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
19. Choi, Hyun-jun, Si-hoon Jung, and Jee-hoon Jung. "A Novel Switching Algorithm to improve Efficiency at light load conditions for Three-Phase DAB Converter in LVDC Application." *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*. IEEE, 2018. 383–387. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507840.
20. Prasad, A. R., P. D. Ziogas, and S. Manias. "A three-phase resonant PWM DC-DC converter." *PESC'91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 1991. 463–473. DOI: 10.1109/PESC.1991.162716.
21. Albatran, Saher, Yong Fu, and Ahmad Albanna. "Comparative harmonic analysis of hybrid 2D-3D SVM and conventional 2D SVM." *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. IEEE, 2013. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626441.
22. Albatran, Saher, Yang Fu, and Ahmad Albanna. "Switching function notation for hybrid 2D-3D space vector modulation." *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2013. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785636.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Константин Александрович — аспирант
Научный руководитель:
 Томасов Валентин Сергеевич — кандидат технических наук, профессор
 Университет ИТМО
 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литер А
 e-mail: mail@niuitmo.ru
Поляков Николай Александрович — кандидат технических наук, доцент
 Университет ИТМО
 197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литер А
 e-mail: polyakov.ets.itmo@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vorobev, Konstantin A. — Postgraduate
Supervisor:
 Tomasov, Valentin S. — PhD, professor
 ITMO University
 49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101, Russian Federation
 e-mail: mail@niuifmo.ru
Poliakov, Nikolai A. — PhD, associate professor
 ITMO University
 49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101, Russian Federation
 e-mail: polyakov.ets.itmo@gmail.com

Стжелецки Рышард —
доктор технических наук, профессор
Гданьский политехнический университет
80-233, Польша, Гданьск
e-mail: ryszard.strzelecki@pg.edu.pl

Strzelecki, Ryszard —
Dr. of Technical Sciences, professor
Gdańsk University of Technology
Gdańsk, 80-233, Poland
e-mail: ryszard.strzelecki@pg.edu.pl

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2020 г.
Received: August 17, 2020.*