ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ**О. С. Савенко, С. К. Поднебенна, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна. E-mail: savenko.olja@gmail.com

У роботі розглянуті результати експериментального дослідження роботи гібридного компенсатора реактивної потужності, що складається з активної та пасивної частин. У якості пасивної частини прийнята батарея конденсаторів з тиристорним перемиканням. Активна частина представляє собою автономний інвертор напруги з конденсатором у ланці постійного струму у якості накопичувача. Пасивна та активна частина компенсатора з'єднані між собою послідовно, що дає змогу «ізолювати» батарею конденсаторів від впливу вищих гармонік напруги мережі. Розглянута система керування, що дозволяє виконувати компенсацію реактивної потужності та в обмеженому обсязі виконувати функції активного фільтру, корегуючи спектральний склад струму мережі. При цьому не допускається виникнення перенапруг та перевищення допустимих струмів на батареї конденсаторів, що може бути викликано несинусоїдною формою прикладеної напруги. Ємність пасивної частини компенсатора обирається за умови мінімізації потужності активної частини. Для проведення експериментів розроблений лабораторний зразок гібридного компенсатора реактивної потужності, робота якого була перевірена при паралельному підключенні двох типів навантаження: двигун потужністю 0,18 кВт та частотний перетворювач потужністю 0,4 кВт. Навантаження було підключене на несинусоїдну напругу. Зазначені основні показники, що дозволяють оцінити ефективність роботи гібридного компенсатора реактивної потужності. Проведені експерименти довели працездатність розроблених систем керування роботою пристрою: забезпечується плавна та безперервна компенсація реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік у спектрі струму мережі. Потужність активної частини значно менша за потужність пасивної частини. Коефіцієнт несинусоїдності струму мережі дорівнює 3,1 % (до підключення гібридного компенсатора – 29,3 %).

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація реактивної потужності, гібридний компенсатор, батарея конденсаторів, активний фільтр, коефіцієнт несинусоїдності, коефіцієнт потужності, мікроконтролер.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков**

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87555, Украина. E-mail: savenko.olja@gmail.com

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования работы гибридного компенсатора реактивной мощности, который состоит из активной и пассивной части. В качестве пассивной части принята батарея конденсаторов с тиристорным переключением. Активная часть представляет собой автономный инвертор напряжения с конденсатором в звене постоянного тока в качестве накопителя. Пассивная и активная части компенсатора соединены между собой последовательно, что дает возможность «изолировать» батарею конденсаторов от воздействия высших гармоник приложенного напряжения. Рассмотрена система управления, которая позволяет выполнять компенсацию реактивной мощности и в ограниченном объеме функции активного фильтра, корректируя спектральный состав тока сети. При этом не допускается возникновение перенапряжений и превышение допустимых токов на батарее конденсаторов, что может быть вызвано несинусоидальной формой приложенного напряжения. Емкость пассивной части компенсатора выбирается из условия минимизации мощности активной части. Для проведения экспериментов разработан лабораторный образец гибридного компенсатора реактивной мощности, работа которого была проверена при параллельном подключении двух типов нагрузки: двигатель мощностью 0,18 кВт и частотный преобразователь мощностью 0,4 кВт. Нагрузка была подключена на несинусоидальное напряжение. Указаны основные показатели, позволяющие оценить эффективность работы гибридного компенсатора реактивной мощности. Проведенные эксперименты доказали работоспособность разработанных систем управления работой устройства: обеспечивается плавная и непрерывная компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник в спектре тока сети. Мощность активной части составила 12 % от мощности всего компенсатора. Коэффициент несинусоидальности тока сети равен 3,1 % (до подключения гибридного компенсатора – 29,3 %).

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация реактивной мощности, гибридный компенсатор, батарея конденсаторов, активный фильтр, коэффициент несинусоидальности, коэффициент мощности, микроконтроллер.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Збільшення кількості різномірних навантажень в сучасних електромережах призвело до зростання споживаної/генерованої реактивної потужності (РП), що викликає збільшення реактивних складових струмів. Наявність перетоків реактивних струмів, які циркулюють між енергомережею та споживачами, негативно впливає на якість електроенергії, що постачається, і стабільність енергосистеми, в цілому.

Згідно з [1] зі 100 % реактивної потужності, що виробляється в енергосистемі, 22 % втрачається в підвищувальних трансформаторах електростанцій і автотрансформаторах на підстанціях 110–750 кВ енергосистеми, 6,5 % втрачається в лініях районних мереж системи, 13,5 % становлять втрати в понижувальних трансформаторах і лише 58 % з усієї виробленої реактивної потужності потрапляє на шини 6–10 кВ споживачів. Для зменшення перетоків реактивної потужності по лініях і трансформаторах джерела реактивної потужності повинні розташовуватися поблизу місць її споживання. Такими джерелами є пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП), що встановлюються паралельно навантаженню [2].

Найбільш економічними пристроями компенсації є конденсаторні батареї, але їх використання не дозволяє плавно керувати величиною реактивної потужності. Крім того конденсатори швидко виходять з ладу при роботі в мережі з несинусоїдною напругою [3]. ПКРП на базі реакторів дозволяють компенсувати РП у широкому діапазоні, при цьому забезпечується плавність керування величиною РП, але використання реактора погіршує масо-габаритні показники пристрою; крім того, його робота супроводжується генерацією струмів вищих гармонік до мережі [4–5].

Зазначених недоліків позбавлені статичні компенсатори реактивної потужності (СТАТКОМ), які виконуються на базі автономних інверторів [6]. За їх допомогою компенсація РП виконується плавно та безперервно у широкому діапазоні. А при використанні височастотної елементної бази додаються функції фільтрації вищих гармонік. Основним недоліком зазначених пристроїв є їх висока вартість. Тому актуальним є використання так званих гібридних компенсаторів реактивної потужності (ГКРП), до складу яких входить пасивна (на базі батарей конденсаторів або реакторів) та активна (на базі автономних інверторів струму/напруги) частини. Вони дозволяють компенсувати більшу частину реактивної потужності засобами пасивного компенсатора, що дає можливість використовувати активний компенсатор значно меншої потужності, тобто істотно зменшити вартість пристрою у порівнянні зі СТАТКОМами.

В [7] наведені алгоритми керування роботою ГКРП, що дозволяють досягти зменшення вихідної напруги автономного інвертора. Передбачені дві стратегії керування роботою пристрою. Згідно з першою стратегією виконується компенсація реактивної потужності, при цьому струм компенсатора носить синусоїдний характер, тобто забезпечується «ізоляція» батареї конденсаторів від вищих гармонік. При виборі другої стратегії керування виконується компенсація реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік. З огляду на те, що в реальних промислових мережах найчастіше зустрічається напруга несинусоїдної форми, розроблені системи керування передбачають роботу ГКРП в умовах несинусоїдних напруг.

Метою роботи є експериментальне дослідження роботи ГКРП з розробленими алгоритмами керування в умовах несинусоїдної мережі.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для дослідження був обраний гібридний компенсатор реактивної потужності наступної конфігурації:

- пасивна частина представлена батареєю конденсаторів з тиристорним перемиканням, що складається з декількох ступенів;
- активна частина виконана на базі автономного інвертора напруги;
- активна та пасивна частина з'єднані послідовно.

Спрощена схема підключення ГКРП наведена на рис. 1.

Рисунок 1 – Спрощена схема підключення ГКРП

Вибір ємності батареї конденсаторів виконується згідно з методикою, що викладена в [8, 9].

У роботі [9] був проведений аналіз, за результатами якого встановлено, що робота ГКРП у режимі керованого джерела струму дозволяє виконувати компенсацію реактивної потужності та обмежено фільтрацію вищих гармонік, що входять до спектрального складу струму мережі. Фільтрація виконується не в повному обсязі для того, щоб не допустити виникнення перенапруг на пасивному компенсаторі.

Структурна схема розробленої авторами відповідної системи керування наведена на рис. 2.

Рисунок 2 – Структурна схема системи керування ГКРП в однофазному виконанні

Частота дискретизації АЦП $f_{\text{виб}}$ дорівнює 6400 Гц (прийнята кількість відліків за період – 128). Струм завдання обчислюється як сума синфазної $i_p(z)$ та квадратурної $i_q(z)$ складових та складових вищих гармонік. Синфазна складова визначається величиною активної потужності, що витрачається в транзисторних ключах, квадратурна складова – величиною реактивної потужності, яку необхідно компенсувати. Для формування зазначених складових використаний блок DPLL (Digital Phase-Locked Loop), який виділяє з напруги мережі синфазну і квадратурну компоненти основної частоти. Для виділення постійної складової зі струму мережі використаний sync-фільтр першого порядку (блок ФНЧ). Шляхом завдання струму I_{qREFn} можна забезпечити роботу пристрою в режимах пере- або недокомпенсації. Для виділення вищих гармонік струму мережі використаний режекторний фільтр (контур виділення ВГ). Система керування забезпечує підтримку середнього значення напруги в середній точці напівмостів (U_{mp}) та стабілізацію напруги в ланці постійного струму (регулятор напруги РН). Для формування вихідного струму інвертора напруги реалізоване гістерезисне струмове керування (регулятор струму РС). Детальний огляд системи керування та її складових частин наведений в [9].

Для проведення досліджень був розроблений експериментальний зразок ГКРП. Пасивна частина компенсатору виконана на базі металоплівкових конденсаторів типу СВВ65 номінальною напругою 450 В, перемикання ступенів здійснюється за допомогою симісторів ВТА24-800ВW (максимальний струм – 25 А, максимальна напруга –

800 В). Активна частина виконана на базі силового модулю IRAMS10UP60B1, до складу якого входить шість IGBT транзисторів (допустимий струм колектора складає 10 А, максимальна напруга «колектор-емітер» – 600 В, частота несучої ШІМ – 20 кГц).

Керування інвертором напруги організоване від контролера STM32F103C8T6B. Реалізовані 4 канали вимірювання струмів (на базі мікросхем ACS712-05B), 2 канали вимірювання напруги (на базі мікросхем MCP6004), вимірювання напруги ланки постійного струму, передбачений апаратний струмовий захист. Робоча частота мікроконтролера – 72 МГц. Перетворення аналогових сигналів у цифрову форму виконують два швидкодіючих 12-бітних АЦП послідовного наближення з 10 мультиплексованими входами. Час вибірки складає 1 мкс.

Для керування симісторами використаний контролер STM32F100C4T6B. Контролери інвертора напруги та симісторів обмінюються інформацією через високошвидкісні послідовні порти (USART1 та USART3) та оптопарі гальванічної розв'язки. Максимальна швидкість передачі даних складає 2 Мбіт/с.

Принципова електрична схема активного компенсатора наведена на рис. 3.

У якості навантаження було прийняте комбіноване навантаження, що складається з двох частин:

- 1) перетворювач частоти потужністю 0,4 кВт, $\cos\varphi = 0,98$; $\text{THD}_1 = 59\%$;
- 2) асинхронний двигун потужністю 0,18 кВт, $\cos\varphi = 0,6$; $\eta = 0,55$.

Рисунок 3 – Принципова електрична схема активної частини компенсатора

Спрощена схема підключення навантаження та ГКРП представлена на рис. 4.

Вимірювання проводилися з використанням цифрового двоканального осцилографа Micsig MS510S. Осцилограф має гальванічну розв'язку каналів та працює в частотному діапазоні до 100 МГц.

Рисунок 4 – Спрощена схема підключення навантаження та ГКРП для проведення лабораторних досліджень

Форма напруги мережі та струму навантаження наведені на рис. 5. Коефіцієнт несинусоїдності напруги мережі THD_U складає 5,2 %, несинусоїдності струму навантаження THD_I – 29,3 %.

Рисунок 5 – Осцилограми напруги мережі та струму навантаження

На рис. 6 наведені результати проведених експериментів після підключення ГРП.

В якості основних показників ефективності роботи ГКРП використані:

- коефіцієнт потужності PF;
- коефіцієнт несинусоїдності струму (THD_I).

Отримані дані наведені в табл. 1.

а)

б)

Рисунок 6 – Результати експериментальних досліджень: а) осцилограми напруги мережі та струму компенсатора; б) осцилограми напруги та струму мережі

Таблиця 1 – Результати дослідження показників ефективності роботи ГКРП

Показники	До підключення ГКРП	Після підключення ГКРП
Коефіцієнт несинусоїдності струму мережі THD_I	29,3 %	3,1 %
Коефіцієнт потужності PF , розрахований для частоти 50 Гц	0,7	0,99

Розрахунок показників проведений за визначеннями стандартів IEEE 1459-2010 [10] та IEC 61000 [11].

У таблиці 2 наведені результати перерозподілу скомпенсованої реактивної потужності між пасивною та активною частиною.

Таблиця 2 – Значення скомпенсованої реактивної потужності та її перерозподіл між складовими частинами компенсатору

Величина реактивної потужності, яку необхідно скомпенсувати, $Q_{завд}$, ВАр	360
Величина реактивної потужності, яка скомпенсована пасивною частиною компенсатора, $Q_{пас}$, ВАр	316,8
Величина реактивної потужності, яка скомпенсована активною частиною компенсатора, $Q_{пас}$, ВАр	43,2

В результаті аналізу таблиць 1 і 2 видно, що підключення ГКРП забезпечує повну компенсацію реактивної потужності (причому потужність активної частини суттєво менша за потужність пасивної частини) та дозволяє корегувати спектральний склад струму мережі.

ВИСНОВКИ. В роботі проведено експериментальне дослідження роботи гібридного компенсатора реактивної потужності. Розроблений експериментальний зразок розглянутого пристрою, в якому реалізовано систему керування, що забезпечує роботу пристрою у режимі керованого джерела струму, причому виконується компенсація реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік. Проведені лабораторні дослідження підтвердили працездатність запропонованих алгоритмів. Розраховані основні показники, що характеризують ефективність роботи розглянутого компенсатора. Отримані результати свідчать про те, що використання запропонованих алгоритмів керування дозволяють забезпечити плавність регулювання реактивної потужності, при цьому зменшити питому потужність інвертора, та дають можливість корегувати спектральний склад струму мережі.

ЛІТЕРАТУРА

- Кузьмин В. В., Кирисов И. Г., Малинин С. В. Анализ средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях Украины. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. Вип. 05 (99). С. 45–50.
- Лыкин А. В. Электроэнергетические системы и сети: учебник для вузов. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 360 с.
- Attachie J. C., Amuzuvi C. K. Investigating Harmonic Resonance And Capacitor Bank Switching At A Power Distribution Substation Using A Fixed Capacitor Bank. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*. 2013. № 2 (4). P. 343–348.
- Vijayakumar T., Nirmalkumar A. Harmonics Analysis of Thyristor controlled Reactor circuits. *International Journal of Computer and Electrical Engineering (IJCEE)*. 2010. Vol. 2 (1). P. 190–192.

DOI: 10.7763/IJCEE.2010.V2.134

5. Ponce C. A. Technique Power Factor Compensation by the Electronic Generation of Reactive and Harmonic Currents. *XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (6-9 October 2015; Cordoba)*. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/RPIC.2015.7497149

6. Dixon J. W., Moran L., Rodríguez J., Domke R. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. № 12. P. 2144–2164.

7. Savenko O. S., Podnebennaya S. K., Burlaka V. V., Gulakov S. V. Control Strategy for Hybrid VAR Compensator. *IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW)*. 2018. P. 93–96.

8. Пат. 112554 Україна, МПК G05A 1/70. Спосіб компенсації реактивної потужності / С.В. Гулаков, В.В. Бурлака, С.К. Поднебенна, О.С. Савенко. –

№ а201403912; заявл. 14.04.2014; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.

9. Burlaka V. V., Gulakov S. V., Podnebennaya S. K., Savenko O. S. Hybrid VAR compensator with improved efficiency. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2014. Вип. 29. С. 174–180.

10. IEEE Std. 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *Approv. Feb. 2010*. 44 p.

11. ДСТУ EN 61000-3-12:2014. Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на силу струму гармонік, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (EN 61000-3-12:2011, IDT). Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYBRID VAR COMPENSATOR

O. Savenko, S. Podnebenna, V. Burlaka, S. Gulakov

Pryazovskyi State Technical University

vul. Universytets'ka, 7, Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: savenko.olja@gmail.com

Purpose. The widespread use of electrical equipment, the operation of which requires the consumption of reactive power to maintain an alternating magnetic field, has led to the loading of electrical networks with reactive current components. But their presence has a negative impact on the power system operation: reducing the service life of equipment, increasing electricity losses, deteriorating of load's and lines' power factor and reducing the capacity of the network. This cause the advantage of using VAR compensators that are installed next to the load. The purpose of this article is experimental research of the VAR compensator operation in order to confirm the operability of the developed control systems. **Methodology.** To achieve this goal, an experimental prototype of a hybrid VAR compensator was developed. The combined load was used. It consists of two parts: the frequency converter and induction motor. Oscillograms of grid voltage and current, load current and compensator current were obtained. The main performance indicators were calculated: power factor, current's THD and compensated reactive power of passive/active parts of VAR compensator. **Results.** The experiments proved the efficiency of the developed control systems: smooth and continuous compensation of reactive power and filtering of higher harmonics in the network current spectrum is provided. The power of the active part is much less than the power of the passive part. THD of the grid current is 3.1 % (before connecting the VAR compensator – 29.3 %). **Originality.** A hybrid VAR compensator comprised of thyristor-switched capacitor bank and an VSI-based active power filter connected in series is proposed. Control algorithms were developed allowing for flexible configuration of operating mode: between fundamental reactive power compensation only and full non-active power compensation (including distortion power). The system concept allows to minimize rated power of the VSI, enabling lower production cost of the proposed hybrid VAR compensator. **Practical value.** An experimental prototype of a hybrid reactive power compensator has been developed, which implements several control strategies. The work of the compensator was checked at a non-sinusoidal supply voltage. The effectiveness of the proposed approach has been confirmed. References 11, tables 2, figures 5.

Key words: reactive power, reactive power compensation, hybrid VAR compensator, capacitor bank, active filter, THD, power factor, microcontroller.

REFERENCES

1. Kuzmin, V. V., Kirisov, I. G., & Malinin, S. V. (2012). Analysis of reactive power compensation in electric networks of Ukraine. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 05 (99), 45–50. [in Russian].

2. Lykin, A. V. (2019). *Elektroenergeticheskie sistemy i seti : uchebnik dlya vuzov [Electric power systems and networks: textbook for universities]*. Moscow: Izdatelstvo Yurayt. [in Russian].

3. Attachie, J. C., & Amuzuvi, C. K. (2013). Investigating Harmonic Resonance And Capacitor Bank Switching At A Power Distribution Substation Using A Fixed Capacitor Bank. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*, 2 (4), 343–348.

4. Vijayakumar, T., & Nirmalkumar, A. (2010). Harmonics Analysis of Thyristor controlled Reactor circuits, *International Journal of Computer and*

Electrical Engineering (IJCEE), 2 (1), 190–192. DOI: 10.7763/IJCEE.2010.V2.134.

5. Ponce, C. A. (2015). Technique Power Factor Compensation by the Electronic Generation of Reactive and Harmonic Currents. *XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (6-9 October 2015; Cordoba)*, 1–6. DOI: 10.1109/RPIC.2015.7497149.

6. Dixon, J. W., Moran, L., Rodríguez, J., & Domke, R. (2005). Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review, *Proceedings of the IEEE*, 93, 12, 2144–2164.

7. 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)*, 93–96.

8. Gulakov, S. V., Burlaka, V. V., Podnebennaya, S. K., & Savenko, O. S. (2016). *Sposib kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti [VAR compensation method]*. Patent UA, № 112554. [in Ukrainian]

9. Burlaka, V. V., Gulakov, S. V., Podnebennaya, S. K., & Savenko, O. S. (2014). Hybrid VAR compensator with improved efficiency, *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*, 29, 174–180.

10. IEEE Std. 1459-2010. (2010). IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *Approv. Feb*, 44.

11. DSTU EN 61000:3-12:2014. (EN 61000-3-12:2011, IDT) (2018). *Elektromagnitna sumisnist'. Chastina 3-12. Normi. Normi na silu strumu garmonik, stvoreni obladnanniam iz nominal'nim vkhidnim strumom siloyu ponad 16 A ta do 75 A vklyuchno na fazu, pidklyuchenim do niz'kovol'tnikh elektropostachal'nikh sistem zagal'noi priznachenosti [Electromagnetic compatibility. Part 3-12. Norms. Harmonic current norms created by equipment with a rated input current of more than 16 A and up to and including 75 A per phase connected to low-voltage general-purpose power supply systems]*. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 1.06.2020.