

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

- САВЕНКО О.С. мл. научный сотрудник кафедры систем автоматизации и электропривода ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, Украина, e-mail: savenko.olja@gmail.com;
- ПОДНЕБЕННАЯ С.К. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизации и электропривода ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, Украина, e-mail: podsvet@gmail.com;
- БУРЛАКА В.В. д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры систем автоматизации и электропривода ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, Украина, e-mail: VladimirV.Burlaka@gmail.com;

Цель работы. Исследование эффективности работы гибридного компенсатора реактивной мощности (ГКРМ), представляющего собой последовательно соединенные батарею конденсаторов (БК) со ступенчатым переключением и активный фильтр (АФ) высших гармоник, при различных стратегиях управления, при несинусоидальном и несимметричном питающем напряжении, в графической среде имитационного моделирования Simulink пакета Matlab.

Методы исследования. Методы электротехники, методы численного моделирования, методы теории преобразования систем координат, методы матричных преобразований.

Полученные результаты. Рассмотрено несколько стратегий управления ГКРМ: при работе в режиме компенсации реактивной мощности с “изоляцией” БК от высших гармоник; при работе в режиме активной фильтрации высших гармоник. Для расчета требуемой емкости БК и тока задания АФ рассмотрены теория мгновенной мощности ($p-q$ теории) и $d-q$ теория по основной частоте. Проверка эффективности рассмотренных стратегий управления выполнена в графической среде имитационного моделирования Simulink пакета Matlab. Синтезированы имитационные модели, позволяющие качественно оценить эффективность работы ГКРМ при различных стратегиях управления. Установлено, что в условиях несимметрии и/или несинусоидальности напряжения сети систему управления компенсатором целесообразно синтезировать с использованием $d-q$ теории по основной частоте. В процессе моделирования установлено, что предложенный ГКРМ позволяет обеспечить плавное регулирование реактивной мощности, при этом мощность АФ составляет не более 10 % от общей мощности ГКРМ (для заданных параметров моделирования). При работе в режиме активной фильтрации высших гармоник ГКРМ также показал высокую эффективность, мощность АФ составила не более 20 % от общей мощности компенсатора. Для иллюстрации эффективности подхода приведены диаграммы токов и напряжений, рассчитаны коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока (THD_i) и коэффициент мощности комплекса ГКРМ+нелинейная нагрузка.

Научная новизна. Получил дальнейшее развитие способ управления ГКРМ, заключающийся в совместном управлении БК со ступенчатым переключением и АФ: 1) по условию компенсации реактивной мощности и “изоляции” БК от высших гармоник; 2) по условию компенсации высших гармоник тока (работа в режиме параллельного активного фильтра).

Практическая ценность. Разработана имитационная модель гибридного компенсатора реактивной мощности, которая реализует несколько стратегий управления. Проверена работа компенсатора при несинусоидальном и несимметричном питающем напряжении. Подтверждена эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: батарея конденсаторов; активный фильтр; реактивная мощность; имитационное моделирование; высшие гармоники; несимметрия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение электрооборудования, которое имеет нелинейные вольт-амперные характеристики, обусловило изменение режимов работы электроприемников и привело к загрузке электрических сетей реактивными составляющими токов. Наличие перетоков реактивной мощности (РМ) приво-

дит к уменьшению пропускной способности линий, а, следовательно, к необходимости увеличения сечений проводов и кабелей; снижению напряжения на шинах нагрузок и подстанций распределительных сетей; росту потерь активной мощности во всех элементах системы электроснабжения; росту потерь напряжения в трансформаторах и линиях; необходимости использования оборудования большей номинальной мощно-

сти; снижению КПД трансформаторов, генераторов; сокращению срока службы оборудования и увеличению оплаты за потребляемую электроэнергию [1]-[2].

Широко используемым способом компенсации реактивных компонент токов является установка статических компенсаторов, а именно, батарей конденсаторов (БК) с тиристорным переключением и тиристорно-управляемых реакторов (ТУР). Однако они имеют ряд недостатков, что ограничивает их использование: батареи конденсаторов не обеспечивают плавность управления величиной РМ и чувствительны к наличию компонент неосновной частоты в приложенном напряжении, а работа ТУР приводит к генерации токов высших гармоник [3], [4]. Кроме того, установка статических компенсаторов вызывает проблемы, связанные с возможностью возникновения резонансов токов и напряжений. Использование активных компенсаторов позволяет решить проблемы плавности регулирования реактивной мощности и обладают значительными фильтро-компенсирующими свойствами, однако требуют большой установленной мощности устройства, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей. Поэтому целесообразным решением вопроса компенсации РМ является установка гибридных компенсаторов, которые объединяют достоинства пассивных (дешевизна) и активных (плавность управления, возможность регулировать спектральный состав тока) устройств. Установка пассивного фильтра позволяет выполнять поэтапное регулирование величины реактивной мощности и дает возможность использовать активный компенсатор меньшей номинальной мощности и напряжения; активная часть обеспечивает плавность регулирования, устраняет возможность резонанса между БК и сетью (работая как узкополосный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники) и, при необходимости, выполняет функцию фильтрации высших гармоник (ВГ).

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известны несколько вариантов схемных решений гибридных компенсаторов реактивной мощности (ГКРМ) [5]-[8]. На рис. 1 представлен вариант параллельного соединения пассивной и активной частей ГКРМ [5]. Такое включение позволяет обеспечить работу каждого из компенсаторов независимо друг от друга.

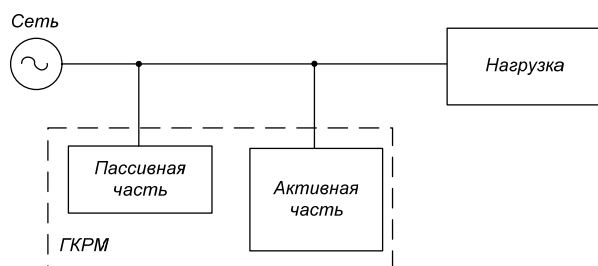


Рисунок 1. ГКРМ с параллельным соединением пассивной и активной частей

Пассивная часть представляет собой БК, емкости ступеней которой пропорциональны степенями двойки.

Каждый из компенсаторов выполняет свою задачу – пассивный обеспечивает компенсацию реактивной мощности преимущественно на частоте сети, а активный – корректирует спектральный состав тока сети, обеспечивая его синусоидальную форму. Однако уровень установленной мощности активной части остается высоким, что требует дорогой многоуровневой структуры активного фильтра [9].

В [6], [7] в качестве пассивного компенсатора использован LC-фильтр, настроенный на частоту пятой и седьмой гармоник, но при широком диапазоне изменения реактивной составляющей тока нагрузки наблюдаются значительные потери мощности.

В [8] предложено схемное решение, при котором в качестве пассивного компенсатора используется ТУР, а последовательно с активным компенсатором установлен резонансный фильтр, настроенный на основную частоту. Предложенная конфигурация позволяет обеспечить плавность регулирования РМ, однако в связи с тем, что большинство нелинейных нагрузок носит индуктивный характер и ток через ТУР также индуктивный, от активного компенсатора может потребоваться обеспечить большой емкостный ток, что требует увеличенной мощности активной части.

Кроме того параллельное включение пассивного и активного компенсаторов может вызвать проблему возникновения резонансных явлений, что приведет к перенапряжению на пассивном компенсаторе.

Указанными недостатками не обладает схема последовательного включения активной и пассивной частей ГКРМ (рис. 2), которая и принята для дальнейших исследований.

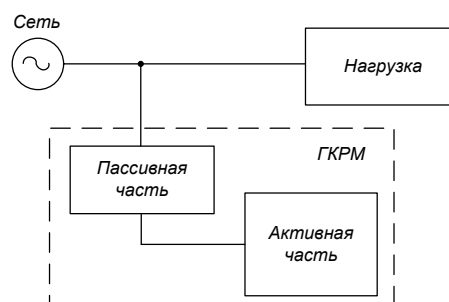


Рисунок 2. ГКРМ с последовательным соединением пассивной и активной частей

Известно, что при использовании ТУР в качестве пассивной части ГКРМ суммарная мощность гибридного устройства может составлять до 80 % от мощности трехфазной нагрузки, что существенно скажется на стоимости ГКРМ [10]. Поэтому при моделировании в качестве пассивной части компенсатора принята БК со ступенчатым переключением.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование эффективности работы гибридного компенсатора реактивной мощности, представляющего собой последовательно соединенные батарею конденсаторов со ступенчатым переключением и активный фильтр высших гармоник, с различными стратегиями управления, при несинусоидальном и несимметричном питающем напряжении, в графической среде имитационного моделирования Simulink пакета Matlab.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Однофазная схема замещения компенсатора изображена на рис.3. Выбор емкостей ступеней БК выполняется согласно алгоритму, изложенному в [11]. Активный компенсатор выполнен на базе автономного инвертора напряжения и подключен параллельно нагрузке. Это не требует установки дополнительного трансформатора, следовательно, улучшает технико-экономические показатели системы в целом.

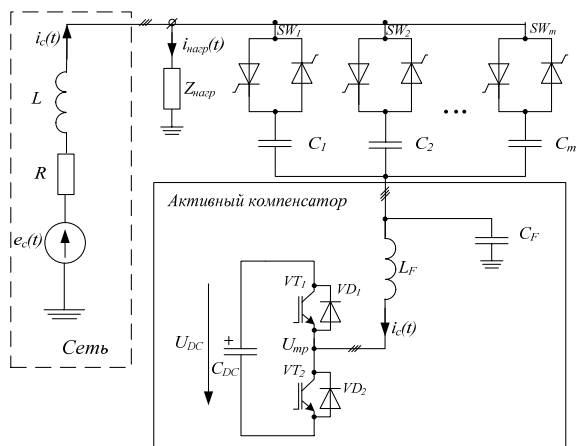


Рисунок 3. Однофазная схема замещения гибридного компенсатора РМ

Рассмотрим следующие стратегии управления при симметричном и несимметричном напряжении сети:

- 1) компенсация РМ и фильтрация ВГ;
- 2) компенсация РМ и “изоляция” БК от ВГ.

Компенсация РМ и фильтрация ВГ в условиях симметричного напряжения сети.

Задание на ток компенсатора формируется как сумма активной и реактивной составляющих. Величина активной составляющей зависит только от активной мощности, которая расходуется на переключение и потери проводимости в транзисторных ключах. Реактивная составляющая определяется величиной реактивной мощности, которую необходимо компенсировать.

Для расчета величины реактивной мощности, которую необходимо компенсировать, и тока задания, использован алгоритм, основанный на теории мгновенной мощности [12]-[14]. В соответствии с выбранным алгоритмом выполняется преобразование векторов токов, вращающихся в системе координат а-в-с, в неподвижную в пространстве систему координат α-β (т.н. преобразования Кларка) [12]:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}; \\ i_\beta = \sqrt{3} \cdot (\frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}), \end{cases} \quad (1)$$

где i_α, i_β – ток в координатах α-β; i_a, i_b, i_c – ток в координатах а-в-с.

Аналогичные преобразования выполнены и для векторов напряжения сети.

Тогда вектора напряжения сети и тока нагрузки можно представить в виде двух проекций на оси α, β, соответственно:

$$I_{нагр} = i_\alpha + j \cdot i_\beta,$$

$$U_{сетм} = u_\alpha + j \cdot u_\beta.$$

Тогда полная мощность рассчитывается следующим образом:

$$S = U \cdot I = p + j \cdot q,$$

где $p = [u_\alpha \quad u_\beta] \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$; $q = [u_\beta \quad -u_\alpha] \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$.

Мгновенная активная мощность представляет собой совокупность энергии, которую требуется передать от источника нагрузки в единицу времени (постоянная составляющая $p_{ном}$), и энергии, которой обменивается источник с нагрузкой за единицу времени (осциллирующая составляющая p_{osc}) [12], [13]. Мгновенная реактивная мощность q количественно характеризует процессы обмена энергией между фазами [14].

Токи задания компенсатора в системе координат α-β определяются переменной составляющей мгновенной активной мощности и мгновенной реактивной мощностью [12], [13]:

$$\begin{cases} i_{k-\alpha}^* = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot [u_\alpha \quad u_\beta] \cdot \begin{bmatrix} p - p_{ном} \\ q \end{bmatrix}; \\ i_{k-\beta}^* = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot [u_\beta \quad -u_\alpha] \cdot \begin{bmatrix} p - p_{ном} \\ q \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{k-\alpha}^*, i_{k-\beta}^*, i_{k-\gamma}^*$ – токи задания компенсатора в

α - β -координатах, A ; u_α, u_β – напряжение сети, представленное в α - β -координатах, В; p – мгновенная активная мощность, Вт; $p_{пост}$ – постоянная составляющая мгновенной активной мощности, Вт; q – мгновенная реактивная мощность, ВАр.

Токи задания компенсатора $i_{k_A}^*, i_{k_B}^*, i_{k_C}^*$ в системе координат а-б-с определяются как:

$$\begin{cases} i_{k_A}^* = \frac{2}{3} \cdot i_{k_a}^* \\ i_{k_B}^* = -\frac{1}{3} \cdot i_{k_a}^* + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{k_b}^* \\ i_{k_C}^* = -\frac{1}{3} \cdot i_{k_a}^* - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{k_b}^* \end{cases} \quad (3)$$

Описанный подход реализован в системе управления, изображенной на рис. 4.

Фильтр ФНЧ выделяет постоянную составляющую активной мощности.

Регулятор распределения Q выполняет перерас-

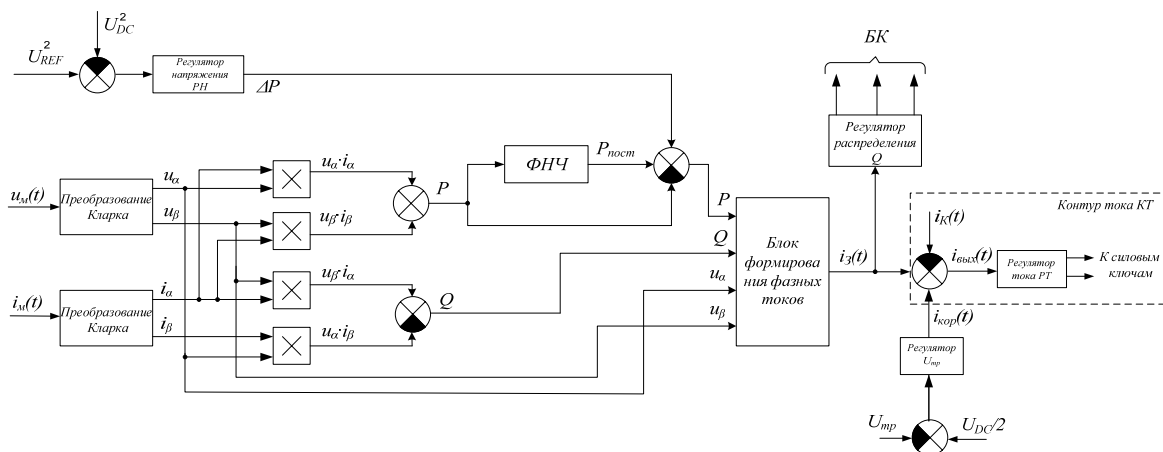


Рисунок 4. Структурная схема системы управления компенсатором

Компенсация РМ и “изоляция” БК от ВГ в условиях симметричного напряжения сети.

При выборе данной стратегии управления ГКРМ выполняет исключительно компенсацию реактивной составляющей тока нагрузки, при этом не корректирует спектральный состав тока сети. Напряжение, приложенное к БК, носит синусоидальный характер, следовательно, отсутствует риск возникновения перенапряжений, вызванных наличием ВГ в токе компенсатора.

В этом случае осциллирующие составляющие мгновенной активной и реактивной мощности равны нулю, т.е. в системе (2): $p - p_{пост} = 0$, а $q = q_{пост}$.

Компенсация РМ и фильтрация ВГ в условиях несимметричного напряжения сети.

пределение мощности между активной и пассивной частями компенсатора по условию минимизации мощности АФ.

Поддержание среднего значения напряжения в средней точке полумоста на уровне $0.5 \cdot U_{DC}$ относительно отрицательной шины звена постоянного тока АФ осуществляется регулятором U_{mp} , выходной сигнал которого является током коррекции $i_{кор}(t)$. Здесь достаточно П-регулятора с небольшим коэффициентом усиления. Без этого регулятора неизбежно появление на БК неконтролируемой постоянной составляющей напряжения, что приведет к невозможности обеспечения корректного управления током гибридного компенсатора [11].

В блоке формирования фазных токов реализован алгоритм согласно системе уравнений (2).

Рассмотренный выше способ при несимметрии и/или несинусоидальности сетевых напряжений не способен компенсировать высшие гармоники, даже более того – является дополнительным источником гармоник тока, поэтому его применение нежелательно в таких условиях [15].

При работе компенсатора в условиях несимметричного питающего напряжения использован dq-алгоритм управления. Этот подход позволяет формировать симметричную трехфазную синусоидальную систему токов, независимо от спектра и несимметрии напряжения.

Трехфазная система напряжений и токов преобразуется в систему d (прямой) и q (квадратурной) координат, которая вращается с заданной частотой. Это может быть либо частота первой гармоники при ис-

пользовании алгоритма по основной частоте, или частота выбранной гармоники. Переход в систему d-q-координат выполняется с помощью преобразований Кларка и Парка [16].

Путем использования преобразования Кларка происходит переход от трехфазной системе координат a-b-c к неподвижной системе координат α - β согласно (1). Далее для перехода от α - β к d-q координатам выполнено преобразование Парка:

$$I_{dq} = i_d + j \cdot i_q,$$

где

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos \phi + i_\beta \cdot \sin \phi;$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos \phi - i_\alpha \cdot \sin \phi.$$

$$U_{dq} = u_d + j \cdot u_q,$$

где

$$u_d = u_\alpha \cdot \cos \phi + u_\beta \cdot \sin \phi;$$

$$u_q = u_\beta \cdot \cos \phi - u_\alpha \cdot \sin \phi.$$

В общем случае:

$$S = U_{dq} \cdot I_{dq}^* = (u_d + j \cdot u_q) \cdot (i_d - j \cdot i_q) = p - j \cdot q,$$

где

$$p = u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q;$$

$$q = -u_d \cdot i_q + u_q \cdot i_d.$$

Управление величинами i_d и i_q позволяет регулировать активную и неактивную мощности.

Для осуществления компенсации реактивной мощности необходимо обеспечить нулевую квадратурную составляющую тока ($i_q = 0$), то есть полный ток будет равен синфазной составляющей ($i = i_d$).

Ток i_d содержит постоянную и переменную составляющие, причем постоянная составляющая i_{d_nocm} обеспечивает передачу активной мощности.

Тогда ток компенсатора можно рассчитать как:

$$i_k = (i_d - i_{d_nocm}) + j \cdot i_q. \quad (4)$$

Компенсация РМ и “изоляция” БК от ВГ в условиях несимметричного напряжения сети.

Для реализации данной стратегии управления необходимо обеспечить нулевое значение переменной составляющей тока i_d , т.е. в выражении (4) разность $i_d - i_{d_nocm}$ будет равна нулю.

Имитационное моделирование предложенных стратегий управления.

Корректность предложенных алгоритмов управления ГКРМ в динамических режимах проверена в графической среде имитационного моделирования

Simulink пакета Matlab.

На рис. 5 представлен общий вид модели.

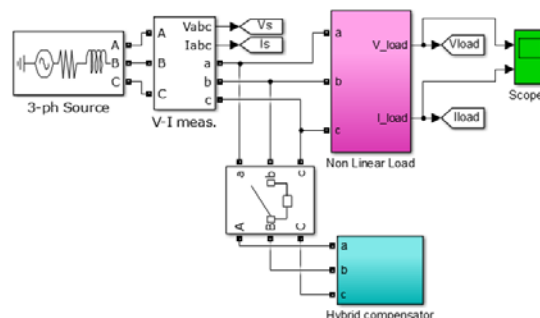


Рисунок 5. Общий вид имитационной модели

Сеть представлена блоком Three-Phase Source, формирующим трехфазную симметричную систему напряжений с частотой 50 Гц. Нелинейная нагрузка моделируется путем комбинированного подключения потребителей двух типов: реактивная составляющая тока создается активно-индуктивной несимметричной нагрузкой (блок Series RLC Load), а несинусоидальность кривой тока получена путем включения шестипульсного выпрямителя, нагруженного на RL-нагрузку.

Подсистема, моделирующая работу ГКРМ, представлена на рис. 6.

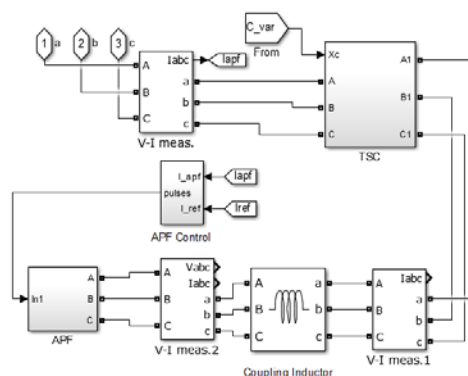


Рисунок 6. Гибридный компенсатор

Блок TSC представляет собой БК с тиристорным переключением (рис.3). Емкости ступеней БК устанавливаются согласно алгоритму [11]. Емкость задания для пассивного фильтра рассчитана согласно [17].

Активный фильтр (блок APF) выполнен на базе автономного инвертора напряжения (блок Universal Bridge 3 arms), для формирования выходного напряжения инвертора заданной формы используется гистерезисное токовое управление (блок APF Control). На выходе инвертора установлен интерфейсный фильтр (блок Coupling Inductor) для сглаживания модуляционных составляющих выходного тока инвертора.

Ток задания компенсатора рассчитывается в соответствии с (3). Данная подсистема изображена на

рис. 7.

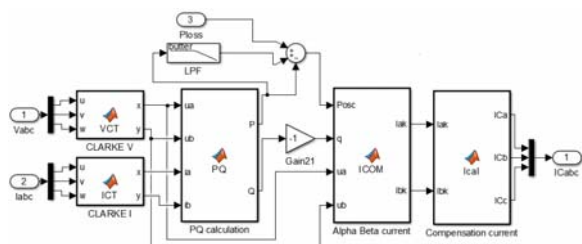


Рисунок 7. Подсистема расчета тока задания компенсатора

Проверена работа схемы для выше описанных стратегий управления.

При рассмотрении первой и второй стратегий управления (при симметричном напряжении сети) в качестве исходных данных приняты диаграммы сетевого напряжения и тока нагрузки, изображенные на рис.8. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока THDI составил 3,71%, коэффициент мощности PF равен 0,502.

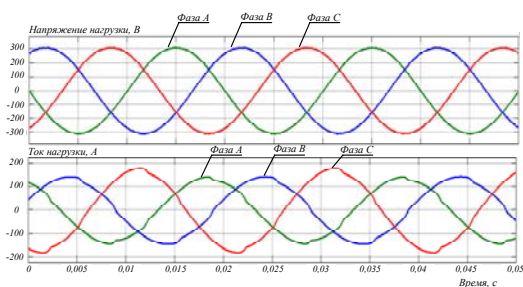


Рисунок 8. Осциллограммы напряжения и тока нагрузки

На рис. 9 изображены напряжение и ток сети, ток компенсатора при выборе первой стратегии управления (компенсация РМ, фильтрация ВГ).

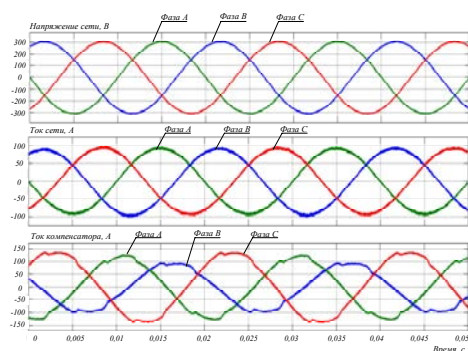


Рисунок 9. Результаты моделирования: напряжение и ток сети, ток компенсатора

Обеспечивается нулевой фазовый сдвиг между напряжением и током сети, выполняется компенсация высших гармоник, входящих в спектр тока нагрузки.

Таким образом, поддерживается синусоидальная форма тока сети. THDI = 2,83%, коэффициент мощности PF = 0,98.

На рис. 10 представлена подсистема расчета тока задания в режиме компенсации РМ и “изоляции” БК от ВГ.

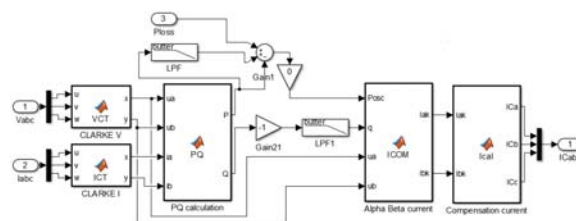


Рисунок 10. Подсистема расчета тока задания компенсатора

На рис. 11 изображены напряжение и ток сети, ток компенсатора. Ток, протекающий через компенсатор, носит синусоидальный характер, то есть БК полностью изолирована от токов ВГ. При этом выполнена компенсация реактивной мощности. По результатам моделирования THDI = 5,18%, коэффициент мощности PF равен 0,97.

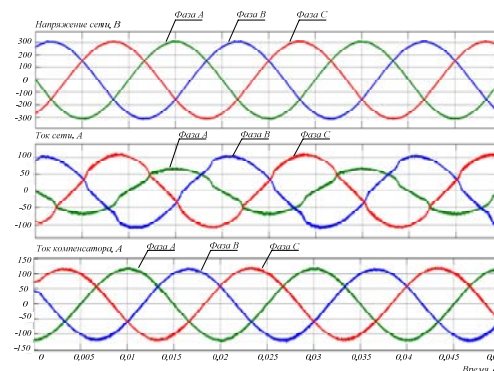


Рисунок 11. Результаты моделирования: напряжение и ток сети, ток компенсатора

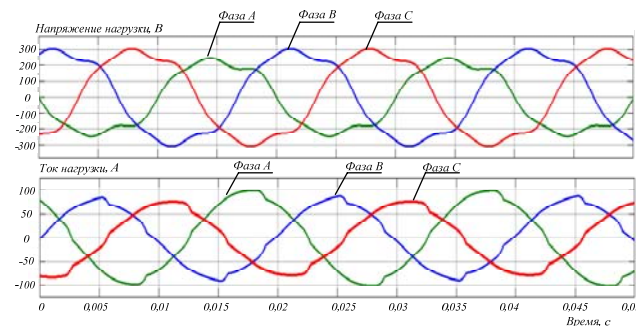


Рисунок 12. Осциллограммы напряжения и тока нагрузки

В условиях несимметрии напряжение сети моделировалось с помощью блока Three-Phase

Programmable Voltage Source, изменение амплитуды напряжения происходило в 0.05 с, 0.1 с и 0.2 с.

На рис. 12 представлены формы напряжения и тока нагрузки, принятые в качестве исходных данных (THDU = 15,26%, THDI = 3,81%, PF = 0,705).

Подсистема расчета тока задания для инвертора в режиме компенсации РМ и фильтрации ВГ показана на рис. 13.

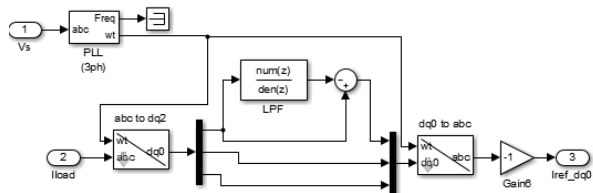


Рисунок 13. Подсистема расчета тока задания

На рис. 14 представлены формы кривых напряжения и тока сети, тока компенсатора (для тока сети THD_I = 3,45%, PF = 0,96).

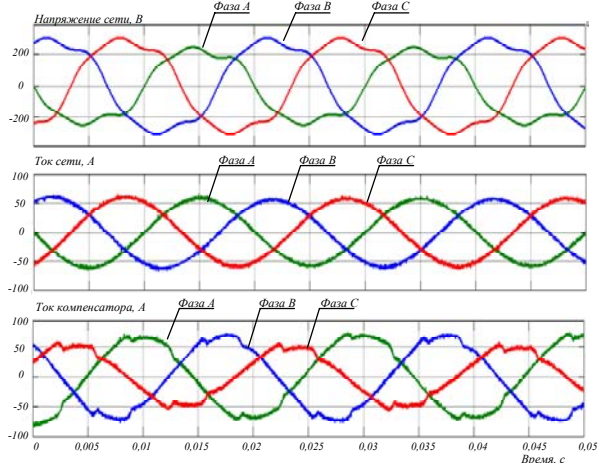


Рисунок 14. Результаты моделирования: напряжение и ток сети, ток компенсатора

Выполнена компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник, поддерживается синусоидальная форма тока сети.

На рис. 15 изображена подсистема расчета тока задания в режиме компенсации РМ и “изоляции” БК от ВГ.

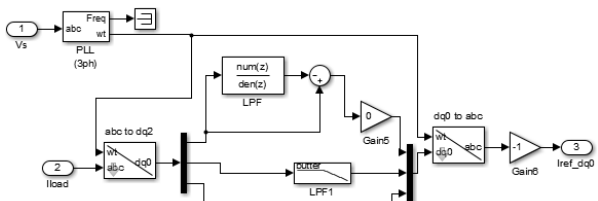


Рисунок 15. Подсистема расчета тока задания

На рис. 16 представлены формы кривых напряжения и тока сети, тока компенсатора (для тока сети

THD_I = 11,21%, PF = 0,92).

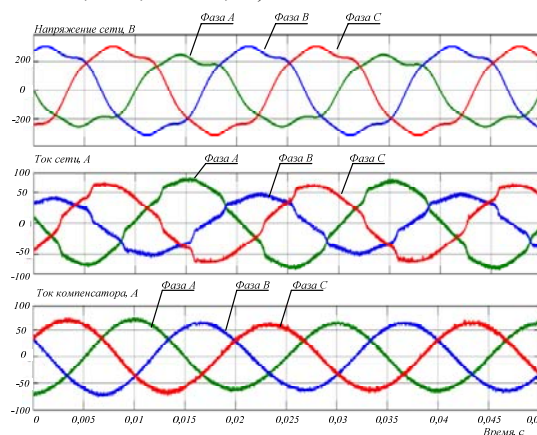


Рисунок 16. Результаты моделирования: напряжение и ток сети, ток компенсатора

Из диаграмм видно, что в рассмотренном режиме сдвиг фаз между напряжением и током сети равен нулю, ток, протекающий через компенсатор, имеет синусоидальную форму, следовательно, обеспечена “изоляция” БК от токов ВГ.

V. ВЫВОДЫ

Проведено исследование эффективности работы гибридного компенсатора реактивной мощности, который представляет собой последовательно соединенные батарею конденсаторов со ступенчатым переключением и активный фильтр высших гармоник. Рассмотрена работа устройства при различных стратегиях управления, в условиях несинусоидального и несимметричного питающего напряжения. Работоспособность предложенных алгоритмов проверена в графической среде имитационного моделирования Simulink пакета Matlab.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кабышев, А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий : учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск, 2012. – 234 с.
- [2] Irinjila, Kranti Kiran. Shunt versus Series compensation in the improvement of Power system performance / Irinjila Kranti Kiran, Jaya Laxmi.A. // International journal of applied engineering research. – 2011. – Vol. 2, № 1. – Pp. 28-37.
- [3] Vijayakumar, T. Harmonics Analysis of Thyristor controlled Reactor circuits / T.Vijayakumar, A.Nirmalkumar // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 2, № 1. – Pp. 190-192.
- [4] Xu, W. Harmonic analysis of systems with static compensators / W. Xu, J.R. Marti, H.W. Dommel // IEEE Transactions on Power Systems. – 1991. – Vol. 6(1). – Pp. 183-190. DOI: 10.1109/59.131061

- [5] Dixon, J. A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter / J. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortuzar, L. Moran, C. Maffrand // 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'01. – Pp. 1150-1155. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119375
- [6] Varschavsky, A. Cascaded Nine-Level Inverter for Hybrid-Series Active Power Filter, Using Industrial Controller / A. Varschavsky, J. Dixon, M. Rotella, L. Morán // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57(8). – Pp. 2761-2767. DOI: 10.1109/tie.2009.2034185
- [7] Litran, S.P. Reference Voltage Optimization of a Hybrid Filter for Nonlinear Load Compensation / S.P. Litran, P. Salmeron // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61(6). – Pp. 2648-2654. DOI: 10.1109/tie.2013.2276078
- [8] Luo, A. Power Electronic Hybrid System for Load Balancing Compensation and Frequency-Selective Harmonic Suppression / A. Luo, S. Peng, C. Wu, J. Wu, Z. Shuai // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59(2). – Pp. 723-732. DOI: 10.1109/tie.2011.2161066
- [9] Wang, L., Lam, C.-S., & Wong, M. C. (2018). Minimizing Inverter Capacity Design and Comparative Performance Evaluation of SVC-Coupling Hybrid Active Power Filters / L. Wang, C.-S. Lam, M.C. Wong // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 1227-1242. DOI:10.1109/tpe.2018.2828159
- [10] Yukiharu, Satake. New Control Strategy for Hybrid Static Var Compensator with Series Active Filters / Yukiharu Satake, Ayumu Tokiwa, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, Mitsunori Fukuda / 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 7-10, 2018. – Korea, 2018. – Pp. 1990-1994. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549156
- [11] Бурлака, В.В. Гибридный компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, О.С. Савенко // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 13-19.
- [12] Миколаєць, Д.А. Застосування р-q теорії для керування трифазним фільтро-компенсуючим перетворювачем / Д.А. Миколаєць, М.О. Мацюк // Електронна та акустична інженерія. – 2018. – №1. – С. 6-12.
- [13] Сінолиций, А.П. Р-Q теорія миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації. Обмеження застосування / А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, В.С. Козлов // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 34-39.
- [14] Afonso, J. L. P-Q power components calculations / Joao L. Afonso, M. J. Sepulveda Freitas, Julio S. Martins // ISIE 2003. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Rio de Janeiro, Brazil, 9-11 June, 2003. – Pp. 123-128. DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267279
- [15] Czarnecki, L.S. On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power Theory / L.S. Czarnecki // IEEE Transactions on Power Electronics, 2004. – Vol. 19(3). – Pp. 828-836. DOI: 10.1109/tpe.2004.826500
- [16] Suru, C.V. The synchronous fundamental dq frame theory implementation and adaptation for the active filtering / C.V. Suru, C.A. Patrascu, M. Linca // International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). – 2014. DOI: 10.1109/icate.2014.6972654
- [17] Savenko, O.S. Control Strategy for Hybrid VAR Compensator / O.S. Savenko, S.K. Podnebenная, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW), October 2-6, 2018. – Kyiv, 2018. – Pp. 93-96.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2019

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

- САВЕНКО О.С.** молодший науковий співробітник кафедри систем автоматизації та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна, e-mail: savenko.olja@gmail.com;
- ПОДНЕБЕННА С.К.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем автоматизації та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна, e-mail: podsvet@gmail.com;
- БУРЛАКА В.В.** д-р техн. наук, доцент, професор кафедри систем автоматизації та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна, e-mail: VladimirV.Burlaka@gmail.com;

Мета роботи. Дослідження ефективності роботи гібридного компенсатора реактивної потужності (ГКРП), що представляє собою послідовно з'єднані батарею конденсаторів (БК) зі ступінчастим перемиканням і активний фільтр вищих гармонік, з різними стратегіями управління, при несинусоїдальній і / або

несиметричній напрузі мережі, в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab.

Методи дослідження. Методи електротехніки, методи чисельного моделювання, методи теорії перетворення систем координат, методи матричних перетворень.

Отримані результати. Розглянуто кілька стратегій управління ГКРП: при роботі в режимі компенсації реактивної потужності з ізоляцією БК від вищих гармонік; при роботі в режимі активної фільтрації (АФ) вищих гармонік. Для розрахунку необхідної ємності БК і струму завдання АФ розглянуті теорія миттєвої потужності ($p-q$ теорії) і $d-q$ теорія по основній частоті. Перевірка ефективності розглянутих стратегій управління виконана в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab. Синтезовані імітаційні моделі, що дозволяють якісно оцінити ефективність роботи ГКРП при різних стратегіях управління. Встановлено, що в умовах несиметрії і / або несинусоїдальності напруги мережі систему управління компенсатором доцільно синтезувати з використанням $d-q$ теорії по основній частоті. В процесі моделювання встановлено, що запропонований ГКРП дозволяє забезпечити плавне регулювання реактивної потужності, при цьому потужність АФ становить не більше 10% від загальної потужності ГКРП (для заданих параметрів моделювання). При роботі в режимі активної фільтрації вищих гармонік ГКРП також показав високу ефективність, потужність АФ склала не більше 20% від загальної потужності компенсатора. Для ілюстрації ефективності підходу приведені діаграми струмів і напруг, розраховані коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму мережі (THD_I) і коефіцієнт потужності комплексу ГКРП + нелінійне навантаження.

Наукова новизна. Отримав подальший розвиток спосіб управління ГКРП, що полягає в спільному управлінні БК зі ступінчастим перемиканням і АФ: 1) за умовою компенсації реактивної потужності та ізоляції БК від вищих гармонік; 2) за умовою компенсації вищих гармонік струму (працюючи в режимі паралельно-го активного фільтра).

Практична цінність. Розроблено імітаційну модель гібридного компенсатора реактивної потужності, яка реалізує кілька стратегій управління. Перевірено роботу компенсатора при несинусоїдальній і / або несиметричній напрузі мережі. Підтверджено ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: батарея конденсаторів; активний фільтр; реактивна потужність; імітаційне моделювання; вищі гармоніки; несиметрія.

IMITATION MODELING OF THE HYBRID VAR COMPENSATOR

- SAVENKO O.S. Junior research fellow of the of the department of automation systems and electric drives of the SHEI "Pryazovskyi State Technical University", Mariupol, Ukraine, e-mail: savenko.olja@gmail.com;
- PODNEBENNAYA S.K. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of automation systems and electric drives of the SHEI "Pryazovskyi State Technical University", Mariupol, Ukraine, e-mail: podsvet@gmail.com;
- BURLAKA V.V. Sci.D, Associate professor, professor of the department of automation systems and electric drives of the SHEI "Pryazovskyi State Technical University", Mariupol, Ukraine, e-mail: VladimirV.Burlaka@gmail.com;

Purpose. Study of the effectiveness of the hybrid VAR compensator, which consists of series-connected capacitor bank (CB) with discrete regulation and active filter of higher harmonics, with different control strategies, under asymmetrical and / or non-sinusoidal grid voltage and loads, in a graphical programming environment Matlab Simulink.

Methodology. Methods of electrical engineering, numerical modeling methods, methods of the theory of coordinate systems transformation, methods of matrix transformations.

Findings. Several control strategies for hybrid VAR compensator are considered: operating in the mode of reactive power compensation with isolation of CB from higher harmonics; working in the mode of active filtering (AF) of higher harmonics. To calculate the required capacitance of the CB and the reference current of AF, the instantaneous power theory ($p-q$ theory) and $d-q$ theory on the fundamental frequency are considered. The effectiveness check of the considered control strategies was performed in the graphical programming environment Matlab Simulink. Simulation models that allow a qualitative assessment of the effectiveness of the hybrid VAR compensator work with various control strategies have been synthesized. It has been established that, under the conditions of asymmetry and / or non-sinusoidality of the grid voltage, it is advisable to synthesize the control system for the compensator using the $d-q$ theory for the fundamental frequency. In the process of modeling, it has been established that the proposed hybrid VAR compensator allows the smooth regulation of reactive power, while the AF power is not more than 10% of the total VAR compensator power (for given simulation parameters). When operating in the filtering of higher harmonics mode, the VAR compensator also showed high efficiency, the AF power was not more than 20% of the total compensator power.

er. To illustrate the effectiveness of the approach, the diagrams of currents and voltages are given, Total Harmonic Distortion (THD) and the power factor of the complex «VAR compensator + nonlinear load» are calculated.

Originality. The control method for VAR compensator was further developed. It consists in the joint control of CB with discrete regulation and AF: 1) according to the condition of reactive power compensation and «isolation» of CB from higher harmonics; 2) according to the condition of compensation of higher harmonics of the current (working in the parallel active filter mode).

Practical value. A simulation model of a hybrid reactive power compensator has been developed, which implements several control strategies. The operation of the compensator was checked under asymmetrical and / or non-sinusoidal grid voltage. The effectiveness of the proposed approach is confirmed.

Keywords: capacitor bank; active filter; reactive power; imitation modeling; higher harmonics; asymmetry.

REFERENCES

- [1] Kabyshev, A.V. (2012). Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriatii : uchebnoe posobie. Tomsk. 234.
- [2] Irinjila Kranti Kiran, Jaya Laxmi. A. (2011). Shunt versus Series compensation in the improvement of Power system performance. *International journal of applied engineering research*, 2, 1, 28-37.
- [3] Vijayakumar, T., Nirmalkumar, A. (2010). Harmonics Analysis of Thyristor controlled Reactor circuits. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2, 1, 190-192.
- [4] Xu, W., Marti, J.R., Dommel, H.W. (1991). Harmonic analysis of systems with static compensators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1), 183-190. DOI: 10.1109/59.131061
- [5] Dixon, J., del Valle, Y., Orchard, M., Ortuzar, M., Moran, L., Maffrand, C. (2001). A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter. *27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'01*, 1150-1155. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119375
- [6] Varschavsky, A., Dixon, J., Rotella, M., Morán, L. (2010). Cascaded Nine-Level Inverter for Hybrid-Series Active Power Filter, Using Industrial Controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(8), 2761-2767. DOI: 10.1109/tie.2009.2034185
- [7] Litran, S.P., Salmeron, P. (2014). Reference Voltage Optimization of a Hybrid Filter for Nonlinear Load Compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2648-2654. DOI: 10.1109/tie.2013.2276078
- [8] Luo, A., Peng, S., Wu, C., Wu, J., Shuai, Z. (2012). Power Electronic Hybrid System for Load Balancing Compensation and Frequency-Selective Harmonic Suppression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 723-732. DOI: 10.1109/tie.2011.2161066
- [9] Wang, L., Lam, C.-S., Wong, M.C. (2018). Minimizing Inverter Capacity Design and Comparative Performance Evaluation of SVC-Coupling Hybrid Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 2, 1227-1242. DOI:10.1109/tpel.2018.2828159
- [10] Yukiharu, Satake, Ayumu, Tokiwa, Hiroaki, Yamada, Toshihiko, Tanaka, Mitsunori, Fukuda. (2018). New Control Strategy for Hybrid Static Var Compensator with Series Active Filters. *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, October 7-10, 2018, 1990-1994. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549156
- [11] Burlaka, V., Gulakov, S., Podnebennaya, S., & Savenko, O. (2014). Reactive power compensator with smooth control. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 13-19. doi:10.15588/1607-6761-2014-2-2
- [12] Mikolaets', D.A., Matsiuk, M.O. (2018). Application of the p-q theory to control a three-phase filter-compensating converter. *Electronic and Acoustic Engineering*, 1, 6-12. (in Ukrainian.)
- [13] Sinolitsii, A.P., Kol'sun, V.A., Kozlov, V.S. (2013). P-Q teoriiia mittevoi potuzhnosti dlia pristroiv aktivnoi fil'tratsii. Obmezhennia zastosuvannia [P-Q theory for active power filters. Limitation of application]. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 34-39. (in Ukrainian.)
- [14] Afonso, J. L., Sepulveda Freitas M. J., Martins, Julio S. (2003). P-Q power components calculations. *ISIE 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 123-128. DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267279
- [15] Czarnecki, L.S. (2004). On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power Theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(3), 828-836. DOI: 10.1109/tpel.2004.826500
- [16] Suru, C.V., Patrascu, C.A., Linca M. (2014). The synchronous fundamental dq frame theory implementation and adaptation for the active filtering. *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. DOI: 10.1109/icate.2014.6972654
- [17] Savenko, O.S., Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. (2018). Control Strategy for Hybrid VAR Compensator. *IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW)*, October 2-6, 2018, 93-96.