

1993, s.159-162. 3. Pitt K., Achmatowicz S., Jakubowska M., Zwierkowska E., Primowicz M., *The Effect of Thermal Aging on Electrical Properties of Thick Film Base Metal Resistors on Alumina and Dielectric*, *Proceedings of 8th European Passive Components Symposium CARTS EUROPE 94, Manchester, Oct. 1994*, s. 117-121. 4. Achmatowicz S., Jakubowska M., Zwierkowska E., Szczytko B., Szymański D., *Niklowa pasta przewodząca*, Patent RP Nr 160584. 5. E.Brown, B.Walton, *An Air Firing Base Metal resistor and Conductor System for Low Cost Thick Film Circuit Manufacture*, *Electrocomponent Science and Technology*, 1981, vol.8, pp.61-65. 6. Achmatowicz S., Jakubowska M., Zwierkowska E., Primowicz M., Sapowska G., *Pasta Rezystywna*, Patent RP Nr 172514. 7. Hotra Z., Jakubowska M., Szczepanski Z., *Thick Film Structure Resistor on Dielectric*, *Wiśnik Nacionalnowo Uniwersitetu Lwviwska Politechnika*, vol.427, s.73-82.

УДК 621.318

Р.А. Пеленський

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теорії загальної електротехніки

## ПРИСТРОЇ ДЛЯ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

© Пеленський Р.А., 2003

Досліджено проблему динамічного компенсування реактивної потужності в енергетиці та її вплив на покращання якості електроенергії, на краще використання наявних енергетичних потужностей та ліній пересилання електроенергії. Проаналізовано роботу функціональних елементів керованої енергетичної електроніки на основі тиристорних та МОН-вентилів. Запропоновано пристрої для динамічної компенсації реактивної потужності зі зменшеним впливом на якість енергосередовища.

**The problem of the dynamic var compensation in power systems and its impact on improving the quality of electric power as well as on a better employment of the available power capacities and electric energy transference lines have been discussed. The work of the functional elements of the guided power electronics based on the thyristor and metal-oxide-semiconductor valves has been analyzed. Setups for a dynamic compensation of the reactance var power with the decreased impact on the quality of the power environment have been suggested.**

Впровадження в енергетиці силової електроніки дозволяє розв'язати фундаментальну проблему динамічного компенсування реактивної потужності. В українській енергетиці широко використовується статичне компенсування реактивної потужності. Компенсуючі ємності батарей конденсаторів і синхронні компенсатори розраховані на номінальну потужність енергооб'єкта. У цій одній точці досягають достатньо високої степені компенсації реактивного струму. Реальна практика експлуатації енергооб'єктів визначається значними відхиленнями від розрахункового режиму і при використанні статичних компенсаторів в лініях пересилання енергії наявні великі реактивні струми, що приводить до недовикористання генераторів електричної енергії і некорисного завантаження ліній пересилання енергії.

Розв'язання даної проблеми можливе лише створенням систем динамічної компенсації реактивної потужності, тобто генерована компенсуючими пристроями реактивна потужність повинна безперервно змінюватись відповідно до змін навантаження і в кожному момент часу компенсувати реактивний струм навантаження. Відслідкувати зміни навантаження, зокрема реактивну складову його струму має вимірювальна система і комп'ютер, який повинен керувати малопотужною зовнішньою системою управління електронними пристроями, що регулюють кількість виробленої компенсуючими пристроями реактивної потужності, забезпечуючи протягом усього часу експлуатації об'єкта живлення його мінімально можливим струмом. Сьогодні системи динамічної компенсації реактивної потужності вже використовуються в енергосистемах розвинутих країн. Розробки в цьому напрямку започатковані в США [1–3], і ефективність динамічної компенсації практично підтверджено. Невирішеною частиною проблеми динамічної компенсації реактивної потужності залишається засмічення енергосередовища вищими гармоніками, генераторами яких є використовувані для цілей компенсації тиристорні пристрої.

У цій статті поставлено задачу дослідження можливостей створення керованих генераторів реактивної потужності для компенсування реактивного струму навантаження синхронно зі змінами навантаження. Досліджуються можливості повсякчасного повного компенсування реактивного струму основної гармоніки і можливості одночасного компенсування вищих гармонік, створюваних нелінійними пристроями навантаження.

Дослідження компенсуючих здатностей керованих генераторів реактивної потужності основної і вищих гармонік проведемо для одно- та двопівперіодних ємнісних компенсаторів, виконаних як тиристорні або як МОН-керовані ємнісні пристрої.

Схема однопівперіодного керованого ємнісного компенсатора реактивної потужності наведена на рис. 1.

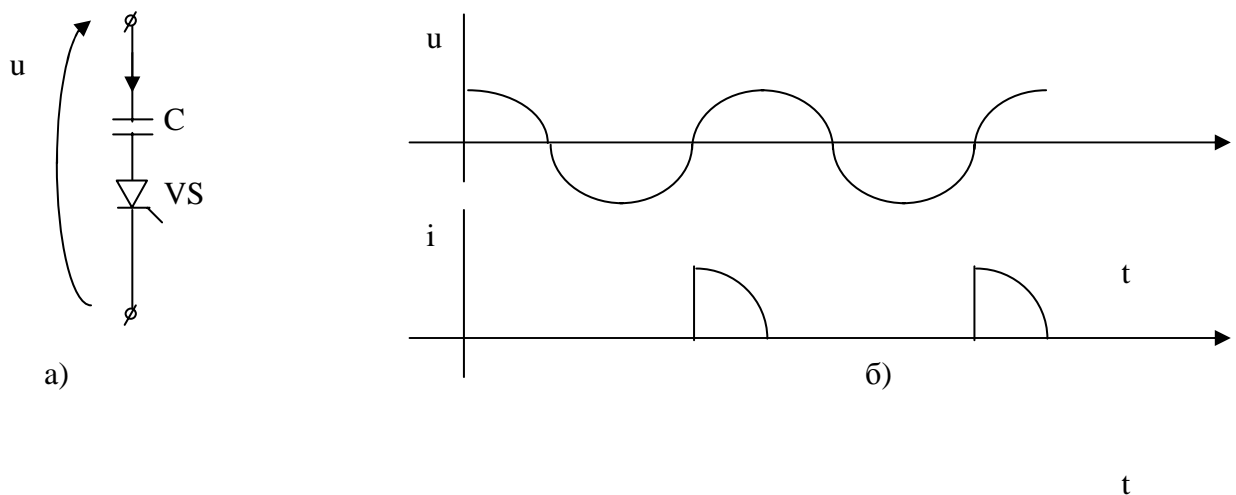


Рис. 1. Схема однопівперіодного керованого ємнісного компенсатора (а) та часові графіки прикладеної напруги та струму (б)

Недоліком схеми є накопичення в конденсаторі енергії електричного поля і зарядження конденсатора. Гасіння цієї енергії через паралельно включений резистор (рис. 2) вимагає громіздкого і дорогого обладнання.

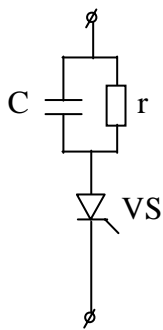


Рис. 2. Схема однопівперіодного компенсатора реактивної потужності з гасінням енергії електричного поля

Схема двопівперіодного керованого реактора реактивної потужності (рис.3а) має суттєві переваги в зв'язку з тим, що струм через конденсатор не містить постійної складової.

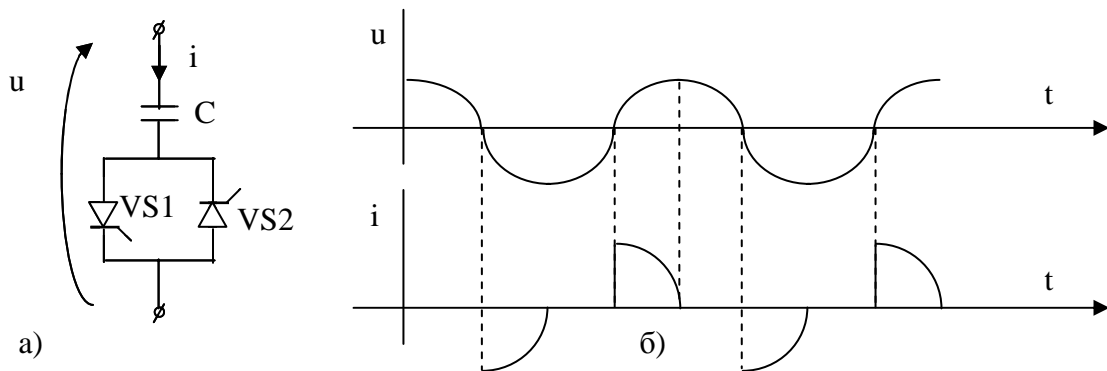


Рис. 3. Схема двопівперіодного генератора реактивної потужності (а) та часові графіки напруги та струму (б) при куті запалювання  $\alpha=90^\circ$

У випадку, якщо генератори зовнішньої системи керування тиристорами виробляють імпульси для синхронізованого відкриття обох тиристорів, постійна складова в струмі відсутня, генеруючі реактивну потужність конденсатори перебувають в найлегших умовах роботи. Недоліком цієї схеми як компенсатора реактивної потужності є відсутність в симетричній кривій струму парних гармонік. У більшості пристроїв перетворення енергії на основі вентильних схем двопівперіодного, три- та шестифазного випрямлення відсутня основна гармоніка струму в навантаженні, проте наявні всі парні гармоніки.

Створення компенсуючих засобів з розширеними можливостями вимагає [4, 5] генерування і парних, і непарних гармонік при відсутності постійної складової в струмі, що тече через конденсатор. Цього можна досягти при використанні несиметричних керованих випрямлячів. Це можуть бути зовсім різні типи елементів, наприклад, тиристор і МОН-ключ. Якщо використовуються однотипні елементи, то їхні характеристики повинні суттєво відрізнятися. Особливо це стосується прямого опору. Зовнішні керуючі пристрої повинні виробляти імпульси для несинхронного запалювання керованих випрямлячів, підбір параметрів режимів ґрунтується на тому, щоб площі кривих струму над і під віссю абсцис були однакові, а підбір відповідних кутів запалювання дозволить встановити потрібні пропорції між значеннями гармонік, які підлягають компенсуванню. Стовідсоткового компенсування

досягти при змінах навантаження все-таки не вдається, але зниження реактивного струму на порядок є реальною задачею. При паралельному ввімкненні декількох компенсуючих ланок можна добитись суттєвої компенсації цілого ряду гармонік.

В елементній базі енергетичної електроніки як окремі елементи можуть бути виділені: керований активний опір (рис.4,а), керований реактор, або інакше, кероване активно-індуктивне навантаження (рис.4,б), керована індуктивність (рис.4,в) та керована ємність (рис.4,г).

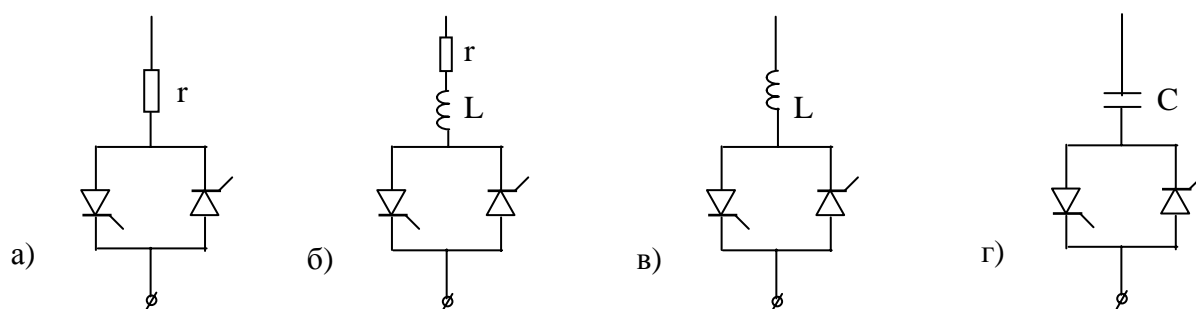


Рис. 4. Функціональні елементи керованої енергетичної електроніки

Струми, що протікають через ці елементи, мають свої особливі властивості. Тому в означенні струму мають фігурувати слова “тиристорно-керований струм або МОН-керований струм”. Дослідимо властивості тиристорно-керованого струму активного опору. При прикладенні до елемента синусоїдної напруги отримуємо несинусоїдний струм (рис. 5).

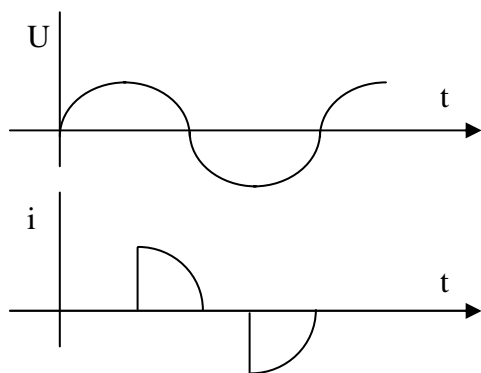


Рис. 5. Часові графіки напруги та струму тиристорно-керованого активного опору

При використанні симетричних тиристорів розкладений в ряд Фур’є струм може бути записаний у формі:

$$i = B_1 \sin \omega t + C_1 \cos \omega t + B_3 \sin 3\omega t + C_3 \cos 3\omega t + \dots, \quad (1)$$

Складову струму  $C_1 \cos \omega t$  можна компенсувати за допомогою ввімкненої паралельно з елементом ємності [3]. Але енергосередовище буде засмічене непарними вищими гармоніками.

Якщо паралельно з’єднати елементи, зображені на рис. 4, а, в, г, отримуємо можливість для повної компенсації струмів тиристорно-керованих індуктивності та ємності, включно з вищими гармоніками. Крім того, додатково може бути скомпенсована ще й косинусна складова тиристорно-керованого струму активного опору. Дуже цікавою є векторна діаграма для струмів першої гармоніки паралельно сполучених тиристорно-керованих індуктивності, ємності та активного опору. Діаграма наведена на рис. 6.

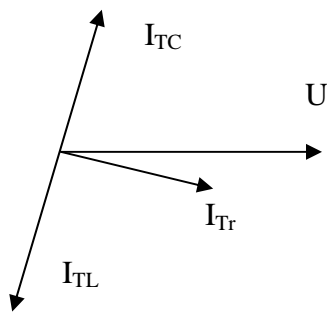


Рис. 6. Векторна діаграма напруги та струмів паралельно сполучених тиристорно-керованих індуктивності, ємності та опору для першої гармоніки

При куті запалювання  $\alpha=0$  вектор струму  $I_{TT}$  збігається з вектором напруги, а вектори  $I_{TL}$  та  $I_{TG}$  займають вертикальне положення. З ростом кута запалювання  $\alpha$  діаграма струмів повертається відносно діаграми напруги за годинниковою стрілкою.

Використання елементної бази, наведеної на рис. 4, спрощує розрахункові моделі випростувальних пристроїв і аналіз процесів в них. Так, наприклад, двопівперіодна мостова схема, навантажена активним опором при застосуванні керованих випростувачів в плечах моста, може бути представлена тиристорно-керованим активним опором (рис. 4, а) відносно затискачів вхідного трансформатора.

З несиметричних тиристорно-керованих ємностей можна отримувати генерування різних гармонік, зокрема і парних. Залежно від кута запалювання між гармоніками будемо отримувати різні співвідношення. Тому з'являється можливість для компенсування вищих гармонік. Зрозуміло, що при змінах навантаження добитись повного компенсування реактивного струму основної гармоніки та ще й всіх вищих гармонік у широкому діапазоні зміни навантаження не вдається, проте ступінь компенсування є глибоким.

### Висновки

Запровадження динамічного компенсування реактивної потужності дозволяє вирішувати фундаментальні проблеми енергетики: зменшувати завантаження реактивним струмом ліній електропередавання та забезпечувати енергетичні потреби держави за допомогою меншої сумарної повної потужності електростанцій, тобто відпадає потреба в побудові нових генеруючих потужностей. Стає можливим інтегрування електростанцій альтернативної енергетики в загальні енергомережі.

Енергетична електроніка привнесе фундаментальні зміни. З'являються можливості для заміни сьогоденних повільних механічно-керованих пристроїв систем керування та комутацій в енергосистемах на надшвидкодійні пристрої, які здатні забезпечувати швидкодію порядку наносекунд. У такій постановці стає можливою високоякісна динамічна компенсація реактивної потужності і гармонік навіть у таких важких для енергосередовища регіонах, як сталеплавильні регіони держави.

1. *Power electronics in electric utilities static var compensators /L. Gyugui/ Pros. of the IEEE, 1988, v. 76, № 4.* 2. *Power electronics: Problems manual / F.Csaki, I.Herman,.../ Budapest, 1979.* 3. *Энергетическая электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1987.* 4. *Тонкаль В.Е., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Компенсация неактивных составляющих полной мощности в цепях несинусоидального тока и напряжения // Техническая электродинамика. – 1989. – № 5.* 5. *Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Гармоники в сетевом токе компенсированного управляемого выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 6.*