

УДК 621.316.727

### ПРИМЕНЕНИЕ «ДИНАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ» ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕСИММЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

**С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков**

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет»  
ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87500, Украина. Email: podsvet@gmail.com

Для решения задач компенсации несинусоидальности, несимметрии и реактивной мощности в электрических сетях получают широкое распространение активные фильтрокомпенсирующие и симметрирующие устройства: статические компенсаторы, активные фильтры, универсальные системы управления перетоками мощности. Обычно для расчета фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств используют метод симметричных составляющих, позволяющий найти искомые величины их проводимостей. В работе показано, что добиться компенсации несимметрии можно, используя только емкостные элементы. Если реализовать фильтрокомпенсирующее и симметрирующее устройство, содержащее только емкостные элементы, при условии необходимости одновременной компенсации несимметрии и реактивной мощности невозможно, то в этом случае вводится понятие целевой функции, которая определяет возможности «недокомпенсации»: допустимые уровни несимметрии и потребления (генерирования) реактивной мощности. Рассмотрена возможность компенсации несимметрии с помощью разновидности активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств, получивших название «динамические конденсаторы» (dynamic capacitors), или безынерторные активные фильтры (inverter-less active filter). Они представляют собой батарею конденсаторов, подключенную к сети через полупроводниковый непосредственный АС/АС преобразователь. «Динамические конденсаторы» позволяют обеспечить плавное регулирование реактивной мощности, более того, они могут ограниченно выполнять функции активной фильтрации высших гармоник аналогично параллельным активным фильтрам.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, несимметрия, «динамический конденсатор», активный фильтр.

### ЗАСТОСУВАННЯ «ДИНАМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ» ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ НЕСИМЕТРІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**С. К. Поднебенна, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков**

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»  
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500, Україна. Email: podsvet@gmail.com

Для вирішення задач компенсації несинусоїдальності, несиметрії й реактивної потужності в електричних мережах отримують широке поширення активні фільтрокомпенсуючі та симетрувальні пристрої: статичні компенсатори, активні фільтри, універсальні системи управління перетіканнями потужності. Зазвичай для розрахунку фільтрокомпенсуючих та симетрувальних пристроїв використовують метод симетричних складових, що дозволяє знайти шукані величини їх провідностей. У роботі показано, що добитися компенсації несиметрії можна, використовуючи тільки ємнісні елементи. Якщо реалізувати фільтрокомпенсуючий і симетрувальний пристрій, що містить лише ємнісні елементи, за умови необхідності одночасної компенсації несиметрії та реактивної потужності неможливо, то в цьому випадку вводиться поняття цільової функції, яка визначає можливість «недокомпенсації»: допустимі рівні несиметрії й споживання (генерування) реактивної потужності. Розглянуто можливість компенсації несиметрії за допомогою різновиди активних фільтрокомпенсуючих і симетрувальних пристроїв, що одержали назву «динамічні конденсатори» (dynamic capacitors), або безінверторні активні фільтри (inverter-less active filter). Вони є батареєю конденсаторів, підключеною до мережі через напівпровідниковий безпосередній АС/АС перетворювач. «Динамічні конденсатори» дозволяють забезпечити плавне регулювання реактивної потужності, більше того, вони можуть обмежено виконувати функції активної фільтрації вищих гармонік аналогічно паралельним активним фільтрам.

**Ключові слова:** реактивна потужність, несиметрія, «динамічний конденсатор», активний фільтр.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Одним из важных показателей качества электроэнергии, наряду с несинусоидальностью напряжений и токов, является несимметрия напряжений. Она возникает при неравномерном подключении множества однофазных (реже двухфазных) электрических нагрузок к трехфазной сети. Наиболее распространенные несимметричные электроприемники – индукционные и дуговые печи, сварочные источники питания, тяговые нагрузки на железнодорожных подстанциях [1, 2].

Согласно [3], несимметрия напряжений характеризуется коэффициентом несимметрии напряжений

по обратной последовательности  $K_{2U}$  и коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ , для которых в сетях 0,4 кВ установлены нормально допустимые значения на уровне 2 % и предельно допустимые – на уровне 4 % соответственно.

Отрицательное влияние низкого качества электроэнергии на работу потребителей и энергосистемы в целом давно известно [1]. Разработка методов и способов обеспечения качества электроэнергии является актуальной и важной задачей, и на сегодня существует множество способов ее решения [1, 2, 4].

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ.**  
Наиболее простым способом, с точки зрения проектирования системы электроснабжения, является рациональное распределение нагрузок по фазам, однако зачастую в существующих сетях это нереализуемо или имеет ряд технико-экономических сложностей. Более сложный, но вместе с тем и более универсальный способ – применение фильтрокомпенсирующих (ФКУ) и симметрирующих устройств (СУ).

Развитие полупроводниковой электроники привело к тому, что на смену пассивным ФКУ и СУ (нерегулируемым или тиристорно-регулируемым) пришли активные устройства, которые позволяют адаптироваться к изменяющимся режимам работы сети, в том числе и несимметрии напряжений. Одним из способов обеспечения симметричной системы напряжений является применение силовых активных фильтров (САФ), универсальных регуляторов качества электроэнергии, межлинейных и межфазных регуляторов потоков мощности [5]. Основным недостатком перечисленных устройств – высокая стоимость – приводит к необходимости поиска более эффективных решений, чем пассивные ФКУ и СУ, но менее дорогих, чем активные фильтры.

Перспективным направлением в разработке новых ФКУ и СУ является применение так называемых «тонких» преобразователей переменного тока (Thin AC Converter, ТАСС) [6]. При подключении ТАСС к существующим конденсаторам для коррекции коэффициента мощности может быть реализовано устройство, получившее название «динамический конденсатор», или безынверторный активный фильтр, представляющий собой батарею конденсаторов, подключенную к сети через полупроводниковый непосредственный АС/АС преобразователь.

Наибольший интерес для практической реализации ФКУ и СУ представляет схема, основанная на buck-преобразователе (рис. 1), поскольку применение boost- и buck-boost преобразователей предусматривает поддержание повышенного напряжения на конденсаторе [7, 8]. Это накладывает определен-

ные требования к пробивному напряжению силовых ключей и является экономически неоправданным.

Изменением скважности открытия двунаправленных ключей (S1S2 и S3S4) можно обеспечить плавное регулирование реактивной мощности. Реактивная мощность такого ФКУ равна номинальной мощности батареи конденсаторов, умноженной на квадрат скважности управляющих импульсов двунаправленного ключа S1S2.

Для определения величины реактивной мощности такого ФКУ и СУ требуется провести анализ несимметричного режима электрической сети. Как известно, в соответствии с методом симметричных составляющих любую трехфазную систему можно представить в виде трех систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Тогда выражения для токов нагрузки будут иметь вид [9]:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{nA} &= \dot{i}_{nA1} + \dot{i}_{nA2} + \dot{i}_{nA0}; \\ \dot{i}_{nB} &= \dot{i}_{nB1} + \dot{i}_{nB2} + \dot{i}_{nB0} = \\ &= a^2 \dot{i}_{nA1} + a \dot{i}_{nA2} + \dot{i}_{nA0}; \\ \dot{i}_{nC} &= \dot{i}_{nC1} + \dot{i}_{nC2} + \dot{i}_{nC0} = \\ &= a \dot{i}_{nA1} + a^2 \dot{i}_{nA2} + \dot{i}_{nA0}. \end{aligned} \tag{1}$$

Известно, что токи в трехфазной трехпроводной сети не содержат составляющих нулевой последовательности, при этом составляющие прямой и обратной последовательностей могут быть найдены по выражениям

$$\begin{aligned} \dot{i}_{n1} &= \frac{1}{3}(\dot{i}_{nA} + a \dot{i}_{nB} + a^2 \dot{i}_{nC}); \\ \dot{i}_{n2} &= \frac{1}{3}(\dot{i}_{nA} + a^2 \dot{i}_{nB} + a \dot{i}_{nC}). \end{aligned} \tag{2}$$

Приняв начальную фазу составляющей напряжения прямой последовательности  $\varphi_{\dot{U}_{A1}}$  равной нулю, компенсация мнимой части составляющей тока прямой последовательности обеспечит компенсацию реактивной мощности. А для обеспечения компенсации несимметрии токов нагрузки должна отсутствовать составляющая тока обратной последовательности.

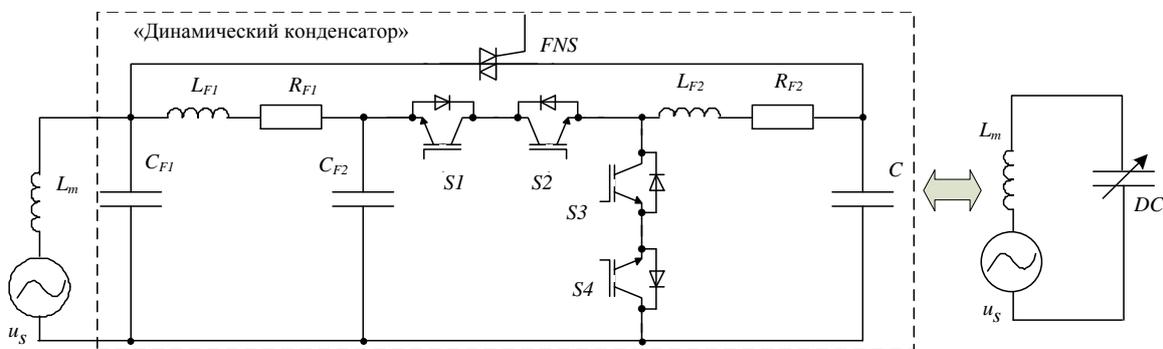


Рисунок 1 – Схема однофазного «динамического конденсатора» на основе buck-преобразователя

Параллельно нагрузке подключим СУ, соединенное треугольником (рис. 2).

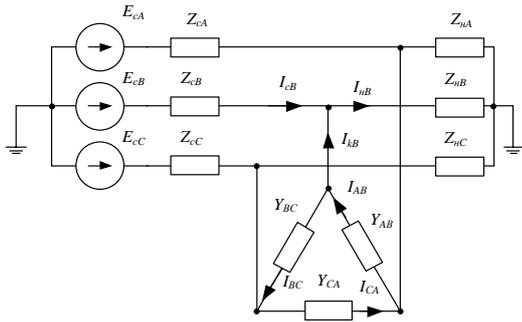


Рисунок 2 – Схема замещения трехфазной трехпроводной электрической сети при подключении СУ

С учетом указанных требований и допущений несложно составить систему уравнений, которая позволит рассчитать проводимости СУ:

$$\frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \underline{Y}_{AB} - \frac{1}{2} \dot{U}_{CA} \underline{Y}_{CA} - j \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \underline{Y}_{AB} - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_{BC} + \frac{1}{2} \dot{U}_{CA} \underline{Y}_{CA} \right) = 0 - j \operatorname{Im}(i_{i1}); \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \underline{Y}_{AB} - \frac{1}{2} \dot{U}_{CA} \underline{Y}_{CA} + j \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \underline{Y}_{AB} - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_{BC} + \frac{1}{2} \dot{U}_{CA} \underline{Y}_{CA} \right) = -i_{i2}. \quad (4)$$

В общем случае полученные в результате решения такой системы уравнений проводимости могут иметь как активный, так и реактивный характер, причем при различных коэффициентах несимметрии будет изменяться и схема СУ.

Пусть электродвижущие силы сети представляют собой симметричную систему, а токи нагрузки несимметричны. Рассмотрим СУ, представляющее собой соединенные треугольником конденсаторы (рис. 3).

Выделив в системе уравнений (3), (4) действительную и мнимую части, представим полученную систему в матричном виде. Матрица токов MI:

$$MI = \begin{bmatrix} -\operatorname{Im}(I_{n1}) \\ \operatorname{Re}(I_{n2}) \\ \operatorname{Im}(I_{n2}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрица потенциалов MU:

$$MU = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \operatorname{Re}(U_{AB}) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{AB}) & -\frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{BC}) & -\frac{1}{2} \operatorname{Re}(U_{CA}) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{CA}) \\ \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Re}(U_{AB}) + \frac{1}{2} \operatorname{Im}(U_{AB}) & -\frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Re}(U_{BC}) & \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Re}(U_{CA}) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(U_{CA}) \\ -\frac{1}{2} \operatorname{Re}(U_{AB}) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{AB}) & -\frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{BC}) & \frac{1}{2} \operatorname{Re}(U_{CA}) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{Im}(U_{CA}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Искомая матрица проводимостей MY находится в соответствии с выражением

$$MY = MU^{-1}MI. \quad (7)$$

На рис. 4 приведена векторная диаграмма, показывающая, что при установке полученных в результате вычислений проводимостей удается сим-

метризовать фазные токи и добиться компенсации реактивной мощности. Здесь и далее звездочкой отмечены результирующие токи сети.

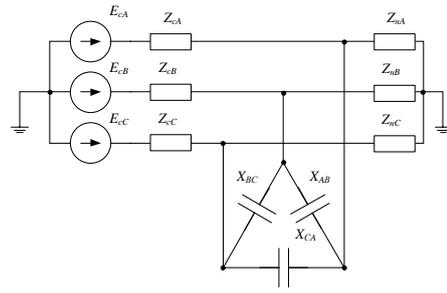


Рисунок 3 – Включение трехпроводного СУ с конденсаторами

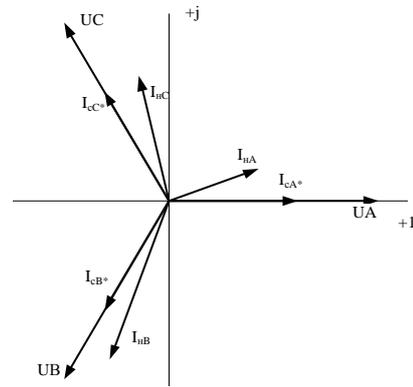


Рисунок 4 – Векторная диаграмма при полном симметрировании токов сети

При решении системы уравнений (5)–(7) искомые величины проводимостей могут оказаться отрицательными, что предполагает их индуктивный характер. Учитывая, что рассматриваемое СУ (рис. 3) содержит только емкостные элементы, реализовать его при условии необходимости компенсации и несимметрии, и реактивной мощности не представляется возможным. В этом случае необходимо ввести понятие целевой функции, которая определит возможности «недокомпенсации»: допустимые уровни несимметрии и потребления (генерирования) реактивной мощности.

Рассмотрим следующую целевую функцию: необходимо обеспечить полное симметрирование токов нагрузки независимо от потребления (генерирования) реактивной мощности.

Пусть параллельно рассчитанному СУ установлена симметричная батарея конденсаторов, соединенная треугольником, причем емкости конденсаторов треугольника равны по модулю минимальной расчетной емкости СУ (рис. 5):

$$C_{ABc} = C_{BCc} = C_{CAc} = \min(C_{AB}, C_{BC}, C_{CA}). \quad (8)$$

Подключение такой батареи конденсаторов может быть описано выражением

$$MC = MY \frac{1}{2\pi f} - \min(C_{AB}, C_{BC}, C_{CA}), \quad (9)$$

где  $MC = \begin{bmatrix} C_{AB} \\ C_{BC} \\ C_{CA} \end{bmatrix}$  – матрица емкостей СУ.

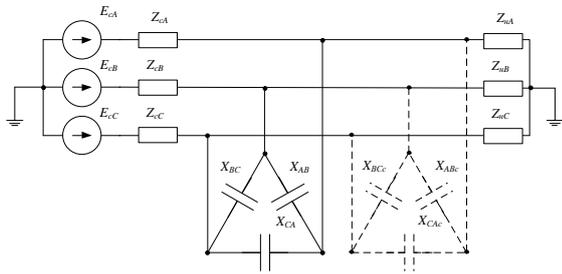


Рисунок 5 – СУ с дополнительной симметричной батареей конденсаторов

В результате алгебраических вычислений получится, что одна из емкостей результирующего треугольника равна нулю, а подключение двух других, рассчитанных согласно (8), приведет к симметрированию токов нагрузки (рис. 5).

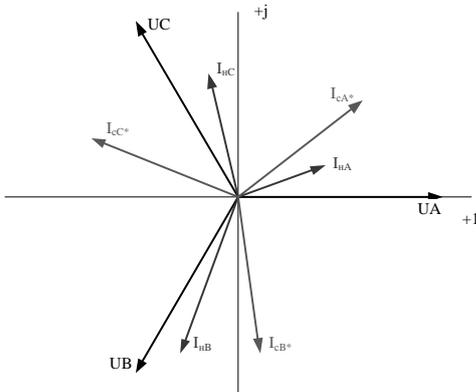


Рисунок 6 – Векторная диаграмма для СУ по схеме (рис. 5)

При несимметричной системе питающих напряжений описанный выше подход также может быть реализован. При этом полученная система токов будет симметрична относительно системы координат, но несимметрична относительно системы напряжений.

В [10] показано, что минимум потерь мощности в сети достигается при равенстве сопротивлений по фазам нагрузки, независимо от коэффициента несимметрии питающих напряжений. Величина искомого сопротивления может быть найдена из выражения

$$R = \frac{U_{A_{rms}}^2 + U_{B_{rms}}^2 + U_{C_{rms}}^2}{P}, \quad (10)$$

где  $U_{A_{rms}}$ ,  $U_{B_{rms}}$ ,  $U_{C_{rms}}$  – среднеквадратичные фазные напряжения;  $P = Re(\dot{U}_A \bar{I}_{nA}) + Re(\dot{U}_B \bar{I}_{nB}) + Re(\dot{U}_C \bar{I}_{nC})$  – активная мощность, потребляемая нагрузкой;  $\bar{I}_{nA}$ ,  $\bar{I}_{nB}$ ,  $\bar{I}_{nC}$  – сопряженные комплексы токов нагрузки.

Рассмотрим целевую функцию – обеспечение минимальных потерь мощности в сети. Представим, что несимметричная нагрузка и СУ ведут себя по отношению к сети как активная нагрузка (рис. 7).

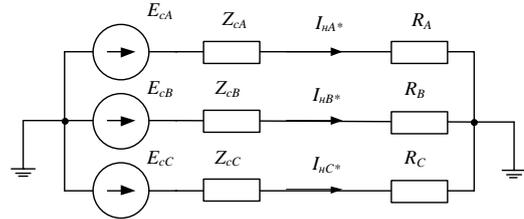


Рисунок 7 – Схема замещения сети

При этом токи СУ могут быть найдены в соответствии со следующими выражениями:

$$\dot{i}_{kA} = \frac{\dot{U}_A}{R} - \dot{i}_{nA}; \quad (11)$$

$$\dot{i}_{kB} = \frac{\dot{U}_B}{R} - \dot{i}_{nB}; \quad (12)$$

$$\dot{i}_{kC} = \frac{\dot{U}_C}{R} - \dot{i}_{nC}. \quad (13)$$

Рассмотрим структуру СУ, содержащую параллельно включенным треугольником емкостям конденсаторы, включенные звездой (рис. 7). Тогда ток СУ будет распределяться таким образом:

$$\dot{i}_{kA} = \dot{i}_{AA} + \dot{i}_{AY}; \quad (14)$$

$$\dot{i}_{kB} = \dot{i}_{BA} + \dot{i}_{BY}; \quad (15)$$

$$\dot{i}_{kC} = \dot{i}_{CA} + \dot{i}_{CY}. \quad (16)$$

Применение подхода, основанного на непосредственном применении законов Кирхгофа, в данном случае оказывается неэффективным, поскольку полученная таким образом система уравнений имеет бесконечное число решений.

Для СУ по схеме «треугольник» достаточно управлять двумя линейными токами. Запишем выражения для них:

$$\dot{i}_{AA} = \dot{U}_{AB} jB_{AB} - \dot{U}_{BC} jB_{BC}; \quad (17)$$

$$\dot{i}_{BA} = \dot{U}_{BC} jB_{BC} - \dot{U}_{AB} jB_{AB}. \quad (18)$$

Разделив обе части (16), (17) на  $j$ , получим

$$-j\dot{i}_{AA} = \dot{U}_{AB} B_{AB} - \dot{U}_{CA} B_{CA}; \quad (19)$$

$$-j\dot{i}_{BA} = \dot{U}_{BC} B_{BC} - \dot{U}_{AB} B_{AB}. \quad (20)$$

Представим токи  $-j\dot{i}_{AA}$  и  $-j\dot{i}_{BA}$  в виде геометрической суммы проекций, как показано на рис. 9.

Управляя проекциями токов на действительную и мнимую оси выбранной для каждой из фаз системы координат, можно управлять активной и реактивной мощностями.

Для фазы А ось абсцисс выбранной системы координат совпадает с действительной осью, ось ординат – с мнимой. Для фазы В система координат выбрана таким образом, чтобы ось абсцисс совпадала с положительным направлением вектора фазного напряжения  $\dot{U}_B$ , а ось ординат была ему ортогональна.

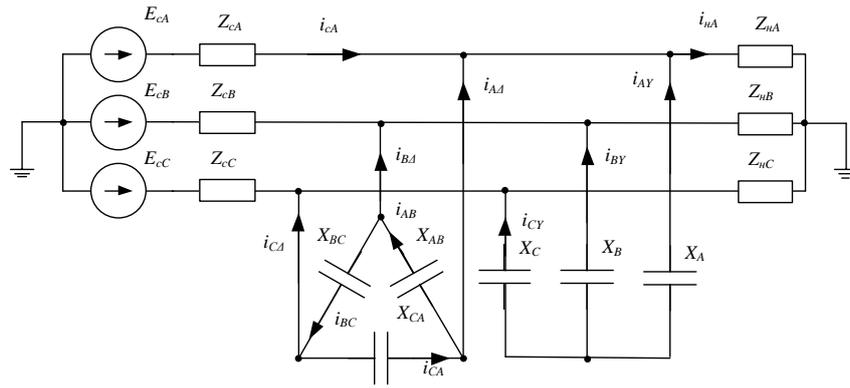


Рисунок 8 – Схема замещения электрической сети с СУ, состоящим из конденсаторов, соединенных треугольником и звездой

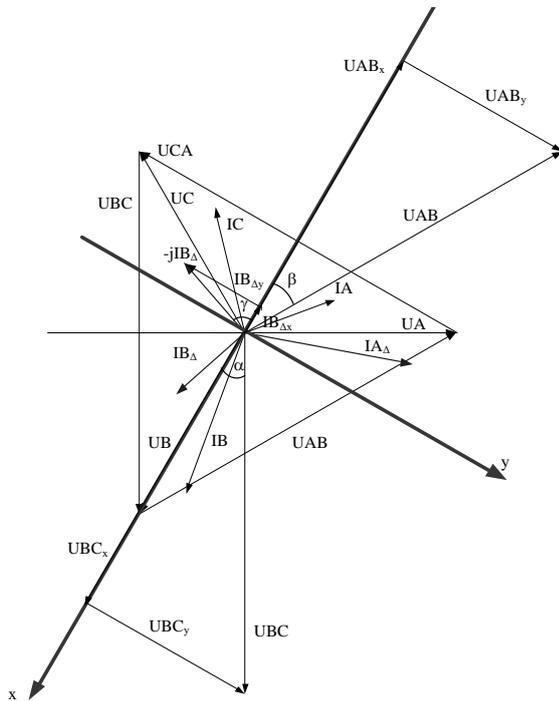


Рисунок 9 – Векторная диаграмма для СУ по схеме (рис. 8)

Уравнения (19), (20) могут быть представлены в виде системы из четырех выражений:

$$I_{A\Delta x} = \operatorname{Re}(-jI_{A\Delta}) = \operatorname{Re}(\dot{U}_{AB}jB_{AB} - \dot{U}_{CA}jB_{CA}); \quad (21)$$

$$I_{A\Delta y} = \operatorname{Im}(-jI_{A\Delta}) = \operatorname{Im}(\dot{U}_{AB}jB_{AB} - \dot{U}_{CA}jB_{CA}); \quad (22)$$

$$I_{B\Delta x} = |-jI_{B\Delta}| \cos(\gamma) = |\dot{U}_{BC}| B_{BC} \cos(\alpha) - |\dot{U}_{AB}| B_{AB} \cos(\beta); \quad (23)$$

$$I_{B\Delta y} = -|-jI_{B\Delta}| \sin(\gamma) = |\dot{U}_{BC}| B_{BC} \sin(\alpha) + |\dot{U}_{AB}| B_{AB} \sin(\beta). \quad (24)$$

Здесь  $\gamma$  – угол между векторами тока  $-jI_{B\Delta}$  и напряжения  $\dot{U}_B$ ;  $\alpha$  – угол между векторами напря-

жения  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_B$ ;  $\beta$  – угол между векторами напряжения  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_B$ .

Так как число уравнений системы (21)–(24) больше числа неизвестных, управлять всеми проекциями токов невозможно. Наиболее целесообразно управлять проекциями на действительные оси. Таким образом удастся симметризовать распределение активной мощности, что бывает необходимо, например, при «слабой» сети. Третьим уравнением системы может служить одно из уравнений (22), (24). Рассмотрим решение системы уравнений (21), (23) и (24) для нахождения фазных проводимостей треугольника. Требуемую составляющую тока (из уравнения (22)) можно получить, подключив в фазу А звезды некоторую проводимость, которая будет найдена из выражения

$$b_{Ay} = \frac{\operatorname{Im}(-jI_{A\Delta}) - \operatorname{Im}(\dot{U}_{AB}jB_{AB} - \dot{U}_{CA}jB_{CA})}{\operatorname{Re}(\dot{U}_A)}. \quad (25)$$

В результате при установке в фазы треугольника и звезды рассчитанных проводимостей совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений будет иметь вид, представленный на рис. 10. Видно, что в результате достигнута компенсация несимметрии токов и реактивной мощности.

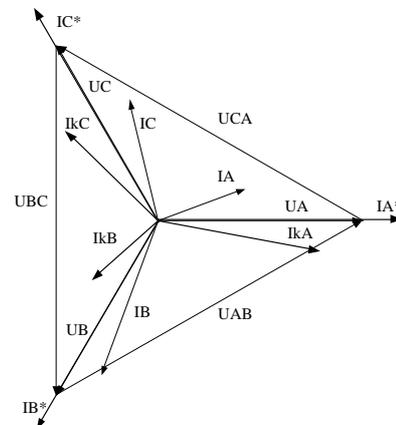


Рисунок 10 – Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений рассчитанного индуктивно-емкостного СУ

При получении проводимостей, имеющих индуктивно-емкостный характер, для реализации емкостного СУ можно задаться целевой функцией симметрирования токов нагрузки независимо от компенсации реактивной мощности, аналогично ранее рассмотренному подходу. Совмещенная векторная диаграмма приведена на рис. 11.

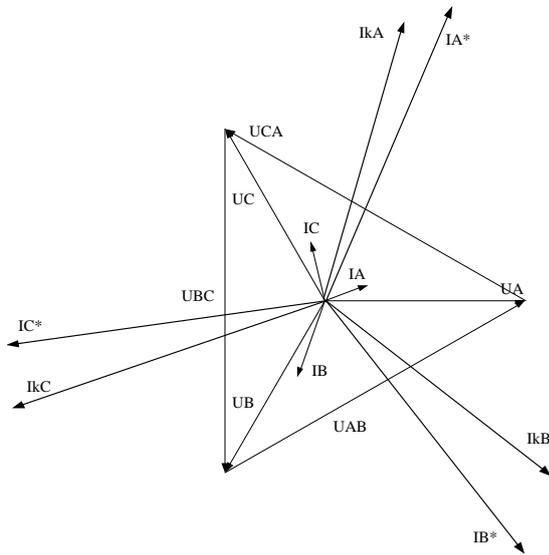


Рисунок 11 – Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений рассчитанного емкостного СУ

Видно, что симметрирования удалось добиться, однако сетевые токи при этом значительно увеличились из-за перекомпенсации реактивной мощности.

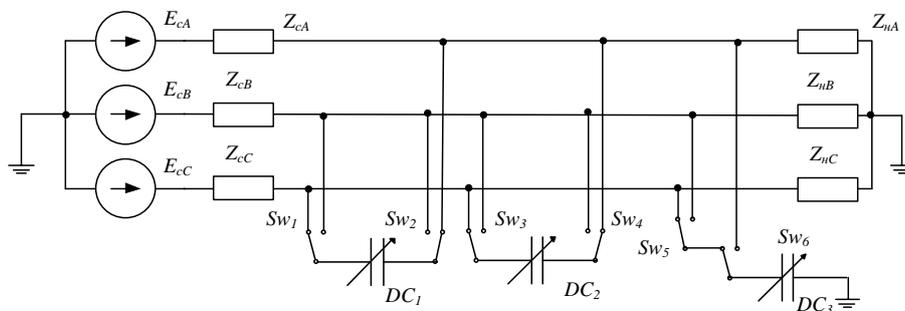


Рисунок 12 – Схема трехфазного СУ на базе «динамических конденсаторов»

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриб О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения. – Харьков: ХНАГХ, 2004. – 180 с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
3. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

Для практической реализации такого СУ достаточно двух «динамических конденсаторов» (рис. 1), включенных открытым треугольником, и одного «динамического конденсатора», включенного в одну фазу звезды. На рис. 12 приведена схема СУ.

Изменением положений ключей Sw<sub>1</sub>–Sw<sub>6</sub> можно обеспечить подключение «динамических конденсаторов» в нужные фазы треугольника и звезды и добиться компенсации несимметрии токов нагрузки.

**ВЫВОДЫ.** «Динамические конденсаторы» позволяют обеспечить плавное регулирование реактивной мощности, более того, они могут ограниченно выполнять функции активной фильтрации высших гармоник аналогично параллельным активным фильтрам.

Однако при реализации в «динамических конденсаторах» функции активной фильтрации батареи конденсаторов оказываются нагружены токами высших гармоник. Это ограничивает возможность использования обычных конденсаторов для коррекции коэффициента мощности – зачастую они допускают работу с действующим током не более (1,3–1,5) номинального.

Дальнейшие исследования перспективны в области оптимизации алгоритмов управления «динамическими конденсаторами» с целью обеспечения симметрирования сетевого тока при работе рассмотренной разновидности СУ в составе электротехнического комплекса с несимметричной нагрузкой и несимметричном/искаженном напряжении сети.

4. Бурлака В.В., Поднебенная С.К., Гулаков С.В. Современные способы улучшения качества электроэнергии // Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 26–28 ноября 2014 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2014. – С. 137–143.
5. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review / J.W. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – Iss. 93/2005 (12). – PP. 2144–2164.

6. Prasaj A., Deepak M. Divan. Control of Dynamic Capacitor // *IEEE Transactions on Industry Application*. – 2011. – Iss. 1/2011 (47). – PP. 161–168.

7. Erickson R.W. *Fundamentals of Power Electronics*. – New York: Chapman and Hall, 1997. – 791 p.

8. Rashid M.H. *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*. – USA: Elsevier, 2011. – 1409 p.

9. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник*. – М.:

Гардарики, 2002. – 638 с.

10. Особенности управления силовым параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 9–11 квітня 2013 р.* – Кременчук: КрНУ, 2013. – С. 168–169.

## APPLYING THE “DYNAMIC CAPACITORS” FOR UNBALANCE COMPENSATION IN POWER GRID

**S. Podnebennaya, V. Burlaka, S. Gulakov**

*Pryazovskyi State Technical University*

ul. Universytetskaya, 7, Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: podsvet@gmail.com

To solve the problem of nonsinusoidality, unbalance and reactive power compensation in electric grid, active filters and devices for balancing are widely distributed. These devices are static compensators, active power filters, unified power flow controllers. Method of symmetrical components is widely used to calculate passive active filters and devices for balancing. It allows to obtain the desired active filters and devices for balancing conductivity values. It is shown that the unbalance compensation can be achieved using only the capacitive elements. But for active filters and devices for balancing containing only capacitive elements, simultaneous compensation of unbalance and reactive power is impossible. In this case, the concept of the objective function is introduced. It is a function which determines the possibility of "undercompensation": acceptable levels of unbalance and consumption (generation) of reactive power. The paper deals with a type of active active filters and devices for balancing, so-called "Dynamic capacitors" or inverter-less active filters, which consists of a capacitor bank connected to the grid through a direct AC/C converter. Load balancing using Dynamic capacitors is discussed. Dynamic capacitors allow for smooth control of reactive power, moreover, they can perform limited active harmonic filtering, similar to a shunt active power filter.

**Key words:** reactive power, unbalance, "dynamic capacitor", active power filter.

## REFERENCES

1. Grib, O.G. (2004), *Kontrol i regulirovaniye nesimmetrichnykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya* [Control and regulation of asymmetric modes in power systems], KHNAGKH, Kharkov. (in Russian)

2. Zhezhelchenko, I.V. (2010), *Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [The higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)

3. State Standard 13109-97 (1999), *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Compatibility of technical equipment. Quality standards for electrical energy in power systems for general use], Gosstandart Ukrainy, Kiev. (in Russian)

4. Burlaka, V.V., Podnebennaya, S.K. and Gulakov, S.V. (2014), "Modern ways of increasing power quality" *Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Power quality management. Proceedings of the International Conference], Moscow, Russia, November 26–28, 2014, pp. 137–143. (in Russian)

5. Dixon, J.W., Moran, L., Rodriguez, J. and Domke, R. (2005), "Reactive Power Compensation

Technologies", State-of-the-Art Review, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164.

6. Prasaj, A. and Deepak, M. Divan (2011), "Control of Dynamic Capacitor", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 1, no. 47, pp. 161–168.

7. Erickson, R.W. (1997), *Fundamentals of Power Electronics*, Chapman and Hall, New York, USA.

8. Rashid, M.H. (2011), *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*, Elsevier, USA.

9. Bessonov, L.A. (2002), *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektricheskkiye tsepi: uchebnik* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuit: the Textbook], Gardariki, Moscow. (in Russian)

10. Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V. and Gulakov, S.V. (2013), "Features of Active Power Filter Control Strategy", *Yeletromekhanichni ta yenergetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizatsii. Zbirnik naukovikh prats XI Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii molodikh uchenikh i spetsialistiv* [Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 11th International conference of students and young researches], Kremenchuk, KrNU, April 9–11, 2013, pp. 168–169. (in Russian)

Стаття надійшла 13.05.2015.