

УДК 621.314

А.Г. Гарганеев, Р.С. Абуэлсауд

Система электроснабжения на основе управления автономным инвертором с прогнозирующей моделью

Рассмотрена стратегия управления системой электроснабжения с прогнозирующей моделью. Представлена новая дискретно-временная модель автономного инвертора и выходного LC -фильтра для прогнозирования выходного напряжения на изменяющейся нагрузке. Метод управления выбирает состояние транзисторных ключей инвертора, позволяющее минимизировать ошибку между выходным и опорным напряжениями. Предложенный метод показывает хорошее слежение за напряжением при малых уровнях гармонических искажений для сбалансированных, несбалансированных и нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: система электроснабжения, прогнозирующее управление, автономный инвертор напряжения.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-106-111

Развитие элементов и устройств силовой электроники, а также средств вычислительной микропроцессорной техники стимулирует развитие и реализацию новых принципов управления автономных систем электроснабжения (СЭС) [1, 2]. Автономные СЭС часто работают в условиях ограничения мощности входного источника, а также «непредсказуемости» нагрузок, что определяет их случайный характер как по величине активной мощности, так и по характеру – нагрузки могут быть одно- или трехфазными, сбалансированными (симметричными) или несбалансированными, линейными или нелинейными. Несимметрия и гармонические искажения

напряжения могут вызвать серьезные проблемы с оборудованием [3, 4].

Трехфазная СЭС с дополнительной (четвертой) стойкой автономного инвертора напряжения (АИН) обладает способностью эффективно обрабатывать несбалансированные нагрузки при организации четырехпроводной системы [1, 4]. В этой топологии нейтральный провод подключен к искусственно созданной средней точке « n » в транзисторной стойке S_n, S'_n (рис. 1), что не только исключает использование больших и дорогих конденсаторов, но и обеспечивает более низкую пульсацию напряжения в звене постоянного тока АИН.

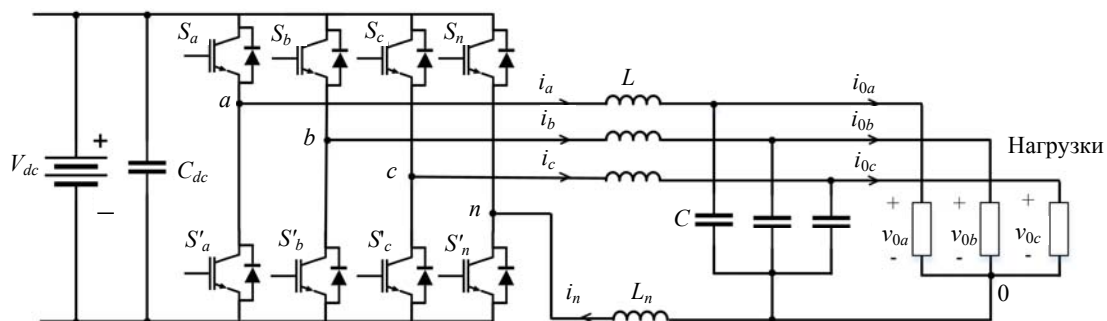


Рис. 1. Схема СЭС на основе АИН с нулевым проводом

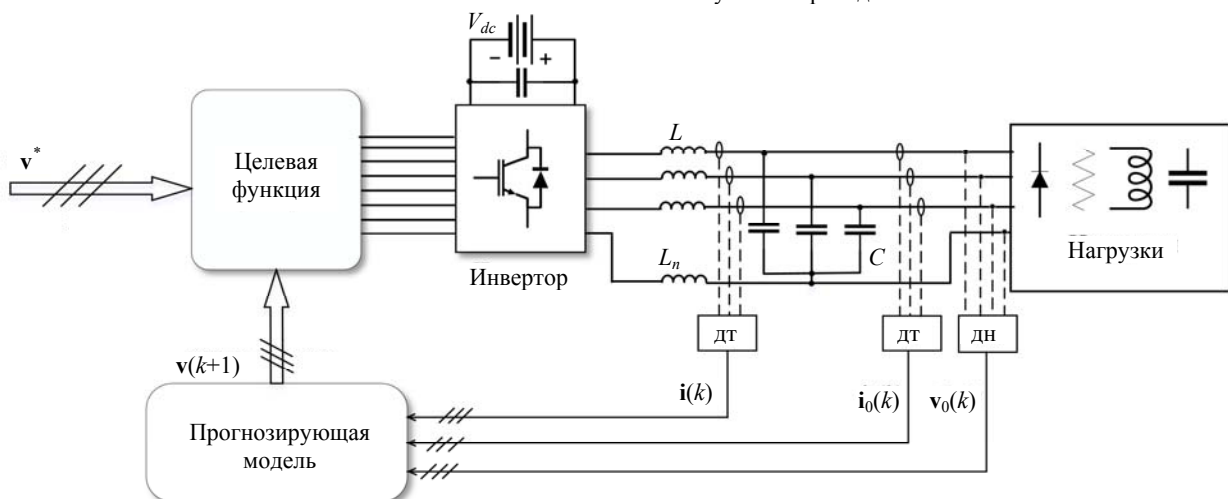


Рис. 2. Топологическая схема СЭС при управлении АИН на основе прогнозирующей модели

Одним из современных формализованных подходов к синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является теория управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей (УПМ). Этот метод появился относительно недавно и уже нашел отражение в исследованиях ряда авторов как новый инструмент управления электроприводами и устройствами силовой электроники [5–9].

Даже несмотря на то, что УПМ работает с переменной частотой коммутации АИН, этот способ основан на относительно простой концепции и обеспечивает интуитивный подход для реализации в реальном времени, а также быстрый динамический отклик. Более того, УПМ является гибким. Таким образом, дополнительные задачи, такие как минимизация частоты коммутаций, формирование спектра и устранение гармоник, могут быть решены за счет алгоритмов контроллера [10, 11].

Далее рассмотрена новая дискретно-временная модель системы управления СЭС на основе трехфазного АИН с дополнительной транзисторной стойкой, выходным LC-фильтром и индуктором нейтрали L_n .

Модель системы электроснабжения

Топология СЭС с выходным LC-фильтром и нулевым проводом показана на рис. 1, где средняя точка транзисторной стойки S_n, S'_n подключена к LC-фильтру и нагрузке через индуктор L_n , который помогает минимизировать пульсацию тока нейтрали I_n [2, 12].

Математическая модель СЭС основана на связи между состояниями переключения и выходными напряжениями. Существует четыре последовательности управляющих сигналов для четырех транзисторных стоек АИН S_a, S_b, S_c и S_n [13]. Эти сигналы образуют в общей сложности $2^4 = 16$ возможных состояний переключения АИН. Действительные состояния переключения с соответствующими фазными напряжениями представлены в табл. 1. Выходные напряжения в соответствии с сигналами переключения:

$$v_{an} = (S_a - S_n) V_{dc}, \tag{1}$$

$$v_{bn} = (S_b - S_n) V_{dc}, \tag{2}$$

$$v_{cn} = (S_c - S_n) V_{dc}, \tag{3}$$

где V_{dc} является входным напряжением постоянного тока. Для упрощения анализа векторы напряжения и тока могут быть выражены как

$$\mathbf{v} = [v_{an} \ v_{bn} \ v_{cn}]^T, \tag{4}$$

$$\mathbf{v}_0 = [v_{0a} \ v_{0b} \ v_{0c}]^T, \tag{5}$$

$$\mathbf{i} = [i_a \ i_b \ i_c]^T, \tag{6}$$

$$\mathbf{i}_0 = [i_{0a} \ i_{0b} \ i_{0c}]^T, \tag{7}$$

где \mathbf{v} и \mathbf{v}_0 – векторы напряжения инвертора и нагрузки соответственно, также \mathbf{i} и \mathbf{i}_0 – векторы тока инвертора и нагрузки соответственно.

Дифференциальные уравнения для выходного фильтра в терминах векторов напряжения и тока описываются следующим образом:

$$\mathbf{v} = L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{v}_0 + L_n \frac{di_n}{dt}, \tag{8}$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_0 + C \frac{d\mathbf{v}_0}{dt}, \tag{9}$$

$$i_n = i_a + i_b + i_c. \tag{10}$$

Таблица 1

Состояния переключения АИН

	S_a	S_b	S_c	S_n	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	V_{dc}	0	0
3	0	1	0	0	0	V_{dc}	0
4	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}	0
5	0	0	1	0	0	0	V_{dc}
6	1	0	1	0	V_{dc}	0	V_{dc}
7	0	1	1	0	0	V_{dc}	V_{dc}
8	1	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
9	0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
10	1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
11	0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
12	1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
13	0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
14	1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
15	0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
16	1	1	1	1	0	0	0

При решении уравнений (8) и (9) эта модель может быть выражена в форме пространства состояний как

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}/C \\ -\mathbf{L}^{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I}/C \\ \mathbf{L}^{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \tag{12}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \times L, \tag{13}$$

где $\mathbf{0}$ и \mathbf{I} – нулевые и единичные матрицы третьего порядка соответственно. Для упрощения анализа предположим, что индуктивность фильтра L равна индуктивности нейтрали L_n . Модель непрерывного пространства состояний в (11) может быть преобразована в дискретную форму как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_0(k+1) \\ \mathbf{i}(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0(k) \\ \mathbf{i}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{i}_0(k) \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где $\mathbf{Q} = \exp\{\mathbf{A}T_s\}$, $\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{Q} - \mathbf{I}_{6 \times 6})\mathbf{B}$, T_s является временем выборки, а k – дискретным моментом времени.

Описание прогнозирующего управления выходным напряжением АИН

Блок-схема предлагаемого подхода управления АИН, основанного на прогнозирующей модели, показана на рис. 3. Этот метод использует дискретную модель системы для прогнозирования вектора напряжения нагрузки для одношагового времени прогнозирования $(k + 1)$ по измеренному напряжению и току в момент времени k , а затем выбирается состояние переключения на основе минимизации целевой функции [14, 15]. Такой алгоритм выполняется для каждого времени выборки.

Целевая функция g может быть определена следующим образом:

$$g = [v^*(k+1) - v_0(k+1)]^2. \quad (15)$$

Слежение за опорным напряжением (v^*) является основной целью данного алгоритма управления, а $v^*(k+1)$ является экстраполированным значением, полученным из v^* . Из-за того, что время выборки T_s очень короткое, будем считать, что опорное напряжение существенно не изменяется в одном интервале дискретизации, и в этом случае $v^*(k+1) = v^*(k)$.

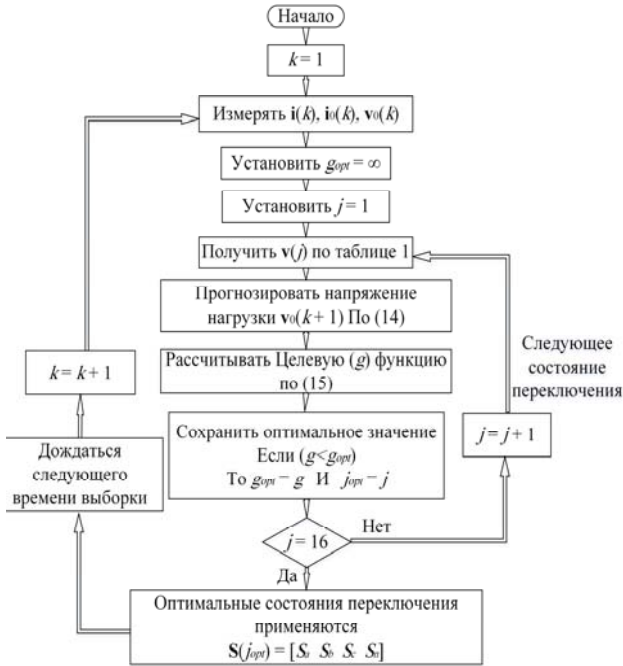


Рис. 3. Блок-схема алгоритма прогнозирующего управления АИН

Результаты моделирования

Математическое и имитационное моделирование проводилось в средах MATLAB/SIMULINK. Параметры, используемые в моделировании, приве-

дены в табл. 2. Рассматриваются два рабочих условия для демонстрации предлагаемого метода управления.

Таблица 2

Параметры моделирования СЭС	
Параметр	Значение
Напряжение постоянно-го тока АИН	$V_{dc} = 640$ В
Время выборки	$T_s = 25$ мкс
Емкость конденсатора постоянного тока	$C_{dc} = 3000$ мкФ
Параметры LC-фильтра	$L = 2,5$ мГн, $C = 80$ мкФ
Сбалансированные резистивные нагрузки	$R_a = R_b = R_c = 20$ Ом
Несбалансированные нагрузки	$R_a = 7$ Ом, $R_b = 15$ Ом, $R_c = \infty$, $L_a = 10$ мГн, $L_b = 30$ мГн
Несбалансированные нелинейные нагрузки	$L_{a1}' = 50$ мГн, $R_{a1}' = 20$ Ом, $R_{b1}' = 1$ Ом, $R_{b2}' = 60$ Ом, $C_{b1}' = 3000$ мкФ, $L_{c1}' = 20$ мГн, $R_{c1}' = 70$ Ом, $C_{c1}' = 5000$ мкФ

Целевая функция оценивается для каждого из возможных состояний переключения согласно табл. 1. Состояние переключения, которое минимизирует функцию, выбирается, а затем применяется в следующий момент выборки. Предлагаемый алгоритм управления показан на рис. 3.

Опыт 1. К предварительно подключенным на выход АИН сбалансированным нагрузкам через 0,2 с подключаются несбалансированные нагрузки (рис. 4). Амплитуда опорного фазного напряжения установлена на уровне 310 В, а частота равна 50 Гц. На рисунке показано, что напряжения нагрузки хорошо следят за опорным напряжением и являются синусоидальными и симметричными с низкими гармоническими искажениями – коэффициент нелинейных искажений (КНИ) не более 3%. Ток нейтрали равен нулю в случае сбалансированной нагрузки и появляется в нейтральной линии в случае подключения несбалансированной нагрузки.

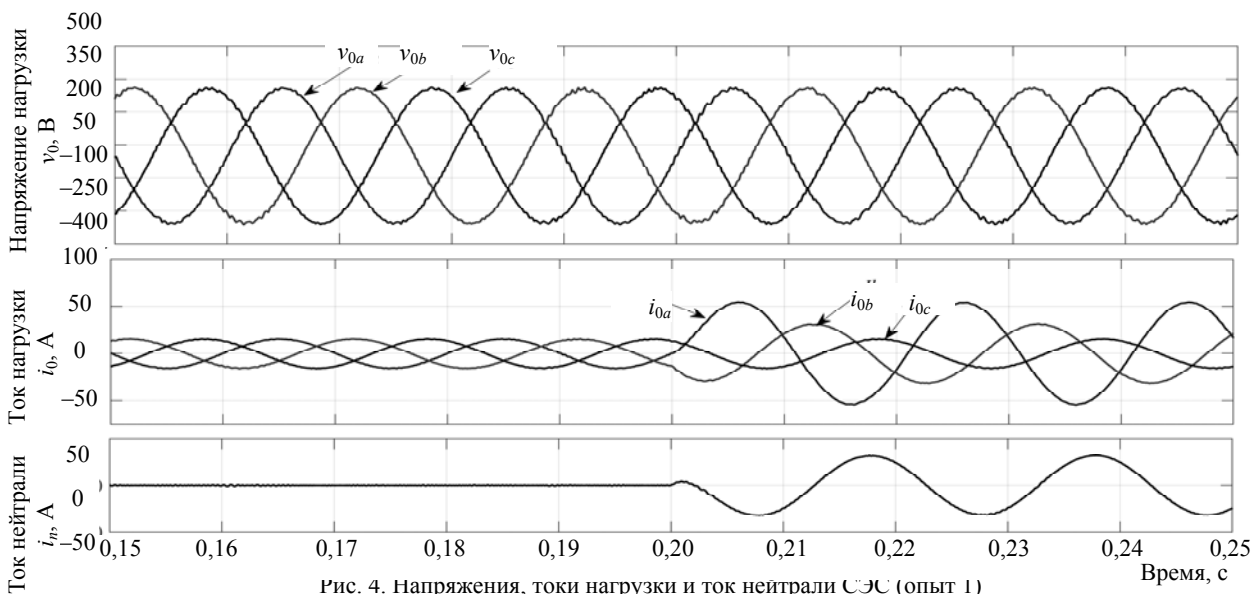


Рис. 4. Напряжения, токи нагрузки и ток нейтрали СЭС (опыт 1)

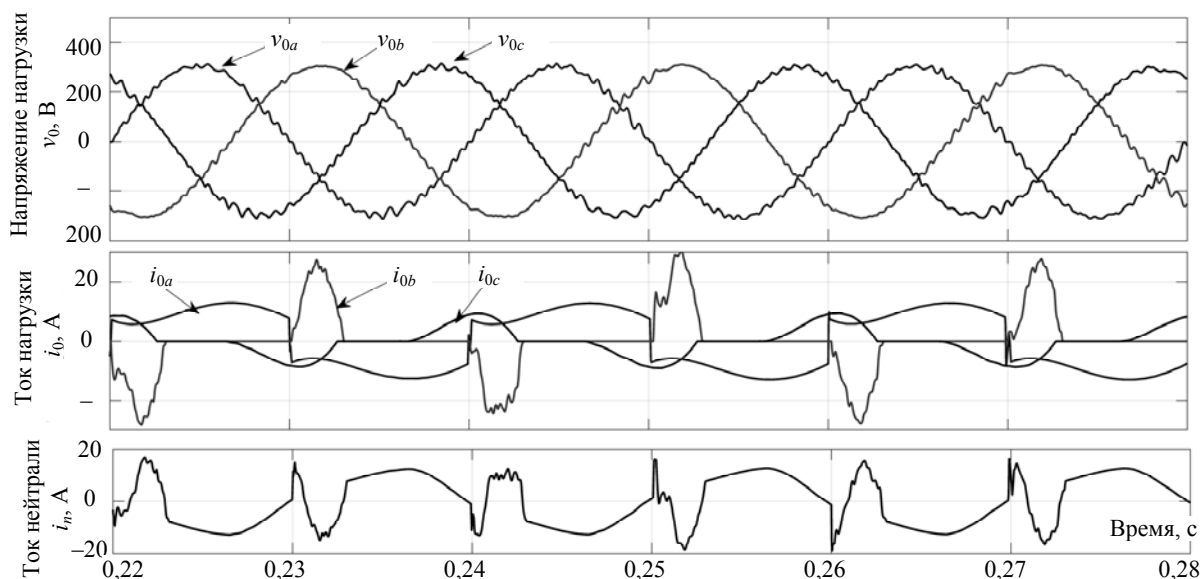


Рис. 5. Напряжения, токи нагрузки и ток нейтрали СЭС (опыт 2)

Опыт 2. На выход АИН подключена несбалансированная нелинейная нагрузка, топология которой представлена на рис. 6. Напряжения, токи нагрузки и ток нейтрали показаны на рис. 5. Из-за нелинейности нагрузки ток нейтрали существенно несинусоидален и циркулирует через четвертую транзисторную стойку АИН. При этом выходные напряжения СЭС остаются синусоидальными и симметричными в хорошем соответствии с опорным напряжением. КНИ напряжения нагрузки находится в допустимых пределах, не превышая 5%. Возможные перегрузки ключей АИН при коммутации нагрузки в этом случае устраняются защитными алгоритмами, не рассматриваемыми в данной статье.

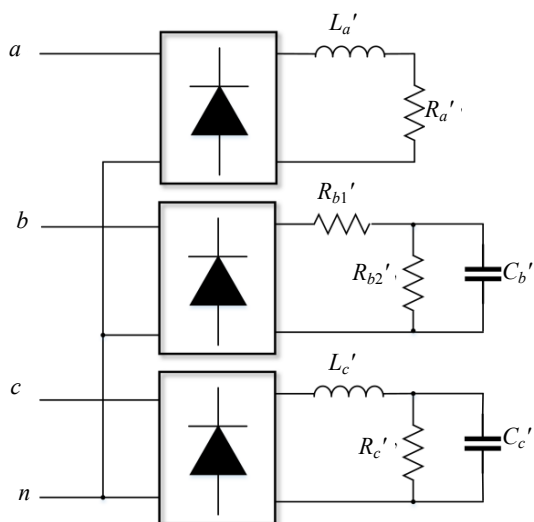


Рис. 6. Топология однофазных нелинейных нагрузок, используемых в моделировании

Заключение

Проведенные исследования показывают, что прогнозирующая стратегия управления динамическими объектами может быть с успехом применена при создании СЭС на основе АИН с выходным

LC-фильтром. Набор координат управления может быть расширен с помощью четвертой транзисторной стойки инвертора и дополнительного нейтрального провода с индуктором, что в совокупности с прогнозирующей стратегией управления повышает качество выходного напряжения СЭС в статических и динамических режимах при работе как на линейные, так и на нелинейные и несбалансированные по фазам нагрузки.

Литература

1. Miveh M.R. Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review / M.R. Miveh, M.F. Rahmat, A. Ghadimi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – P. 1592–1610.
2. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
3. Shahnian F. Operation and control of a hybrid micro-grid containing unbalanced and nonlinear loads / F. Shahnian, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, F. Zare // Electric Power Systems Research. – 2010. – P. 954–965.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
5. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока / Р.Т. Шрейнер, А.А. Ефимов, Г.С. Зиновьев, К.Н. Корюков, И.А. Мухаматшин, А.И. Калыгин // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 43–50.
6. Диаб А. А.З. Векторное управление асинхронными электроприводами на основе прогнозирующих моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.
7. Ефимов А.А. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями / А.А. Ефимов, В.Д. Косулин, С.В. Мельников // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 4. – С. 48–53.
8. Диаб А.А.З. Непосредственное векторное управление асинхронными электроприводами с использованием прогнозирующих моделей / А.А.З. Диаб, Д.А. Котин,

В.В. Панкратов // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 28, № 1. – С. 1–8.

9. Vazquez S. Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics Sergio / S. Vazquez, J.I. Leon, L.G. Franquelo, J. Rodriguez, H.A. Young // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2014. – Vol. 8. – P. 16–31.

10. Kouro S. Predictive Control Based Selective Harmonic Elimination With Low Switching Frequency for Multilevel Converters / S. Kouro, B. La Rocca, S. Alepuz, B. Wu, J. Rodriguez // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – 2009. – P. 3130–3136.

11. Cortes P. Predictive Current Control Strategy With Imposed Load Current Spectrum / P. Cortes, J. Rodriguez, D.E. Quevedo, C. Silva // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – Vol. 23, No. 2 – P. 612–618.

12. Modeling, analysis and mitigation of load neutral point voltage for three-phase four-leg inverter / Z. Liu, J. Liu, J. Li // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2013. – Vol. 60, No. 5. – P. 2010–2021.

13. Rodriguez J. Predictive current control of three-phase two-level four-leg inverter / J. Rodriguez, M. Rivera, C. Rojas, V. Yaramasu, A. Wilson // IProceedings of the International EPE/PEMC, Ohrid, Macedonia. – 2010. – P. 106–110.

14. Cortés P. Predictive Control in Power Electronics and Drives / P. Cortés, M.P. Kazmierkowski, Ralph M. Kennel, Daniel E. Quevedo, José Rodríguez // IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – Vol. 55, No. 12. – P. 4312–4324.

15. Cortes P. Model Predictive Control of an Inverter With Output LC Filter for UPS Applications / P. Cortes, G. Ortiz, J.I. Yuz, J. Rodriguez, S. Vazquez, L.G. Franquelo // Industrial Electronics, IEEE Transactions. – 2009. – Vol. 56, No. 6. – P. 1875–1883.

state of the inverter transistor keys, which minimizes the error between the output and the reference voltages. The proposed method shows a good voltage tracking at low harmonic distortion levels for balanced, unbalanced and non-linear loads.

Keywords: power supply system, model predictive control, autonomous inverter.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-106-111

References

1. Miveh M.R.M.F. Rahmat, A. Ghadimi. Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids. *A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, pp. 1592–1610.

2. Haritonov S.A. *Jelektromagnitnyye processy v sistemah generirovaniya jelektricheskoy jenerгии dlya avtonomnykh ob'ektov* [Electromagnetic processes in systems of electric power generation for autonomous objects]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2011, 536 p. (In Russ.)

3. Shahnia F., Majumder R., Ghosh A., Ledwich G., Zare F. Operation and control of a hybrid microgrid containing unbalanced and nonlinear load. *Electric Power Systems Research*, 2010, pp. 954–965.

4. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoj jelektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2003. 664 p.

5. Shrejner R.T., Efimov A.A., Zinov'ev G.S., Korjukov K.N., Muhamatshin I.A., Kalygin A.I. / Prognozirujushhee relejno-vektornoe upravlenie aktivnymi preobrazovateljami chastoty v sistemah jelektroprivoda peremennogo toka [Predicts relay-active frequency converter vector control in AC electric drive systems]. *Jelektrotehnika*, 2004, no. 10, pp. 43–50. (In Russ.)

6. Diab A.A.Z. *Vektornoe upravlenie asinhronnymi jelektroprivodami na osnove prognozirujushhih modelej* [Vector control of asynchronous electromotor based on prediction models]. Avtoreferat kand. nauk. Novosibirsk, 2009. 20 p.

7. Efimov A.A., Kosulin V.D., Mel'nikov S.V. Prognozirujushhee relejno-vektornoe upravlenie aktivnymi tokovymi preobrazovateljami [Predicts relay-vector control active current converters]. *Information-control systems*, 2014, no. 4, pp. 48–53. (In Russ.)

8. Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Neposredstvennoe vektornoe upravlenie asinhronnymi jelektroprivodami s ispol'zovaniem prognozirujushhih modelej.Inzhe-nernyj [Direct vector control of asynchronous electromotor using prediction models]. *Vestnik Dona*, 2014, vol. 28, no. 1. pp. 1–8 (In Russ.)

9. Vazquez S., Leon J.I., Franquelo L.G., Rodriguez J., Young H.A. Model Predictive Control. A Review of Its Applications in Power Electronics Sergio. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, vol. 8, pp. 16–31.

10. Kouro S., Rocca B. La, Alepuz S., Wu B., Rodriguez J. Predictive Control Based Selective Harmonic Elimination With Low Switching Frequency for Multilevel Converters. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 3130–3136.

11. Cortes P., Rodriguez J., Quevedo D.E., Silva C. Predictive Current Control Strategy With Imposed Load Current Spectrum. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 612–618.

12. Liu Z., Liu J., Li J. Modeling, analysis and mitigation of load neutral point voltage for three-phase four-leg inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2013, vol. 60, no. 5, pp. 2010–2021.

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор инженерной школы энергетики (ИШЭ) Томского политехнического университета (ТПУ)
Усова ул., д. 7, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-61-08
Эл. почта: garganeev@rambler.ru

Абуэlsaуд Раиф Снам

Аспирант ИШЭ ТПУ
Усова ул., д. 7, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-417-40-30
Эл. почта: aboelsaud@tpu.ru

Garganeev A.G., Aboelsaud R.S.

Power supply system based on the predictive model autonomous inverter control

The control strategy of the power supply system with a predictive model is considered. A new discrete-time model of the autonomous inverter and the output LC-filter to predict the output voltage at a varying load is presented. In accordance with the control strategy, the algorithm generates a switching

13. Rodriguez J., Rivera M., Rojas C., Yaramasu V., Wilson A. Predictive current control of three-phase two-level four-leg inverter. *Proceedings of the International EPE/PEMC*, Ohrid, Macedonia, 2010, pp. 106–110.

14. Cortés P., Kazmierkowski M.P., Kennel R.M., Quevedo D.E., Rodríguez J. Predictive Control in Power Electronics and Drives. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4312–4324.

15. Cortes P., Ortiz G., Yuz J.I., Rodriguez J., Vazquez S., Franquelo L.G. Model Predictive Control of an Inverter With Output LC Filter for UPS. *Applications, Industrial Electronics, IEEE Transactions*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 1875–1883.

Aleksandr G. Garganeev

Doctor of Engineering Sciences, professor,
School of Energy Tomsk Polytechnic University
7, Usov st., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 60-61-08
Email: garganeev@rambler.ru

Aboelsaud R. Siam

PhD student,
School of Energy Tomsk Polytechnic University
7, Usov st., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7-923-417-40-30
Email: aboelsaud@tpu.ru