

Jak definiować trójfazową moc pozorną?

Leszek S. Czarnecki, Life Fellow IEEE

Electrical and Computer Engineering Dept. Louisiana State University, Baton Rouge, USA

Streszczenie — Artykuł wyjaśnia przyczyny zamieszania wokół definicji mocy pozornej oraz współczynnika mocy w obwodach trójfazowych z sinusoidalnymi i niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć. Pokazuje on, że w obecności niezerównoważenia odbiornika, powszechnie używane definicje mocy pozornej, to jest definicja arytmetyczna i definicja geometryczna tej mocy, prowadzą do błędnej wartości współczynnika mocy i błędnej wartości mocy transformatorów zasilających. W przypadku przebiegów sinusoidalnych poprawna wartość trójfazowej mocy pozornej otrzymywana jest, stosując mało znaną definicję Buchholza. W przypadku przebiegów niesinusoidalnych poprawną wartość mocy pozornej i współczynnika mocy w obwodach z odbiornikami niezerównoważonymi otrzymuje się, stosując definicję mocy pozornej autora tego artykułu.

Abstract — The article clarifies some confusion around various definitions of the apparent power in three-phase systems. It demonstrates that arithmetical and geometrical definitions of that power in three-phase systems with unbalanced loads yield erroneous values of the three-phase apparent power and the power factor. When voltages and currents are sinusoidal, then right value of the apparent power and the power factor can be calculated when Buchholz's definition is used. When these quantities are distorted, the right value of the apparent power and the power factor can be calculated using the definition suggested by the author of this article.

Słowa kluczowe — Odbiorniki niezerównoważone, wektory trójfazowe, trójfazowa wartość skuteczna, współczynnik mocy

Index Terms — *Unbalanced loads, three-phase vectors, three-phase rms, power factor*

1. WSTĘP

Aby dostarczać do odbiornika energię elektryczną, źródło zasilania musi wytwarzać napięcie $u(t)$ i musi być zdolne wytrzymać, bez przegrzania, obciążenie prądem odbiornika $i(t)$. Iloczyn wartości skutecznych napięcia źródła i prądu odbiornika jednofazowego, $\|u\|$, $\|i\|$, nazwano mocą pozorną, i oznacza się ją zwykle symbolem S . Maksymalna wartość mocy pozornej określa moc źródła zasilania. Gdy napięcie i prąd mają przebiegi sinusoidalne, wówczas symbole wartości skutecznej, $\|u\|$, $\|i\|$, są zwykle upraszczane do symboli U i I , mianowicie

$$\|u\| \stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = U \quad (1)$$

$$\|i\| \stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = I \quad (2)$$

i moc pozorna definiowana jest wzorem

$$\|u\| \|i\| \stackrel{\text{df}}{=} UI = S. \quad (3)$$

Moc pozorna w obwodach jednofazowych z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, jest obok mocy czynnej P i mocy bierniej Q , jedną z najbardziej rozpowszechnionych w elektrotechnice wielkości energetycznych.

Z powodu różnych zjawisk w odbiornikach elektrycznych, wartość skuteczna $\|i\|$ prądu odbiornika jest zwykle większa od wartości niezbędnej do tego, aby energia była dostarczana do odbiornika z mocą czynną P . Oznacza to, że moc pozorna odbiornika S jest zwykle większa od jego mocy czynnej P . Stosunek tych dwóch mocy

$$\frac{P}{S} \stackrel{\text{df}}{=} \lambda \quad (4)$$

określa skuteczność odbiornika w procesie absorpcji energii, która może być dostarczana przez źródło zasilania. Stosunek ten nazywa się współczynnikiem mocy.

Niska wartość współczynnika mocy oznacza, że energia dostarczana jest do odbiornika przy zbyt wielkiej wartości skutecznej prądu zasilania, powodując nadmierne straty w źródle, zbyt duży spadek napięcia na impedancji źródła, oraz nadmierne zużycie potencjału źródła, potrzebnego do zasilania odbiorników. Usprawiedliwia to różne formy nacisku dostawcy energii na jej odbiorcę, naciski mające na celu poprawienie przez odbiorcę współczynnika

mocy λ . Odbiorca może to osiągnąć na drodze kompensacji lub wtedy, gdy odbiorca przetwarza energię elektryczną silnikami, lepiej dopasowując moc elektryczną silników do mocy odbiorników mechanicznych.

2. INTERPRETACJA MOCY POZORNEJ

Ponieważ moc pozorna, obok mocy czynnej P i mocy bierniej Q , jest jedną z podstawowych mocy w obwodach elektrycznych, przez długi czas poszukiwano interpretacji fizycznej tej mocy. Jednym z najzagorzalszych zwolenników opinii, że moc pozorna jest wielkością fizyczną, był prof. Emanuel, kierujący Grupą Roboczą IEEE Definicji Mocy (IEEE Working Group on Power Definitions). Twierdził on, że moce czynna, bierna i pozorna są tak podstawowymi wielkościami opisującymi przepływ energii w obwodach elektrycznych, że jest nie do pomyślenia, aby moce te nie były odbiciem konkretnych zjawisk fizycznych. Opinię tę i interpretację fizyczną mocy pozornej przedstawił Emanuel w artykułach [1, 2]. Wydaje się, że ta interpretacja fizyczna mocy pozornej została jednak skutecznie podważona przez autora tego artykułu w pracach [3, 4], gdyż opinia Emanuela o fizycznej naturze mocy pozornej w literaturze tego przedmiotu więcej się nie pojawiła.

Moc pozorna nie może być wielkością fizyczną, gdyż jest zdefiniowana jako iloczyn wartości skutecznych, które to wartości nie są zjawiskami fizycznymi. Są one liczbami, przyporządkowanymi, zgodnie z definicjami (1) i (2) napięciu i prądowi zasilania. Liczby te, $\|u\|$ oraz $\|i\|$, są pewnymi miarami skutków termicznych prądu i napięcia w jednym okresie zmienności tych dwóch wielkości. Te miary są wielkościami umownymi, zatem moc pozorna S , jako ich iloczyn, jest tylko wielkością umowną. Zresztą skutki termiczne prądu i napięcia mają miejsce w odrębnych obszarach źródła zasilania. Prąd $i(t)$ powoduje skutki termiczne w rezystancji wewnętrznej źródła, natomiast skutki termiczne napięcia $u(t)$ pojawiają się w procesie jego wytwarzania, na przykład w rdzeniu transformatora czy stojanie generatora.

Tak więc, moc pozorna nie jest wielkością fizyczną, lecz bardzo w elektrotechnice użyteczną, wielkością umowną.

3. RYS HISTORYCZNY

Koncepcja mocy pozornej S pojawiła się, wraz z koncepcjami mocy chwilowej $p(t)$ i mocy czynnej P w ostatnich dekadach XIX wieku, i dotyczyła pierwotnie obwodów jednofazowych. Bardzo wcześnie [5] pojawiły się też pytania o przyczyny różnicy między mocą pozorną i mocą czynną, jak to zaobserwował Steinmetz w 1892 r., nawet w obwodach czysto rezystancyjnych z lampami łukowymi, które to pytania doprowadziły do pojawienia się koncepcji mocy bierniej Q .

Obserwacja i pytanie Steinmetza o przyczynach różnicy między wartościami mocy pozornej i mocy czynnej dały początek rozwojowi teorii mocy obwodów elektrycznych, w szczególności, dla obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia. Teorie te, poczynając od Budeanu [6], Fryzego [7] i szereg innych [Shepherd, Moore, Czarnecki, Tenti] usiłowały odpowiedzieć na pytanie Steinmetza, proponując rozkład mocy pozornej S , w kwadracie, na różne moce elektryczne. Dla przykładu, Budeanu zaproponował [6] rozkład mocy pozornej na moc czynną P , moc bierną Budeanu Q_B i moc odkształcenia D , mianowicie

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2. \quad (5)$$

Fryze zaproponował [7] rozkład mocy pozornej na moc czynną P i moc bierną Fryzego Q_F , mianowicie

$$S^2 = P^2 + Q_F^2. \quad (6)$$

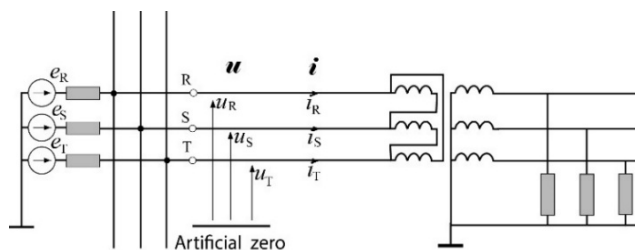
Kusters i Moore zaproponowali [8] rozkład mocy pozornej S na moc czynną P , pojemnościową moc bierną Q_C , i resztkową moc bierną Q_{Cr} .

$$S^2 = P^2 + Q_C^2 + Q_{Cr}^2. \quad (7)$$

Czarnecki zaproponował [9] dla odbiorników liniowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania, rozkład mocy pozornej S na moc rozrzutu D_S , i moc bierną Q .

$$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q^2. \quad (8)$$

Krytyczną analizę tych i innych rozkładów mocy pozornej można znaleźć w książce [10]. Rozkłady mocy pozornej nie są jednak przedmiotem tego artykułu, jakkolwiek rozkłady te ilustrują różnorodność poglądów na temat wpływu różnych mocy na wartość mocy pozornej. Przedmiotem artykułu jest definicja trójfazowej mocy pozornej w obwodach trójfazowych, o ogólnej strukturze pokazanej na Rys. 1.



Rys. 1. Obwód trójfazowy.

Te same zjawiska, które obniżają współczynnik mocy w obwodach jednofazowych, obniżają go także w obwodach trójfazowych. Dochodzi tylko jeszcze jeden czynnik, mianowicie niezrównoważenie odbiornika, to znaczy różnica impedancji poszczególnych faz odbiornika. Sygnalizował to [11] Steinmetz w 1917r. W tej samej książce Steinmetz opracował reaktancyjny kompensator równoważący obwody niezrównoważone z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia. Pojawiło się też zagadnienie definiowania trójfazowej mocy pozornej.

Amerykański Instytut Inżynierów Elektryków (AIEE) powołał w roku 1920 komitet poświęcony definiowaniu mocy pozornej w obwodach trójfazowych, który zalecił [12] definiowanie mocy pozornej wzorem

$$S = S_A \stackrel{\text{df}}{=} U_R I_R + U_S I_S + U_T I_T \quad (9)$$

nazwaną definicją arytmetyczną, lub wzorem

$$S = S_G \stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

nazwaną definicją geometryczną. W obwodach zrównoważonych zasilanych napięciem symetrycznym z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, obie te definicje prowadzą do identycznych wartości mocy pozornej, jakkolwiek różnią się one zasadniczo co do natury tych definicji i na poziomie pomiarowym.

Ponieważ odmiennosc tych definicji tworzyła pewne zamieszanie, komitet AIEE kontynuował badania nad wyborem rekomendowanej definicji. Nie znaleziono jednak argumentów wskazujących na przewagę którejś z nich i na podstawie rezultatów opublikowanych [13] w roku 1935, obie definicje znalazły się w Słowniku Standardów IEEE [14]. Jednocześnie, komitet AIEE nie dostrzegł, że naukowiec niemiecki, prof. Buchholtz zaproponował [15] w 1922r. odmienną definicję mocy pozornej, mianowicie

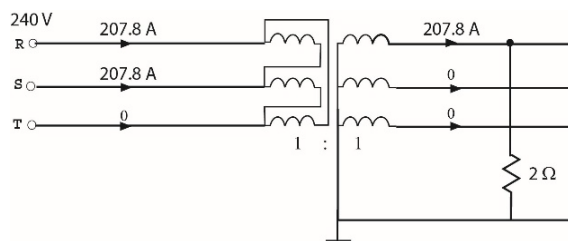
$$S = S_B \stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2} \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2} \quad (11)$$

i definicja ta nie znalazła się w Standardzie IEEE [14], pozostając wskutek tego definicją mało znaną.

4. WYBÓR DEFINICJI TRÓJFAZOWEJ MOCY POZORNEJ

Jak pokazano poprzednio, moc pozorna jest wielkością umowną, jednak wybór jej definicji, jakkolwiek do pewnego stopnia dowolny i oparty na różnych opiniach, powinien brać pod uwagę techniczne i ekonomiczne skutki jej wyboru. Jednym z najbardziej ważnych takich ekonomicznych skutków jest poprawność obliczania skuteczności zasilania odbiorników, określona wartością współczynnika mocy λ , która może zależeć od wyboru definicji mocy pozornej. Wybór tej definicji może mieć także wpływ na ocenę mocy urządzeń transmisyjnych w systemach rozdzielczych, przede wszystkim, transformatorów. Błędny wybór definicji mocy pozornej może mieć wpływ na błędne oszacowanie wewnętrznych strat energii w transformatorze. Przy niedoszacowaniu tych strat może to prowadzić do przegrzewania transformatora.

Aby uświadomić sobie wpływ definicji mocy pozornej na wartość współczynnika mocy, rozpatrzmy obwód pokazany na Rys. 2.



Rys. 2. Obwód trójfazowy z niezrównoważonym odbiornikiem rezystancyjnym.

W obwodzie tym, niezrównoważony odbiornik rezystancyjny zasilany jest ze źródła symetrycznych napięć przez idealny transformator o przekładni zwojowej 1:1. Moc czynna odbiornika w tym obwodzie jest równa $P = 86,4$ kW. Ponieważ obwód jest czysto rezystancyjny, moc bierna $Q = 0$. Moc pozorna na zaciskach zasilania, R, S, T, zależnie od przyjętej definicji, wynosi

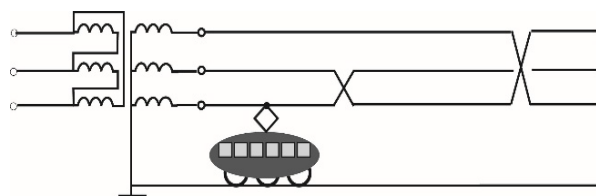
$$S_A = 99.7 \text{ kVA}, \quad S_G = 86.4 \text{ kVA}, \quad S_B = 122.2 \text{ kVA}.$$

Zatem, zależnie od tej definicji, współczynnik mocy ma wartość

$$\lambda_A = \frac{P}{S_A} = 0.87, \quad \lambda_G = \frac{P}{S_G} = 1, \quad \lambda_B = \frac{P}{S_B} = 0.71.$$

Pojawia się zatem pytanie, **”jaka jest wartość współczynnika mocy tego odbiornika?”** Pytanie jest ważne, gdyż dostawca energii może uzależniać cenę sprzedaży od wartości tego współczynnika, szczególnie dla dużych odbiorców.

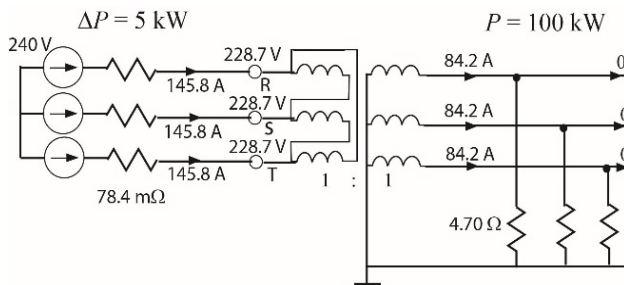
Takie ekstremalne niezrównoważenie odbiornika, jak to jest w obwodzie na Rys. 2, może nie pojawiać się w systemach rozdzielczych zbyt często, zwykle jest znacznie niższe, jednak może mieć ono miejsce, na przykład w obwodach zasilania trakcji elektrycznej, jak to ilustruje Rys. 3.



Rys. 3. Przykład zasilania silnika trakcyjnego.

Niestety, Standard IEEE [14] nie podaje żadnych wskazówek co do wyboru definicji mocy pozornej. Pewne rozumowanie prowadzące do wyboru tej definicji można znaleźć jedynie w artykule autora [16], opublikowanym w 1999r. w czasopiśmie niemieckim, *Archiv für Elektrotechnik*. Poniżej przytoczone są elementy tego rozumowania.

Zgodnie z tym rozumowaniem, dostawca energii elektrycznej może uzależniać cenę jej sprzedaży od współczynnika mocy λ , gdyż wpływa on na straty energii w systemie rozdzielczym. Zatem możemy postawić pytanie, **”która z wartości współczynnika mocy λ_A , λ_G , czy λ_B , dostarcza poprawnej informacji o wzroście strat energii w źródle zasilania?”**. Aby odpowiedzieć na to pytanie, rozpatrzmy najpierw obwód ze zrównoważonym odbiornikiem rezystancyjnym, pokazanym na Rys. 4. Jego parametry zostały tak dobrane, aby moc czynna odbiornika miała wartość $P = 100$ kW, moc strat w źródle wynosiła 5 % mocy odbiornika, to jest $\Delta P = 5$ kW.



Rys. 4. Obwód z czysto rezystancyjnym odbiornikiem trójfazowym.

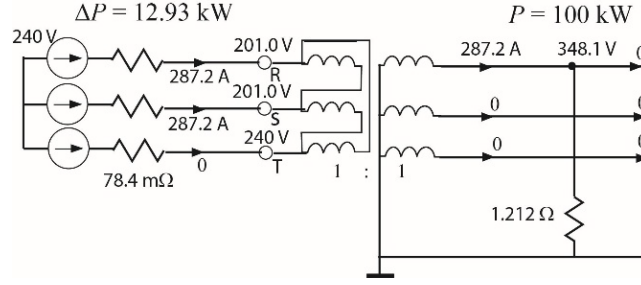
Obwód pracuje z takimi mocami, jeśli przy przyjętym napięciu wewnętrznym źródła zasilania, $E_R = 240$ V, rezystancja wewnętrzna źródła $R_w = 78,4$ mΩ, zaś rezystancja fazowa odbiornika, $R = 4,70$ Ω. Ponieważ odbiornik jest zrównoważony, wartość mocy pozornej S nie zależy od wyboru jej definicji, zatem

$$S_A = S_G = S_B = 100 \text{ kVA}$$

oraz

$$\lambda_A = \lambda_G = \lambda_B = 1.$$

W następnym kroku przyjmijmy, że to samo źródło zasila, z tą samą mocą $P = 100$ kW, rezystancyjny odbiornik jednofazowy, jak jest to pokazane, z wynikami analizy, na Rys. 5.



Rys. 5. Źródło pokazane na Rys. 4 zasilające odbiornik jednofazowy.

Przy takim obciążeniu, trójfazowa moc pozorna na zaciskach R, S, and T, zależnie od jej definicji, ma wartość

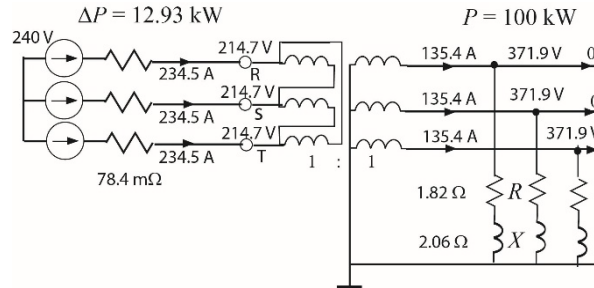
$$S_A = 115.4 \text{ kVA}, \quad S_G = 100 \text{ kVA}, \quad S_B = 151.1 \text{ kVA}.$$

zaś współczynnik mocy ma wartość

$$\lambda_A = \frac{P}{S_A} = 0.87, \quad \lambda_G = \frac{P}{S_G} = 1, \quad \lambda_B = \frac{P}{S_B} = 0.66.$$

Zauważmy, że niezrównoważenie odbiornika zwiększyło moc strat w źródle z $\Delta P = 5 \text{ kW}$ do $\Delta P = 12.93 \text{ kW}$, lecz nie ma to odbicia w wartości współczynnika mocy λ_G , obliczanego z użyciem geometrycznej definicji mocy pozornej. Zatem definicja geometryczna jest definicją błędną.

Ciągle jednak nie wiemy, która z definicji, arytmetyczna czy Buchholta prowadzi do poprawnej wartości współczynnika mocy. Aby to rozstrzygnąć, zbadajmy, przy jakim współczynniku mocy λ moc strat w źródle wzrasta do wartości $\Delta P = 12.93 \text{ kW}$. Aby współczynnik ten nie zależał od przyjętej definicji mocy pozornej, odbiornik musi być zrównoważony. Aby był on mniejszy od jedności, odbiornik ten, o mocy czynnej $P = 100 \text{ kW}$, nie może być czysto rezystancyjny, lecz reaktancyjno-rezystancyjny, powiedzmy, indukcyjno-rezystancyjny. Parametry takiego odbiornika zostały obliczone i obwód, z wynikami analizy, przedstawiony jest na Rys. 6.



Rys. 6. Obwód z odbiornikiem zrównoważonym RL, równoważny ze względu na straty w źródle odbiornikowi niezrównoważonemu, pokazanemu na Rys. 5.

Moc pozorna w takim obwodzie na zaciskach R, S, oraz T, niezależnie od jej definicji, ma wartość

$$S_A = S_G = S_B = 151.0 \text{ kVA}$$

zatem

$$\lambda_A = \lambda_G = \lambda_B = 0.66.$$

Tak więc, moc strat wewnętrznych w źródle jest oszacowana poprawnie, jeśli współczynnik mocy $\lambda = 0.66$. To nie jest wartość otrzymana przy wyborze w obwodzie z odbiornikiem niezrównoważonym, pokazanym na Rys. 5, definicji arytmetycznej, lecz definicji Buchholta. Definicja arytmetyczna prowadzi do błędnej wartości tego współczynnika. Jest więc błędna. Poprawną definicją trójfazowej mocy pozornej S jest definicja Buchholza (11). Niestety, definicja ta nie jest cytowana w Standardzie IEEE [14], ani w ostatnim Standardzie IEEE 1459-2025, [18].

5. MOC POZORNA W OBWODACH Z PRZEBIEGAMI ODKSZTAŁCONYMI

Pracując nad nową teorią mocy obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, autor tego artykułu doszedł do wniosku, że nie ma możliwości opracowania takiej teorii, korzystając z istniejących definicji mocy pozornej (9), (10) lub (11). Definicja arytmetyczna (9) sugeruje spełnianie przez moc pozorną zasady bilansu mocy,

gdyż moc ta dla całego obwodu trójfazowego jest jakoby sumą mocy pozornych jego faz, w sytuacji, gdy moc pozorna, będąc wielkością nieujemną, zasady bilansu mocy spełniać nie może. Definicja geometryczna (10) jest w istocie równaniem mocy, biorącym pod uwagę wyłącznie moc czynną P i moc bierną Q odbiornika, ignorującym wpływ niezrównoważenia na jego moc pozorną S .

Aby pokonać tę przeszkodę na drodze opracowania teorii mocy obwodów trójfazowych, przedstawionej w artykule [17], wprowadzona została nowa definicja trójfazowej mocy pozornej. Przede wszystkim, dla wektora trójfazowego prądu odbiornika

$$\mathbf{i} \stackrel{\text{df}}{=} \begin{bmatrix} i_R(t) \\ i_S(t) \\ i_T(t) \end{bmatrix} = \sum_{n \in N} \mathbf{i}_n = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} I_{Rn} \\ I_{Sn} \\ I_{Tn} \end{bmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (12)$$

gdzie N jest zbiorem rzędów harmonicznych prądu, zaś

$$I_{Ln} = I_{Ln} e^{j\beta_n} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T i_L(t) e^{-jn\omega_1 t} dt, \quad L = R, S, T \quad (13)$$

jest zespoloną wartością skuteczną harmonicznej prądu rzędu n , wprowadzono koncepcję “*wartości skutecznej wektora prądów*”, zdefiniowanej wzorem

$$\begin{aligned} \|\mathbf{i}\| &\stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^t \cdot \mathbf{i} dt} = \sqrt{\|i_R\|^2 + \|i_S\|^2 + \|i_T\|^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{n \in N} I_{Rn}^2 + \sum_{n \in N} I_{Sn}^2 + \sum_{n \in N} I_{Tn}^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Podobnie, dla wektora napięć przewodowych

$$\mathbf{u} \stackrel{\text{df}}{=} \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u_S(t) \\ u_T(t) \end{bmatrix} = \sum_{n \in M} \mathbf{u}_n = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n \in M} \begin{bmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{bmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (15)$$

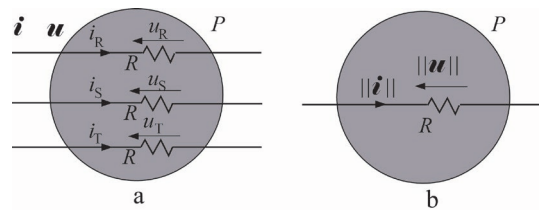
gdzie M jest zbiorem rzędów harmonicznych napięcia, zaś

$$U_{Ln} = U_{Ln} e^{j\beta_n} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T u_L(t) e^{-jn\omega_1 t} dt, \quad L = R, S, T. \quad (16)$$

wprowadzono koncepcję “*wartości skutecznej wektora napięć*”, zdefiniowanej wzorem

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}\| &\stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^t \cdot \mathbf{u} dt} = \sqrt{\|u_R\|^2 + \|u_S\|^2 + \|u_T\|^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{n \in M} U_{Rn}^2 + \sum_{n \in M} U_{Sn}^2 + \sum_{n \in M} U_{Tn}^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Wartość skuteczna wektora prądów $\|\mathbf{i}\|$ jest równa wartości skutecznej prądu I , który powoduje w odbiorniku jednofazowym o rezystancji R , pokazanym na Rys. 7(b), identyczne skutki cieplne jak wektor prądu $\mathbf{i}$ w zrównoważonym odbiorniku rezystancyjnym, pokazanym na Rys. 7(a), o rezystancjach fazowych R .



Rys. 7. Zrównoważony, rezystancyjny przyrząd trójfazowy (a) i równoważny mu ze względu na skutki cieplne, przyrząd jednofazowy (b).

Oba przyrządy na Rys. 7 mają tę samą moc czynną, gdyż

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (R i_R^2 + R i_S^2 + R i_T^2) dt = R \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^t \cdot \mathbf{i} dt = R \|\mathbf{i}\|^2 \quad (18)$$

Tak więc, trójfazowe wartości skuteczne $\|\mathbf{u}\|$, $\|\mathbf{i}\|$ są odpowiednikami ze względu na skutki cieplne wartościom skutecznym $\|u\|$, $\|i\|$. Ta równoważność pozostaje prawdziwa również dla przebiegów odkształconych prądów i napięć. Dlatego, trójfazową moc pozorną zdefiniowano w artykule [17] wzorem

$$S = S_C \stackrel{\text{df}}{=} \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{i}\|. \quad (19)$$

Łatwo zauważyć, że definicja ta dla obwodów trójfazowych z przebiegami sinusoidalnymi upraszcza się do definicji Buchholza (11).

6. WNIOSKI

Arytmetyczna i geometryczna definicja trójfazowej mocy pozornej, użyte do obliczania mocy pozornej w obwodach z odbiornikami niezerównoważonymi, prowadzą do błędnej wartości współczynnika mocy. Jest tak nawet w obwodach z przebiegami sinusoidalnymi. Poprawną wartość trójfazowej mocy pozornej i współczynnika mocy otrzymuje się, stosując definicję Buchholza. W obwodach z przebiegami odkształconymi poprawną wartość tej mocy i współczynnika mocy otrzymuje się, stosując definicję autora tego artykułu.

LITERATURA

- [1] A.E. Emanuel, "Apparent power and reactive power systems in three-phase, in search of physical meaning and better resolution", *Europ. Trans. on Electrical Power Eng. ETEP*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-14, 1993.
- [2] Z. Cekarski, A.E. Emanuel, "On the physical meaning of non-active powers in three-phase systems", *IEEE Trans. Eng. Rev.*, Vol. 19, No. 7, pp. 46-47, 1999.
- [3] L.S. Czarnecki, "Misinterpretations of some power properties of electric circuits," *IEEE Trans. on Pow. Del.*, Vol. 9, No. 4, pp. 1760-1770, 1994.
- [4] L.S. Czarnecki, "Could power properties of three-phase systems be described in terms of the Poynting Vector?" *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, 2006, pp. 339-344, 2006.
- [5] Ch.P., Steinmetz, "Is a phase-shift in the current of an electric arc?" (in German), *Elektrotechnische Zeitschrift*, Heft 42, 567-568, 1892.
- [6] C.I. Budeanu, "Puissances reactives et fictives", Institut Romain de l'Energie, Bucharest, 1927.
- [7] S. Fryze, "Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia", *Przegląd Elektrotechniczny*, Z. 7, 1931; Z. 8, Z. 22, 1932.
- [8] N.L. Kusters, W.J.M. Moore, "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions", *IEEE Trans. Pow. Appl. Syst.*, Vol. PAS-99, 1845-1854, 1980.
- [9] L.S. Czarnecki, L.S., "Ortogonalne składowe prądu odbiornika liniowego zasilanego ze źródła napięcia odkształconego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA Nr. 6, 1983.
- [10] L.S. Czarnecki: "Powers and Compensation in Circuits with Nonsinusoidal Currents", Oxford University Press, 2025.
- [11] Ch.P. Steinmetz, *Theory and calculation of electrical apparatus*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1917.
- [12] AIEE Committee on Apparent Power in Three-Phase Systems, *Trans. AIEE*, Vol. 39, pp. 1450-45, 1920.
- [13] H.L. Curtis, F.B. Silsbee, "Definitions of power and related quantities", *Trans. AIEE*, Vol. 54, pp. 394-404, 1935.
- [14] IEEE: *The New Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, 1992.
- [15] F. Buchholz, "Die Drehstrom-Scheinleistung bei ungleichmäßiger Belastung der drei Zweige", *Licht und Kraft*, No. 2, pp. 9-11, 1922.
- [16] L.S. Czarnecki, "Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality", *Archiv fur Elektrotechnik*, (82), No. 4, pp. 10-15, 1999.
- [17] L.S. Czarnecki, "Orthogonal decomposition of the current in a three-phase non-linear asymmetrical circuit with distorted voltage", *IEEE Trans. on IM*, Vol. IM-37, No. 1, 30-34, 1988.
- [18] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Power Quantities Under Sinusoidal, Distorted, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459-2025.