

Итерационный алгоритм оптимального управления компенсационными преобразователями

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

Авторы рассматривают вопрос реализации алгоритма оптимального управления активным компенсационным выпрямителем [1] (АКВ) с отдельным управлением вентилями катодной и анодной групп. Схема АКВ в составе двухзвенного преобразователя частоты [2, 3] приведена на рис.1. Для формирования необходимого значения выпрямленного напряжения U и величины потребляемой, либо генерируемой в сеть, реактивной мощности, требуется вычислить программные (задающие) значения углов управления группами вентилялей α_e и α_u [4]. Произведем такие вычисления при общепринятых допущениях о значительной индуктивности в цепи постоянного тока.

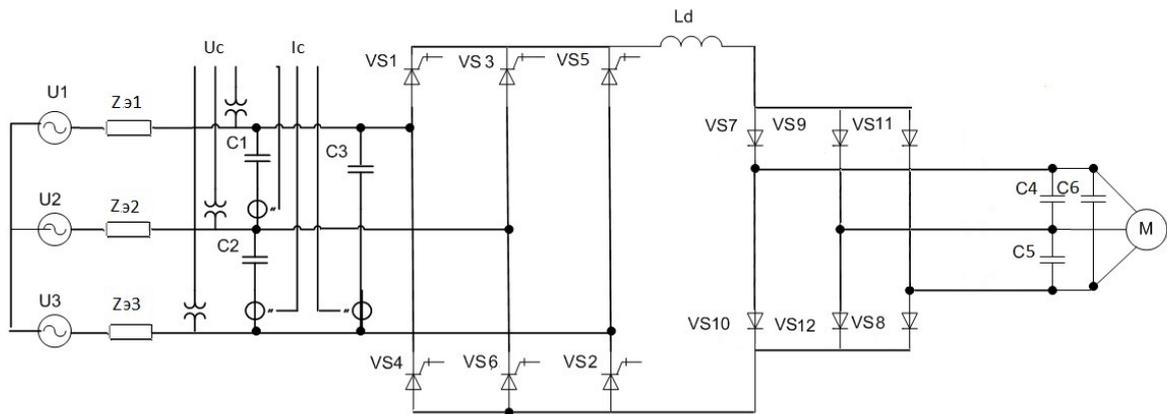


Рис. 1. - Принципиальная схема двухзвенного преобразователя частоты с компенсационным преобразователем

Значения мощности искажения, активной и реактивной мощности зависят от углов управления α_e и α_u [5].

$$P = m \cdot U \cdot I_{1(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

$$Q = m \cdot U \cdot I_{1(1)} \cdot \sin \varphi_{(1)},$$

$$T = m \cdot U \cdot \sum_{n=2}^{\infty} I_{1(n)},$$

где m - количество фаз преобразователя;

$\varphi_{(1)}$ - сдвиг фаз между первыми гармониками питающего напряжения и тока.

Задача управления компенсационным выпрямителем - поиск соотношения между значениями управляющих углов α_e и α_u , которые обеспечат минимум целевой функции:

$$\min (tg \varphi_{сетu}) = \min_{\alpha_e, \alpha_u} \left(\frac{Q_{сетu} - Q_{KB}}{P_{KB}} \right), \quad (1)$$

где Q_{KB} - реактивная мощность компенсационного выпрямителя;

P_{KB} - активная мощность компенсационного выпрямителя;

$Q_{сетu}$ - требуемая реактивная мощность для распределительной сети.

Эту задачу решает устройство оптимизации, включенное в состав системы управления компенсационным выпрямителем.

Во время работы, компенсационный выпрямитель должен решать две основных задачи. Во-первых, требуется обеспечить технологический процесс за счет активной мощности $P = U \cdot I$, получаемой с выхода АКВ. При этом напряжение на выходе АКВ определяется следующей формулой:

$$U_d = U_{do} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2).$$

Во-вторых, необходимо генерировать в сеть реактивную мощность емкостного характера:

$$Q = U_{do} \cdot I \cdot (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2),$$

$$\text{где } 0 \leq \alpha_1 \leq \frac{\pi}{2} (\alpha_1 = \alpha_e) \text{ и } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_2 \leq 0 (\alpha_2 = \alpha_u).$$

При решении задач оптимизации будем рассматривать необходимый установившийся режим (процесс) на выходе компенсационного выпрямителя, при котором $I = const$, $U = const$, т.е. режим, характеризующийся параметром $R_g = \frac{U}{I}$.

При этом справедливо соотношение:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_{\text{э}}}$$

Получаем функционально-технологическое ограничение в системе электроприемника постоянного тока:

$$I - \frac{U}{R_{\text{э}}} = 0$$

Составим функцию Лагранжа:

$$L = \frac{Q_c - I \cdot U_{d0} \cdot (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)}{I \cdot U_{d0} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)} + \lambda \left(I - \frac{U_{d0} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)}{R_{\text{э}}} \right)$$

Необходимо найти и приравнять к нулю выражения $\frac{dL}{d\alpha_1}$, $\frac{dL}{d\alpha_2}$, $\frac{dL}{d\lambda}$, они систему уравнений, решение которых α_1^{opt} , α_2^{opt} , λ^{opt} – обеспечит минимум функции (1).

Таким образом, для первого уравнения имеем:

$$\frac{dL}{d\alpha_1} = \frac{Q_c}{I \cdot U_{d0}} \cdot \frac{\sin \alpha_1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} - \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + 1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} + \lambda \frac{U_{d0}}{R_{\text{э}}} \sin \alpha_1$$

Для 2-го уравнения:

$$\frac{dL}{d\alpha_2} = \frac{Q_c}{I \cdot U_{d0}} \cdot \frac{\sin \alpha_2}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} - \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + 1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} + \lambda \frac{U_{d0}}{R_{\text{э}}} \sin \alpha_2$$

В итоге, получим систему уравнений для нахождения значений α_1^{opt} , α_2^{opt} , λ^{opt} :

$$\begin{cases} \frac{Q_c}{I \cdot U_{d0}} \cdot \frac{\sin \alpha_1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} - \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + 1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} + \lambda \frac{U_{d0}}{R_{\text{э}}} \sin \alpha_1 = 0 \\ \frac{Q_c}{I \cdot U_{d0}} \cdot \frac{\sin \alpha_2}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} - \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + 1}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)^2} + \lambda \frac{U_{d0}}{R_{\text{э}}} \sin \alpha_2 = 0 \\ \frac{I R_{\text{э}}}{U_{d0}} = \cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

В используемом алгоритме применен способ решения уравнений при помощи итераций [6, 7], реализующий достижение условия:

$$D = f(x) - x.$$

После интегрирования производной неизвестной (искомой) переменной, её текущие значения «x» подставляются в выражение $F(x) = 0$, формирующее штрафную функцию:

$$D = f(x) - x = \frac{dx}{dt}.$$

На рис. 2 показана вычислительная схема, лежащая в основе оптимизирующего устройства в системе управления преобразователем, обеспечивающая решение системы уравнений (2).

Модель идентификации значений углов управления группами вентилей активного компенсационного выпрямителя

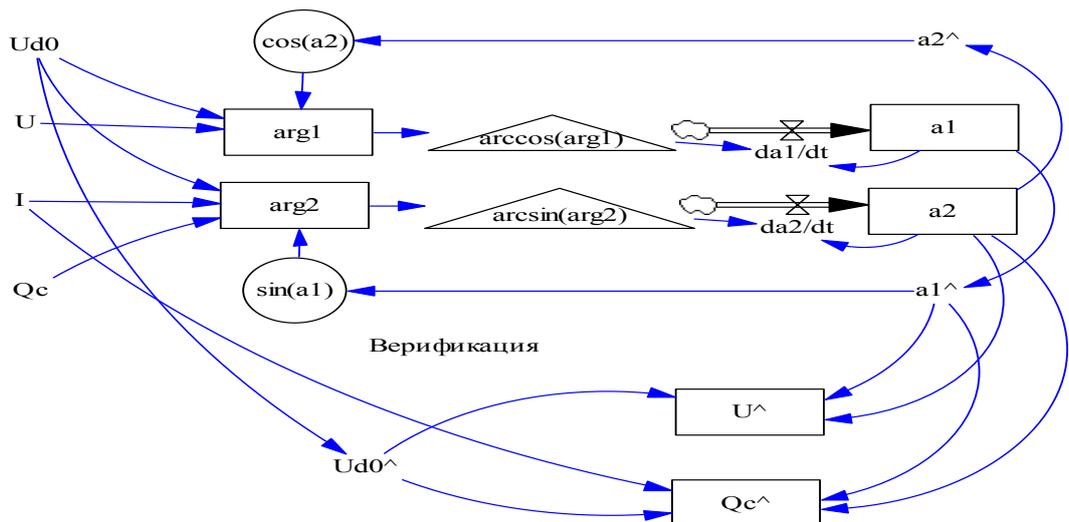


Рис. 2. - Вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений

При моделировании нелинейной схемы вычисления углов управления использован метод Эйлера [8, 9]:

$$D = \frac{dx}{dt} \cong \frac{\Delta x}{T_i} = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{T_i}.$$

Решение указанных в данном разделе задач возможно при использовании микропроцессорных средств. В качестве базы для реализации

комплексной системы управления могут использоваться сигнальные процессоры[10].

Литература:

1. 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.

2. 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.

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. Generalized Predictive Direct Power Control for AC/DC Converters/ Ricardo P. Aguilera, Daneil E. Quevedo// ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 pp 1215-1220.

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

6. Плехов А.С. Задачи идентификации и оптимизации при энергосберегающем управлении электроприводами и алгоритмы их решения / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Труды Нижегородского

государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.
Нижегород, 2011, № 3(90), с. 215-225.

7. Kelley, C.T. Iterative methods for optimization / C. T. Kelley // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999 – 196 p.

8. Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов. Курс лекций. / Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.// Изд. 2-е испр. и перераб. – Спб.: БХВ – Петербург, 2005. – 768 с.

9. Бабенко К.И. Основы численного анализа. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 848 с.

10. Сперанский В.С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 168 с.