

УДК 621.314.25

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.20

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

Е. В. ЯГУП*Кафедра «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика», УкрДУЗТ, г. Харьков, УКРАИНА*

АННОТАЦИЯ Рассматривается оптимизация режима работы трехфазной сети электроснабжения с неравномерной активно-индуктивной нагрузкой. Возникающая при этом несимметрия сетевых токов и реактивная мощность устраняются с помощью активного фильтра, представляющего собой мостовой инвертор на IGBT-транзисторах. Управление ключами инвертора осуществляется системой управления с использованием широтно-импульсной модуляции по гистерезисному принципу. Для оптимизации режима системы используется соответствующая визуальная модель и оптимизационный алгоритм деформируемого многогранника. Оптимизация режима осуществляется путем стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе.

Ключевые слова: активный фильтр; оптимизация; несимметрия; реактивная мощность; система электроснабжения.

OPTIMIZATION OF MODE OF UNBALANCED THREE-PHASE SYSTEM USING ACTIVE FILTER AND MODIFY CONTROL ALGORITHM

E. YAGUP*Department "Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics", Ukrainian State University of Railway Transport (USURT), Kharkov, UKRAINE*

ABSTRACT The optimization of operating modes of three-phase power supply network with unbalance active-inductive load is considered. Increase of line currents amplitudes and emergence of reactive power take place in such mode. These cases cause as losses in power line, as harm for its consumers. Therefore the problem, which is under consider, is actual. The resulting asymmetry of this line currents and reactive power are compensated with using a parallel active filter, which is a bridge inverter on the IGBT-transistors. Control of inverter keys is carried out by the control system with the implementation of the pulse-width modulation on hysteresis principle. A result of comparison of line current and signal from the reference current source is supplied on hysteresis element. Whereby pulses of various widths are formed, which control inverter switches so as to form an acceptable mode of operation of the network. The corresponding visual model and the optimization algorithm of the flexible polyhedron are used to optimize the system mode. The optimization is carried out by stabilization of the voltage reservoir capacitor, and optimization parameters are the amplitude of signal of reference current source and the initial capacitor voltage. The stabilization of capacitor voltage is realized by means of mathematical operations with the values of the capacitor voltage measured at the end of each oscillation period. As a result of search optimization take place complete balancing of the network currents, their amplitude decreased in four times, the reactive power has been reduced to zero, and the optimal initial voltage of the capacitor has reduced the transient current amplitude and in its mode.

Keywords: active filter; search optimization; unbalance; reactive power; the system of electric supply.

Введение

Несимметричный режим работы систем электроснабжения распространен в системах железнодорожного транспорта, сельскохозяйственных системах, а так же в системах электроснабжения коммунального хозяйства, где преобладает нагрузка одной из фаз. Это вызывает такие негативные последствия, как возникновение реактивной мощности, увеличение амплитуд сетевых токов, что в свою очередь приводит к потерям в электрической сети, и так же сокращению срока службы оборудования, подключенного к таким сетям. Поэтому проблема симметрирования токов и компенсация реактивной мощности в сетях с неравномерной нагрузкой фаз является актуальной.

Анализ последних публикаций

Для оптимизации работы сети электроснабжения с несимметричной нагрузкой используются симметрирующие устройства, которые представляют собой межфазные конденсаторы [1, 2]. В последнее время стали широко применяться силовые активные фильтры, представляющие собой мостовые инверторы [3 – 11]. Управление такими фильтрами выполняется широтно-импульсной модуляцией, реализация которой осуществляется с помощью достаточного сложных систем управления, например основанный на теории мгновенной мощности с преобразованием сигналов трехфазной системы в двухфазную [5, 9, 10].

Для управления активным фильтром в [11, 12] успешно использовались оптимизационные алгоритмы. Однако в [12] рассматривалась однофазная

© Е. В. ЯГУП, 2016

система. В [11] оптимізація здійснювалась по критерію урівнювання активних потужностей на стороні навантаження і на стороні джерел електричної енергії системи електропостачання. При цьому початкове напруга на накопительному конденсаторі задавалось рівним нулю, що приводило до зростання амплітуд мережних токів в процесі переходного процесу. Слід зауважити, що в [11] оговаривается, що виконання оптимізації можна так же виконувати по критерію встановлення напруги на накопительному конденсаторі активного фільтра.

Целью статьи является разработка метода оптимізації режиму несимметричной трехфазной сети с использованием активного фильтра на визуальной модели

Основной материал статьи

Система питающих напряжений симметрична, амплитуды напряжений равны 100 В, а сдвиг фаз напряжений источников относительно друг друга составляет 120 эл. градусов. Нагрузка в системе распределена неравномерно: $z_a = (0.7 + j0.005)$, $z_b = (0.1 + j0.01)$, $z_c = (2 + j0.04)$, что приводит к значительной несимметрии токов в системе, а индуктивный характер нагрузки обуславливает сдвиг фаз питающих напряжений и сетевых токов в одноименных фазах. На рис. 1 отображены временные диаграммы сетевых токов в рассматриваемом несимметричном режиме.

Токи фаз разнятся в несколько раз, а сдвиг фаз питающего напряжения и сетевого тока значителен. Такой режим работы является неблагоприятным как для самой сети, так и для потребителей и требует выполнения симметрирования токов и компенсации реактивной мощности.

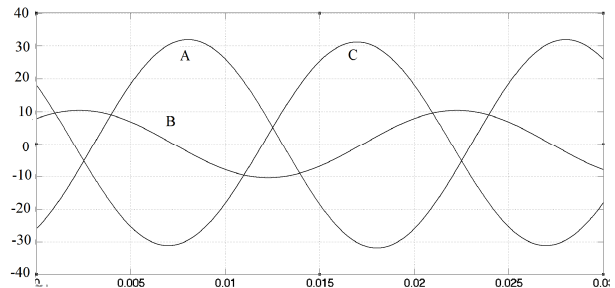


Рис. 1 – Временные диаграммы сетевых токов системы электропостачання з неравномерної навантажувальної фаз

На рисунке 2 изображена визуальная модель системы электропостачання с активным фильтром, подключенным параллельно нагрузке. Силовой активный фильтр представляет собой инвертор, выполненный на IGBT-транзисторах с накопительным конденсатором. Сформированные сигналы поступают в силовую часть схемы через специальные дроссели.

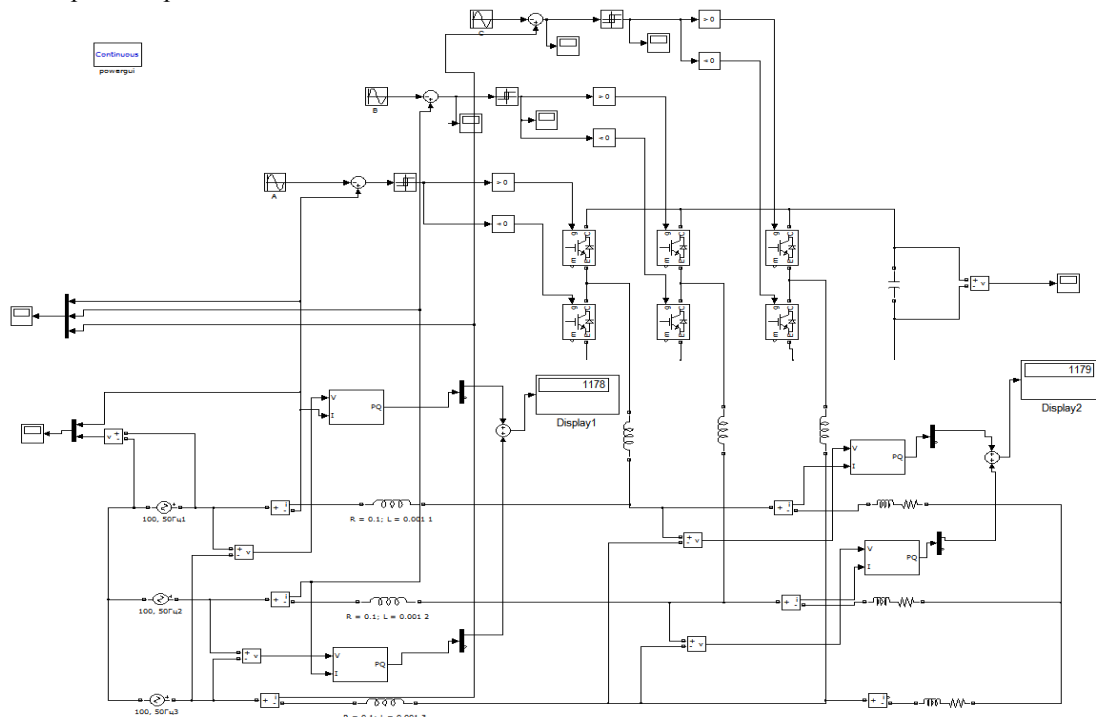


Рис. 2 – Визуальная модель системы электропостачання з активним фільтром

Управление ключами инвертора осуществляется широтно-импульсной модуляцией с гистерезисной модуляцией [13]. Узел сравнения

выделяет разность между сигналом генератора эталонного тока и током сети электропостачання. Полученное значение поступает на гистерезисный

элемент, на выходе которого формируются импульсы, равные +1 и -1. Ширина гистерезисной зоны по входному сигналу задана равной 0.5. Далее с помощью элемента сравнения, происходит распределение положительных и отрицательных импульсов таким образом, что первая часть осуществляет управление верхним транзистором плеча, а вторая – нижним. Таким образом, формируются три канала управления ключами фильтра, которые корректируют токи в трех фазах системы электроснабжения.

Признаком входа в оптимальный режим является установление напряжения на накопительном конденсаторе фильтра. Для обеспечения таких условий активный фильтр должен сформировать соответствующие корректирующие токи. При выполнении поисковой оптимизации параметрами оптимизации зададим амплитуду сигнала генератора эталонного тока (эта величина одинакова для всех трех генераторов фаз) и начальное напряжение на накопительном конденсаторе. Следует отметить, что при нулевом начальном напряжении конденсатора в системе происходит переходный процесс, в котором амплитуды сетевых токов превышают установившееся значение в 2,5 раза [11]. Поэтому определение начального значения напряжения конденсатора способствует улучшению качества электрической энергии в сети.

При формировании целевой функции возникает проблема измерения напряжения на конденсаторе, так как эта величина не является постоянной, а изменяется по периодическому закону. Поэтому целесообразно выполнять измерение напряжения в конце каждого периода колебания, и из полученных значений сформировать целевую функцию. Имеет смысл значения напряжений при компьютерном вычислении записывать в вектор. Целевая функция вычисляется по формуле

$$N = \sqrt{(V_{C2} - V_{C3})^2 + (V_{C3} - V_{C4})^2}, \quad (1)$$

где V_{C2}, V_{C3}, V_{C4} – напряжения на конденсаторе в конце 1, 2 и 3-го периодов колебания.

Время работы модели установлено равным 0,03 сек, что является достаточным для выхода системы на установившейся режим. Период колебания напряжения на накопительном конденсаторе составляет 0.01 сек, и это время задано в блоке Vc, который передает в рабочее пространство MATLAB значения напряжений в конце каждого периода в соответствующий вектор.

В листинге 1 приведен текст основной программы, выполняющей оптимизацию. В первой строке в качестве глобальных переменных заданы параметры оптимизации, номер итерации Nst и вектор значений напряжений на накопительном конденсаторе Vc. Оптимизация выполняется специальной встроенной в MATLAB функцией fminsearch(), параметрами которой являются имя файл-функции и начальные значения параметров оптимизации.

```
global I VC0 Nst Vc
SOP = 0.5
L = 0.001
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[ 13.8984 150 ])
Nst
```

В Листинге 2 приведен текст файл-функции, вызов которой осуществляется из основной программы. В первой строке функции присваивается имя файл-функции с параметром, который равен вектору значений параметров оптимизации. Далее идет дублирование как и в головной программе глобальных переменных программы, а затем эти параметры нормируются. Вызов модели осуществляется с помощью команды sim. Затем по формуле (1) вычисляется целевая функция, значения которой представляют собой значения вектора напряжений на накопительном конденсаторе Vc.

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global I VC0 Nst Vc
I=abs(x(1)*1E-0)
VC0 = abs(x(2)*1E-0)
sim model1
Nev = sqrt((Vc(2)-Vc(3))^2+(Vc(3)-Vc(4))^2)
x
Nst=Nst+1
```

Анализ результатов

После выполнения оптимизации значения параметров оптимизации приняли следующие значения: амплитуда эталонного синусоидального сигнала $I = 7.7420$, начальное напряжение на конденсаторе $VC0 = 205.2681$. Измерители мощностей на стороне питания сети и на стороне нагрузки показали уравнивание активных мощностей.

На рисунке 3 приведены временные диаграммы сетевых токов при начальном напряжении на накопительном конденсаторе равным 0.

На рисунке 4 показаны временные диаграммы токов после проведения оптимизации. Амплитуды токов снизились до 8 А, в установившемся режиме, в то время как в несимметричном режиме максимальная амплитуда составляла 32 А. В переходном режиме при задании начального напряжения на накопительном конденсаторе равным 205.2681. В максимальная

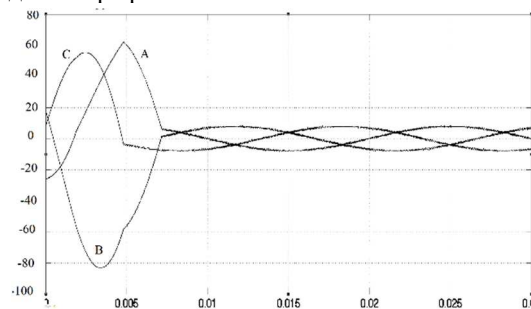


Рис. 3 – Временные диаграммы сетевых токов после выполнения оптимизации при начальном напряжении на конденсаторе равным нулю.

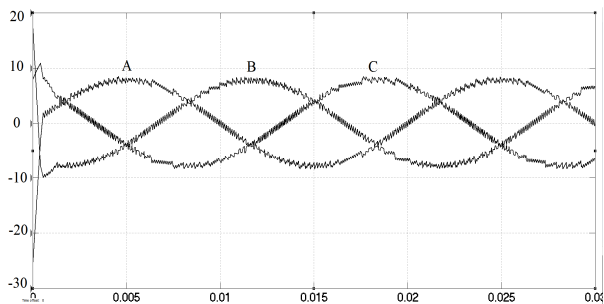


Рис. 4 – Временные диаграммы сетевых токов после выполнения оптимизации при начальном напряжении на конденсаторе равным 205.2681 В.

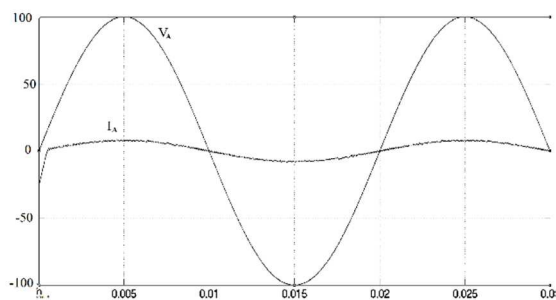


Рис. 5 – Временные диаграммы напряжения и тока фазы А.

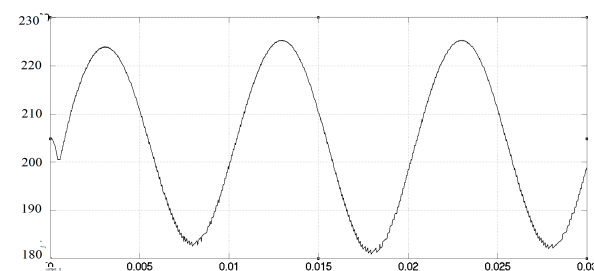


Рис. 6 – Временная диаграмма напряжения на накопительном конденсаторе активного фильтра

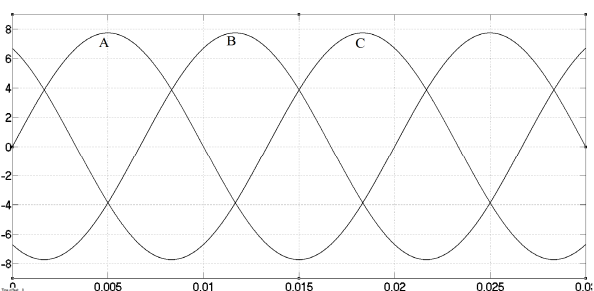


Рис. 7 – Корректирующие токи силового активного фильтра

величина амплитуды сетевого тока снизилась со значения -82 А до -25 А. При этом сократилась длительность переходного процесса с 0.002 сек до 0.005 сек. На рис. 5 изображены напряжение источника э.д.с и сетевого тока в фазе А. Временная диаграмма

демонстрирует сведение к нулю фазового сдвига между этими величинами.

Рис. 6 демонстрирует установление напряжения на накопительном конденсаторе. На рис. 7 изображены корректирующие токи силового активного фильтра.

Выводы

1. Сформирован критерий целевой функции, в основу которого положен модифицированный алгоритм управления активным фильтром.
2. Проведение компьютерного эксперимента продемонстрировало, что для симметрирования токов в сети, снижения их амплитуд и сведения реактивной мощности в сети до нуля, достаточно стабилизировать напряжение на накопительном конденсаторе фильтра.
3. Задание оптимального начального значения напряжения на конденсаторе способствует снижению длительности переходного процесса, и уменьшению максимальных токов в линии электропередачи.

Список литературы

1. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М.: Энергия. – 1977. – 128 с.
2. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях // А. К. Шидловский В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка. – 1985. – 268 с.
3. Akagi, H. Modern active filters and traditional passive filters / H. Akagi // *Bulletin of the Polish Academy of sciences, Technical sciences*. – 2006. – V. 54. – P. 255 – 269.
4. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes // *IEEE Press*. – 2007. – 379 p.
5. Agrawal, A. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies / A. Agrawal // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2014. – V. 3, Is. 5. – P. 1672 – 1678. – doi: 10.1109/PrimeAsia.2012.6458630
6. Dell'Aquila, A. A current control for three-phase four-wire shunt active filters / A. Dell'Aquila, A. Lecci // *Automatika*. – 2003. – V. 44, N 3-4. – P. 129–135.
7. Murat Kale An adaptive band current controller for shunt active power filter / Murat Kale, Engin Ozdemir // *Electric Power Systems Research*. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119. – doi: 10.1016/j.epsr.2004.06.006.
8. Yiauw, K. H. A Novel Three-Phase Power Filter / K. H. Yiauw, M. S Khanniche // *Power Engineering*. – 2001 – P. 77 – 84.
9. Sozański, K. Digital Control Circuit for Active Power Filter with Modified Instantaneous Reactive Power Control Algorithm / K. Sozański, R. Strzelecki, A. Kempski // *33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC '02*, Cairns, Australia – 2002.
10. Rajashekar1, B. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with a New Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes Under Non-Equal Dc Link Voltages with Power Quality Enhancement / B. Rajashekar1, T. Praveen Kumar, R. Ramesh // *IJIRSET*. – 2014. – Vol. 3, Is. 9. – P. 15857 – 15863.

11. Ягуп, В. Г. Модель активного фильтра для трехфазной электрической системы с несимметричной нагрузкой и управлением по оптимизационному алгоритму / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2015. – Випуск 3 (31). – С. 103 – 109.
12. Ягуп, Е. В. Моделирование системы электроснабжения с активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму / Е. В. Ягуп // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2016. – Вып. №8 (79), том 1. – С. 52 – 58. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.59538
13. Розанов, Ю. К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк // *Электротехника*. – 1999. – Вып. 4. – С. 28–32.
6. Dell'Aquila, A. A., Lecci, A. Current control for three-phase four-wire shunt active filters. *Automatika*. 2003, **44**(3-4), 129–135.
7. Murat Kale, Engin Ozdemir An adaptive band current controller for shunt active power filter. *Electric Power Systems Research*. 2005, **73**, 113 – 119, doi: 10.1016/j.epsr.2004.06.006.
8. Yiauw, K. H., Khanniche, M. S. A Novel Three-Phase Power Filter. *Power Engineering*. 2001, 77 – 84.
9. Sozanski, K., Strzelecki, R., Kempski, A. Digital Control Circuit for Active Power Filter with Modified Instantaneous Reactive Power Control Algorithm. *33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC '02*, Cairns, Australia, 2002.
10. Rajashekar1, B., Praveen Kumar T., Ramesh, R. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with a New Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes Under Non-Equal Dc Link Voltages with Power Quality Enhancement. *IJIRSET*. 2014, **3**(9), 15857 – 15863.
11. Yagup, V. G., Yagup, E. V. Model' aktivnogo fil'tra dlya trekhfaznoy elektricheskoy sistemy s nesimmetrichnoy nagruzkoy i upravleniem po optimizatsionnomu algoritmu. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. 2015, **3** (31), 103 – 109.
12. Yagup, E. V. Modelirovanie sistemy elektrosnabzheniya s aktivnym fil'trom, upravlyаемым по оптимизационному алгоритму. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2016, **8** (79 (1)), 52 – 58, doi: 10.15587/1729-4061.2016.59538.
13. Rozanov, Yu. K., Ryabchitskiy, M. V., Kvasnyuk, A. A. Sovremennye metody regulirovaniya kachestva elektroenergii sredstvami silovoy elektroniki. *Elektrotekhnika*. 1999, **4**, 28–32.

Bibliography (transliterated)

1. Zhezhelenko, I. V. Pokazateli kachestva elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh. Moscow: Energiya. 1977, 128 p.
2. Shidlovskiy, A. K., Kuznetsov, V. G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh. Kyiv: Naukova dumka. 1985, 268 p.
3. Akagi, H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the Polish Academy of sciences, Technical sciences*. 2006, **54**, 255 – 269.
4. Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. *IEEE Press*. 2007, 379 p.
5. Agrawal, A. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014, **3**(5), 1672 – 1678, doi: 10.1109/PrimeAsia.2012.6458630.

Сведения об авторах

Ягуп Екатерина Валериевна – кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, доцент кафедры «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» г. Харьков, Украина; e-mail: yag.kate@rambler.ru.

Yagup Kate Valeriivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of Electric Power, Electrician and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, pl. Feyyerbakha, 7, Kharkov, 61050, Ukraine. E-mail: kate.yag@rambler.ru

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Ягуп, Е. В. Оптимизация режима несимметричной трехфазной сети с использованием активного фильтра по усовершенствованному алгоритму / **Е. В. Ягуп** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 124-128. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.20.

Please cite this article as:

Yagup, K. Optimization of mode of unbalanced three-phase power supply by active filter using advanced algorithms. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 124–128, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.20.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ягуп, К. В. Оптимізація режиму несиметричної трифазної мережі з використанням активного фільтра по вдосконаленому алгоритму / **К. В. Ягуп** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 124-128. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.20.

АНОТАЦІЯ Розглядається оптимізація режиму роботи трифазної мережі електропостачання з нерівномірним активним індуктивним навантаженням. Несиметрія мережевих струмів і реактивна потужність компенсуються за допомогою активного фільтра, що представляє собою мостовий інвертор на IGBT-транзисторах. Управління ключами інвертора здійснюється системою керування з реалізацією широтно-імпульсної модуляції за гістерезисним принципом. Для оптимізації режиму системи використовується відповідна візуальна модель і оптимізаційний алгоритм деформованого багатогранника. Оптимізація режиму здійснюється шляхом стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі.

Ключові слова: активний фільтр; оптимізація; несиметрія; реактивна потужність; система електропостачання.

Поступила (received) 14.12.2016