

3. Gogolyuk P., Lysiak V., and Grinberg I. *Mathematical Modeling of a Synchronous Motor and Centrifugal Pump Combination in Steady State*. 2004 IEEE PES. Power Systems Conference & Exposition. 10–13 October 2004, New York City, NY. 4. Dennis J.E., Jr, Schnabel R.B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. New Jersey, 1983. 5. Ong Chee–Mun. *Dynamic Simulation of Electric Machinery*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1998. – 626 p. 6. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. *Энергосбережение в электроприводе*. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.

УДК 621.3.016.45

Д.О. Білоха

Харківська національна академія міського господарства, м. Харків

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ОПТИМАЛЬНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

© Білоха Д.О., 2007

Розглядаються питання компенсації реактивної потужності застосуванням тиристорних компенсаторів. Запропоновано метод побудови системи керування тиристорним компенсатором, що забезпечує високу швидкодію.

The issues concerning reactive power compensation by static var compensators are treated. Highlight is on building control system. The aim is to obtain control system with advanced response time.

Вступ. За останні десятиліття в світі поширення набули тиристорні компенсатори реактивної потужності (ТКРП). Елементом ТКРП, що забезпечує швидке і плавне регулювання реактивної потужності, є фазокерований реактор (ФР), фази якого сполучені в трикутник, а кожна фаза являє собою послідовне сполучення реактора та двонапрявленого тиристорного ключа. Регулювання реактивної потужності відбувається зміною системою керування (СК) кута керування тиристорів. Схема силової частини ТКРП з навантаженням зображена на рис. 1.

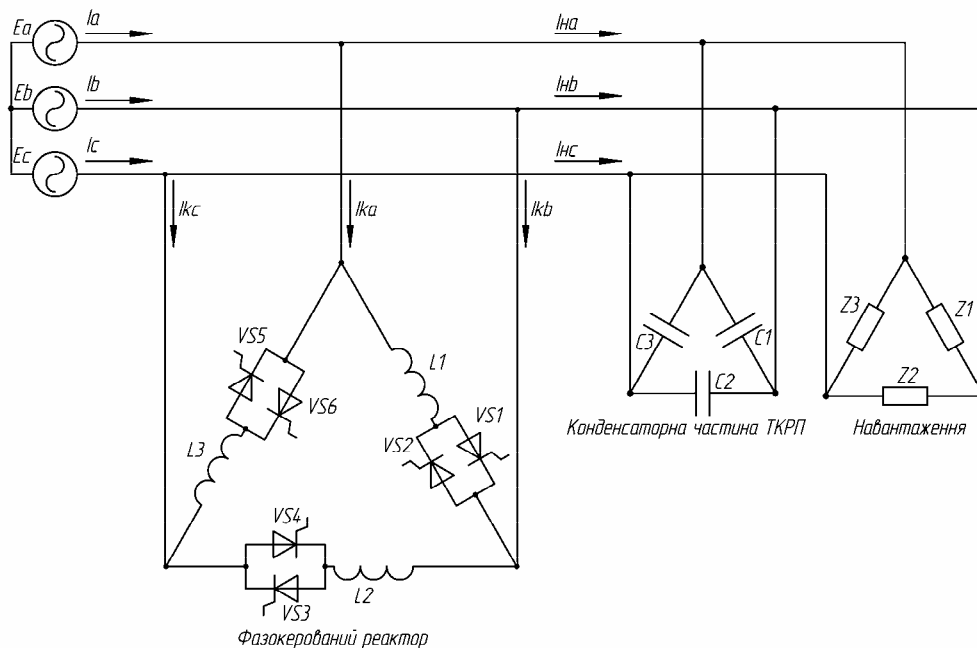


Рис. 1. Силова частина ТКРП з навантаженням

ТКРП використовуються, переважно, для розв'язання двох задач:

- керування споживанням реактивної потужності для керування режимами електроенергетичних систем;
- компенсація реактивної потужності швидкозмінного навантаження (дугові сталетопні печі, тиристорні перетворювачі електропривода тощо) для підвищення економічних показників електромережі промислового підприємства та забезпечення якості електроенергії відповідно до чинних норм.

Для ТКРП другого типу актуальним є завдання підвищення швидкодії і точності компенсації, оскільки ці показники характеризують здатність ТКРП компенсувати швидкозмінну реактивну потужність. Найперспективнішим способом розв'язання цієї задачі є вдосконалення СК ТКРП.

Відомі з літератури [1–4] принципи побудови СК ТКРП ґрунтуються на формулі [5], що виражає залежність реактивної складової першої гармоніки струму ФР від кута керування тиристорів

$$I_1 = \frac{U}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right), \quad (1)$$

чи аналогічній формулі [4], що пов'язує провідність ФР для першої гармоніки з кутом α керування тиристорами

$$B_{\text{тcr}} = -\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \omega L}, \quad (2)$$

де U – дієве значення напруги мережі; ω – колова частота; L – індуктивність реактора; α – кут керування тиристорів.

Основними недоліками принципів [1–4], що не забезпечують досягнення максимальної швидкодії та високої точності, є неврахування внеску вищих гармонік струму ФР і навантаження у струм, споживаний з мережі, оскільки керування відбувається лише за рівнем першої гармоніки та використання фільтрування для виділення першої гармоніки струму, що, внаслідок неідеальності фільтра, зумовлює зниження швидкодії та точності компенсування.

У [6] запропонований інший принцип побудови СК ТКРП, названий авторами “оптимальним”. Під оптимальністю розуміють досягнення в результаті компенсації реактивної потужності мінімуму дієвого значення струму, що споживається системою “навантаження–компенсатор” з живильної мережі. Перевагами такої компенсації є відсутність необхідності фільтрації сигналу струму, що дає змогу досягти високої швидкодії, та досягнення мінімуму споживаного з мережі струму з урахуванням не лише основної, а й вищих гармонік. Згідно із запропонованим підходом, один раз на період СК за допомогою мінімізації функціонала знаходить кути керування тиристорами на наступному періоді. Функціонал, що підлягає мінімізації, має вигляд

$$J_1 = \int_0^T (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) dt, \quad (3)$$

де i_a , i_b , i_c – миттєві струми, споживані навантаженням та ТКРП з мережі; T – період основної гармоніки напруги мережі.

Побудова СК ТКРП на підставі принципу мінімізації функціонала (3), що описаний в [6], також не дає змоги досягти максимальної швидкодії та реалізувати всі переваги методу оптимальної компенсації, що зумовлено використанням у (3) інтеграла за період, тоді як реактивна потужність навантаження може змінюватися частіше. Отже, постає задача підвищення швидкодії методу компенсації, запропонованого в [6].

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення методу підвищення швидкодії оптимальної компенсації реактивної потужності.

Матеріал і результати досліджень. Обчислення кутів керування тиристорами трифазного ФР один раз на період явно є недостатньо частим, оскільки трифазний ФР містить шість тиристорів і, відповідно, для досягнення високої швидкодії СК повинен визначати кути керування тиристорів

один за одним з інтервалом у 60 ел.градусів. Враховуючи, що зміна кута керування тиристора в одній фазі ФР впливає одночасно на два лінійні струми, споживані з мережі, і не має жодного впливу на третій лінійний струм, за основу принципу побудови СК ТКРП приймемо функціонал, мінімум якого відповідає мінімуму суми дієвих значень двох лінійних струмів, які залежать від шуканого кута

$$J_2 = \int_0^{T/2} (i_1^2 + i_2^2) dt, \quad (4)$$

де i_1, i_2 – миттєві значення струмів, споживані навантаженням і ТКРП з мережі, величина яких залежить від кута керування тиристора у цій фазі.

Тоді функціонування СК зводиться до визначення кожні 60 ел.градусів кута керування відповідного тиристора ФР, який забезпечить мінімум (4).

Розглянемо момент часу, коли лінійна напруга фази АВ досягає амплітудного значення. У цей момент СК має визначити кут керування тиристором у фазі АВ ФР. У такому разі функціонал (4) набуває вигляду

$$J_{AB} = \int_0^{T/2} (i_a^2 + i_b^2) dt. \quad (5)$$

Згідно з першим законом Кірхгофа для лінійних струмів, споживаних з мережі, можна записати

$$i_a = i_{н.а} + i_{к.аб} - i_{к.са}; \quad i_b = i_{н.б} + i_{к.бс} - i_{к.аб}, \quad (6)$$

де $i_{н.а}, i_{н.б}$ – миттєві струми навантаження, для спрощення до струму навантаження зараховуємо також струм конденсаторної частини ТКРП (див. рис. 1); $i_{к.аб}$ – миттєвий струм фази АВ ФР, що визначається шуканим кутом α_{AB} ; $i_{к.бс}, i_{к.са}$ – миттєві струми ФР фаз ВС та СА.

Тоді шуканий кут керування тиристора фази АВ ФР є розв'язком рівняння, що виражає умову мінімуму (5)

$$\frac{\partial J_{AB}}{\partial \alpha_{AB}} = 0, \quad (7)$$

де α_{AB} – кут керування тиристором фази АВ ФР, який необхідно знайти.

Отже, згідно з (6), (7) для знаходження кута керування тиристором фази АВ необхідно знати значення струмів навантаження $i_{н.а}, i_{н.б}$ та струмів фаз ФР ВС та СА $i_{к.бс}, i_{к.са}$ на наступному напівперіоді. Струми фаз ФР ВС та СА можна визначити за їхніми кутами керування, що були знайдені СК раніше. Майбутні значення струмів навантаження можна знайти з минулих, якщо зробити припущення про напівхвильову симетрію струмів навантаження. Тоді вираз (6) набуває вигляду

$$i_a = -i_{нм.а} + i_{к.аб} - i_{к.са}; \quad i_b = -i_{нм.б} + i_{к.бс} - i_{к.аб}, \quad (8)$$

де $i_{нм.а}, i_{нм.б}$ – миттєві значення струмів навантаження на минулому напівперіоді.

З урахуванням (5,8) можна записати

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{AB}}{\partial \alpha_{AB}} &= \frac{\partial}{\partial \alpha_{AB}} \int_0^{T/2} i_a^2 dt + \frac{\partial}{\partial \alpha_{AB}} \int_0^{T/2} i_b^2 dt = \\ &= 2 \int_0^{T/2} (-i_{нм.а} - i_{к.са} + i_{к.аб}) \frac{\partial i_{к.аб}}{\partial \alpha_{AB}} dt - 2 \int_0^{T/2} (-i_{нм.б} - i_{к.бс} - i_{к.аб}) \frac{\partial i_{к.аб}}{\partial \alpha_{AB}} dt \end{aligned} \quad (9)$$

Виконавши математичні перетворення (9), отримаємо рівняння

$$M_{AB} + \int_0^{T/2} i_{к.аб} dt = 0, \quad (10)$$

де

$$M_{AB} = \int_0^{T/2} (-i_{HM.a} - i_{K.ca} + i_{HM.b} - i_{K.bc}) dt. \quad (11)$$

Як відомо з [6], миттєвий струм фази ФР виражається залежністю

$$i_L(\alpha, t) = \begin{cases} \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha), \alpha < \omega t < \pi - \alpha \\ \frac{U}{\omega L} (\sin \omega t + \sin \alpha), \pi + \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha \end{cases}. \quad (12)$$

Проінтегрувавши вираз (12) і підставивши результат у (10), отримаємо рівняння, коренем якого є кут керування тиристора фази АВ ФР, що забезпечує мінімум суми дієвих значень споживаних з мережі струмів i_a та i_b

$$M_{AB} + \frac{U_m}{\omega^2 L} \left(\cos \alpha_{AB} + \left(\alpha_{AB} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha_{AB} \right) = 0. \quad (13)$$

Згідно з властивостями інтегрування вираз (11) можна записати у вигляді

$$M_{AB} = \int_0^{T/2} (i_{HM.b} - i_{HM.a}) dt - \int_0^{T/2} i_{K.ca} dt - \int_0^{T/2} i_{K.bc} dt. \quad (14)$$

Перший доданок у виразі (14) СК знаходять інтегруванням лінійних струмів навантаження, другий і третій – за формулою, що отримана інтегруванням (12) з урахуванням зсуву в часі між фазами ФР і він має вигляд

$$\int_0^{T/2} i_{K.insh.f} dt = \begin{cases} \frac{2U_m}{\omega^2 L} \left(\cos \alpha + \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \right), \alpha \geq \pi/3 \\ \frac{U_m}{\omega^2 L} \left(1 - \frac{\pi}{3} \sin \alpha \right), \alpha < \pi/3 \end{cases}. \quad (15)$$

Вирази (13) і (14) для інших фаз ФР мають аналогічний вигляд. Функціонування СК ТКРП, що побудована за пропонуваним принципом, зводиться до визначення кожні 60 ел. градусів (у момент досягнення однією з лінійних напруг мережі амплітудного значення) членів, що входять у рівняння типу (13) та розв'язання отриманого рівняння. Коренем рівняння є кут керування, що має бути заданий для відповідного тиристора. Оскільки рівняння (13) є трансцендентним, пошук кореня необхідно вести числовим методом. Роботу СК пояснює спрощена блок-схема алгоритму, що зображена на рис. 2.

Якщо брати до уваги лише основну гармоніку струмів, то запропонований спосіб керування ТКРП можна проілюструвати векторними діаграмами, що зображені на рис. 3. На рис. 3, а наведені вектори лінійних і фазних напруг мережі, лінійні струми навантаження та фазні струми ФР. Оскільки в досліджуваній системі нульовий провід відсутній, то сума векторів лінійних струмів навантаження дорівнює нулю ($I_{na} + I_{nb} + I_{nc} = 0$). Це з геометричного погляду означає, що вектори утворюють боки трикутника. Трикутник, боками якого є вектори струмів навантаження, зображений на рис. 3, б. З (б) і властивостей додавання та віднімання векторів випливає, що під час зміни модуля струму ФР, наприклад, фази СА, вершина трикутника, утворена векторами I_{na} та I_{nc} , здійснює ковзний рух по півпрямій, яка співнапрявлена вектору I_{ksa} , а вектор I_{nb} залишається незмінним. СК ТКРП зміною кута керування тиристорів з інтервалом у 60 ел. градусів “рухає” по черзі кожну вершину цього трикутника, щоразу досягаючи цим мінімальної сумарної довжини відповідних двох його боків.

Оскільки прями, вздовж яких відбувається рух вершин, утворюють рівнобічний трикутник, що впливає з кутів між векторами струмів ФР і напруг системи, то перехідний процес компенсації закінчується в момент, коли вектори результуючих лінійних струмів, споживаних з мережі, (I_a, I_b, I_c) також утворюють рівнобічний трикутник (див. рис. 3, б). Отже, пропонується СК ТКРП забезпечує не лише швидкодійну компенсацію реактивної потужності, а й симетрування навантаження.

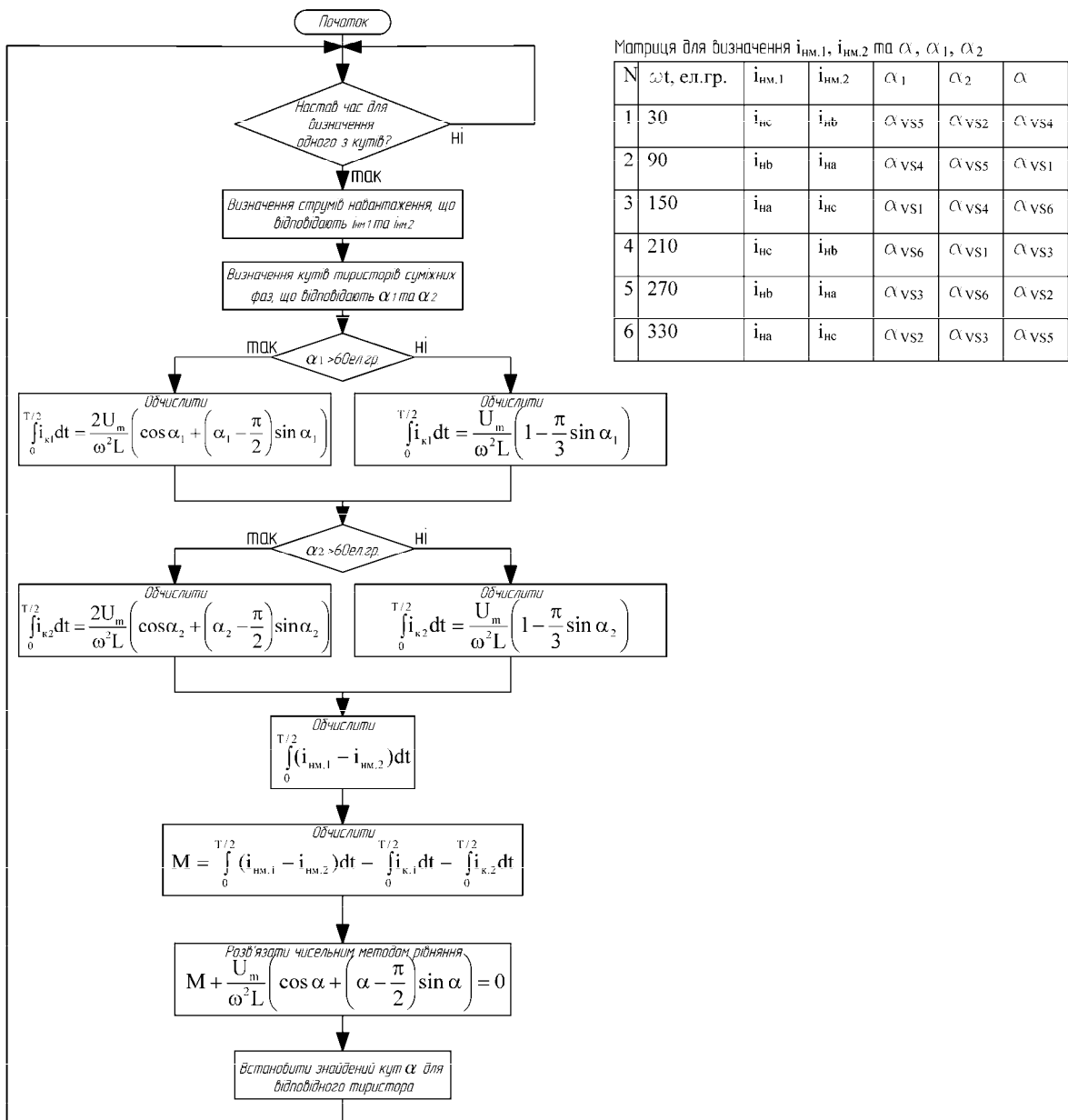


Рис. 2. Спрощена блок-схема алгоритму роботи СК ТКРП

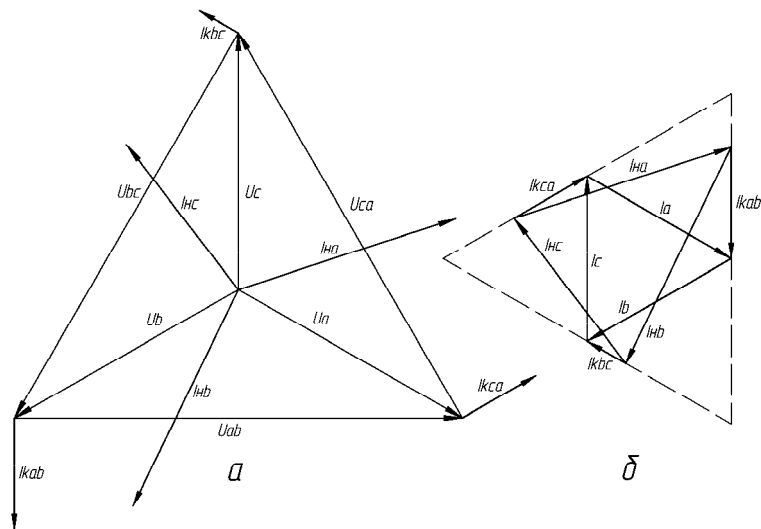


Рис. 3. Векторні діаграми компенсації

Для перевірки запропонованого принципу керування ТКРП у системі MATLAB створена математична модель системи, що складається з навантаження, тиристорного компенсатора та СК. Принципова схема силової частини модельованої системи наведена на рис. 1. Схема була модельована з такими значеннями елементів: $L1=L2=L3=0,15$ Гн; $C1=C2=C3=36,27$ мкФ; $Z1, Z2$ – відсутні; $Z3 = 76$ Ом

Дієві значення струмів, що споживаються з мережі, з компенсацією та без неї в усталеному режимі, а також з компенсацією за схемою Штейнмеца наведено у таблиці.

Дієві значення струмів

Струм	Без компенсації, А	З компенсацією, А	За Штейнмецем, А
I_a	7,7257	2,3213	2,0469
I_b	4,7032	2,0587	2,0469
I_c	5,3178	2,0835	2,0469

Для наочної характеристики перехідного процесу доцільно використати дієві значення результуючих лінійних струмів. Дієві значення струмів знаходили з усередненням “уперед” за формулою

$$I_d(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2 dt} . \quad (16)$$

Отже, робити висновок про закінчення перехідного процесу компенсації можна за досягненням величиною (16) усталеного значення. Графіки зміни дієвих значень споживаних з мережі струмів, що розраховані за формулою (16), наведено на рис. 4. Для $t = 0,02$ с починає роботу СК ТКРП, через півперіоду (з $t = 0,03$ с) максимальне відхилення дієвого значення струму від усталеного становить 10,1 %.

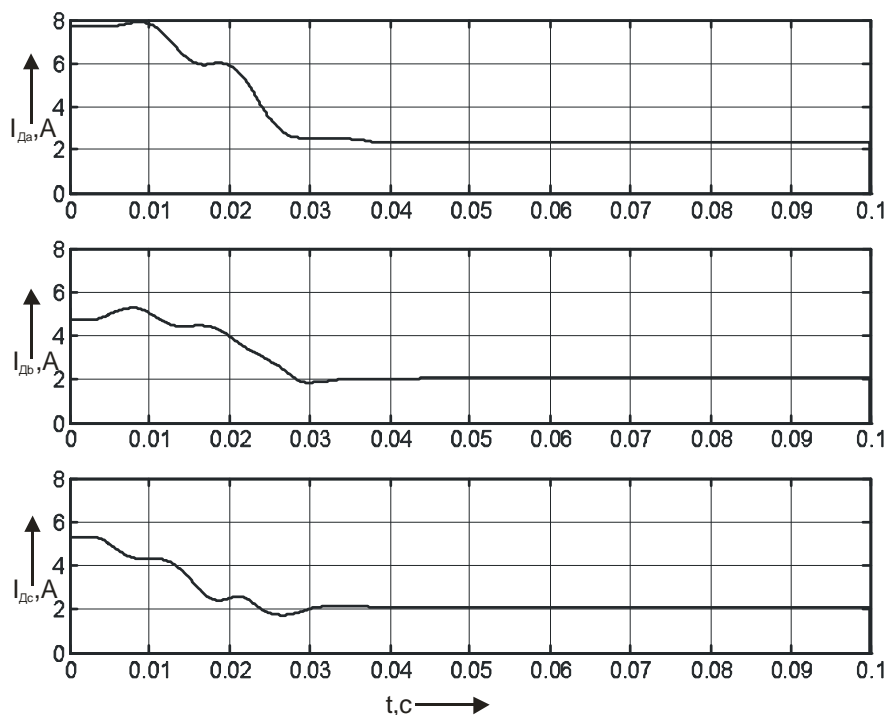


Рис. 4. Дієві значення струмів, що споживаються з мережі

Висновки. Розроблено метод підвищення швидкодії оптимальної компенсації реактивної потужності. Підвищення швидкодії досягнуто за рахунок зміни функціонала, що підлягає

мінімізації. Показано, що система здійснює компенсацію реактивної потужності та симетрування навантаження.

1. US Pat. 4, 068, 159. *Fast Current Mesurment Apparatus for Static Var Generator Compensator Control Circuit and Method for Using Same* / L. Gyugyi. Printed Jan. 10, 1978. 2. El-Bolok H., Masoud M., Mahmoud M. *A Microprocessor Based Adaptive Power Factor Corrector for Nonlinear Loads* // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 1990. – Vol. 37, № 1. – P. 77–81. 3. Kahle K., Jovic D. *Static Var Compensator for CERN's Proton Synchrotron Particle Accelerator* // *Proceedings of the conference "Secure Critical Infrastructures", Grenoble, October 2004*. 4. Hasler J-Ph., Johansson T., Angquist L. *Method and Device for Compensation of Reactive Power. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty Number WO97/49157*. Printed Dec. 24, 1997. 5. Худяков В.В., Чванов В.А. *Управляемый статический источник реактивной мощности* // *Электротехника*. – 1969. – № 1. – С. 29–35. 6. Exposito A., Vazquez F., Mitchell C. *Microprocessor-Based Control of an SVC for Optimal Load Compensation* // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1992. – Vol. 7, № 2. – P. 706–712.

УДК 62-523.8

А. Сидор

Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

МОДЕЛІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОЗГАЛУЖЕНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

© Сидор А., 2007

Метод дослідження показників надійності розгалужених систем за допомогою твірних функцій поширено на старіння вихідних елементів системи. Досліджено основні показники надійності складних енергетичних систем. Вирази для основних характеристик надійності розроблено для випадків, коли безвідмовність вихідних елементів, що старіють, описується розподілом Релея.

A method of investigation of reliability indices of ramified systems by means of generating functions is developed taking account of aging of the system's output elements. Main reliability indices of compound power systems are examined in this paper. Expressions for the main reliability indices are worked out in the cases when the lifetime of ageing output elements is circumscribed by the Raileigh distribution.

Вступ. Для багатьох сучасних технічних автоматизованих систем вирішення проблеми надійності визначає, бути чи не бути цим системам. До таких розгалужених систем можна зарахувати регіональні й галузеві автоматизовані системи управління, до складу яких входить велика кількість комп'ютерів, системи управління повітряним рухом для цивільної авіації, автоматизовані системи управління технологічними процесами, мережа центрів управління та слідкування за космічними об'єктами, комп'ютерні мережі [1].

Традиційні методи аналізу та оцінки надійності систем здебільшого орієнтовані на прості об'єкти й не можуть повною мірою задовольнити потреби аналізу надійності великих систем. Необхідно розвивати методи оцінки, аналізу надійності розгалужених систем з урахуванням їхньої специфіки (можливості зміни у структурі, збереження роботоздатності при часткових відмовах за рахунок збитковості тощо), розробляти нові методи оцінки, які дають змогу повною мірою оцінювати функціонування систем [2].

Автоматизовані системи обліку електроенергії часто можна подати у вигляді складних розгалужених систем. Вони дають змогу здійснювати облік та оперативний контроль за