

С.Б. Крыльцов, аспирант кафедры общей электротехники (Санкт-Петербургский горный университет)

Научный руководитель О.Б. Шонин, д.т.н., профессор (Санкт-Петербургский горный университет)

г. Санкт-Петербург

## **СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ТРЕХУРОВНЕВОГО СЕТЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Сетевые преобразователи (СП) представляют собой силовые инверторы напряжения на базе IGBT модулей. СП являются неотъемлемой частью таких устройств как активный выпрямитель частотно-регулируемого электропривода; динамические компенсаторы искажений напряжения сети семейства FACTS; распределённые источники электроэнергии, например, ветрогенераторы, в которых СП служат для согласования нестабильных параметров генерируемой энергии с сетью [2].

Выполнение СП по традиционной двухуровневой топологии в сетях 6-10 кВ имеет ряд недостатков. Подключение СП к таким сетям требует установки понижающего трансформатора и соответствующих затрат, а для уменьшения коэффициента искажений тока, потребляемого СП при больших мощностях, требуется использование большого значения индуктивности входного фильтра. Для устранения указанных недостатков целесообразно использовать многоуровневые инверторы напряжения.

Наиболее распространённой топологией многоуровневых преобразователей является трёхуровневый преобразователь с фиксируемой диодами нейтральной точкой [4]. По сравнению с традиционными двухуровневыми преобразователями данная топология позволяет подключать нагрузку мощностью до нескольких мегаватт непосредственно сети без понижающего трансформатора, уменьшить искажения выходного напряжения преобразователя, а также существенно снизить потери энергии в индуктивном фильтре. Однако, для трёхуровневого преобразователя характерно нарушение баланса напряжений на конденсаторах в звене постоянного тока, что требует разработки специальных алгоритмов управления. Целью работы является обоснование эффективной системы управления трёхуровневым инвертором напряжения с высокой динамикой реакции и поддержанием баланса напряжений на конденсаторах в звене постоянного тока.

Система прямого управления мощностью преобразователя основана на представлении процессов трёхфазной сети в соответствии с теорией мгновенной мощности [3]. Мгновенные значения активной –  $p$ ; и

реактивной –  $q$ , мощности любой трёхфазной системы в  $\alpha\beta$ -системе координат могут быть вычислены по формуле:

$$p = u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}; q = u_{\alpha} i_{\beta} - u_{\beta} i_{\alpha} \quad (1)$$

Для несимметричных и несинусоидальных режимов работы сети мгновенные мощности представляются в виде суммы постоянной –  $\bar{p}, \bar{q}$ ; и колебательной составляющей –  $\tilde{p}, \tilde{q}$ :

$$p = \bar{p} + \tilde{p}; q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2)$$

Постоянные значения мгновенной мощности соответствуют мощности основной гармоники токов и напряжения  $p^{1+}, q^{1+}$ . Колебательные же составляющие активной и реактивной мощности связаны с составляющими обратной последовательности  $p^{1-}, q^{1-}$ , а также с высшими гармоническими составляющими  $p^h, q^h$ , и должны быть скомпенсированы. Тогда справедлива запись:

$$\bar{p} = p^{1+}; \tilde{p} = p^{1-} + p^h; \bar{q} = q^{1+}; \tilde{q} = q^{1-} + q^h \quad (3)$$

Задание по мощности для системы управления преобразователем формируется следующим образом:

$$p^* = \bar{p} - \tilde{p}; q^* = \bar{q} - \tilde{q} \quad (4)$$

Мощности  $p$  и  $q$  вычисляются по формуле (1), затем из них с помощью фильтров высоких частот могут быть получены сигналы мощности высших гармонических составляющих –  $p^h$  и  $q^h$  [5]. Мощности прямой и обратной последовательностей  $p^{1+}, q^{1+}, p^{1-}, q^{1-}$  вычисляются согласно методу обобщённых симметричных составляющих, уравнения которого для напряжений в  $\alpha\beta$  системе координат имеют следующий вид [6]:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -d \\ d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ -d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Здесь  $d$  – оператор задержки сигнала на 5 мс или четверть электрического периода. Для сигналов тока формула аналогична.

Для управления ключами СП на основе заданий по мощности традиционно используются табличные алгоритмы [1], которые, однако, обладают существенным недостатком, связанным с переменной частотой коммутации. Это приводит к уменьшению срока службы силовых ключей, большим потерям на переключение и повышению требований к быстродействию преобразователя по сравнению с алгоритмами ШИМ. Для устранения этих недостатков в системе управления вместо табличного алгоритма используется алгоритм пространственно-векторной модуляции (ПВМ) [7]. Задание по напряжению для блока ПВМ формируется пропорционально-интегральными регуляторами токов:

$$\begin{aligned} u_{\alpha}^* &= k_p (i_{\alpha}^* - i_{\phi\alpha}) + k_i \int (i_{\alpha}^* - i_{\phi\alpha}) dt; \\ u_{\beta}^* &= k_p (i_{\beta}^* - i_{\phi\beta}) + k_i \int (i_{\beta}^* - i_{\phi\beta}) dt \end{aligned} \quad (6)$$

Задающие сигналы по токам вычисляются следующим образом:

$$i_{\alpha}^* = \left( \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \right) p^* - \left( \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \right) q^*; \quad i_{\beta}^* = \left( \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \right) p^* + \left( \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \right) q^* \quad (7)$$

Трёхуровневый преобразователь имеет в каждой фазе преобразователя 4 силовых ключа. Состояния ключей необходимые для приложения положительного (Р), нулевого (0) и отрицательного (N) напряжения к фазе сети показаны на рисунке 1.

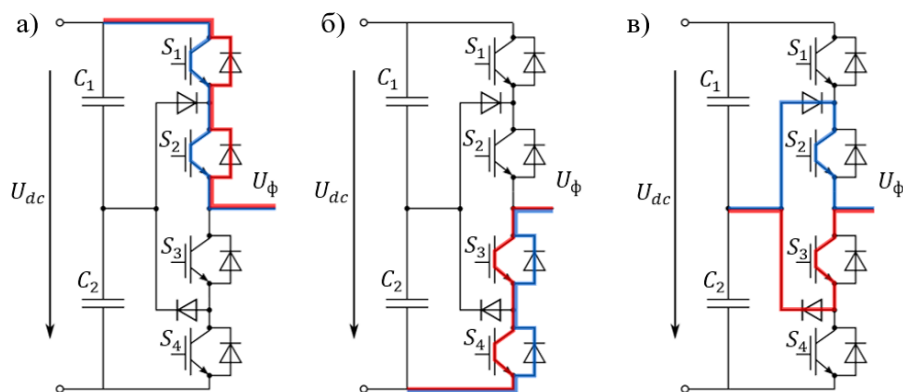


Рисунок 1. Р – а), N – б), О – в) состояния трёхуровневого инвертора.

Задача поддержания баланса напряжений на конденсаторах решается с помощью оптимального переключения комбинаций ключей преобразователя при наличии в каждом секторе как минимум одного вектора, формируемого двумя различными комбинациями ключей. Анализ показывает, что положительный уровень напряжения (Р) разряжает верхний конденсатор и заряжает нижний, отрицательный уровень (N)

оказывает противоположное действие, нулевое напряжение не оказывает влияния на баланс напряжений. В зависимости от небаланса напряжений осуществляется выбор необходимого состояния ключей из двух возможных.

Моделирование системы прямого управления мощностью трёхуровневого СП в условиях искажений напряжения сети проведено в среде MATLAB/Simulink, результаты представлены на рисунке 2. Эффективность работы системы управления оценивалась по способности поддерживать номинальное напряжение на каждом из конденсаторов звена постоянного тока при наличии возмущений напряжения сети.

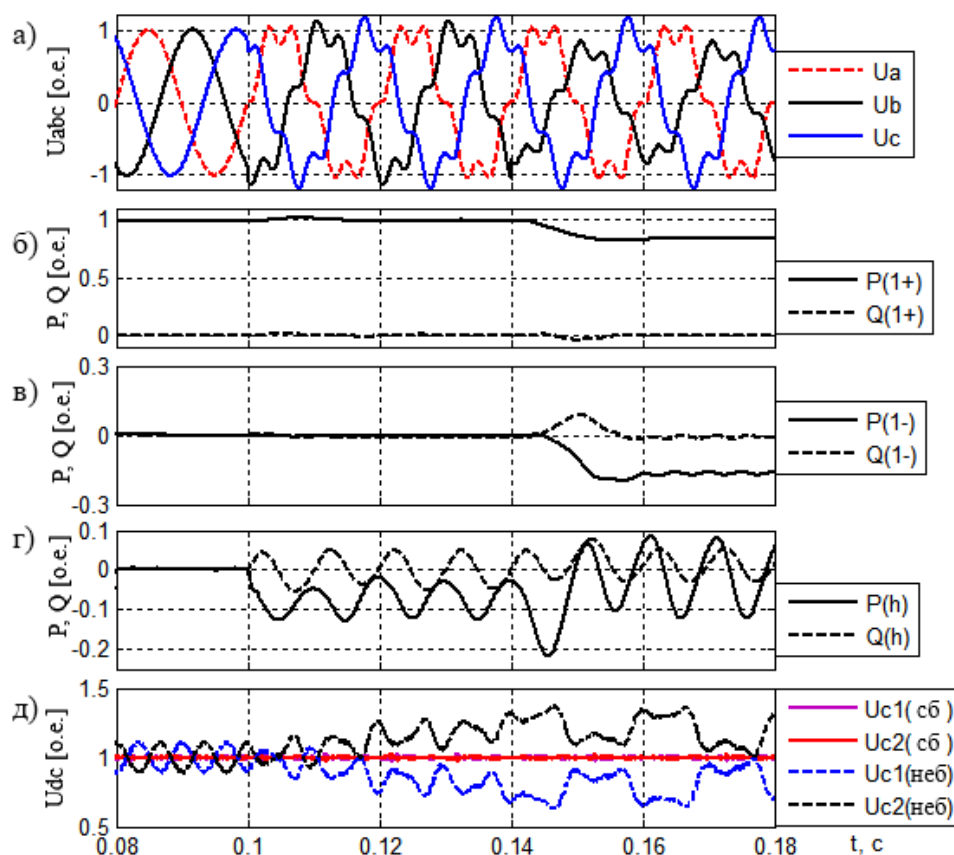


Рисунок 2. Результаты моделирования работы СП в условиях искажений напряжения сети.

Профиль фазных напряжений сети, к которой подключен преобразователь, изображён на рисунке 2а. В момент времени  $t=0.1\text{c}$  в спектр напряжения сети добавляется пятая гармоника амплитудой 15%. Система управления оценивает возмущение как внесённую мощность высших гармоник (рисунок 2г). Постоянная составляющая мгновенной мощности (рисунок 2б) при этом остаётся неизменной. В момент времени  $t=0.14\text{c}$  напряжение в фазе В падает до 80% от номинального значения. Постоянная составляющая активной мощности при этом падает на 20% и возникает мощность обратной последовательности с амплитудой 20% от

номинального значения (рисунок 2в). Выделение мгновенной мощности прямой последовательности, которая не подвержена колебаниям, вызванным составляющими обратной последовательности и высших гармоник, позволяет управлять суммарным напряжением звена постоянного тока независимо от возмущений напряжения сети. На рисунке 2д изображены результаты стабилизации напряжения на конденсаторах для предлагаемой системы прямого управления мощностью – кривые сбалансированных системой управления напряжений конденсаторов  $U_{c1}(сб)$ ,  $U_{c2}(сб)$ , и для классической векторной системы управления трёхуровневым преобразователем с синусоидальной ШИМ – кривые несбалансированных напряжений  $U_{c1}(неб)$ ,  $U_{c2}(неб)$ . Из графика можно увидеть, что векторная система управления неспособна поддерживать напряжение на конденсаторах в условиях искажений напряжения сети. Отклонение напряжения на каждом конденсаторе достигает  $\pm 40\%$ , что недопустимо для работы преобразователя.

В работе показано, что предлагаемая система управления позволяет поддерживать напряжение на каждом конденсаторе с предельным отклонением  $\pm 2\%$  в условиях асимметрии и несинусоидальности напряжения сети. Выделение составляющих обратной последовательности, а также высших гармонических составляющих активной и реактивной мощности позволяет в дальнейшем использовать эти значения для компенсации искажений напряжения сети.

#### Список литературы

1. Крыльцов, С.Б. Алгоритмы управления сетевыми инверторами на основе теории мгновенной мощности / С.Б. Крыльцов, О.Б. Шонин // Современная наука и практика №1(1), Санкт-Петербург, 2015, с.25-30.
2. Шклярский, Я.Э. Определение потока активной мощности в цепях с нелинейной нагрузкой / Я.Э. Шклярский, Ю.Е. Бунтеев, А.И. Барданов // Естественные и технические науки – 2014. – №1(69) – с.147-152/
3. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M., 2007. Instantaneous power theory and applications to power conditioning (Vol. 31). John Wiley & Sons.
4. Corzine, K., 2003. Operation and design of multilevel inverters. Developed for the office of Naval research, pp.1-79.
5. Kolawole, E.S., Ali, W.H., Cofie, P., Fuller, J., Tolliver, C. and Obiomon, P., 2015. Design and Implementation of Low-Pass, High-Pass and Band-Pass Finite Impulse Response (FIR) Filters Using FPGA. Circuits and Systems, 6(02), p.30.
6. Paap, G.C., 2000. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations. IEEE Transactions on Power Systems, 15(2), pp.522-528.
7. Prasad, V.H., 1997. Analysis and comparison of space vector modulation schemes for three-leg and four-leg voltage source inverters.