

- inactive parts of turbogenerators / V.V. Kuzmin, V.V. Shevchenko, A.N. Minko // Vestnik NTU «KPI». The Energy and the heat engineering processes and the equipment. – 2011. – № 6. – Pp. 106-112. (Rus.)
5. Kuzmin V.V. Optimizing the weight and size parameters inactive parts of turbogenerators: monograph / V.V. Kuzmin, V.V. Shevchenko, A.N. Minko. – Kharkov: Monograph SPDFD Chalchev A.V., 2012. – 246 p. (Rus.)
 6. Shevchenko V.V. Definition of criteria for assessing the state of turbo-generators to establish their replacement or rehabilitation / V.V. Shevchenko // Proceedings of the National Technical University «KPI». Section : Problems of improving electrical machinery and apparatus. Theory and Practice / NTU «KPI». – Kharkov, 2012. – № 61 (967). – Pp. 44-50. (Rus.)

Рецензент: Т.П. Павленко
д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

Статья поступила 17.02.2015

УДК 621.316

© Поднебенная С.К.*

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статье рассмотрены особенности компенсации реактивной мощности резкопеременных нагрузок. Для обеспечения компенсации реактивной мощности и минимизации потерь мощности в сети требуется устанавливать устройства компенсации. Установленная мощность таких устройств должна быть рассчитана с учетом несимметричного потребления / генерации реактивной мощности по фазам. В качестве устройств компенсации реактивной мощности можно использовать тиристорно-управляемые реакторы, тиристорно-переключаемые конденсаторы, гибридные компенсаторы реактивной мощности, активные компенсаторы (СТАТКОМы), «динамические конденсаторы». Проведен технико-экономический анализ, в результате которого установлены перспективы дальнейших исследований в направлении повышения энергоэффективности электрических сетей путем разработки эффективных устройств компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: реактивная мощность, устройство компенсации реактивной мощности, «динамический конденсатор».

Поднебенна С.К. До питання підвищення ефективності компенсації реактивної потужності. У даній статті розглянуті особливості компенсації реактивної потужності різкозмінних навантажень. Для забезпечення компенсації реактивної потужності та мінімізації втрат потужності в мережі потрібно встановлювати пристрої компенсації. Встановлена потужність таких пристроїв має бути розрахована з урахуванням несиметричного споживання / генерації реактивної потужності по фазах. В якості пристроїв компенсації реактивної потужності можна використовувати тиристорно-керовані реактори, конденсатори з тиристорним перемиканням, гібридні компенсатори реактивної потужності, активні компенсатори (СТАТКОМи), «динамічні конденсатори». Проведено техніко-економічний аналіз, в результаті якого встановлено перспективи подальших досліджень у напрямку підвищення енергоефективності електричних мереж шляхом розробки ефективних пристроїв компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: реактивна потужність, пристрій компенсації реактивної потуж-

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

ності, «динамічний конденсатор».

S.K. Podnebenna. To the issue of increasing efficiency of VAR compensation. This article describes the features of VAR compensation of variable loads. One of the most common non-symmetric non-linear power consumers are welding power sources. Time and duration of the work of these sources vary randomly. To compensate the consumption of reactive power on the basis of consumption data from the three-phase electricity meters is inefficient. Compensation devices power should be calculated taking into account the asymmetrical consumption/generation of reactive power per phase and changing consumption patterns. Thyristor-controlled reactor, thyristor-switched capacitors, hybrid VAR compensators, active compensators (STATCOMs), «dynamic capacitors» can be used as the VAR compensation devices. Thyristor-controlled reactors can provide smooth regulation of reactive power, but they have high weight and size parameters and are additional sources of higher harmonics. Thyristor-switched capacitors provide stepwise adjustment of reactive power and are subject to the current higher harmonics. Hybrid VAR compensators make it possible to isolate capacitors from the higher harmonics and ensure smooth regulation, which is achieved by active filter introduction to the reactive power compensation devices based on thyristor-switched capacitors. However, this increases the cost of a compensator and complicates its control system. STATCOMs provide smooth regulation of reactive power, but they are too expensive. Perspective direction in the development of effective VAR compensation devices is «dynamic capacitor». As a result of a feasibility study the prospects for further research of electrical grids power efficiency through the development of effective devices for VAR compensation have been established.

Keywords: reactive power, VAR compensator, «dynamic capacitor».

Постановка проблеми. Повышение энергоэффективности электрических сетей является одной из наиболее важных задач электроэнергетики. В последнее время значительно выросла доля электроприемников, потребляющих переменную реактивную мощность (РМ) и/или несинусоидальный ток, инжектирующих в сеть высокочастотные составляющие. Применение известных подходов, основанных на применении пассивных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (ФКУ и СУ), особенно в сетях низкого напряжения, не всегда эффективно, а применении активных ФКУ и СУ – слишком дорого. В этих условиях исследования и разработка альтернативных ФКУ и СУ, позволяющих повышать энергоэффективность электрических сетей, и при этом удовлетворять требованиям экономики, являются актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций. Одними из наиболее распространенных потребителей, негативно влияющих на качество электрической энергии энергосистемы в целом, являются сварочные источники питания. Так, в условиях крупных предприятий машино-, судо-, автомобилестроения количество сварочных источников питания может исчисляться тысячами, при этом их время и продолжительность включения носят случайный характер. Кроме того, распределение сварочных источников по фазам зачастую несимметрично, что также негативно влияет на показатели качества электроэнергии.

На сегодняшний день показатели качества электроэнергии в Украине нормируются ГОСТ 13109-97, однако отсутствие законодательной основы соблюдения этих требований приводит к тому, что проблемы высших гармоник, несимметрии, и, как следствие, провалов, отклонений, колебаний напряжения в электрических сетях с каждым годом становятся все серьезнее. Энергоснабжающие компании мотивируют потребителей электроэнергии устанавливать устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), что должно приводить к снижению потерь мощности в сети [1, 2]. При этом выбор мощности компенсирующих устройств зачастую производится на основании показаний трехфазных счетчиков электроэнергии и не учитывает неравномерную загрузку фаз [3-5]. Такой «калькуляторный» метод расчета и выбора компенсирующих устройств приводит к тому, что, несмотря на видимую компенсацию РМ, желаемой разгрузки линий электропередач от реактивного тока не происходит.

Цель статьи. Повышение эффективности компенсации РМ является актуальной задачей и составляет цель данной работы.

Изложение основного материала. В качестве примера источника нелинейных искажений и потребителя реактивной мощности рассмотрим подключение сварочного источника питания ТДЭ-250 (рис. 1), нагруженного на активное сопротивление (балластный реостат РБ-300). Указанный источник содержит однофазный трансформатор с тиристорным регулированием на стороне переменного тока и включается на линейное напряжение [6].

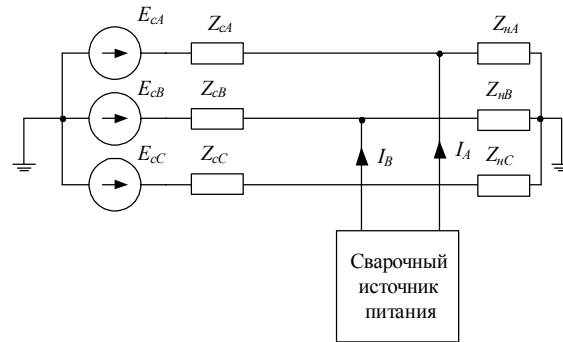


Рис. 1 – Подключение сварочного трансформатора ТДЭ-250 в сеть 0,4 кВ

Источник предназначен для ручной дуговой сварки, наплавки и резки стальных конструкций толщиной от 1 до 8 мм покрытыми металлическими электродами диаметром от 3 до 5 мм, широко используется в быту и на производстве [6].

Осциллографирование проводилось при помощи цифрового осциллографа АКТАКОМ АСК-2034. Данные осциллографирования были экспортированы в Mathcad. Осциллограммы первичных токов в фазах А и В приведены на рис. 2, а спектр тока I_A – на рис. 3.

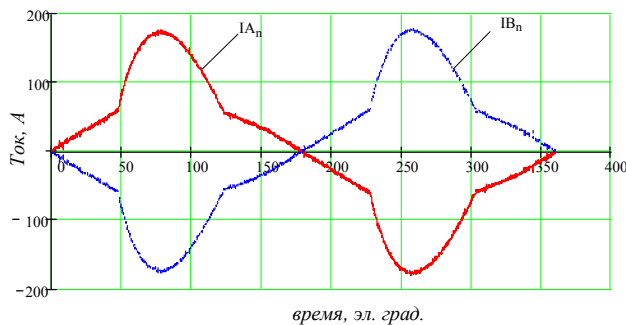


Рис. 2 – Осциллограммы токов при подключении сварочного источника ТДЭ-250

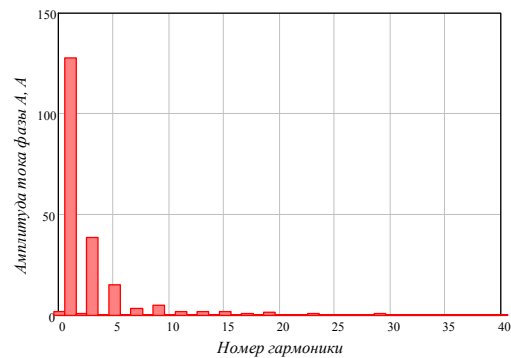


Рис. 3 – Спектрограмма тока I_A

При практическом применении такого источника в качестве нагрузки выступает сварочная дуга, которая вносит еще большие искажения ввиду своей нелинейной вольт-амперной характеристики и флуктуации процесса при ручной сварке.

В соответствии с [7], активная P_1 и реактивная Q_1 мощности определяются как составляющие «фундаментальной» полной мощности:

$$S_1^2 = (U_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 = (U_1 I_1 \cos \phi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \phi_1)^2, \quad (1)$$

где U_1 – среднеквадратичное напряжение на основной частоте (первой гармонике), В, I_1 – среднеквадратичный ток на основной частоте (первой гармонике), А, ϕ_1 – угол сдвига фаз между составляющими тока и напряжения на основной частоте (первой гармонике).

В дальнейшем расчеты и векторные диаграммы будут приводиться для составляющих на основной частоте.

Схема подключения трехфазного УКРМ для компенсации РМ приведена на рис. 4. При этом УКРМ может быть как пассивным, так и активным.

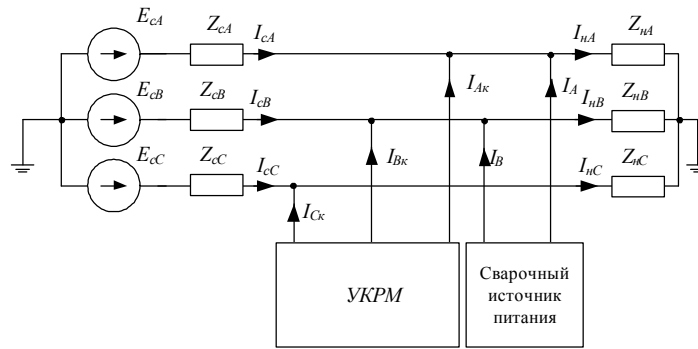


Рис. 4 – Подключение симметричного УКРМ для компенсации РМ сварочного трансформатора ТДЭ-250

Для определения оптимального метода компенсации РМ в качестве критерия оптимизации выберем минимум функции f , равной сумме квадратов токов комплекса «сварочный трансформатор + УКРМ»:

$$f = I_{A^*}^2 + I_{B^*}^2 + I_{C^*}^2, \quad (2)$$

где $I_{A^*} = I_A + I_{Aк}$, $I_{B^*} = I_B + I_{Bк}$, $I_{C^*} = I_C + I_{Cк}$ – результирующие токи комплекса «сварочный трансформатор + УКРМ»; $I_{Aк}$, $I_{Bк}$, $I_{Cк}$ – токи от УКРМ.

Рассчитав потребляемую РМ как алгебраическую сумму потребленных/сгенерированных реактивных мощностей каждой из фаз, можно рассчитать требуемую мощность трехфазного симметричного пассивного УКРМ, и генерируемый реактивный ток. На рис. 5 приведена совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений, позволяющая добиться полной компенсации РМ. Звездочкой отмечены результирующие токи нагрузки после компенсации РМ.

Для рассмотренного спектрального состава токов такой подход привел к снижению суммы квадратов токов, потребляемых комплексом «сварочный трансформатор + УКРМ», в 1,087 раза.

Рассмотрим вариант пофазной компенсации РМ. Такой подход можно реализовать при подключении несимметричного пассивного УКРМ, соединенного треугольником или звездой. Емкости УКРМ по фазам устанавливаются в соответствии с требуемой реактивной мощностью, рассчитанной по (1). Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений при подключении такого УКРМ приведена на рис. 6. Такой подход позволяет добиться снижения суммы квадратов токов, потребляемых комплексом «сварочный трансформатор + УКРМ», в 1,433 раза.

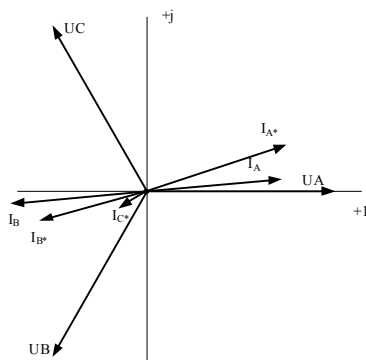


Рис. 5 – Векторная диаграмма токов и напряжений для симметричного УКРМ

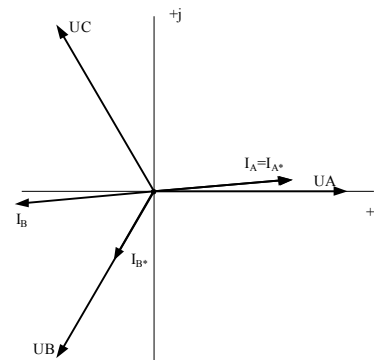


Рис. 6 – Векторная диаграмма токов и напряжений для несимметричного УКРМ

При подключении УКРМ, позволяющего пофазно компенсировать как индуктивный, так и емкостный ток нагрузки, можно добиться единичного $\cos \phi_1$ по всем фазам.

При этом снижение суммы квадратов токов, потребляемых комплексом «сварочный трансформатор + УКРМ», возможно в 1,441 раза.

Таким образом, видно, что минимизация суммы квадратов токов, потребляемых комплексом «сварочный трансформатор + УКРМ», достигается при пофазной компенсации реактивной мощности.

В качестве практической реализации УКРМ для пофазной компенсации РМ возможно использование компенсаторов с тиристорным управлением, статических компенсаторов (СТАТКОМов) и активных фильтров. Основным недостатком активных УКРМ является их высокая стоимость, поэтому более широкое распространение в промышленности получили УКРМ с тиристорным управлением, к которым относятся тиристорно-управляемые реакторы (ТУР) и тиристорно-переключаемые конденсаторы (ТПК) [8-10].

В состав устройства ТУР входят конденсатор фиксированной емкости и реактор с тиристорным управлением (рис. 7). Изменением угла открытия тиристоров можно регулировать действующий ток реактора, что эквивалентно регулированию его индуктивности. Такие КРМ позволяют добиться непрерывности процесса управления, обладают высоким быстродействием и практически полным отсутствием переходных процессов, однако, поскольку ТУР являются источниками токов высших гармоник, они требуют установки дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств [9].

ТПК (рис. 8) состоит из БК с тиристорным переключением ступеней и дросселей, служащих для ограничения скорости изменения тока тиристоров и/или расстройки БК для предотвращения резонансов. Для обеспечения «мягкого» включения тиристоров их отпирание производится в момент равенства мгновенного напряжения сети и напряжения на конденсаторе.

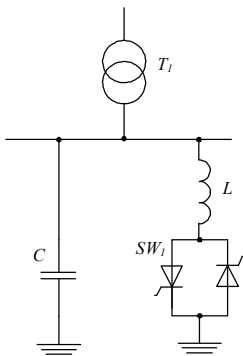


Рис. 7 – УКРМ на базе ТУР

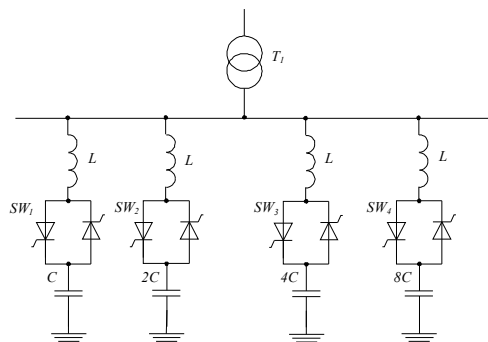


Рис. 8 – УКРМ на базе ТПК

Устройства на базе ТПК обладают возможностью ступенчатого регулирования реактивной мощности, высоким быстродействием и не генерируют высшие гармоники в сеть.

Для обеспечения плавного регулирования и снижения влияния высших гармоник на батареи конденсаторов можно применить гибридный УКРМ, подключив к ТПК последовательный активный фильтр (АФ) малой мощности (рис. 9) [10].

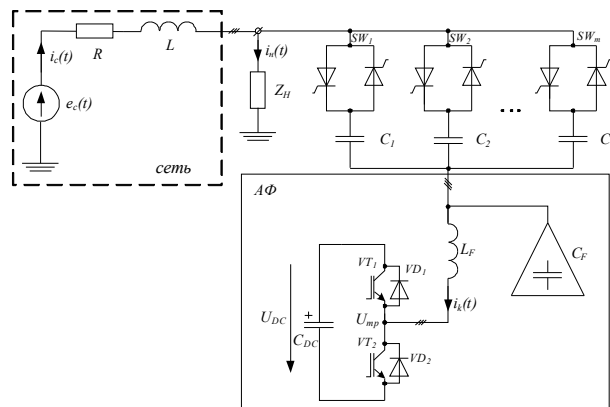


Рис. 9 – Однофазная схема силовой части гибридного УКРМ

Перспективним вариантом практической реализации УКРМ является применение так называемых «тонких» преобразователей переменного тока (Thin AC Converter, ТАСС) [11]. 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 УКРМ представляет схема, основанная на buck-преобразователе (рис. 10).

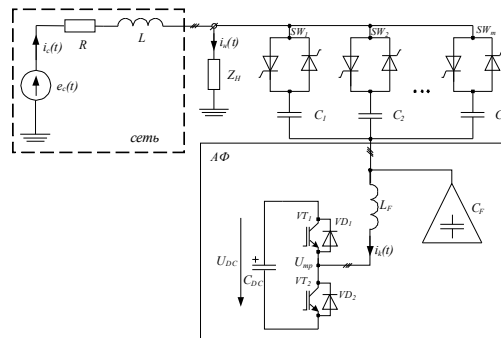


Рис. 10 – Схема однофазного «динамического конденсатора» на основе buck-преобразователя

По своим свойствам «динамический конденсатор» подобен СТАТКОМу, однако ввиду отсутствия накопителя энергии в звене постоянного тока, управление каждой фазой осуществляется без взаимодействия с другими [12].

Изменением скважности открытия двунаправленных ключей (S1S2 и S3S4) можно обеспечить плавное регулирование реактивной мощности.

Если скважность управляющих импульсов двунаправленного ключа S1S2 $K_0 = const$ при достаточно высокой частоте переключения, то можно записать выражения для напряжения на конденсаторе U_C и локального среднего тока через ключи S1S2 I_X :

$$u_c(t) = K_0 \cdot u_s(t) = K_0 \cdot U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (3)$$

где $u_s(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ – мгновенное фазное напряжение сети, В.

$$i_x(t) = K_0 \cdot i_c(t) = K_0 \cdot C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} = K_0^2 \cdot \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos(\omega t). \quad (4)$$

Реактивная мощность такого УКРМ равна номинальной мощности батареи конденсаторов Q_C , умноженной на квадрат скважности управляющих импульсов двунаправленного ключа S1S2:

$$S_{D-CAP} = U_{Srms} \cdot I_{Xrms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{K_0^2 \cdot U_m}{\sqrt{2} \cdot X_C} = K_0^2 \cdot \frac{U_m^2}{2 \cdot X_C} = K_0^2 \cdot Q_C. \quad (5)$$

Результаты технико-экономического сравнения различных вариантов УКРМ для решения задачи пофазной компенсации реактивной мощности приведены в таблице. Для сравнения рассмотрены трехфазные УКРМ мощностью 500 кВАр для сети напряжением 0,4 кВ. Экономические показатели приведены с учетом стоимости составляющих УКРМ и в соответствии с [12].

Таблица

Показатели технико-экономического сравнения УКРМ

Вид УКРМ / Показатель	ТУР	ТПК	Гибридный ТПК с АФ	СТАТКОМ	«Динамический конденсатор»
Количество конденсаторов для коррекции коэффициента мощности (трехфазных)	1	6(8)	6(8)	-	1

Продолжение таблицы

Емкость конденсаторов, мФ	5,7 на фазу	5,7 на фазу	5,7 на фазу	5,4 (в звене постоянного тока)	5,7 на фазу
Установленная мощность индуктивных компонентов, кВАр	500	25 ... 100 (расстроенные реакторы)	25 ... 80	5 ... 15	5 ... 15
Число тиристоров	3	36...48	36...48	-	1(6)
Число и мощность IGBT	-	-	6 50...100А	6 300...600 А	12 300...600 А
Плавность регулирования	Да	Нет	Да	Да	Да
Время отклика, с	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002
Инжекция высших гармоник тока в сеть	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Возможность фильтрации высших гармоник	Нет	Нет	Да	Да	Да*
Стоимость	Средняя/ Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая

Выводы

1. Для компенсации РМ резкопеременных нагрузок, например, сварочных источников питания, целесообразна пофазная компенсация, которая обеспечит минимизацию потерь мощности в сети.

2. Для пофазной компенсации РМ целесообразно использовать «динамические конденсаторы», поскольку они обладают наилучшим соотношением «цена / эффективность» по сравнению с другими УКРМ, такими как тиристорно-управляемые реакторы, тиристорно-переключаемые конденсаторы, гибридные ТПК с активным фильтром, СТАТКОМы.

Список использованных источников:

1. Правила пользования электрической энергией / Нацкомэлектроэнергетики. – Харьков: Форт, 2010. – 164 с.
2. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами / Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики України 17 січня 2002 р. N 19, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за N 93/6381.
3. Веприк Ю.Н. Выбор оптимальных мест установки компенсирующих устройств в электрических сетях / Ю.Н. Веприк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ» – №41. – 2011. – С. 36-41.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – Изд. 6-ое, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
5. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
6. Голошубов В.І. Зварювальні джерела живлення: навчальний посібник / В.І. Голошубов. – К.: Арістей, 2005. – 448 с.

7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459-2010, New York, 2010.
8. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review / J.W. Dixon, L. Moran, J. Rodríguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – 2005 – Vol.93, Dec. – № 12. – Pp. 2144-2164.
9. Давидов О.Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О.Ю. Давидов, О.В. Бялобржеський // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3(62). – С. 132-136.
10. Burlaka V.V. Hybrid VAR compensator with improved efficiency / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya, O.S. Savenko // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2014. – Вип. 29. – С. 174-180.
11. Prasaj A. Control of Dynamic Capacitor / Anish Prasai, Deepak M. Divan // IEEE transactions on industry applications. – Vol. 47, № 1, January/February. – 2011. – Pp. 161-168.
12. Prasaj A. Dynamic Capacitor (D-CAP): An Integrated Approach to Reactive and Harmonic Compensation / Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan // IEEE transactions on industry applications. – Vol. 46, № 6, November/December. – 2010. – Pp. 2518-2525.

Bibliography:

1. Terms of use of electrical energy / Natskomelektroenergetiki. – Kharkov: Fort, 2010. – 164 p. (Rus.)
2. Method of calculating payments for reactive power flow for Electricity between an organization and its customers / Approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine on January 17 2002 g. N 19, registered with the Ministry of Justice of Ukraine on February 1, 2002 for N 93/6381. (Ukr.)
3. Veprik Yu.N. Selecting the optimum installation locations of compensating devices in electric networks / Yu.N. Veprik // Reporter of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»: Collection of scientific works. Special Issue : Energy : Reliability and Energy Efficiency. – Kharkiv: NTU «KHPI». – №41. – 2011. – P. 36-41. (Rus.)
4. Zhezhelenko I.V. The higher harmonics in power supply systems, industrial enterprises / I.V. Zhezhelenko. – Edition 6-th, revised and expanded. – M.: Energoatomizdat, 2010. – 375 p. (Rus.)
5. Zhezhelenko I.V. Power quality in industrial enterprises / I.V. Zhezhelenko, Yu.L. Sayenko. – Edition 4-th, revised and expanded. – M.: Energoatomizdat, 2005. – 261 p. (Rus.)
6. Golosubov V.Í. Welding Power Supply: tutorial. – K.: Aristey, 2005. – 448 p. (Rus.)
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459-2010, New York, 2010.
8. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review / J.W. Dixon, L. Moran, J. Rodríguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – 2005 – Vol.93, Dec. – № 12. – Pp. 2144-2164.
9. Davidov O.Yu. Analysis of reactive power compensation in electrical systems / O.Yu. Davidov, O.V. Byalobrzheskiy // Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo. – 2010. – Issue 3(62). – P. 132-136. (Ukr.)
10. Burlaka V.V. Hybrid VAR compensator with improved efficiency / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya, O.S. Savenko // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – Mariupol, 2014. – Issue 29. – P. 174-180.
11. Prasaj A. Control of Dynamic Capacitor / Anish Prasai, Deepak M. Divan // IEEE transactions on industry applications. – Vol. 47, № 1, January/February. – 2011. – Pp. 161-168.
12. Prasaj A. Dynamic Capacitor (D-CAP): An Integrated Approach to Reactive and Harmonic Compensation / Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan // IEEE transactions on industry applications. – Vol. 46, № 6, November/December. – 2010. – Pp. 2518-2525.

Рецензент: И.В. Жежеленко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.05.2015