

УДК 621.317.38

АКТИВНА, РЕАКТИВНА ПОТУЖНОСТІ ЯК КОМПОНЕНТИ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ КОЛА З ПЕРІОДИЧНИМИ СТРУМОМ ТА НАПРУГОЮ

О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського,
вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна
seemal@kdu.edu.ua

З використанням тригонометричної форми ряду Фур'є для періодичних струму та напруги проведено розрахунок компонент, які формують миттєву потужність. Для гармонічних струму та напруги розраховано компоненти потужності, в яких виділені активна, реактивна та повна потужності, а також початкова фаза останньої, як гармонічної функції. Виконуючи аналіз періодичних полігармонічних струму та напруги отримано вирази миттєвої потужності, приведені до певного нормованого виду. Використовуючи відому концепцію розподілу компонент полігармонічної потужності, яка відповідає закону збереження енергії та теоремі Телледжана, визначено активну та реактивну компоненти в існуючому представленні. Зазначено, що у такому випадку повну потужність виділити неможливо. Спираючись на відомі роботи, для інтегральної оцінки полігармонічної потужності використано її квадратичну норму. Бібл. 7, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: потужність електричної енергії, норма потужності, активна потужність, реактивна потужність.

Вступ. В електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах і комплексах у разі розв'язання задач, пов'язаних з перетворенням електричної енергії в інші види енергії, використовують баланс енергії або потужності, а також для перевірки результату рішення задачі або оцінки розподілу потоків потужності. В більшості випадків баланс складається за усередненими на певному проміжку часу значеннями відповідних величин.

Значення потужності в більшості задач електротехніки та електромеханіки мають узагальнюючу вагу та використовуються для співвідношення енергетичних показників елементів системи – дотримання балансу за активною та реактивною потужностями. У разі експлуатації мереж, які забезпечують електричною енергією споживачів, незалежно від характеру струму постають задачі обліку електричної енергії. Для мереж постійного струму як обліковий показник використовують середнє (на визначеному проміжку часу) значення потужності, для мереж змінного струму – значення активної та реактивної потужностей [1, 2]. Спотворення електричної енергії, які спричинені чи то дією джерела, чи то дією навантаження у разі обліку електричної енергії не враховують.

Аналіз попередніх досліджень. Електроенергетичні системи використовуються для вироблення та передавання енергії, яка для електричного кола в першу чергу визначається

активною потужністю: $P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u i dt$, де u – напруга; i – струм.

У разі наявності в колі елементів, які мають властивості накопичення енергії, результат взаємодії напруги та струму розглядають фактично за рівнянням Коші-Будяновського-

Шварца [3]: $\left(\int_{t_0}^{t_0+T} u i dt \right)^2 = \int_{t_0}^{t_0+T} u^2 dt \int_{t_0}^{t_0+T} i^2 dt - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0+T} \int_{t_0}^{t_0+T} (u(\tau)i(t) - u(t)i(\tau))^2 d\tau dt$, і у випадку гар-

монічних функцій (струмів, напруг) відповідає рівнянню

$$P^2 = S^2 - Q^2, \quad (1)$$

де S – повна потужність; Q – реактивна потужність, потужність елементів, які накопичують енергію.

Наявність в електричному колі елементів з нелінійною вольт-амперною характеристикою унеможливує використання для виразу (1) поняття реактивна потужність, яку в роботах [4], спираючись на теорію Будеану, відносять до неактивної потужності N . Остання

об'єднує реактивну потужність елементів, які накопичують енергію Q , та потужність спотворення D , яку викликають елементи з нелінійною вольт-амперною характеристикою, тобто $P^2 = S^2 - N^2 = S^2 - (Q^2 + D^2)$.

Визначення причин виникнення потужності спотворення D досліджено вченими, наприклад, у роботах [1, 4], та наразі найбільш чітко систематизовано у стандарті Інституту інженерів електриків та електронників [5], декларує певну кількість компонент потужності електричної енергії, кожна з яких відбиває характерні показники. Використовуючи відомі векторні форми та поняття повної, активної, неактивної, реактивної потужностей, потужності спотворення, автори багатогранно визначають характеристику потоку потужності. У цьому разі використовується представлення струмів, напруг та миттєвої потужності у тригонометричній формі ряду Фур'є. Зазначені компоненти потужності обґрунтовані на підставі концепції Будеану, але в роботах [3, 4] піддаються критиці з позиції визначення гармонічних складових потужності на підставі гармонічних струму та напруги.

Визначення компонент потужності створює передумови для певної оцінки енергетичного процесу [6]. Аналіз струму, напруги та потужності полігармонічними функціями використовують для вирішення задач ідентифікації параметрів та характеристик елементів схеми [7]. У такому випадку забезпечують закон збереження енергії, що робить його більш сприятливим для оцінки показників передачі електричної енергії.

Мета роботи. Аналітичне визначення активної та реактивної потужностей як компонент миттєвої потужності кола з періодичними струмом та напругою.

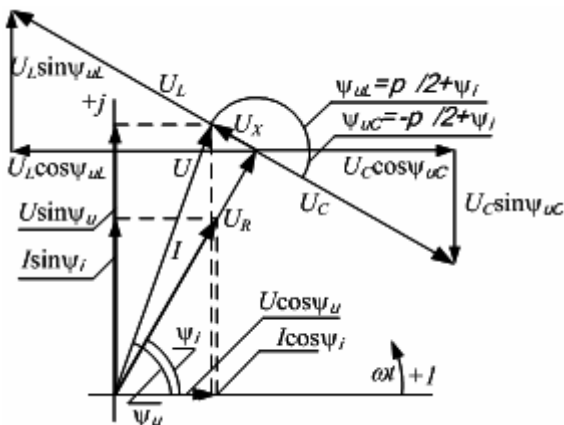


Рис. 1

Основний матеріал і результати досліджень. Розглянемо елементарний контур з послідовно увімкненими активним опором, індуктивним та ємнісним елементами. Протікання гармонічного струму в лінійному колі (рис. 1) забезпечується дією зовнішньої напруги, покладаючи гармонічними параметри режиму, запишемо у вигляді

$$i = I \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = U \sin(\omega t + \psi_u),$$

де U, I – амплітуда напруги та струму; ψ_u, ψ_i – початкова фаза напруги та струму; ω – кутова частота, при цьому напруга та струм пов'язані таким чином:

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C = i_R R + L \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{C} \int i_C dt = \\ &= I_R R \sin(\omega t + \psi_{iR}) + L \omega I_L \cos(\omega t + \psi_{iL}) - \frac{I_C}{C \omega} \cos(\omega t + \psi_{iC}). \end{aligned}$$

При цьому $i_R = i_L = i_C$; $I_R = I_L = I_C = I$; $\psi_{iR} = \psi_{iL} = \psi_{iC} = \psi_i$. Тоді можна записати

$$u = I \left(R \sin(\omega t + \psi_i) + \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \cos(\omega t + \psi_i) \right).$$

Потужність кола у разі зазначених струмів та напруги

$$\begin{aligned} p &= I \sin(\omega t + \psi_i) I \left(R \sin(\omega t + \psi_i) + \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \cos(\omega t + \psi_i) \right) = I^2 \left(R \sin^2(\omega t + \psi_i) + \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \sin(\omega t + \psi_i) \cos(\omega t + \psi_i) \right) = \\ &= \frac{I^2 R}{2} \cos(0) + \frac{I^2}{2} \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \sin(0) - \left(\frac{I^2 R}{2} \cos 2\psi_i - \frac{I^2}{2} \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \sin 2\psi_i \right) \cos 2\omega t + \\ &\quad + \left(\frac{I^2 R}{2} \sin 2\psi_i + \frac{I^2}{2} \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right] \cos 2\psi_i \right) \sin 2\omega t; \end{aligned}$$

$$p = P_R \cos(0) + [P_L - P_C] \sin(0) + (-P_R \cos 2\psi_i + [P_L - P_C] \sin 2\psi_i) \cos 2\omega t + (P_R \sin 2\psi_i + [P_L - P_C] \cos 2\psi_i) \sin 2\omega t =$$

$$= P_{a.1-1} \cos(0) + P_{b.1-1} \sin(0) + P_{a.1+1} \cos 2\omega t + P_{b.1+1} \sin 2\omega t. \quad (2)$$

Не виключаючи з огляду компоненту при $\sin(0)$, яка фактично не бере участі у формуванні миттєвої потужності, відмітимо, що $P_{a.1-1} \neq P_{a.1+1}$; $P_{b.1-1} \neq P_{b.1+1}$. Для збереження певної форми запису перепишемо рівняння, використовуючи такі компоненти – активну, реактивну та повну потужності: $p = P \cos(0) + Q \sin(0) + S \sin(2\omega t + \psi_s)$, де $P = P_{a.1-1} = P_R = \frac{I^2 R}{2}$ – акти-

вна потужність кола; $Q = P_{b.1-1} = [P_L - P_C] = \frac{I^2}{2} \left[L\omega - \frac{1}{C\omega} \right]$ – реактивна потужність кола;

$S = \sqrt{P_{a.1+1}^2 + P_{b.1+1}^2} = \sqrt{P_R^2 + [P_L - P_C]^2} = \sqrt{P_R^2 + Q^2} = \sqrt{P_{a.1-1}^2 + P_{b.1-1}^2}$ – повна потужність;

$\psi_s = \arctg \frac{(P_R \sin 2\psi_i + [P_L - P_C] \cos 2\psi_i)}{(-P_R \cos 2\psi_i + [P_L - P_C] \sin 2\psi_i)}$ – початкова фаза повної потужності.

Такий підхід повністю відбиває зв'язок компонент миттєвої потужності з відомими компонентами: активною, реактивною та повною потужностями. Нагадаємо, що за повною потужністю баланс в електричному колі не відтворюється. Слід зазначити, що за компонентами активної, реактивної та повної потужностей неможливо відновити миттєву потужність у колі, оскільки початкова фаза повної потужності не використовується. Гармонічні компоненти з амплітудами $P_{a.1-1}$, $P_{b.1-1}$, $P_{a.1+1}$, $P_{b.1+1}$ потужності повністю відтворюють миттєву потужність.

Додатково раціонально використовувати показники, які характеризують потужність як сигнал [1, 3]: максимальне, середнє та середньоквадратичне значення:

$$P_{\max} = \max(p) = P_R + S; P_{av} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p dt = P_R; P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p^2 dt} = \sqrt{P_{a.1-1}^2 + \frac{P_{a.1+1}^2}{2} + \frac{P_{b.1+1}^2}{2}}.$$

Останній показник є квадратичною нормою сигналу миттєвої потужності $P_{rms} = \|p\|$.

Використовуючи вихідну форму запису струму та напруги та їх початкових фаз, вираз для потужності запишемо у вигляді:

$$p = 0,5[UI \cos(\psi_u - \psi_i)] \cos(0) + 0,5[-UI \sin(\psi_u - \psi_i)] \sin(0) + 0,5[-UI \cos(\psi_u + \psi_i)] \cos(2\omega t) + 0,5[UI \sin(\psi_u + \psi_i)] \sin(2\omega t). \quad (3)$$

Порівнюючи вирази (2) та (3), маємо $P_{a.1-1} = 0,5[UI \cos(\psi_u - \psi_i)] = P$ – активна потужність; $P_{b.1-1} = 0,5[-UI \sin(\psi_u - \psi_i)] = Q$ – реактивна потужність; $P_{a.1+1} = 0,5[-UI \cos(\psi_u + \psi_i)]$ – косинусна компонента повної потужності; $P_{b.1+1} = 0,5[UI \sin(\psi_u + \psi_i)]$ – синусна компонента повної потужності.

Таким чином, компоненти повної потужності, що пульсують з подвійною частотою, не є активною та реактивною потужностями. Вони є ортогональними компонентами осцилюючої повної потужності, яка має початкову фазу ψ_s , штучно приводяться до активної та реактивної потужностей, що виконується деякими авторами шляхом відповідного зрушення за фазою.

З розглядом полігармонічних струму та напруги

$$u = \sum_k u_k = \sqrt{2} \sum_k U_k \sin(k\omega t + \psi_{uk}) = \sqrt{2} \sum_k (U_k \cos(\psi_{uk}) \sin(k\omega t) + U_k \sin(\psi_{uk}) \cos(k\omega t)) =$$

$$= \sum_k (U_{a.k} \sin(k\omega t) + U_{b.k} \cos(k\omega t)) = \sum_k (u_{a.k} + u_{b.k});$$

$$i = \sum_n i_n = \sqrt{2} \sum_n I_n \sin(n\omega t + \psi_{in}) = \sqrt{2} \sum_n (I_n \cos(\psi_{in}) \sin(n\omega t) + I_n \sin(\psi_{in}) \cos(n\omega t)) =$$

$$= \sum_n (I_{a.n} \sin(n\omega t) + I_{a.n} \cos(n\omega t)) = \sum_n (i_{a.n} + i_{b.n}),$$

де k, n – номери гармонік напруги та струму; U_k, I_n – діючі значення гармонік напруги та струму; ψ_{uk}, ψ_{ik} – початкова фаза напруги та струму; $U_{a.k}, U_{b.k}$ – амплітуди косинусної та синусної компонент гармонік напруги; $I_{a.k}, I_{b.k}$ – амплітуди косинусної та синусної компонент гармонік струму, вираз для потужності суттєво ускладнюється:

$$p = \sum_k u_k \sum_n i_n = \sum_k (u_{a.k} + u_{b.k}) \sum_n (i_{a.n} + i_{b.n}) = \sum_{k,n} U_k I_n \cos[(k-n)\omega t + \psi_{uk} - \psi_{in}] - \sum_{k,n} U_k I_n \cos[(k+n)\omega t + \psi_{uk} + \psi_{in}].$$

Як зазначено в [6], з останнього виразу випливає, що функція миттєвої потужності містить гармоніки, порядок яких (s) визначається як різницю ($k-n$), так і сумою ($k+n$) порядків гармонік напруги і струму, тобто $s = k \pm n$). Таким чином, миттєва потужність

$$\begin{aligned} p &= \sum_s p_s = \sum_s P_s \sin(s\omega t + \psi_{p.s}) = \sum_s (P_s \cos(\psi_{p.s}) \sin(s\omega t) + P_s \sin(\psi_{p.s}) \cos(s\omega t)) = \\ &= \sum_s (P_{a.s} \sin(s\omega t) + P_{b.s} \cos(s\omega t)) = \sum_s (p_{a.s} + p_{b.s}). \end{aligned} \quad (4)$$

Виконуючи ланку перетворень рівняння потужності, виділимо чотири компоненти потужності, приводячи його до вигляду (3):

$$\begin{aligned} p &= \sum_{k,n} [U_k I_n \cos(\psi_{uk} - \psi_{in})] \cos(k-n)\omega t + \sum_{k,n} [-U_k I_n \cos(\psi_{uk} + \psi_{in})] \cos(k+n)\omega t + \\ &+ \sum_{k,n} [-U_k I_n \sin(\psi_{uk} - \psi_{in})] \sin(k-n)\omega t + \sum_{k,n} [U_k I_n \sin(\psi_{uk} + \psi_{in})] \sin(k+n)\omega t. \end{aligned}$$

У цьому випадку розділити компоненти потужності за характером їх утворення можливо виходячи з концепції, викладеної в [6]. Використовуючи елементи алгебри теорії чисел та вводячи позначення предикату $A(s)$ – « s - парне», запишемо умови для визначення компонент потужності:

1. Косинусна компонента нульової частоти (активна потужність)

$$p_{a,0} = \sum_{k,n} [U_k I_n \cos(\psi_{uk} - \psi_{in})] \cos(k-n)\omega t = P \cos(0); \quad \forall s (s = |k-n| \rightarrow A(s)) \cap (k=n);$$

2. Синусна компонента нульової частоти (реактивна потужність)

$$p_{b,0} = \sum_{k,n} [-U_k I_n \sin(\psi_{uk} - \psi_{in})] \sin(k-n)\omega t = Q \sin(0); \quad \forall s (s = |k-n| \rightarrow A(s)) \cap (k=n);$$

3. Косинусні канонічні компоненти

$$p_{a,c} = \sum_{k,n} [-U_k I_n \cos(\psi_{uk} + \psi_{in})] \cos(k+n)\omega t = \sum_s P_{a.c.s} \cos(s\omega t); \quad \forall s (s = (k+n) \rightarrow A(s)) \cap (k \neq n);$$

4. Синусні канонічні компоненти

$$p_{b,c} = \sum_{k,n} [U_k I_n \sin(\psi_{uk} + \psi_{in})] \sin(k+n)\omega t = \sum_s P_{b.c.s} \sin(s\omega t); \quad \forall s (s = (k+n) \rightarrow A(s)) \cap (k \neq n);$$

5. Косинусні компоненти канонічного порядку – псевдоканонічні компоненти

$$\begin{aligned} p_{a,pc} &= \sum_{k,n} [U_k I_n \cos(\psi_{uk} - \psi_{in})] \cos(k-n)\omega t + \sum_{k,n} [-U_k I_n \cos(\psi_{uk} + \psi_{in})] \cos(k+n)\omega t = \\ &= P_{a.pc.s} \cos(s\omega t); \quad \forall s (s = (k \pm n) \rightarrow A(s)) \cap (k \neq n); \end{aligned}$$

6. Синусні компоненти канонічного порядку – псевдоканонічні компоненти

$$\begin{aligned} p_{b,pc} &= \sum_{k,n} [-U_k I_n \sin(\psi_{uk} - \psi_{in})] \sin(k-n)\omega t + \sum_{k,n} [U_k I_n \sin(\psi_{uk} + \psi_{in})] \sin(k+n)\omega t = \\ &= \sum_s P_{b.pc.s} \sin(s\omega t); \quad \forall s (s = (k \pm n) \rightarrow A(s)) \cap (k \neq n); \end{aligned}$$

7. Косинусні неканонічні компоненти

$$\begin{aligned} p_{a,nc} &= \sum_{k,n} [U_k I_n \cos(\psi_{uk} - \psi_{in})] \cos(k-n)\omega t + \sum_{k,n} [-U_k I_n \cos(\psi_{uk} + \psi_{in})] \cos(k+n)\omega t = \\ &= P_{a.nc.s} \cos(s\omega t); \quad \forall s (s = |k \pm n| \rightarrow \neg A(s)) \cap (k \neq n); \end{aligned}$$

8. Синусні неканонічні компоненти

$$\begin{aligned}
 P_{b.nc} &= \sum_{k,n} \left[-U_k I_n \sin(\psi_{uk} - \psi_{in}) \right] \sin(k-n)\omega t + \sum_{k,n} \left[U_k I_n \sin(\psi_{uk} + \psi_{in}) \right] \sin(k+n)\omega t = \\
 &= \sum_s P_{b.nc.s} \sin(s\omega t); \quad \forall s (s = |k \pm n| \rightarrow \neg A(s)) \cap (k \neq n).
 \end{aligned}$$

Аналогічно можливо представити компоненти потужності з використанням ортогональних складових струму та напруги. У результаті в потужності однозначно виділяються активна та реактивна потужності в існуючому їх уявленні, виділити повну потужність S серед компонент потужності в цьому випадку не можливо.

Спосіб представлення потужності у вигляді

$$P = P_{a,0} + P_{b,0} + P_{a,c} + P_{a,pc} + P_{b,c} + P_{b,pc} + P_{a,nc} + P_{b,nc} \quad (5)$$

відповідає закону збереження енергії та теоремі Телледжена [6]. При цьому сигнал потужності узагальнюється квадратичною нормою P_{rms} .

Рациональність використання такого представлення потужності можна ілюструвати таким прикладом. Припустимо, що струм та напруга задані трьома гармоніками з відповідними амплітудами та початковими фазами (табл. 1), а частота основної гармоніки складає $\omega = 314 \text{ c}^{-1}$.

Діаграми струму та напруги для першого та другого експериментів наведені на рис. 2 а та в відповідно, результуючу діаграму потужності – на рис. 2 б та г. Очевидно, що за умови різних значень гармонік струму буде отримано різну потужність, але інтегральні показники [4] – активна P , реактивна Q , повна S потужності та навіть потужність спотворення D залишаються незмінними, хоча, як видно з рис. 2 б та г, характер спотворення потужності різний, що призводить до різних значень максимуму потужності.

В табл. 2 наведено значення ортогональних компонент потужності для першого та другого експериментів, отримані відповідно до виразу (4). Як і було зазначено раніше, однозначно визначаються компоненти з нульовою частотою $P_{a,0} = P$ та $P_{b,0} = Q$.

Пов'язати компоненти інших частот із зазначеними потужностями або з повною потужністю S неможливо, але такий спосіб представлення потужності дає змогу відрізнити потужності p , отримані в пропонованих експериментах.

Таблиця 1

Experiment	1				2			
	<i>h1</i>	<i>h2</i>	<i>h3</i>	<i>RMS</i>	<i>h1</i>	<i>h2</i>	<i>h3</i>	<i>RMS</i>
<i>I, A</i>	20	1	10	15,83	20	10	1	15,83
<i>THD_I, в.о.</i>				0,502				0,502
<i>U, B</i>	220	10	10	155,89	220	10	10	155,89
<i>THD_U, в.о.</i>				0,064				0,064
<i>φ, град</i>	30	60	60		30	60	60	
<i>P, Вт</i>	1933				1933			
<i>Q, вар</i>	1148				1148			
<i>S, ВА</i>	2467				2467			
<i>D, вар</i>	1017				1017			

Таблиця 2

	$P_{a,0}$, ВА	$P_{b,0}$, ВА	$P_{a,1}$, ВА	$P_{b,1}$, ВА	$P_{a,2}$, ВА	$P_{b,2}$, ВА	$P_{a,3}$, ВА	$P_{b,3}$, ВА	$P_{a,4}$, ВА	$P_{b,4}$, ВА	$P_{a,5}$, ВА	$P_{b,5}$, ВА	$P_{a,6}$, ВА	$P_{b,6}$, ВА	P_{rms} , ВА	P_{max} , ВА
<i>Exp1</i>	1933	1148	169,3	84,2	2542	2003	0,015	145,3	639,1	1007	27,5	47,6	25	43,3	3118	6790
<i>Exp2</i>	1933	1148	664,3	863,7	2047	1145	0,011	1003	166,6	188,5	27,5	47,6	2,5	4,3	2796	6606

Слід зазначити різні значення квадратичної норми потужності та її максимального значення для кожного з експериментів. Додатково слід звернути увагу на співпадіння значень ортогональних компонент п'ятої гармоніки потужності $s = 5$, яка зумовлена взаємодією другої та третьої гармонік напруги та струму. Значення ортогональних компонент шостої гармоніки потужності $s = 6$ на порядок відмінні, тому що зумовлені взаємодією виключно трьох гармонік струму та напруги. Окремо слід виділити значення ортогональних компонент другої гармоніки потужності $s = 2$, яка відбиває взаємодію гармонік струму та напруги, для яких $n \pm k = s = 2$. У цьому випадку окрім першої гармоніки струму та напруги у формуванні

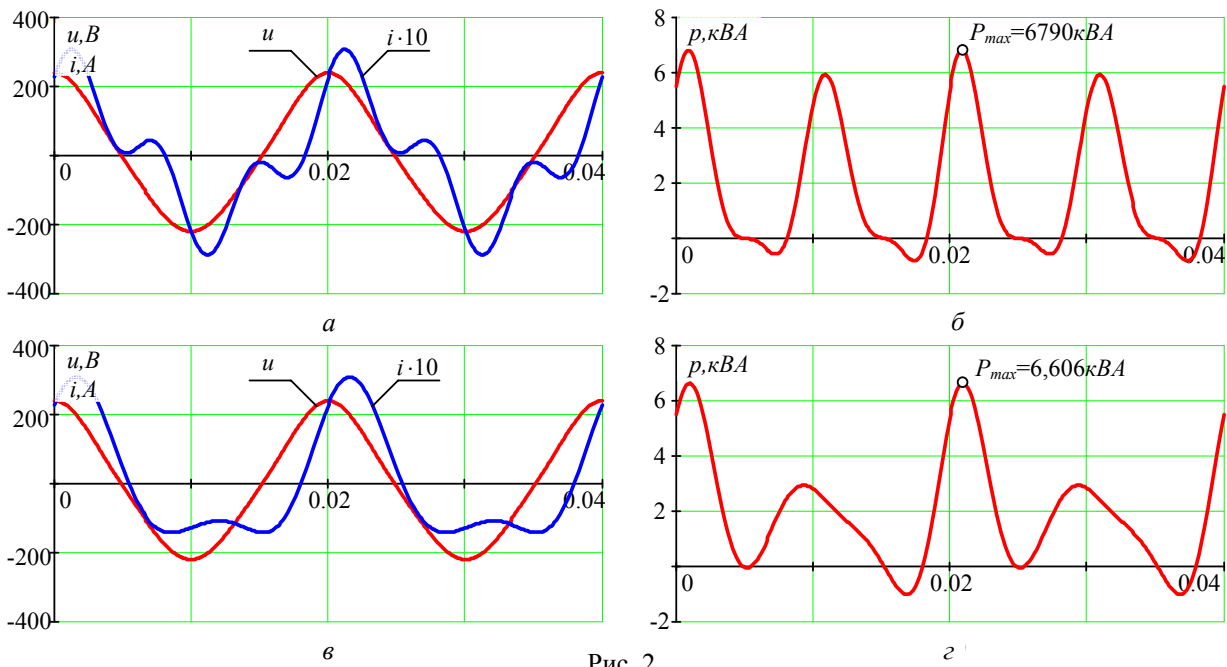


Рис. 2

цієї компоненти потужності беруть участь і всі інші гармоніки струму та напруги, для яких виконується умова.

У табл. 3 наведено значення ортогональних компонент потужності для першого та другого експериментів, отримані відповідно до виразу (5). В цьому випадку також однозначно визначаються компоненти з нульовою частотою $P_{a,0} = P$ та $P_{b,0} = Q$. Аналогічно попередньому варіанту є ситуація з ортогональними компонентами гармонік $s = 5$ та $s = 6$. Ортогональні компоненти гармонік потужності $s = 2$ розподілені згідно з (5): на канонічні компоненти (індекс «с»), які відбивають дію компонент струму та напруги однієї частоти $n = k = 1$, та псевдоканонічні компоненти (індекс «pc»), які відбивають дію гармонік струму і напруги різних частот $n \neq k$. Тому значення канонічних ортогональних компонент гармонік потужності $s = 2$ для обох експериментів співпадають, а для неканонічних відрізняються.

Таблиця 3

	$P_{a,0}$	$P_{b,0}$	$P_{a,nc,1}$	$P_{b,nc,1}$	$P_{a,c,2}$	$P_{a,pc,2}$	$P_{b,c,2}$	$P_{b,pc,2}$	$P_{a,nc,3}$	$P_{b,nc,3}$	$P_{a,c,4}$	$P_{a,pc,4}$	$P_{b,c,4}$	$P_{b,pc,4}$	$P_{a,nc,5}$	$P_{b,nc,5}$	$P_{a,c,6}$	$P_{b,c,6}$
	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА	ВА
Exp1	1933	1148	169,3	84,2	1905	636,6	1100	902,6	0,02	145,3	2,5	636,6	4,3	1003	27,5	47,6	25	43,3
Exp2	1933	1148	664,3	863,7	1905	141,6	1100	45,3	0,01	1003	25	141,6	43,3	145,3	27,5	47,6	2,5	4,3

Висновки. На підставі аналізу ортогональних компонент миттєвої потужності як добутку моногармонічних струму та напруги встановлено компоненти, які відповідають активній, реактивній і повній потужностям та її ортогональним складовим, які зумовлюють амплітуду останньої та її початкову фазу. На відміну від відомого представлення компонент потужності навмисно не виключено з розгляду ортогональні компоненти з нульовим аргументом функції.

Для періодичних струмів та напруг з довільною кількістю гармонік, використовуючи відомий розподіл компонент потужності на ортогональні, а останніх на компоненти нульової частоти, канонічні, псевдоканонічні та неканонічні, з використанням мови логіки предикатів сформульовано умови і рівняння для визначення зазначених компонент.

На прикладі двох експериментів з періодичними полігармонічними струмом та напругою, які в обох експериментах мають однакові показники діючого значення та коефіцієнта викривлення, змінюючи порядок гармонік струму, проілюстровано низьку ефективність використання інтегральних показників повної потужності та потужності спотворення, які в обох випадках залишаються незмінними.

Використовуючи розділення компонент потужності на компоненти нульової частоти, канонічні, псевдоканонічні та неканонічні, на прикладі показано багатогранність відображення процесу передавання потужності електричної енергії зі збереженням закону збереження енергії та виконанням теореми Телледжена. Пропоноване рішення потребує розвитку в напрямку визначення показників, корисних для інструментальної оцінки енергетичного процесу, що в свою чергу може бути використаним у системах обліку обсягів та якості електричної енергії.

1. Emanuel A.E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, 2010. 280 p.
2. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 66–70.
3. Willems J. L. Budeanu's Reactive Power and Related Concepts Revisited. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2011. Vol. 60, no. 4. P. 1182–1186.
4. Jeltsema Dimitri. Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2015. no. 4/201. P. 68–73.
5. IEEE Std 1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE, 2010, 50 p.
6. Bialobrzheskyi O., Rod'kin D., Gladyr A. Power components of electric energy for technical and commercial electricity metering. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 2. P. 44–53.
7. Родькин Д. И. Особенности применения энергетического метода идентификации двигателей переменного тока при псевдополигармонических сигналах. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2009. Вип. 1. С. 7–20.

УДК 621.317.38

А.В. Бялобржеский, канд. техн. наук

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского,
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина

АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТИ КАК КОМПОНЕНТЫ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ЦЕПИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

С использованием тригонометрической формы ряда Фурье для периодических тока и напряжения проведен расчет компонент, формирующих мгновенную мощность. Для гармонических тока и напряжения рассчитаны компоненты мощности, в которых выделены активная, реактивная и полная мощности, а также начальная фаза последней, как гармонической функции. Выполняя анализ периодических полигармонических тока и напряжения получены выражения мгновенной мощности, приведенные к определенному нормированному виду. Используя известную концепцию распределения компонент полигармонической мощности, соответствующую закону сохранения энергии и теореме Телледжена, определены активная и реактивная компоненты в существующем представлении. Отмечено, что в таком случае полную мощность выделить невозможно. Опираясь на известные работы, для интегральной оценки полигармонической мощности использована ее квадратичная норма. Библ. 7, рис. 2, табл. 3.

Ключевые слова: мощность электрической энергии, норма мощности, активная мощность, реактивная мощность.

O.V. Bialobrzheskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,
st. Pervomaiska, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine

ACTIVE, REACTIVE POWER AS COMPONENTS OF THE INSTANTANEOUS POWER A CIRCUIT WITH PERIODIC CURRENT AND VOLTAGE

Using the trigonometric form of the Fourier transform for periodic currents and voltages, the components forming instantaneous power are calculated. For harmonic currents and voltages, power components are calculated in which the active, reactive and apparent powers are allocated, as well as the initial phase of the latter, as a harmonic function. Performing an analysis of periodic polyharmonic currents and voltages, instantaneous power expressions are obtained, reduced to a certain normalized form. Using the well-known concept of the distribution of polyharmonic power components, corresponding to the energy conservation law and the Telleggen theorem, the active and reactive components are determined in the existing representation. It is noted that in this case it is impossible to single out the full power. Based on known works, for its integral estimation of polyharmonic power its quadratic norm is used. References 7, figure 2, tables 3.

Key words: power of electric energy, power norm, active power, reactive power.

1. Emanuel A. E. Power definitions and the physical mechanism of power flow. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, 2010. 280 p. (En)

2. Gemerov G.G, Tugay D.V. Dependence of additional losses in three-phase power supply systems on reactive power and pulsations of instantaneous active power. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2015. No 4. P. 66–70. (Rus)
3. Willems J. L. Budeanu's reactive power and related concepts revisited. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2011. Vol. 60, no. 4. P.1182–1186. (En)
4. Jeltsema Dimitri. Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2015. no. 4/201. Pp. 68–73. (En)
5. IEEE Std 1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE, 2010, 50 p (En)
6. Bialobrzheskyi O., Rod'kin D., Gladyr A. Power components of electric energy for technical and commercial electricity metering. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 2. P. 44–53. (En)
7. Rod'kin D.I. Features of the application of the energy method for the identification of alternating-current motors for pseudo-polyharmonic signals. *Electromechanical and energy saving systems*. 2009. №. 1. P. 7–20. (Rus)

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018

THE CONCEPT OF LINE AUTOMATION SYSTEM AS A COMPONENT OF SMART NETWORKS OF THE FUTURE

O.A. Buslavets^{1*}, O.V. Martyniuk^{2**}, O.A. Savchenko^{3***}, O.O. Miroshnyk^{4****}, S.V. Diubko^{5*****}

1, 2 – Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, 30,

Khreshchatyk str., Kyiv, 01601, Ukraine

3-5 – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture,

44 Alchevskiyh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

e-mail: olga.buslavets@mev.gov.ua, oleksandr.martynuk@mev.gov.ua, savoa@ukr.net, omiroshnyk@ukr.net, stanislavdiubko@gmail.com

The article reflects the authors' vision on the prospects for the development of automation tools used on transmission lines. The authors overviewed briefly the existing elements of transmission lines automation - monitoring systems for various processes, actuating devices. The approach for the integration of individual elements of automation on the PL into a single set of software is offered. It gives grounds for introducing the concept of an automated control system of technological processes of the transmission line (ACSTP PL). The ACSTP PL structural scheme of as a potential component of "smart" networks is reviewed, the group of the monitoring system sensors of the line are described and their general purpose is described. The general requirements for the construction of ACSTP PL, their functional capabilities are formulated. Prospects for the implementation of ACSTP PL and their key technologies are projected. References 10, figures 2, table.

Key words: Smart Grid, power line, line automation system, measurement and monitoring system, control actions, software and hardware complex.

Introduction. Currently, the main trend of electric power systems development in the world is the widespread adoption of Smart Grid technologies. The most complete Smart Grid concept is reflected in the definition of IEEE as a fully integrated electric power system, characterized by self-regulation and self-healing features and managed in real time. Self-regulation and self-healing are the key characteristics of Smart Grid, through which high reliability of power supply with high-quality energy is achieved. The basis for realization of these properties is implementation of monitoring of the various processes taking place in the grid, and also control devices that provide network "adaptation" to existing conditions caused by external and internal factors [1].

Smart Grid technologies are relevant for Ukraine, because the electric networks of the country are characterized by a high degree of physical and moral wear of the electric equipment, large losses of electric energy for its transmission, low level of automation, and so on. Thus, by the end of 2017, the share of power lines of distribution networks to be reconstructed, replaced or overhaul exceeded 52 % of their total length. The number of substations that worked out the project resource

© Buslavets O. A., Martyniuk O.V., Savchenko O.A., Miroshnyk O.O., Diubko S.V., 2018

* ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6449-7587>; ** ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5278-4789> ;

*** ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6401-0852> ; **** ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6144-7573> ;

***** ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1856-1987>