

Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями

В.Г. Титов, А.С. Плехов, К.А. Бинда, Д.Ю. Титов

Приоритетом энергетической стратегии является энергосбережение при электропотреблении. Актуальны мероприятия по уменьшению потерь активной мощности в системе электроснабжения, включая узлы нагрузки предприятий, увеличению ее пропускной способности за счет генерации реактивной мощности компенсационными выпрямителями, синхронными двигателями, применению возбuditелей с компенсационными выпрямителями [1-5]. Для этого целесообразно использовать активные компенсационные выпрямители/инверторы (АКВ) [5-7] в двухзвенных преобразователях частоты (ДПЧ) регулируемых электроприводов переменного тока. Добавление функции компенсации неактивных составляющих потребляемой мощности увеличивает стоимость преобразователей, однако эффект энергосбережения позволяет быстро окупить их удорожание [8].

Выбор каналов управления зависит от схемного решения ДПЧ, которое определяется диапазоном регулирования скорости и момента приводного двигателя, требованиями к быстродействию и точности привода. Авторами предложены технические решения содержащие:

- АКВ с искусственной коммутацией всех ключевых приборов и автономный инвертор тока с управляемой частотой коммутации вентиляей;
- АКВ с искусственной коммутацией всех вентиляей и автономный инвертор тока с широтно-импульсной модуляцией на интервалах проводимости ключей;
- АКВ с естественной и искусственной коммутацией вентиляей соответственно анодной и катодной групп мостовой схемы и автономный инвертор тока с управляемой частотой коммутации вентиляей.

Принципиальная схема ДПЧ с АКВ, в котором реализуются все три способа управления приведена на рис.1.

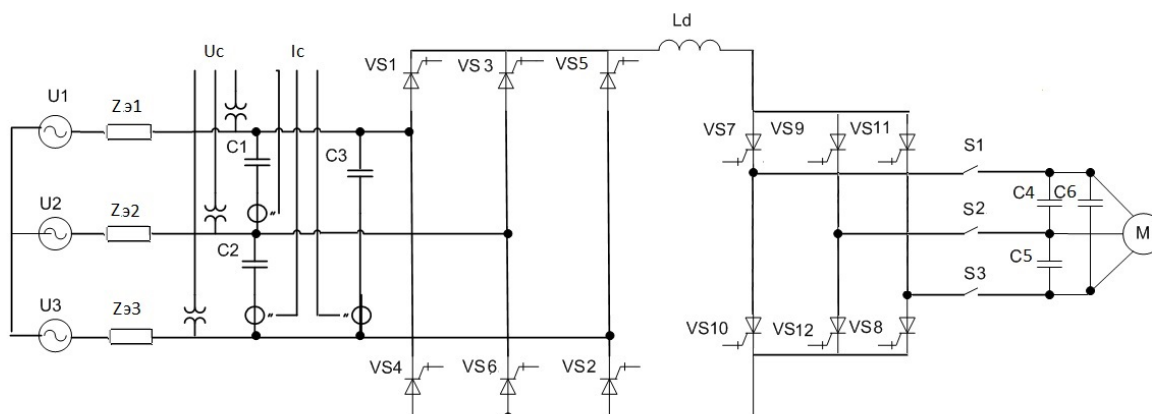


Рис. 1. - Принципиальная схема двухзвенного преобразователя частоты с компенсационным преобразователем

В силовой цепи преобразователя последовательно включены АКВ на полностью управляемых вентилях VS_1-VS_6 , являющийся активным выпрямителем тока, сглаживающий реактор в цепи выпрямленного тока L_d , автономный инвертор тока на тиристорах $VS_7..VS_{12}$ и выходной фильтр C_4-C_6 . Силовые полупроводниковые переключающие элементы выпрямителя и инвертора, обладают полной управляемостью и односторонней проводимостью тока. Напряжение и ток конденсаторов малой емкости C_1-C_3 , включенных на входе компенсационного преобразователя, используются в качестве информационных параметров системы управления потоками реактивной мощности между узлом нагрузки и компенсационным выпрямителем, построенной на основе обработки векторных сигналов U_c и I_c . В свою очередь, потоки реактивной мощности зависят от режима управления вентилями компенсационного выпрямителя [9,10].

АКВ по предложенным схемам позволяют управлять как активной мощностью на выходе, так и реактивной мощностью, генерируемой преобразователями в целях обеспечения электромагнитной совместимости. Поэтому актуальной является задача использования резервов установленной мощности АКВ для осуществления указанных функций.

Однако, при синтезе алгоритмов формирования сигналов α_u, α_e , следует соблюдать баланс между потребляемой и генерируемой мощностью и установленной мощностью компенсационного преобразователя.

При неизменной величине напряжения сети

$$U_c = 2 \cdot U_t \cdot \sin \frac{\pi}{m},$$

где $U_t = U_1, U_2, U_3$ по схеме рис. 1, значение выпрямленного напряжения U_d как и действующее значение $U_{y.n.}$ в узле нагрузки, то есть. на входе преобразователя, полностью определяются углами управления α_u и α_e , поскольку $U_{y.n.}$ и U_d связаны известными соотношениями:

$$U_{d0} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} U_{y.n.},$$

$$U_d = \frac{U_{d0}}{2} (\cos(\alpha_e) + \cos(\alpha_u)).$$

От взаимного расположения и величины векторов U_c и $U_{y.n.}$ зависит и вектор тока, потребляемого преобразователем из сети с первой гармоникой $I_{(1)d}$.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов токов, притекающих к емкостным элементам C_1-C_3 со стороны сети и со стороны активного выпрямителя. Варьируя с помощью системы управления компенсационным преобразователем параметрами основной гармоники переменного тока через емкостные элементы C_1-C_3 можно обеспечить потребление из сети необходимого тока с заданным фазовым углом. Иными словами, можно обеспечить работу преобразователя частоты с заданным значением коэффициента мощности, например равным единице, либо "опережающим", либо "отстающим" коэффициентом мощности.

Приведенные соображения иллюстрируют векторные диаграммы на рис.2, которые содержат векторы падения напряжений на эквивалентных активных и реактивных элементах источника питания Z_0 . Эти элементы эквиваленты совокупным параметрам индуктивных сопротивлений

рассеяния, активных сопротивлений первичной и вторичной обмоток трансформатора и линий (токопровода): $X_1, R_1; X'_2, R'_2; X_\Delta, R_\Delta$.

Из приведенных диаграмм следует, что управляя током $I_{(1)d}$ – потребляемым АКВ из сети, можно изменять как коэффициент мощности в узле нагрузки, так и напряжение в этом узле $U_{у.н.}$.

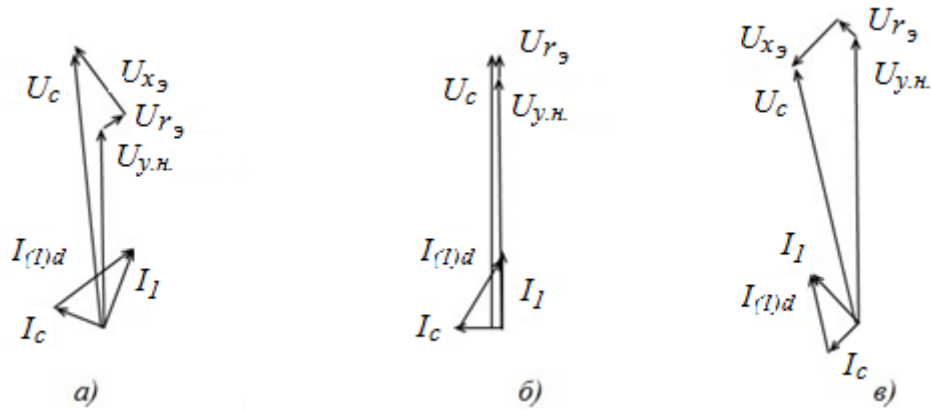


Рис. 2. - Векторные диаграммы токов и напряжений элементов схемы узла нагрузки с компенсационным преобразователем в режимах генерации: а) реактивная мощность индуктивного характера; б) полностью скомпенсированная реактивная мощность; в) реактивная мощность емкостного характера.

Согласно предложенным методам управления компенсационными преобразователями авторами были разработаны имитационные модели преобразователей в пакете MATLAB Simulink.

В ходе исследования модели АКВ с отдельным управлением вентилях анодной и катодной групп были получены значения токов в сети при разных углах управления преобразователем. По этим данным рассчитаны гармонические искажения тока в питающей сети, а так же активные и реактивные составляющие потребляемой преобразователем мощности (рис.3). Использованием метода спектрального моделирования с применением метода множественной регрессии, получены математические выражения составляющих полной мощности активного компенсационного преобразователя.

$$\bar{y} = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_1 * X_2 + a_4 * X_1^2 + a_5 * X_2^2 ,$$

где X_1 – угол управления компенсационным преобразователем α_e ;

X_2 – угол управления компенсационным преобразователем α_u ;

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \\ T^* \end{bmatrix}.$$

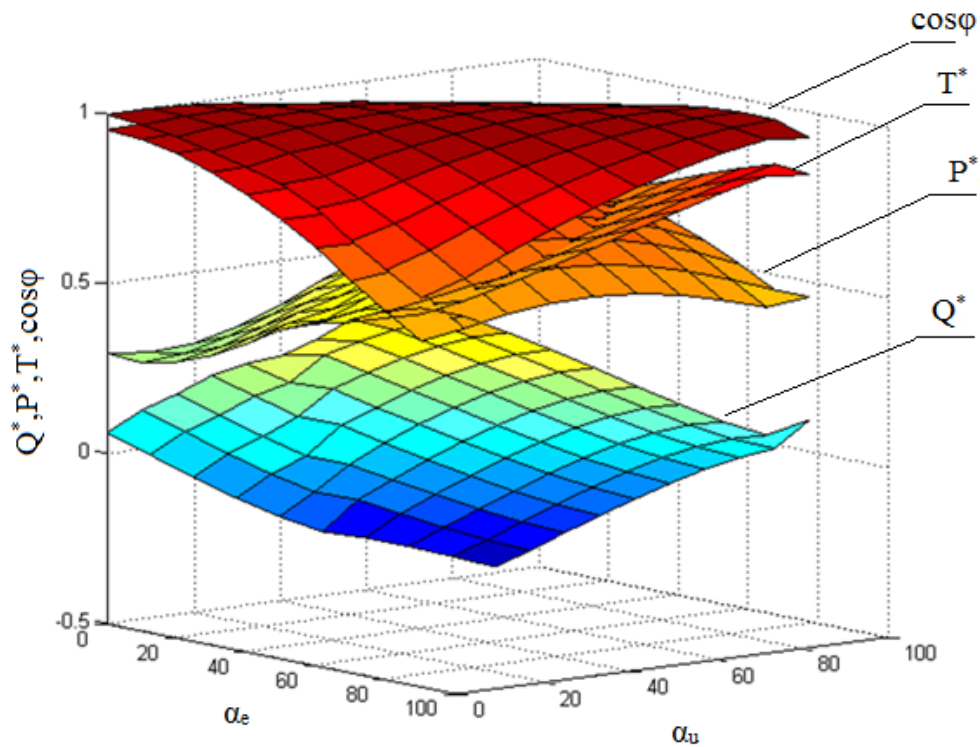


Рис. 3. – Коэффициент мощности и составляющие полной мощности в о. е. при разных углах управления преобразователем, где P^* - активная мощность в о.е., Q^* - реактивная мощность в о.е., T^* - мощность искажения в о.е.

Коэффициенты регрессии приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты математических зависимостей составляющих мощностей

	$P^*=$	$Q^*=$	$T^*=$
a_0	9.5939e-001	3.6890e-002	2.4027e-001
a_1	-2.1659e-004	-6.9505e-003	3.8454e-003
a_2	-1.3010e-003	9.2340e-003	4.3031e-003
a_3	3.4385e-005	-3.0093e-006	-7.5451e-006
a_4	-3.5789e-005	9.8183e-006	1.9220e-007
a_5	-4.1419e-005	-2.7432e-005	-3.5358e-006

При этом установленная мощность АКВ определяется:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}.$$

Вычислительные задачи авторами решены при использовании итерационных алгоритмов.

Литература:

1. Чивенков, А.И. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети [Электронный ресурс] / А.И. Чивенков, В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // «Инженерный вестник Дона», 2013. №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1564> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

2. Кочкин В.И., Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах/ Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г//.-М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011.- 312с.: ил.

3. Кондратьева Н.П. Инновационные энергосберегающие электроустановки для предприятий АПК Удмуртской Республики. [Электронный ресурс] / Н.П.Кондратьева, С.И.Юран, И.Р.Владыкин, Е.А. Козырева, И.В.Решетникова, В.А.Баженов, В.М.Литвинова //«Инженерный вестник Дона», 2013. №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1632> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

4. Zheng W., A Current-Source-Converter-Based High-Power High-Speed PMSM Drive With 420-Hz Switching Frequency/ Zheng Wang, Bin Wu, Dewei Xu, Navid Reza Zargari // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 59, NO. 7, JULY 2012 pp 2970-2981

5. Зайцев А.И. Применение компенсационных преобразователей в целях энергосбережения / А.И. Зайцев, А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж, 2010. №4(20). с.38-44.

6.Плехов А.С. Применение компенсационных выпрямителей для питания системы возбуждения синхронных двигателей / Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж, 2008. №3(11). с.36-36.

7.Титов В.Г. Возможности применения компенсационных преобразователей в звене постоянного тока электроприводов на основе автономного инвертора тока / В.Г. Титов, А.И. Зайцев, А.С. Плехов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 4, с.23-35.

8.Плехов А.С. Энергосберегающие полупроводниковые источники реактивной мощности / А. С. Плехов, В.Г. Титов, Б.Ю. Алтунин, А.О. Кашканов // Промышленная энергетика. - 2012. - № 5. - С. 47-51.

9.Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

10.Salo M. A New Control System With a Control Delay Compensation for a Current-Source Active Power Filter / Salo M, Tuusa H. // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 52, no. 6, december 2005 pp 1616-1624.