

Гибридный алгоритм модуляции трёхуровневого преобразователя с фиксированной средней точкой

Маклаков А.С., Радионов А.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

Г. Челябинск, Российская Федерация

alexandr.maklakov.1991@ieee.org, radionov.mail@gmail.com

Аннотация. Целью данной работы являются разработка и исследование гибридного алгоритма модуляции трёхуровневого преобразователя с фиксированной средней точкой (ЗУ ПЧ с ФСТ) на основе активного выпрямителя (АВН) и автономного инвертора напряжения (АИН) в составе высоковольтного автоматизированного электропривода (АЭП). Гибридный алгоритм модуляции позволяет обеспечить плавное переключение между алгоритмами пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) и широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) в зависимости от режима работы АЭП. Реализация алгоритма приведёт к снижению коммутационных потерь, возникающих при переключении ключей при ПВШИМ, за счет снижения числа этих переключений при ШИМ с УВГ. С помощью разработанной имитационной модели в программе Matlab/Simulink была осуществлена оценка показателей качества преобразуемой электроэнергии при ПВШИМ и ШИМ с УВГ. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований было определено, что использование гибридного алгоритма модуляции, осуществляющего переключение между алгоритмом ПВШИМ и алгоритмом ШИМ с УВГ, приводит к снижению количества переключений полупроводниковых модулей преобразователя, при идентичных суммарных коэффициентах гармонических составляющих тока и напряжения.

Ключевые слова: силовая преобразовательная техника, широтно-импульсная модуляция, многоуровневый преобразователь, удаление выделенных гармоник.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на современных предприятиях активно внедряются высоковольтные автоматизированные электроприводы (АЭП) на базе многоуровневых преобразователей частоты различных топологий и многопульсных схем соединения с питающей сетью [1-5]. Ввиду больших мощностей, на фоне ужесточения международных стандартов к электромагнитной совместимости (ЭМС) и энергосбережению, высоковольтные АЭП являются наиболее перспективными в отношении повышения энергоэффективности и качества потребляемой электроэнергии. Из всего разнообразия рассматриваемых топологий преобразователей, двунаправленные трехуровневые преобразователи частоты с фиксированной средней точкой (ЗУ ПЧ с ФСТ) применяются наиболее часто. Даже незначительное увеличение КПД такого преобразователя приведет к существенной экономии потребляемой электроэнергии АЭП. Новизна способов повышения энергоэффективности трехуровневых преобразователей частоты определяет

необходимость совершенствования и исследования используемых схемных решений, алгоритмов модуляции и систем управления [6].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Фундаментальные исследования принципов работы различных топологий, методов управления и модуляции полупроводниковых преобразователей частоты в области электропривода переменного тока нашли отражения во многих научных трудах. В работе [7] рассмотрена гибридная ШИМ для АИН, обеспечивающая плавный переход между синусоидальной ШИМ и ШИМ с УВГ путем устранения фазовой задержки между двумя методами модуляции. В работе [8] рассмотрена гибридная ШИМ для АИН, обеспечивающая плавный переход между ПВШИМ и ШИМ с УВГ путем заранее определенного момента перехода. В работе [9] рассмотрена гибридная ШИМ для АВН, обеспечивающая плавный переход между ПВШИМ и ШИМ с УВГ и учитывающая коммутационные состояния во время перехода. В продолжение исследований в данной статье предложен гибридный алгоритм модуляции для ЗУ ПЧ с ФСТ. Существенным его отличием от известных является использование векторного детектора для определения момента переключений ШИМ с УВГ и ПВШИМ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗУ ПЧ с ФСТ

ЗУ ПЧ с ФСТ на базе АВН и АИН состоит (рис. 1) из 24 полностью управляемых полупроводниковых ключей VT_1-VT_{24} , 24 обратных диодов VD_1-VD_{24} , 12 фиксированных диодов $VD_{c1}-VD_{c12}$ и двух эквивалентных емкостей C_{dc1} и C_{dc2} , образующих нулевой потенциал [10-12].

Общеизвестные методы построения математических моделей многоуровневых преобразователей основаны на принципе разделения электрической системы на взаимодействующие между собой подсистемы. Однако, такой подход не позволяет получить удобные математические модели для исследования показателей качества потребляемой электроэнергии электроприводами большой мощности и синтеза их систем управления. В настоящей работе применен универсальный метод построения математических моделей полупроводниковых преобразователей, в основе которого положены дискретные логические функции γ_{abc} , описывающие состояния полупроводниковых приборов $S_{abc12rv}$ ЗУ ПЧ с ФСТ:

- для АВН

$$\gamma_{abc r} = \begin{cases} 1, & (S_{abc1r} \text{ and } S_{abc2r}) = 1 \text{ and } (S_{abc3r} \text{ and } S_{abc4r}) = 0 \\ 0, & (S_{abc2r} \text{ and } S_{abc3r}) = 1 \text{ and } (S_{abc1r} \text{ or } S_{abc4r}) = 0 \\ -1, & (S_{abc3r} \text{ and } S_{abc4r}) = 1 \text{ and } (S_{abc1r} \text{ and } S_{abc2r}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- для АИН

$$\gamma_{abc v} = \begin{cases} 1, & (S_{abc1v} \text{ and } S_{abc2v}) = 1 \text{ and } (S_{abc3v} \text{ and } S_{abc4v}) = 0 \\ 0, & (S_{abc2v} \text{ and } S_{abc3v}) = 1 \text{ and } (S_{abc1v} \text{ or } S_{abc4v}) = 0 \\ -1, & (S_{abc3v} \text{ and } S_{abc4v}) = 1 \text{ and } (S_{abc1v} \text{ and } S_{abc2v}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Дискретные логические функции γ_{abc} формируют состояния коммутационных функции F . Коммутационные функции F формируют логические сигналы, определяющие уровень напряжения звена постоянного тока, подключаемого к каждой фазе выпрямителя и инвертора

$$F_{abc12rv} = \frac{\gamma_{abc v} \cdot (\gamma_{abc v} + 1)}{2} \quad (3)$$

На основе законов Кирхгофа составлена система уравнений, описывающая электромагнитные процессы преобразователя.

$$\begin{cases} u_{abcT} = u_{abc r} + i_{abc r} \cdot Z_{abc r} \\ u_{abc l} = u_{abc v} + i_{abc v} \cdot (Z_{abc f} + Z_{abc l}) \\ u_{abc r} = u_{dc1} \cdot \left(F_{abc1r} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} F_{n1r} \right) + u_{dc2} \cdot \left(F_{abc2r} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} F_{n2r} \right) \\ u_{abc v} = u_{dc1} \cdot \left(F_{abc1v} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} F_{n1v} \right) + u_{dc2} \cdot \left(F_{abc2v} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} F_{n2v} \right) \\ u_{dc1} = \frac{(F_{a1r} i_{ar} + F_{b1r} i_{br} + F_{c1r} i_{cr}) - (F_{a1v} i_{av} + F_{b1v} i_{bv} + F_{c1v} i_{cv})}{p \cdot C_{dc1}} \\ u_{dc2} = \frac{(F_{a2r} i_{ar} + F_{b2r} i_{br} + F_{c2r} i_{cr}) - (F_{a2v} i_{av} + F_{b2v} i_{bv} + F_{c2v} i_{cv})}{p \cdot C_{dc2}} \end{cases} \quad (4)$$

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ МОДУЛЯЦИИ

Гибридного алгоритма модуляции базируется на алгоритме пространственно-векторной ШИМ (ПВШИМ) и ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ). При описании ПВШИМ была выбрана реализация при использовании базовой последовательности базовых пространственных векторов для каждого региона и сектора [13-15]. При описании ШИМ с УВГ был выбран вариант реализации на основе четвертьволновой симметрии, обеспечивающий поддержание уровня первой гармоники выходного фазного напряжения преобразователя на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции [16, 17]. Функциональная схема гибридного алгоритма представлена на рис. 2.

Принцип работы схемы основан на ряде требований:

1. Измеряемый угол поворота пространственного вектора задающего фазного напряжения 3У ПЧ с ФСТ является общим для двух алгоритмов ШИМ;
2. Амплитуда, частота и угол пространственного вектора преобразователя задающего фазного напряжения остаются неизменными при переходе с одного алгоритма ШИМ на другой;
3. Сохраняется принцип минимизации числа коммутации ключей преобразователя при смене алгоритмов ШИМ (переход возможен либо без изменения коммутационных состояний в трех фазах инвертора, либо при коммутации только в одной из трех фаз);
4. Переход от ПВШИМ к ШИМ с УВГ происходит на границах полупериодов модуляции ПВШИМ.

Блок определения момента перехода на функциональной схеме (рис. 2) представлен в качестве элемента «векторный детектор». Данный блок (рис. 3) осуществляет постоянное слежение за формируемыми состояниями [P], [O] и [N] для двух алгоритмов ШИМ и в момент появления сигнала с верхнего уровня управления осуществляет смену алгоритмов, если все оговоренные ранее условия выполняются.

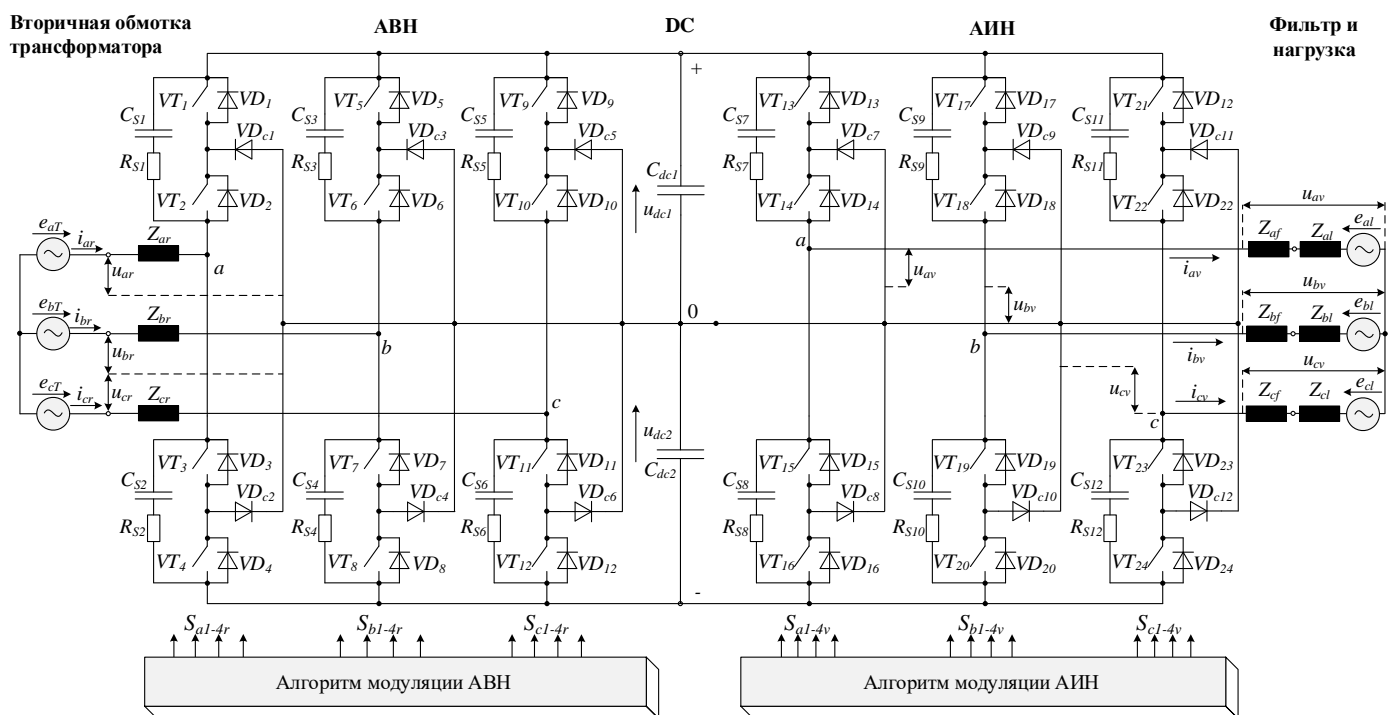


Рис. 1. Схема трёхуровневого преобразователя с фиксированной средней точкой

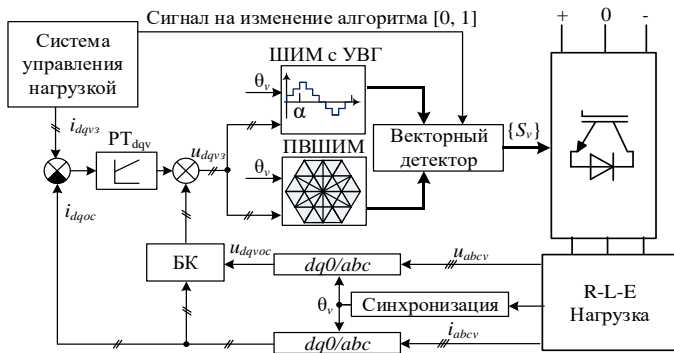


Рис. 2. Функциональная схема гибридного алгоритма ШИМ

Гибридный алгоритм модуляции, позволяющий осуществить переключение между алгоритмами ПВШИМ и ШИМ с УВГ реализован в программной среде Matlab/Simulink. Результаты моделирования на основе логико-математической модели 3У ПЧ с ФСТ и рассмотренных алгоритмов модуляции показаны в четвертой главе.

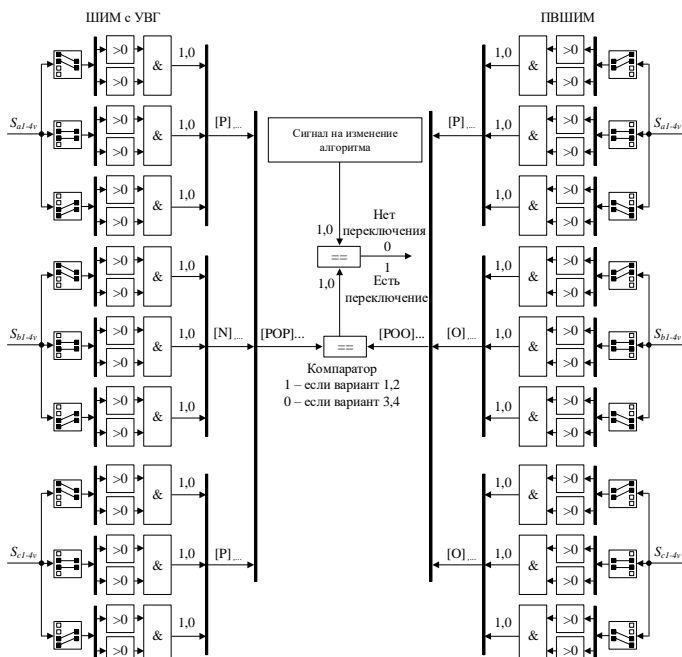


Рис. 3. Функциональная схема алгоритма векторного детектора

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА МОДУЛЯЦИИ

Моделирование алгоритма гибридной модуляции проводилось в программе Matlab/Simulink на разработанных математических моделях. Результаты моделирования процесса перехода от алгоритма ПВШИМ к ШИМ с УВГ показаны на рис. 4 и рис. 5. Кривые токов двигателя до и после переключения на рис. 6.

Из результатов моделирования перехода от ПВШИМ к ШИМ с УВГ в момент времени $t=0,35$ сек (рис. 4) можно видеть, что последним состоянием ПВШИМ является [OON]. В этот момент алгоритм ШИМ с УВГ имеет идентичные состояния [OON]. Данный случай обеспечивает переход между алгоритмами без дополнительных переключений.

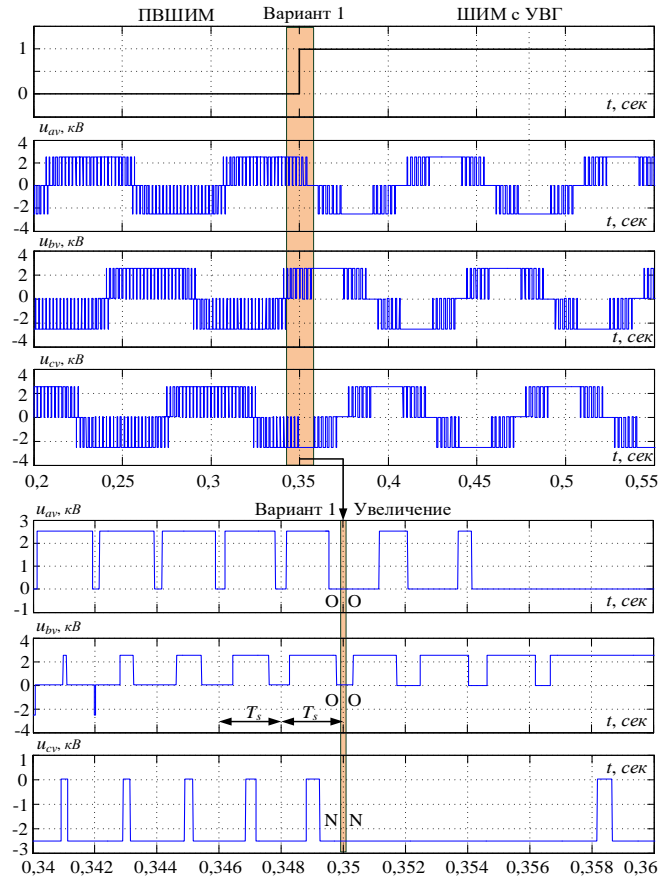


Рис. 4. Переход в момент сигнала на переключение

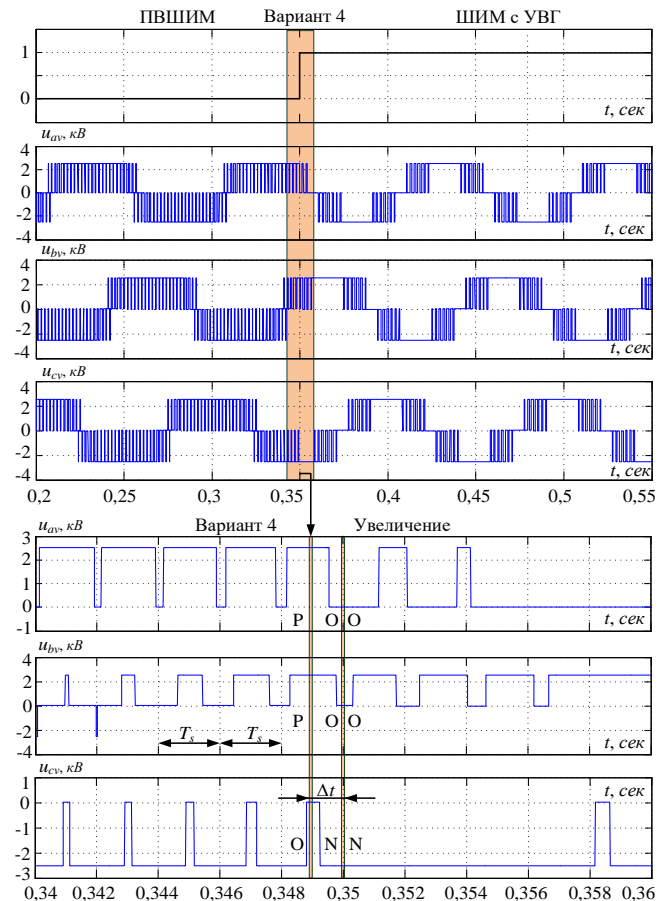


Рис. 5. Переход на следующем полупериоде квантования

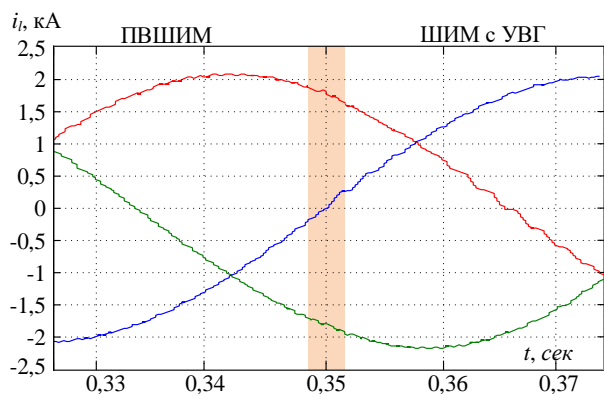


Рис. 6. Кривые токов при переключении

Из результатов моделирования перехода от ПВШИМ к ШИМ с УВГ в момент времени $t = 0,349$ сек (рис. 5) можно видеть, что последним состоянием ПВШИМ является [OON]. В этот момент алгоритм ШИМ с УВГ имеет состояния [PPO]. Данный случай не обеспечивает переход между алгоритмами без дополнительных переключений. Выполнение переключения становится возможным через промежуток времени Δt на следующем полуинтервале периода квантования ПВШИМ. В момент времени $t = 0,35$ сек последним состоянием ПВШИМ является [OON] и переключение выполняется.

Результаты моделирования (рис. 6) свидетельствуют о том, что смена алгоритмов модуляции осуществляется без бросков в кривых тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан гибридный алгоритм модуляции, который позволяет осуществить переключение между алгоритмами ШИМ с УВГ и ПВШИМ, обеспечивая при этом выполнение требований к минимизации числа коммутаций полупроводниковых ключей ЗУ ПЧ с ФСТ.

В результате моделирования работы предложенного гибридного алгоритма модуляции в момент смены алгоритмов ПВШИМ и ШИМ с УВГ показан переход без дополнительных переключений полупроводниковых модулей, исключающий скачки в кривых тока двигателя.

Практическое использование предложенного гибридного алгоритма модуляции ЗУ ПЧ с ФСТ позволит повысить КПД и улучшить показатели качества потребляемой электроэнергии высокомошного АЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications / J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro et al. // Proc. IEEE. – 2009. – vol. 97, №11. – P. 1786-1817. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030235
2. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology / H. Abu-Rub, S. Bayhan, M. Malinowski et al. // IEEE Power Electronics Magazine. – 2016. – vol. 3, №2. – P. 29-41. DOI: 10.1109/MPREL.2016.2551802
3. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics / J.I. Leon, S. Kouro, L.G. Franquelo et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – vol. 63, №5. – P. 2688-2701. DOI: 10.1109/TIE.2016.2519321
4. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies / S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu et al. //

IEEE Power Electronics Magazine. – 2012. – vol. 18, №4. – P. 26-39. DOI: 10.1109/MIAS.2012.2192231

5. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives / J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2007. – vol. 54, №6. – P. 2930-2945. DOI: 10.1109/TIE.2007.907044

6. Melício R. Comparative study of power converter topologies and control strategies for the harmonic performance of variable-speed wind turbine generator systems / R. Melício, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão // Energy. – 2011. – №36. – P. 520-529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012

7. Wang Y. The smooth transition research of different PWM modulations for vector control of induction motor in medium voltage high power / Y. Wang, X. Wen, X. Guo // Proc. IEEE Elect. Mach. and Syst. conf. – 2011. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073517

8. Zhang Y. A hybrid PWM applied to high-power three-level inverter-fed induction-motor drives / Y. Zhang, Z. Zhao, J. Zhu // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011 – vol.58, no.8. – P. 3409-3420. DOI: 10.1109/TIE.2010.2090836

9. McGrath B.P. Optimized space vector switching sequences for multilevel inverters / B.P. McGrath, D.G. Holmes, T. Lipo // IEEE Trans. Power Electron. – 2003. – vol. 18, no.6. – P. 1293-1301. DOI: 10.1109/TPEL.2003.818827

10. Maklakov A.S. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers / A.S. Maklakov, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov // IECON Proceedings Industrial Electronics Conference. – 2016. – P. 2551-2556. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793315

11. Beig A.R. Modified SVPWM algorithm for three level VSI with synchronized and symmetrical waveforms / A.R. Beig, G. Narayanan, V.T. Ranganathan // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2007. – vol. 54, №1. – P. 486-494. DOI: 10.1109/TIE.2006.888801

12. Shu Z. An efficient SVPWM algorithm with low computational overhead for three-phase inverters / Z. Shu, J. Tang, Y. Guo // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2007. – vol. 22, iss. 5. – P. 1797-1805. DOI: 10.1109/TPEL.2007.904228

13. Alonso O.A generalized methodology calculate switching times and regions in SVPWM modulation of multilevel converters / O. Alonso, L. Marroyo, P. Sanchis // Proc. EPE. Graz. – 2001. – P. 1-8.

14. Soumitra D. Novel Switching sequences for a space-vector-modulated three-level inverter / D. Soumitra, G. Narayanan // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – vol. 59, №3. – P. 1477-1487. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163373

15. Abdulvelev I.R. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency / I.R. Abdulvelev, T.R. Khramshin, G.P. Kornilov // Proc. NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). – 2016. – P. 476-481. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448226

16. Maklakov A.S. EMC evaluation of three level NPC converter based on space vector PWM / A.S. Maklakov, A.A. Radionov // Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). – 2015. – P. 236-240. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102269

17. Wells J.R. Selective harmonic control: A general problem formulation and selected solutions / J.R. Wells, B.M. Nee, P.L. Chapman, P.T. Krein // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – vol. 20. – P. 1337-1345. DOI: 10.1109/TPEL.2005.857541

Hybrid PWM of 3L-BtB-NPC Converter

Maklakov A.S., Radionov A.A.

South Ural State University (National Research University)

Chelyabinsk, Russian Federation

alexandr.maklakov.1991@ieee.org, radionov.mail@gmail.com

Abstract. The purpose of the research is to develop and study Hybrid PWM for three level back-to-back neutral-point clamped converter (3L-BtB-NPC) based on active front-end rectifier and voltage source inverter. Hybrid PWM provides smooth switching between the algorithms of space vector PWM and selective harmonic elimination PWM. This allows decreasing power losses, which arise when commutating under SVPWM, by decreasing the number of switches under SHEPWM. To achieve the purpose, the mathematical model of 3L-BtB-NPC converter based on AFE rectifier and VSI under SVPWM and SHEPWM was developed. Applying a developed simulation model in Matlab/Simulink, the power quality of VSI under SVPWM and SHEPWM was evaluated. Based on theoretical and experimental research, it was proved that applying Hybrid PWM with transition SVPWM and SHEPWM decreases the amount of semiconductor modules switches.

Keywords: modulation techniques, power converters, neutral-point clamped converter, selective harmonic elimination, space vector PWM.

REFERENCES

1. Rodriguez J., Franquelo L.G., Kouro S. et al. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications, *Proc. IEEE*, 2009, no.11 (97), pp. 1786-1817. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030235
2. Abu-Rub H., Bayhan S., Malinowski M. et al. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology, *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, no.2 (3), pp. 29-41. DOI: 10.1109/MPPEL.2016.2551802
3. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G. et al. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, no.5 (63), pp. 2688-2701. DOI: 10.1109/TIE.2016.2519321
4. Kouro S., Rodriguez J., Wu B. et al. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies, *IEEE Power Electronics Magazine*, 2012, no.4 (18), pp. 26-39. DOI: 10.1109/MIAS.2012.2192231
5. Rodriguez J., Bernet S., Wu B. et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2007, no.6 (54), pp. 2930-2945. DOI: 10.1109/TIE.2007.907044
6. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Comparative study of power converter topologies and control strategies for the harmonic performance of variable-speed wind turbine generator systems, *Energy*, 2011, no.36, 520-529. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.012
7. Wang Y., Wen X., Guo X. The smooth transition research of different PWM modulations for vector control of induction motor in medium voltage high power, *Proc. IEEE*

Elect. Mach. and Syst. conf., 2011, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073517

8. Zhang Y., Zhao Z., Zhu J. A hybrid PWM applied to high-power three-level inverter-fed induction-motor drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, no.8 (58), pp. 3409-3420. DOI: 10.1109/TIE.2010.2090836

9. McGrath B.P., Holmes D.G., Lipo T. Optimized space vector switching sequences for multilevel inverters, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2003, no.6 (18), pp.1293-1301. DOI: 10.1109/TPEL.2003.818827

10. Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers, *IECON Proceedings Industrial Electronics Conference*, 2016, pp. 2551-2556. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793315

11. Beig A.R., Narayanan G., Ranganathan V.T. Modified SVPWM algorithm for three level VSI with synchronized and symmetrical waveforms, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2007, no.1 (54), pp. 486-494. DOI: 10.1109/TIE.2006.888801

12. Shu Z., Tang J., Guo Y. An efficient SVPWM algorithm with low computational overhead for three-phase inverters, *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2007, vol. 22, iss. 5, pp.1797-1805. DOI: 10.1109/TPEL.2007.904228

13. Alonso O., Marroyo L., Sanchis P. Generalized methodology calculate switching times and regions in SVPWM modulation of multilevel converters, *Proc. EPE. Graz*, 2001, pp. 1-8.

14. Soumitra D., Narayanan G. Novel Switching sequences for a space-vector-modulated three-level inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, no.3 (59), pp. 1477-1487. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163373

15. Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Kornilov G.P. Space-vector pulse-width modulation of a three-level NPC-inverter at low switching frequency, *Proc. NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, 2016, pp. 476-481. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448226

16. Maklakov A.S., Radionov A.A. EMC evaluation of three level NPC converter based on space vector PWM, *Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, 2015, pp. 236-240. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102269

17. Wells J.R., Nee B.M., Chapman P.L., Krein P.T. Selective harmonic control: A general problem formulation and selected solutions, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2005, vol. 20, pp. 1337-1345. DOI: 10.1109/TPEL.2005.857541

Библиографическое описание статьи

Маклаков А.С. Гибридный алгоритм модуляции трёх-уровневого преобразователя с фиксированной средней точкой / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т.4, №2. – С. 30-34. DOI: 10.24892/RIJEE/20170204

Reference to article

Maklakov A.S., Radionov A.A. Hybrid PWM of 3L-BtB-NPC converter, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol.4, no.1, pp. 30-34. DOI: 10.24892/RIJEE/20170204