

СИНХРОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СДВОЕННЫХ ИНВЕРТОРОВ С ОТСЕКАЮЩИМИ ДИОДАМИ ДЛЯ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Олещук В., докт.техн.наук, **Ермуратский В.,** докт.техн.наук
Институт энергетики Академии наук Молдовы,
ул. Академическая 5, Кишинев-2028, Молдова.
e-mail: oleschukv@hotmail.com

Исследованы модуляционные процессы в фотопреобразовательной системе на базе двух инверторов с отсекающими диодами, включенных между двумя фотопреобразовательными панелями и первичными обмотками связанного с сетью трёхфазного трансформатора. Показано, что симбиоз специализированной схемы управления инверторами (с использованием семи векторов напряжения) с алгоритмами синхронной модуляции позволяет обеспечить минимизацию напряжения нулевой последовательности в системе, а также минимизацию амплитуд чётных гармоник и субгармоник в спектре фазного выходного напряжения. Выполнено моделирование процессов в системе с тремя разновидностями ШИМ. Библиограф. 10, рис. 6.

Ключевые слова: алгоритм управления, пространственный вектор напряжения, фотопреобразовательная панель, трёхфазный инвертор напряжения, стратегия ШИМ, MATLAB.

Введение. Фотопреобразовательные системы являются одной из перспективных областей практического применения комбинированных структур силовых преобразователей на базе сдвоенных инверторов напряжения [1,5,7]. Наряду со стандартными двухуровневыми инверторами в подобных системах могут быть использованы каскадно-включенные инверторы со средней точкой в цепи источника питания (инверторы с отсекающими диодами). На рис. 1, а показана структура силовых цепей фотопреобразовательной системы на базе сдвоенных (каскадных) инверторов с отсекающими диодами, питающихся от двух изолированных фотоэлектрических панелей с выходными напряжениями постоянного тока V_{dc1} и V_{dc2} . При этом возможно как непосредственное подключение фотоэлектрических панелей ко входам двух инверторов, так и подключение через промежуточное звено постоянного тока, показанное в данном случае штриховой линией. Сдвоенные инверторы соединены с сетью через трехфазный трансформатор с разомкнутыми обмотками на первичной стороне.

Трёхфазный инвертор с отсекающими диодами и со средней точкой в цепи источника питания. Базовая структура инвертора с отсекающими диодами с фазами a, b, c (на рис. 1, а – *Neutral-Point-Clamped Inverter 1*) показана на рис. 1, б [6]. Каждая из трех фаз инвертора содержит четыре силовых ключа с встречно-параллельно включёнными обратными диодами, а также два фиксирующих диода. На рис. 1, в показана диаграмма состояний вектора выходного напряжения инвертора [6]. Состояния силовых ключей инвертора, изображаемые условно в виде троичной системы (+, 0, -), определяются для каждой из трех фаз инвертора как

+ if S_1, S_2 are **ON** and S_3, S_4 are **OFF**; 0 if S_2, S_3 are **ON** and S_1, S_4 are **OFF**; if S_3, S_4 are **ON** and S_1, S_2 are **OFF**.

Известно, что использование только семи векторов, $V_1 - V_7$, показанных на рис. 1, в большими стрелками с соответствующим номером вектора, может обеспечить устранение нежелательных напряжений нулевой последовательности в трехфазной нагрузке [6]. При этом каждому из упомянутых базовых пространственных векторов напряжения соответствуют нижеприведенные состояния силовых ключей инвертора с отсекающими диодами:

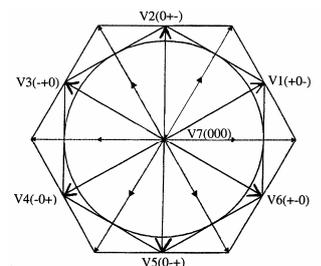
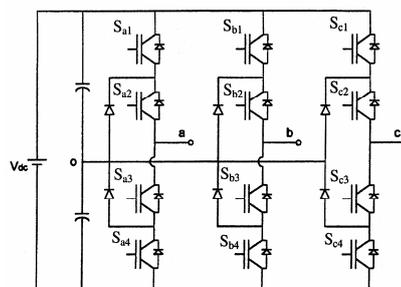
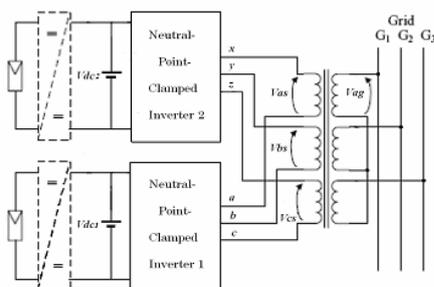


Рис. 1

$$V_1(+0-); V_2(0+-); V_3(-+0); V_4(-0+); V_5(0-+); V_6(+ -0); V_7(000).$$

Схема синхронной модуляции для инверторов с отсекающими диодами. Для устранения недостатков асинхронного принципа управления, характерного для стандартных схем векторной модуляции, при управлении сдвоенными трехуровневыми инверторами со средней точкой в цепи источника питания предложено использовать новый метод синхронной векторной модуляции [2–4]. В качестве иллюстрации диссеминации данного метода для управления инвертором с отсекающими диодами на рис. 2 показаны (для первого 60-градусного интервала периода выходной частоты) последовательность переключения (диаграмма) состояний ключей, полярные V_a , V_b и линейное V_{ab} напряжения инвертора с непрерывной схемой синхронной ШИМ, обеспечивающей устранение напряжений нулевой последовательности и синхронизацию формы кривой выходного напряжения в системе [6].

В частности, на рис. 2 сигналы β_j представляют суммарную продолжительность включенного состояния вентиля в течение тактового подинтервала τ , сигналы γ_k формируются по краям соответствующих β -сигналов. Длительность пауз λ_k характеризует продолжительность нулевого состояния вентиля.

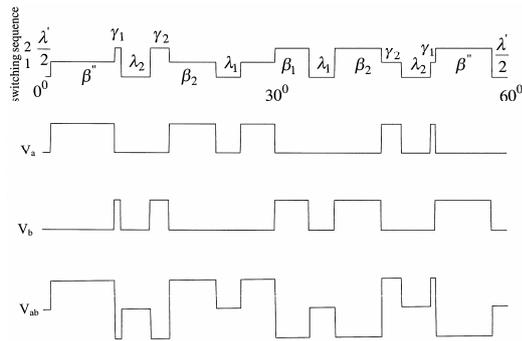


Рис. 2

При этом для осуществления непрерывной синхронизации кривой выходного напряжения на всем диапазоне регулирования положение центральных β_1 -сигналов жестко фиксируется в центрах 60-градусных тактовых интервалов, и формирование других активных β - и γ -сигналов (совместно с формированием λ -сигналов, характеризующих продолжительность нулевых пауз в кривой выходного напряжения) производится симметрично относительно центральных β_1 -сигналов.

При регулировании выходных напряжений каждого из сдвоенных инверторов преобразовательной системы на базе алгоритмов синхронной векторной ШИМ обеспечиваются симметричные фазные напряжения V_{as} ,

V_{bs} и V_{cs} на первичной стороне системы (рис. 1, а). Рациональный фазовый сдвиг между выходными напряжениями обоих инверторов в этом случае равен половине коммутационного интервала τ [10]. При этом определение текущих продолжительностей управляющих сигналов инверторов со средней точкой в цепи источника питания осуществляется на базе соотношений, приведенных в [2,6].

Учитывая, что вышеупомянутая стратегия управления обеспечивает устранение напряжений нулевой последовательности в системе, фазные напряжения V_{as} , V_{bs} и V_{cs} системы со сдвоенными инверторами и с двумя изолированными источниками постоянного тока (рис. 1, а) определяются как

$$V_{as} = V_a + V_x; \quad V_{bs} = V_b + V_y; \quad V_{cs} = V_c + V_z,$$

где V_a , V_b , V_c , V_x , V_y , V_z – полярные напряжения инверторов со средней точкой в цепи источника питания (рис. 1, а, б).

На рис. 3–5 показаны кривые опорных напряжений, а также спектры фазного выходного напряжения фотопреобразовательной системы на базе каскадно-соединенных инверторов с отсекающими диодами для двух режимов управления для случая равенства постоянных напряжений ($V_{dc1}=V_{dc2}$) и токов ($I_{dc1}=I_{dc2}$) источников постоянного тока. Полярные V_a , V_x и линейное V_{ab} напряжения, а также напряжение нулевой последовательности V_0 и фазное напряжение V_{as} сдвоенных инверторов со средней точкой в цепи источника питания приведены для периода выходной частоты. Кривые на рис. 3 соответствуют режимам управления при питании системы повышенным напряжением постоянного тока. Кривые на рис. 4 соответствуют режиму работы системы при пониженном напряжении источника постоянного тока. Выходная частота системы $F=50$ Hz. Частота коммутации инверторов равна $F_s=1,05$ kHz для случая повышенного напряжения питания и $F_s=1,45$ kHz – для пониженной величины напряжения питания.

При этом кривые, показанные на рис. 3, а и 4, а, иллюстрируют функционирование системы на базе сдвоенных инверторов с алгоритмами непрерывной синхронной ШИМ при питании повышенным (рис. 3, а – $m_1=m_2=0,63$) и пониженным (рис. 4, а – $m_1=m_2=0,88$) напряжением звена постоянного тока при соотношении амплитуд упомянутых напряжений, равном 1,45:1,05. Кривые рис. 3, б и 4, б иллюстрируют работу системы на базе инверторов с прямой синхронной ШИМ, являющейся одной из разновидностей непрерывной схемы модуляции для инверторов со средней точкой в цепи источника питания [6, 8]. Кривые на рис. 3, в и 4, в показывают базовые формы напря-

жений и спектр фазного напряжения V_{as} для системы, регулируемой на базе алгоритмов прерывистой синхронной ШИМ [6, 9].

Анализ спектральных характеристик фазного напряжения фотопреобразовательной системы на базе сдвоенных инверторов с различными разновидностями синхронной модуляции (спектрограммы на рис. 3, 4) показывает, что в спектре фазного напряжения отсутствуют четные гармоники и субгармоники применительно к любому режиму функционирования системы и при любой частоте коммутации вентилях инверторов со средней точкой в цепи источника питания.

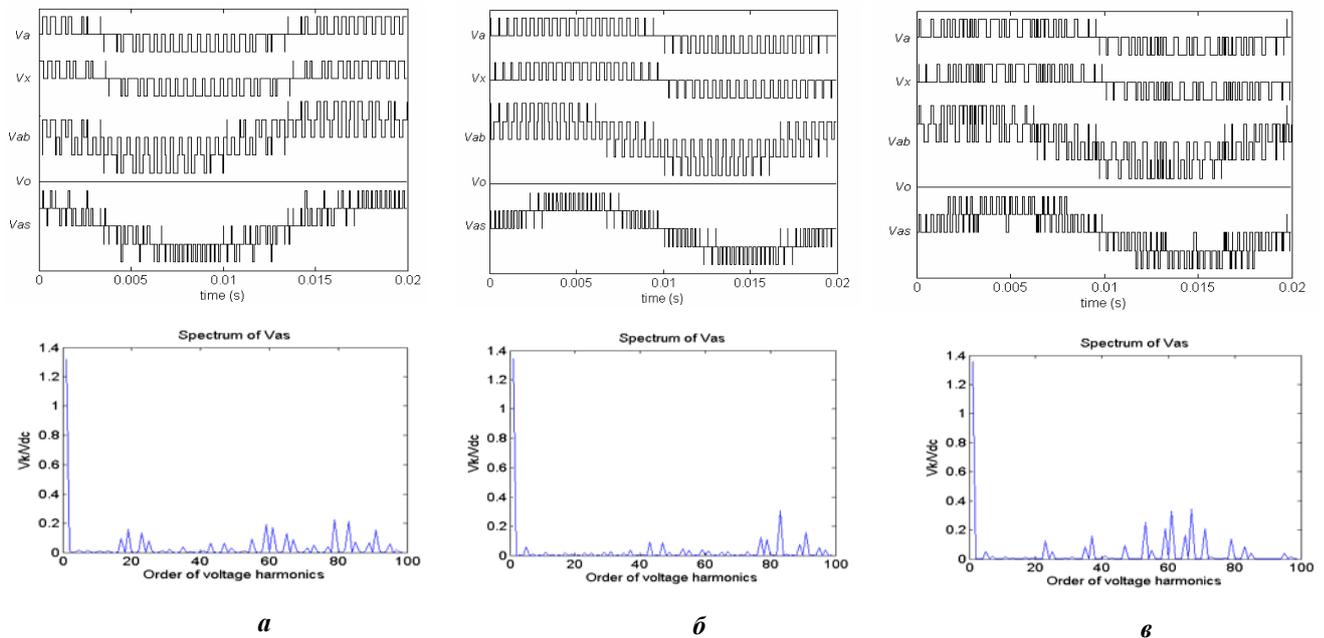


Рис. 3

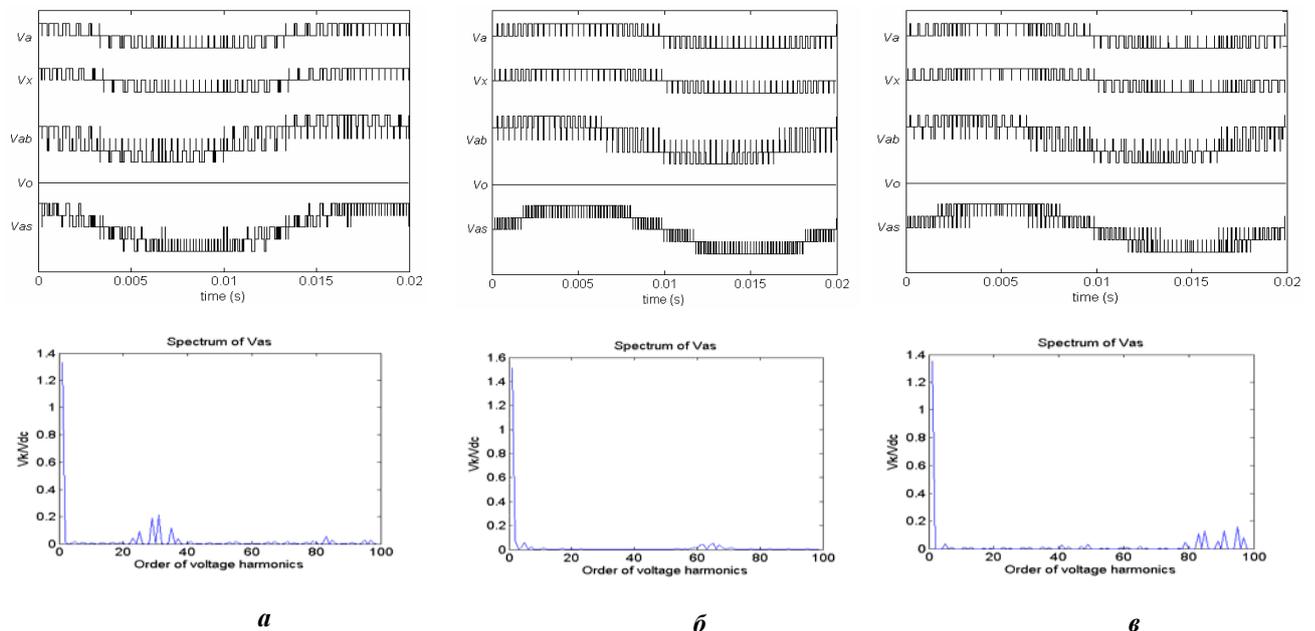


Рис. 4

При различных условиях солнечного освещения двух стандартных фотопреобразовательных панелей выходные токи панелей также имеют неодинаковые значения. В этом случае для обеспечения максимальной передаваемой мощности в системе и для стабилизации величины основной гармоники фазного тока сдвоенных инверторов коэффициенты модуляции инверторов m_1 и m_2 должны быть в обратно пропорциональной зависимости от соответствующих величин выходных токов I_{dc1} и I_{dc2} фотопреобразовательных панелей [1].

Кривые на рис. 5 иллюстрируют режим функционирования системы с прерывистой синхронной ШИМ при неравномерной нагрузке фотопреобразовательных панелей, когда $I_{dc1} \neq I_{dc2}$. В частности, кривые на рис. 5, а иллюстрируют функционирование системы при режиме управления, при котором $I_{dc1}=0,8I_{dc2}$, а коэффициенты модуляции двух инверторов соответственно равны $m_1=0,9$ и $m_2=0,72$. Кривые на рис. 5, б иллюстрируют функционирование системы при режиме управления, при котором $I_{dc1}=0,6I_{dc2}$, а коэффициенты модуляции двух инверторов при этом соответственно равны $m_1=0,9$ и $m_2=0,54$. Анализ гармонического состава фазного выходного напряжения в системе показывает (спектрограммы на рис. 5), что и в случае неравномерной нагрузки фотопреобразовательных панелей в спектре фазного напряжения каскадной преобразовательной системы с синхронной ШИМ отсутствуют четные гармоники и субгармоники.

На рис. 6 показаны результаты расчета зависимости коэффициента искажений фазного напряжения V_{as} от коэффициента модуляции инверторов $m=m_1=m_2$ для системы на базе сдвоенных инверторов со средней точкой в цепи источника питания с одинаковыми напряжениями ($V_{dc1}=V_{dc2}$) и токами ($I_{dc1}=I_{dc2}$) источников питания (двух фотопреобразовательных панелей). В качестве трех базовых схем управления при этом использовались алгоритмы непрерывной синхронной модуляции (**Mode1**), прямой синхронной ШИМ (**Mode2**) и прерывистой синхронной модуляции (**Mode3**). Коэффициент

искажения напряжения $THD = (1/V_1) \sqrt{\sum_{k=2}^{40} V_k^2}$ рассчитан с учетом низших гармоник вплоть до 40-ой

гармоники фазного напряжения. Выходная частота системы равна 50 Hz, средняя частота коммутации вентилях каждого инвертора равна $F_s=1,25$ kHz.

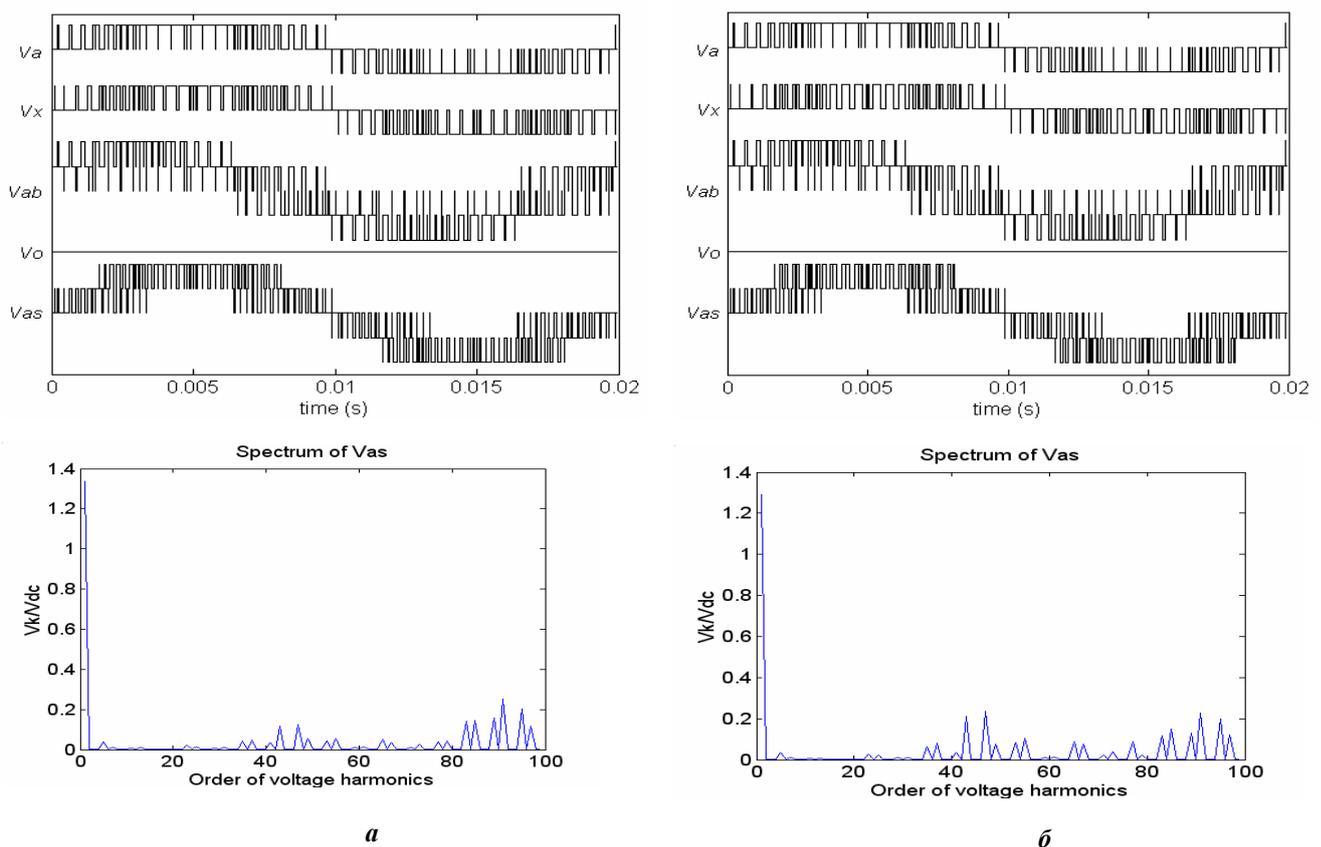


Рис. 5

Представленные на рис. 6 результаты вычислений показывают, что для фотопреобразовательных систем с широким диапазоном управления (большой величиной изменения коэффициента модуляции сдвоенных инверторов) меньшие значения коэффициента искажения фазного напряжения наблюдаются в случае использования алгоритмов прерывистой синхронной широтно-импульсной модуляции, а также при использовании схемы прямой синхронной модуляции (при повышенных значениях коэффициента модуляции).

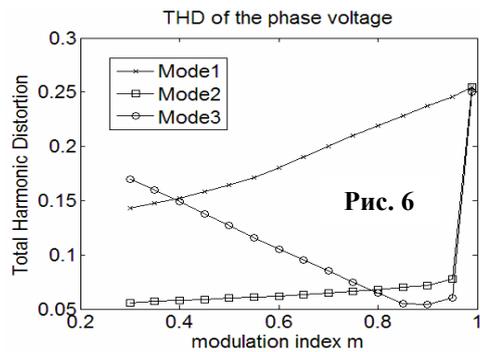


Рис. 6

Заключення. В фотоперетворювальній системі на базі сдвоєних інверторів з отсекаючими діодами, в якій використовується спеціалізована схема управління і модуляції на базі семи векторів напруги, на всьому діапазоні регулювання спостерігається усунення напруги нульової послідовності як при однакових, так і при різних амплітудах вихідних токів фотоперетворювальних панелей. При цьому використання алгоритмів синхронної векторної ШІМ для управління сдвоєними інверторами дозволяє також забезпечити стабілізацію величини основної гармоніки фазного напруги в системі при будь-яких режимах функціонування.

1. Grandi G., Ostojic D., Rossi C., Lega A. Control strategy for a multilevel inverter in grid-connected photovoltaic applications // Proc. of the IEEE Aegean Conf. on Electrical Machine, Power Electronics and Electromotion (ACEMP'2007). – 2007. – 6 p.
2. Oleschuk V., Blaabjerg F. Synchronized scheme of continuous space-vector PWM with the real-time control algorithms // Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC'2004). – 2004. – Pp. 1207-1213.
3. Oleschuk V., Bojoi R., Griva G., Profumo F. Dual three-phase traction drive with dc sources power balancing based on synchronized PWM // Proc. of the IEEE Int'l Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'2007). – 2007. – Pp. 260-265.
4. Oleschuk V., Grandi G., Sangeevkumar P. Simulation of processes in dual three-phase system on the base of four inverters with synchronized modulation // Advances in Power Electronics. – 2011. – 9 p.
5. Oleschuk V., Griva G., Prudeak R., Sizov A. Dual inverters with synchronized PWM for photovoltaic generation // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2010. – No 4. – Pp. 8-13.
6. Oleschuk V., Profumo F., Tenconi A., Bojoi R., Stankovic A.M. Synchronous control of cascaded three-level inverters // Proc. of the IEEE Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMC'2006). – 2006. – Pp. 240-245.
7. Pires V.F., Martins J.F., Foito D., Chen Hao. A grid connected photovoltaic system with a multilevel inverter and transformer // International Journal of Renewable Energy Research. – 2012. – 2, 1. – Pp. 84-91.
8. Ratnayake R.M.N., Murai Y. A novel PWM scheme to eliminate common-mode voltage in three-level voltage source inverter // Proc. of the IEEE Power Electron. Specialists Conf. (PESC'98). – 1998. – Pp. 269-274.
9. Stefanovic V.R., Vukosavic S.N. Space-vector PWM voltage control with optimized switching strategy // Proc. of the IEEE Ind. Appl. Society Conf. (IAS'92). – 1992. – Pp. 1025-1033.
10. Stemmler H., Guggenbach H. Configurations of high power voltage source inverter drives // Proc. of the European Power Electronics Conf. (EPE'93). – 1993. – Pp. 7-12.

УДК 621.314.572

СИНХРОННЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПОДВОСНИХ ІНВЕРТОРІВ З ВІДСІКАЮЧИМИ ДІОДАМИ ДЛЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Олещук В., докт. техн. наук, Єрмуратський В., докт. техн. наук

Інститут енергетики Академії наук Молдови,

вул. Академічна, 5, Кишинів-2028, Молдова.

e-mail: oleschukv@hotmail.com

Досліджено модуляційні процеси в фотоперетворювальній системі на базі двох інверторів з відсікаючими діодами, включених між двома фотоперетворювальними панелями та первинними обмотками пов'язаного з мережею трифазного трансформатора. Показано, що симбіоз спеціалізованої схеми управління інверторами (з використанням семи векторів напруги) з алгоритмами синхронної модуляції дозволяє забезпечити мінімізацію напруги нульової послідовності в системі, а також мінімізацію амплітуд парних гармонік і субгармонік у спектрі фазної вихідної напруги. Виконано моделювання процесів у системі з трьома різновидами ШІМ, MATLAB. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: алгоритм управління, просторовий вектор напруги, фотоперетворювальна панель, трифазний інвертор напруги, стратегія ШІМ, MATLAB.

PWM CONTROL OF DUAL DIODE-CLAMPED CONVERTERS FOR PV INSTALLATION

V.Oleschuk, V.Ermuratskii

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova,

5 Academy Str., Kishinev, MD-2028, Moldova.

e-mail: oleschukv@hotmail.com

Modulation processes have been analyzed in transformer-based photovoltaic system on the basis of cascaded diode-clamped inverters, adjusted by special control scheme with the use of specific voltage vectors. It has been shown, that symbiosis of this control scheme with algorithms of synchronous modulation insures minimization of common-mode voltage and magnitudes of even harmonics and subharmonics in spectra of voltage on the primary side of three-phase transformer. Simulations validate operation of this system with three control techniques. References 10, figures 6.

Keywords: control algorithm, voltage space-vector, photovoltaic panel, three-phase voltage source inverter, modulation scheme, MATLAB.

Надійшла 20.04.2015