УДК 621.3.11

Л.Й. Глухівський, В.С. Маляр, Р.Л. Глухівський
Український інститут промислової власності Міносвіти і науки України,
Національний університет "Львівська політехніка"

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНИХ СТРУМІВ У МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

© Глухівський Л.Й., Маляр В.С., Глухівський Р.Л., 2003

Запропоновано для збільшення компенсуючої здатності конденсатора при компенсації ним псевдореактивних струмів, породжуваних керованим вентилем, послідовно з ним вмикати електронний ключ, що реалізує функцію провідності конденсаторної гілки на періоді. Пропозиція проілюстрована розрахунком періодичних режимів простої схеми з керованим вентилем диференційним гармонічним методом.

In order to increase the compensative ability of the capacitor when it compensates pseudo-reactive currents caused by the controlled gate, it has been proposed to connect an electronic switch in series, realizing the conductivity function of the capacitor arm on the period. The proposition was illustrated by calculating periodic modes of the simple circuit with the controlled gate using the differential harmonic method.

Суть проблеми. У лінійних електричних колах змінного струму реактивні струми, тобто струми, гармоніки яких мають фазовий зсув на $\pi/2$ радіан по відношенню до гармонік, прикладених до елементів кола напруг, як відомо, генеруються тільки реактивними елементами: індуктивністю і ємністю [1]. При наявності в навантаженні нелінійних елементів такий зсув можливий навіть у тому випадку, якщо ці елементи є активними [2]. Найхарактернішим прикладом можна назвати керований вентиль (тиристор): перша гармоніка струму у гілці із таким елементом може мати часове запізнення по відношенню до першої гармоніки прикладеної до нього напруги на кут $\alpha < \pi/2$, тобто може мати у своєму складі реактивний струм індуктивного характеру. Але у цьому випадку характер струму лише умовно можна назвати реактивним, тому що він генерується елементом не реактивним – тиристором. Такий струм краще називати псевдореактивним. Наявність у струмах гілок навантаження реактивних струмів призводить до росту діючих значень струмів, і це зумовлює ріст втрат електричної енергії, зокрема у лініях передач і генераторах. Тому реактивні струми (і псевдореактивні) намагаються компенсувати у місцях їх виникнення. Класичними компенсаторами реактивних струмів індуктивного характеру служать ємність, електромашинний синхронний компенсатор тощо.

Аналіз останніх досліджень. Здавалося б, що висловлені вище тези вже стали класичними, однозначно сприймаються усім загалом фахівців електроенергетичної сфери і не викликають жодних сумнівів. Разом з тим, як свідчать наукові дослідження останніх років [3], питання, пов'язані з поняттям реактивної потужності і компенсацією реактивних струмів у колах з нелінійним навантаженням, сприймаються неоднозначно різними науковими школами. Зокрема, по різному трактуються явища компенсації реактивних і псевдореактивних струмів у таких колах. Це і спонукало нас до проведення дослідження, результати якого висвітлені у цій роботі.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Мета статті. У статті розглянуто компенсацію реактивного струму, зумовленого наявністю напівпровідникових елементів. Запропоновано та проаналізовано на математичній моделі один із шляхів вирішення цієї важливої проблеми.

Виклад основного матеріалу. Дослідження мало характер чисельного експерименту: з використанням диференційного гармонічного методу [4] проводилося комп'ютерне моделювання усталених періодичних режимів у деяких простих колах з єдиним нелінійним елементом – керованим вентилем. Зокрема, було розглянуто схему з однопівперіодним випростувачем, показану на рис. 1. На цій схемі R_g і L_g лінійні активний опір і індуктивність лінії передачі і генератора; $e = E_m \cos \omega t$ – напруга генератора з частотою ω; T – керований вентиль (тиристор); $R_н$ – лінійний активний опір навантаження; C – ємність для компенсування псевдореактивного струму, згенерованого тиристором; ЕК – електронний ключ.

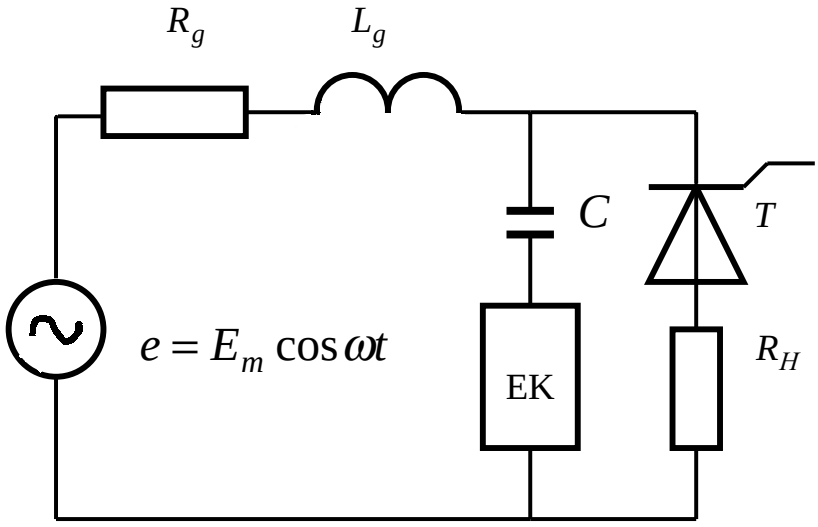

Рис. 1. Схема з керованим вентилем.

Призначення електронного ключа у цій схемі – вмикати і вимикати компенсаційну гілку у задані моменти часу на кожному періоді. Момент ввімкнення задається кутом β від початку періоду (чи іншої фіксованої часової точки) і тривалість ввімкненого стану – кутом Δβ. Якщо β=0 і Δβ=0, то гілка на кожному періоді є неввімкнутою (розрив гілки). Якщо β=0 і Δβ=2π, то гілка є ввімкнутою на повну тривалість кожного періоду (повне ввімкнення). При інших значеннях β і Δβ гілка є ввімкнутою лише впродовж частки Δβ періоду (часткове ввімкнення).

Періодичні режими схеми описуються системою рівнянь:

$$\begin{aligned} &\vec{I}_g - C\omega \breve{D}\, \vec{U}_c - \vec{I}_H = 0; \\ &(\omega \breve{D} \breve{L}_g + \breve{R}_g)\, \vec{I}_g + \vec{U}_c + \vec{U}_K - \vec{E} = 0; \\ &\vec{U}_c + \vec{U}_K - \breve{R}_H \vec{I}_H - \vec{U}_v = 0; \\ &C\omega \breve{D} \vec{U}_c - \vec{I}_K = 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

де $\vec{I}_g, \vec{I}_H, \vec{I}_K, \vec{U}_c, \vec{U}_v, \vec{U}_K$ – вектори амплітуд гармонік порядку N=2n+1 відповідно: струмів генератора, навантаження і компенсації, спадів напруги на конденсаторі, вентилі і електронному ключі, утворені з постійної складової і косинусних і синусних амплітуд гармонік цих

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

змінних; n – номер найвищої враховуваної гармоніки; $\vec{E} = colon\,(0, E_m, 0, \dots, 0)$ – вектор амплітуд гармонік напруги генератора; $\breve{L}_g, \breve{R}_g, \breve{R}_H$ – діагональні матриці порядку N вигляду

$$\breve{X} = diag\,(X, X, \dots, X), \quad X = L_g, R_g, R_H;$$

$$\breve{D} = diag\,(0, \begin{Vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{Vmatrix}, \begin{Vmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{Vmatrix}, \dots, \begin{Vmatrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{Vmatrix}) -$$

блоково-діагональна матриця, що у [4] іменується матрицею диференціювання.

Система скінченних рівнянь (1) є нелінійною, тому що вектори амплітуд $\vec{U}_v$ і $\vec{U}_K$ є нелінійними функціями векторів амплітуд $\vec{I}_H$ і $\vec{I}_K$, відповідно. Її розв'язування здійснювалося методом Ньютона за алгоритмом, описаним у [4]. При цьому використовувалася матриця Якобі цієї системи рівнянь, вона по відношенню до невідомих $\vec{I}_g, \vec{U}_c, \vec{I}_H$ має вигляд

$$W = \begin{Vmatrix} \breve{E} & -C\omega\breve{D} & -\breve{E} \\ \omega\breve{D}\breve{L}_g + \breve{R}_g & \breve{E} + \breve{R}_K C\omega\breve{D} & 0 \\ 0 & \breve{E} + \breve{R}_K C\omega\breve{D} & -\breve{R}_H - \breve{R}_v \end{Vmatrix}, \qquad (2)$$

де $\breve{E}$ – одинична матриця; $\breve{R}_v$ – матриця диференційних гармонічних опорів вентиля; $\breve{R}_K$ – матриця диференційних гармонічних опорів електронного ключа.

Значення векторів амплітуд $\vec{U}_v$, $\vec{U}_K$ і матриць $\breve{R}_v$ і $\breve{R}_K$ при розв'язуванні системи рівнянь (1) обчислювалися за значеннями векторів амплітуд $\vec{I}_H$ і $\vec{I}_K$ за алгоритмом, описаним у [4].

Результати розрахунків зведені у таблицю. У розрахунках були прийняті незмінними такі значення: R_g = 0,05 Ом; L_g = 0,0005 Гн; R_H =5 Ом; E_m = 100 В. У провідному стані значення опору тиристора і електронного ключа приймалися такими, що дорівнювали 0,005 Ом і у непровідному стані – 2000 Ом. Кут запалювання тиристора приймався $\alpha=0$ рад, тобто тиристор перемикався у провідний стан у момент одержання напругою генератора максимального значення.

Результати розрахунків

№ режиму	C, Ф·10^{-3}	β, рад	Δβ, рад	I_{g0}, А	I_{gc1}, А	I_{gs1}, А	I_g, А	I_K, А
1	0,1	0	0	2,95	4,63	3,16	6,68	0
2	0,1	0	2π	2,95	4,59	0,03	6,33	2,22
3	0,1	4,7	3,1	2,95	4,58	1,84	6,10	1,44
4	0,23	4,7	3,1	2,95	4,63	0,18	5,83	3,28

У цій таблиці наведені задавані для кожного режиму значення ємності конденсатора C, кутів β і Δβ і одержані при цьому значення постійної складової I_{g0}, косинусної амплітуди I_{gc1} і синусної амплітуди I_{gs1} першої (основної) гармоніки струму i_g генераторної гілки, діюче значення I_g струму цієї гілки і діюче значення I_K струму гілки компенсації.

Режим № 1 відповідає вимкнутій гілці компенсації. У цьому режимі струм генераторної гілки дорівнює струмові навантаження. Оскільки генераторна напруга є чистою косинусоїдою,

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

то I_{gs1} є амплітудою псевдореактивного струму індуктивного характеру. У цьому режимі I_{gs1} = 3,16 А або 56 % від амплітуди першої гармоніки струму.

У режимі № 2 при заданому значенні ємності ємнісний струм компенсаційної гілки майже повністю компенсує згенерований керованим вентилем псевдореактивний струм (I_{gs1} = 0,03 А), але при цьому діюче значення I_g = 6,33 А струму генераторної гілки є меншим від аналогічного струму у режимі № 1 тільки на 5,2%, тобто компенсуючий ефект конденсатора у цьому випадку є незначним.

У режимі № 3 при такому самому значенні ємності компенсуюча гілка на кожному періоді за допомогою електронного ключа була під'єднана до схеми тільки протягом проміжку 3,1 радіан, віддаленого від початку періоду на 4,7 радіан. Хоч при цьому конденсатор компенсує лише частково першу гармоніку псевдореактивного струму гілки навантаження (I_{gs1}=1,84 А), діюче значення струму генераторної гілки зменшилось до I_g = 6,10 А, що є меншим від цього струму у режимі № 1 уже на 8,6%, тобто при цьому досягнуто більшого компенсуючого ефекту, та ще й при зменшенні діючого значення струму компенсаційної гілки, тобто струму, що протікає через конденсатор, від 2,22 А до 1,44 А, або на 35 %.

У режимі № 4 при тих самих значеннях β і Δβ прийнято більше значення ємності C=0,00023 Ф, чим досягнуто ще більшого компенсуючого ефекту – діюче значення струму генераторної гілки порівняно із режимом № 1 зменшилося на 12,7 %, правда – при збільшенні діючого значення струму компенсаційної гілки на 47 % порівняно із режимом № 2.

На рис. 2, 3 і 4 показані розрахункові залежності миттєвих значень струмів гілок при врахуванні гармонік до 20-ї (n=20) для режимів № 2, 3 і 4, відповідно.

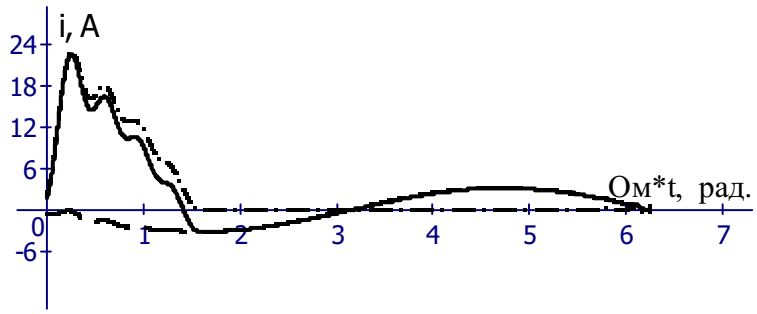

Рис. 2. Залежність від часу струмів на періоді у режимі № 2

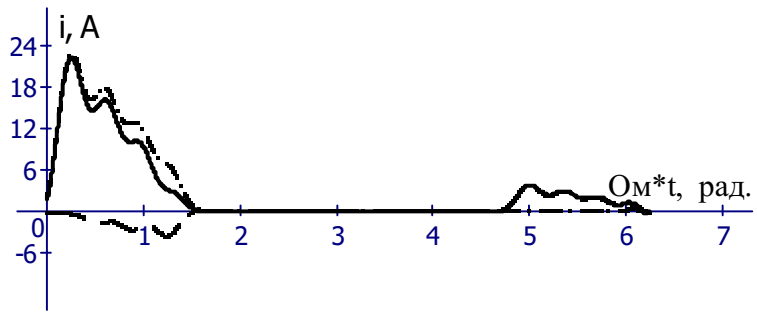

Рис. 3. Залежність від часу струмів на періоді у режимі № 3

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

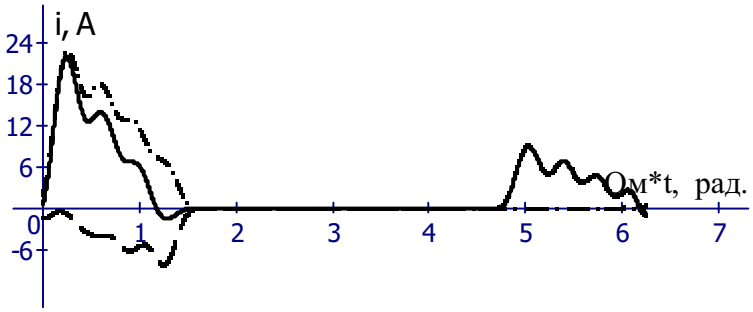

Рис. 4. Залежність від часу струмів на періоді у режимі № 4

На цих рисунках суцільною лінією показано струм генераторної гілки, штриховою – компенсаційної гілки і штрих-пунктирною – гілки навантаження.

Висновки. Для компенсації породжуваних тиристором псевдореактивних струмів одного конденсатора недостатньо. Більшого ефекту можна досягнути, якщо за допомогою електронного ключа конденсатор у цій схемі під'єднувати не на весь період, а тільки на його певну частку. Тим самим деякі породжувані нелінійністю характеристики тиристора ефекти, а саме – генерація ним псевдореактивного струму, можуть повніше компенсуватися введенням додаткового елемента – електронного ключа, що реалізує функцію провідності гілки на періоді. При цьому пошук мінімального діючого значення струму генераторної гілки є оптимізаційною задачею, у якій шукається мінімум функції

$$I_g = \varphi(C, \beta, \Delta\beta). \qquad (3)$$

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. I: Линейные электрические цепи. – 4-е изд. – М., 1970. – 592 с. 2. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. – М., 1977. – 343 с. 3. Саєнко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.09.05 / Нац. ун-т "Львівська політехніка". – Львів, 2003. – 36 с. 4. Глухивский Л.И. Расчет периодических процессов электротехнических устройств (дифференциальный гармонический метод). – Львов, 1984. – 164 с.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua