

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В УЗАГАЛЬНЕНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В.Г. Ягуп<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, К.В. Ягуп<sup>2\*\*</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна,  
e-mail: [yagup.walery@gmail.com](mailto:yagup.walery@gmail.com).

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

*Досліджено режими компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, що живиться від синхронного генератора. Показано, що реактивна складова комплексного опору генератора та тракту електропередачі може обумовлювати відносно великі рівні реактивної потужності в системі. Ця потужність залишається в системі навіть після застосування поперечної ємнісної компенсації, яка не в змозі забезпечити повну компенсацію реактивної потужності в системі електропостачання. За цих умов методом пошукової оптимізації на комп'ютерній моделі знайдено оптимальне значення величини ємності компенсуючого конденсатора і досліджено режими в системі під час варіацій критеріїв оптимізації. Бібл. 16, рис. 6.*

**Ключові слова:** реактивна потужність, повна компенсація, синхронний генератор, лінія електропередачі, пошукова оптимізація.

**Вступ і постановка задачі.** Для систем електропостачання однією з основних функцій є передача електроенергії від генератора до споживача з мінімальними втратами енергії. За заданих параметрів і конфігурації електричної мережі забезпечення цієї функції полягає в оптимізації режимів в системі. Важливим засобом в цьому напрямку є компенсація реактивної потужності в системі електропостачання [1, 2]. При цьому може досягатися також симетрування режимів трифазних систем електропостачання, яке забезпечує рівномірне завантаження джерел електроенергії навіть за несиметричного характеру споживання [3-10]. Пристрої, що забезпечують симетрування та компенсацію реактивної потужності, називають симетро-компенсуючими пристроями (СКП). Задля компенсації реактивної потужності споживачів застосовується поперечна компенсація, коли СКП у вигляді конденсаторних батарей вмикаються паралельно споживачеві або групі споживачів, реактивна потужність яких таким чином компенсується [3-6]. Теоретичне обґрунтування і практичне застосування знайшли визначення параметрів СКП без урахування параметрів елементів заступних схем тракту електропередачі. Під час симетрування трифазних систем електропостачання традиційно розглядаються та враховуються параметри несиметричного навантаження [3-5]. Зокрема, двоконденсаторне симетрування, повне обґрунтування якого шляхом придушення зворотної симетричної складової живильних струмів наведено в [7], залишає в системі надлишкову реактивну потужність від навантаження, оскільки при цьому не забезпечується співпадання за фазою систем живильної напруги і прямої симетричної складової живильних струмів. У разі запровадження індивідуальної або групової компенсації в трифазних системах електропостачання визначення ємностей конденсаторних батарей здійснюється також з урахуванням лише реактивностей навантаження [6, 8-10]. Для розрахунку потужності  $Q_C$  комплексу компенсуючих конденсаторів за заданими активною потужністю  $P$  навантаження, початковим  $\varphi_1$  та кінцевим  $\varphi_2$  фазовими кутами, що визначають початковий та скоректований коефіцієнти потужності, використовується формула

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2).$$

Такий підхід сам по собі вже передбачає неповну компенсацію реактивної потужності навантаження. Впливають, крім того, нестационарність споживання електроенергії, яка лише приблизно враховується добовими графіками, а також дискретність величин ємностей конденсаторів, з яких набирається комплект. Частково останні питання вирішуються застосуванням силових активних фільтрів [10, 11]. Але і ці пристрої також налаштовуються на компенсацію реактивної потужності лише навантаження, оскільки їхні системи керування використовують інформацію про напруги і струми у вузлах підключення силового активного фільтра, що заздалегідь вмикається паралельно навантаженню.

Але такий спосіб залишає в системі реактивну потужність, обумовлену трактом електропередачі, тобто повна компенсація реактивної потужності при цьому не забезпечується. Під режимом повної компенсації реактивної потужності будемо вважати такий, коли струм генератора синусоїдальної напруги співпадає за фазою і формою з напругою, що її створює генератор. За таких умов генератор пов'язаний лише з активною потужністю. Відсутність реактивної потужності генератора означає, що вона циркулює в колах поза генератора, а це, в свою чергу, розвантажує електричні мережі від надлишкових струмів, пов'язаних з проникненням реактивної потужності до самого генератора через лінії електропередачі. На теперішній час забезпечення в системах електропостачання оптимальних режимів з повною компенсацією реактивної потужності набуває ознак особливо актуального питання в зв'язку з бурхливим розвитком інтелектуальних систем електропостачання та електроспоживання, оскільки в таких системах повинен здійснюватися цифровий контроль параметрів режимів з передачею повної інформації про функціонування будь-яких елементів системи електропостачання [11]. Дійсно, для інтелектуальних електричних систем очікується широке впровадження інтелектуальних датчиків, цифровізація інформації, керування великими масивами інформації та впровадження нового програмного забезпечення. Все це дає перспективу для практичної реалізації ідеї повної компенсації реактивної потужності саме в інтелектуальних електричних системах на основі оптимізаційних пошукових методів.

Задля досягнення режиму повної компенсації реактивної потужності, вочевидь, треба компенсувати реактивні потужності в тракці електропередачі. Він, в загальному випадку, включає в себе індуктивності дротів самої лінії електропередачі, а, крім того, індуктивності розсіювання і намагнічування трансформаторів, що підвищують напругу генератора перед подачею її на дроти лінії електропередачі, і трансформаторів, які знижують напругу з лінії перед подачею її споживачам. Для компенсації цієї реактивної потужності застосовується повздовжня компенсація, коли конденсаторні батареї вмикаються послідовно з лініями електропередачі. Слід зазначити, що такі повздовжні конденсатори мають бути розраховані на високі напруги, і, крім того, їхня наявність може приводити до виникнення резонансних явищ в системі. В той же час, як показують дослідження [12, 13], повна компенсація може бути досягнута лише завдяки поперечній компенсації. У такому разі на СКП покладаються задачі не тільки симетрування навантаження і компенсації саме його реактивної складової потужності, а й додаткової компенсації реактивних потужностей в тракці електропередачі. Дослідження таких режимів з поперечною компенсацією цікаве також з приводу силових активних фільтрів паралельного типу [14], які є найпростішими в сенсі вмикання їх в систему електропостачання. Як показують дослідження на моделях, можливості повної компенсації реактивної потужності і в цих випадках залежать від співвідношення параметрів навантаження і тракту електропередачі. В останньому наявність індуктивностей дротів і трансформаторів може приводити до значного зростання реактивної потужності цих елементів,

**Метою статті** є дослідження впливу параметрів тракту передачі електричної енергії і компенсувального пристрою на електромагнітні процеси та параметри режимів за поперечної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання за умови досягнення оптимального режиму повної компенсації реактивної потужності в системі, а за відсутності повної компенсації – дослідити можливість досягнення оптимального режиму за заданим критерієм оптимізації. Предметом дослідження виступатиме узагальнена електрична система енергопостачання, в якій враховуються параметри генератора електроенергії, лінії електропередачі та навантаження. До такої системи з точки зору затискачів навантаження може бути приведена будь-яка складна система на основі використання теореми про активний двополосник. Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси та енергетичні показники, що супроводжують режими компенсації реактивної потужності в системі.

**Основний зміст статті.** Розглянемо систему електропостачання, що живиться від синхронного генератора з наступними заданими параметрами [15]: повна номінальна потужність синхронного генератора  $S_G=15$  мВА; лінійне діюче значення напруги на затискачах синхронного генератора  $U_G=6,3$  кВ; коефіцієнт потужності синхронного генератора  $K_M=0,8$ . Навантаження визначається з умов лінійної напруги  $U_z=6$  кВ, активна потужність навантаження  $P_z=11,43$  мВт, коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\varphi_2=0,8$ , частота 50 Гц. Активна потужність генератора  $P_{GN}=12$  мВт. Обчислення еквівалентного опору привело в [15] до результату  $Z_z = (2,015 + j1,511)$  Ом.

Комплексний опір синхронного генератора представлено у вигляді  $\dot{V}_{ck} = 3505,83e^{j(-45^\circ)}$ .

Комплексний опір лінії електропередачі прийнятий  $Z_{lin} = (0,11 + j0,063)$  Ом.

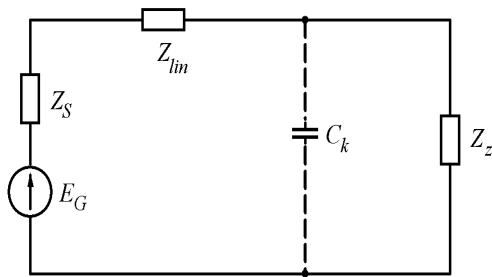


Рис. 1

**ВИХІДНІ ДАННІ СИСТЕМИ:**

$$Z_G := R_G + j \cdot X_G = 0.066 + 3.2i$$

$$Z_i := R_i + j \cdot X_i = 0.176 + 3.263i$$

$$C_k := 758.2217 \cdot 10^{-6}$$

$$X_C := (j \cdot \omega \cdot C_k)^{-1} = -4.198i$$

$$Z_z := R_z + j \cdot X_z = 2.015 + 1.511i$$

**РЕЖИМ ЧАСТКОВОЇ КОМПЕНСАЦІЇ:**

$$U_Z := E_{Gm} = 5.144 \times 10^3$$

$$I_Z := \frac{U_Z}{Z_z} = 1.634 \times 10^3 - 1.225i \times 10^3$$

$$I_C := \frac{U_Z}{X_C} = 1.225i \times 10^3$$

$$I_G := I_C + I_Z = 1.634 \times 10^3 + 5.288i \times 10^{-5}$$

Given

$$E_{Gm} = Z_i \cdot I_G + U_Z \quad U_Z = Z_z \cdot I_Z$$

$$U_Z = X_C \cdot I_C \quad I_G = I_Z + I_C$$

$$\begin{pmatrix} I_G \\ I_C \\ I_Z \\ U_Z \end{pmatrix} := \text{Find}(I_G, I_C, I_Z, U_Z)$$

$$\begin{pmatrix} I_G \\ I_C \\ I_Z \\ U_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 788.085 - 773.608i \\ 580.11 + 590.966i \\ 207.975 - 1.365i \times 10^3 \\ 2.481 \times 10^3 - 2.435i \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис. 2

допомогою так званої позначки логічної рівності. Оператор *Find* ініціює процес знаходження рішення оптимізаційним методом в межах заданої точності. Результати розв'язання надсилаються у вектор шуканих змінних у вигляді комплексних величин напруги навантаження і струмів усіх трьох гілок системи електропостачання (рис. 2).

На основі отриманих результатів розраховано енергетичні показники системи електропостачання за такої часткової компенсації реактивної потужності. Розрахунки енергетичних показників наведено на рис. 3. Тут на робочому листі позначено комплексні величини повних потужностей *S<sub>G</sub>* – генератора, *S<sub>i</sub>* – на опорах генератора та лінії електропередачі, *S<sub>C</sub>* – компенсуючого конденсатора, *S<sub>Z</sub>* – навантаження. Всі ці потужності обчислюються як половини добутків комплексів напруги елемента на спряжений комплекс струму цього елемента. Порівняння реактивних потужностей конденсатора та навантаження свідчить про те, що компенсуючий конденсатор створює реактивну потужність ємнісного характеру, яка повністю компенсує реактивну потужність навантаження, що має індуктивний характер. Цю обставину відображено в першому

Ці умови призводять до еквівалентної схеми узагальненої системи електропостачання, наведеної на рис. 1. Така еквівалентна схема відображає однофазний варіант для однієї фази системи електропостачання в припущенні, що трифазна система абсолютно симетрична. *E<sub>G</sub>* при цьому відображає фазну напругу синхронного генератора з діючим значенням:  $P_z = 6,3/\sqrt{3}$

За цих умов в [15] визначено ємність компенсуючого конденсатора  $C_k = 758$  мкФ, що вмикається паралельно навантаженню і забезпечує одиничне значення коефіцієнту потужності. Однак при цьому не забезпечено дотримання принципу цілісності системного підходу, оскільки навантаження розглядається у відриві від кіл генератора і лінії електропередачі.

Проведемо аналіз режиму для представленого варіанту з дотриманням системного підходу. На рис. 2 наведено робочий лист з текстом програми для системи комп'ютерної математики MathCAD з розрахунком параметрів режиму компенсації реактивної потужності шляхом увімкнення поперечного конденсатора заданої ємності. На початку програми наведено параметри системи електропостачання і конденсатора. Далі задано початкові значення струмів і напруги, відносно яких ведеться обчислення режиму. Використовується неоднорідний базис, а саме: напруга на навантаженні *U<sub>Z</sub>* та струми навантаження *I<sub>Z</sub>*, конденсатора *I<sub>C</sub>* та синхронного генератора *I<sub>G</sub>*. Розв'язання рівнянь режиму далі здійснюється оптимізаційним методом, а задля поліпшення і прискорення збіжності вирішення початкові значення для змінних, які знаходяться, наближені в певній мірі до розв'язання. Для цього призначаємо початкові значення за умови рівності напруги навантаження напрузі генератора, а струми знаходимо на основі рівнянь Ома і Кірхгофа, як це і показано на рис. 2 у розділі, що передує оператору *Given*. За цим оператором розміщено рівняння електричної рівноваги системи, причому ліві і праві частини кожного рівняння зв'язані між собою за

рівнянні балансу реактивних потужностей, де сума вказаних потужностей складає величину, близьку до нуля в межах чисельної похибки розв'язання.

#### АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

ПОВНІ ПОТУЖНОСТІ:

$$SG := 0.5 \cdot E_{Gm} \cdot \overline{IG} = 2.027 \times 10^6 + 1.99i \times 10^6$$

$$Si := 0.5 \cdot Z_i \cdot IG \cdot \overline{IG} = 1.073 \times 10^5 + 1.99i \times 10^6$$

$$SC := 0.5 \cdot U_Z \cdot \overline{IC} = -1.439i \times 10^6$$

$$SZ := 0.5 \cdot U_Z \cdot \overline{IZ} = 1.92 \times 10^6 + 1.439i \times 10^6$$

БАЛНС РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ:

$$\text{Im}(SC) + \text{Im}(SZ) = -0.062$$

$$\text{Im}(SG) - \text{Im}(Si) = -0.062$$

КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ:

$$\text{CosFi} := \frac{\text{Re}(SG)}{|SG|} = 0.714$$

АКТИВНІ ПОТУЖНОСТІ СИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА І НАВАНТАЖЕННЯ (ДЛЯ 3 ФАЗ):

$$P_{G3f} := 3 \cdot \text{Re}(SG) = 6.081 \times 10^6$$

$$P_{Z3f} := 3 \cdot \text{Re}(SZ) = 5.759 \times 10^6$$

ЛІНІЙНА НАПРУГА НА НАВАНТАЖЕННІ  
ЕФЕКТИВНЕ ЗНАЧЕННЯ:

$$U_{Z\text{efLin}} := \frac{|U_Z| \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 4.258 \times 10^3$$

Рис. 3

За цих умов, однак, рішення не було знайдене, не дивлячись на спроби змінювати початкові умови шуканих змінних. Тому прийшлося застосувати пошук режиму повної компенсації засобами

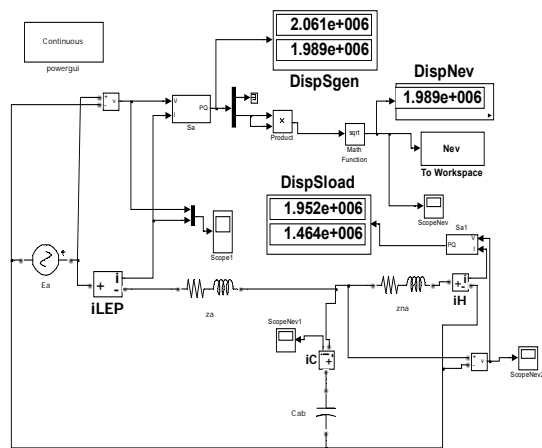


Рис. 4

електроенергії задається необхідне амплітудне значення напруги

$$E_{Gm} = \frac{U_G \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 5143,9 \text{ В},$$

оскільки функціонування моделі здійснюється в часовій області шляхом інтегрування диференціальних рівнянь для простору змінних стану. Реактивну потужність джерела електроенергії прийнято за цільову функцію оптимізації, що відповідає системному підходу під час вирішення задач оптимізації процесів системи електропостачання з точки зору енергетичних показників. Модель

Порівняння реактивних складових комплексів повних потужностей генератора і сумарного опору генератора та лінії електропередачі вказує на те, що в системі продовжує циркулювати некомпенсована реактивна потужність. Ця обставина ілюструється другим рівнянням балансу реактивних потужностей (рис. 3). За отриманими результатами обчислено коефіцієнт потужності  $\text{CosFi}=0,714$ , який становить досить мале значення і характеризує систему електропостачання як неефективну навіть у разі застосування СКП. Тим паче, контроль активних потужностей генератора і навантаження призводить у перерахунку до трифазної системи до значень відповідно 6,081 мВт та 5,759 мВт замість задекларованих у [15]  $P_{GN}=12$  мВт та  $P_z=11,43$  мВт. Мале значення потужності навантаження пояснюється суттєвим зниженням лінійної напруги на навантаженні, ефективне значення якої у перерахунку (рис. 3) складає лише 4,258 кВ замість очікуваних 6 кВ. Ще більш вражаючий занепад режиму спостерігається за відсутності СКП. Поклавши  $C=0$ , отримуємо наступні показники режиму за відсутності СКП в перерахунку на трифазний режим:  $P_{GN}=3,152$  мВт та  $P_z=2,899$  мВт,  $\text{CosFi}=0,417$ . Ефективне значення лінійної напруги на навантаженні при цьому становить лише 3,021 кВ замість 6 кВ.

Спроби віднайти режим повної компенсації методом пошукової оптимізації на MathCAD використовували повну систему рівнянь, яку було доповнено додатковою умовою рівності нулю реактивної потужності джерела живильної напруги в заступній схемі.

MATLAB в часовому просторі з використанням *Sim Power System* – візуальної моделі (рис. 4) і вбудованих функцій оптимізації.

Силова частина моделі фактично повторює вихідну заступну схему, наведену на рис. 1, за тим винятком, що комплексні опори генератора  $z_s$  і лінії електропередачі  $z_{lin}$  об'єднано в один елемент з комплексним опором

$$z = z_s + z_{lin} = (0,176 + j3,263) \text{ Ом}.$$

Ємність  $C_k$  конденсатора, що компенсує реактивну потужність, прийнято як змінну оптимізації. У модель увімкнено вимірювачі напруги і струму джерела напруги, що дає змогу далі за допомогою віртуального вимірювача активної та реактивної потужностей оцінити енергетичні показники системи. Для джерела

працює в часовому інтервалі, що відповідає одному періоду напруги живлення з малим кроком інтегрування  $\Delta t=10^{-4}$  с за методом Розенброка, що дає змогу розв'язати диференціальними рівняннями. Знайдене в результаті моделювання значення цільової функції передається за допомогою елемента *To Workspace* в робочий простір MATLAB, звідси воно надходить у вбудовану функцію *fminsearch()*, яка здійснює із заданою точністю пошук оптимуму методом деформованого багатогранника. Ця функція викликається в основній програмі, з якої, в свою чергу, викликається файл-функція, що забезпечує обчислення значення цільової функції після чергового прогону візуальної *Sim Power System*-моделі. Задля отримання оптимального результату знадобилося 63 виклики моделі, внаслідок чого отримано значення ємності конденсатора  $C_k = 776,174$  мкФ. Однак, що особливо примітно для варіанта, що розглядається, цільова функція при цьому не зводиться до нульової величини. Про це свідчать наведені на рис. 4 показання приладів, які відповідають саме випадку досягнення рішення. Тут видно, що повна потужність, яка споживається від джерела, становить величину  $S_G = P_G + jQ_G = (2,061 + j1,989)$  мВА.

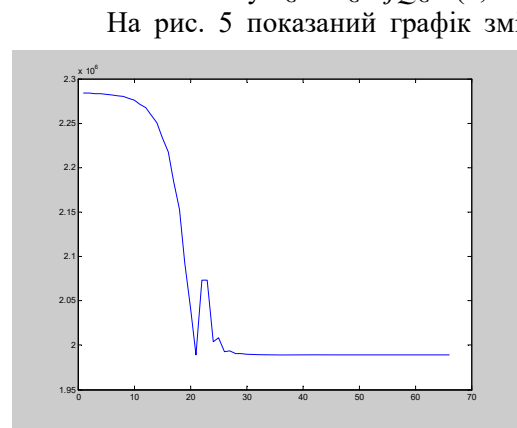


Рис. 5

На рис. 5 показаний графік зміни цільової функції в залежності від номера прогону SPS-моделі. Цей графік фактично відображає реактивну потужність джерела  $Q_G$  на відповідному кроці оптимізації. Як видно з цього графіка, значення цільової функції стійко досягає мінімального значення  $1,989 \cdot 10^6$ . Це говорить про досягнення за заданих параметрах лише часткової компенсації реактивної потужності в системі. Відповідний коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{2,061}{\sqrt{2,061^2 + 1,989^2}} = 0,72 < 1,$$

що відповідає куту відставання струму  $\varphi=44^\circ$ . Для промодельованого таким чином варіанту струм від джерела в лінії електропередачі  $I_G = 1113,82e^{j(-43,98^\circ)}$ . Напруга на

навантаженні і конденсаторі  $U_Z = 3505,83e^{j(-45^\circ)}$  Струм через навантаження  $I_Z = 1391,97e^{j(-81,87^\circ)}$  Потужність, що споживається навантаженням:  $S_Z = 0,5U_Z \cdot I_Z^* = (1,952 + j1,464)$  мВА.

В [15] під час розгляду параметрів навантаження наводяться наступні дані: струм через навантаження (діюче значення)  $I_Z = 1375$  А; активна потужність  $P_Z=11,43$  мВА; фазна напруга на навантаженні (діюче значення)  $U_Z=3464$  В. Звертають на себе увагу наступні обставини, очевидні з проведеного аналізу. Активна потужність навантаження 1,952 мВт за результатами моделювання системи менша задекларованої в [15] і складовою в перерахунку на одну фазу  $11,43/3=3,81$  мВт. Відношення цих потужностей становить величину  $3,81/1,952=1,952$ .

Напруга на навантаженні, що становить діюче значення величиною

$$V_{cc} = \frac{3505,83}{\sqrt{2}} = 2479 \text{ В},$$

також менша задекларованою в [15] діючого значення  $U_Z=3464$  В. Відношення напруг становить  $3464/2479=1,397$ . Квадрат цієї величини саме і становить відношення потужностей.

Таким чином, зменшення потужності навантаження пояснюється зменшенням напруги на навантаженні на 40% у порівнянні з розрахунковим в [15]. Причому, зауважимо, що це спостерігається безпосередньо в режимі компенсації реактивної потужності.

Причинами виявлених протиріч є, на наш погляд, такі обставини. По-перше, аналіз режимів в колі навантаження і колі генератора в [15] проведено окремо без системного підходу. На навантаженні напруга априорі вважається рівною 6 кВ і при цьому також вважається, що різниця напруг генератора і навантаження в 0,3 кВ падає на опорах генератора і лінії електропередачі. Так і повинно було б бути на практиці, що є підставою для наближених оціночних розрахунків. Однак, по-друге, опір генератора вибрано надмірно великим, причому його вибір в [15] не обґрунтовується ані розрахунковими формулами, ані будь-якими посиланнями. Особливо завищеною представляється

реактивна складова опору генератора  $x_S=3,2$  Ом. Дійсно, базовий опір синхронного генератора

$$z_b = \frac{U_G^2}{S_G} = \frac{6,3^2}{15} = 2,646 \text{ Ом.}$$

Відносне значення обраного в [15] реактивного опору становить, таким чином, величину

$$\frac{3,2}{2,646} \cdot 100\% = 121\%,$$

в той час, як на практиці ця величина зазвичай становить  $8 \div 25\%$  для турбогенераторів [16].

Навіть не користуючись системним підходом, задачу вибору компенсуючого конденсатора можна вирішити з умови компенсації лише реактивної складової провідності навантаження завдяки рівнянню  $\omega C_{cc} + I_m \cdot Z_z^{-1} = 0$

Оскільки за  $Z_z = 2,015 + j1,511$  провідність навантаження

$$Y_z = \frac{1}{2,015 + j1,511} = 0,31766 - j0,23820.$$

Звідси  $C_z = 0,2382 \cdot \omega^{-1} = 758,22$  мкФ.

Таке рішення не вимагає використання інших вихідних даних і розрахунків для параметрів, наведених в [15].

Для виявлення впливу величини ємності конденсатора на електромагнітні процеси і параметри режимів за поперечної компенсації проведено комп'ютерні експерименти на моделі з пошуком оптимальних режимів за різними критеріями оптимізації. Результати цих експериментів наведено у таблиці.

$C_k$ (мкФ)	$I_{mG}$ (кА)	$I_{mCk}$ (кА)	$U_{mZ}$ (кВ)	$Q_i$ (мВА)	$Q_{Ck}$ (мВА)	$Q_z$ (мВА)	$\Delta Q$ (мВА)	$\cos \varphi$
0	0,9793	0	2,466	1,565	0	0,724	2,289	0,417
600	1,038	0,608	3,228	1,757	-0,982	1,241	2,016	0,655
700	1,076	0,743	3,383	1,890	-1,258	1,363	1,995	0,693
758,22	1,104	0,828	3,477	1,990	-1,439	1,439	1,990	0,714
776,13	1,114	0,855	3,506	2,024	-1,499	1,464	1,989	0,720
800	1,127	0,891	3,545	2,072	-1,579	1,497	1,990	0,727
900	1,191	1,050	3,712	2,314	-1,948	1,642	2,007	0,755
1000	1,268	1,220	3,883	2,624i	-2,368	1,795	2,051	0,778
1266,4	1,535	1,718	4,317	3,844	-3,708	2,220	2,356	0,8024
1730,9	2,077	2,562	4711	7,035	-6,034	2,643	3,644	0,7311
2000	2,298	2,870	4,567	8,613	-6,553	2,484	4,545	0,639
2034,6	2,316	2,893	4,533	8,749	-6,559	2,448	4,639	0,6273
3000	2,338	2,852	3,026	8,918	-4,315	1,091	5,693	0,322
4000	2,133	2,513	1,999	7,423	-2,512	0,476	5,388	0,189
$9 \times 10^6$	1,574	1,574	$0,55 \times 10^{-3}$	4,044	$-48 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	4,043	0,054

Тут, крім ємності конденсатора (у першому стовпці) відображено такі величини:  $I_{mG}$  – амплітудне значення струму синхронного генератора;  $I_{mCk}$  – амплітудне значення струму компенсуючого конденсатора;  $U_{mZ}$  – амплітудне значення напруги на навантаженні і на конденсаторі;  $Q_i$  – реактивна потужність, обумовлена реактивними опорами генератора і лінії електропередачі;  $Q_{Ck}$  – реактивна потужність компенсуючого конденсатора;  $Q_z$  – реактивна потужність навантаження;  $\Delta Q$  – сума попередніх трьох реактивних потужностей;  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності системи.

Результати досліджень показують, що за відсутності ємності окрім надзвичайно низького коефіцієнта потужності спостерігається занижена напруга на навантаженні. Її відносна величина складає  $2,466/4,9=0,503$ , що обумовлює наявність на навантаженні лише біля чверті від номінальної потужності. За ємності 758,22 мкФ виникає режим повної компенсації реактивної потужності лише навантаження, але при цьому залишається некомпенсованою реактивна потужність внутрішнього опору генератора і лінії електропередачі. Напруга на навантаженні досягає відносного значення  $3,477/4,9=0,71$ , що, однак, забезпечує лише біля половини номінальної потужності навантаження. Подальше зростання ємності конденсатора пов'язане із досягненням мінімальних значень певних

показників, для знаходження яких модель було модифіковано і налагоджено на обчислення відповідних цільових функцій. Так мінімум реактивної потужності в системі досягається за ємності конденсатора 776,13 мкФ, однак низькими залишаються як коефіцієнт потужності, так і напруга на навантаженні. Наступний максимум відносно саме коефіцієнта потужності досягається із збільшенням ємності до значення 1266,1 мкФ. Далі максимум амплітуди вихідної напруги виникає у разі збільшення ємності конденсатора до величини 1730,9 мкФ, і відносне значення напруги на навантаженні досягає в максимумі значення  $4,711/4,9=0,96$ . Нарешті, дослідження моделі на максимум реактивної потужності на конденсаторі призводить до значення -6,559 мВА за ємності конденсатора 2034,6 мкФ. Таким чином, використання пошукової оптимізації на візуальній моделі дає змогу визначити параметри компенсатора в залежності від бажаного режиму шляхом зміни цільової функції, яка обчислюється у разі прогону візуальної моделі системи електропостачання.

Подальше збільшення ємності конденсатора призводить до погіршення показників, що фізично пояснюється шунтуючою дією компенсатора щодо навантаження. Завдяки цьому напруга на навантаженні зменшується, що обумовлює зменшення споживаної навантаженням потужності. З другого боку, при цьому зростає струм через лінію електропередачі, що призводить до зростання реактивної і активної потужностей, що приходяться на долю лінії електропередачі. Ця ж причина по суті не дає змоги досягти режиму повної компенсації в системі електропостачання, в якій параметри тракту передачі електричної енергії мають відносно великі значення реактивного опору. Намагання збільшити долю скомпенсованої конденсатором реактивної потужності шляхом збільшення ємності конденсатора фактично наражається на протидіюче зниження напруги на цьому конденсаторі. Це зниження обумовлено збільшенням струму через лінію електропередачі, що призводить до збільшення падіння напруги на реактивному опорі лінії електропередачі, і це одночасно збільшує реактивну потужність, споживану саме лінією електропередачі, яку намагається компенсувати конденсатор за рахунок збільшення його ємності. Цим і пояснюється неможливість досягнення повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання із завищеними реактивностями

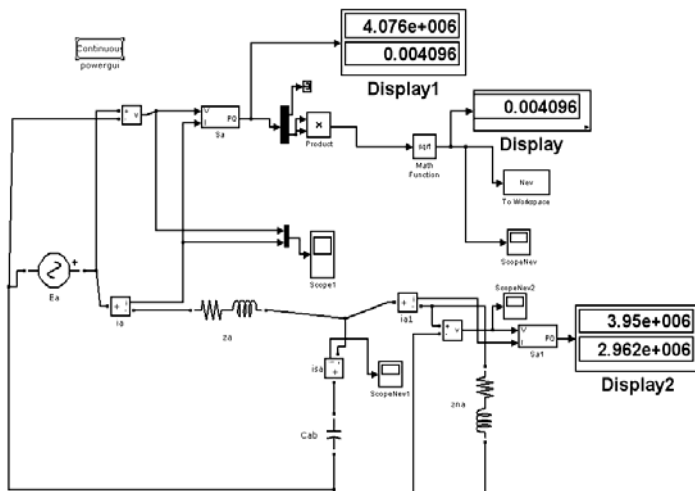


Рис. 6

тракту електропередачі, що обумовлено в даному випадку нереально завищеною реактивністю синхронного генератора.

Задасмося, однак, реальним значенням реактивного опору синхронного генератора, вибравши його за верхньою межею  $2,646 \times 0,25 = j0,6615$  Ом. Пошукова оптимізація приводить до встановлення режиму повної компенсації (*Full Compensation*) за ємності компенсуючого конденсатора  $CFC=1004,758$  мкФ. На рис. 6 показано вигляд візуальної моделі системи і віртуальних вимірювачів потужностей після завершення процесу пошукової оптимізації. При цьому потужність, що віддається джерелом,  $Se=4,203$  мВт, потужність, що споживається

навантаженням,  $SZ= (3,962 + j2,976)$  мВА. Цей режим практично забезпечує задані потужності трифазного навантаження і самого синхронного генератора.

$$\text{Струм від джерела в лінії електропередачі } \dot{I}_a = 1634,34e^{j(0^\circ)}.$$

$$\text{Напруга на навантаженні та компенсуючому конденсаторі } \dot{V}_{cc} = 4998,55e^{j(-13,7^\circ)}.$$

$$\text{Струм через навантаження } \dot{I}_z = 1984,66e^{j(-50,57^\circ)}.$$

Маючи в своєму розпорядженні значення амплітуд наведених струмів і напруги, проконтролюємо баланс реактивних потужностей в системі. Потужності, які споживаються індуктивностями, обчислимо як половини добутків квадратів амплітуд струмів через індуктивності на реактивні опори індуктивностей. Для індуктивності навантаження реактивна потужність

$$Q_z = 0,5 \times 1984,66^2 \times 1,511 = 2,976 \text{ мВА.}$$

Для сумарної індуктивності лінії електропередачі і генератора реактивна потужність

$$Q_a = 0,5 \times 1634,34^2 \times 0,7245 = 0,9676 \text{ мВА.}$$

Під час обчислення реактивної потужності компенсувального конденсатора умовно розподілимо його ємність між двома паралельно з'єднаними конденсаторами. Ємність першого  $CZ=758,22$  мкФ, яка повністю компенсує реактивну складову повної потужності навантаження. Частина ємності повної компенсації, що залишилася, відповідає другому умовно відокремленому конденсатору  $C_a=CFC-CZ=246,538$  мкФ. Другий умовний конденсатор повинен повністю компенсувати реактивну потужність сумарної індуктивності лінії електропередачі і генератора. Реактивні потужності, що генеруються кожним конденсатором, обчислимо як половину добутку квадрата амплітуди напруги конденсатора на реактивну провідність цього конденсатора. Для першого конденсатора реактивна потужність, що генерується

$$Q_{cz} = 0,5 \times 4998,55^2 \times 100\pi \times 758,22 \times 10^{-6} = 2,976 \text{ мВА.}$$

На долю другого умовного конденсатора припадає реактивна потужність

$$Q_{ca} = 0,5 \times 4998,55^2 \times 100\pi \times 246,538 \times 10^{-6} = 0,9676 \text{ мВА.}$$

Наведені чисельні розрахунки показують, що за реальних параметрів індуктивного опору синхронного генератора поперечна компенсація шляхом шунтування навантаження косинусним конденсатором здатна забезпечити досягнення режиму повної компенсації реактивної потужності. Це можливо шляхом збільшення ємності конденсатора на величину, достатню для компенсації реактивної потужності, що споживається індуктивними складовими повних опорів лінії електропередачі і синхронного генератора.

#### **Висновки.**

1. Розрахунок компенсувального пристрою і режиму компенсації реактивної потужності за відсутності системного підходу призводить до спотворених результатів під час визначення як вихідного режиму, так і режиму компенсації реактивної потужності.

2. За підвищених значень індуктивного опору генератора і лінії електропередачі стає неможливим здійснення режиму повної компенсації реактивної потужності.

3. Метод пошукової оптимізації, реалізований в системі MATLAB, надав змогу визначити для випадку неповної компенсації оптимальні режими і ємність компенсувального конденсатора для обраних критеріїв оптимізації, в тому числі за критерієм максимального значення коефіцієнта потужності системи електропостачання.

4. Показано, що за обґрунтованих базовими співвідношеннями параметрах заступної схеми синхронного генератора в системі електропостачання забезпечуються як вихідний режим, так і режим повної компенсації реактивної потужності.

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 672 с.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов-Дон: Феникс, 2006. 720 с.
3. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. К.: Наукова думка, 1985. 286 с.
4. Шидловский А.К., Борисов Б.П., Вагин Г.И., Куренный Э.Г., Крахмалин И.Г. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. К.: Наукова думка, 1992. 236 с.
5. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. К.: Наукова думка, 1992. 240 с.
6. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
7. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1971. 438 с.
8. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
9. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
10. Miller J.E. Reactive power controlled in electric systems. John Wiley & sons, 1982. 416 p.
11. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission. 2006. 44 p.
12. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.060>



13. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Расчет параметров симметрично-компенсирующего устройства трехфазной системы электроснабжения на основе декомпозиции системы. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.06.020>
14. Zubair Ahmed Memon, Mohammad Aslam Uqaili, Mukhtiar Ali Unar. Design of Three-Phase Hybrid Active Power Filter for Compensating the Harmonic Currents of Three-Phase System. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*. 2012. Vol. 31(2). Pp. 347 – 354.
15. Міліх В.І., Павленко Т.П. Електропостачання промислових підприємств. Харків: ФОП Панов А.М., 2016. 272 с.
16. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2004. 607 с.

## POWER COMPENSATION MODES RESEARCH IN GENERALIZED ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

V.G. Yagup<sup>1</sup>, K.V. Yagup<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University,

25, str. Yaromlava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: [yagup.walery@gmail.com](mailto:yagup.walery@gmail.com).

<sup>2</sup>National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

*The article is devoted to the study of reactive power compensation modes //in a power supply system powered by a synchronous generator. This power remains in the system even after the application of transverse capacitor compensation, which is unable to provide full compensation of reactive power in the power supply system. Under these conditions, the optimal value of the parameter of the compensating capacitor was found on the computer model by the method of search optimization and the modes in the system with variations of the optimization criteria were investigated. References 16, figures 6.*

**Keywords:** synchronous generator, power line, reactive power, search optimization, full compensation.

1. Kudrin B.I. Power supply of industrial enterprises. Moskva: Internet Engeniring, 2006. 672 p. (Rus)
2. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electrical energy. Rostov-on-Don: Phoenix. 2006, 720 p. (Rus)
3. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Improving the quality of electricity in electrical networks. Kyiv: Naukova Dumka, 1985. 286 p.
4. Shidlovsky A.K., Borisov B.P., Vagin G.I., Kurennyi E.G., Krakhmalin I.G. Electromagnetic compatibility of electrical receivers of industrial enterprises. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. 236 p.
5. Kuznetsov V.G., Grigoriev A.S., Danilyuk V.B. Reducing the asymmetry and non-sinusoidality of voltages in electrical networks. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. 240 p.
6. Zhezhenenko I.V., Saenko Yu.L. The quality of electricity at industrial enterprises. Moskva: Energoatomizdat, 2005. 261 p.
7. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. Electrical networks. Moskva: Vysshaia shkola, 1971. 438 p.
8. Zhelezko Yu.S. Reactive power compensation and improvement of the quality of electricity. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 224 p.
9. Zhelezko Yu.S. Loss of electricity. Reactive power. Electricity quality. Guide for practical calculations. Moskva: ENAS, 2009. 456 p.
10. Miller J.E. Reactive power controlled in electric systems. John Willey& sons, 1982. 416 p.
11. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future. European Commission, 2006. 44 p.
12. Yagup V.G., Yagup K. V. Calculating the parameters of symmetry-compensating device for three-phase electrical power system based on the system decomposition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 60-66. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.060> (Rus)
13. Yagup V.G., Yagup E.V. Calculation of the parameters of a symmetrical-compensating device of a three-phase power supply system based on the decomposition of the system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 20–26. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.06.020> (Rus)
14. Zubair Ahmed Memon, Mohammad Aslam Uqaili, Mukhtiar Ali Unar. Design of Three-Phase Hybrid Active Power Filter for Compensating the Harmonic Currents of Three-Phase System. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*. 2012. Vol. 31(2). Pp. 347–354.
15. Milykh V.I., Pavlenko T.P. Electrical supply of industrial enterprises. Kharkiv: FOP Panov A.M., 2016. 272 p. (Ukr)
16. Kopylov I.P. Electric machines. Moskva: Vysshaia shkola, 2004. 607 p. (Rus)

Надійшла 15.04.2022  
Остаточний варіант 05.09.2022