

Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження

Жуйков В. Я., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery_zhuikov@yahoo.com

Вербицький Є. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbitskiy@bigmir.net

Бондаренко О. Ф., к.т.н., доцент, ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Кафедра промислової електроніки kaf-pe.kpi.ua

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Описано задачу компенсації реактивної потужності в електричних мережах при вмиканні лінійного навантаження. Проаналізовано причини низької ефективності застосування існуючих методів компенсації реактивної потужності для цього випадку. Проаналізовано обмін енергії між джерелом і навантаженням під час перехідного процесу на основі теорії миттєвої потужності. Наведено методику оцінки ефективності передавання енергії від джерела до навантаження на основі миттєвого коефіцієнта потужності, який розраховується з використанням вимірних значень струму і напруги мережі. Показано реалізацію запропонованої методики на прикладі під'єднання до мережі лінійного ланцюга першого порядку. Наведено принципи компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.

Бібл. 13, рис. 3.

Ключові слова — перехідний режим; компенсація реактивної потужності; коефіцієнт потужності.

I. ВСТУП

Компенсація реактивної потужності є однією зі складових підвищення ефективності роботи електричних мереж, теоретичні засади якої були розроблені ще на початку минулого століття Фрізе і Будеану [1,2]. Однак розробка ефективних алгоритмів керування пристроями компенсації реактивної потужності триває і зараз. Вона ведеться у двох напрямках – збільшенні ефективності процесу компенсації, що в основному визначається інерційністю алгоритму керування, та у пошуку ефективних та компактних методів опису складових потужності електричної мережі. На даний момент широко використовується p - q теорія миттєвої потужності, запропонована Акагі [3] та ряд інших теорій [4-8].

Алгоритми роботи більшості компенсаторів реактивної потужності, якими у мережах малої і середньої потужності найчастіше є напівпровідникові перетворювачі електричної енергії, мають інерційність не менше ніж один період напруги мережі. Тому вони ефективно працюють в усталеному режимі, для якого

використовують інтегральні показники, що характеризують обмінні процеси між джерелом та навантаженням: повну S , активну P , реактивну Q потужності та потужність спотворення D [9]. Ефективність передавання енергії в системі характеризується коефіцієнтом потужності PF :

$$PF = \frac{P}{S} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T e(t)i(t)dt \right) / EI, \quad (1)$$

де T – період напруги мережі, $e(t)$, $i(t)$ – миттєві значення напруги і струму мережі відповідно, E , I – діючі значення напруги і струму мережі відповідно.

У мережах з часто змінюваним навантаженням ефективність роботи таких пристроїв є низькою. Це стосується автономних систем електроживлення малої потужності [10] та тягових установок [11], в яких під час перехідного процесу суттєво погіршуються параметри якості напруги мережі, тому задача компенсації реактивної потужності у перехідних режимах є актуальною задачею.



Зрозуміло, що опис обмінних процесів у мережі під час перехідних режимів на основі вищеперерахованих інтегральних показників ускладнений, оскільки струм мережі має неперіодичний характер. У цьому випадку, для якісного аналізу енергетичних процесів, використовують поняття миттєвої потужності $s(t)$ [9] та миттєвої реактивної потужності $q(t)$ [11,12]. Вказані миттєві показники потужності також не можуть безпосередньо використовуватись на практиці для компенсації реактивної потужності, тому що у формулі реактивної потужності використовується інтегральний показник активної потужності P , інтервал інтегрування якого у перехідному режимі невідомо.

Зважаючи на це, у статті пропонується методика розрахунку миттєвих показників активної та реактивної потужності, оцінка ефективності передавання енергії до навантаження і особливості компенсації реактивної потужності під час перехідних режимів при вмиканні лінійного навантаження.

II. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Як відомо [9] коефіцієнт потужності є інтегральним параметром, і якщо відомі напруга мережі $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$ та струм навантаження в усталеному режимі $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi)$, коефіцієнт потужності також можна розрахувати за формулою (1).

Під час зміни навантаження виникають перехідні процеси, протягом яких струм мережі є неперіодичним. Оцінки інтегрального параметра коефіцієнта потужності PF під час перехідних процесів не існує, тому аналіз енергетичних процесів у мережі ускладнено.

Для впровадження миттєвого коефіцієнта потужності $PF^*(t)$ представимо перехідний процес струму мережі $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi)$ як суму усталеної $i_{ycm}(t)$ і вільної $i_{віль}(t)$ складових. За умови відсутності кратних коренів та нульових початкових умов струм навантаження виражається формулою:

$$i(t) = i_{ycm}(t) + i_{віль}(t) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k}, \quad (2)$$

де I_m – амплітудне значення усталеного струму,

I_{mk} – амплітудне значення k -ої вільної складової струму, ψ – початкова фаза напруги мережі, φ – зсув фаз між напругою і струмом, τ_k – стала часу k -ої вільної складової, N – порядок ланцюга.

Розкладемо за аналогією з формулою для миттєвої реактивної потужності $q(t)$ Жежеленка-Саєнка [10,11]:

$$s(t) = q(t) + \frac{P}{E^2} e^2(t), \quad (3)$$

миттєву потужність на активну $p(t)$ і реактивну $q(t)$ складові для усталеного режиму, тобто при $t \rightarrow \infty$.

$$s(t) = i_p(t)e(t) + i_a(t)e(t), \quad (4)$$

де $s(t) = e(t) \cdot i(t)$ – миттєва потужність, $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$ – функція миттєвих значень напруги мережі, $i_a(t)$, $i_p(t)$ – активна і реактивна складові струму мережі:

$$i_a(t) = I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t + \psi) = I_a \sin(\omega t + \psi);$$

$$i_p(t) = -I_m \sin(\varphi) \cos(\omega t + \psi) = I_p \cos(\omega t + \psi).$$

Аналізуючи формули (5)-(6) можна зробити висновок, що активна складова струму є синфазною напрузі мережі, реактивна – зсунута на 90° відносно напруги мережі, що узгоджується з формулою Жежеленка-Саєнка (3). Струм навантаження є алгебраїчною сумою активної $i_a(t)$ і реактивної $i_p(t)$ складових струму:

$$i(t) = I_a \sin(\omega t + \psi) + I_p \cos(\omega t + \psi) = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \sin(\omega t + \psi - \varphi). \quad (5)$$

Згідно з формулами (1) і (5) коефіцієнт потужності PF розраховується за формулою:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{E \cdot \frac{I_a}{\sqrt{2}}}{E \cdot \frac{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}}{\sqrt{2}}} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}}. \quad (6)$$

Відповідно до формули (6) значення коефіцієнту потужності PF можливо розповсюдити на будь-який момент часу і розраховувати його миттєве значення $PF^*(t)$. В усталеному режимі значення амплітуд активної I_a і реактивної I_p складової струму не змінюється в часі, тому $PF^*(t) = PF = \text{const}$. Натомість в перехідному режимі значення амплітуд активної та реактивної складових струму є функціями часу, $I_a(t)$, $I_p(t)$. Для визначення аналітичних виразів $I_a(t)$, $I_p(t)$ у перехідному режимі, представимо формулу (2) у вигляді:

$$i(t) = I_a \sin(\omega t + \psi) + I_p \cos(\omega t + \psi) - (\sin^2(\omega t + \psi) + \cos^2(\omega t + \psi)) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k} = \left(I_a - \sin(\omega t + \psi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k} \right) \times \sin(\omega t + \psi) + \left(I_p - \cos(\omega t + \psi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k} \right) \times \cos(\omega t + \psi) = I_a^*(t) \sin(\omega t + \psi) + I_p^*(t) \cos(\omega t + \psi), \quad (7)$$

$$I_a^*(t) = I_a - \sin(\omega t + \psi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k}; \quad (8)$$

$$I_p^*(t) = I_p - \cos(\omega t + \psi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-t/\tau_k}. \quad (9)$$

З врахуванням формул (6), (8) і (9) миттєвий коефіцієнт потужності $PF^*(t)$ розраховується за формулою:



$$PF^*(t) = \frac{I_a^*(t)}{\sqrt{I_a^{*2}(t) + I_p^{*2}(t)}}. \quad (10)$$

Згідно з формулами (8) і (9) миттєві значення амплітуд активної $I_a^*(t)$ і реактивної $I_p^*(t)$ можуть бути як більше нуля, так і менше, тому при аналізі енергетичних процесів у перехідних режимах доцільно виокремити чотири випадки:

- 1) $I_a^*(t) \geq 0, I_p^*(t) \geq 0$ – активна потужність передається від джерела до навантаження, у ланцюгу генерується ємнісний характер реактивної потужності, миттєвий коефіцієнт потужності має додатне значення $PF^*(t) \geq 0$;
- 2) $I_a^*(t) \geq 0, I_p^*(t) < 0$ – активна потужність передається від джерела до навантаження, у ланцюгу генерується індуктивний характер реактивної потужності, миттєвий коефіцієнт потужності має додатне значення $PF^*(t) \geq 0$;
- 3) $I_a^*(t) < 0, I_p^*(t) \geq 0$ – активна потужність передається від навантаження до джерела, у ланцюгу генерується ємнісний характер реактивної потужності, миттєвий коефіцієнт потужності має додатне від'ємне $PF^*(t) < 0$;
- 4) $I_a^*(t) < 0, I_p^*(t) < 0$ – активна потужність передається від навантаження до джерела, у ланцюгу генерується індуктивний характер реактивної потужності, миттєвий коефіцієнт потужності має від'ємне значення $PF^*(t) < 0$.

Передавання енергії від навантаження до джерела, яке спостерігається, коли миттєвий коефіцієнт потужності має від'ємне значення $PF^*(t) < 0$ потребує пояснення.

У формулі Жежеленка-Саєнка (4) для визначення миттєвої реактивної потужності використовується вираз $Pe^2(t)/E^2$, який за своїм фізичним змістом може трактуватись як миттєва активна потужність.

У виразі використовується інтегральний показник активної потужності P , інтервал інтегрування для розрахунку якого у перехідних процесах невизначений. Якщо розраховувати параметр P на інтервалах, де струм і напруга мають різний знак, він матиме від'ємне значення, що підтверджує можливість існування від'ємного значення активної потужності в перехідних процесах, яку за своїм фізичним змістом слід називати активною обмінною потужністю.

В усталеному режимі значення амплітуди активної складової струму $I_a^*(t)$ має невід'ємне значення, як і інтегральний показник P у формулі Жежеленка-Саєнка, тому і в цьому режимі запропонований підхід повністю узгоджується з формулою Жежеленка-Саєнка.

Для ілюстрації можливих енергетичних режимів розглянемо електричний ланцюг першого порядку – RL навантаження, активний опір якого $R = 10$ Ом, а індуктивність обирається з умови, що значення коефіцієнта потужності в усталеному режимі PF складає $PF = 0.1$.

$$L = \frac{R\sqrt{1-PF^2}}{\omega PF} = \frac{10\sqrt{0.99}}{2\pi \cdot 50 \cdot 0.1} = 0.317 \text{ Гн}. \quad (11)$$

Напруга мережі змінюється за законом $e(t) = 311 \sin(2\pi \cdot 50t + \pi/4)$. Часові діаграми активної складової струму $i_a(t)$ та його амплітуди $I_a^*(t)$ показано на рис. 1 а), реактивної складової струму $i_p(t)$ та його амплітуди $I_p^*(t)$ – на рис. 1 б).

На часових інтервалах $t_1..t_2, t_3..t_4, t_5..t_6$ амплітуда активної складової струму $I_a^*(t)$ має від'ємне значення, що свідчить про наявність обмінної активної потужності. Значення амплітуди реактивної складової струму $I_p^*(t)$ є від'ємним, тому реактивна потужність має індуктивний характер протягом усього перехідного процесу.

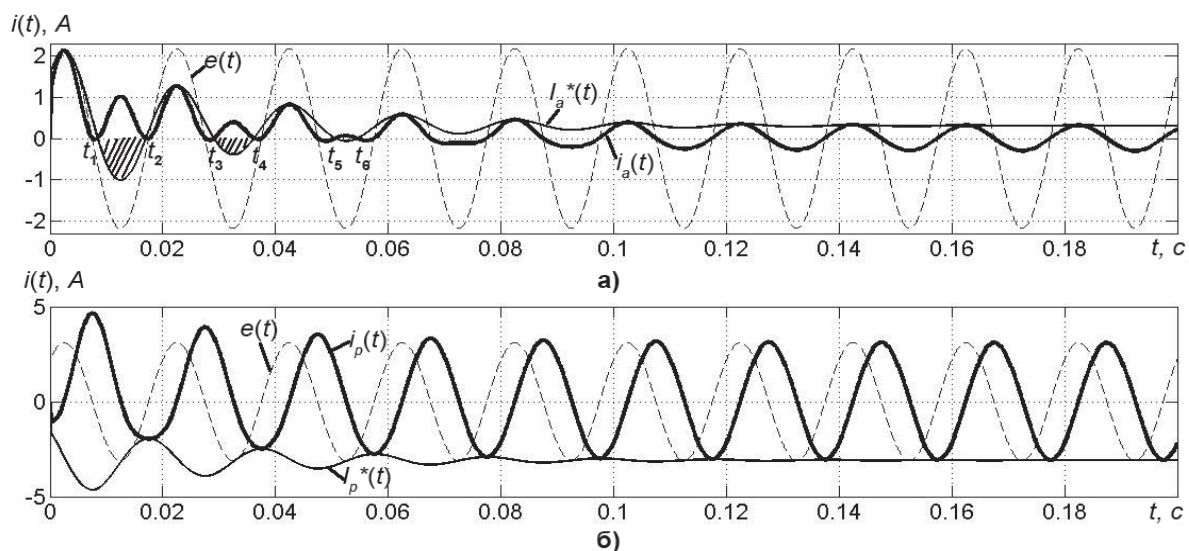


Рис. 1 Часові діаграми струмів: (а) активної складової струму $i_a(t)$ та його амплітуди $I_a^*(t)$; (б) реактивної складової струму $i_p(t)$ та його амплітуди $I_p^*(t)$



III. МЕТОДИКА ОЦІНКИ КОЕФІЦІЕНТА ПОТУЖНОСТІ ЗА ЗНАЧЕННЯМИ СТРУМУ МЕРЕЖІ

Зазвичай параметри навантаження, під'єданого до мережі, є невідомими, тому необхідно розробити методику для ідентифікації миттєвої оцінки коефіцієнта потужності в перехідних режимах PF^* . Для цього доцільно використовувати миттєві значення струму мережі.

В усталеному режимі, знаючи миттєве значення струму у два довільних моменти часу t_1 і t_2 можливо визначити амплітуди активної I_a і реактивної I_p складових:

$$\begin{cases} i(t_1) = I_p \sin(\omega t_1 + \psi) + I_a \cos(\omega t_1 + \psi); \\ i(t_2) = I_p \sin(\omega t_2 + \psi) + I_a \cos(\omega t_2 + \psi); \end{cases} \quad (12)$$

$$I_a = \frac{i(t_1) \cos(\omega t_2 + \psi) - i(t_2) \cos(\omega t_1 + \psi)}{\sin(\omega(t_1 - t_2))}; \quad (13)$$

$$I_p = \frac{i(t_1) \sin(\omega t_2 + \psi) - i(t_2) \sin(\omega t_1 + \psi)}{\sin(\omega(t_2 - t_1))}.$$

Оцінку миттєвого значення коефіцієнта потужності також можливо здійснювати на основі значення струму $i(t_1)$ і його похідної $i(t_1)'$ в певний момент часу t_1 . Для переходу до цієї методики використаємо формули (13), в яких вважатимемо, що часовий інтервал між сусідніми вимірюваннями $\Delta t = t_2 - t_1$ прямує до нуля, $\Delta t \rightarrow 0$.

$$I_a^*(t_1) = \frac{\cos(\omega t_1 + \psi)}{\omega} i(t)' \Big|_{t=t_1} + \sin(\omega t_1 + \psi) i(t_1); \quad (14)$$

$$I_p^*(t_1) = \frac{-\sin(\omega t_1 + \psi)}{\omega} i(t)' \Big|_{t=t_1} + \cos(\omega t_1 + \psi) i(t_1).$$

Для оцінки значення PF^* доцільно користуватись відомим значенням струму і його похідної в одній точці (14). За умови використання формули (13) за двома значеннями струму, значення $PF^*(t)$ є усередненим і потребує корекції.

Формула для розрахунку амплітуд активної та реактивної складових струму (14) може бути застосована до лінійного ланцюга будь-якого порядку і на її основі може бути оцінене миттєве значення коефіцієнту потужності в заданий момент часу.

Запропонована методика дає змогу оцінювати лише поточні значення $PF^*(t)$, однак в зв'язку з інерційністю контуру керування, іноді доцільно знати значення $PF^*(t)$ на певному прогнозованому інтервалі T_p , для чого можливо:

- за отриманими значення $PF^*(t_i)$, $PF^*(t_i - \Delta t)$, ..., $PF^*(t_i - k\Delta t)$ екстраполювати значення параметра PF^* на прогнозованому інтервалі $PF^*(t_i +$

$\Delta t)$, ..., $PF^*(t_i + T_p)$ одним з відомих методів [13];

- ідентифікувати параметри перехідного процесу I_m , φ , τ і замість формули (14) використовувати аналітичні вирази $I_a^*(t)$ і $I_p^*(t)$ (12).

Останній пункт можливо реалізувати на основі вирішення системи, яка складається з рівнянь типу (6).

$$\begin{cases} i(\Delta t) = I_m \sin(\omega \Delta t + \psi + \varphi) - \\ - \sin(\psi + \varphi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-\Delta t / \tau_k}; \\ i(2\Delta t) = I_m \sin(2\omega \Delta t + \psi + \varphi) - \\ - \sin(\psi + \varphi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-2\Delta t / \tau_k}; \\ i(3\Delta t) = I_m \sin(3\omega \Delta t + \psi + \varphi) - \\ - \sin(\psi + \varphi) \sum_{k=1}^N I_{mk} e^{-3\Delta t / \tau_k}. \end{cases} \quad (15)$$

Знаючи виміряні значення струму $i(\Delta t)$, $i(2\Delta t)$, $i(3\Delta t)$ можливо вирішити систему (15) відносно змінних I_m , φ , τ і використовувати їх для прогнозування їх параметра PF^* .

IV. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ

За значеннями активної $i_a(t)$ і реактивної $i_p(t)$ складових струму мережі миттєва потужність розділяється на активну $p(t)$ і реактивну $q(t)$ складові.

$$p(t) = I_a^*(t) \sin(\omega t + \psi) \cdot e(t); \quad (16)$$

$$q(t) = I_p^*(t) \cos(\omega t + \psi) \cdot e(t). \quad (17)$$

Розрахунок миттєвих значень складових потужності проводився на прикладі моделі з параметрами, наведеними у попередньому розділі.

Для отриманої моделі в середовищі Simulink® MatLab® проведені розрахунки за формулами (11), (15), (17), (18). Часові діаграми параметрів $PF^*(t)$, $p(t)$, $q(t)$ наведені на рис. 2 а), рис. 2 б) і рис. 2 в) відповідно.

З діаграм, наведених на рис. 2, видно, що:

- значення миттєвого коефіцієнта потужності $PF^*(t)$ у перехідному режимі суттєво відрізняється від значень коефіцієнта потужності PF , тоді як в усталеному режимі їх значення збігаються;
- значення параметра $PF^*(t)$ на часових інтервалах $t_1..t_2$, $t_3..t_4$, $t_5..t_6$ протягом перехідного режиму має від'ємне значення, що підтверджується формулами (7), (9) і свідчить про наявність обмінної активної потужності;

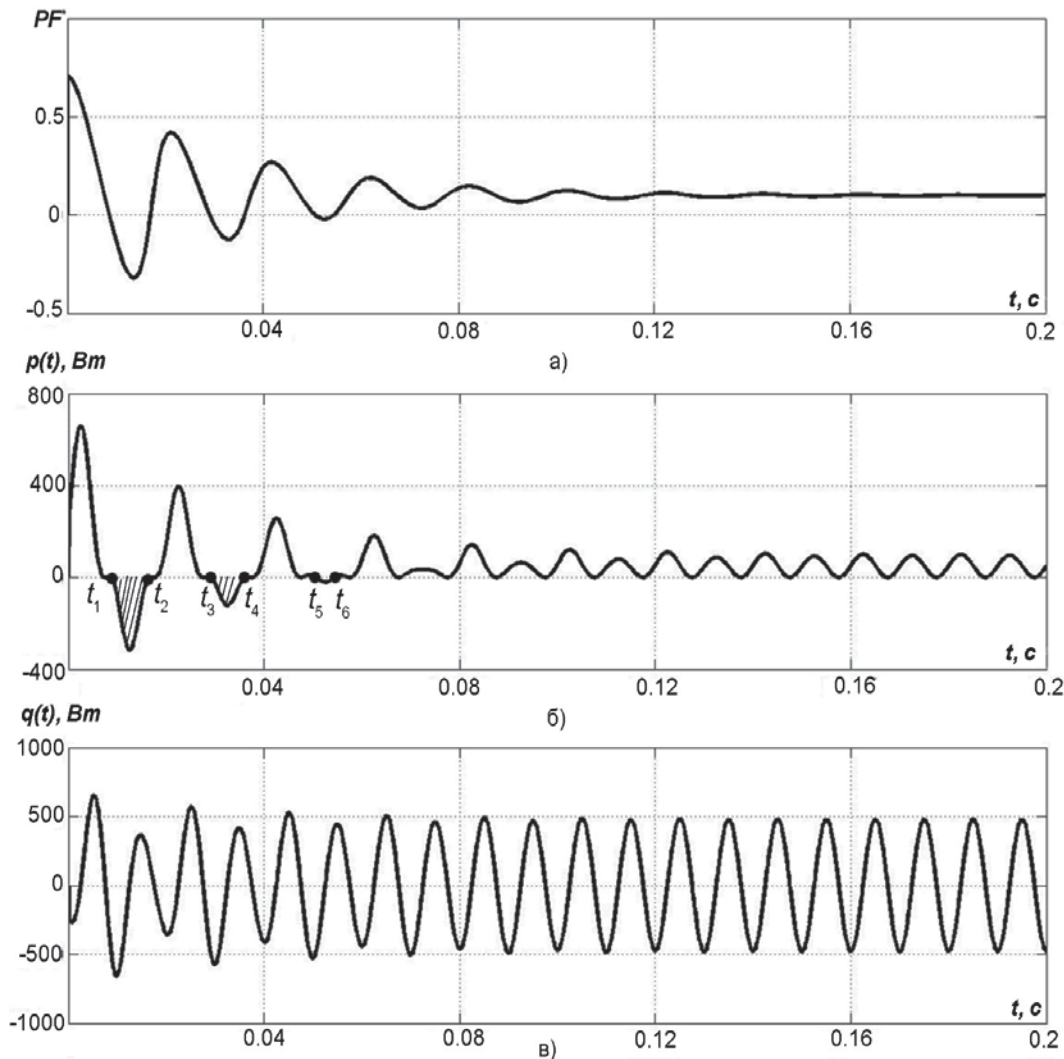


Рис. 2 Часові діаграми функцій протягом перехідного процесу: (а) часова діаграма миттєвого коефіцієнта потужності $PF^*(t)$; (б) часова діаграма активної потужності $p(t)$; (в) часова діаграма реактивної потужності $q(t)$

Таким чином, протягом перехідного режиму, окрім реактивної потужності, необхідно компенсувати і обмінну активну потужність, яка виникає на інтервалах, коли виконується умова $PF^*(t) < 0$. На основі вказаного принципу компенсації в середовищі Simulink® синтезовано паралельний компенсатор з струмом компенсації i_k , що змінюється за таким законом:

$$i_k(t) = \begin{cases} -I_p^*(t) \cos(\omega t + \psi), & PF^*(t) \geq 0 \\ -I_p^*(\cos(\omega t + \psi) - & \\ -I_a^* \sin(\omega t + \psi), & PF^*(t) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Згідно з формулою (18):

- за умови $PF^*(t) \geq 0$, компенсатор усуває лише реактивний струм;

- коли $PF^*(t) < 0$, то компенсується реактивний та активний обмінний струм.

На рис. 3 показано часові діаграми напруги, струму і потужності мережі після компенсації реактивної та активної обмінної потужності.

Як видно з часової діаграми струму мережі $i(t)$, після компенсації реактивної потужності, протягом значної частини перехідного режиму є однополярним. При чому струм має ту ж полярність, що і напруга мережі, що свідчить про відбирання від мережі лише активної потужності. Така форма струму сприяє накопиченню необхідної енергії в індуктивності навантаження за мінімально можливого діючого значення струму мережі.

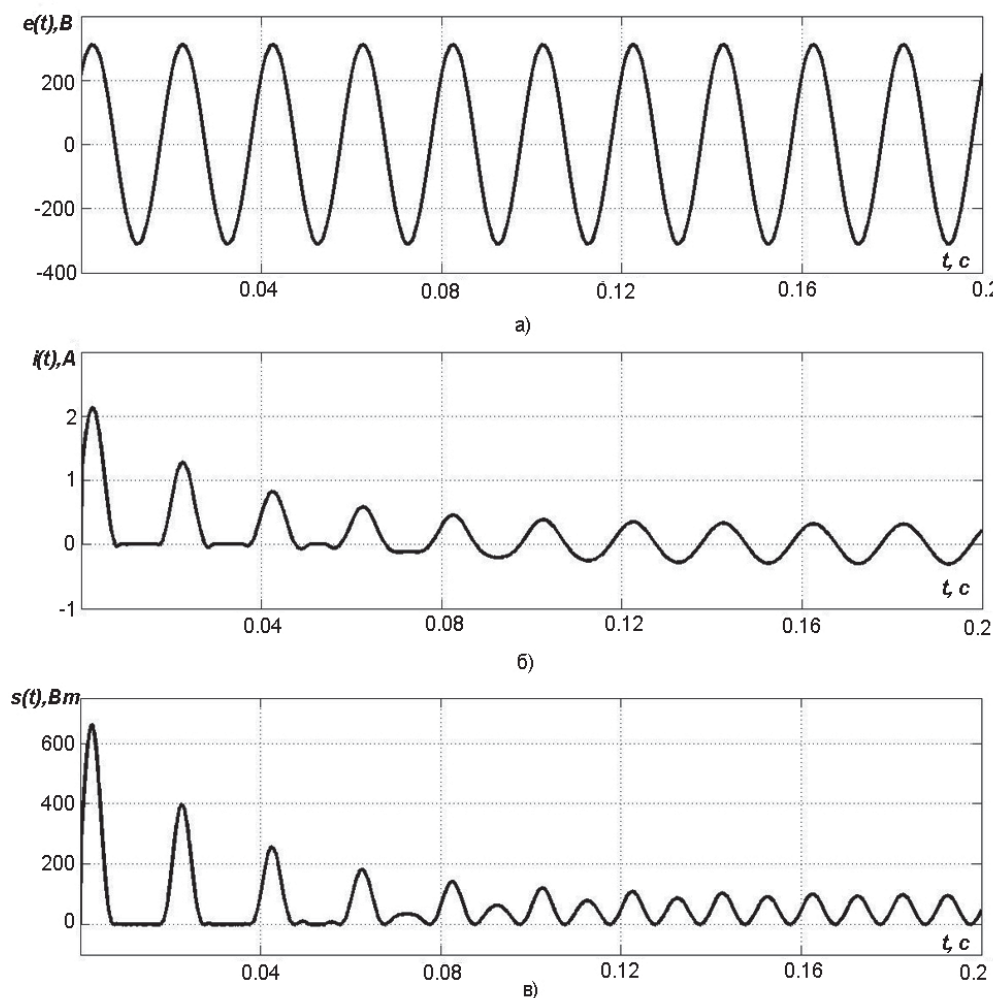


Рис. 3 Часові діаграми напруги функцій після компенсації реактивної потужності: (а) часова діаграма напруги мережі $e(t)$; (б) часова діаграма струму мережі $i(t)$; (в) часова діаграма повної потужності мережі $s(t)$

Висновки

Отже, виконані дослідження дають підставу зробити такі висновки:

- використання миттєвої оцінки коефіцієнта потужності PF^* дає можливість описати енергетичні процеси в електричній мережі протягом перехідних процесів;
- опис активної та реактивної складових потужності мережі в перехідному режимі зручно представляти за допомогою активної та реактивної складових струму мережі;
- за результатами аналізу виявилось, що під час перехідного режиму окрім реактивної потужності, необхідно компенсувати і обмінну активну потужність, на інтервалах часу, протягом яким параметр PF^* має від'ємне значення;

- розроблена методика дозволяє компенсувати реактивну і обмінну активну потужність у перехідних режимах, що продемонстровано на прикладі ланцюга першого порядку.

ЛІТЕРАТУРА:

- [1] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 7-8, pp. 193-203, 1931.
- [2] C. I. Budeanu, Reactive and fictitious powers, Publication No. 2 of the Rumanian National Inst. Bucuresti, 1927.
- [3] H. Akagi, "Modern Active Filters and Traditional Passive Filters," *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, no. 54, p. 255-269, 2006.
URL: [http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/\(54-3\)255.pdf](http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/(54-3)255.pdf)
- [4] J. H. Kim and S. K. Sul, "A carrier-based PWM method for three phase fourleg voltage source con-verters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 1, p. 66-75, January 2004.
DOI: [10.1109/TPEL.2003.820559](https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.820559)
- [5] F. Z. Peng, G. Ott and D. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive



- power theory for three-phase four-wire systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 6, p. 1174–1181, November 1998. DOI: [10.1109/63.728344](https://doi.org/10.1109/63.728344)
- [6] M. Y. Artemenko, L. M. Batrak and M. A. A. Taher, "Combined control system with direct current formation for three-phase four-wire network shunt active power filter," in *IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2014. DOI: [10.1109/ELNANO.2014.6873442](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2014.6873442)
- [7] P. Davari, Y. Yang, F. Zare and F. Blaabjerg, "A Multipulse Pattern Modulation Scheme for Harmonic Mitigation in Three-Phase Multimotor Drives," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 174–185, March 2016. DOI: [10.1109/JESTPE.2015.2461018](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2461018)
- [8] P. Davari, F. Zare and F. Blaabjerg, "Pulse Pattern-Modulated Strategy for Harmonic Current Components Reduction in Three-Phase AC–DC Converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3182–3192, July–August 2016. DOI: [10.1109/TIA.2016.2539922](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2539922)
- [9] V. E. Tonkal, A. V. Novoseltsev, S. P. Denisyuk and others, *Balans energii v elektricheskikh tsepyakh* [An energy balance in electrical circuits], Kyiv: Naukova Dumka, 1992, p. 312.
- [10] V. J. Romashko, I. V. Verbitsky and I. I. Kyrychik, «Anallz vtratai energii v sistemі vldboru maksimalnoi potuzhnosti sonyachnoi baterai [Energy loses analyze in solar battery maximum power picking system],» *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, pp. 55–57, 2014. URL: http://techned.org.ua/2014_4/st18.pdf
- [11] N. A. Kostin and O. G. Sheykina, «Oznaka nayavnosti obminnoyi potuzhnosti v sylovykh electrychnykh tyagovykh lantsyugakh systemy postynogo strumu [The signs of availability of exchange power in electric traction circuits of the direct current],» *Nauka i progress transportu. Vistnyk Dnipropetrovskogo natsionalnogo universytetu zaliznodorozhnogo transportu*, no. 42, pp. 98–101, 2012. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/priznak-nalichiya-obmennoy-moschnosti-v-silovykh-elektricheskikh-tyagovykh-tsepyakh-sistemy-postoyannogo-toka>
- [12] I. V. Zhezhelienko and Y. L. Sayenko, «Sovremennaya kontseptsya reaktivnoy moshchnosti [Reactive power modern conception],» *Vestnik Priazovskogo gostehuniversiteta*, pp. 192–197, 1995.
- [13] L. N. Trefethen, *Approximation Theory and Approximation Practice*, Oxford: University of Oxford, 2013, p. 298.

Надійшла до редакції 26 червня 2017 р.

УДК 621.314

Особенности компенсации мгновенной реактивной мощности в линейных цепях в переходном режиме при включении нагрузки

Жуйков В. Я., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery_zhuikov@yahoo.com

Вербицкий Е. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbitskiy@bigmir.net

Бондаренко А. Ф., к.т.н., доцент, ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Кафедра промышленной электроники kaf-pe.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Описана задача компенсации реактивной мощности в электрических цепях при включении линейной нагрузки. Проанализировано причины низкой эффективности применения существующих методов компенсации реактивной мощности для этого случая. Проанализирован обмен энергии между источником нагрузкой в течение переходного процесса на основе теории мгновенной мощности. Приведена методика оценки эффективности передачи энергии от источника к нагрузке на основе мгновенного коэффициента мощности, который рассчитывается с использованием измеренных значений тока и напряжения сети. Показано реализацию предложенной методики на примере подключения к сети линейной цепи первого порядка. Описано принципы компенсации реактивной мощности в переходных режимах.

Библ. 13, рис. 3.

Ключевые слова — переходной режим; компенсация реактивной мощности; коэффициент мощности.



UDC 621.314

Features of compensation of a instantaneous reactive power in linear circuits at the transient mode and switched on load

V. Ya. Zhuikov, Dr.Sc.(eng.), Prof., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery_zhuiphkov@yahoo.com

Ie. V. Verbitskiy, PhD, ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

e-mail verbitskiy@bigmir.net

O. F. Bondarenko, PhD, Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail bondarenkoaf@gmail.com

Department of Industrial Electronics kaf-pe.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—Compensation of reactive power is one of the ways of increasing the electrical grid efficiency, theoretical foundations of which were developed at the beginning of the last century by scientists Frize and Budeanu. The development of effective control algorithms for reactive power compensation continues today. As usual, algorithms of reactive power compensation have an inertia of at least one period of network voltage. Therefore they cannot be used in transient mode because of the grid current non-stationarity. The problem of reactive power compensation in power grids with variable load is analyzed. An inefficient implementation of existing methods of reactive power compensation for this case is shown. The method of analysis of the transmitting energy between the source and the load during the transition process based on the theory of instantaneous power is proposed. The grid current on active and reactive components is expanded. The instantaneous value of power factor for estimation of reactive power value is proposed. To implement an assessment of the power factor instantaneous value the grid current represented as the sum of the steady and free components. For subsequent simplification of power factor calculation, the steady and free current components representation based on sine and cosine components is proposed. The power factor sign according to the current components values is analyzed. Time dependency of the current components in transient mode unlike for steady state is shown. The proposed method is adapted to transient processes. A method of instantaneous power factor value calculation, based on grid current calculation is proposed. The disadvantage of proposed method in transient mode is shown and proposed to estimate power factor value based on grid current and its derivatives. The procedure of calculation, prediction, and identification of power factor values based on expanded equation system is proposed. Principle of active and reactive power calculation on basis instantaneous power factor, sine and cosine current components is shown. Analysis of energy processes in the transient mode in a linear circuit of the first order is performed. A possibility of power factor negative values is shown. A reactive compensator design for transient mode is proposed. The principles of reactive power compensation based on power factor instantaneous values in transient mode are given. The necessity of active power compensation during time intervals when power factor has negative values is proved. The grid current shape after reactive power compensation is analyzed. The unipolar shape of the grid current and the same polarity with grid voltage insignificant part of the transient process is underlined. Shown, that such current behavior facilitates to the accumulation of the required energy in the reactive element within the minimum possible root mean square current of the electric grid that decreases stress to the grid during the transient process.

Ref. 13, fig. 3.

Key words — transient mode; reactive power compensation; power factor.

