

Uwagi do artykułu

Możliwość przedstawienia jednolitej nowej koncepcji mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest dyskusja nad "jednolitą nową koncepcją mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu" przedstawioną w przez Prof. Adama Skopca i dr. inż. Czesława Steca w *Przeglądzie Elektrotechnicznym*, R. 84, Nr. 6/2008. Koncepcja ta dotyczy definiowania mocy biernej Budeanu w dziedzinie czasu. Moc ta została oryginalnie zdefiniowana w dziedzinie częstotliwości. W dyskusji tej zwraca się uwagę na to, że moc ta, a także moc odkształcenia Budeanu, błędnie interpretują zjawiska w obwodzie elektrycznym i po osiemdziesięciu latach od ich wprowadzenia nie mają one ani poznawczej ani technicznej wartości. W dyskusji tej pokazano też, że obecnie tylko dziedzina częstotliwościowa ujawnia wszystkie zjawiska energetyczne w obwodach elektrycznych.

Abstract. Discussion on "a uniform concept of reactive power of nonsinusoidal currents in a time-domain," by Prof. Adam Skopec and dr. inż. Czesław Stec, published in *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 84, Nr. 6/2008, is presented. The concept results in Budeanu reactive power definition in time-domain. Originally, it was defined in the frequency-domain. It is pointed out in this discussion that Budeanu reactive and distortion powers misinterpret power phenomena in electrical circuits and, after eighty years since the Budeanu reactive and distortion powers were introduced to electrical engineering, these two powers do not provide either cognitive or practical applications. It was also shown that presently, only the frequency-domain approach makes identification of power phenomena in electrical circuits possible. (**Discussion on "a uniform concept of reactive power of nonsinusoidal currents in a time-domain"**)

Słowa kluczowe: moc bierna, moc odkształcenia, moc rozrzutu, dziedzina czasu, dziedzina częstotliwości, teoria mocy CPC
Keywords: reactive power, distortion power, scattered power, time-domain, frequency-domain, CPC power theory.

Wstęp

Z uwagą przeczytałem artykuł [8] Prof. Adama Skopca i dr. inż. Czesława Steca, opublikowany w *Przeglądzie Elektrotechnicznym*, R. 84, Nr. 6/2008. Artykuł pokazuje, że podstawowe pojęcia teorii mocy, takie jak moc bierna, są ciągle przedmiotem badań naukowych. Z dużą przyjemnością śledziłem ścisłość i precyzję matematyczną wywodów. Nie mając najmniejszych nawet zastrzeżeń i wątpliwości co do matematycznej poprawności artykułu, chciałem podzielić się z Autorami i Czytelnikami tego artykułu, szeregiem refleksji dotyczących teorii mocy i w konsekwencji, pewnymi wnioskami dotyczącymi przedstawionej w artykule koncepcji. Czuję się do tego upoważniony jako twórca najbardziej obecnie kompletnej teorii mocy, Teorii Mocy Składowych Fizycznych Prądów, (ang.: Currents' Physical Components), znanej głównie pod angielską nazwą CPC Power Theory, w której to teorii moc bierna jest jedną z podstawowych wielkości energetycznych. Przedmiotem dysktowanego artykułu jest moc bierna, zdefiniowana pierwotnie przez C.I Budeanu, i jej miejsce w teorii mocy. Dlatego moje uwagi dotyczą właśnie mocy biernej Budeanu Q i związanej z nią mocy odkształcenia D .

Teoria mocy

Moc bierna, która jest głównym przedmiotem komentowanego przeze mnie artykułu, jest pojęciem teorii mocy obwodów elektrycznych. Termin "teoria mocy" pojawił się po raz pierwszy w pracy [4] Prof. Fryzego, dla określenia dziedziny elektrotechniki zajmującej się wyjaśnianiem i opisem zjawisk towarzyszących przepływowi energii w obwodach elektrycznych.

Teoria mocy rozwijana jest z motywów poznawczych: chcemy rozumieć świat, w którym żyjemy, w tym przypadku, świat zjawisk elektrycznych, i jako nauczyciele, objaśnić ten świat naszym studentom. Rozwija się ona także ze względów praktycznych: aby budować urządzenia do przesyłu energii, musimy umieć ten przepływ poprawnie opisać. Rozwija się ona także z przyczyn ekonomicznych: producent i użytkownik energii elektrycznej muszą mieć poprawne podstawy dla rozliczeń energetycznych. Tak więc, teoria mocy obwodów elektrycznych leży na styku fizyki, techniki i ekonomii.

Wtedy, gdy stworzono już podstawy analizy obwodów i opisano przepływ energii w polach elektrycznych, wydawało

się, że wiadomo już także wszystko o mocach. Jednak po obserwacji Steinmetza [1] w 1892, że w rezystancyjnym obwodzie z łukiem elektrycznym, podstawowe równanie mocy

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

nie jest spełnione, okazało się, że tak nie jest. Jakkolwiek mogło się wydawać, że modyfikacja tego równania tak, aby opisywało ono eksperyment Steinmetza nie powinna być szczególnie trudna, złożoność problemu przerasta oczekiwania.

Biorąc pod uwagę liczbę publikacji na temat właściwości energetycznych obwodów elektrycznych, zapewne przekraczającą tysiąc, i liczbę naukowców starających się te właściwości wyjaśnić i opisać, można uznać teorię mocy za jeden z najbardziej zawikłanych i kontrowersyjnych problemów elektrotechniki dwudziestego wieku.

Nie można się temu dziwić. Systemy energetyczne buduje się tylko po to, aby wytwarzać, przesyłać i rozdzielać energię elektryczną. Teoria mocy ma wyjaśniać i opisywać zjawiska energetyczne w takich systemach. Jest teoretycznym fundamentem przesyłu energii. Musi te zjawiska wyjaśniać i opisywać poprawnie.

Moc bierna

Centralną wielkością energetyczną w teorii mocy, po mocy czynnej P , jest moc bierna Q . Ponieważ pojęcie mocy czynnej i jej definicja nie budzą wątpliwości, badania nad teorią mocy skupiły się głównie na mocy biernej.

Produktem kilku generacji naukowców pracujących nad teorią mocy było wiele różnych definicji mocy biernej. Mówiąc ściślej, różnice nie dotyczyły sposobu definiowania mocy biernej, lecz raczej tego, jaka wielkość winna być uznana za moc bierną. Najbardziej znane są definicje mocy biernej według teorii mocy Budeanu, Fryzego, Shepherd'a i Zakikhani'ego, czy Kusters'a i Moore'a. Moce bierne w tych teoriach są to całkowicie wzajemnie różne obiekty matematyczne. Różnice te nie wynikają z rodzaju i jakości aparatu matematycznego użytego do ich definicji, lecz z opinii autorów odnośnie tego, jaka wielkość winna być uznana za moc bierną. Pod względem matematycznym wszystkie koncepcje mocy biernej są równie poprawne, jakkolwiek są różnice odnośnie ogólności przyjętych definicji.

Moc bierna według definicji Budeanu

Pierwszą definicję mocy biernej zaproponował Illović [2], lecz nie była ona jeszcze elementem szerszej koncepcji teorii mocy. Dopiero Budeanu w 1927r. zaproponował nowe równanie mocy i definicję mocy biernej Q oraz wprowadził do elektrotechniki pojęcie mocy odkształcenia D .

Mianowicie, wyrażając prąd i napięcie odbiornika jako sumę harmonicznych, Budeanu definiuje moc bierną

$$(2) \quad Q \triangleq \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n,$$

oraz moc odkształcenia

$$(3) \quad D \triangleq \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

Przy takich definicjach mocy biernej i odkształcenia, równanie mocy przyjmuje nową postać

$$(4) \quad S^2 = P^2 + Q^2 + D^2.$$

Wyjaśnia ono nierówność Steinmetza w obwodzie z łukiem elektrycznym obecnością w obwodzie mocy odkształcenia.

Moc bierna Q miała być, według Budeanu, miarą wpływu oscylacji energii między źródłem a odbiornikiem na moc pozorną źródła S , zaś moc odkształcenia D miała być miarą wpływu na nią, odkształcenia prądu względem napięcia.

Cztery lata później, w 1931r., konkurencyjną koncepcję teorii mocy oraz odmienną definicję mocy biernej, bez użycia szeregów Fouriera i harmonicznych, zaproponował Fryze [4].

Fizyczne interpretacje mocy w równaniu Budeanu, jak również to, że moc bierna Budeanu spełnia zasadę bilansu, przeważały szalę badań nad teorią mocy na korzyść teorii mocy Budeanu. Stała się ona podstawową wykładnią dla badań nad właściwościami energetycznymi obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, cytowaną w artykułach, podręcznikach i standartach.

Zasłużyła ona na tą rolę, niestety, nie dzięki swej wartości, lecz tylko dlatego, że nikt dostatecznie wcześniej nie wgłębił się w prawdziwość interpretacji fizycznych mocy Budeanu. Interpretacje fizyczne obu mocy są bowiem całkowicie błędne.

W artykułach [6] i [7] podane są przykłady obwodów pokazujące, że w obwodzie mogą istnieć oscylacje energii między źródłem a odbiornikiem, przy jednocześnie zerowej mocy biernej Q Budeanu. Nie ma więc ona związku z oscylacjami energii. W artykułach tych pokazane są też przykłady obwodów, w których prąd zasilania jest odkształcony względem napięcia, przy jednocześnie zerowej mocy odkształcenia D . Pokazane są też tam przykłady obwodów, w których prąd nie jest względem napięcia odkształcony, a jednocześnie moc odkształcenia jest różna od zera. Nie ma więc związku między odkształceniem przebiegów a mocą odkształcenia D .

Do chwili obecnej nie ujawniono w obwodach elektrycznych żadnych zjawisk fizycznych mających jakikolwiek związek z mocą bierną i z mocą odkształcenia Budeanu. Są to obiekty matematyczne, nie mające związku ze zjawiskami energetycznymi w obwodach elektrycznych. Moc odkształcenia D pojawiła się w wyniku błędnego zdefiniowania mocy biernej Q . Powstała luka w równaniu mocy, którą sztucznie wypełniono czymś, co Budeanu nazwał mocą odkształcenia.

Teoria mocy Budeanu nie ma więc nie tylko żadnych wartości poznawczych, lecz jeszcze narzuciła elektrotechnice, na wiele dziesięcioleci, błędne interpretacje zjawisk energetycznych.

Zostało to pokazane w moim artykule „What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Powers and Why it should be Abandoned” (IEEE Trans. on

Instrumentation and Measurement, 1987), [6], opublikowanym, niestety, dopiero w 60 lat po powstaniu teorii mocy Budeanu.

Teoria mocy winna też tworzyć podstawy dla konstrukcji kompensatorów poprawiających współczynnik mocy źródeł zasilających odbiorniki. Jednak wszystkie próby znalezienia struktury i parametrów kompensatora z pomocą teorii mocy Budeanu nie dały żadnych rezultatów. Przyczyna tego została wyjaśniona w artykułach [6] i [7]. Pokazałem tam, że nie ma związku między współczynnikiem mocy a mocą bierną Budeanu. Teoria mocy Budeanu jest więc zupełnie bezwartościowa, a wręcz szkodliwa, nie tylko z poznawczego punktu widzenia, lecz także z punktu widzenia projektowania urządzeń do poprawy współczynnika mocy czy rozliczeń energetycznych.

Dziedzina czasu a dziedzina częstotliwości

Budeanu zdefiniował moc bierną Q w dziedzinie częstotliwości i to wtedy, gdy harmoniczne, a w szczególności przesunięcie fazy harmonicznych prądu i napięcia, φ_n , były praktycznie poza zasięgiem możliwości pomiarowych. O ile filtry analogowe umożliwiały pomiar amplitud czy wartości skutecznych harmonicznych prądu i napięcia, to pomiar fazy z zadawalającą dokładnością był niezmiernie trudny. Ta sytuacja, a także to, że szeregi Fouriera mogą prowadzić w obwodach z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia do błędnych interpretacji zjawisk energetycznych, było źródłem poglądu Fryzego, że moce w takich układach nie powinny być definiowane w dziedzinie częstotliwości, lecz w dziedzinie czasu.

Pogląd, że właściwości energetyczne winny być opisywane w dziedzinie czasu zdominował badania nad teorią mocy na wiele lat, niestety, bez wychodzenia poza teorię Budeanu. W swej ostatniej, opublikowanej po śmierci pracy, [5] Prof. Fryze pokazał, że istotnie, moce Budeanu, oryginalnie zdefiniowane w dziedzinie częstotliwości, mogą być także zdefiniowane w dziedzinie czasu.

Pomimo pełnej, wynikającej z przekształceń Fouriera formalnej równoważności dziedziny czasu i dziedziny częstotliwości, wgląd jaki te dwie dziedziny dają we właściwości energetyczne obwodów jest głęboko różny.

W szczególności, pokazanie, że moc bierna i odkształcenia Budeanu nie mają sensu fizycznego było możliwe w dziedzinie częstotliwości. Równoważny dowód tego w dziedzinie czasu nie jest znany.

Wyczuwalny niekiedy w dyskusjach nad teorią mocy pogląd o wyższości dziedziny czasowej nad dziedziną częstotliwości nie jest uzasadniony. Jedynie procedury sterowania kompensatorów mogą być obliczeniowo dłuższe wtedy, gdy algorytm sterowania wymaga analizy harmonicznej.

Podstawowe właściwości energetyczne obwodów elektrycznych zostały ujawnione w dziedzinie częstotliwości. Nie wiadomo obecnie, czy jest to możliwe w dziedzinie czasu.

Moce odbiornika jednofazowego w teorii mocy CPC

W teorii mocy CPC, [9] prąd zasilania jednofazowego, czasowo-niezmienniczego odbiornika liniowego, o admittancji dla częstotliwości harmonicznych

$$(5) \quad Y_n = G_n + jB_n,$$

jest sumą prądu czynnego, prądu rozrzutu i prądu biernego,

$$(6) \quad i = i_a + i_s + i_r.$$

Prąd i_a jest prądem czynnym według definicji Fryzego. Jeśli napięcie odbiornika ma szereg Fouriera

$$(7) \quad u = U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n \in N} U_n e^{jn\omega t},$$

to prąd rozrzutu i prąd bierny są zdefiniowane wzorami

$$(8) \quad i_s \triangleq (G_0 - G_e)U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n \in N} (G_n - G_e) U_n e^{jn\omega t},$$

$$(9) \quad i_r \triangleq \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n \in N} jB_n U_n e^{jn\omega t},$$

gdzie G_e oznacza równoważną konduktancję odbiornika,

$$(10) \quad G_e = \frac{P}{\|u\|^2}.$$

Prąd bierny i prąd rozrzutu związane są z istnieniem w obwodzie obserwowalnych zjawisk. Prąd bierny pojawia się w prądzie zasilania wtedy, gdy harmoniczne prądu są przesunięte fazowo względem harmonicznych napięcia. Prąd rozrzutu pojawia się w prądzie zasilania wtedy, gdy konduktancja odbiornika G_n zmienia się z częstotliwością.

Wartości skuteczne tych prądów są odpowiednio równe

$$(11) \quad \|i_a\| = G_e \|u\| = \frac{P}{\|u\|},$$

$$(12) \quad \|i_s\| = \sqrt{\sum_{n \in N_0} (G_n - G_e)^2 U_n^2},$$

$$(13) \quad \|i_r\| = \sqrt{\sum_{n \in N} B_n^2 U_n^2} = \sqrt{\sum_{n \in N} \left(\frac{Q_n}{U_n}\right)^2},$$

i są w sposób wyraźny określone parametrami odbiornika i napięciem zasilania

Te dwa zjawiska fizyczne powiększają wartość skuteczną prądu zasilania, gdyż prąd czynny, rozrzutu oraz prąd bierny są wzajemnie ortogonalne, a więc ich wartości skuteczne spełniają relację

$$(14) \quad \|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_r\|^2,$$

prowadzącą bezpośrednio do równania mocy

$$(15) \quad S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2,$$

gdzie

$$(16) \quad S \triangleq \|u\| \|i\|, \quad P \triangleq \|u\| \|i_a\|,$$

$$D_s \triangleq \|u\| \|i_s\|, \quad Q \triangleq \|u\| \|i_r\|.$$

Przesunięcie fazowe harmonicznych oraz zmiana konduktancji odbiornika z częstotliwością, powodujące szkodliwy wzrost wartości skutecznej prądu zasilania, są zjawiskami obserwowalnymi bezpośrednio w dziedzinie częstotliwości. Czy można te zjawiska zidentyfikować w dziedzinie czasu i w dziedzinie czasu wyodrębnić prąd rozrzutu i prąd bierny? Na to pytanie nie mamy odpowiedzi.

Wynika z tego, że dziedzina częstotliwości dostarcza skuteczniejszych narzędzi do wyjaśniania zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych niż dziedzina czasu. Warto też dodać, że jeśli odbiornik, z powodu nieliniowości lub okresowej zmienności parametrów, powoduje odkształcenie prądu zasilania, to pojawia się w nim dodatkowy składnik, który najwygodniej opisywać z pomocą harmonicznych, a więc także w dziedzinie częstotliwości.

Podział prądu zasilania na opisane powyżej składniki ma znaczenie nie tylko poznawcze. Umożliwił on także stworzenie podstaw poprawy współczynnika mocy w warunkach zasilania napięciem niesinusoidalnym. Mianowicie, prąd bierny jest całkowicie kompensowalny kompensatorem reaktancyjnym, prąd rozrzutu jest prądem niekompensowalnym takim kompensatorem, zaś prąd harmoniczny generowany w odbiorniku może być redukowany filtrem rezonansowym. Trzeba też pamiętać o tym, że synteza kompensatorów reaktancyjnych czy filtrów rezonansowych oparta jest na metodach częstotliwościowych a nie czasowych.

Nowa koncepcja mocy biernej w dziedzinie czasu

Biorąc pod uwagę obecny stan rozwoju teorii mocy, przedstawiona w artykule [8] nowa koncepcja mocy biernej w dziedzinie czasu, nie wnosi, niestety, niczego nowego. Jest raczej powrotem do tego okresu teorii mocy, w którym niemal niepodzielnie królowała teoria mocy Budeanu, sprowadzając na manowce badania nad właściwościami energetycznymi obwodów i ich kompensacją.

Nie ma znaczenia, czy moc bierna Budeanu Q zdefiniowana jest w dziedzinie czasu, czy w dziedzinie częstotliwości. Niezależnie od dziedziny, ma ona dokładnie te same właściwości, to znaczy nie odnosi się do jakiegokolwiek zjawiska w obwodzie elektrycznym. To samo dotyczy mocy odkształcenia D .

W ciągu 80 przeszło lat, które minęły od wprowadzenia tych dwóch wielkości do elektrotechniki, nie wskazano też żadnego technicznego zastosowania tych wielkości w projektowaniu kompensatorów lub w rozliczeniach energetycznych.

Prądy i_b oraz i_d w proponowanym przez Autorów rozkładzie (24), z którego wynika następnie równanie mocy (34), nawet jeśli są wzajemnie ortogonalne, nie są wynikiem istnienia jakiegokolwiek zjawiska fizycznego w obwodach elektrycznych. Ich wprowadzenie miałyby sens, gdyby udało się Autorom takie zjawiska ujawnić. Wydaje się to jednak niezmiernie mało prawdopodobne, gdyż już teoria mocy CPC ujawnia wszystkie zjawiska odpowiedzialne za wzrost wartości skutecznej prądu, a prądy i_b oraz i_d z tymi zjawiskami niczego wspólnego nie mają.

Wnioski

Nie wydaje się, aby proponowana w artykule [8] jednolita koncepcja mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu wносиła cokolwiek do teorii mocy, gdyż koncepcja ta dotyczy tylko matematycznej postaci mocy, wprowadzonej do elektrotechniki przed osiemdziesięciu laty, w którym to okresie nie ujawniono ani jej fizycznego sensu ani technicznego zastosowania.

LITERATURA

1. P.Ch. Steinmetz, (1892) *Is a phase-shift in the current of an electric arc?* Elektrotechnische Zeitschrift, Heft 42, s. 567-568.
2. M.A. Illović, (1925), *Definition et mesure de la puissance et de l'énergie réactives*, Bull. Soc. Franc. Electriciens.
3. C.I. Budeanu, (1927) *Reactive and apparent powers*, Institut Romain de l'Energie, Bucharest.
4. S. Fryze, (1931) *Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, z. 7, 193-203, z. 8, 225-234, 1931, (1932): z. 22, 673-676.
5. S. Fryze, (1985), *Teoretyczne i fizyczne podstawy definicji mocy czynnej, biernej i pozornej w niesymetrycznych układach wielofazowych o odkształconych przebiegach napięć i prądów*, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka, No. 100, 29-46. Publikacja pośmiertna.
6. L.S. Czarnecki, (1987), *What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned*, IEEE Trans. on Inst. Meas., Vol. IM-36, No. 3, s. 834-837.
7. L.S. Czarnecki, (1997) *Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents*, Archiv fur Elektrot., (81), N. 2, s. 5-15.
8. A. Skopec, C. Stec, (2008) *Możliwość przedstawienia jednolitej nowej koncepcji mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu*, Przegląd Elektrotechniczny, R84, No. 6, s. 69-74.
9. L.S. Czarnecki, (2008), *Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental for power theory*, Przegląd Elektrotechniczny, R84, No. 6, s. 28-37.

Autor: prof. dr hab. Inż. Leszek S. Czarnecki, Fellow IEEE, Alfredo M. Lopez Distinguished Professor, Electrical and Computer Eng. Dept., Louisiana State University, 824 Louray Dr., Baton Rouge, LA 70808, E-mail: lsczar@cox.net, Web Page: www.lsczar.info