

Wspomnienie o Profesorze Stanisławie Fryzem i refleksje nad Jego miejscem w teorii mocy

Streszczenie. Autor niniejszego artykułu był studentem Profesora Fryzego a jednocześnie jest kontynuatorem jego prac nad rozwojem teorii mocy obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia. Artykuł ten łączy osobiste wspomnienia autora z kontaktów z Profesorem Fryzem z oceną Jego miejsca w rozwoju teorii mocy. Wskazuje te idee Prof. Fryzego, które na trwałe pozostały w tej teorii oraz te, które nie mogły w niej pozostać. W zakończeniu Autor tego artykułu wyraża pogląd, że Profesor Fryze był tym naukowcem pracującym jak wielu nad teorią mocy, który odcisnął najmocniejsze piętno na jej rozwoju.

Abstract. The author of this paper was Professor Fryze's student and, at the same time, he is a continuator of his research on powers in systems with nonsinusoidal voltages and currents. The paper combines personal impressions on contacts with Prof. Fryze as a teacher with reflections on Fryze's place in the research on the power theory development. The paper indicates ideas that have become permanent in the power theory and those, which had to be abandoned. In conclusions the author expresses his opinion, that just Prof. Fryze set the most visible imprint on the power theory development. (*Recollections on Professor Fryze and reflections on his place in the Power Theory development*)

Słowa kluczowe: Definicje mocy, Składowe Fizyczne Prądu, CPC, prąd czynny, prąd bierny, prąd rozrzutu, współczynnik mocy,
Keywords: Power definitions, Current's Physical Components, CPC, active current, reactive current, scattered current, power factor

Profesor Fryze: nauczyciel elektrotechniki

Jest rok 1958. Siedzę w tłumie świeżych kolegów w amfiteatralnej auli Nr. 21 Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Wchodzi niewysoki krępy profesor w asyście wysokiego, z kruczo-czarnymi włosami i wąsem laboranta. Wstajemy. Dobitnym, nieco chrapliwym głosem mówi, że jest Profesorem Fryze i że będzie nas uczył podstaw elektrotechniki.

Dla mnie, niedawnego absolwenta Technikum Budowlanego, który nie miał nawet fizyki w programie szkoły, wykład jest ekscytujący! Wzory na tablicy i ilustrujące te matematyczne wzory huki, trzaski i łuki wzniesane obok przez Aleksandra Kaszubę, laboranta Profesora. Jak się nie nauczyć elektrotechniki, widząc eliptyczną puszkę po szpachach w pomidorach, wirującą w polu magnetycznym trzech olbrzymich cewek! Wielka lekcja, że elektrotechnika to i matematyka i fizyka i technika! Ta fascynacja rolą fizyki w elektrotechnice pozostanie we mnie po tych wykładach na zawsze. Wiele lat później nazwę stworzoną przez mnie teorią mocy obwodów elektrycznych Teorią Mocy Składowych Fizycznych Prądu. Jego pierwszą składową, w ciągu wielu innych mocno osadzonych w zjawiskach fizycznych składowych prądu, będzie prąd czynny Fryzego.

Takie wykłady nie mogą nie budzić fascynacji. Ich słuchacze pozostaną już elektrykami na zawsze. Auditorium jest wypełnione po brzegi. Profesor uczy nie tylko nas. Niekiedy uczy asystentów jak uczyć, a sam siedzi ze studentami. Spada mu ołówek. Prosi siedzącego obok studenta (Jurka O.), aby mu go podniósł. Jurek się pochyła, podnosi, i słyszy pytanie: do której godziny piłeś kolego? Do czwartej Panie Profesorze. Za chwilę, zza katedry grzmiący głos Profesora: Niektórzy profesorowie narzekają, że im studenci na wykłady nie przychodzą, a na moje, studenci piją do rana a na wykłady przychodzą!

Pozostaje jeszcze egzamin. Profesor hojny nie jest. Udaje mi się wywalczyć tylko „czwórke”. Po latach nie sposób oprzeć się refleksji, jak wszystko jest ukryte i nieprzewidywalne w ludzkich losach. Któż mógłby śmieć wtedy przypuszczać, gdy siedziałem wystraszone przed jego biurkiem, że przez całe moje życie zawodowe będę pracował nad teorią mocy obwodów elektrycznych, nad tym, co zaczął Profesor Fryze.

Narodziny Teorii Mocy

Profesor Fryze był zapewne pierwszym, który w 1931 roku użył terminu „teoria mocy”, w odniesieniu do sposobu

wyjaśniania i opisu właściwości energetycznych obwodów elektrycznych. Było to dopiero trzecie dziesięciolecie systemów energetycznych. Zaledwie ucichła batalia, czy system ten ma być systemem prądu stałego, którego zwolennikiem był Thomas Edison, czy prądu zmiennego, jak widział go Serb z pochodzenia, Nikola Tesla. Batalia jest brutalna. Tesla pracuje dla Westinghouse i Edison wprowadza do obiegu publicznego nazwę procesu uśmiercania przestępców na krześle elektrycznym zasilanym prądem zmiennym jako „westinghousing”, sugerując tym, jak bardzo prądy zmiennne są niebezpieczne. Tesla umiera złamany, a jednak to właśnie on jest nie tylko wynalazcą radia, silnika prądu zmiennego, świetłówki, pilotów radiowych lecz przede wszystkim, jest wynalazcą i twórcą systemów energetycznych prądu zmiennego.

Na szczęście batalia nad teorią mocy tak brutalną nie jest. Jest natomiast dłuższą. Pierwsza obserwacja kwestionująca równanie mocy $S^2 = P^2 + Q^2$ pojawia się już w 1892, w pracy Steinmetza [1] a ciągle jeszcze, po przeszło stu latach, nie ma zgody na to, jak opisywać i interpretować zjawiska energetyczne w obwodach elektrycznych. Jeszcze przed rokiem polemizowałem [2] z poglądem wyrażanym przez twórców jednej z najbardziej obecnie rozpowszechnionych teorii mocy, Teorii Chwilowej Mocy Biernej p-q, Profs. Watanabe i Akagim, twierdzącymi [3], że energia wiruje wokół linii przesyłowej z mocą równą chwilowej mocy biernej q.

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 zakłamanych i kontrowersyjnych problemów elektrotechniki. Przytoczony przykład, dotyczący wirowania energii z mocą bierną q, jest ilustracją tego, jak kontrowersyjne pozostają nawet teraz, po stu latach badań i dyskusji, najbardziej podstawowe zjawiska energetyczne w obwodach elektrycznych.

Tekst ten, poświęcony miejscu Profesora Fryzego w rozwoju teorii mocy, piszę z perspektywy wiedzy jaką mamy obecnie dzięki powstaniu Teorii Mocy Składowych Fizycznych Prądów, [4, 5] znanej pod angielską nazwą CPC Power Theory (Currents' Physical Components Power Theory). Teoria ta wyjaśnia i opisuje wszystkie zjawiska towarzyszące przepływowi energii w układach jedno- i trójfazowych, z odbiornikami zarówno liniowymi czasowo-niezmiennymi, jak i z odbiornikami generującymi harmo-

niczne i asymetrie prądów i napięć. Ponadto tworzy ona teoretyczne podstawy kompensacji układów jedno- i trójfazowych z niesinusoidalnymi i asymetrycznymi przebiegami prądów i napięć. Dlatego teoria ta daje doskonałe podstawy do oceny różnych koncepcji teorii mocy, w tym koncepcji Profesora Fryzego. Ma to też, niestety, zasadniczą wadę, wynikającą z oczywistego truizmu: Fryze i inni naukowcy przbijający się po omacku przez zawiłości zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych wiedzy, którą dziś mamy, głównie dzięki CPC, jeszcze nie mieli. Osiągnięciom musiały towarzyszyć i potknięcia. Aby przedstawić wkład Profesora Fryzego w teorię mocy muszę mówić i o jednym i o drugim. Potknięcia są nieuchronnymi elementami procesu poznawczego. Pomijanie ich deformowałoby ten proces.

Pierwsze trzy dziesięciolecia, które upłynęły od raportu Stainmetza [1] opublikowanego w 1892 r, w którym informował, że moc pozorna S w obwodzie rezystancyjnym z łukiem elektrycznym jest większa od mocy czynnej P , a więc równanie mocy

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

nie jest spełnione, nie przyniosły wyjaśnienia tej nierówności.

Ponieważ obserwacja Stainmetza podważyła poprawność jednego z podstawowych równań elektrotechniki, nie może więc być zaskoczeniem, że z końcem lat dwudziestych literatura tego zagadnienia liczy już około 80 pozycji. Staje się przy tym oczywiste, że nierówność ta spowodowana jest niesinusoidalnym przebiegiem prądu. Łuk elektryczny ma właściwości prostownicze.

Ponieważ definicje mocy czynnej P jak i mocy pozornej S nie były kwestionowane, uwaga naukowców skupiła się nad taką definicją mocy bierniej Q , która pozwoliłaby wyjaśnić obserwację Steinmetza. Niemiecki naukowiec, Emde, dochodzi jednak do wniosku [6], że taka modyfikacja definicji mocy bierniej nie jest możliwa i że trzeba zmienić całe równanie mocy.

Teoria mocy Budeanu

Osiąga to C.I. Budeanu, profesor Uniwersytetu w Bukareszcie, wyrażając prąd i napięcie obwodu jako sumę harmonicznym i definiując w roku 1927 [7] moc bierną wzorem

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

oraz wprowadzając nową wielkość energetyczną, którą nazwał *mocą odkształcenia*, zdefiniowaną jako

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

Przy takich definicjach mocy bierniej i odkształcenia, równanie mocy odbiornika jednofazowego przyjmuje postać

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

Wyjaśnia ono nierówność Steinmetza w obwodzie z łukiem elektrycznym obecnością mocy odkształcenia D . Należy tu jednak zwrócić uwagę na to, że użycie harmonicznym w definicji mocy bierniej nie było oryginalnym pomysłem Budeanu. Wcześniej, w roku 1923, definicje mocy bierniej z ich użyciem proponuje Illović [8].

Teoria mocy Fryzego

W cztery lata później, w roku 1931, na przekór opinii wyrażonej przez Emde w pracy [6], Profesor Fryze pokazuje [9], że i w obwodach z niesinusoidalnymi przebiegami

prądu i napięcia można zachować równanie mocy (1). Złożyło się na to kilka nowatorskich pomysłów Prof. Fryzego, które odcisnęły trwałe piętno na całym rozwoju teorii mocy. Były to:

- 1.- Opinia, że rozkład mocy na składowe jest wtórny względem rozkładu prądu.
- 2.- Koncepcja ortogonalności składników prądu.
- 3.- Wprowadzenie pojęcia prądu czynnego.
- 4.- Przekonanie, że moce należy definiować bez użycia szeregów Fouriera.

Te cztery pomysły złożyły się na bardzo proste i eleganckie wyprowadzenie równania mocy odbiorników jednofazowych z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia. Mianowicie, prąd odbiornika musi mieć składową czynną, $i_a(t)$, proporcjonalną do napięcia zasilania $u(t)$ o minimalnej wartości niezbędnej do tego, aby odbiornik miał moc czynną P . Został on zdefiniowany wzorem

$$(5) \quad i_a(t) = \frac{P}{\|u\|^2} u(t),$$

gdzie moc czynna odbiornika P i wartość skuteczna napięcia zasilania $\|u\|$ są odpowiednio równe

$$(6) \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \quad \|u\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Pozostała część prądu odbiornika, po odjęciu składowej czynnej,

$$(7) \quad i_{\text{rF}}(t) = i(t) - i_a(t),$$

nie bierze udziału w trwałym przenoszeniu energii ze źródła do odbiornika i została nazwana prądem biernym.

Ponieważ prąd czynny i prąd bierny są wzajemnie ortogonalne, zatem ich wartości skuteczne spełniają relację

$$(8) \quad \|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_{\text{rF}}\|^2.$$

Mnożąc to równanie przez kwadrat wartości skutecznej napięcia $\|u\|^2$, otrzymuje się równanie mocy (1) z mocą bierną według definicji Fryzego

$$(9) \quad Q = Q_F = \|u\| \|i_{\text{rF}}\|.$$

Trzeba przy tym pamiętać, że różnica w podejściu Budeanu i Fryzego nie dotyczy sposobu definicji tej samej wielkości energetycznej. Są to dwie całkowicie różne wielkości, które łączy jedynie nazwa *mocy bierniej*.

Teoria mocy Fryzego na tle teorii Budeanu

Definicja Fryzego mocy bierniej miała w porównaniu z definicją Budeanu zdecydowaną przewagę z punktu widzenia możliwości jej pomiaru. W latach trzydziestych harmonicznym przebiegów nie były wielkościami łatwymi do mierzenia. Metody cyfrowej obróbki sygnałów nie były jeszcze znane. Metody analogowe umożliwiały pomiar amplitudy harmonicznym; ich faza pozostawała jednak praktycznie poza zasięgiem możliwości pomiarowych. Pierwsze mierniki mocy bierniej według definicji Budeanu zostały zbudowane [10, 11] dopiero w latach siedemdziesiątych, wtedy, gdy dawno były już znane mierniki mocy bierniej według definicji Fryzego.

Koncepcja Budeanu w porównaniu z koncepcją Fryzego miała natomiast przewagę, chociaż pozornie, interpretacyjną. Moc bierna Q_B miała być według Budeanu miarą wpływu oscylacji energii na moc pozorną źródła S , zaś moc odkształcenia D miała być miarą wpływu na nią, odkształcenia prądu względem napięcia. Niestety, moc bierna według definicji Fryzego nie miała innej interpretacji niż tylko tę,

że jest to składowa bezużyteczna mocy pozornej, co zresztą jest truizmem, jeśli składową użyteczną mocy pozornej jest tylko moc czynna P .

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

Niestety, zasłużyła ona na tą rolę nie dzięki swej wartości, lecz tylko dlatego, że nikt dostatecznie wcześniej nie wglębił się w prawdziwość interpretacji fizycznych mocy Budeanu. Interpretacje obu mocy są całkowicie błędne. Nie ma żadnego związku między wartością mocy biernej Q_B a oscylacją energii między źródłem a odbiornikiem; nie ma żadnego związku między mocą odkształcenia D a odkształceniem prądu względem napięcia. Niestety, zostało to pokazane dopiero w artykule „What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Powers and Why it should be Abandoned” (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987), [12], opublikowanym dokładnie w 60 lat po powstaniu teorii mocy Budeanu. Tak więc, nie ma w obwodach elektrycznych żadnych zjawisk fizycznych mających jakikolwiek związek z mocą bierną i z mocą odkształcenia Budeanu.

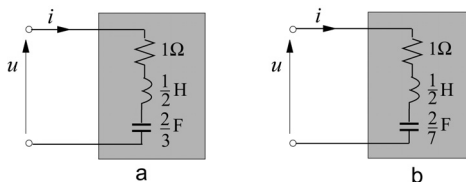
Patrząc na "obraz po bitwie", można z całą pewnością powiedzieć, że koncepcja teorii mocy Fryzego nie powinna była być zepchnięta na bok przez teorię mocy Budeanu. Profesor Fryze nie wyjaśnił, co prawda, fizycznego sensu mocy biernej Q_F , lecz nie sugerował przynajmniej błędnych interpretacji fizycznych tej mocy. Jej sens fizyczny został wyjaśniony [13] dopiero w ramach teorii mocy CPC. Mianowicie, nawet w najprostszych obwodach RL, dwa niezależne od siebie zjawiska fizyczne powodują pojawienie się tej mocy. Są to, zmiana konduktancji odbiornika z częstotliwością oraz przesunięcie fazowe harmonicznych prądu względem harmonicznych napięcia odbiornika.

Poprawa współczynnika mocy

Niestety, żadna z pierwszych dwóch koncepcji teorii mocy nie stworzyła podstaw projektowania kompensatorów poprawiających współczynnik mocy w obwodach z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć. Wtedy, gdy przebiegi te są sinusoidalne, moc bierna jest całkowicie kompensowalna. Jej kompensacja podwyższa współczynnik mocy do jedności, redukując wartość skuteczną prądu zasilania do najniższej możliwej wartości. Nie jest już tak, gdy przebiegi te są niesinusoidalne. Kompensacji mocy biernej Q_B nie musi towarzyszyć poprawa współczynnika mocy, gdyż jej zmniejszeniu może towarzyszyć wzrost mocy odkształcenia D . Niestety, również znajomość wartości mocy biernej wg. definicji Fryzego Q_F nie dostarcza żadnych informacji potrzebnych do zaprojektowania kompensatora.

Można to zilustrować z pomocą dwóch odbiorników pokazanych na rysunku 1(a) i (b), zasilanych takim samym napięciem

$$u(t) = 100\sqrt{2}(\sin\omega_1 t + \sin 3\omega_1 t) \text{ V}, \quad \omega_1 = 1 \text{ rad/s.}$$



Rys. 1. Dwa odbiorniki RLC

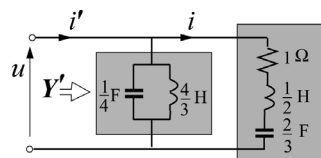
Przy przyjętym napięciu zasilania odbiornika, jego wartość skuteczna $\|u\| = 141,4 \text{ V}$, zaś wartość skuteczna prądu zasilania $\|i\| = 100 \text{ A}$.

Moc czynna obu odbiorników wynosi $P = 10 \text{ kW}$ zaś moc pozorna $S = 14,1 \text{ kVA}$, zatem moc bierna wg. definicji Fryzego

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{14,1^2 - 10^2} = 10 \text{ kvar}.$$

Tak więc, odbiorniki te w teorii mocy Fryzego są wzajemnie nierozróżnialne.

Jak to wykazano w książce [5] odbiornik na rysunku 1(a) może być skompensowany do współczynnika mocy $\lambda = 1$ kompensatorem reaktacyjnym pokazanym na rysunku 2

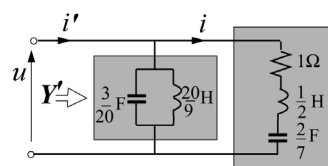


Rys. 2. Odbiornik z rysunku 1(a) z kompensatorem reaktacyjnym

Kompensator taki zmniejsza wartość skuteczną prądu zasilania do wartości

$$\|i'\| = 70,1 \text{ A}.$$

W przypadku odbiornika pokazanego na rysunku 1(b) największą wartość współczynnika mocy można uzyskać kompensatorem pokazanym na rysunku 3



Rys. 3. Odbiornik z rysunku 1(b) z kompensatorem reaktacyjnym

Kompensator taki zmniejsza wartość skuteczną prądu tylko do wartości

$$\|i'\| = 90,5 \text{ A},$$

redukując moc pozorną do wartości $S = 12,7 \text{ kVA}$. Tak więc, moc bierna zdefiniowana wg. Fryzego może być zmniejszona jedynie do wartości

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{12,7^2 - 10^2} = 8 \text{ kvar}.$$

Okazuje się więc, że dwa odbiorniki, równoważne w sensie teorii mocy Fryzego, nie są równoważne pod względem możliwości ich kompensacji. Niestety, teoria ta różnicy tej nie wyjaśnia. Ponadto, nie tworzy ona podstaw projektowania kompensatorów reaktacyjnych. Parametry kompensatorów w powyższych ilustracjach nie zostały wyznaczone z użyciem teorii mocy Fryzego, lecz korzystając z wyników teorii mocy Składowych Fizycznych Prądu (CPC).

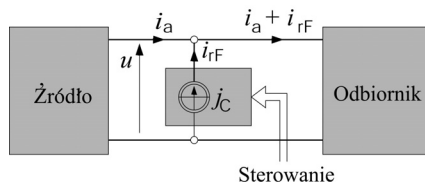
Teoria mocy oparta na Składowych Fizycznych Prądzie wyjaśnia też różnicę w możliwości kompensacji odbiorników liniowych, takich jak te, pokazane na rysunku 1. Mianowicie, moc bierna Q_F wg. definicji Fryzego jest wielkością złożoną, która w przypadku odbiorników liniowych ma dwie składowe. Jedną jest wynikiem przesunięcia fazowego harmonicznych prądu i napięcia i traktowana jest w ramach teorii mocy CPC jako moc bierna Q . Jest to moc kompensowalna reaktacyjnie. Drugi składnik jest wynikiem zmiany konduktancji odbiornika z częstotliwością. Jest to moc rozrzutu Q_s

(Ang.: *scattered power*). Moc ta nie może być kompenso-
wana dwójnikiem reaktacyjnym włączonym na zaciskach
odbiornika. Moce te spełniają relację

$$(10) \quad Q_F^2 = Q^2 + Q_s^2.$$

Obliczając admitancję odbiorników pokazanych na
rysunku 1 można sprawdzić, że konduktancja odbiornika na
rysunku 1(a) ma dla podstawowej i trzeciej harmonicznej
taką samą wartość $G_1 = G_3 = 0,5 \text{ S}$, a więc moc rozrzutu
tego odbiornika jest równa zero i jest on zatem całkowicie
kompensowalny reaktacyjnie. Odbiornik na rysunku 1(b)
ma konduktancje $G_1 = 0,1 \text{ S}$; $G_3 = 0,9 \text{ S}$, a więc ma nie-
zerową moc rozrzutu Q_s i nie może być skompensowany
reaktacyjnie do współczynnika mocy $\lambda = 1$.

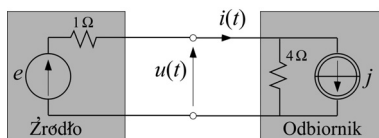
Jakkolwiek teoria mocy Fryzego nie tworzy podstaw
teoretycznych dla projektowania kompensatorów reaktan-
cyjnych, istnieją opinie, że może być podstawą dla konstru-
kcji algorytmów sterowania kompensatorów kluczących,
to jest urządzeń energoelektronicznych, znanych pod
nazwą „filtrów aktywnych”. Działanie takich kompensatorów
polega na wprowadzaniu do obwodu zasilania odbiornika
pewnego prądu, który kompensuje niepożądane składowe
prądu zasilania. Kompensator kluczący działa tak jak
sterowane źródło prądu włączone na zaciski odbiornika jak
to pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Obwód z kompensatorem biernego prądu Fryzego

Według tej koncepcji, wystarczy wyodrębnić z prądu
odbiornika prąd bierny Fryzego $i_{rF}(t)$ i użyć go następnie
jako sygnał sterujący kompensatora, który odtwarza go
jako prąd kompensujący $j_C(t)$.

Podejście takie jest niezmiernie sugestywne, niestety,
nie jest poprawne. Aby to wykazać, rozważmy obwód poka-
zany na rysunku 5.



Rys. 5. Obwód z odbiornikiem generującym harmoniczne prądu

Jeśli w pokazanym obwodzie napięcie źródłowe $e(t)$ jest
sinusoidalne i ma przebieg

$$e(t) = e_1 = 100\sqrt{2} \sin \omega_1 t \text{ V},$$

zaś odbiornik generuje trzecią harmoniczną prądu $j_3(t)$ o
wartości

$$j(t) = j_3 = 50\sqrt{2} \sin 3\omega_1 t \text{ A},$$

to prąd i napięcie w przekroju między odbiornikiem a źró-
dłem mają przebiegi

$$u = u_1 + u_3 = 80\sqrt{2} \sin \omega_1 t - 40\sqrt{2} \sin 3\omega_1 t \text{ V},$$

$$i = i_1 + i_3 = 20\sqrt{2} \sin \omega_1 t + 40\sqrt{2} \sin 3\omega_1 t \text{ A}.$$

Parametry tego obwodu zostały tak dobrane, aby moc
czynna na zaciskach odbiornika

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \sum_{n=1,3} U_n I_n \cos \varphi_n = 1600 - 1600 = 0,$$

tak więc, prąd zasilania nie ma składowej czynnej, gdyż

$$i_a = \frac{P}{\|u\|^2} u \equiv 0,$$

i w sensie teorii mocy Fryzego w obwodzie nie ma innego
prądu, niż tylko prąd bierny

$$i_{rF} = i = 20\sqrt{2} \sin \omega_1 t + 40\sqrt{2} \sin 3\omega_1 t = i_1 + i_3.$$

Kompensacja tego prądu nie ma oczywiście sensu,
gdyż oznaczałoby to przerwanie dopływu energii do odbior-
nika. Kompensacji wymaga w istocie trzecia harmoniczna
prądu zasilania, i_3 , lecz nie jest to prąd bierny Fryzego.

Tak więc, teoria mocy Fryzego tylko pozornie tworzy
podstawy kompensacji odbiorników generujących harmo-
niczne prądu.

Definicja prądu czynnego $i_a(t)$ według koncepcji Fryzego
ma sens tylko wtedy, gdy odbiornik nie jest źródłem harmo-
nicznych, to jest tylko wtedy, gdy odbiornik jest liniowy i
czasowo-niezmienny.

Ponieważ harmoniczne prądu generowane w odbiorniku
mogą powodować przepływ energii z odbiornika do źródła,
tj. moce czynne harmonicznych $P_n = U_n I_n \cos \varphi_n$ mogą być
ujemne, dlatego prąd czynny w teorii mocy Składowych
Fizycznych Prądu definiowany jest [14] odmiennie, niż w
teorii mocy Fryzego, mianowicie, jako prąd minimalny niez-
będny do przenoszenia mocy czynnych tylko tych harmo-
nicznych, które przenoszą energię ze źródła do odbiornika.

Jeśli P_D jest sumą dodatnich mocy czynnych P_n zaś
 $u_D(t)$ jest sumą harmonicznych napięcia, przy których moce
te są dodatnie, to prąd czynny w teorii mocy CPC definio-
wany jest w sposób następujący:

$$(11) \quad i_{aD}(t) \stackrel{\text{df}}{=} G_{eD} u_D(t), \text{ gdzie } G_{eD} \square \frac{P_D}{\|u_D\|^2}.$$

Na przykład, w obwodzie na rysunku 5, $P_D = 1600 \text{ W}$,

$$u_D = 80\sqrt{2} \sin \omega_1 t \text{ V}, \text{ gdzie } G_{eD} = 0,25 \text{ S},$$

a zatem prąd czynny w teorii mocy CPC ma przebieg

$$i_{aD} = 20\sqrt{2} \sin \omega_1 t \text{ A}.$$

Tak więc, kompensator powinien kompensować prąd

$$i_b = i - i_{aD} = 40\sqrt{2} \sin 3\omega_1 t \text{ A}.$$

W wyniku takiej kompensacji napięcie na zaciskach odbior-
nika zmienia się do napięcia $u_D(t)$, a współczynnik mocy
poprawia się do jedności.

Jakkolwiek wynikiem kompensacji odbiorników gene-
rujących harmoniczne nie może być, jak to powyżej poka-
zано, prąd czynny Fryzego, to jednak algorytm sterowania
kompensatora może być oparty na kompensacji prądu bier-
nego $i_{rF}(t)$ według definicji Fryzego. Proces kompensacji w
układach o niezerowej impedancji źródła jest zawsze proces-
sem iteracyjnym i cel kompensacji osiąga się po pewnej
liczbie kroków. Jak to pokazano w pracy [15], nawet, jeśli w
każdym kroku iteracji kompensator ma redukować prąd
bierny Fryzego, to w wyniku kompensacji pozostaje w
prądzie zasilania tylko prąd czynny $i_{aD}(t)$, to jest prąd czyn-
ny wg. w teorii mocy CPC.

Teoria Fryzego a teoria chwilowej mocy biernej p-q

Koncepcje Budeanu i Fryzego zapoczątkowały dwa
zasadniczo różne podejścia do badań i opisu właściwości
energetycznych obwodów elektrycznych. Definicje Budeanu
to definicje w dziedzinie częstotliwościowej, oparte na sze-

regach Fouriera prądu i napięcia. Definicje Fryzego to definicje w dziedzinie czasowej.

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych obecnie teorii mocy sformułowanej w dziedzinie czasowej jest tzw. teoria chwilowej mocy biernej p-q, (CMB p-q) opracowana [17] w roku 1983, przez Nabae'a i Akagi'ego w Tokyo Institute of Technology. Poprawność tej teorii została jednak zakwestionowana w artykule [18]. Jej autorzy powołują się na Fryzego, jako prekursora ich koncepcji [16], jednak nie dostrzegają istotnej różnicy między nimi. Dlatego błędy teorii CMB p-q nie wynikają z jakichś błędów w teorii mocy Fryzego. Autorzy CMB p-q sugerowali [19] możliwość momentalnej identyfikacji właściwości energetycznych odbiornika w oparciu o znajomość momentalnych wartości chwilowej mocy czynnej p i mocy biernej q . W teorii mocy Fryzego składowe prądów i moce są jednak wyznaczane w procesie uśredniania pewnych wielkości chwilowych w ich okresie zmienności T . Dlatego chwilowy prąd czynny w teorii CMB p-q nie ma nic wspólnego z prądem czynnym Fryzego. W tej ostatniej, odbiornik pobiera prąd czynny tylko wtedy, gdy ma niezerową moc czynną. Według teorii CMB p-q, nawet odbiornik czysto reaktancyjny, a więc o zerowej mocy czynnej P , może obciążać źródło chwilowym prądem czynnym [18]. Podobnie, odbiornik czysto rezystancyjny, a więc o zerowej mocy biernej Q , może obciążać źródło chwilowym prądem biernym.

Odwrotnie niż w teorii CMB p-q, w teorii Fryzego pierwotny jest rozkład prądu odbiornika na składową czynną i bierną, zaś moce są już wielkościami wtórnymi względem tego rozkładu. W teorii CMB p-q wielkościami pierwotnymi są moce chwilowe p i q . Moce te są pewnymi formami algebraicznymi iloczynów chwilowych wartości napięcia zasilania i prądu poszczególnych faz odbiornika. Dlatego z przebiegu mocy p i q nie można wnioskować, czy pewne cechy tych mocy pochodzą z cech (harmonicznych lub asymetrii) prądu odbiornika, czy też z podobnych cech napięcia zasilania. Powoduje to generowanie błędnych sygnałów kontrolnych dla kompensatorów kluczujących, pracujących przy odkształconym [20] lub asymetrycznym [21] napięciu zasilania.

Jakkolwiek twórcy teorii CMB p-q powołują się ostatnio [3] na Prof. Fryzego jako na naukowca, który zainicjował koncepcję rozwoju teorii mocy w dziedzinie czasowej, ich podejście nie ma nic wspólnego z koncepcją Fryzego. Błędy teorii CMB p-q są wynikiem odejścia od oryginalnej koncepcji Fryzego, w której pierwotnym jest rozkład prądu odbiornika a nie rozkład mocy.

Dziedzina czasowa i dziedzina częstotliwościowa

Zdecydowaną słabością koncepcji Profesora Fryzego było natomiast całkowite odrzucenie szeregów Fouriera i harmonicznych jako narzędzi pozwalających głębiej wniknąć w naturę zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych. Miał on słuszość ostrzegając nas przed pewnymi wnioskami, które w efekcie stosowania szeregów Fouriera, sugerują istnienie w obwodzie zjawisk energetycznych, których tam w istocie nie ma. Świątną tego ilustracją jest sytuacja w obwodzie pokazanym na rysunku 6.

Jeśli napięcie i prąd na zaciskach odbiornika, który jest niczym innym jak tylko okresowym przełącznikiem, przedstawi się w postaci szeregu Fouriera,

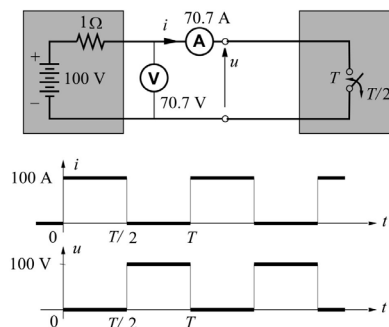
$$(9) \quad u(t) = U_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n,$$

$$(10) \quad i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_1 t + \beta_n) = \sum_{n=0}^{\infty} i_n,$$

wówczas moc chwilowa odbiornika, to jest prędkość przepływu energii W między źródłem i odbiornikiem

tytu energii W między źródłem i odbiornikiem

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



Rys. 6. Obwód z okresowym przełącznikiem

jest nieskończoną sumą oscylujących składników. W rzeczywistości, w obwodzie tym nie ma żadnego przepływu energii, a tym samym żadnych oscylacji energii, gdyż w każdej chwili czasu, wykluczając punkty nieciągłości, iloczyn napięcia i prądu, jak to widać z ich przebiegów, ma wartość zerową. Nie widać tego jednak zupełnie wtedy, gdy moc chwilowa $p(t)$ określona jest w dziedzinie częstotliwości.

Profesor Fryze miał niewątpliwą słuszość podkreślając, że harmoniczne nie istnieją jako obiekty fizyczne; że są jedynie wytworem naszego mózgu. Takie sztuczne obiekty nie powinny być używane według Profesora Fryzego do opisu tak podstawowego zjawiska, jakim jest przepływ energii. Ale prąd czynny i prąd bierny Fryzego są także niczym innym jak tylko wytworami naszego mózgu. Podobnie jest ze wszystkimi składowymi fizycznymi prądami w opracowanej przez mnie teorii mocy CPC. Żadna z nich, pomimo nazwy, fizycznie nie istnieje. Istnieją one wyłącznie jako obiekty matematyczne, podobnie jak i wszystkie moce, łącznie nawet z mocą czynną. Są one jedynie matematycznymi narzędziami do ilościowego opisu zjawisk energetycznych.

Z obserwacji, że niewłaściwe użycie pewnego narzędzia może mieć fatalne skutki, nie należy jednak wyciągać wniosku, że o narzędziu takim należy zapomnieć. Szeregi Fouriera i harmoniczne udowodniły swoimi zastosowaniami, niekiedy nie do zastąpienia, że są podstawowymi narzędziami elektrotechniki. Nie potrafimy zaprojektować filtru rezonansowego czy kompensatora reaktancyjnego bez użycia szeregów Fouriera i harmonicznych. Można to jedynie co najwyżej zrobić, wypranymi z treści fizycznych, metodami optymalizacyjnymi.

Podobnie nie potrafimy wyjaśnić zjawisk energetycznych przy niesinusoidalnych przebiegach prądów i napięć bez użycia harmonicznych, a przynajmniej, nikomu po stu latach badań nad teorią mocy, jeszcze się to nie udało. Pogląd ten potwierdza tzw. metoda FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock) [22], opracowana przez Prof. Depenbrocka, który niemal całość swego życia zawodowego poświęcił badaniom nad teorią mocy. Niestety, starając się nie wyjść poza podejście czasowe, nie był w stanie niczego dodać do tego, co wcześniej dla obwodów jednofazowych uzyskał Profesor Fryze.

Prof. Depenbrock nie ujawnił w odbiorniku jednofazowym żadnego zjawiska odpowiedzialnego za prąd bierny wg. definicji Fryzego. Składowa rozrzutu, bierna i generowana, zidentyfikowane w prądzie odbiornika dzięki teorii mocy CPC, są w metodzie FBD wzajemnie splątane, nie powiązane z parametrami odbiornika i napięciem źródła.

Z tego powodu, metoda FDB nie dostarcza żadnych informacji odnośnie reaktancyjnej kompensacji odbiorników, nawet odbiorników liniowych.

Rezygnując z użycia szeregów Fouriera i harmonicznych, profesor Fryze zapłacił niestety bardzo wysoką naukową cenę. Druga pasja Profesora, jakim były systemy jednostek fizycznych w elektrotechnice, dała mu wyjątkowo głęboki wgląd w zjawiska fizyczne będące fundamentem elektrotechniki. Uehonorowano Go za to stopniem Członka Honorowego Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Pomimo tego, oponując przez wiele lat przeciwko definicjom mocy Budeanu, nie dostrzegł tego, że błąd Budenau nie polega na użyciu harmonicznych, z czym się nie zgadzał, lecz na tym, że nie ma w obwodzie żadnego zjawiska fizycznego określonego ilościowo przez moc bierną Q_B i moc odkształcenia D Budeanu. Teoria ta jest błędna nie z matematycznego, lecz z fizycznego punktu widzenia. Zostało to pokazane w mej pracy [12] z pomocą szeregów Fouriera, a więc w dziedzinie częstotliwości. Dowód błędności teorii mocy Budeanu, przeprowadzony w dziedzinie czasowej, nie jest mi znany.

Podsumowanie

Teoria mocy Składowych Fizycznych Prądu, będąca zwięźczeniem sto lat trwających badań nad wyjaśnieniem i opisem zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych i nad ich modyfikacją z użyciem kompensatorów, nie zawiera już w swej najbardziej zaawansowanej postaci, prądu czynnego czy prądu biernego według definicji Fryzego. Pomimo tego, to właśnie koncepcja Profesora Fryzego w największym stopniu przyczyniła się do jej powstania.

Przebiegając myślami po nazwiskach naukowców pracujących nad rozwojem teorii mocy obwodów elektrycznych, nie znajduję nikogo, kto by w większym stopniu niż Profesor Fryze przyczynił się do jej rozwoju. Wyraziłem ten sam pogląd w artykule [23] i powtarzam go jeszcze raz.

LITERATURA

- [1] Steinmetz, P.Ch., (1892) Is a phase-shift in the current of an electric arc? *Elektrotechnische Zeitschrift*, Heft 42, pp. 567-568.
- [2] Czarnecki, L.S., (2009) Comments to the paper: "Instantaneous p-q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems," *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 85, No. 6, pp. 167-169.
- [3] Watanabe E. H., Akagi H., Aredes M., (2008) Instantaneous p-q Power Theory for compensating nonsinusoidal systems, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp. 28-37.
- [4] Czarnecki L.S., (2008) Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental for power theory, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp.28-37.
- [5] Czarnecki L.S., (2005) Moce w obwodach z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.
- [6] Emde, F., (1921) Zur Definition der Scheinleistung und Blindleistung, *Elektr. und Maschinen.*, pp. 545.
- [7] Budeanu, C.I., (1927) Reactive and apparent powers, *Institut Romain de l'Energie*, Bucharest.
- [8] Illović, M.A., (1925) Definition et mesure de la puissance et de l'energie reactivs, *Bull. Soc. Franc. Electriciens*.
- [9] Fryze, S., (1931) Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, *Przeegląd Elektrotechniczny*, z. 7, 193-203, z. 8, 225-234, 1931, (1932): z. 22, pp. 673-676.
- [10] Czarnecki, L.S., (1972) Miernik mocy biernej w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi, *Zeszyty Nukowe Pol. Śląskiej ELEKTRYKA*, No. 36, pp. 61-69.
- [11] Czarnecki, L.S., (1981) Measurement principle of a reactive power meter for nonsinusoidal systems, *IEEE Trans. Instr. Measurements.*, Vol. 6, No. 30, pp. 209-212.
- [12] Czarnecki, L.S., (1987) What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned, *IEEE Trans. on Instr. Measur.*, Vol. IM-36, No. 3, pp. 834-837.
- [13] Czarnecki, L.S., (1984) Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, No. 3, pp. 399-404.
- [14] Czarnecki, L.S., Swietlicki, T., (1990) Powers in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-39, No. 2, pp. 340-344.
- [15] Czarnecki, L.S., Pearce, S.E., (2010) CPC-based comparison and compensation goals in systems with nonsinusoidal voltages and currents, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 86, 6/2010, pp. 22-29.
- [16] Watanabe E. H., Akagi H., Aredes M., (2008) Instantaneous p-q Power Theory for compensating nonsinusoidal systems, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp. 28-37.
- [17] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., (1984) Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components, *IEEE Trans. on Industry Applic.*, IA-20, No. 3, pp. 625-630.
- [18] Czarnecki L.S., (2004) On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory, *IEEE Trans. on Power Electronics*, V. 19, No.3, pp. 828-836.
- [19] Akagi, H., Nabae, A., (1993) The p-q theory in three-phase systems under nonsinusoidal conditions, *European Trans. on Electric Power, ETEP*, Vol. 3, No. 1, pp. 27-31.
- [20] Czarnecki L.S., (2009) Effect of supply voltage harmonics on IRP p-q-based switching compensator control, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 483-488.
- [21] Czarnecki L.S., (2010) Effect of supply voltage asymmetry on IRP p-q - based switching compensator control, *IET Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-17.
- [22] Staudt, V., (2008) Fryze-Buchholz-Depenbrock: A time-domain power theory, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp.1-11.
- [23] Czarnecki, L.S., (1997) Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents, *Archiv fur Elektrotechnik*, (81), No. 2, pp. 5-15.

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