

## Аналітичний метод визначення умов повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання

**Мета.** Метою статті є розробка аналітичного методу визначення умов досягнення повної компенсації в узагальненій системі електропостачання, на основі використання замінних схем, які отримані за допомогою еквівалентних перетворень топології вихідної схеми. **Методологія.** У статті запропоновано методіку заміни послідовної компенсації реактивної потужності у високовольтних трактах системи електропостачання на паралельну компенсацію реактивної потужності у вузлі навантаження низької напруги. **Результати.** Розроблено алгоритм послідовних перетворень схеми живлення, що дає змогу оцінити значення ємностей компенсуювальних конденсаторів, при яких досягається повна компенсація реактивної потужності в системі. **Оригінальність.** Запропонована аналітична методика розрахунку параметрів вузла компенсації дозволяє відмовитися від складних комп'ютерних методів оптимізації та дає можливість оцінити компенсаційні можливості, які припадають на частку навантаження та мережі. **Практична цінність.** Запропонована методика дозволяє за простим алгоритмом з високою точністю визначити необхідні параметри компенсаційного пристрою, які забезпечують оптимальний режим в системі електропостачання. Запропонований алгоритм легко реалізується в мікроконтролерній системі автоматичного керування режимами системи електропостачання. Бібл. 15, табл. 1, рис. 6.

**Ключові слова:** електрична система, реактивна потужність, повна компенсація, пошукова оптимізація, коефіцієнт потужності, еквівалентні перетворення, заступна схема.

**Вступ і постановка задачі.** Компенсація реактивної потужності залишається одним з основних засобів підвищення енергоефективності систем електропостачання [1-6]. В Україні при сучасних умовах воєнного стану ці питання повинні стати одними з головних факторів підвищення можливостей безаварійного постачання електроенергією, зокрема, компенсація реактивної потужності дозволить розвантажити електричні мережі і підвищити коефіцієнт корисної дії систем в цілому [4, 5]. Поряд з традиційним підходом часткової компенсації реактивної потужності навантажень заслуговує уваги режим повної компенсації реактивної потужності, при якому в трифазних мережах компенсуються зворотна і нульова симетричні складові [7-11], реактивні потужності безпосередньо навантаження і, крім того, реактивні потужності в самій електричній мережі [12-14]. Останні традиційно компенсуються так званою повздовжньою компенсацією, при якій компенсуювальні конденсатори вмикаються послідовно в лінії електропередавання [1, 2]. Але, як показано в [14], компенсації складових, обумовлених індуктивностями ліній електропередавання, можна досягти за рахунок збільшення ємностей конденсаторів поперечної компенсації, що вони шунтують навантаження у вузлах відбору електроенергії. В загальному випадку визначення повної компенсації може бути здійснене за допомогою пошукової оптимізації [12, 13] наближеними чисельними методами, оскільки по суті приходиться розв'язувати систему нелінійних рівнянь, в яких містяться як параметри системи, так і струми з напругами, і вони зв'язані між собою операціями множення і ділення. Це властиве, як буде показано нижче, і для варіанту однолінійної узагальненої схеми, яка може бути застосована навіть при розгляді розгалужених електричних мереж. Однак чисельні методи здатні провести дослідження для конкретних чисельних значень, які характеризують режим повної компенсації. Аналітичні символічні методи дозволяють провести якісний аналіз і отримувати узагальнені результати, рекомендації і висновки.

**Мета статті** полягає у створенні аналітичного методу визначення умов досягнення повної компен-

сації в узагальненій системі електропостачання задля спрощення методіки визначення параметрів компенсуювальних пристроїв і досягнення результатів без використання відносно складних процедур на основі оптимізаційних алгоритмів.

**Основна частина дослідження.** Будемо розглядати традиційну систему електропостачання з поперечною компенсацією реактивної потужності [1-3, 5, 6, 10], яка зображена на рис. 1 у загальноприйнятій для електроенергетики вигляді.

Цю систему варто називати узагальненою системою електропостачання, оскільки в ній виділені основні складові системи електропостачання при дотриманні загальноприйнятих в електроенергетиці умов. Такими умовами є, по-перше, припущення, що трифазна зазвичай система електропостачання функціонує в симетричному режимі, а тому достатньо аналізувати її лише за однією з трьох фаз і завдяки цьому можна розглядати так званий однолінійний варіант системи, тобто, однофазну заступну схему з одним джерелом напруги. По-друге, параметри заступної схеми приводяться до однієї сторони – або до сторони генератора, або до сторони навантаження, як це, наприклад, робиться при розрахунках режимів коротких замикань. По-третє, мережа, яка може мати розгалужену топологію, заміщується одним комплексним активно-індуктивним опором на основі теореми про еквівалентний активний двополюсник.

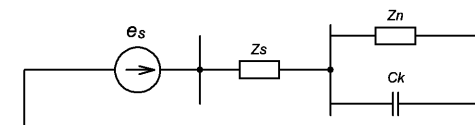


Рис. 1. Узагальнена однолінійна система електропостачання з компенсатором реактивної потужності

В цій схемі  $e_s$  – джерело напруги, яке генерує і постачає електроенергію;  $Z_s$  – комплексний активно-індуктивний опір, що відображає лінію електропередавання і враховує внутрішній опір самого генератора;  $Z_n$  – комплексне активно-індуктивне навантаження;  $C_k$  – ємність батареї конденсаторів, які компенсу-

ють реактивну потужність в системі електропостачання. Зазвичай традиційно в електроенергетиці використовуються досить наближені оцінки значення цієї ємності. Вона визначається як така, що спроможна компенсувати певну задану частину реактивної потужності навантаження. Це пов'язано з постійною змінною навантаженням, наприклад, в мережах електропостачання комунальних споживачів. Крім того, неможливо виставити точне значення ємності батареї конденсаторів навіть тоді, коли це значення визначено, оскільки надає вплив на дискретність значень ємностей окремих конденсаторів, що складають батарею. Однак розвиток напівпровідникової силової електроніки і засобів автоматичного управління електротехнічними системами мають тенденції цифровізації електроніки і перехід до інтелектуальних систем електропостачання [11], що дозволяють вирішити взагалі ці проблеми і надати можливість досягти точних параметрів компенсувальних пристроїв навіть в умовах варіацій навантаження. Мається на увазі застосування керованих індуктивностей з увімкненими зустрічно тиристорами, а також силових активних фільтрів з широтно-імпульсною модуляцією.

На рис. 2 наведено заступну схему узагальненої системи електропостачання з компенсатором.

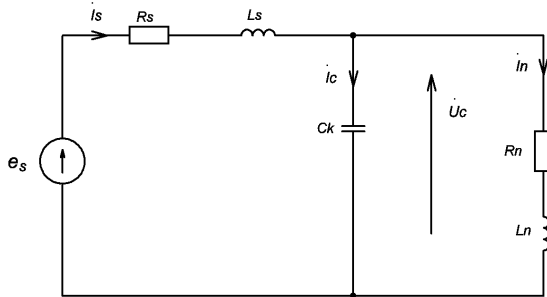


Рис. 2. Заступна схема узагальненої системи електропостачання з компенсатором

В цій схемі  $R_s$  і  $L_s$  – активний опір і індуктивність лінії електропередавання, куди також включені і відповідні параметри реального генератора;  $R_n$  і  $L_n$  – активний опір і індуктивність навантаження при представленні навантаження послідовним еквівалентом. Система рівнянь за методом комплексних амплітуд, що описує цю еквівалентну заступну схему, виглядає наступним чином в базисі змінних  $\dot{I}_s, \dot{I}_n, \dot{U}_c$ :

$$(R_s + j\omega L_s)\dot{I}_s + \dot{U}_c = \dot{e}_s; \quad (1)$$

$$(R_n + j\omega L_n)\dot{I}_n - \dot{U}_c = 0; \quad (2)$$

$$\dot{I}_s - \dot{I}_n - j\omega C_k \dot{U}_c = 0. \quad (3)$$

Слід зауважити, що в системі цих рівнянь містяться невідомі струми  $\dot{I}_s, \dot{I}_n$  і напруга  $\dot{U}_c$ , а крім того невідомою величиною є ємність  $C_k$ , яка разом із  $U_c$  утворює добуток  $C\dot{U}_c$ . Це в свою чергу лишає систему (1) – (3) лінійності, а крім того трьох рівнянь вже не вистачає для однозначного визначення  $\dot{I}_s, \dot{I}_n, \dot{U}_c$  і  $C_k$ . В методі пошукової оптимізації ця задача розв'язується накладанням додаткових умов компенсації реактивної потужності з подальшим використанням числових алгоритмів із застосуванням ньютонівських методів або

методу оптимізації за алгоритмом, наприклад, деформованого багатогранника [12, 13].

Застосуємо наступні етапи еквівалентних перетворень заступних схем узагальненої системи електропостачання.

**Етап 1.** Перетворимо послідовний еквівалент навантаження з комплексним опором  $R_n + j\omega L_n$  в паралельний еквівалент з комплексною провідністю  $G_{n1} - jY_{n1}$ :

$$G_{n1} - jY_{n1} = \frac{1}{R_n + j\omega L_n} = \frac{R_n}{R_n^2 + \omega^2 L_n^2} - j \frac{\omega L_n}{R_n^2 + \omega^2 L_n^2} = \frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} - j \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2}.$$

Крім того, конденсатор  $C_k$  замінимо двома конденсаторами  $C_k = C_1 + C_2$ , де  $C_1$  буде призначений для компенсації реактивності суто навантаження, а  $C_2$  буде доповнювати процес компенсації до рівня, коли джерело  $e_s$  не буде пов'язане з реактивною потужністю, тобто фази напруги і струму джерела співпадуть і тим самим буде досягнута повна компенсація реактивної потужності в системі. Отримана після етапу 1 заступна схема зображена на рис. 3.

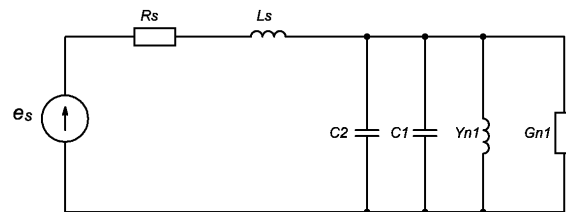


Рис. 3. Заступна схема системи з паралельним еквівалентом навантаження і розподіленим компенсатором

**Етап 2.** Визначасмо ємність конденсатора  $C_1$ , який повинен компенсувати індуктивність паралельного еквіваленту навантаження:

$$j\omega C_1 - jY_{n1} = 0 \quad \text{або} \quad \omega C_1 = \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2},$$

звідки:

$$C_1 = \frac{X_n / \omega}{R_n^2 + X_n^2} = \frac{L_n}{R_n^2 + X_n^2}. \quad (4)$$

На цьому ж етапі можна в еквівалентній схемі (рис. 3) позбавитися двох реактивних елементів. Маються на увазі індуктивність паралельного еквівалента навантаження з провідністю  $Y_{n1}$  і конденсатор  $C_1$ , який повністю компенсує цю індуктивність. Сума провідностей цих елементів дорівнює нулю, тому з точки зору метода комплексних амплітуд, що застосовується тут для аналізу, ці елементи можна просто виключити зі схеми на рис. 3. В результаті отримаємо еквівалентну схему без вказаних елементів, яка представлена на рис. 4.

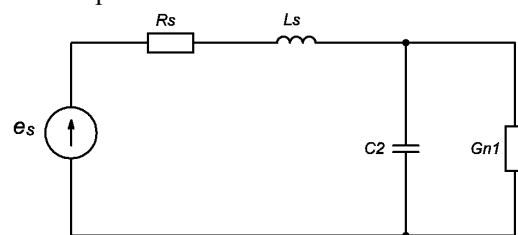


Рис. 4. Заступна схема системи з компенсатором реактивної складової лінії електропередавання

**Етап 3.** Тепер треба визначити ємність конденсатора  $C_2$ , який підключений паралельно провідності  $G_{n1}$  і повинен компенсувати реактивну потужність індуктивності  $L_s$  лінії електропередавання. Перетворимо далі паралельне коло  $G_{n1} - C_2$  в послідовне з'єднання еквівалентних резистора  $R_3$  і конденсатора  $C_3$  (рис. 5).

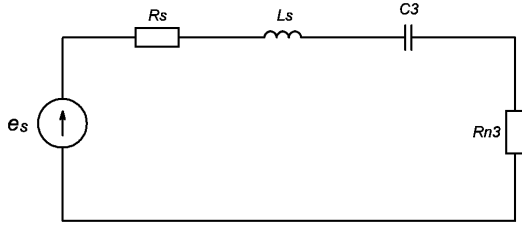


Рис. 5. Заступна схема системи на етапі визначення ємності компенсатора для лінії електропередавання

Позначимо:  $X_s = \omega L_s$ ,  $Y_{C2} = \omega C_2$ ,  $X_{C3} = 1/Y_{C3}$ ,  $Y_{C3} = \omega C_3$ . Тоді параметри нового кола навантаження отримаємо з очевидних співвідношень:

$$R_3 - jX_{C3} = \frac{1}{G_{n1} + jY_{C2}} = \frac{G_{n1} - jY_{C2}}{G_{n1}^2 + Y_{C2}^2}. \quad (5)$$

Звідси ясно, що

$$R_{n3} = \frac{G_{n1}}{G_{n1}^2 + Y_{C2}^2}; \quad (6)$$

$$X_{C3} = \frac{Y_{C2}}{G_{n1}^2 + Y_{C2}^2}. \quad (7)$$

В схемі на рис. 5 реактивні елементи увімкнені послідовно, і умови повздовжньої компенсації реактивної потужності полягають у виконанні умови  $X_s = X_{C3}$ , тобто

$$X_s = Y_{C2} / (G_{n1}^2 + Y_{C2}^2), \quad (8)$$

що приводить до розв'язання алгебраїчного квадратного рівняння

$$Y_{C2}^2 - \frac{1}{X_s} Y_{C2} + G_{n1}^2 = 0. \quad (9)$$

Звідси можна визначити провідність конденсатора  $C_2$ :

$$Y_{C2} = \frac{1}{2X_s} \pm \sqrt{\frac{1}{4X_s^2} - G_{n1}^2}. \quad (10)$$

Як видно з отриманого виразу, розв'язання має два корені, з яких для реального випадку слід обрати рівняння з позначкою «мінус» перед коренем. Друге значення підтверджує існування двох режимів повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, на що було вказано в попередніх працях [14, 15], де параметри другого режиму отримувалися чисельним методом в ході проведення оптимізації за методом деформованого багатогранника. Другий корінь відповідає завищеній ємності компенсації і значному збільшенню струму, що споживається від джерела. Ємність конденсатора  $C_2$ :  $C_2 = Y_{02} / \omega$ . Сумарна ємність, необхідна для повної компенсації:  $C_k = C_1 + C_2$ .

**Умови досягнення режиму повної компенсації.** З виразу (10) можна отримати умову досягнення режиму повної компенсації, яка полягає в тому, щоб підкорінний вираз був позитивний:

$$\frac{1}{4X_s^2} - G_{n1}^2 > 0. \quad (11)$$

Це приводить до виразу:

$$X_s < \frac{1}{2G_{n1}}. \quad (12)$$

З урахуванням того, що

$$G_{n1} = \frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2},$$

отримаємо:

$$X_s < \frac{1}{2} \left( R_n + \frac{X_n}{R_n} \right). \quad (13)$$

Таким чином, **методика використання** отриманих вище розрахункових співвідношень може бути описана наступним чином:

- Розраховуємо паралельний еквівалент навантаження.

- Використовуючи індуктивну складову паралельного еквівалента, знаходимо ємність конденсатора, що він компенсує реактивну складову суто навантаження за співвідношенням (4).

- Виключаємо із заступної схеми індуктивну складову паралельного еквіваленту навантаження разом з її ємнісним компенсатором, оскільки їх сумарна провідність дорівнює нулю. Вводимо в еквівалентну схему ємність  $C_2$ , що призначена для компенсації реактивної складової лінії електропередавання.

- За співвідношенням (13) перевіряємо умови досягнення повної компенсації реактивної потужності в системі.

- Якщо повна компенсація може бути досягнута, складаємо рівняння (9) і розв'язуємо його за співвідношенням (10), що дозволяє визначити провідність конденсатора  $C_2$ .

- Розраховуємо ємність  $C_2$  і сумарну ємність конденсатора, що забезпечує повну компенсацію реактивної потужності в системі.

**Результати чисельного аналізу і моделювання.** Розглянемо узагальнену систему електропостачання (рис. 2) при наступних параметрах:  $e_s(t) = 100\sin(\omega t)$ , де  $\omega = 100\pi$ ,  $R_s = 3$  Ом;  $L_s = 0,03$  Гн;  $R_n = 7$  Ом;  $L_n = 0,05$  Гн. Комплексний опір навантаження  $Z_n = 7 + j15,708$ .

Комплексна провідність паралельно еквівалентна навантаження.

$$G_{n1} - jY_{n1} = \frac{1}{7 + j15,708} = 0,0237 - j0,05311.$$

Провідність конденсатора  $C_1$ , що він компенсує реактивність навантаження  $Y_{C1} = 0,053119$  См.

Ємність конденсатора  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{Y_{C1}}{\omega} = \frac{0,05311}{100\pi} = 169,07 \text{ мкФ.}$$

Квадратне рівняння для знаходження провідності  $Y_{C2}$ :

$$Y_{C2}^2 - 0,1061 \cdot Y_{C2} + 5,6024 \cdot 10^{-4} = 0,$$

звідки

$$Y_{C2} = 0,05305 - \sqrt{0,0028 - 5,24 \cdot 10^{-4}} = 0,0055728 \text{ См.}$$

Ємність конденсатора  $C_2$ , який компенсує індуктивність лінії електропередавання:

$$C_2 = \frac{Y_{C2}}{100\pi} = 17,739 \text{ мкФ.}$$

Ємність, що забезпечує повну компенсацію реактивної потужності в системі

$$C_k = C_1 + C_2 = 186,81 \text{ мкФ.}$$

За отриманими результатами проведено моделювання системи для трьох варіантів:

I – без компенсуючого конденсатора;

II – з ємністю  $C_k = C_1$ , коли забезпечується часткова компенсація лише реактивності навантаження;

III – з ємністю  $C_k = C_1 + C_2$ , що забезпечує повну компенсацію реактивної потужності в системі.

Для моделювання складена візуальна модель в системі MATLAB/Simulink/SimPowerSystem. Конфігурація моделі фактично повторює схему, приведену на рис. 2, і тому не наводиться. Вимірювалися комплексні величини напруга  $\dot{U}_C$  на конденсаторі, тобто напруга на навантаженні; струм  $\dot{I}_S$  джерела електроенергії; струм  $\dot{I}_C$  конденсатора  $C_k$ ; струм  $\dot{I}_{Zn}$  через навантаження. Результати моделювання приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання

Параметри	I варіант	II варіант	III варіант
$C_k$	0	$C_1$	$C_1 + C_2$
$\dot{U}_C$	$63,8 \angle -2,32^\circ$	$91,41 \angle -11,77^\circ$	$95,57 \angle -13,25^\circ$
$\dot{I}_S$	$3,7 \angle -68,3^\circ$	$2,16 \angle -11,77^\circ$	$2,32 \angle 0^\circ$
$\dot{I}_C$	0	$4,86 \angle 78,23^\circ$	$5,61 \angle 76,75^\circ$
$\dot{I}_{Zn}$	$3,7 \angle -68,3^\circ$	$5,33 \angle -77,75^\circ$	$5,56 \angle -79,23^\circ$

Аналізуючи приведені результати, варто зауважити, що при відсутності компенсуючого конденсатора режим характеризується надзвичайно низьким рівнем напруги, яка надходить до навантаження. Від джерела споживається відносно великий струм, який створює на комплексному опорі лінії електропередавання достатньо велике падіння напруги, амплітуда якого досягає більш ніж 30 % від напруги самого джерела. Обчислення значення коефіцієнта потужності дає вельми низьке значення  $\cos(68,30^\circ) = 0,369$ . Застосування часткової компенсації при  $C_k = C_1$  повністю компенсує реактивну потужність навантаження. Про це свідчить однакові фазові зсуви напруги навантаження  $\dot{U}_C$  і струму  $\dot{I}_S$ , тобто навантаження сумісно з конденсатором  $C_1$  поводять себе як активний резистор. Це в свою чергу підтверджує дієздатність заступної схеми, зображеної на рис. 4 при  $C_2 = 0$ . Дійсно, поділивши струм  $\dot{I}_S$  на напругу  $\dot{U}_C$  отримаємо провідність еквівалента навантаження

$$G_{eq2} = \frac{2,16 \angle -11,77^\circ}{91,41 \angle -11,77^\circ} = 0,02363 \text{ Ом}^{-1}.$$

що співпадає з  $G_{n1}$  заступної схеми на рис. 4. Еквівалентний опір  $R_{n1} = 1 / G_{n1} = 42,319 \text{ Ом}$ . Без компенсації модуль навантаження склав

$$|Z_n| = \sqrt{7^2 + 15,708^2} = 17,971 \text{ Ом.}$$

Таким чином, підключення конденсатора  $C_1$ , що компенсує реактивність навантаження, можна трактувати як суттєве зростання еквівалентного опору навантаження. Завдяки цьому зменшується струм, споживаний від джерела. В той же час збільшується доля напруги джерела, яка поступає безпосередньо на вузли навантаження. Хоча падіння напруги на лінії електропередавання зменшується майже втричі і тепер складає біля 10 % від напруги джерела, напруга на навантаженні все ж таки не досягає 5 % допустимого відхилення. У третьому варіанті  $C_k = C_1 + C_2$ , і при цьому досягається повна компенсація реактивної потужності в системі. Про це свідчить збіг фази струму  $\dot{I}_S$  джерела з фазою його напруги  $e_s(t)$ . Завдяки додатковій компенсації індуктивності лінії електропередавання напруги навантаження  $\dot{U}_C$  збільшується і досягає 5 % допустимого відхилення від напруги джерела. Споживаний від джерела струм дещо збільшується. Це можна пояснити по заступній схемі, зображеній на рис. 5, якщо прийняти до уваги, що сума реактивних опорів індуктивності  $L_s$  і  $C_3$  конденсатора дорівнює нулю. Тому ці елементи можна прибрати зі схеми, замінивши їх короткозамкненим провідником. Отримаємо просту заступну схему з послідовних підключенням резисторів  $R_s$  і  $R_{n3}$ . Обчислимо опір останнього резистора за (6):

$$R_{n3} = \frac{G_{n1}}{G_{n1}^2 + Y_{C2}^2} = \frac{0,0237}{0,0237^2 + 0,0055728^2} = 39,983 \text{ Ом.}$$

Як видно, опір  $R_{n3}$  незначно зменшується у порівнянні з  $R_{n1}$ . Струм  $\dot{I}_S$ , обчислений з урахуванням  $R_s$  і  $R_{n3}$ :

$$\dot{I}_S = \frac{100}{3 + 39,9834} = 2,326 \text{ А,}$$

що співпадає з результатами моделювання в табл. 1.

Напруга на навантаженні обчислюється як геометрична сума напруг на  $R_{n3}$  і  $C_3$ :

$$U_{n3} = \left[ (I_S R_{n3})^2 + \left( \frac{1}{\omega C_3} \cdot I_S \right)^2 \right]^{1/2} = 95,59 \text{ В,}$$

що також співпадає з результатами моделювання.

Для моделювання в часовому просторі використана візуальна модель у системі MATLAB/SimPowerSystem (рис. 6). Віртуальні прилади дозволяють визначати амплітуди струмів і напруг, а також активні і реактивні потужності на елементах системи.

Показані на рис. 6 результати відповідають режиму повної компенсації. Тут видно, що джерело віддає лише активну потужність  $P_e = 116,2 \text{ Вт}$ , активна потужність навантаження становить  $P_n = 108,1 \text{ Вт}$ , активні втрати на лінії електропередавання і опору генератора  $P_s = 8,102 \text{ Вт}$ . Реактивна потужність, пов'язана з джерелом електроенергії, дорівнює нулю, і тому коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = 1$ . ККД системи при цьому складає  $\eta = 108,1 / 116,2 = 0,93$ . У той же час для некомпенсованого режиму ці величини складають:  $P_e = 68,34 \text{ Вт}$ ,  $P_n = 47,84 \text{ Вт}$ ,  $P_s = 20,5 \text{ Вт}$ ,  $\eta = 47,84 / 68,34 = 0,7$ . Реактивна потужність, що віддається джерелом при цьому, складає  $Q_e = 171,8 \text{ ВАр}$ ,

що обумовлює низьке значення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi = 0,37$ . Ці результати наочно свідчать на користь режиму повної компенсації, завдяки якому навантаження споживає напругу, близьку до номінальної, що забезпечує в свою чергу належний рівень споживаної потужності, втрати на лінії електропередавання зменшуються у 2,5 рази, а коефіцієнт корис-

ної дії підвищується на 23 %. Таким чином, при реалізації повної компенсації суттєво підвищуються енергетичні показники системи електропостачання і забезпечується нормальне живлення навантаження, яке при відсутності компенсації перевантажує мережу і тим самим неприпустимо знижує напругу в точці підключення цього навантаження.

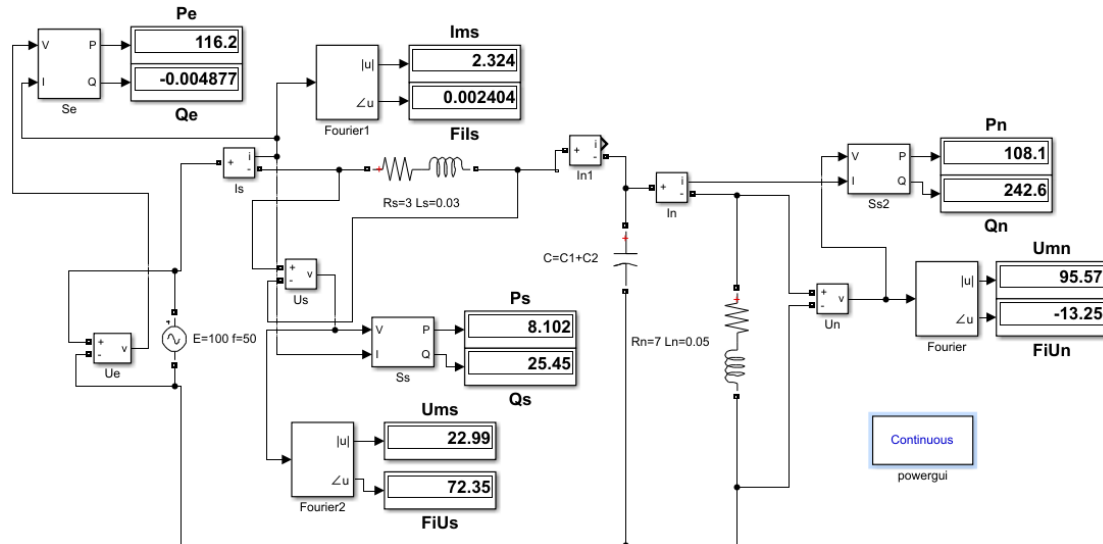


Рис. 6. Візуальна модель системи для верифікації режиму повної компенсації

### Висновки.

1. Запропоновано аналітичний метод визначення умов досягнення повної компенсації реактивної потужності в узагальненій системі електропостачання, що ґрунтується на базі еквівалентних перетворень топології системи електропостачання та дозволяє не застосовувати складні методи розв'язання нелінійних рівнянь ітераційними та оптимізаційними методами.

2. На основі запропонованого методу розроблена аналітична методика розрахунку параметрів компенсуючого пристрою і режимних параметрів системи, та виконана її верифікація, що підтвердила співпадіння отриманих результатів із відомими прикладами реалізації повної компенсації реактивної потужності.

3. Із проведеного аналізу витікає, що загальноприйнята часткова компенсація реактивності навантаження може не забезпечувати належного зростання напруги на навантаженні, в той же час застосування повної компенсації реактивної потужності забезпечує подальше підвищення напруги на навантаженні.

4. Показано, що процеси збільшення напруги на навантаженні і зменшення струму джерела можна трактувати як збільшення еквівалентного опору навантаження.

5. Запропоновані метод та методика розрахунку на його основі мають перспективу бути застосованими при аналізі процесів компенсації реактивної потужності в електричних мережах з багатьма навантаженнями і декількома джерелами постачання електроенергії.

6. Результати моделювання режиму в системі на моделі, складеній в пакеті MATLAB/Simulink/SimPowerSystem при заданих вихідних параметрах і знайдених параметрах компенсатора показують абсолютне співпадіння з розрахованими за допомогою розробленої методики результатами розрахунків режимів.

**Конфлікт інтересів.** Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Kyrlyenko O., Zharkin A., Butkevych O., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. Power Systems Research and Operation. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2022, vol. 388. 174 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1>.
2. Kundur P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill Inc., 1994. 1176 p.
3. Wang H., Li Q., Wang S., Song D., Jia Y., Peng X., Deng X., Huang Y. Modeling and Control Strategy of Reactive Power Coordination in the Combined System of New Energy Plant and Energy Storage Station. *2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*, 2023, pp. 235-239. doi: <https://doi.org/10.1109/EECR56827.2023.10149982>.
4. Wang A., Zhang J. A novel reactive power control strategy in virtual flux droop control. *2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts*, 2017, pp. 1-2. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEF.2017.8090711>.
5. Qu S., Zhaohui Q., Zhaowei L., MingMing S., Yuchen H., Zhenhua L. Energy Storage Active and Reactive Power Coordinated Control Considering DC Commutation Failure Voltage Recovery and Restraining AC Line Active Power Fluctuation. *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2022, pp. 1163-1168. doi: <https://doi.org/10.1109/ACPEE53904.2022.9783988>.
6. Miller J.E. *Reactive power controlled in electric systems*. John Wiley & Sons, 1982. 416 p.
7. Yaoyun L. Research on Voltage and Reactive Power Control Strategy Based on Intelligent Detection of Abnormal Data and Coordinated Control of Dynamic Reactive Power. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, 2022, pp. 71-76. doi: <https://doi.org/10.1109/AUTEEE56487.2022.9994561>.
8. Srinivasan G., Mahesh Kumar Reddy V., Venkatesh P., Parimalasundar E. Reactive power optimization in distribution

systems considering load levels for economic benefit maximization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 83-89. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.12>.

9. Kobayashi H., Hatta H. Reactive power control method between DG using ICT for proper voltage control of utility distribution system. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039569>.

10. Yang K., Gong Y., Zhang P., Liu Z. A reactive power compensation method based on tracing the power flow and loss function of power system. *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2015, pp. 615-619. doi: <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432309>.

11. *European Smart Grids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. European Commission, 2006. 44 p.

12. Miron A., Cziker A.C., Ungureanu S., Beleiu H.G., Darab C.P. Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case. *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 2022, pp. 101-106. doi: <https://doi.org/10.1109/EPE56121.2022.9959800>.

13. Yagup V.G., Yagup K.V. Calculating the parameters of symmetry-compensating device for three-phase electrical power system based on the system decomposition. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 6, pp. 20-26. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.020>.

14. Yagup V.G., Yagup K.V. Power compensation modes research in generalized electrical supply system. *Technical Electrodynamics*, 2022, no. 6, pp. 63-71. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.063>.

15. Yagup V.G., Yagup E.V. Research of the modes of full compensation of reactive power in a three-phase power supply system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 61-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.09>.

Надійшла (Received) 05.08.2023

Прийнята (Accepted) 25.09.2023

Опублікована (Published) 02.03.2024

#### How to cite this article:

Yagup V.G., Yagup K.V. Analytical method of determining conditions for full compensation of reactive power in the power supply system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 75-80. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.11>

Ягуп Валерій Григорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Ягуп Катерина Валеріївна<sup>2</sup>, д.т.н., проф.,

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

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

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

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Goal.** The purpose of the article is the development of an analytical method for determining the conditions for achieving full compensation in the generalized power supply system based on the use of substitute circuits, which are obtained using equivalent transformations of the topology of the original circuit. **Methodology.** The article proposes a methodology for replacing series reactive power compensation in high-voltage paths of the power supply system with parallel reactive power compensation in a low-voltage load node. **Results.** An algorithm for successive transformations of the power supply circuit has been developed, which makes it possible to estimate the values of the capacitances of compensating capacitors, at which full compensation of reactive power in the system is achieved. **Originality.** The proposed analytical method for calculating the parameters of the compensation unit makes it possible to dispense with complex optimization computer methods and makes it possible to estimate the compensation capacities that fall on the share of the load and the network. **Practical value.** The proposed technique allows, using a simple algorithm, to determine with high accuracy the necessary parameters of the compensating device, which provide the optimal mode in the power supply system. The proposed algorithm can easily be implemented in a microcontroller system for automatic control of the modes of the power supply system. References 15, table 1, figures 6.

**Key words:** electrical system, reactive power, full compensation, search optimization, power factor, equivalent transformations, substitute circuit.