

EDN: IWUUZD

УДК 621.3.072

Compensation of Unsymmetrical Load in Four-Wire Networks Using an Active Rectifier with an Energy Source

Mikhail E. Blinnikov* and Vasily I. Panteleev
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 15.07.2024, received in revised form 22.07.2024, accepted 02.08.2024

Abstract. The load of residential and public buildings is a significant part of electricity consumption in the overall annual structure of electricity consumption of Russia. Due to the different power and irregular mode of their operation, the daily electricity consumption graph becomes to be significantly irregular, and the phase distribution is asymmetrical. Existing problem solving methods usually solve only one problem, and they must be used together. As a device for balancing consumption from the supply system, this work considers an active voltage rectifier with an energy source in the DC link. The aim of this work is to develop a simulation model of a three-phase active voltage rectifier to compensate for unbalanced consumption by an unbalanced load in a four-wire network in the SimInTech simulation environment. A mathematical description of the active rectifier control system and a method for obtaining a control law are given. An example with an unbalanced three-phase load is considered. Simulation modeling was carried out. As a result of operation of the active rectifier it compensates for the phase unbalance of the active and reactive power of the load and perform power factor correction to achieve the standard power factor.

Keywords: active voltage rectifier, consumption balancing, unbalanced load, load compensation, pulse-width modulation, simulation modelling, SimInTech model.

Citation: Blinnikov M. E., Panteleev V. I. Compensation of unsymmetrical load in four-wire networks using an active rectifier with an energy source. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(5), 655–666. EDN: IWUUZD



Компенсация несимметричной нагрузки в четырёхпроводных сетях с помощью активного выпрямителя с источником энергии

М. Е. Блинников, В. И. Пантелеев
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Нагрузка жилых и общественных зданий составляет значительную долю потребления электроэнергии в общегодовой структуре электропотребления России. Ввиду различной мощности и нерегулярного режима их эксплуатации суточный график потребления оказывается существенно неравномерным, а распределение мощности потребления по фазам – несимметричным. Существует необходимость комплексного рассмотрения и решения возникающих проблем. В качестве устройства симметрирования потребления из сети в данной работе рассмотрен активный выпрямитель напряжения с источником энергии в звене постоянного тока. Целью данной работы является разработка имитационной модели трёхфазного активного выпрямителя напряжения (АВН) для компенсации несимметрии потребления несимметричной нагрузкой в четырёхпроводной сети в среде моделирования SimInTech. Приведено математическое описание системы управления активным выпрямителем и способ получения закона управления. Рассмотрен пример с несимметричной трёхфазной нагрузкой, выполнено имитационное моделирование. В результате работы активный выпрямитель компенсирует несимметрию активной и реактивной мощности приёмника по фазам и компенсирует реактивную мощность для достижения нормативного коэффициента мощности.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, симметрирование потребления, несимметричная нагрузка, компенсация нагрузки, широтно-импульсная модуляция, имитационное моделирование, SimInTech-модель.

Цитирование: Блинников М.Е. Компенсация несимметричной нагрузки в четырёхпроводных сетях с помощью активного выпрямителя с источником энергии / М.Е. Блинников, В.И. Пантелеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(5). С. 655–666. EDN: IWUUZD

Введение

Нагрузка жилых и общественных зданий составляет значительную долю потребления электроэнергии в общегодовой структуре электропотребления России. Доля годового потребления бытового сектора в среднем составляет 13–15 %. Вместе со сферой внешнеэкономической деятельности и сферой услуг годовое потребление бытового сектора составило 26 % от общего годового потребления электроэнергии в 2017 году [1]. Большую часть нагрузки жилых и общественных зданий составляют низковольтные однофазные электроприёмники бытового и офисного назначения. Ввиду различной мощности и нерегулярного режима их эксплуатации суточный график потребления оказывается существенно неравномерным, а распределение мощности потребления по фазам – несимметричным даже при предусмотренных проектных решениях о равномерном распределении приёмников по фазам. Несимметрия остаётся одной из основных проблем снижения качества электроэнергии в системах электроснаб-

жения [2]. Несимметричная нагрузка приводит к повышению потерь мощности в электрических сетях и электрооборудовании, ухудшению качества напряжения и недоиспользованию мощности трансформаторов ТП-6/10 кВ. В часы пиковой мощности наименее загруженные фазы трансформатора оказываются недогруженными, а наиболее загруженная фаза может оказаться перегруженной. Симметричное потребление на стороне низшего напряжения трансформатора повышает эффективность работы и снижает потери мощности как в трансформаторе, так и в выше стоящей сети.

Существующие способы решения проблем, такие как равномерное распределение приёмником по фазам, использование симметрирующих устройств, средств компенсации реактивной мощности [3] БСК, СТК, СТАТКОМ, ценозависимое регулирование [4, 5] и активные потребители [6], активные энергетические комплексы [7] и другие, как правило, решают только одну проблему, и их необходимо использовать комплексно.

В качестве устройства симметрирования потребления из сети с несимметричной трёхфазной нагрузкой рассматривается активный выпрямитель напряжения [8] с источником энергии в звене постоянного тока. Источником энергии может выступать нетрадиционная генерация [6, 9], например солнечная или ветряная, накопитель энергии, либо сеть переменного тока, напряжение которой выпрямлено. В [10] предложена концепция обратимого преобразователя энергии с маховичным накопителем энергии, электропреобразовательное устройство которого является двухзвенным преобразователем частоты на базе обратимых преобразователей напряжения.

Целью данной работы является разработка имитационной модели трёхфазного активного выпрямителя напряжения (АВН) для компенсации несимметрии потребления несимметричной нагрузкой в четырёхпроводной сети в среде моделирования SimInTech.

Математическое описание блоков имитационной модели

Имитационная модель в среде SimInTech представлена на рис. 1. Активный выпрямитель подключён по четырёхпроводной схеме и содержит инвертор нуля. Трёхфазный электроприёмник соединён в звезду с нейтральным проводом. При несимметрии нагрузки токи приёмника содержат прямую, обратную и нулевую последовательности. Питание сети выполнено от шин бесконечной мощности, питающие напряжения на шинах сохраняются симметричными.

Система управления активным выпрямителем выполнена в координатах $dq0$, вращающихся синхронно с изображающим вектором тока.

Блок «АВС/dq0» – это координатный преобразователь, который реализует преобразования координат входных токов или напряжений в координатах АВС в координаты $dq0$. Математическое описание блока:

$$d = \frac{2}{3} \left(a \cos \theta + b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right), \quad (1)$$

$$q = -\frac{2}{3} \left(a \sin \theta + b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (2)$$

$$o = \frac{a + b + c}{3}, \quad (3)$$

где a, b, c – обобщённое значение входных сигналов в координатах ABC; d, q, o – обобщённое значение выходных сигналов в координатах dq0; θ – угол поворота изображающего вектора относительно координатной оси A, рад.

Регулирование по току осуществляется путём вычитания из сигналов обратных связей токов I_q, I_d и I_0 активного выпрямителя сигналов задания уставок. Сигналы задания уставок содержат две составляющие. Первая составляющая представляет собой сигналы токов для полной компенсации токов нагрузки электропотребителя в координатах dq0. Вторая составляющая – сигналы уставок токов в координатах dq0 симметричного электропотребителя, трёхфазная активная и реактивная мощность которого эквивалентна аналогичным величинам подключённого к сети несимметричного электроприёмника. Уставка реактивной мощности также может быть задана с учётом наибольшего коэффициента реактивной мощности для часов наибольших нагрузок. Таким образом, дополнительно решается задача компенсации реактивной мощности.

Блок «Res», вычисляющий сигналы ошибок задания регулирующих сигналов, подаваемых на ПИ-регулятор, описывается следующими выражениями:

$$\Delta q = i_q + i_{qy} + i_{qk}, \quad (4)$$

$$\Delta d = i_d + i_{dy} + i_{dk}, \quad (5)$$

$$\Delta o = -i_0 - i_{0y} - i_{0k}, \quad (6)$$

где $\Delta q, \Delta d, \Delta o$ – ошибки задания уставок регулирующих сигналов в координатах dq0; i_q, i_d, i_0 – сигналы токов в координатах dq0 от компенсатора; i_{qy}, i_{dy}, i_{0y} – сигналы уставок токов в координатах dq0 эквивалентного трёхфазного симметричного электроприёмника; i_{qk}, i_{dk}, i_{0k} – сигналы уставок токов полной компенсации токов нагрузки в координатах dq0.

Ток уставки нулевой последовательности i_{0y} принимается равным нулю.

Блок «PQS» реализует вычисление параметров трёхфазной симметричной нагрузки, трёхфазная активная и реактивная мощности которой соответствуют трёхфазной активной

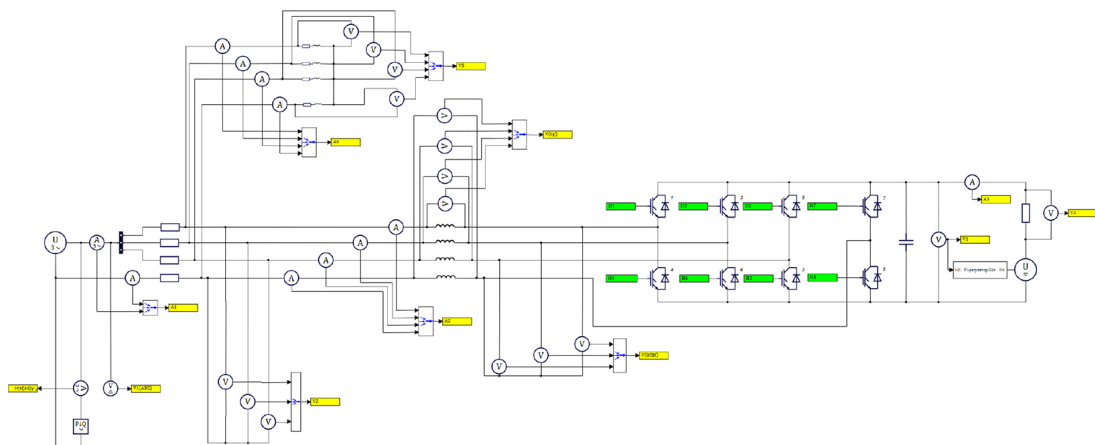


Рис. 1. Силовая часть имитационной модели в среде SimInTech

Fig. 1. Power part of the simulation model in the SimInTech environment

и реактивной мощностям действительной нагрузки. Блок вычисляет трёхфазные активную, реактивную и полную мощности нагрузки, коэффициент мощности трёхфазной нагрузки, составляющие изображающего вектора тока нагрузки в координатах dq.

Работа блока «PQS» описывается следующими уравнениями:

$$p = i_a u_a + i_b u_b + i_c u_c, \quad (7)$$

$$q = \frac{i_a(u_b - u_c) + i_b(u_c - u_a) + i_c(u_a - u_b)}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

$$i_q = \frac{p}{U_{\text{л}}} \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (9)$$

$$i_d = \frac{q}{U_{\text{л}}} \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (10)$$

$$s = \sqrt{p^2 + q^2}, \quad (11)$$

$$\cos \varphi = \lambda = \frac{p}{s}, \quad (12)$$

где p – мгновенная активная трёхфазная мощность, Вт; q – мгновенная реактивная трёхфазная мощность, вар; s – мгновенная трёхфазная полная мощность, ВА; i_a, i_b, i_c – мгновенные значения фазных токов действительной трёхфазной нагрузки, А; u_a, u_b, u_c – мгновенные значения фазных напряжений действительной трёхфазной нагрузки, В; i_q – ток по оси q в координатах dq эквивалентной симметричной трёхфазной нагрузки, А; i_d – ток по оси d в координатах dq эквивалентной симметричной трёхфазной нагрузки, А; $U_{\text{л}}$ – действующее значение номинального линейного напряжения сети, В; λ – коэффициент мощности нагрузки с учётом высших гармоник, о.е.; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности эквивалентной симметричной нагрузки по основной гармонике, с учётом допущений принимается равным λ , о.е.

После вычисления составляющих мощности p и q их сигналы подаются последовательные цепочки из трёх инерционных звеньев первого порядка. Данное преобразование выполнено, чтобы исключить переменную составляющую сигналов при несимметричной нагрузке. Средние значения сигналов, вычисленных по выражениям (7) и (8) при несимметрии приёмника, являются действующими значениями активной и реактивной мощности нагрузки. Постоянная времени первого и второго звена равна 50 мс, постоянная времени третьего звена равна 10 мс. После фильтрации постоянных составляющих выполняется вычисление остальных параметров по выражениям (9)–(12).

Трёхфазный электроприёмник соединён по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Нагрузка фазы задаётся в виде последовательной RL-ветви, параметры которой описываются выражениями

$$R_{\Phi} = \frac{U_{\Phi} P_{\Phi}}{\sqrt{P_{\Phi}^2 + Q_{\Phi}^2}}, \quad (13)$$

$$L_{\Phi} = \frac{U_{\Phi} Q_{\Phi}}{\omega \sqrt{P_{\Phi}^2 + Q_{\Phi}^2}}, \quad (14)$$

где U_ϕ – действующее значение номинального фазного напряжения сети, В; P_ϕ – активная мощность нагрузки рассматриваемой фазы, Вт; Q_ϕ – реактивная мощность нагрузки рассматриваемой фазы, вар; R_ϕ – активное сопротивление нагрузки рассматриваемой фазы, Ом; L_ϕ – индуктивность нагрузки рассматриваемой фазы, Гн; ω – круговая частота, соответствующая промышленной частоте сети, рад/с.

Из блока «Res» сигналы ошибок задания уставок после ПИ-регуляторов передаются в блок «ШИМ». Блок «ШИМ» реализует преобразование регулирующих сигналов в координатах dq0 после ПИ-регуляторов в координаты ABC, учёт коэффициента модуляции и формирование управляющих сигналов для IGBT-транзисторов активного выпрямителя.

Преобразование координат осуществляется путём обратного преобразования Кларк-Парка

$$a = d \cos \theta - q \sin \theta + o, \quad (15)$$

$$b = d \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + o, \quad (16)$$

$$c = d \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) - q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + o, \quad (17)$$

где a, b, c – обобщённое значение выходных сигналов в координатах ABC; d, q, o – обобщённое значение входных сигналов в координатах dq0, полученных по выражениям (4)–(6); θ – угол поворота изображающего вектора относительно координатной оси А, рад.

Выходные сигналы в координатах ABC, а также сигнал регулирования нулевой последовательности по выражению (6) умножаются на коэффициент модуляции k_u , после чего сравниваются с опорным пилообразным сигналом для задания сигналов управления IGBT-транзисторами при широтно-импульсном регулировании. В результате формируются импульсные сигналы, подаваемые на электроды управления полностью управляемых ключей активного выпрямителя. Математическое описание сигналов управления приведено в табл. 1: a, b, c – обобщённое значение выходных сигналов управления в координатах ABC с учётом коэффициента модуляции k_u , o – обобщённое значение сигнала управления нулевой последовательности с учётом коэффициента модуляции, p – значение пилообразного опорного сигнала, i_n – управляющий сигнал n -го ключа в соответствии со схемой (рис. 1) обратимого преобразователя напряжения. Значение «1» соответствует открытому ключу, значение «0» соответствует закрытому ключу (табл. 1).

Блок-схема системы управления приведена на рис. 2.

Таблица 1. Значения управляющих сигналов: номер импульсного сигнала соответствует номеру ключа активного выпрямителя

Table 1. Control signal values: the number of the pulse signal corresponds to the number of the active rectifier switch

Значение	$a \geq p$	$a \leq p$	$b \geq p$	$b \leq p$	$c \geq p$	$c \leq p$	$o > p$	$o < p$
1	i_1	i_4	i_3	i_6	i_5	i_2	i_7	i_8
0	i_4	i_1	i_6	i_3	i_2	i_5	i_8	i_7

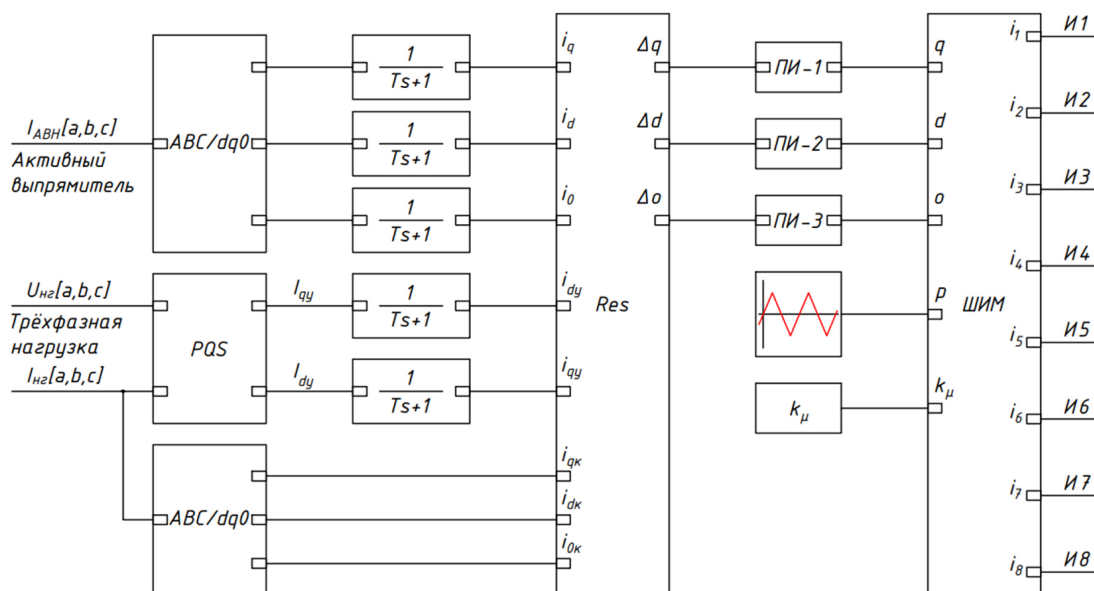


Рис. 2. Блок-схема системы управления активным выпрямителем

Fig. 2. Block diagram of the active rectifier control system

В качестве источника энергии в звене постоянного тока использован абстрактный источник напряжения, ЭДС которого регулируется для поддержания уровня напряжения в звене постоянного тока. Регулирование осуществляется с помощью ПИ-регулятора. Ошибка, подаваемая на регулятор, получается путём сравнения значения уставки поддерживаемого напряжения и измеренного напряжения в ЗПТ. После получения от ПИ-регулятора сигнала управления он проходит через инерционное звено первого порядка и сглаженный подаётся на источник ЭДС. На рис. 3 приведена блок-схема блока управления напряжением в звене постоянного тока. Математическое описание блока:

$$\Delta U_{dc} = U_y - U_{dc}, \quad (18)$$

$$U_{\text{пер}} = U_{dc0} + k_p \Delta U_{dc} + k_i \int \Delta U_{dc} dt, \quad (19)$$

$$T_a \frac{dE_{dc}}{dt} + E_{dc} = U_{\text{пер}}, \quad (20)$$

где U_y – значение уставки напряжения в ЗПТ, поддерживаемого регулятором, В; U_{dc} – измеренное напряжение в ЗПТ, В; ΔU_{dc} – ошибка регулирования напряжения, В; U_{dc0} – базовое напряжение ЭДС постоянного тока, относительно которой осуществляется регулирование, В; k_p – коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ-регулятора, о.е.; k_i – коэффициент усиления интегрирующей составляющей ПИ-регулятора, о.е.; $U_{\text{пер}}$ – сигнал задания ЭДС на выходе ПИ-регулятора, В; T_a – постоянная времени инерционного звена, с; E_{dc} – ЭДС источника постоянного напряжения, В.

Блок-схема регулятора напряжения приведена на рис. 3.

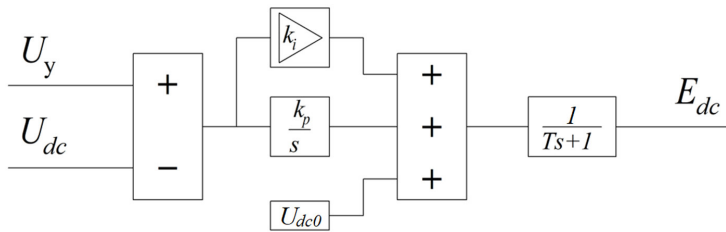


Рис. 3. Блок-схема регулятора напряжения в звене постоянного тока

Fig. 3. Block diagram of a voltage regulator in the DC link

Результаты численного эксперимента

В рассматриваемом примере для моделирования несимметричный трёхфазный электроприёмник имеет нагрузку по фазам: $8+j2$ кВА фаза A ; $6+j8$ кВА фаза B ; $4+j3$ кВА фаза C . Величины нагрузки приняты для наглядного представления несимметрии потребителя и работы активного выпрямителя в качестве устройства симметрирования потребления. Нагрузка фазы представлена в виде звена с параллельным соединением активного сопротивления и индуктивности. Сопротивление нейтрального провода 1 Ом.

На рис. 4 приведены фазные токи, потребляемые из сети. При отсутствии регулирования потребления с помощью активного выпрямителя ярко выражена несимметрия фазных токов и наличие тока в нулевом проводе. На данном отрезке моделирования ток из сети обусловлен потреблением нагрузки. На втором отрезке моделирования выполнена компенсация токов нагрузки. Потребление из сети практически равно нулю. На третьем отрезке моделирования наблюдается симметричная система токов, ток в нулевом проводе отсутствует. Потребляемая

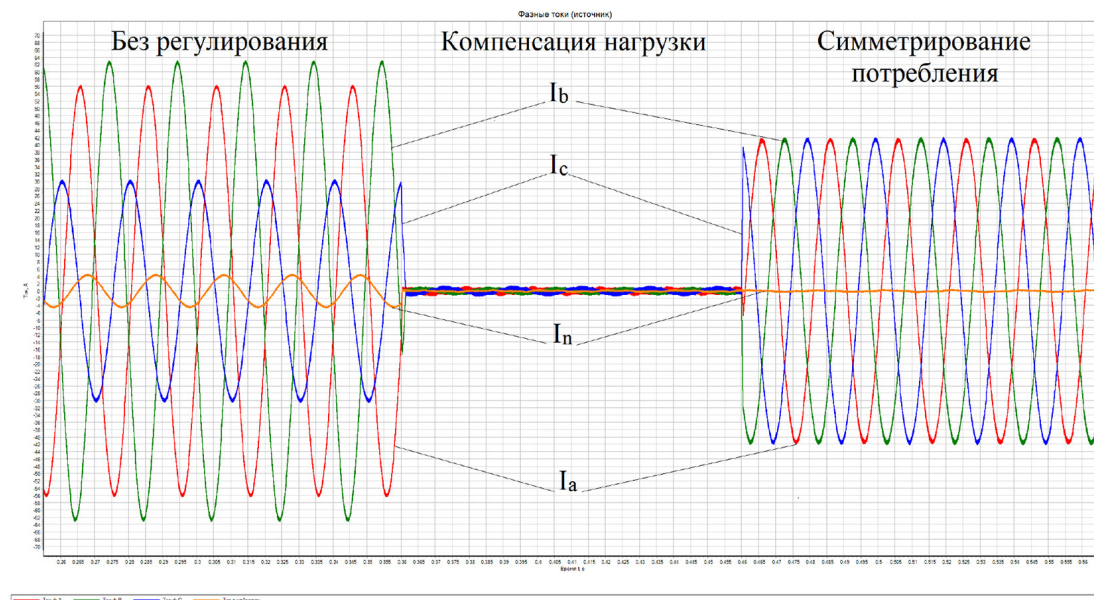


Рис. 4. Фазные токи, потребляемые из сети

Fig. 4. Phase currents from external power supply system

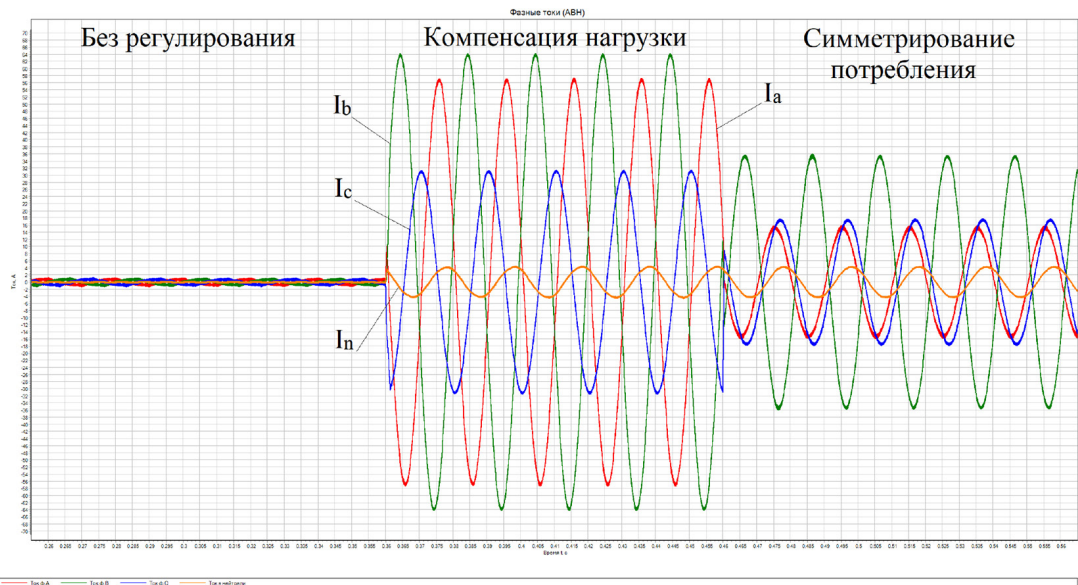


Рис. 5. Фазные токи активного выпрямителя

Fig. 5. Active rectifier phase currents

на данном отрезке из сети трёхфазная активная мощность симметричной нагрузки эквивалентна трёхфазной активной мощности действительной несимметричной нагрузки. Реактивная мощность задана через коэффициент мощности 0,95.

На рис. 5 приведены фазные токи активного выпрямителя. В данном случае на первом участке фазные токи и ток в нейтральном проводе практически равны нулю. На втором участке токи активного выпрямителя находятся в противофазе с токами нагрузки для полной компенсации потребления из сети. На третьем участке токи соответствуют заданию на симметрирование потребления из сети и компенсацию реактивной мощности для повышения коэффициента мощности рассматриваемого узла нагрузки.

На рис. 6 приведены токи в фазе А при отсутствии регулирования от активного выпрямителя (первый участок моделирования), при полной компенсации нагрузки (второй участок) и при симметрировании потребления из сети с компенсацией реактивной мощности (третий участок).

Более полную картину можно увидеть из осциллограмм токов сети (рис. 7) и активного выпрямителя (рис. 8) в системе координат $dq0$.

Можно сделать вывод, что при работе активного выпрямителя с источником энергии по заданному алгоритму несимметричное потребление из сети, вызванное несимметричной нагрузкой потребителя, равномерно распределяется по фазам. Дополнительно выполнена компенсация реактивной мощности до нормативного коэффициента мощности, что уменьшило значения фазных токов. В реальной сети это положительно скажется на уменьшении потерь мощности в питающей сети.

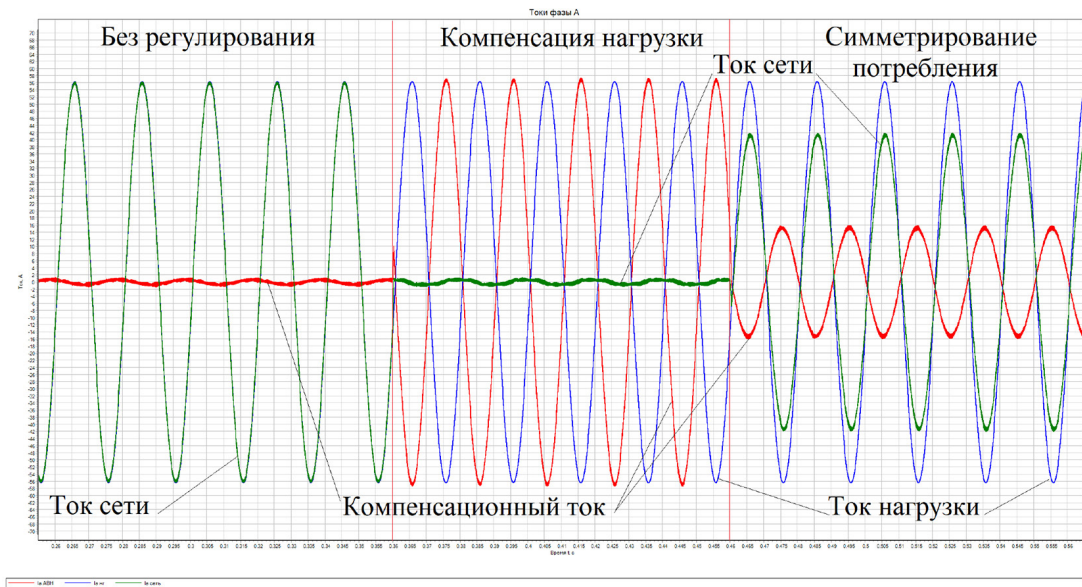


Рис. 6. Токи фазы А при работе активного выпрямителя

Fig. 6. Phase A currents during active rectifier operation

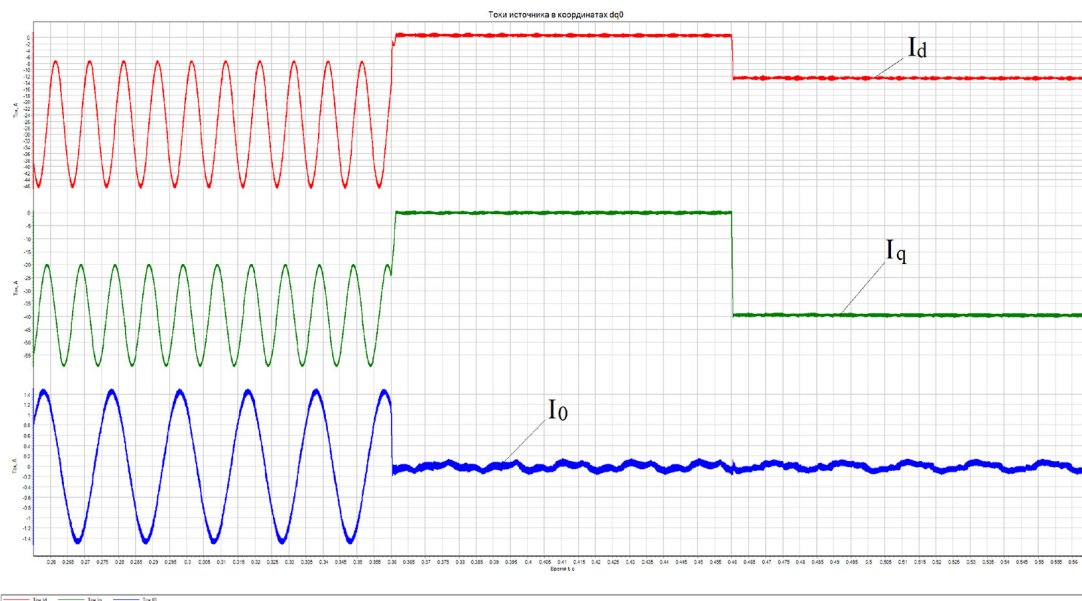


Рис. 7. Токи, потребляемые из сети, в координатах dq0

Fig. 7. Currents from the external power supply system in coordinates dq0

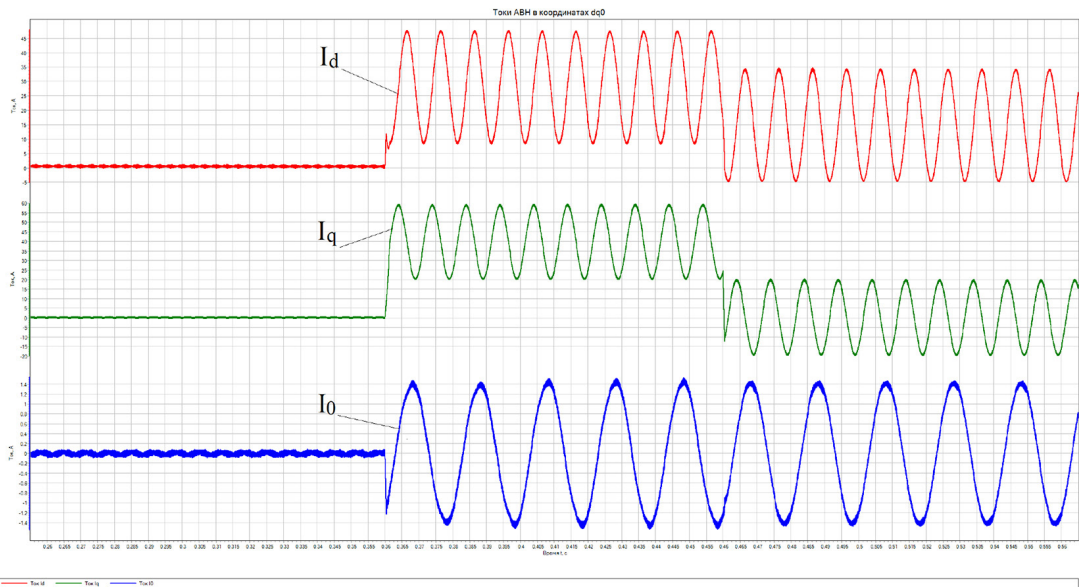


Рис. 8. Токи активного выпрямителя в координатах dq0

Fig. 8. Active rectifier currents in dq0 coordinates

Заключение

Получена имитационная модель активного выпрямителя с источником энергии в звене постоянного тока для компенсации несимметрии потребления несимметричной нагрузки в четырёхпроводной сети в среде моделирования SimInTech. Активный выпрямитель модели компенсирует несимметрию активной и реактивной мощности приёмника по фазам и компенсирует реактивную мощность для достижения нормативного или требуемого коэффициента мощности. Разработанная модель может быть усовершенствована для регулирования напряжения у потребителя и исследования более общих случаев. Рассмотренный активный выпрямитель с источником энергии может использоваться в качестве компенсирующего устройства высших гармонических составляющих тока нагрузки потребителя, разгружая от них систему электроснабжения. Вместо источника энергии в звене постоянного тока может выступать выпрямленное сетевое напряжение. Однако тогда активный выпрямитель не сможет выполнять свои компенсирующие функции в автономном режиме при отсутствии питания из сети. В то же время при использовании в качестве источника энергии в звене постоянного тока накопителя энергии активный выпрямитель может использоваться для выравнивания суточного потребления нагрузки и работать в качестве источника автономного питания. Полученный электротехнический комплекс из активного выпрямителя и накопителя энергии может найти применение в трансформаторных подстанциях 10 кВ жилых и общественных зданий, выравнивая их суточное потребление и компенсируя несинусоидальность и несимметрию.

Список литературы / References

- [1] Пантелеев В.И., Блинников М.Е. Формирование требований к основным параметрам маховичных накопителей энергии. *Электроэнергия. Передача и распределение*, 2023, 6(81). 92–

99 [Blinnikov M. E., Panteleev V. I. Formation of requirements for the main parameters of flywheel energy storage devices, *Electricity. Transmission and distribution*, 2023, 6(81). 92–99 (in Rus.)]

[2] Gruosso G., Londono C. D., Daniel L., Maffezzoni P., Advanced probabilistic load flow methodology for voltage unbalance assessment in PV penetrated distribution grids, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 155, 109556.

[3] Blasco P. A., Montoya-Mira R., Diez J. M., Montoya R., Algorithm for passive reactive power compensation of an unbalanced three-phase four-wire system using capacitors ensuring minimum line losses, *Electric Power Systems Research*, 2024, 227, 109972.

[4] Системный оператор единой энергетической системы. Demand response На российском рынке: барьеры и перспективы [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon_consulting_dr_v0.3.1_2018.pdf – Заглавие с экрана. [Russian power system operator. Demand response In the Russian market: barriers and prospects [Electronic resource] – Access: https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon_consulting_dr_v0.3.1_2018.pdf]

[5] Hu D., Liu H., Zhu Y., Sun J., Zhang Z., Yang L., Liu Q., Yang B., Demand response-oriented virtual power plant evaluation based on AdaBoost and BP neural network, *Energy Reports*, 2023, 9, 922–931.

[6] Hofmann M., Lindberg K. B., Evidence of households' demand flexibility in response to variable hourly electricity prices – Results from a comprehensive field experiment in Norway, *Energy Policy*, 2024, 184, 113821.

[7] Системный оператор единой энергетической системы. Активные энергетические комплексы: энергосистемы в миниатюре и новый способ сэкономить на электричестве [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/smi/2020/RUM_2020-05_dacko.pdf – Заглавие с экрана. [Russian power system operator. Active energy complexes: miniature energy systems and a new way to save on electricity [Electronic resource] – Access: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/smi/2020/RUM_2020-05_dacko.pdf]

[8] Salim O. M., Aboraya A. El. S., Power quality enhancement of unbalanced Distributed-Resources based on triple-loop compensation, *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15, 102454.

[9] Jin W., Li Y., Sun G., Gao Y., Admittance Model for Three-phase AC Micro-grid with Unbalanced Load Compensated by the Multi-functional Grid-connected Inverter, *Energy Procedia*, 2019, 158, 2475–2480.

[10] Блинников М. Е., Пантелеев В. И. Обратимый преобразователь энергии с маховичным накопителем в системах электроснабжения. *Энергетические системы*, 2023, 2, 44–50 [Blinnikov M. E., Panteleev V. I. Reversible energy converter with flywheel storage in power supply systems, *Energy systems*, 2023, 2, 44–50 (in Rus.)]