

# Анализ режимов работы статического компенсатора реактивной мощности в режиме симметрирования нагрузки<sup>1</sup>

КИСЕЛЕВ М.Г., РОЗАНОВ Ю.К.

*Рассматриваются режимы работы компенсатора типа СТАТКОМ при симметрировании несбалансированной нагрузки. Основное внимание уделяется анализу влияния режимов на загрузку электронных ключей силовой части компенсатора и конденсаторов на стороне постоянного тока преобразователя. Приводится методика анализа режима работы компенсатора при несбалансированной нагрузке.*

**Ключевые слова:** СТАТКОМ, компенсатор реактивной мощности, симметрирование трехфазной нагрузки, метод симметрирования нагрузки

Традиционно симметрирование токов в трехфазных сетях осуществляют путем параллельного подключения к линии электропередачи конденсаторов, соединенных по схеме треугольника с различными значениями емкостей [1]. Возможности симметрирования токов таким способом ограничены из-за сложной реализации системы управления дискретного подбора конденсаторов для разных случаев несимметрии и является малоэффективным для трехфазных сетей с нейтральным проводом. Кроме этого, дополнительная функция данного способа – генерирование реактивной мощности в сеть, характеризуется тем, что значение этой реактивной мощности жестко связано с компенсацией несимметрии токов сети. Поэтому для одних случаев эта дополнительная функция является положительной, а для других – отрицательной.

Также известны средства устранения несимметрии токов на базе встречно-параллельных тиристоров и последовательно включенного к ним дросселя. Несмотря на более простую управляемость по сравнению с конденсаторным способом, такое устройство сильно искажает форму кривой тока и потребляет реактивную мощность, поэтому почти всегда дополнительно требуется подключение к нему конденсаторных батарей для поддержания баланса реактивной мощности [2].

*The operating modes of a STATCOM type reactive power compensator used for balancing an unbalanced three-phase load are considered. The main focus is placed on studying how the operating modes influence the loading of the solid-state switches used in the compensator's power part and the condenser on the converter's DC side. The procedure used for analyzing the compensator in the mode of its operation with an unbalanced load is described.*

**Key words:** STATCOM, reactive power compensator, three-phase load, balancing method

Эффективным способом устранения несимметрии токов является использование статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ) [3], для которого разработаны методики симметрирования напряжения [4] и токов [5, 6]. Устройство компенсации несимметрии на базе СТАТКОМ позволяет плавно регулировать в широком диапазоне несимметрию токов и устранять ток в нейтрали. Кроме того, при реализации компенсатора на базе СТАТКОМ возможно совместить функции симметрирования токов и компенсации реактивной мощности. В доступной зарубежной литературе не дается анализ работы компенсатора токов несимметрии на базе СТАТКОМ, отсутствуют также работы по анализу влияния режима симметрирования тока на силовые элементы СТАТКОМ. Решению этих задач и посвящена настоящая статья.

**Анализ мгновенной мощности трехфазной системы электропередачи при несимметричной нагрузке.** Рассмотрим влияние несимметричного распределения нагрузки на мгновенную мощность для общего случая – трехфазной сети с нейтральным проводом. Для этого были приняты следующие допущения: напряжение сети синусоидальное (содержит только прямую последовательность), нагрузка имеет линейный характер (содержит только пассивные элементы).

Мгновенную мощность трехфазной системы электропередачи вычисляют следующим образом [7]:

$$s(t) = s_A(t) + s_B(t) + s_C(t) =$$

<sup>1</sup> Изложенные исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

$$= u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  – мгновенная мощность трехфазной системы;  $s_A(t), s_B(t), s_C(t)$  – мгновенные значения мощности каждой фазы;  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  – мгновенные значения фазных напряжений сети;  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$  – мгновенные значения фазных токов.

Разложим несимметричные фазные токи трехфазной сети на симметричные составляющие и подставим их в уравнение (1):

$$s(t) = \bar{s} + \tilde{s} + s_0 = (u_{A1}(t)i_{A1}(t) + u_{B1}(t)i_{B1}(t) + u_{C1}(t)i_{C1}(t)) + (u_{A1}(t)i_{A2}(t) + u_{B1}(t)i_{B2}(t) + u_{C1}(t)i_{C2}(t)) + (u_{A1}(t)i_{A0}(t) + u_{B1}(t)i_{B0}(t) + u_{C1}(t)i_{C0}(t)) = 3UI_1 \cos \varphi_1 + \frac{3}{4}UI_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + 0, \quad (2)$$

где  $\bar{s} = 3UI_1 \cos \varphi_1$  – постоянная составляющая мгновенной мощности  $s(t)$ ;  $\tilde{s} = \frac{3}{4}UI_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)$  – переменная составляющая мгновенной мощности  $s(t)$  частотой 100 Гц, вызванная обратной последовательностью токов;  $s_0 = 0$  – составляющая мгновенной мощности  $s(t)$ , обусловленная влиянием нулевой последовательности токов;  $I_1$  и  $I_2$  – действующее значение прямой и обратной последовательности тока фазы;  $U$  – действующее значение фазного напряжения сети;  $\varphi_1$  – угол между фазным напряжением сети и фазным током прямой последовательности;  $\varphi_2$  – угол между напряжением фазы  $A$  и током обратной последовательности фазы  $A$ .

Выражение (2) показывает, что при несимметрии токов мгновенная мощность трехфазной системы будет содержать переменную составляющую частотой 100 Гц, значение которой определяется током обратной последовательности. Для ее исключения из мощности  $s(t)$  необходимо обеспечить равенство нулю тока обратной последовательности. В таком случае распределение потоков мощности будет выглядеть так, как это показано на рис. 1, из которого видно, что при генерировании переменной части мгновенной мощности  $s(t)$  нагрузки компенсирующим устройством (КУ) из сети будет потребляться только постоянная составляющая мощности.

**Анализ работы КУ при компенсации токов обратной последовательности.** На рис. 2 приведены диаграммы токов (обратная последовательность) и напряжений (прямая последовательность), а также результаты вычислений активной и реактивной мощности для каждой фазы КУ. Анализ диаграмм в КУ по отдельным фазам показывает, что проис-

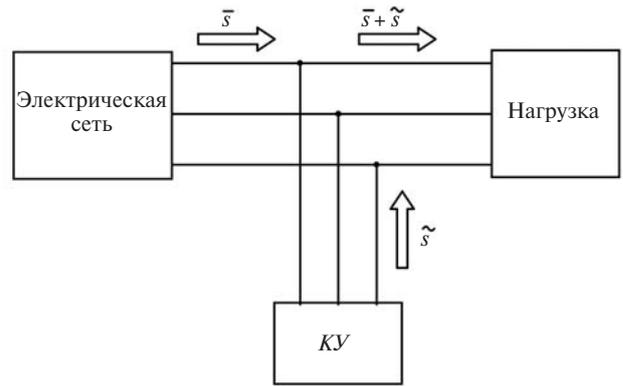


Рис. 1. Распределение потоков мощности при компенсации тока обратной последовательности

ходит потребление активной и генерирование реактивной мощности в фазе  $A$ , потребление активной и реактивной мощности в фазе  $B$ , генерирование активной мощности в фазе  $C$ , а для всей системы в целом активная и реактивная мощности равны нулю:

$$P = P_A + P_B + P_C = 0; \quad (3)$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 0.$$

Из рассмотрения этих равенств, следует вывод, что при обеспечении протекания в фазах КУ тока обратной последовательности устройство компенсации не потребляет активную мощность, что позволяет применить в качестве КУ СТАТКОМ.

**Компенсация токов нулевой последовательности.** Исключения составляющей мощности  $\tilde{s}$  в трехфазных сетях с нулевым проводом недостаточно для обеспечения протекания симметричных токов в сети. Для компенсации тока нулевой последовательности в токе сети необходимо обеспечить замкнутую цепь для протекания этого тока от нагрузки через КУ (рис. 3).

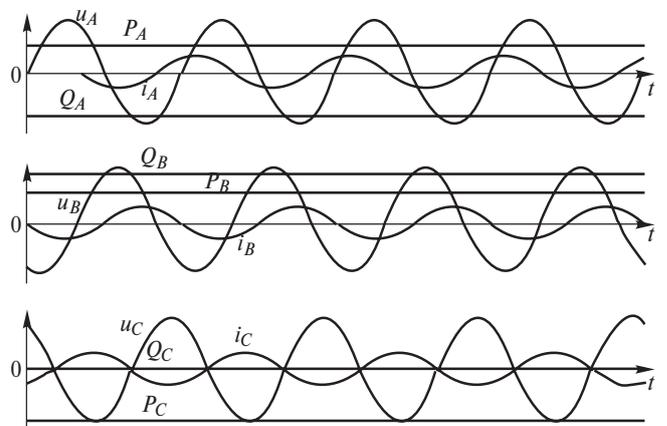


Рис. 2. Диаграммы токов в фазах КУ ( $i_A, i_B, i_C$ ), его фазных напряжений ( $u_A, u_B, u_C$ ) активных ( $P_A, P_B, P_C$ ) и реактивных ( $Q_A, Q_B, Q_C$ ) мощностей в фазах

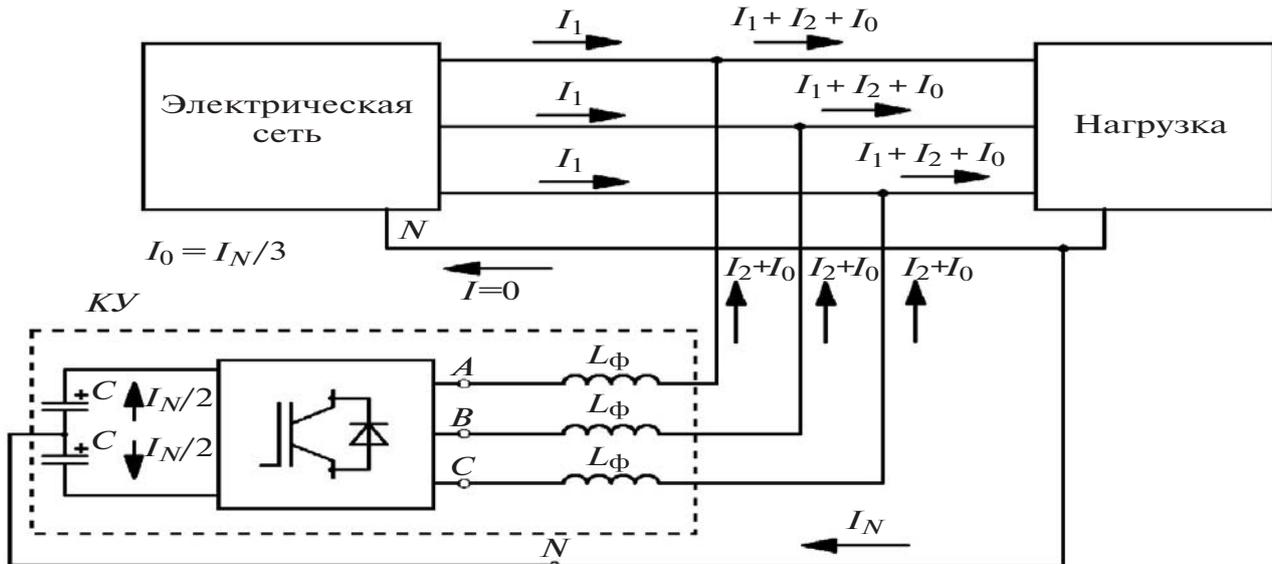


Рис. 3. Структурная схема СТАТКОМ и распределение токов в системе

Для компенсации тока нулевой последовательности КУ не требуется активная мощность, и при анализе протекания токов, так же как и на рис. 2, получим равенства, аналогичные (3). Поэтому для компенсации нулевой последовательности также возможно использовать СТАТКОМ, при этом потребуются дополнительный узел соединения нейтрального провода у устройства СТАТКОМ.

Отметим, что СТАТКОМ способен работать в комбинированном режиме компенсации токов и обратной, и нулевой последовательности. Такой режим необходим для решения задачи симметрирования токов в трехфазных сетях с нейтральным проводом.

**Структурная схема и работа СТАТКОМ в режиме компенсации несимметричных токов.** Устройство СТАТКОМ состоит из трехфазного моста, собранного из шести полностью управляемых ключевых элементов (например на IGBT-транзисторах), конденсаторов на стороне постоянного тока моста и выходных дросселей на стороне переменного тока моста. Конденсатор выполняет функцию накопителя электроэнергии, значение которой определяет уровень напряжения на стороне постоянного тока. Для обеспечения работы СТАТКОМ во всех четырех квадрантах комплексной плоскости (режимы выпрямления и инвертирования с индуктивным и емкостным характером тока) необходимо поддерживать уровень напряжения, значение которого зависит от типа ШИМ. Выходные дроссели на стороне переменного тока моста служат для фильтрации модуляционных составляющих токов, возникающих в результате работы ШИМ, и одновременно обеспечивают их непрерывность. В систему управления (СУ), реализуемую на микропроцессоре, поступают данные от датчиков, система вычисляет

опорные сигналы в соответствии с режимом работы компенсатора и формирует импульсы управления ключами мостового преобразователя компенсатора. Ток задания рассчитывался путем преобразования  $abc/dq$  [8]. Для регулирования тока в выходных дросселях компенсатора в СУ используется отрицательная обратная связь с дальнейшей подачей сигнала на вход ПИ-регулятора для преобразования тока задания в напряжение задания.

Устройство СТАТКОМ подключается параллельно с сетью. Размещение его вблизи нагрузки позволяет достичь наибольшей эффективности работы. На рис. 3 приведена схема подключения СТАТКОМ к трехфазной сети с нейтральным проводом. Для этого используют схему с соединением нейтрального провода между конденсаторами.

Функция СТАТКОМ заключается в генерировании токов обратной и нулевой последовательности в противофазе соответствующим токам нагрузки. Таким образом, при несимметричных по фазам нагрузках обеспечиваются симметричные токи по фазам сети и исключается ток в нейтральном проводе между компенсатором и сетью. При анализе работы СТАТКОМ в режиме компенсации несимметричных токов была использована компьютерная математическая модель в программе MatLab/Simulink. На рис. 4 приведены диаграммы, свидетельствующие о работоспособности модели в требуемом режиме.

**Распределение токов в ключевых элементах преобразователя СТАТКОМ.** Рассмотрим распределение токов в ключевых элементах преобразователя СТАТКОМ, соединенных по схеме двухуровневого моста. Для работы компенсатора в четырех квадрантах в качестве ключевых элементов используется комбинация транзистора и параллельно подклю-

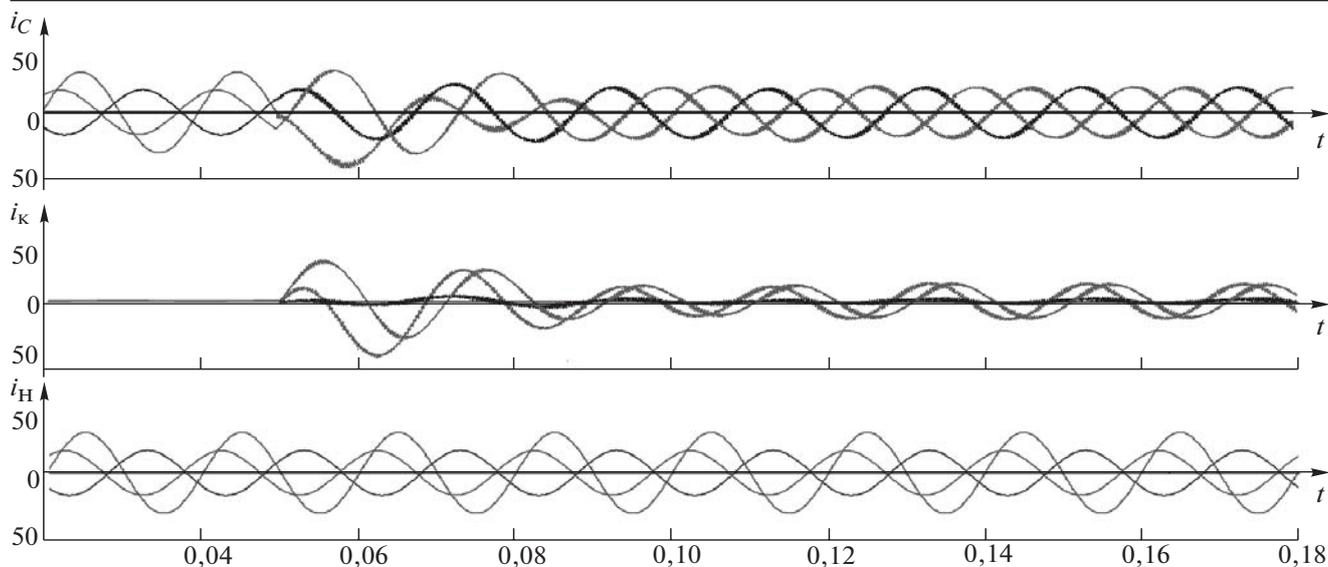


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования математической модели СТАТКОМ в режиме компенсации несимметричных токов (верхний график – токи сети, средний – токи компенсатора, нижний – токи нагрузки)

ченного обратного диода. Выходные дроссели компенсатора обеспечивают протекание непрерывного тока в них. В установившемся режиме работы в преобразователе компенсатора ток распределяется между транзистором верхнего ключевого элемента и диодом нижнего ключевого элемента при протекании условно положительного тока (от компенсатора к сети) и между транзистором нижнего ключевого элемента и диодом верхнего ключевого элемента при протекании условно отрицательного тока. На рис. 5 выделены элементы, через которые протекает ток при условно положительном направлении тока в дросселе. Элементы ключей, которые не выделены жирно, проводят попеременно при отрицательном направлении тока.

На рис. 6 представлены диаграммы токов в ключах, полученные на компьютерной модели, работающей в режиме компенсации обратной последовательности токов. В положительной части графика по оси ординат отложены значения тока, протекающего в транзисторе ключевого элемента, а

в отрицательной части графика – тока в диоде. Из диаграмм видно различное распределение токов по ключевым элементам в каждой из фаз. Распределение тока между транзистором и обратным диодом одного из ключевых элементов зависит от сдвига фаз между током и соответствующим фазным напряжением сети. При протекании токов прямой последовательности в ветвях компенсатора в каждом плече преобразователя токи между транзистором и обратным диодом распределяются одинаковым образом. В других режимах распределение токов между транзистором и диодом в каждом плече будет различным.

Для расчета среднего значения тока в диоде можно воспользоваться следующим выражением:

$$I_{\text{ср}VD} = M_A k_{VD} \frac{I_m}{2\pi}, \quad (4)$$

где  $M_A$  – индекс амплитудной модуляции;  $I_m$  – амплитуда тока фазы;  $k_{VD}$  – коэффициент, зависящий от угла между фазными напряжением и током.

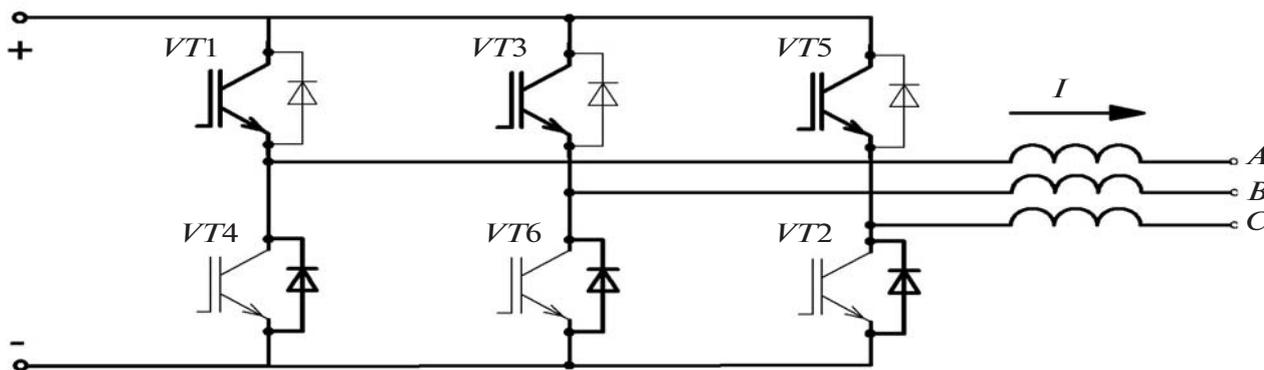


Рис. 5. Распределение токов в двухуровневом мосте при положительном направлении тока

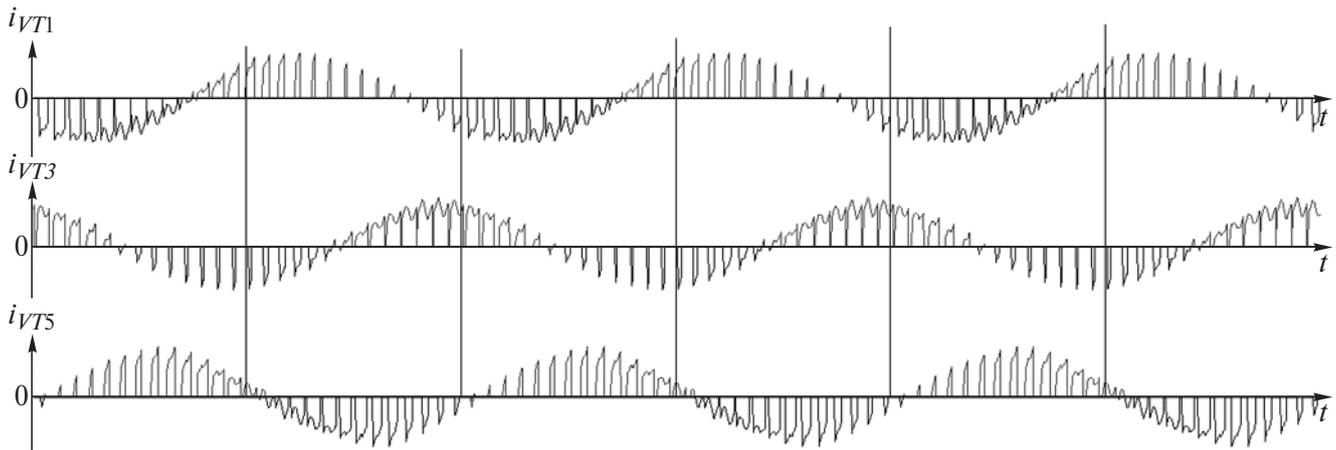


Рис. 6. Диаграммы токов верхней группы ключей преобразователя

Коэффициент  $k_{VD}$  определяется по зависимости на рис. 7, которая была получена по результатам моделирования СТАТКОМ. При получении этой зависимости датчик тока в компенсаторе был установлен таким образом, что при протекании тока к компенсатору он будет положительным. Поэтому при угле, равном нулю, в фазе компенсатора будет протекать чисто активный ток (режим выпрямления). При угле  $180^\circ$  в фазе будет протекать чисто активный ток (т.е. от компенсатора) – режим инвертирования.

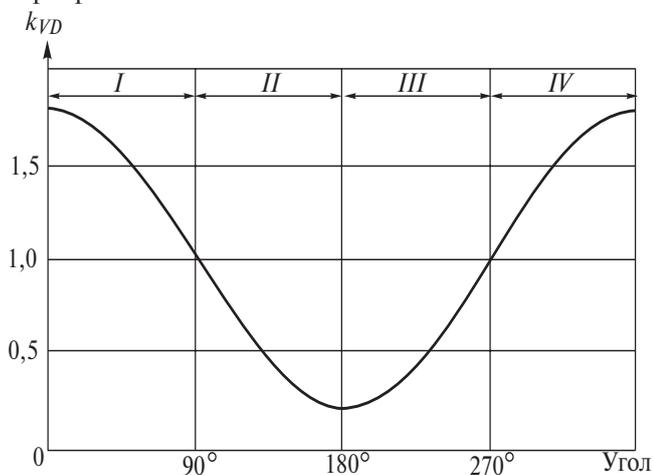


Рис. 7. Зависимость коэффициента  $k_{VD}$  от угла между фазными напряжением и током: I – режим выпрямления с индуктивным характером; II – режим инвертирования с индуктивным характером; III – режим инвертирования с емкостным характером; IV – режим выпрямления с емкостным характером

Среднее значение тока в транзисторе

$$I_{\text{ср}VT} = \frac{I_m}{2\pi} - I_{\text{ср}VD}. \quad (5)$$

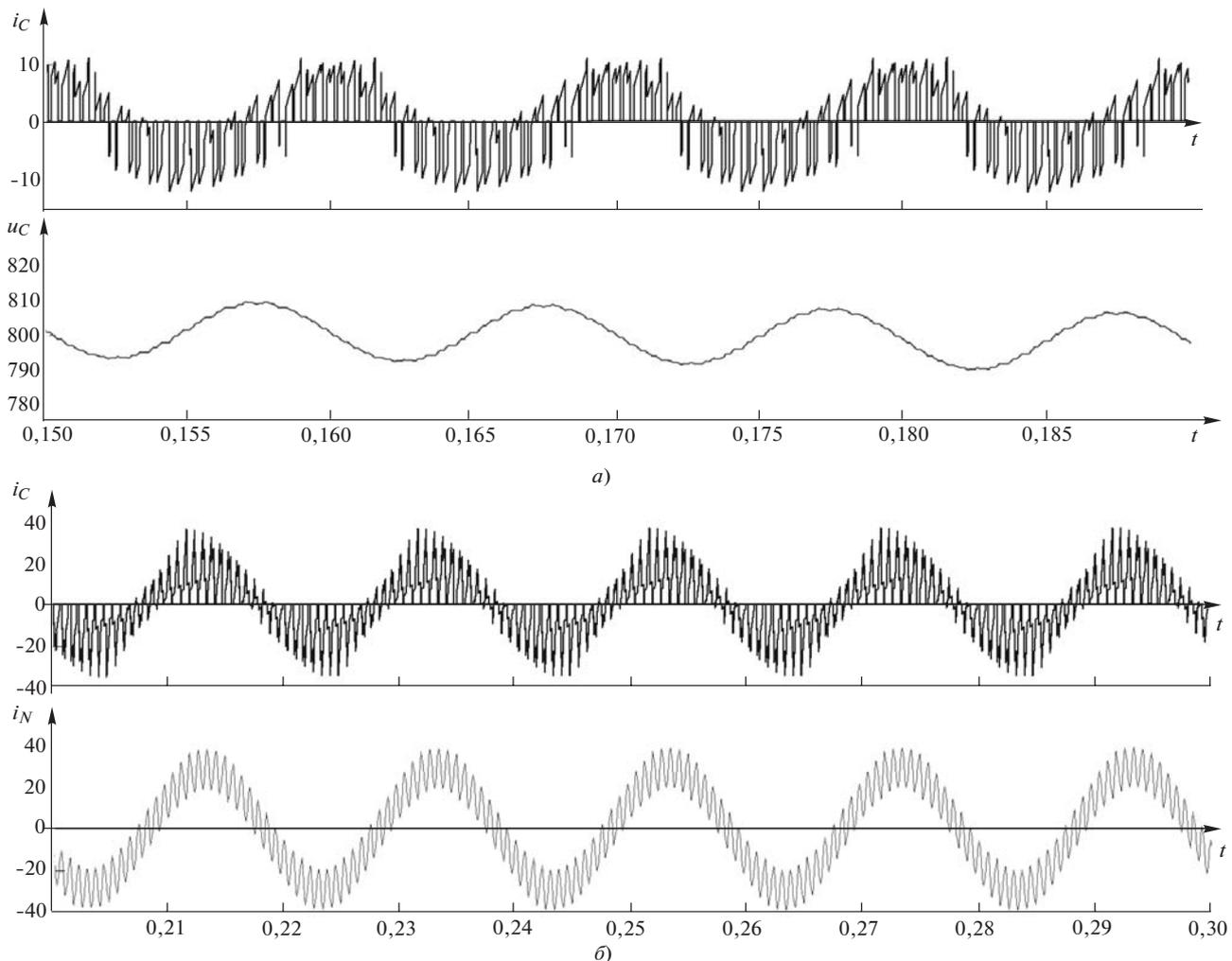
По формулам (4) и (5) можно найти средний ток в каждом из элементов преобразователя. Для этого достаточно знать амплитуду протекающего тока в фазе и сдвиг фаз между током и фазным напряжением.

**Выбор конденсатора на стороне постоянного тока СТАТКОМ при работе в режиме компенсации токов небаланса.** При компенсации тока обратной последовательности на стороне постоянного тока СТАТКОМ помимо модуляционных составляющих протекает переменный ток с частотой 100 Гц (рис. 8,а), значение которого зависит от величины компенсируемого тока обратной последовательности. В качестве накопителя электроэнергии в СТАТКОМ применяют полярный электролитический конденсатор. Значение частоты и амплитуды тока, протекающего в таком конденсаторе, влияют на его срок службы. По технической документации и значению компенсируемых токов обратной последовательности возможно рассчитать срок службы конденсатора. Кроме того, колебания тока в конденсаторе вызывают колебания напряжения  $\Delta U_{\text{кб}}$  (рис. 8,а), что влияет на условия работы системы управления и точность работы компенсатора. Исходя из допустимого значения колебания напряжения на конденсаторе рассчитывается его емкость.

Колебания на стороне постоянного тока компенсатора рассчитываются из условия соблюдения баланса мгновенных мощностей: на входе и выходе преобразователя компенсатора. В рассматриваемом случае мгновенная мощность будет содержать только переменную составляющую, и для нахождения значения колебания тока достаточно использовать действующие значения токов и напряжений. Поэтому баланс мощностей запишем следующим образом, используя часть слагаемого переменной мгновенной мощности из уравнения (2), характеризующую его амплитуду:

$$I_{\text{пер}} U_d = \frac{3}{4} U I_2, \quad (6)$$

где  $I_{\text{пер}}$  – действующее значение переменного тока, вызванного генерацией тока обратной после-



**Рис. 8.** Диаграммы тока и напряжения на стороне постоянного тока СТАТКОМ при компенсации тока обратной последовательности (а) и диаграммы тока в нейтральном проводе и тока на стороне постоянного тока СТАТКОМ при компенсации токов нулевой последовательности тока (б)

довательности компенсатором;  $U_d$  — напряжение на конденсаторе.

Из соотношения (6) определяем значение действующего значения переменной составляющей тока на стороне постоянного тока СТАТКОМ:

$$I_{\text{пер}} = \frac{3UI_2}{4U_d} \quad (7)$$

Исходя из известного тока пульсации емкость конденсатора рассчитывается как

$$C = \frac{I_{\text{пер}}}{2\omega U_{\text{пер}}} \quad (8)$$

где  $U_{\text{пер}}$  — допустимое значение колебания напряжения на конденсаторе;  $\omega$  — угловая частота.

Рассмотрим процессы на стороне постоянного тока СТАТКОМ при работе его в режиме компенсации тока нулевой последовательности. В этом случае переменный ток частотой 50 Гц протекает через конденсаторы (рис. 3).

Ток в нейтрали определяется суммой мгновенных фазных токов, частота которых равна основной частоте (50 Гц). В точке соединения нейтрального провода и конденсаторов ток разделяется поровну между верхним и нижним конденсаторами на рис. 3. Этот ток вызывает колебания напряжения на каждом из конденсаторов с частотой 50 Гц. Сложением напряжений на конденсаторах найдем напряжение на стороне постоянного тока преобразователя. Колебания напряжений на конденсаторах, вызванные током нейтрали, взаимокompенсируются и не вызывают колебаний суммарного напряжения.

На рис. 8,б представлена диаграмма тока в конденсаторах при компенсации тока нейтрального провода. При работе в комбинированном режиме емкость конденсаторов следует выбирать исходя из токов обратной последовательности.

**Выводы.** 1. В трехфазной сети с несимметричной нагрузкой обратная последовательность токов вызывает колебания мгновенной мощности частотой

той 100 Гц, а нулевая последовательность токов не оказывает никакого влияния на нее.

2. При протекании в ветвях КУ только токов обратной и нулевой последовательности отсутствует передача/потребление активной и реактивной мощности.

3. При работе СТАТКОМ в режиме симметрирования токов распределение токов между ключевыми элементами (транзистором и диодом) различное для каждого из плеч преобразователя.

4. Работа СТАТКОМ в режиме компенсации токов обратной последовательности вызывает колебания тока на стороне постоянного тока преобразователя частотой 100 Гц (помимо модуляционных составляющих токов). Колебания тока в конденсаторе вызывают колебания напряжения. По требуемому значению ограничения колебания напряжения на стороне постоянного тока рассчитывается емкость конденсаторной батареи.

5. Работа СТАТКОМ в режиме компенсации тока нулевой последовательности вызывает протекание через него переменного тока частотой 50 Гц, который в целом не вызывает колебаний напряжения на стороне постоянного тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каргашев И.И., Тульский В.Н., Шаров Ю.В. и др. Управление качеством электроэнергии. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.

2. Чаплыгин Е.Е., Ковырзина О.С. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей. – Электричество, 2009, № 11.

3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. – М.: И«здат. дом МЭИ», 2007.

4. Пешков М.В. Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009.

5. Yan Xu, Tolbert L.M., Kueck J.D. Voltage and Current Unbalance Compensation Using a Parallel Active Filter. – Power Electronics Specialists Conf. (PESC 2007), 2007.

6. Escobar G., Valdez A.A., Torres-Olguin R.E., Martinez-Montejano M.F. A Model-Based Controller for a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter with Compensation of the Neutral Line Current. – IEEE Trans. Power Electronics, 2007, Issue 6, vol. 22.

7. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч. 1. – М.: Энергия, 1966.

8. Киселев М.Г., Рябчицкий М.В., Крайнов В.О. Компенсация токов небаланса в трехфазных сетях. – Техническая электродинамика. Тем. Вып. Силовая электроника и энергоэффективность», 2009, ч. 4.

[17.01.11]

*Авторы: Киселев Михаил Геннадьевич окончил в 2008 г. Московский энергетический институт (МЭИ). Научный сотрудник кафедры «Электрические и электронные аппараты» НИУ МЭИ.*

*Розанов Юрий Константинович окончил в 1962 г. МЭИ. В 1986 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Системы электроснабжения автономных объектов». Профессор кафедры «Электрические и электронные аппараты» НИУ МЭИ.*

\* \* \*

**Редакция и редколлегия журнала «Электричество» поздравляют членов редакционной коллегии АНАТОЛИЯ АНАТОЛЬЕВИЧА КОРОТЕЕВА и АНДРЕЯ НИКОЛАЕВИЧА ЛАГАРЬКОВА с избранием действительными членами Российской академии наук.**

