

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети*

Лоскутов А. Б., Алтунин Б. Ю., доктора техн. наук, Карнавский И. А., инж.,
Кралин А. А., канд. техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Рассмотрены причины возникновения несимметрии напряжений и токов нулевой последовательности в четырехпроводных сетях электроснабжения и ее негативное влияние на электрооборудование. Несимметричное распределение нагрузки по фазам — одна из часто встречающихся проблем в существующих системах электроснабжения предприятий. Устранить вызванные им отрицательные последствия можно с помощью устройства симметрирования токов сети и компенсации токов нулевой последовательности, включающего в себя активный фильтр. Исследование активного фильтра и разработанный алгоритм системы управления трехфазным мостовым инвертором с нулевым отводом выполнены в синхронной $dq0$ системе координат. Результаты моделирования предложенного устройства свидетельствуют об эффективном устранении несимметрии токов.

Ключевые слова: активный фильтр, несимметрия напряжений, несимметрия токов, токи нулевой последовательности, качество электроэнергии.

Несимметричная нагрузка в трехфазной четырехпроводной сети обуславливает не только несимметрию токов и напряжений, но и протекание в нейтрали тока нулевой последовательности, называемого током небаланса. Он оказывает крайне негативное влияние на питающие трансформаторы, вызывая их нагрев, несимметрию напряжений в фазах, превышение токов в нулевом проводе и др. Ток в нейтрали иногда может достигать больших значений, что ведет к перегреву и уменьшению срока службы трансформаторов. Поэтому ГОСТ 11677–85 ограничивает допустимый ток в нулевом проводе до значения не более 25 % номинального фазного тока — для трансформаторов со схемой соединения обмоток $Y/Y-0$ и не более 75 % — для трансформаторов со схемой $\Delta/Y-0$, при этом ни в одной из фаз ток не должен превышать номинальное значение [1]. Защита нулевой последовательности, как правило, должна быть отстроена от указанного допустимого тока небаланса.

ГОСТ Р 54149–2010 регламентирует все параметры электроэнергии для обеспечения функционирования любого электрооборудова-

ния, в числе которых одним из важных является несимметрия напряжения. Установленные в нем значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям составляют соответственно: нормально допустимое — 2 % и предельно допустимое — 4 % [2].

Несимметрия напряжений, возникающая только в трехфазной сети и влияющая на работу оборудования и системы электроснабжения в целом, обусловлена неравномерным распределением нагрузок по фазам, однофазными КЗ, несимметрией питающей сети [3, 4]. При несбалансированной нагрузке по фазам и КЗ в четырехпроводных сетях со схемой подключения $Y/Y-0$ несимметрия напряжений обусловлена смещением нулевой точки, вследствие чего фазные напряжения могут значительно отличаться от номинальных. Увеличение напряжения и повышение тока в нейтральном проводе могут привести к выходу из строя бытовой техники, значительному сокращению срока службы трансформаторов и электрических машин, увеличению потерь электроэнергии, “отгоранию нуля”, неправильной работе защитных и преобразовательных устройств [3–5]. Например, понижение на 7 % напряжения электродуговых печей, чувствительных к его отклонениям, приводит к удлинению (в 1,5 раза)

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракт № 16.526.12.6076 от 11.10.2011).

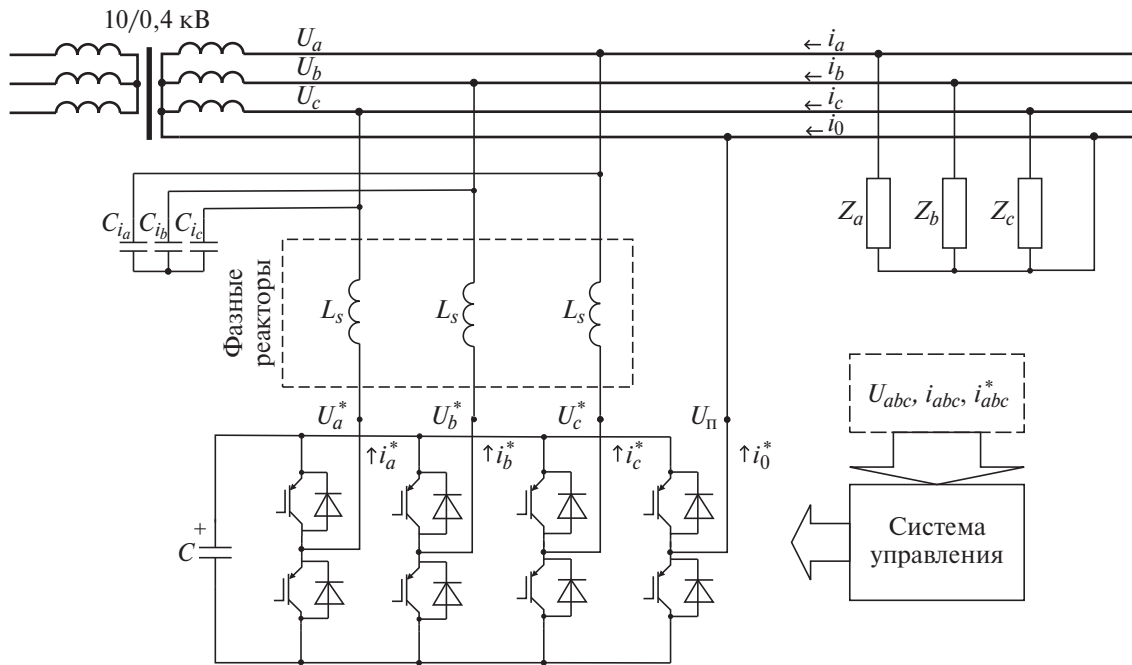


Рис. 1. Схема симметрирования сетевых токов в четырехпроводной сети

процесса плавки стали, а повышение напряжения более 5% — к перерасходу электроэнергии.

Различают два вида несимметрии: систематическую и вероятностную (случайную). Систематическая несимметрия обусловлена неравномерной постоянной перегрузкой одной из фаз, а вероятностная свойственна непостоянным нагрузкам, при которых в разное время перегружаются разные фазы в зависимости от случайных факторов (переменяющаяся несимметрия).

Равномерное распределение нагрузки по фазам не всегда возможно или бывает затруднительно. Например, в условиях производства, где несимметрию можно отнести к систематической, оборудование работает независимо друг от друга и создает переменную неравномерную загрузку сети в течение дня. Распределить же равномерно по фазам бытовых потребителей практически невозможно, так как время их включения и потребляемая мощность имеют хаотический характер и считаются вероятностными.

Систематическую несимметрию можно устранить путем рационального перераспределения нагрузки по фазам, но это не всегда позволяет снизить коэффициент несимметрии напряжений до допустимого значения. В таких случаях необходимо применять специальные симметрирующие устройства. Известно много разных устройств. Поскольку в них имеются батареи конденсаторов, целесообразно применять те, в которых одновременно с

симметрированием генерируется реактивная мощность с целью ее компенсации. Подобные устройства находятся в стадии разработки.

Снижать несимметрию в четырехпроводных городских сетях 0,4 кВ можно путем уменьшения сопротивления нулевой последовательности Z_0 в элементах сети и снижения тока нулевой последовательности I_0 , которое в первую очередь достигается перераспределением нагрузок. Однако использование симметрирующих устройств является более гибким и универсальным способом устранения негативного влияния несимметрии напряжений.

В НГТУ им. Р. Е. Алексеева на математических и имитационных моделях анализируются и исследуются режимы работы устройства симметрирования, выполненного на основе трехфазного мостового инвертора с нейтралью (рис. 1). Инвертор подключен через фазные реакторы L_s к сети в точке, где наблюдается неравномерная ее загрузка по фазам. Емкостный накопитель C в цепи постоянного тока служит для формирования выходного напряжения и обмена мощностью между фазами для симметрирования токов.

Аналитические выражения, описывающие систему управления, обеспечивающую симметрирование токов в сети и перераспределение потоков мощности по фазам, в синхронной системе координат имеют следующий вид:

$$U_d^*(t) = U_d(t) + R_{L_s} i_d^*(t) - \omega L_s i_q^*(t) + L_s \frac{d}{dt} i_d^*(t); \quad (1)$$

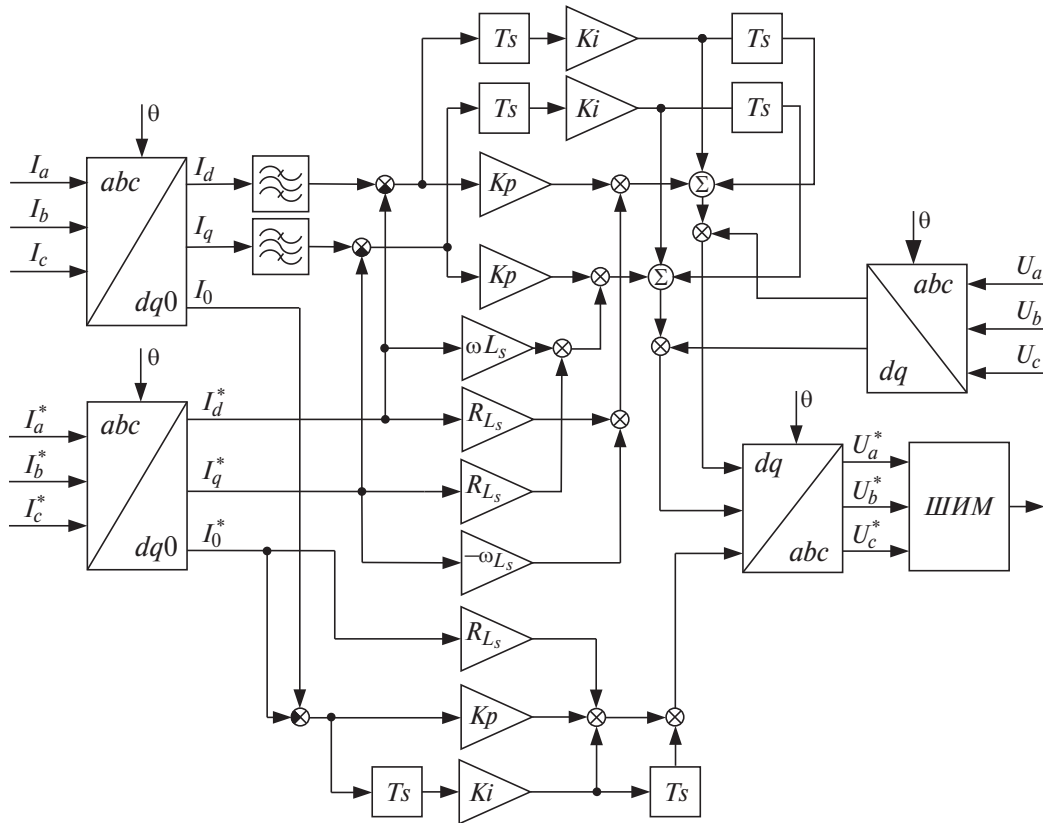


Рис. 2. Структурная блок-схема системы управления

$$U_q^*(t) = U_q(t) + R_{L_s} i_q^*(t) + \omega L_s i_d^*(t) + L_s \frac{d}{dt} i_q^*(t); \quad (2)$$

$$U_0^*(t) = R_{L_s} i_0^*(t) + L_s \frac{d}{dt} i_0^*(t), \quad (3)$$

где R_{L_s} — активное сопротивление фазного реактора; L_s — индуктивность фазного реактора; ω — частота сети; U_d^* , U_q^* , U_0^* — выходное напряжение инвертора в $dq0$ координатах; U_d , U_q , U_0 — напряжение сети в $dq0$ координатах.

Математическое описание системы выражениями (1) – (3) преобразуем к дискретному виду (учитывая, что время дискретизации равно T_s)**;

$$\begin{bmatrix} U_d^{*(k+1)} \\ U_q^{*(k+1)} \\ U_0^{*(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d^{(k)} \\ U_q^{(k)} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{L_s} \begin{bmatrix} i_d^{*(k)} \\ i_q^{*(k)} \\ i_0^{*(k)} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_s & 0 \\ \omega L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{*(k)} \\ i_q^{*(k)} \\ i_0^{*(k)} \end{bmatrix} + K_p \begin{bmatrix} i_d^{*(k)} - i_d^{(k)} \\ i_q^{*(k)} - i_q^{(k)} \\ i_0^{*(k)} - i_0^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{I_d}^{(k)} \\ \Delta U_{I_q}^{(k)} \\ \Delta U_{I_0}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{I_d}^{(k)} \\ \Delta U_{I_q}^{(k)} \\ \Delta U_{I_0}^{(k)} \end{bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} i_d^{*(k-1)} - i_d^{(k-1)} \\ i_q^{*(k-1)} - i_q^{(k-1)} \\ i_0^{*(k-1)} - i_0^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta U_{I_d}^{(k-1)} \\ \Delta U_{I_q}^{(k-1)} \\ \Delta U_{I_0}^{(k-1)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где K_p — пропорциональный коэффициент; K_i — интегральный коэффициент; k — шаг дискретизации.

Полученные уравнения учитывают дискретность системы и единичную задержку распространения управляющего сигнала. Пропорционально-интегральные регулировочные дискретные звенья обеспечивают устойчивость системы. На основе этих уравнений разработана система управления трехфазным мостовым инвертором с нулевым отводом в синхронной системе координат. Несимметрия в данной

** Из-за математических расчетов и смещения по фазе выходного сигнала опорное расчетное напряжение на k -м шаге будет иметь задержку T_s , поэтому ее следует компенсировать в регуляторе и системе управления [6].

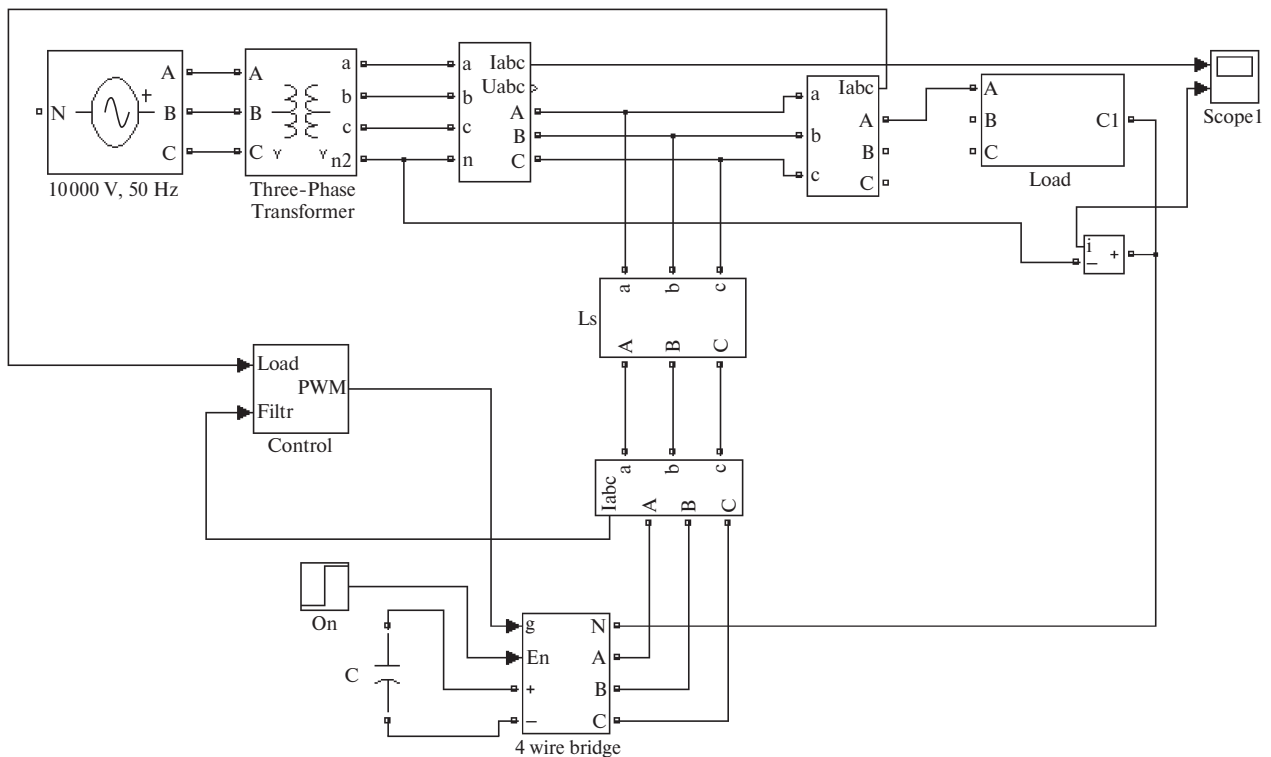


Рис. 3. Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети

системе координат соответствует удвоенной частоте сети, поэтому необходимо ввести полосовые фильтры частотой 100 Гц (при частоте питающей сети 50 Гц) для выделения полезных задающих сигналов несимметрии. Активный фильтр должен компенсировать ток в нулевом проводе минимум до 25 % номинального значения тока фазы (в данном исследовании осуществлена максимально возможная компенсация). Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

Сигналы токов и напряжений, измеренные с помощью датчиков в точке подключения к сети и симметрирующего устройства, квантуются по времени с шагом дискретизации T_s и передаются на блоки преобразования из статической (abc) в синхронную (dq) систему координат. Математические вычисления выполнены в соответствии с уравнениями Парка. Поскольку рассматриваемая сеть трехпроводная, то нулевая последовательность отсутствует и не учитывается в расчете.

Полосовой фильтр (он должен быть цифровым и учитывать фазовые и амплитудные искажения), настроенный на 100 Гц, выделяет полезную гармонику по двум составляющим: d и q . В расчетах сигналы с его выхода принимаются в качестве опорных. Блоки T_s обеспечивают задержку сигнала на один период квантования, тем самым выполняя функцию запоминания значения на один

такт. Управление силовыми ключевыми элементами требует управляющих импульсов, поэтому блок ШИМ преобразует рассчитанные трехфазные сигналы в импульсы.

С использованием полученной системы управления была исследована работа активного фильтра в пакете Matlab/Simulink (рис. 3). Одним из тяжелых для трансформатора является неполнофазный режим, который также заметно влияет на несимметрию напряжений. В режиме работы при номинальной активной нагрузке в фазе A и ее отсутствии в фазах B и C фильтр перераспределяет токи между фазами нагрузки для получения симметричных токов в фазах сети.

На рис. 4 представлены временные диаграммы сетевых токов однофазной нагрузки без активного фильтра и с его использованием в устройстве, приведенном на рис. 1. В период времени $0 - 0,06$ с активный фильтр отключен, и ток в фазе A равен току в нулевом проводе. Данный режим является крайне неблагоприятным. Включившийся в момент времени $0,06$ с активный фильтр перераспределяет потоки мощности, тем самым исключая протекание тока в нулевом проводе и симметрируя токи сети. Как видно из диаграмм, перераспределение токов по фазам приводит к выравниванию амплитуд фазных токов и снижению до незначительного (3 – 4 %) тока в нулевом проводе.

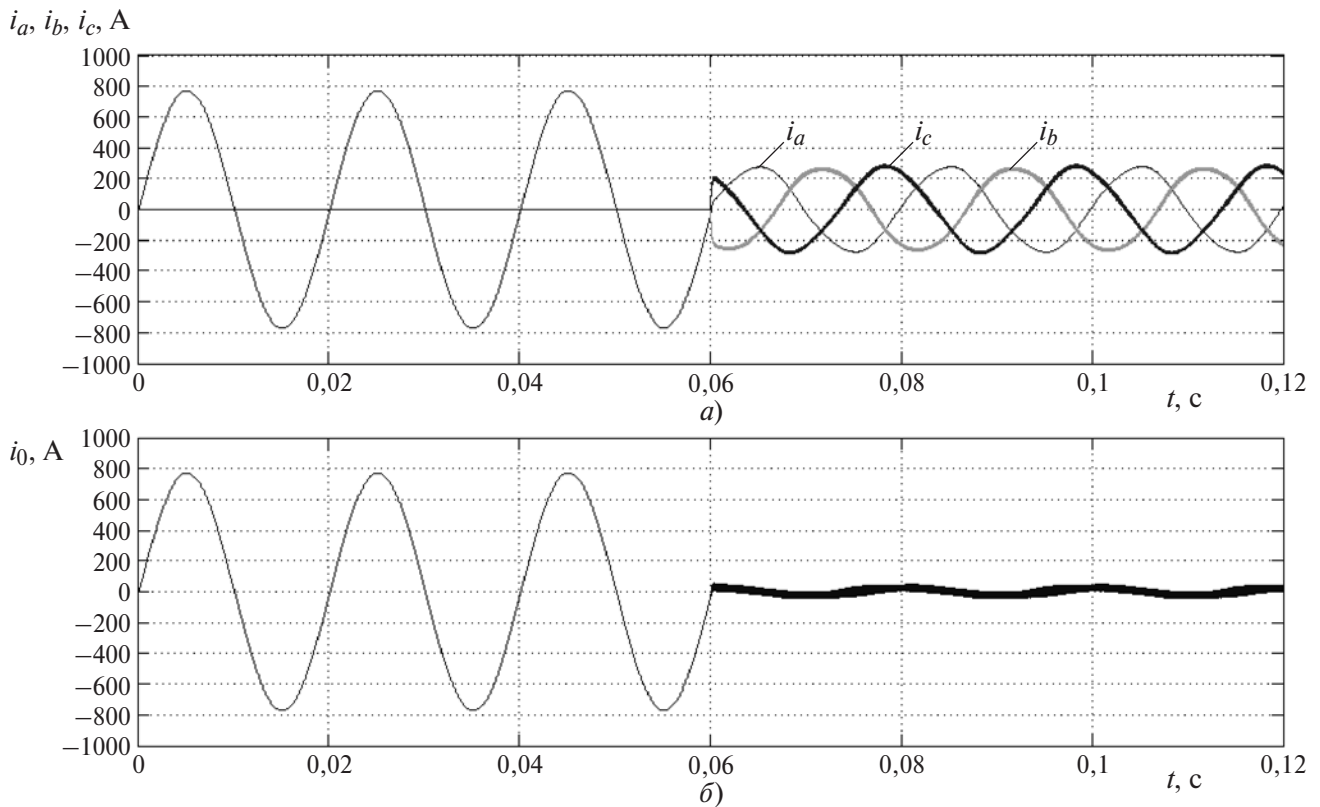


Рис. 4. Временные диаграммы сетевых токов несимметричной однофазной нагрузки (а) и тока в нулевом проводе (б)

Таким образом, благодаря подключению предложенного трехфазного активного фильтра к четырехпроводной сети с разработанной системой управления выравниваются по амплитуде фазные токи и компенсируется ток в нулевом проводе. Это способствует устранению несимметрии напряжений питающей сети, вызванной несимметричным потреблением фазных токов.

Список литературы

1. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
2. ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. — М.: НЦ “ЭНАС”, 2009.
4. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. — Киев: Наукова думка, 2005.
5. Шабад М. А. Защита трансформаторов 10 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Fang Lin Luo, Hong Ye, Muhammad Rashid. Digital Power Electronics and Applications. — Elsevier (USA), 2005.

loskutov@nntu.nnov.ru