AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

This is the translation from the original text published on pp. 6-19.

prof. dr hab. inż. Leszek S. CZARNECKI
Life Fellow IEEE, Alfredo M. Lopez Distinguished Professor, Louisiana State University, USA, e-mail: lsczar@cox.net

s. 20–32

Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi i niesymetrycznymi przebiegami prądu i napięcia

Część 10. Historia rozwoju teorii składowych fizycznych prądów (CPC)

Powers and Compensation in Systems with Nonsinusoidal Voltages and Currents
Part 10. Development history of the Currents' Physical Components (CPC) - based power theory

Abstract: *Currents' Physical Components (CPC) – based power theory of electrical systems with nonsinusoidal and asymmetrical voltages and currents is a theory which explains power related physical phenomena that contribute to reduction of effectiveness of the energy transfer in distribution systems. It was developed in parallel to other attempts aimed at explanation and description of power properties of electrical circuits and it is currently the most advanced concept of the power theory. This paper puts the development of the CPC in a broader context of the power theory development. It also summarizes contribution of various schools of power theory to its development.*

Streszczenie: *Teoria składowych fizycznych prądów (ang.: currents' physical components – CPC) i oparta na niej teoria mocy obwodów z niesinusoidalnymi i niesymetrycznymi przebiegami prądów i napięć stanowią teorię mocy, która wyjaśnia zjawiska fizyczne redukujące skuteczność przesyłu energii w systemach rozdzielczych. Powstawała ona równolegle do innych prób opisu właściwości energetycznych obwodów elektrycznych i jest obecnie najbardziej zaawansowaną koncepcją teorii mocy. Niniejszy artykuł osadza teorię składowych fizycznych prądów w szerszym kontekście rozwoju teorii mocy. Podsumowuje on także wkład różnych szkół w rozwój teorii mocy obwodów elektrycznych.*

Keywords: *power theory, compensation, nonsinusoidal voltages*

Słowa kluczowe: *teoria mocy, compensacja, niesinusoidalne prądy*

1. WPROWADZENIE

Koncepcja składowych fizycznych prądów (ang.: *currents' physical components – CPC*) powstawała jako odpowiedź na pytanie: **dlaczego moc pozorna S odbiornika może być większa od jego mocy czynnej P?** Pytanie to, o charakterze poznawczym, jest jednym z podstawowych pytań elektrotechniki. Teoria mocy oparta na CPC jest pierwszą teorią mocy, która udziela pełnej, opartej na fizycznych podstawach odpowiedzi na powyższe pytanie. Fryze [9] pokazał, że pytanie to należy formułować raczej w odniesieniu do prądu zasilania odbiornika, mianowicie: **Dlaczego wartość skuteczna prądu zasilania może być większa od wartości skutecznej niezbędnej do tego, aby miał on moc czynną P?** Przeformatowaniem tego pytania i wyodrębnieniem z prądu odbiornika składowej nazwanej prądem czynnym, $i_a(t)$, Fryze uczynił pierwszy krok w kierunku rozwoju teorii składowych fizycznych prądów. Prąd czynny jest jednym z siedmiu składowych fizycznych prądów i opartej na tym rozkładzie teorii mocy obwodów elektrycznych.

Koncepcja składowych fizycznych prądów i oparta na niej teoria mocy stanowią obecnie najbardziej zaawansowane narzędziem pozwalającym opisywać i wyjaśniać zjawiska fizyczne towarzyszące przesyłowi energii elektrycznej w systemach rozdzielczych, a przede wszystkim, przyczyny obniżające skuteczność tego przesyłu. Jest też ona narzędziem do projektowania kompensatorów reaktancyjnych i sterowania kompensatorów kluczujących, pozwalających skuteczność tę poprawić poprzez kompensację wybranych składowych fizycznych prądów zasilających odbiorników energii.

Na rozwój teorii mocy opartej na koncepcji składowych fizycznych prądu złożyło się wiele badań i wyników, publikowanych w ciągu kilku dziesięcioleci. Wielu naukowców przyczyniło się do jej rozwoju. Jednymi z najważniejszych dla rozwoju teorii mocy były prace Profesora Politechniki Lwowskiej, Stanisława Fryzego, opublikowane w 1931 r. w języku polskim [9] i w 1932 r. w języku niemieckim. Warto też pamiętać [37], że sam termin

„teoria mocy" pojawił się w elektrotechnice po raz pierwszy w pracach Fryzego. Jego wkład w rozwój teorii mocy został omówiony w artykułach [41, 57].

Niniejszy artykuł osadza teorię mocy opartą na koncepcji CPC, bez wchodzenia w jej szczegóły, w szerszym kontekście rozwoju teorii mocy. Szczegóły można znaleźć w poprzednich artykułach tego cyklu, publikowanych w niniejszym czasopiśmie [56, 58, 59, 60, 63, 64, 66, 67].

2. SKŁADOWE FIZYCZNE PRĄDÓW

Istotą koncepcji składowych fizycznych prądów jest wyodrębnienie z prądu zasilania odbiornika prądów stowarzyszonych z konkretnymi zjawiskami lub właściwościami odbiornika. Prądy te nazwano składowymi fizycznymi prądów. Liczba mnoga („prądów") została użyta ze względu na układy trójfazowe, zasilane przez trzy prądy liniowe. W obwodach jednofazowych właściwszy jest termin „składowe fizyczne prądu".

W obwodach jednofazowych prąd zasilania ma cztery składowe fizyczne

$$i(t) = i_{\mathrm{Ca}}(t) + i_{\mathrm{Cr}}(t) + i_{\mathrm{Cs}}(t) + i_{\mathrm{G}}(t). \tag{1}$$

Indeks „*C*" w powyższych symbolach prądów oznacza, że prądy te mogą mieć tylko te harmoniczne, dla których moc czynna

$$P_n = U_n I_n \cos\varphi_n > 0 \ , \tag{2}$$

jest dodatnia, co oznacza, że przenoszą one energię ze źródła zasilania do odbiornika. Harmoniczne przenoszące energię w przeciwnym kierunku – z odbiornika do źródła – nie mogą być harmonicznymi prądów z indeksem „*C*". Są one harmonicznymi prądu z indeksem „*G*".

Każdy z tych czterech prądów towarzyszy pewnemu, konkretnemu zjawisku fizycznemu w odbiorniku i może być zidentyfikowany przez pomiar prądów i napięć na zaciskach zasilania odbiornika, bez znajomości jego struktury i parametrów. Są to:

- **Prąd czynny** $i_{Ca}(t)$ identyczny w identyczny w obwodach liniowych czasowo niezmienniczych (LTI) z prądem czynnym $i_a(t)$ wyodrębnionym z prądu zasilania odbiorników jednofazowych przez Fryzego [9]. Jest to składowa prądu stowarzyszona ze zjawiskiem trwałego przesyłu energii ze źródła zasilania do odbiornika. Z punktu widzenia potrzeb przesyłu energii jest to najważniejszy, niezbędny składnik prądu zasilania. Pozostałe składowe fizyczne nie przenoszą energii w sposób trwały, powiększając jedynie prądowe obciążenie źródła zasilania. Są to zatem szkodliwe składowe prądu odbiornika.
- **Prąd bierny** $i_{Cx}(t)$ identyczny w obwodach LTI z prądem biernym $i_r(t)$ wyodrębnionym z prądu zasilania odbiorników jednofazowych przez Shepherda i Zakihaniego [18]. Jest to składowa prądu powiązana ze zjawiskiem przesunięcia fazowego między harmonicznymi prądu i napięcia zasilania odbiornika.
- **Prąd rozrzutu** $i_{Cs}(t)$ identyczny w obwodach LTI z prądem rozrzutu $i_s(t)$ wyodrębnionym z prądu zasilania odbiorników jednofazowych przez Czarneckiego [23, 56]. Jest to składowa prądu, która towarzyszy zjawisku zmiany konduktancji odbiornika z częstotliwością harmonicznych napięcia zasilania odbiornika.
- **Prąd generowany** $i_G(t)$ wyodrębniony z prądu zasilania odbiorników jednofazowych przez Czarneckiego [31, 58]. Jest to składowa prądu stowarzyszona ze zjawiskiem przesyłu energii z odbiornika do źródła zasilania przez harmoniczne prądu generowane w odbiorniku wskutek jego nieliniowości lub okresowej zmiany parametrów z okresem napięcia zasilającego.

Rozkład (1) może być uogólniony na obwody trójfazowe, zarówno trójprzewodowe [28, 59], jak i czteroprzewodowe [63–68]. Na przykład jeśli prądy liniowe odbiornika trójfazowego uporządkuje się w wektor trójfazowy

$$\boldsymbol{i}(t) = \begin{bmatrix} i_{\mathrm{R}}(t) \\ i_{\mathrm{S}}(t) \\ i_{\mathrm{T}}(t) \end{bmatrix} , \tag{3}$$

to taki wektor prądów może być rozłożony na siedem składowych fizycznych, mianowicie:

$$\boldsymbol{i}(t) = \boldsymbol{i}_{\mathrm{Ca}}(t) + \boldsymbol{i}_{\mathrm{Cr}}(t) + \boldsymbol{i}_{\mathrm{Cs}}(t) + \boldsymbol{i}_{\mathrm{G}}(t) + \boldsymbol{i}^{\mathrm{n}}_{\mathrm{Cu}}(t) + \boldsymbol{i}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{Cu}}(t) + \boldsymbol{i}^{\mathrm{z}}_{\mathrm{Cu}}(t). \tag{4}$$

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

Prąd czynny, bierny, rozrzutu oraz prąd generowany $\boldsymbol{i}_{Ca}(t)$, $\boldsymbol{i}_{Cr}(t)$, $\boldsymbol{i}_{Cs}(t)$ *oraz* $\boldsymbol{i}_{G}(t)$ zachowują w obwodach trójfazowych taką samą interpretację, jaką miały w obwodach jednofazowych. Pojawiają się natomiast trzy nowe składowe fizyczne prądów [28, 59, 63, 68, 70], mianowicie:

- **Prąd niezrównoważenia kolejności ujemnej** $\boldsymbol{i}^{\mathrm{n}}_{\mathrm{Cu}}(t)$ powiązany ze zjawiskiem asymetrii prądowej powodowanej niezrównoważeniem odbiornika zasilanego trójprzewodowo napięciem symetrycznym kolejności dodatniej.
- **Prąd niezrównoważenia kolejności dodatniej** $\boldsymbol{i}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{Cu}}(t)$ towarzyszący zjawisku asymetrii prądowej powodowanej niezrównoważeniem odbiornika zasilanego trójprzewodowo napięciem niesymetrycznym.
- **Prąd niezrównoważenia kolejności zerowej** $\boldsymbol{i}^{\mathrm{z}}_{\mathrm{Cu}}(t)$ powiązany ze zjawiskiem asymetrii prądowej powodowanej niezrównoważeniem odbiornika zasilanego czteroprzewodowo.

Te trzy ostatnie prądy nie są składowymi pewnego prądu niezrównoważenia, lecz prądami pojawiającymi się w odmiennych sytuacjach obwodowych.

Jedną z najważniejszych właściwości składowych fizycznych prądów jest sposób ich oddziaływania na wartość skuteczną prądu zasilania. Każdy z nich powiększa trójfazową wartość skuteczną tego prądu, niezależnie od pozostałych składowych fizycznych, mianowicie:

$$\|\boldsymbol{i}\| = \sqrt{\|\boldsymbol{i}_{\mathrm{Ca}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}_{\mathrm{Cr}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}_{\mathrm{Cs}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}_{\mathrm{G}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}^{\mathrm{n}}_{\mathrm{Cu}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{Cu}}\|^2 + \|\boldsymbol{i}^{\mathrm{z}}_{\mathrm{Cu}}\|^2} \ . \tag{5}$$

Dzieje się tak dzięki wzajemnej ortogonalności wszystkich CPC. Z właściwości (5) wynika bezpośrednio równanie mocy obwodów

$$S^2 = P_{\mathrm{C}}^2 + Q_{\mathrm{C}}^2 + D_{\mathrm{Cs}}^2 + D_{\mathrm{G}}^2 + D_{\mathrm{Cu}}^{\mathrm{n}2} + D_{\mathrm{Cu}}^{\mathrm{p}2} + D_{\mathrm{Cu}}^{\mathrm{z}2} \ . \tag{6}$$

W równaniu tym moc czynna, oznaczona przez P_C, jest mniejsza od konwencjonalnej mocy czynnej P o moc czynną generowaną P_G, mianowicie:

$$P_{\mathrm{C}} = P - P_{\mathrm{G}} \ . \tag{7}$$

Moc czynna generowana P_G stanowi ujemną sumę mocy czynnych P_n tych harmonicznych, dla których moc ta ma wartość ujemną, a więc energia przenoszona jest z odbiornika do źródła zasilania.

3. SZKOŁY TEORII MOCY

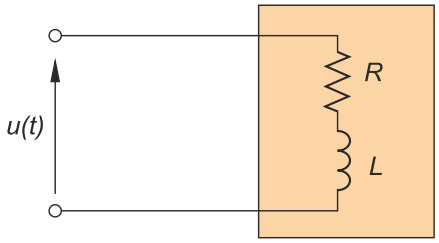
Teoria mocy oparta na koncepcji CPC powstawała w warunkach, gdy istniały już dobrze ugruntowane inne koncepcje teorii mocy, wsparte normami i standardami [17, 21, 42] lub były też tworzone nowe [46]. Było więc rzeczą niezbędną wykazanie, że koncepcja CPC poprawniej interpretuje zjawiska energetyczne w obwodach elektrycznych niż inne, konkurencyjne koncepcje teorii mocy. Dlatego też rozwój koncepcji CPC był przeplatany krytyczną analizą innych teorii. Analiza ta pokazała, że w obecności odkształceń przebiegów prądów i napięć oraz ich asymetrii większość teorii mocy błędnie interpretuje zjawiska energetyczne w obwodach oraz nie tworzy poprawnych podstaw kompensacji.

Rozwój teorii mocy zapoczątkowała w 1892 r. [1] obserwacja Steinmetza. Stwierdził on że równanie mocy $P^2 + Q^2 = S^2$ w obwodzie z lampą łukową nie jest spełnione. Pojawiły się pytania odnośnie do sposobu definiowania mocy biernej oraz zwiazane z postacią równania mocy. Te pozornie proste pytania okazały się wyjątkowo trudne. Różne próby odpowiedzi na te pytania trwają do dziś. Liczba poświęconych temu problemowi artykułów przekracza zapewne tysiąc. Nie można się temu dziwić, gdyż pytanie: **dlaczego odbiornik o określonej mocy czynnej P może wymagać zasilania z mocą pozorną S, większą od mocy czynnej P,** stanowi bardzo podstawowe pytanie elektrotechniki. Z tym pytaniem, o charakterze poznawczym, wiąże się następne, o charakterze ekonomicznym: **jak można zmniejszać różnicę między tymi dwiema mocami?** Poprawna odpowiedź na nie jest ważna z punktu widzenia kompensacji i poprawy współczynnika mocy.

Pojawiło się wiele odpowiedzi. Naukowcy zaangażowani w badania nad teorią mocy podzielili się na szereg szkół skupionych wokół pewnych dominujących koncepcji. W ten sposób powstały teoria mocy Budeanu [7], teoria mocy Fryzego [9], teoria mocy Shepherda i Zakikhaniego [18], teoria mocy Kustersa i Moora [20], koncepcja CPC Czarneckiego [23], metoda FBD Depenbrocka [34], teoria chwilowej mocy biernej p-q Akagiego i Nabae'a [24],

konserwatywna teoria mocy (CPT) Tentiego [46]. Powstał też szereg koncepcji niedających się zakwalifikować do żadnej z powyższych szkół [15, 16, 19, 30, 36, 43, 45, 49, 50], lecz mające wpływ na rozwój teorii mocy i nasze obecne zrozumienie zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych. Pewne koncepcje zostały poparte normami czy standartami, są treścią wykładów akademickich, publikowane w artykułach i książkach.

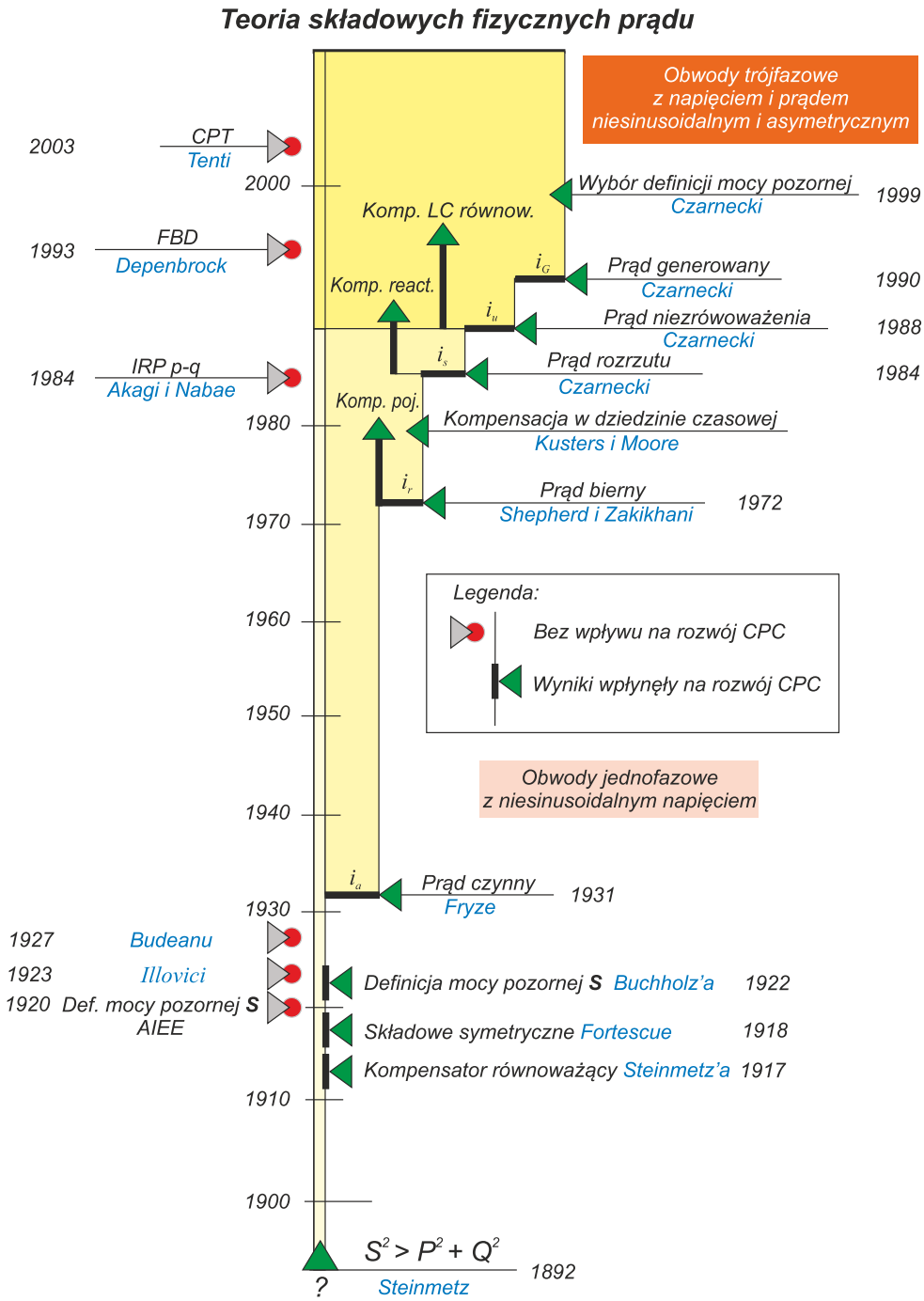
Niestety, pomimo tego wysiłku badawczego, aż do 1984 r. teorie mocy nie były w stanie wyjaśnić zjawisk energetycznych przy niesinusoidalnym napięciu zasilania w tak prostym i powszechnie spotykanym obwodzie, jak obwód pokazany na rysunku 1, z szeregowo połączonymi rezystorem i cewką.



Rys. 1. Odbiornik RL
Fig. 1. RL load

Nie potrafiono też obliczać parametrów kompensatora poprawiającego współczynnik mocy λ, ani nie wiedziano, czy w nawet tak prostym obwodzie można poprawić współczynnik mocy λ do jedności. Problem ten został rozwiązany [23, 32, 56] dopiero w ramach teorii mocy opartej na koncepcji składowych fizycznych prądu.

Rozwój teorii mocy opartej na koncepcji CPC jest zilustrowany, na tle innych koncepcji teorii mocy, na rysunku 2. Na ilustrującym ten rozwój diagramie pokazane są lata, w których pojawiały się w teorii mocy nowe koncepcje, a także ich oddziaływanie na rozwój koncepcji CPC.



Rys. 2. Diagram ilustrujący rozwój teorii mocy opartej na CPC na tle innych badań nad teorią mocy

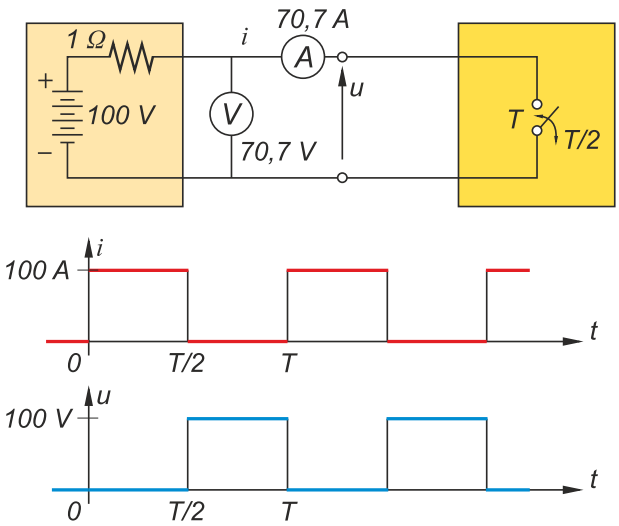
Fig. 2. Diagram of the CPC – based power theory development as referred to other power theories development

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

4. DZIEDZINA CZASOWA I DZIEDZINA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

W ciągu całej historii rozwoju teorii mocy konkurowały ze sobą dwa poglądy, co do dziedziny, w której należy opisywać właściwości energetyczne obwodów. Pierwsza teoria mocy, zaproponowana przez Budeanu [7], sformułowana została w dziedzinie częstotliwościowej, to znaczy z użyciem koncepcji harmonicznych. Fryze uważał, że harmoniczne fizycznie nie istnieją, że są jedynie obiektami matematycznymi, a zatem w opisie tak ważnego zjawiska, jakim jest przepływ energii, harmonicznych nie powinno się stosować. Nie bez znaczenia jest także pomiarowa dostępność harmonicznych prądu i napięcia. W czasach Budeanu i Fryzego, przed pojawieniem się metod cyfrowej obróbki sygnałów, tylko wartość skuteczna harmonicznych była (z pomocą filtrów analogowych) pomiarowo dostępna. Ich faza była niemal poza możliwością pomiaru. Obecnie powszechnie dostępne mierniki cyfrowe mierzą/obliczają zarówno wartość skuteczną, jak i fazę harmonicznych, to jest ich zespoloną wartość skuteczną.

Fryze uważał [9, 25], że przepływ energii powinien być opisywany wyłącznie w dziedzinie czasowej. Poparł tę opinię [9] wnioskami z analizy przepływu energii w obwodzie pokazanym na rysunku 3. W obwodzie tym, zasilanym ze źródła prądu stałego, odbiornikiem jest okresowy przełącznik.



Rys. 3. Obwód z okresowym przełącznikiem
Fig. 3. A circuit with a periodic switch

Prąd i napięcie na zaciskach takiego odbiornika mogą być przedstawione w postaci szeregów Fouriera

$$u(t) = U_0 + \sqrt{2}\sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n \ , \tag{8}$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2}\sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_1 t + \beta_n) = \sum_{n=0}^{\infty} i_n \ . \tag{9}$$

Moc chwilowa odbiornika, czyli prędkość przepływu energii $W(t)$ między źródłem zasilania a odbiornikiem, jest iloczynem prądu i napięcia odbiornika, czyli

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t)\,i(t) = \sum_{r=0}^{\infty} u_r \sum_{s=0}^{\infty} i_s = \sum_{n=0}^{\infty} S_n \cos(n\omega_1 t + \psi_n) \ , \tag{10}$$

Posługując się więc harmonicznymi, to znaczy w dziedzinie częstotliwościowej, niewiele można powiedzieć o przepływie energii w takim obwodzie. Natomiast w dziedzinie czasowej jest od razu widoczne, że poza punktami nieciągłości

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t)\,i(t) = 0 \ , \tag{11}$$

przepływu energii w tym obwodzie po prostu nie ma. Dziedzina czasowa ma zatem wg Fryzego zdecydowaną przewagę nad dziedziną częstotliwości.

Pomimo takiej opinii teorię mocy opartą na CPC sformułowano w dziedzinie częstotliwościowej dla dwóch przyczyn. Prąd bierny:

$$i_{\mathrm{r}}(t) \overset{\mathrm{df}}{=} \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_{n\in N} jB_n \boldsymbol{U}_n e^{jn\omega_1 t} \ , \tag{12}$$

ma interpretację fizyczną, jako prąd pojawiający się w wyniku przesunięcia fazowego między harmonicznymi prądu i napięcia. Stanowi ona wyjaśnienie w dziedzinie częstotliwościowej i stosuje się ją wtedy, gdy nie jest znana interpretacja tego prąduw dziedzinie czasowej. Prąd rozrzutu:

$$i_{\mathrm{s}}(t) \overset{\mathrm{df}}{=} (G_0 - G_{\mathrm{e}})U_0 + \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\sum_{n\in N} (G_n - G_{\mathrm{e}})\boldsymbol{U}_n e^{jn\omega_1 t} \ , \tag{13}$$

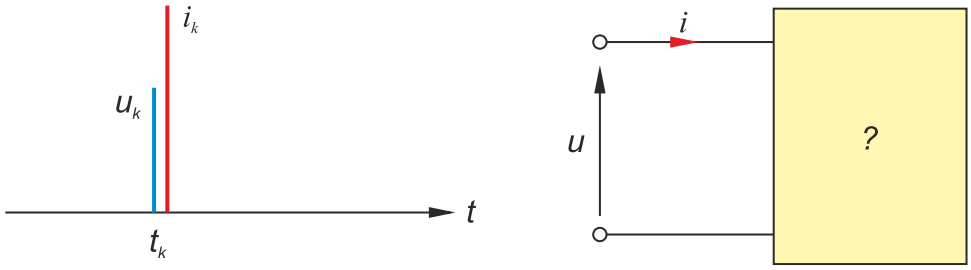
którego wykrycie [23] pozwoliło zidentyfikować wszystkie zjawiska w obwodach LTI odpowiedzialne za wartość współczynnika mocy, ma interpretację tylko w dziedzinie częstotliwości. Prąd ten pojawia się z powodu zmiany konduktancji odbiornika G_n z częstotliwością harmonicznych. Zjawisko fizyczne, jakie stanowi ta zmiana, zwiększa prąd zasilania odbiornika i jest łatwo wyjaśnialne w dziedzinie częstotliwości. Nie wydaje się prawdopodobne, aby można je było wyjaśnić w dziedzinie czasowej, nie posługując się pojęciem częstotliwości.

5. PODEJŚCIE CHWILOWE I UŚREDNIAJĄCE

Badaczy właściwości energetycznych obwodów elektrycznych nurtowało też pytanie, czy moce należy definiować jako wielkości chwilowe, czy jako wielkości uśrednione w okresie zmienności prądów i napięć.

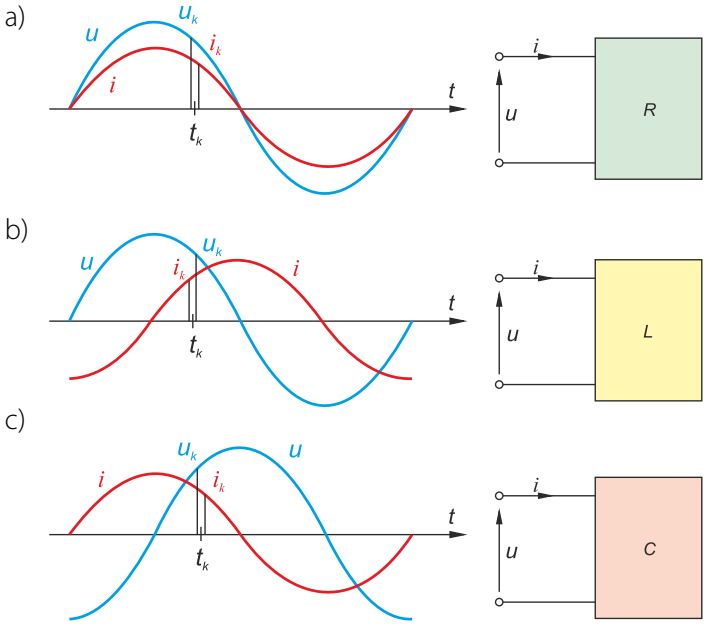
Najbardziej podstawowa wielkość energetyczna: prędkość przepływu energii ze źródła do odbiornika, czyli moc chwilowa $p(t) = dW(t)/dt = u(t)\ i(t)$, jest zdefiniowana jako wielkość chwilowa. Czy zatem teoria mocy nie powinna być zbudowana na mocach chwilowych? Wyrazem takiego poglądu było opracowanie [24] teorii chwilowej mocy biernej p-q (*ang. instantaneous reactive power* p-q *theory*) przez Nabae'a, Kanazawę i Akagiego w 1984 r.

Pojawia się jednak pytanie: **Czy właściwości energetyczne odbiornika mogą być określone momentalnie, gdy obserwuje się tylko jedną parę próbek prądu i napięcia, tak jak to ilustruje rysunek 4?**



Rys. 4. Nieznany odbiornik i para próbek napięcia i prądu na jego zaciskach
Fig. 4. Unknown load and a pair of voltage-current samples at its terminal.

Oczywiście nie jest to możliwe. Jak to ilustruje rysunek 5, identyczną parę próbek prądu i napięcia można zaobserwować na zaciskach rezystora, induktora i kondensatora.



Rys. 5. Trzy różne odbiorniki mogące mieć identyczne pary próbek prądu i napięcia
Fig. 5. Three different loads with identical pairs of the voltage-current samples.

Ogólnie istnieje nieskończenie wiele wzajemnie różnych odbiorników mających identyczne próbki prądu i napięcia. Nie da się wyciągać wniosków co do właściwości energetycznych odbiornika bez obserwacji tych próbek w ciągu całego okresu zmienności prądu i napięcia.

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

W teorii chwilowej mocy biernej p-q Akagiego i Nabae'a, opisującej właściwości energetyczne obwodów trójfazowych, próbki wartości chwilowych prądów i napięć liniowych służą do obliczenia dwóch mocy: **chwilowej mocy czynnej p i chwilowej mocy biernej q.** W każdej chwili odbiornik trójfazowy ma na swoich zaciskach parę mocy (p, q), które wg autorów tej teorii umożliwiają momentalne generowanie sygnałów kontrolnych kompensatora. Niestety, jak pokazano w [47], para mocy (p, q) nie pozwala identyfikować właściwości energetycznych odbiornika, a zatem momentalna kompensacja nie jest możliwa. Ponadto moce chwilowe (p, q) są pewnymi formami algebraicznymi napięcia zasilania i prądu odbiornika. Na podstawie obserwacji tych mocy nie można określić, co jest przyczyną pewnych ich cech: napięcie zasilania czy prąd odbiornika [62]. Niedostrzeganie tego prowadzi do błędnego sterowania kompensatorów kluczujących [53, 55].

Podejście chwilowe nie tworzy więc poprawnej podstawy teorii mocy, szczególnie że stan systemu rozdzielczego opisywany jest wielkościami otrzymywanymi na drodze uśredniania w okresie zmienności prądu i napięcia. Takie są wartości skuteczne prądu i napięcia, moc czynna, bierna i pozorna, składowe symetryczne czy wartości skuteczne harmonicznych, współczynniki asymetrii i odkształcenia. Dlatego też koncepcja składowych fizycznych prądu oparta jest na wielkościach uśrednianych w okresie zmienności T.

6. MOCE W OBWODACH TRÓJFAZOWYCH

Ponieważ energia elektryczna jest głównie przenoszona i przekształcana w obwodach trójfazowych, najważniejszą część teorii stanowi teoria mocy obwodów trójfazowych. Bez niej nie da się wyjaśnić właściwości energetycznych obwodów trójfazowych. Dlatego też niezmiernie wiele wysiłku poświęcono badaniom nad właściwościami energetycznymi takich właśnie trójfazowych obwodów [3, 8, 10, 12, 13, 14, 25, 26, 51] w obecności odkształceń oraz/lub asymetrii.

Rozwój teorii mocy obwodów trójfazowych hamowały dwa czynniki. Pierwszym z nich był brak przez długi czas dostatecznego postępu w rozwoju teorii mocy obwodów jednofazowych. Jak długo właściwości energetyczne obwodów jednofazowych nie były poprawnie wyjaśnione i opisane, tak długo nie można było ich wyjaśnić i opisać w obwodach trójfazowych. Drugim czynnikiem był brak poprawnej definicji mocy pozornej S obwodów trójfazowych. W 1920 r. American Institute of Electrical Engineers (AIEE) zaproponował [4] dwie definicje mocy pozornej obwodów trójfazowych, znane jako arytmetyczna moc pozorna:

$$S = U_R I_R + U_S I_S + U_T I_T = S_A \quad , \tag{14}$$

oraz geometryczna moc pozorna:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = S_G \quad . \tag{15}$$

Dyskusja nad tymi definicjami w latach 20. [11] nie rozstrzygnęła ich poprawności i obie znalazły się w IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms [42], odziaływującym na całe środowisko elektrotechniczne.

W 1922 r. Buchholz zaproponował [5] odmienną definicję:

$$S = \sqrt{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}\,\sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2} = S_B \quad , \tag{16}$$

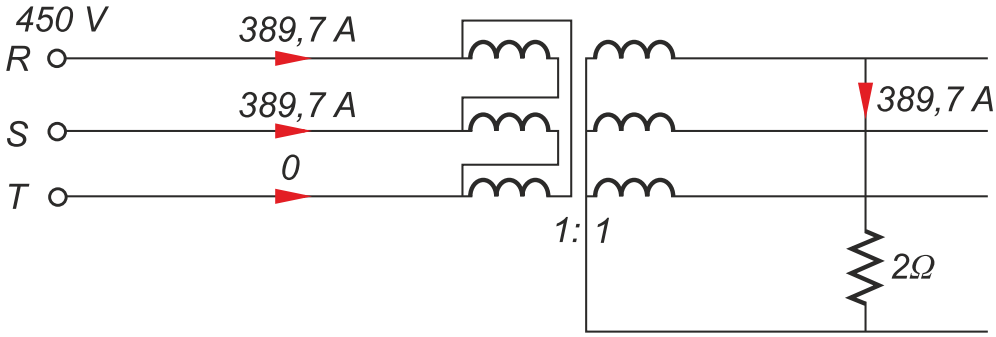
która jednak nie przebiła się do środowiska elektrotechnicznego. Pewnym tego wyjaśnieniem może być okoliczność, że w obwodach trójfazowych z sinusoidalnymi i symetrycznymi przebiegami prądów i napięć, te trzy powyższe definicje są liczbowo równoważne. Niemniej w pracach badawczych nad mocami w obwodach trójfazowych dominowała zwykle geometryczna definicja mocy pozornej.

W pracy [28], opublikowanej w 1988 r., w której po raz pierwszy zastosowano koncepcję składowych fizycznych prądów do niezrównoważonych obwodów trójfazowych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć, moc pozorna S została zdefiniowana w odmienny sposób, mianowicie:

$$S = \|\boldsymbol{u}\|\|\boldsymbol{i}\| \quad . \tag{17}$$

Moc pozorną S odbiornika trójfazowago zdefiniowano więc jako iloczyn trójfazowych wartości skutecznych napięcia i prądu zasilania odbiornika. W warunkach sinusoidalnych definicja ta jest identyczna z definicją mocy pozornej zaproponowaną w 1922 r. przez Buchholza [5]. Jednak pytanie, która z definicji S_A, S_G czy S_B jest poprawna, pozostawało bez odpowiedzi.

Moc pozorna S nie jest wielkością fizyczną, lecz umowną, to znaczy, że jej definicja jest jedynie przedmiotem umowy. Ale jeśli jest tylko przedmiotem umowy, to powinna ona w sposób poprawny określać współczynnik mocy $\lambda = P/S$. Jego wartość związana jest ze stratami energii przy jej przesyle, za których koszty może być obciążony jej odbiorca.



Rys. 6. Niezrównoważony odbiornik trójfazowy
Fig. 6. Unbalanced three-phase load.

Na przykład jeśli odbiornik ma strukturę i parametry pokazane na rysunku 6, wówczas zakładając, że transformator jest idealny, moc pozorna obliczana wg definicji (14), (15) i (16) wynosi odpowiednio:

$$S_A = 351 \text{ kVA}, \; S_G = 304 \text{ kVA}, \; S_B = 430 \text{ kVA},$$

zaś współczynnik mocy

$$\lambda_A = \frac{P}{S_A} = 0.86, \quad \lambda_G = \frac{P}{S_G} = 1, \quad \lambda_B = \frac{P}{S_B} = 0{,}71.$$

Pytanie, która z definicji mocy pozornej pozwala w sposób poprawny obliczać współczynnik mocy λ było przedmiotem analizy przedstawionej w [44]. Z analizy tej wynikło, że ze względu na straty przy przesyle energii współczynnik mocy ma wartość poprawną, jeśli moc pozorna obliczana jest wg definicji Buchholza. Arytmetyczna i geometryczna definicja tej mocy prowadzi do błędnej wartości tego współczynnika.

7. KOMPENSACJA

Kompensacja, której przedmiotem jest poprawa współczynnika mocy, a więc poprawa skuteczności przesyłu energii, stanowi najważniejsze praktyczne zastosowanie teorii mocy. Ze względu na środki techniczne użyte w procesie kompensacji kompensatory można podzielić na trzy grupy

- **kompensatory reaktancyjne,**
- **kompensatory kluczujące,**
- **kompensatory hybrydowe, to znaczy reaktancyjno-kluczujące.**

Pierwszym równoważącym kompensatorem reaktancyjnym był kompensator zaproponowany przez Steinmetza w roku 1917 [2], znany jako obwód Steinmetza. Był to kompensator pracujący w warunkach zasilania napięciem sinusoidalnym

Obliczanie parametrów LC kompensatora reaktancyjnego zasilanego napięciem niesinusoiadalnym może być traktowane jako rozwiązanie zagadnienia optymalizacyjnego i żadna teoria mocy nie jest do tego potrzebna. Wynik optymalizacji nie wnosi jednak niczego do podstaw kompensacji. Ponadto procedury optymalizacyjne, ze względu na długi czas obliczeń, mogą nie nadawać się do sterowania kompensatorów odbiorników szybkozmiennych. Bardziej odpowiednie do tego są metody algebraiczne, pozwalające bezpośrednio obliczać parametry LC kompensatora, bez stosowania metod optymalizacyjnych. Nie da się tego jednak zrobić bez dostatecznie zaawansowanej teorii mocy. Dlatego postęp w rozwoju metod kompensacji jest ściśle związany z rozwojem teorii mocy.

Pierwsze koncepcje teorii mocy zaproponowane przez Budeanu i przez Fryzego nie stworzyły podstaw kompensacji. Nie umożliwiały obliczania, w warunkach zasilania napięciem odkształconym, nawet pojemności kompensującej.

Pierwszy krok w tym kierunku został zrobiony w 1972 r. przez Shepherda i Zakikhaniego. Zaproponowali oni [18] nową teorię mocy i nową definicję prądu biernego. Definicja ta, w dziedzinie częstotliwościowej, umożliwiała obliczanie

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

optymalnej pojemności kompensującej C_{opt}, przy której współczynnik mocy osiąga najwyższą wartość. Definicja ta wymaga jednak znajomości kąta przesunięcia fazowego między harmonicznymi prądu i napięcia. Metoda ta nie była zatem dopasowana do ówczesnych, jeszcze wyłącznie analogowych metod pomiarowych, w ramach których pomiar tego kąta był technicznie bardzo trudny i mało dokładny.

W 1980 r. Kusters i Moore zaproponowali [20] metodę obliczania tej samej pojemności C_{opt} w dziedzinie czasowej. Stanowiła ona postęp w metodach kompensacji na tyle zasadniczy, że metoda ta została zalecona do stosowania przez International Electrotechnical Committee [21]. Niestety okazało się [22], że metoda ta w typowych warunkach panujących w systemach rozdzielczych nie pozwala jednak obliczać pojemności optymalnej C_{opt}. Ponadto kompensacja pojemnościowa w obwodach z napięciem odkształconym może powodować wzrost odkształceń i powinna być unikana.

Podstawy kompensacji reaktancyjnej w obwodach jednofazowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania opracowano [23, 56] dopiero w ramach koncepcji składowych fizycznych prądów w roku 1984. Okazało się też, że o ile prąd bierny może być całkowicie kompensowany z równolegle do odbiornika włączonym kompensatorem reaktancyjnym, o tyle prąd rozrzutu nie może być takim kompensatorem zmniejszany. Całkowita kompensacja wymaga [32] szeregowo-równoległego kompensatora reaktancyjnego.

Metodę syntezy reaktancyjnych kompensatorów równoważących w obwodach trójfazowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania opracowano w ramach koncepcji składowych fizycznych prądów w roku 1989 [29, 35, 60]. Zastosowano ją [38, 40] do sterowania kompensatora adaptacyjnego w strukturze hybrydowej z kompensatorem kluczującym. Koncepcja CPC może być też użyta do minimalizacji wartości skutecznej prądu kompensatorem równoważącym o ograniczonej złożoności [33, 35] oraz do projektowania reaktancyjnych kompensatorów równoważących w obwodach czteroprzewodowych [68].

Kompensatory kluczujące, znane pod nazwą „filtrów aktywnych", są najczęściej sterowane algorytmami opartymi na teorii chwilowej mocy biernej (TCMB) p-q [24]. Niestety wtedy gdy napięcie zasilania jest odkształcone lub symetryczne, algorymy takie generują błędne sygnały sterujące [53, 55].

Sterowanie kompensatorem kluczującym [48, 54] oparte na koncepcji CPC ma dwie zalety. Umożliwia sterowanie w strukturze hybrydowej [38, 40] zarówno kompensatorem reaktancyjnym, jak i kompensatorem kluczującym. Ponadto pozwala na swobodny wybór [52], która ze składowych fizycznych i w jakim stopniu ma być kompensowana. Może to być pożyteczne przy ograniczonych zasobach mocy kompensatora. W szczególności, w przypadku odbiorników bardzo wielkiej mocy, takich jak piece łukowe, ograniczona moc łączników tranzystorowych może nie pozwolić [73] na pełną kompensację kluczującą, natomiast kompensacja hybrydowa, to jest reaktancyjno-kluczująca, może być wciąż możliwa.

8. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA GŁÓWNYCH TEORII MOCY

Teoria mocy Budeanu została opracowana w 1927 r. [7] i sformułowana w dziedzinie częstotliwościowej. Była ona pierwszą próbą opisu właściwości energetycznych obwodów jednofazowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania. Prawdopodobnie jest to najbardziej rozpowszechniona teoria mocy. Jej poprawność została zakwestionowana w 1987 r. w artykule [27], w którym pokazano, że:

- nie ma żadnego zjawiska fizycznego związanego z mocą bierną Q wg definicji Budeanu;
- nie ma żadnego związku między mocą odkształcenia D wg definicji Budeanu a odkształceniem prądu względem napięcia;
- nie ma związku między poprawą współczynnika mocy a kompensacją mocy biernej Q Budeanu.

Teorię mocy Fryzego opracowano w 1931 r. [9] i sformułowano w dziedzinie czasowej. Wniosła ona pojęcie prądu czynnego oraz rozkład prądu na składowe ortogonalne. Wprowadziła nową definicję prądu biernego, lecz bez interpretacji fizycznej innej niż ta, że jest to jedynie bezużyteczna składowa prądu.

Teorię mocy Shepherda i Zakikhaniego opracowano w 1972 r. i sformułowano [18] w dziedzinie częstotliwościowej. Umożliwiło to wyciągnięcie wniosku odnośnie do poprawnego wyboru prądu biernego $i_r(t)$. Wybór ten pozwolił, po raz pierwszy, na obliczanie optymalnej pojemności kompensującej C_{opt}, przy której

współczynnik mocy w obecności harmonicznych osiąga najwyższą wartość. Niestety, z równania mocy Shepherda i Zakikhaniego zniknęła podstawowa moc obwodów elektrycznych, moc czynna P.

Teorię mocy Kustersa i Moore'a opracowano w 1980 r. [20] i sformułowano w dziedzinie czasowej. Rozwiązało to problem obliczania optymalnej pojemności kompensującej C_{opt} bez potrzeby pomiaru zespolonych wartości skutecznych harmonicznych prądu i napięcia odbiornika. Metoda obliczania tej pojemności była niestety poprawna, jak pokazano w [22], tylko w obwodach zasilanych z idealnego źródła napięcia.

Teorię chwilowej mocy biernej (TCMB) p-q Akagiego, Nabae'a i Kanazawy opracowano w 1984 r. [24] w dziedzinie czasowej i uogólniono przez Penga i Lai w [39]. Jest ona w zasadzie teorią mocy układów trójfazowych. Tworzy ona podstawy sterowania kompensatorów kluczujących, pod warunkiem jednak, że napięcie zasilania jest sinusoidalne i symetryczne. Niestety, TCMB błędnie [47, 62] interpretuje zjawiska energetyczne w obwodach trójfazowych.

Teorię mocy opartą na koncepcji CPC Czarneckiego, sformułowano w dziedzinie częstotliwościowej. Jej rozwój został zilustrowany na rysunku 2. Jest ona obecnie najbardziej zaawansowaną teorią mocy obwodów jedno- i trójfazowych z niesinusoidalnymi i niesymetrycznymi przebiegami prądu i napięcia. Wyjaśnia fizyczne przyczyny wzrostu prądu zasilania odbiorników elektrycznych i tworzy podstawy dla kompensacji reaktancyjnej, kluczującej i hybrydowej. Może stanowić punkt wyjścia do badań nad taryfami [61] w warunkach odkształceń i asymetrii, oraz opisu energetycznego obwodów z przebiegami nieokresowymi [71].

Metoda FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock) **Depenbrocka** zaproponowana w [34] jest sformułowana w dziedzinie czasowej. Jest to w zasadzie uogólnienie teorii mocy Fryzego na układy trójfazowe, z mocą pozorną S wg definicji Buchholza. Ma ona wszystkie cechy teorii mocy Fryzego.

Zachowawcza teoria mocy (ang. *conservative power theory* – CPT) **Tentiego i współpracowników** [46], opracowana w 2003 r., sformułowana jest w dziedzinie czasowej. Jakkolwiek CPT spełnia postulat Fryzego rozkładu prądu na składniki ortogonalne, ma w znacznym stopniu cechy teorii mocy Budeanu [65, 72]. Składowe prądu, poza prądem czynnym wg definicji Fryzego, nie są powiązane z żadnymi zjawiskami fizycznymi w obwodzie. Teoria ta nie tworzy też poprawnych podstaw kompensacji.

BIBLIOGRAFIA

[1] Ch.P. Steinmetz, "Does phase displacement occur in the current of electric arcs?" (in German), *ETZ*, 587, 1892.

[2] Ch.P. Steinmetz, "Theory and calculation of electrical apparatur," *McGraw-Hill Book Comp.,* New York, 1917.

[3] W.V. Lyon, "Reactive power and unbalanced circuits", *Electrical World*, pp. 1417–1420, 1920.

[4] A.I.E.E. Committee, "Apparent power in three-phase systems", *Transactions of A.I.E.E.,* Vol. 39, pp. 1450–1455, 1920.

[5] F. Buchholz, "Die Drehstromscheinleistung bei Unglaichmaβger Belastung der drei Zweige," *Licht und Kraft,* pp. 9–11, 1922.

[6] M.A. Illovici, "Definition et mesure de la puissance et de l'energie reactives", *Bull. Soc. Franc. Electriciens*, 1925.

[7] C.I. Budeanu, "Puissances reactives et fictives," *Institut Romain de l'Energie*, Bucharest, 1927.

[8] E. Weber, "Die elektrische Leistung in allgemeinen Wechselstromkreis", *ETZ*, p. 1547, 1929.

[9] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in circuts with nonsinusoidal voltages and currents", *Przegląd Elektrotechniczny,* z. 7, pp. 193–203, z. 8, pp. 225–234, 1931, z. 22, pp. 673–676, 1932.

[10] W. Quade, "Über Wechselstrome mit beliebiger Kurvenform in Dreiphasensystemen", *Archiv fur Elektr.*, vol. 28, pp. 798–809, 1934.

[11] H.L. Curtis, F.B. Silsbee, "Definitions of power and related quantities", *Transactions of AIEE*, Vol. 54, pp. 394–404, 1935.

[12] F. Emde, "Scheinleistung eines nicht sinusformigen Drehstromes", *Elektrotechnik und Machinen*, pp. 555–565, 1937.

[13] I. Rosenzweig, "Symbolic multidimensional approach to analysis of multiphase systems" (in Polish) *Czasopismo Techniczne*, pp. 6–11, 1939.

[14] V.N. Nedelcu, "Die enheitliche Leistungstheorie der unsymmetrischen mehrwelligen Mehrphasensysteme", *ETZ-A,* no. 5, pp. 153–157, 1963.

[15] M. Depenbrock, "Blind- und Scheinleistung in einphasing gespeisten Netzwerken", *ETZ-A,*, Bd. 85, F.13, pp. 385–391, 1964.

[16] Z. Nowomiejski, Z. Cichowska, "Unbalanced three-phase systems" (in Polish), Scientific Letters of Gliwice Univ. of Techno-logy, *ELEKTRYKA*, no. 17, pp. 25–76, 1964.

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

[17] Wechselstromgrossen, 303–310, 1972.

[18] W. Shepherd, P. Zakikhani, "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems," *Proc. IEE*, vol. 119, no. 9, pp. 1361–1362, 1972.

[19] M. Depenbrock, "Wirk- und Blindleistung," *ETG-Fachtagung "Blindleistung"*, Aachen 1979.

[20] N.L. Kusters, W.J.M. Moore, "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions," *IEEE Trans. Pow. Appl. Syst.*, vol. PAS-99, no. 3, pp. 1845–1854, 1980.

[21] International Electrotechnical Commission, (1979), Techn. Committee No. 25, Working Group 7, Report: "Reactive power and distortion power", doc. no. 25, 113 (Secr.).

[22] L.S. Czarnecki, "Additional discussion to "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions," *IEEE Trans. on Power and Syst.*, vol. PAS-102, no. 4, pp. 1023–1024, 1983.

[23] L.S. Czarnecki, "Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations," *IEEE Trans. on Instr. and Measurements*, vol. IM-34, no. 3, pp. 399–404, 1984.

[24] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl,* vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984.

[25] S. Fryze, "Theorethical and physical fundamentals for the active, reactive and apparemt power definitions in multi-phase systems with distorted voltages and currents" (in Polish), Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej *ELEKTRYKA*, nr 100, pp. 29–46, post-humos publ., 1985.

[26] K. Koch, "Bestimmung von Groβen in Mehr-Leitr Systemen", *ETZ Archiv*, vol. 8, no. 10, pp. 313–318, 1986.

[27] L.S. Czarnecki, "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be aban-doned," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. IM-36, No. 3, pp. 834–837, 1987.

[28] L.S. Czarnecki, "Orthogonal decomposition of the current in a three-phase non-linear asymmetrical circuit with nonsinu-soidal voltage," I*EEE Trans. Instr. Meas.*, vol. IM-37, no. 1, pp. 30–34, 1988.

[29] L.S. Czarnecki, "Reactive and unbalanced currents compensation in three-phase circuits under nonsinusoidal conditions," *IEEE Trans. IM, vol. Instr. Meas.*, IM-38, no. 3, pp. 754–459, 1989.

[30] A.E. Emanuel, "Powers in nonsinusoidal situations. A review of definitions and physical meanings", *IEEE Transations on Pow. Del*, vol. 5, no. 3, pp. 1377–1389, 1990.

[31] L.S. Czarnecki, T. Swietlicki, "Powers in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement," *IEEE Trans. Instr. Measur.*, vol. Instr. Meas., IM-39, no. 2, 340–344, 1990.

[32] L.S. Czarnecki, "Scattered and reactive current, voltage, and power in circuits with nonsinusoidal waveforms and their compensation," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 40, no. 3, pp. 563–567, 1991.

[33] L.S. Czarnecki, "Minimization of unbalanced and reactive currents in three-phase asymmetrical circuits with nonsinusoidal voltage," *Proc. IEE* Pt. B, 139, no. 4, pp. 347–354, 1992.

[34] M. Depenbrock, "The FBD-method, a generalized applicable tool for analyzing power relations" *IEEE Trans*. on Power Del., vol. 8, no. 2, pp. 381–387, 1993.

[35] L.S. Czarnecki, "Dynamic, power quality oriented approach to theory and compensation of asymmetrical systems under nonsinusoidal conditions", *European Trans. on Electric Power, ETEP,* vol. 5, pp. 347–358, Sept./Oct. 1994.

[36] G. Superti-Furga, "Searching for generalization of the reactive power – a proposal", *European Transactions on Electrical Power Engineering, ETEP*, vol. 4, no. 5, pp. 411–420, 1994.

[37] L.S. Czarnecki, "Power theory of electric circuits: common data base of power related phenomena and properties", *Europ. Trans. on Electrical Power, ETEP,* vol. 4, no. 5, pp. 491–408, 1994.

[38] L.S. Czarnecki, S.M. Hsu, G. Chen, "Adaptive balancing compensator," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1663–1669, July 1995.

[39] F.Z. Peng; J.S. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," *IEEE Transactions on Instrum. and Meas.*, vol. 45, no. 1, pp. 293, 297, Feb. 1996.

[40] L.S. Czarnecki, G. Chen, Z. Staroszczyk, "Application of running quantities for control of adaptive hybrid compensator," *European Trans. on Electrical Power, ETEP*, vol. 6, no. 5, pp. 337–344, Sept./Oct. 1996.

[41] L.S. Czarnecki, "Budeanu and Fryze: two frameworks for Interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents," *Archiv fur Elektrot*., 81, no. 2, pp. 5–15, 1997.

[42] The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics *Terms, IEEE* Inc., New York, 1997.

[43] W. le Roux, J.D. vanWyk, "Correspondence and difference between the FBD and Czarnecki current decomposition methods for linear loads", *European Transactions on Electrical Power Engineering, ETEP*, vol. 8, no. 5, pp. 329–336, 1998.

[44] L.S. Czarnecki, "Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality," A*rchiv fur Elektrotechnik*, 82, no. 4, pp. 10–15, 1999.

[45] Z. Cekareski, A.E. Emanuel, "Pointing Vector and the power quality of electric energy", *Europ. Trans. on Electrical Power Eng., ETEP,* vol. 11, no. 6, pp. 375–382, 2001.

[46] P. Tenti, P. Mattavelli, "A time-domain approach to power terms definitions under non-sinusoidal conditions," *6th Int. Workshop on Power Definitions and Measurement under Non-Sinusoidal Conditions*, Milan, Italy, 2003.

[47] L.S. Czarnecki, "On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory," I*EEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 828–836, 2004.

[48] A. Firlit, "Current's Physical Components Theory and p-q Power Theory in the control of the three-phase shunt active power filter," *7th Int. Workshop on Power Definitions and Meas. under Non-Sinusoidal Conditions,* Cagliari, Italy, 2006.

[49] L.S. Czarnecki, "Could power properties of three-phase systems be described in terms of the Poynting Vector?" *IEEE Trans. on Power Delivery*, 21, no. 1, 339–344, 2006.

[50] P.E. Sutherland, "On the definition of power in an electrical system", *IEEE Trans. on Pow. Del.*, vol. 22, pp. 1100–1107, 2007.

[51] W.G. Morsi, M.E. El-Hawary, "Defining power components in nonsinusoidal unbalanced polyphase systems: the issues", *IEEE Trans. on Power Delivery,* vol. 22, no. 4, pp. 2428–2438, 2007.

[52] H.L. Ginn, G. Chen, "Switching compensator control strategy based on CPC power theory", Proc. of the International School of Nonsinusoidal Currents and Compensation, (*ISNCC*), Łagów 2008.

[53] L.S. Czarnecki, "Effect of supply voltage harmonics on IRP-based switching compensator control," *IEEE Trans. on Power Electronic*s, vol. 24, no. 2, pp. 483–488, 2009.

[54] L.F. Monteneiro, J.L. Alfonso, J.G. Pinto, E.M. Watanabe, H. Akagi, M. Aredes, "Compensation algorithms based on the p-q and CPC theories for switching compensators in micro-grids", P*roc. of COBEP 09 Power Electronics Conference*, Brazilian DOI: 10.1109/ COCEP.2009.5347593, pp. 32–40, 2009.

[55] L.S. Czarnecki, "Effect of supply voltage asymmetry on IRP p-q - based switching compensator control," *IET Proc. on Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 11–17, 2010.

[56] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nosinusoidal voltages and currents, Part 2. Current's Physical Components and compensation in single-phase time-invariant loads," *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA,* www.epismo-aez.pl, vol. 1, nr 2 (2), pp. 71–79, 2010.

[57] L.S. Czarnecki, "Recollections on Professor Fryze and reflections on his place in the power theory development" *Przegląd Elektrotechniczny,* R. 87, nr 1, pp. 123–128, 2011.

[58] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nosinusoidal voltages and currents, Part 3. Current's Physical Components and compensation in single-phase with Harmonic Generating Loads (HGL)," *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, vol. 2, nr 1 (3), pp. 57–65, 2011.

[59] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 5. Current's Physical Components and compensation three-phase unbalanced systems in sinusoidal conditions," *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, vol. 2, nr 4 (6), pp. 51–57, 2011.

[60] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 4. Compensation of three-phase unbalanced systems in nonsinusoidal conditions," *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, vol. 2, no. 2 (4), pp. 44–53, 2011.

[61] L.S. Czarnecki, "Working, reflected and detrimental active powers," *IET on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 3, pp. 223–239, 2012.

[62] L.S. Czarnecki, "Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", *IET Power Electr.*, vol. 7, no. 9, pp. 2201–2208, 2014.

[63] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 6. Powers in Linear Three-Phase Systems with Neutral Conductor", *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, DOI: 10.17274/AEZ.2014.15.03, vol. 5, nr 1 (15), pp. 48–58, 2014

[[64] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 7. Strategies of switching compensator control", *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, DOI: 10.17274/AEZ.2014.16.03,.vol. 5, Nr 2 (16), pp. 44–54, 2014

[65] L.S. Czarnecki, "Critical comments on the Conservative Power Theory (CPT)", Proc. of Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, (*ISNCC*), Łagów 2015.

66] L.S. Czarnecki, P. Bhattarai, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 8. "Powers and reactive compensation at asymmetrical supply voltage", *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl , DOI: 10.17274/AEZ.2015.19.01, vol. 6, nr 1(19), pp. 8-18, 2015.

[67] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 9. Misinterpretation of power properties of electrical circuits", *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKLOCENIA*, www.epismo-aez.pl, DOI: 10.17274/AEZ.2015.21.01, vol. 6, nr 3(21), pp. 6–17,2015.

[68] L.S. Czarnecki, P.M. Haley, "Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 53–63, Feb. 2015.

AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA
vol. 7, nr 4 (26) 2016, grudzień, ISSN 2082-4149

[69] L.S. Czarnecki, P.M. Haley, "Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 513–521, 2016.

[70] L.S. Czarnecki, P. Bhattarai, "Currents' Physical Components of unbalanced three-phase LTI loads at asymmetrical nonsinu-soidal supply voltage", Proc. of Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, (*ISNCC*), Łagów 2015.

[71] A.R. Izaguirre, M.E. Macias, F. Martell, "Accurate CPC power analysis under extreme EAF's distortion conditions", Proc. of Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, (*SNCC*), Łagów 2015.

[72] L.S. Czarnecki, "What is wrong with the Conservative Power Theory (CPT)", Proc. of Int. Conf. on Applied and Theoretical Electr., *ICATE, Craiova*, Romania 2016.

[73] L.S. Czarnecki, P. Bhattarai, "A method of calculation of LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces", to be printed in *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2016.

otrzymano / received: 20.09.2016 *przyjęto do publikacji / accepted: 20.10.2016*

Zapraszamy na XVII konferencję naukowo-techniczną o charakterze szkoleniowym

AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA

(W dniach 24-26.05.2017, WDW Jurata)

Współorganizatorzy: Politechnika Gdańska, Zarząd Portu Port Gdynia SA, SPE/O Gdańsk

Organizacja i tematyka AEZ- 2017

24 maja 2017 o godz. 15,00 - rozpoczynamy od zajęć w LABORATORIUM LINTE na Politechnice Gdańskiej, ul. Sobieskiego 5.

Będzie demonstrowana praca następujących układów:

- **generatora synchronicznego napędzanego turbiną gazową w układzie kogeneracji,**
- **magazynu energii współpracującego z siecią,**
- **płynnej kompensacji mocy biernej w sieci.**

Dalsza część wykładów w Juracie:

- **Sztuczna inercja w systemach elektroenergetycznych**
- **Napęd elektryczny z pięciofazowym silnikiem indukcyjnym**
- **Układy napędowe z silnikami wysokoobrotowymi**
- **Stabilizator napięcia w liniach przesyłowych**
- **Transformator elektroniczny**
- **Nastawy zabezpieczeń w liniach SN z reklozerami**
- **Dobór uziemień w sieciach SN i nn z punktu widzenia ochrony od porażeń**
- **Problemy pomiaru impedancji pętli zwarciowej w nowoczesnych instalacjach niskiego napięcia**
  - **metody pomiaru impedancji pętli zwarciowej,**
  - **pomiary w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi,**
  - **pomiary w instalacjach zasilanych z UPS.**
- **Pomiary i rozliczenie energii z dostawcą**
- **Teoria mocy**
- **Urządzenia nieelektryczne w atmosferach zagrożonych wybuchem pyłów - wymagania nowej dyrektywy ATEX**
- **Efekty z pracy układu kogeneracji w PEC Suwałki**
- **Analiza możliwości uproszczenia procedury oceny ryzyka szkód piorunowych według normyodgromowej**
- **Zagrożenie piorunowe i przepięciowe w strefach zagrożonych wybuchem**

Wśród wykładowców między innymi:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny, dr inż. Witold Hoppel, dr inż. Henryk Boryń, dr inż. Jarosław Wiater, dr hab. Adam Bień, dr inż. Edward Musiał, prof. dr hab. inż. Leszek Czarnecki, dr hab. inż. Jarosław Guziński, dr hab. Stanislaw Czapp, mgr inż. Łukasz Surowy.

Więcej informacji: tel. 58 625 16 01; 605-387-534,
e-mail: infotech@infotech.gdansk.pl oraz na stronie www.infotech.gdansk.pl