

Uwagi o definicjach mocy biernej Kustersa i Moore'a obwodów o przebiegach odkształconych

LESZEK S. CZARNECKI (GLIWICE)

Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej

Otrzymano 22.2.1983

Przedmiotem artykułu jest analiza proponowanego przez Kusters'a i Moore'a rozkładu mocy pozornej źródeł w obwodach o przebiegach odkształconych, oraz weryfikacja, w jakim stopniu proponowana przez tych autorów koncepcja jest przydatna dla zagadnienia poprawy współczynnika mocy źródeł. W szczególności wykazano, że wbrew twierdzeniu autorów, kompensacja kondensatorem wielkości nazwanej „pojemnościową mocą bierną” Q_c może nie zapewniać uzyskania w układzie elektroenergetycznym maksymalnej, możliwej przy kompensacji pojemnościowej, wartości współczynnika mocy. Nie jest także słuszny pogląd tych autorów, że pozostająca po kompensacji mocy Q_c moc Q_{cr} nie jest przy pomocy gałęzi pasywnej kompensowalna.

1. WSTĘP

W roku 1980 N. L. Kusters i W. J. M. Moore zaproponowali [1] nowy sposób rozkładu mocy pozornej w obwodach o przebiegach odkształconych, a także wprowadzenie nowych wielkości charakteryzujących właściwości energetyczne takich obwodów. Oprócz tego, że wielkości te mogą być bez trudności mierzone, ich główną zaletą ma być zdaniem autorów to, że dostarczają one informacji co do możliwości poprawy współczynnika mocy źródeł napięcia. Mając na uwadze powyższe zalety, Komitet Techniczny Nr 25 Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC), zajmujący się ustaleniem definicji mocy biernej w obwodach o przebiegach odkształconych, zalecił [2] w raporcie TC25/WG7 stosowanie zaproponowanych wielkości. Niestety, wielkości te nie posiadają pewnych, przypisywanych im, a fundamentalnych dla tej koncepcji właściwości, bądź też tracą je w obwodach rzeczywistych. Dlatego też, mając szczególnie na uwadze rekomendację udzieloną tej koncepcji przez IEC, a mogącą powodować jej rozpowszechnienie się w elektrotechnice, niezbędna jest gruntowna weryfikacja tej koncepcji i stwierdzenie, czy wyciągane z niej wnioski są poprawne.

2. ZAŁOŻENIA I UŻYTA SYMBOLIKA

Rozważania w artykule będą ograniczone do odbiorników jednofazowych, liniowych, stacjonarnych i pasywnych, zasilanych ze źródeł napięcie okresowego, o przebiegach napięcia i pochodnej napięcia całkowalnych z kwadratem. Ponadto, rozważania te będą

ograniczone do obwodów o całkowalnym z kwadratem prądzie źródła. W artykule tym będzie wykazane, że już przy tak silnych ograniczeniach właściwości obwodu koncepcja Kustersa i Moore'a może nie posiadać pewnych, przypisywanych jej cech, nie ma więc potrzeby przyjmowania założeń łagodniejszych od wyżej wymienionych.

Przyjmujemy, że napięcie u na zaciskach odbiornika ma okres T i szereg Fouriera, który będzie przedstawiony w postaci

$$u = U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \underline{U}_n \exp \{jn\omega_1 t\}, \quad (1)$$

gdzie U_0 jest wartością średnią napięcia, $\omega_1 \triangleq 2\pi/T$ oraz

$$\underline{U}_n \triangleq U_n \exp \{j\alpha_n\} \triangleq \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T u \exp \{-jn\omega_1 t\} dt. \quad (2)$$

Pochodną napięcia odbiornika oznaczono symbolem $\dot{u} \triangleq du/dt$ i jest ona równa

$$\dot{u} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} jn\omega_1 \underline{U}_n \exp \{jn\omega_1 t\}. \quad (3)$$

Prąd odbiornika i ma szereg Fouriera

$$i = I_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \underline{I}_n \exp \{jn\omega_1 t\}, \quad (4)$$

gdzie

$$\underline{I}_n \triangleq I_n \exp \{j\beta_n\} \triangleq \frac{2}{T} \int_0^T i \exp \{-jn\omega_1 t\} dt. \quad (5)$$

Wielkości mające powyżej określone właściwości i okres równy okresowi napięcia odbiornika T , oznaczone ogólnie symbolem

$$f \triangleq F_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \underline{F}_n \exp \{jn\omega_1 t\}, \quad (6)$$

tworzą przestrzeń L_T^2 z iloczynem skalarnym

$$(f_r, f_s) \triangleq \frac{1}{T} \int_0^T f_r f_s dt = \operatorname{Re} \sum_{n=0}^{\infty} \underline{F}_{rn} \underline{F}_{sn}^* \quad (7)$$

oraz normą, tj. wartością skuteczną wielkości fizycznej f

$$\|f\| \triangleq \sqrt{(f, f)} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} F_n^2}. \quad (8)$$

3. ZASADNICZE TEZY KONCEPCJI KUSTERSA I MOORE'A

Aby wyjaśnić istotę koncepcji Kustersa i Moore'a, będzie ona przedstawiona tutaj odmiennie, niż jest to uczynione w pracy [1], z dwóch powodów. Po pierwsze dlatego, aby wyjaśnić genezę wynikających z niej wniosków, a po wtóre, aby nie powtórzyć występują-

cych w powyższej pracy niekonsekwencji, w rodzaju takiej jak ta, że wartości skuteczne mogą być ujemne.

Kusters i Moore proponują dwa, alternatywne sposoby rozkładu prądu i mocy pozornej źródła, których wybór zależy od tego, czy moc bierna źródła może być kompensowana pojemnościowo czy indukcyjnie. Ponieważ w układach elektroenergetycznych ma się do czynienia raczej z kompensacją pojemnościową, dlatego analiza zostanie w artykule ograniczona do wariantu użytecznego przy takiej właśnie kompensacji. Wnioski uzyskane z tej analizy, po ich odpowiedniej modyfikacji, mogą być jednak przeniesione na wariant pozostały.

Według Kustersa i Moore'a, prąd źródła może być przedstawiony w postaci sumy trzech składowych, mianowicie

$$i = i_a + i_{qc} + i_{qcr}, \quad (9)$$

przy czym

$$i_a \triangleq \frac{P}{\|u\|^2} u \quad (10)$$

jest składową czynną prądu, lub po prostu prądem czynnym, zdefiniowanym już w roku 1931, o czym autorzy pracy [1] nie wspominają, przez Fryzego [3]. Składową i_{qc} autorzy pracy [1] definiują jako

$$i_{qc} \triangleq \frac{(\dot{u}, i)}{\|\dot{u}\|^2} \dot{u} \quad (11)$$

i nazywają „pojemnościowym prądem biernym” (ang. *a capacitive reactive current*), natomiast

$$i_{qcr} \triangleq i - i_a - i_{qc} \quad (12)$$

autorzy nazywają „reszkowym prądem biernym” (ang. *a residual reactive current*).

Jak można wnioskować z podanej w pracy [1] relacji między wartościami skutecznymi tych składowych

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_{qc}\|^2 + \|i_{qcr}\|^2, \quad (13)$$

autorzy przypisują składowym i_a , i_{qc} , i_{qcr} wzajemną ortogonalność, a więc

$$(i_a, i_{qc}) = (i_{qc}, i_{qcr}) = (i_a, i_{qcr}) = 0. \quad (14)$$

Moc pozorna źródła, $S \triangleq \|u\| \|i\|$, może być według Kustersa i Moore'a rozłożona w sposób następujący

$$S^2 = P^2 + Q_c^2 + Q_{cr}^2, \quad (15)$$

przy czym P jest mocą czynną odbiornika; wielkość

$$Q_c \triangleq \frac{\|u\|}{\|\dot{u}\|} (\dot{u}, i) \quad (16)$$

autorzy nazywają „pojemnościową mocą bierną” (ang. *a capacitive reactive power*), natomiast

$$Q_{cr} \triangleq \sqrt{S^2 - P^2 - Q_c^2}. \quad (17)$$

W koncepcji tej występuje także wielkość, zdefiniowana jako

$$I_{qc} \triangleq \frac{(\dot{u}, i)}{\|\dot{u}\|}, \quad (18)$$

nazywana przez autorów „wartością skuteczną pojemnościowego prądu biernego”. Może jednak ona przyjmować wartości ujemne, a więc w istocie wartość skuteczną tego prądu $\|i_{qc}\| = |I_{qc}|$. Zachodzi natomiast

$$Q_c = \|u\| I_{qc}. \quad (19)$$

Gdy określona wzorem (16) moc Q_c jest ujemna, wówczas może być ona skompensowana przez włączenie na zaciski odbiornika kondensatora o pojemności

$$C = -\frac{Q_c}{\|u\| \|\dot{u}\|} \quad (20)$$

oraz o mocy znamionowej

$$S_{zn} \geq S_c = -Q_c, \quad (21)$$

gdzie S_c jest mocą pozorną kondensatora.

Wśród wniosków sformułowanych przez autorów, dwa z nich, gdyby były prawdziwe, miałyby dla zagadnienia poprawy współczynnika mocy źródeł w obwodach o przebiegach odkształconych zasadnicze znaczenie, dlatego cytujemy je poniżej w oryginalnym brzmieniu.

W1. „*The various components (wyrażeń (9) i (15)) can be segregated and measured with relatively simple instrumentation and the results can be readily applied by power engineers to realize the maximum obtainable compensation for reactive power using (...) shunt capacitors*”.

W2. „*The residual reactive component (...) is always positive and compensation by means of passive components is not possible*”.

Jak się jednak okaże, wnioski te nie są prawdziwe. Poprawność drugiego z nich została zakwestionowana przez J. L. Willensa, już w komentarzu do pracy [1], mimo to, koncepcja ta uzyskała rekomendację Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC) [2], a także, jak o tym świadczą nawiązujące do niej prace [4, 5], rozprzestrzenia się w elektrotechnice. Jest to świadectwem jej atrakcyjności, co przy błędności wyżej podanych wniosków, nie jest uzasadnione. Dlatego niezbędna jest ich szczegółowa i przekonująca weryfikacja uzupełniona unaoczniającymi ich błędność przykładami.

4. WERYFIKACJA WNIOSKU W1

Rozkład prądu odbiornika na składowe i_a , i_{qc} , i_{qcr} można interpretować jako zastąpienie odbiornika dwójnikiem przedstawionym na rys. 1b. Jeśli gałąź rezystancyjna ma konduktancję $G_e \triangleq P/\|u\|^2$, natomiast gałąź pojemnościowa ma pewną pojemność C oraz $j_{qcr} \triangleq i - i_a - i_{qc}$, wówczas, gdy

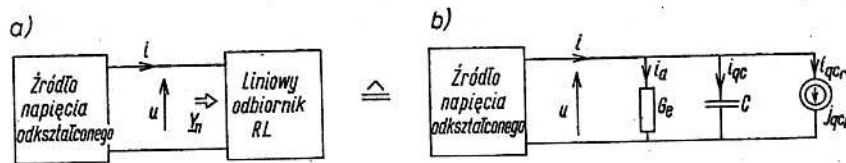
$$\underline{Y}_n \triangleq Y_n e^{-j\varphi_n} \triangleq G_n + jB_n \quad (22)$$

jest admitancją odbiornika dla pulsacji $n\omega_1$, to

$$i_a = G_e U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} G_e \underline{U}_n \exp \{jn\omega_1 t\}, \quad (23)$$

$$i_{qc} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} jn\omega_1 C \underline{U}_n \exp \{jn\omega_1 t\}, \quad (24)$$

$$i_{qcr} = (G_o - G_e) U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (Y_n - G_e - jn\omega_1 C) \underline{U}_n \exp \{jn\omega_1 t\}. \quad (25)$$



Rys. 1. Obwód z liniowym odbiornikiem RL (a) i jego dwójnikiem równoważnym (b)

Sprawdźmy, czy składowe te są wzajemnie ortogonalne. Otrzymamy

$$(i_a, i_{qc}) = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} G_e \underline{U}_n (jn\omega_1 C \underline{U}_n)^* = 0, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} (i_a, i_{qcr}) &= G_e U_o (G_o - G_e) U_o + \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} G_e \underline{U}_n (Y_n - G_e - jn\omega_1 C)^* \underline{U}_n^* = \\ &= G_e (G_o - G_e) U_o^2 + \sum_{n=1}^{\infty} G_e (G_n - G_e) U_n^2 = \\ &= G_e \left[\sum_{n=0}^{\infty} G_n U_n^2 - G_e \sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \right] = G_e (P - P) = 0, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} (i_{qcr}, i_{qc}) &= \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (Y_n - G_e - jn\omega_1 C) \underline{U}_n (jn\omega_1 C \underline{U}_n)^* = \\ &= C \sum_{n=1}^{\infty} n\omega_1 B_n U_n^2 - C^2 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \omega_1^2 U_n^2 = C(\dot{u}, \dot{u}) - C^2 \|\dot{u}\|^2. \end{aligned} \quad (28)$$

Ostatni z iloczynów skalarnych jest równy zeru, a więc składowe i_a , i_{qc} , i_{qcr} są wzajemnie ortogonalne, gdy pojemność C jest równa pewnej pojemności równoważnej

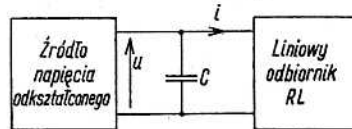
$$C = C_e \triangleq \frac{(\dot{u}, \dot{u})}{\|\dot{u}\|^2}, \quad (29)$$

a więc, gdy prąd gałęzi pojemnościowej ma rzeczywiście wartość zdefiniowaną wzorem (11). Moc bierna kondensatora o pojemności zapewniającej ortogonalność składowych i_a , i_{qc} , i_{qcr} jest właśnie wielkością nazwaną „pojemnościową mocą bierną” Q_c .

Sprawdźmy teraz, czy kondensator o pojemności $C = -C_e$, włączony równoległe względem odbiornika (rys. 2), minimalizuje moc pozorną źródła

$$S = \|u\| \|i + C\dot{u}\|, \quad (30)$$

gdzie u oraz i są wartościami napięcia źródła i prądu odbiornika przy włączonej pojemności C .



Rys. 2. Obwód z kondensatorem kompensującym

Jednak równanie

$$\frac{\partial S}{\partial C} = 0, \quad (31)$$

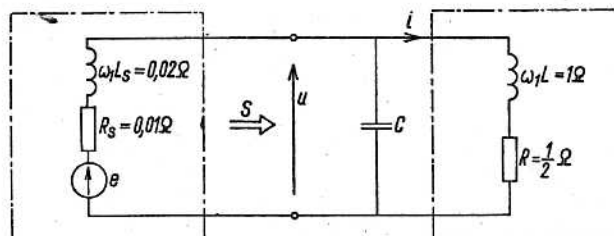
będące warunkiem koniecznym minimalizacji mocy pozornej, ma rozwiązanie

$$C = -\frac{(\dot{u}, i)}{\|\dot{u}\|^2} = -C_e \quad (32)$$

tylko wtedy, gdy napięcie źródła u jest niezależne od pojemności C . Natomiast wtedy, gdy włączenie kondensatora powoduje zmianę napięcia źródła, a zatem i parametrów obwodu zastępczego odbiornika, wówczas nawet pewien proces iteracyjny, polegający na wyznaczaniu (na drodze obliczeń lub pomiarów) ciągu oraz dokładniejszych wartości (\dot{u}, i) , $\|\dot{u}\|$, C , nie pozwala określić pojemności minimalizującej moc pozorną źródła, gdyż nie jest ona określona relacją (32).

Konkludując, w przypadku źródeł nieidealnych, ortogonalny rozkład prądu (9) nie pozostaje w wyraźnej relacji do zagadnienia minimalizacji mocy pozornej źródła oraz wniosek W1 nie jest prawdziwy. Ponieważ impedancja źródeł w układach elektroenergetycznych jest wielokrotnie mniejsza od impedancji odbiorników, zatem mógłby ktoś uznać wzór (32) za wzór określający przybliżoną wartość pojemności, która minimalizuje moc pozorną źródła. Jednak, jak na to wskazuje poniższy przykład liczbowy, nawet taki wniosek może nie być poprawny.

Przykład 1. W obwodzie przedstawionym na rys. 3 źródło napięcia o znormalizowanej pulsacji $\omega_1 = 1$ rad/s zawiera harmoniczną podstawową o wartości skutecznej



Rys. 3. Przykład obwodu z kondensatorem kompensującym

$E_1 = 100$ V oraz piątą i siódmą o wartościach skutecznych $E_5 = 3\%E_1$, $E_7 = 2\%E_1$. Wartość współczynnika mocy źródła $\lambda \triangleq P/S$ oraz wartości (\dot{u}, i) , $\|u\|$, $\|\dot{u}\|$ pozwalające obliczyć moc Q_c oraz pojemność równoważną C_e odbiornika przy braku pojemności kompensującej, zestawione są w kolumnie (1) tablicy 1.

Tablica 1

Wyniki kolejnych prób kompensacji mocy Q_c w obwodzie z przykładu 1

		(1)	(2)	(3)	(4)	...	(6)
C	F	0	0,769	0,610	0,696	...	0,672
λ	—	0,447	0,682	0,800	0,767	...	0,784
(\dot{u}, i)	$\frac{VA}{S}$	-7702	-8002	-7916	-7957	...	-7945
$\ u\ $	V	98,10	99,92	99,42	99,67	...	99,59
$\ \dot{u}\ $	$\frac{V}{S}$	100,08	114,52	106,65	109,80	...	108,74
S_c	VA	—	8800	6468	7616	...	7277
Q_c	VA	-7949	-6982	-7379	-7223	...	-7277
C_e	F	-0,769	-0,610	-0,696	-0,660	...	-0,672

Włączenie kondensatora o pojemności $C = -C_e$ zmienia poprzednie wyniki do wyników zestawionych w kolumnie (2), przy czym S_c oznacza moc pozorną włączonego kondensatora. Ponieważ $C \neq C_e$, wartość włączonej pojemności jest ponownie korygowana. Proces kolejnych korekcyjnych wyników jest zbieżny do wartości zestawionych w kolumnie (6), jednak lepsze wyniki kompensacji (tj. wyższy współczynnik mocy λ , przy mniejszej mocy pozornej kondensatora S_c) były uzyskane wcześniej, przy pojemności $C = 0,610$ F (kolumna (3)), różnej od ujemnej wartości pojemności równoważnej C_e oraz przy mocy biernej kompensującego kondensatora różnej od mocy Q_c . Co więcej, jak wynikało z doświadczeń autora, przy reaktancji źródła powiększonej do wartości $\omega_1 L_z = 0,03 \Omega$, proces korekcji pojemności nie jest już zbieżny.

Tak więc, przy proporcjach i charakterze impedancji źródeł i odbiorników takich jakie mogą występować w systemach elektroenergetycznych, koncepcja Kustersa i Moore'a nie dostarcza informacji mogących być podstawą wyboru pojemności kompensującej.

5. WERYFIKACJA WNIOSKU W2

Aby wykazać błędność wniosku W2 założymy, że właściwości obwodu umożliwiają kompensację mocy Q_c , tj. źródło napięcia jest źródłem bezimpedancyjnym. Prąd źródła

$$i = G_o U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (G_n + jB_n) U_n \exp \{j n \omega_1 t\} \quad (33)$$

może być rozłożony na składowe

$$i_d \triangleq G_o U_o + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} G_n U_n \exp \{j n \omega_1 t\}, \quad (34)$$

$$i_r \triangleq \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} j B_n U_n \exp \{j n \omega_1 t\}. \quad (35)$$

Ponieważ iloczyn skalarny tych składowych $(i_d, i_r) = 0$, są one wzajemnie ortogonalne, a więc

$$\|i\|^2 = \|i_d\|^2 + \|i_r\|^2, \quad (36)$$

gdzie

$$\|i_d\| = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} G_n^2 U_n^2}, \quad \|i_r\| = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 U_n^2}. \quad (37a, b)$$

Ponieważ źródło jest idealne, zatem pojemnościowa moc bierna Q_c może być całkowicie skompensowana kondensatorem o pojemności $C = -C_e$ włączonym równolegle względem odbiornika. Zmienia on admitancję na zaciskach źródła do wartości

$$Y_n = G_n + j B_n - j n \omega_1 C_e, \quad (38)$$

a więc, nie zmieniając składowej i_d , kondensator o takiej pojemności zmienia wartość skuteczną składowej i_r prądu źródła do wartości

$$\|i_r\| = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (B_n - n \omega_1 C_e)^2 U_n^2}, \quad (39)$$

która, poza szczególnymi przypadkami, pozostaje większa od zera. Może zatem istnieć pewien zbiór liczb B_{rn} , takich że

$$0 \leq \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (B_n - n \omega_1 C_e + B_{rn})^2 U_n^2} < \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (B_n - n \omega_1 C_e)^2 U_n^2}, \quad (40)$$

a liczby te mogą być susceptancjami dla częstotliwości harmonicznym pewnego dwójnika reaktancyjnego, który włączony równolegle względem kompensującego moc Q_c kondensatora zmniejszy wartość skuteczną składowej i_r prądu źródła względem jej wartości, gdy $Q_c = 0$. W szczególności, gdy napięcie źródła ma skończoną liczbę harmonicznym o numerach n z pewnego zbioru \mathcal{U} , wówczas dwójnik reaktancyjny o parametrach skupionych i susceptancji, dla każdego $n \in \mathcal{U}$, równej

$$B_{rn} = n \omega_1 C_e - B_n \quad (41)$$

kompensuje składową i_r do zera. Co więcej, dwójniki reaktancyjne mogące posiadać właściwość (41) tworzą zbiór mocy continuum.

Przykład 2. Odbiornik przedstawiony na rys. 4a zasilany jest z idealnego źródła napięcia przemiennego o pulsacji $\omega_1 = 1$ rad/s, zawierającego trzy pierwsze harmonicznym przebiegu prostokątnego o wartościach skutecznych $U_1 = 100$ V, $U_3 = \frac{1}{3} U_1$, $U_5 = \frac{1}{5} U_1$,

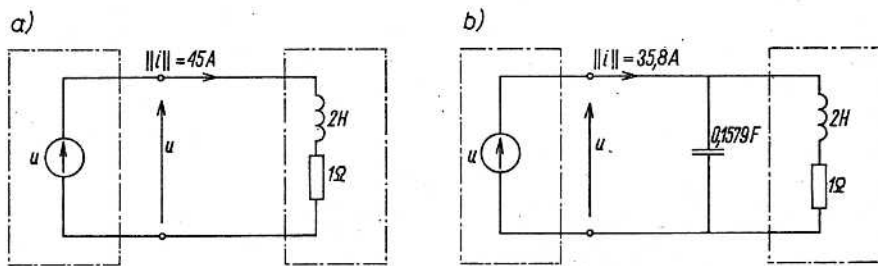
$\mathcal{U} = \{1, 3, 5\}$. Susceptancja odbiornika dla $n \in \mathcal{U}$ ma wartości

$$B_1 = -0,400 \text{ S}, \quad B_3 = -0,16216 \text{ S}, \quad B_5 = -0,09901 \text{ S},$$

pojemnościowa moc bierna $Q_c = -2935 \text{ VA}$, i może być skompensowana kondensatorem o pojemności $C = -C_e = 0,1579 \text{ F}$ (rys. 4b). Wyniki kompensacji są zestawione w tablicy 2.

Zupełną kompensację składowej i_r można uzyskać włączając równolegle względem odbiornika kompensującego moc Q_c dwójnik reaktancyjny, którego susceptancja dla $n \in \mathcal{U}$ ma wartości wynikające ze wzoru (41), równe

$$B_{r1} = 0,2420 \text{ S}, \quad B_{r3} = -0,3117 \text{ S}, \quad B_{r5} = -0,6907 \text{ S}.$$



Rys. 4. Przykład obwodu (a) i obwodu z kondensatorem kompensującym moc Q_c (b)

Tablica 2

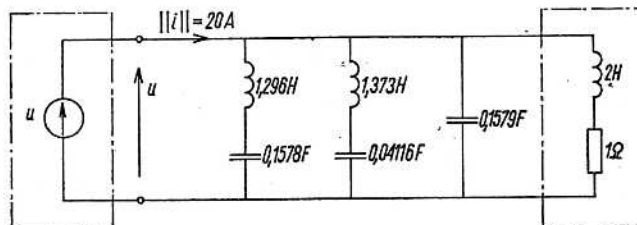
Zestawienie wyników minimalizacji wartości skutecznej prądu źródła obwodu z przykładu 2, przy kompensacji mocy Q_c i przy kompensacji prądu i_r

Kompens.		nie komp.	$C = -C_e$	komp. złoż.
λ	—	0,42	0,53	0,95
$\ i_r\ $	A	40,4	29,7	0
$\ i\ $	A	45,1	35,8	20,0

susceptancję taką ma na przykład dwójnik reaktancyjny o admitancji operatorowej

$$Y_r(s) = \frac{1,5s^3 + 17,217s}{s^4 + 22,588s^2 + 86,520}$$

który może mieć strukturę i parametry przedstawione na rys. 5.



Rys. 5. Przykład kompensacji zupełnej i składowej biernej prądu źródła

Powyzsze rozwiazania oraz przyklad liczbowy dobitnie wykazuja mozliwosc kompensacji mocy biernej zrodla przy pomocy elementow pasywnych, nawet wtedy, gdy moc Q_c zostala juz calkowicie skompensowana, a wiec na blednosc wniosku W2. Nie oznacza to jednak, ze cala moc Q_{cr} moze byc skompensowana dwójnikiem pasywnym. Jezeli jest on bezstratny, to moc pozorna zrodla nie moze byc mniejsza niz

$$S_o \triangleq \|u\| \|i_d\|, \quad (42)$$

a wiec moc Q_{cr} nie moze byc zmniejszona ponizej wartosci

$$Q_{cro} \triangleq \sqrt{S_o^2 - P^2} = \sqrt{\left(\sum_{n \in \mathcal{U}_o} U_n^2\right) \sum_{n \in \mathcal{U}_o} G_n^2 U_n^2 - \left(\sum_{n \in \mathcal{U}_o} G_n U_n^2\right)^2}, \quad (43)$$

gdzie \mathcal{U}_o oznacza zbior numerow harmonicznycy napięcia wraz z zerem.

Dość uciążliwe porządkowanie prawej strony wyrażenia (43) pozwala przedstawić moc bierną, która nie może być skompensowana dwójnikiem pasywnym, włączonym na zaciski odbiornika, w postaci

$$Q_{cro} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{r \in \mathcal{U}_o} \sum_{s \in \mathcal{U}_o} (G_r - G_s)^2 U_r^2 U_s^2}. \quad (44)$$

W szczególności, dla odbiorników, dla których, dla każdego $r, s \in \mathcal{U}_o$, $G_r = G_s$, $Q_{cro} = 0$ i moc bierna jest przy pomocy dwójników pasywnych całkowicie kompensowalna.

6. WNIOSKI

Przeprowadzona w artykule weryfikacja właściwości przypisywanych wielkościom Q_c oraz Q_{cr} wykazuje, że nie dostarczają one właściwych informacji dotyczących kompensacji mocy biernej w obwodach o przebiegach odkształconych i poprawy współczynnika mocy źródeł. Jedynie w przypadkach kompensacji mocy biernej źródeł o bardzo sztywnym napięciu, przy rezygnacji z innych sposobów kompensacji niż kompensacja pojemnościowa, można, zachowując ostrożność, posługiwać się mocą Q_c , korzystając z tego, że może być ona łatwo wyznaczona na drodze pomiarowej.

LITERATURA

1. N. L. Kusters, W. J. M. Moore, *On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions*, IEEE Trans. Power Appl. Syst., Vol. PAS-99, Sept., pp. 1845—1854.
2. International Electrotechnical Commission, Technical Committee No. 25, *Reactive power in nonsinusoidal situations*, Report of TC 25/WG7, 25 (Secretariat) 113, December, 1979.
3. S. Fryze, *Moc czynna, bierna i pozorna w obwodach o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, 1931, nr 7, s. 193—203, nr 8, s. 225—234.
4. C. H. Page, *Reactive power in nonsinusoidal situations*, IEEE Trans. Instr. and Meas., Vol. IM-29, No 4, Dec. 1980, s. 420—423.
5. G. Fodor, G. Tevan, *Powers and compensation in networks in periodic state*, Archiv für Elektrotechnik, 65, 1982, s. 27—40.

L. S. CZARNECKI

COMMENTS ON THE REACTIVE POWER IN NONSINUSOIDAL SYSTEMS DEFINITIONS
BY KUSTERS AND MOORE

Summary

The paper presents a critical analysis of the apparent power in nonsinusoidal systems decomposition, proposed by Kusters and Moore as well as a verification to what degree that concept is useful for the power-factor improvement problems. In particular it was shown, in despite of the authors' claims, that the capacitive reactive power, Q_c , compensation may not result in the highest value of the power-factor, which is possible at the capacitive compensation. Also, the conclusion that the „residual reactive power”, Q_{cr} , cannot be compensated by a passive branch, is not true.

L. S. CZARNECKI

QUELQUES REMARQUES SUR LES DÉFINITIONS DE KUSTERS ET DE MOORE
DE LA PUISSANCE RÉACTIVE DES CIRCUITS À RÉGIMES PÉRIODIQUES

Résumé

Dans ce travail on fait la critique de l'analyse, proposée par Kusters et Moore, de la répartition de la puissance apparente des sources dans les circuits à régimes périodiques. On vérifie aussi dans quelle mesure la méthode proposée est utile, dans le cas du problème de l'amélioration du facteur de puissance. On démontre que, contrairement à l'affirmation des auteurs, la compensation de la grandeur nommée „puissance réactive capacitive”, Q_c n'entraîne pas la valeur maximale du facteur de puissance. Il n'est pas vrai non plus, que la puissance Q_{cr} , obtenue après la compensation de la puissance Q_c , ne soit pas compensable à l'aide d'une branche passive.

L. S. CZARNECKI

ANMERKUNGEN ÜBER DIE DEFINITIONEN DER REAKTIVLEISTUNG
VON KUSTERS UND MOORE IN KREISEN MIT NICHT SINUSFORMIGEN VORGÄNGEN

Zusammenfassung

Gegenstand des Artikels ist die Analyse der von Kusters und Moore vorgeschlagenen Verteilung der Quellenscheinleistung in Kreisen mit nicht sinusförmigen Vorgängen, sowie die Überprüfung, inwieweit diese Methode im Fragepunkt der Verbesserung vom Quellenleistungsfaktor nützlich ist. Es wurde nachgewiesen, daß im Gegensatz zur Behauptung der Autoren, die Kompensation, die als „Kapazitive Reaktivleistung”, Q_c , bezeichnet wird, den maximalen Leistungsfaktor nicht gewährleisten kann. Ebenfalls falsch ist die Behauptung, daß die nach der Kompensation von Leistung Q_c zurückgebliebene Leistung Q_{cr} mit Hilfe des passiven Zweiges nicht kompensierbar ist.

Л. С. ЧАРНЕЦКИ

О ДЕФИНИЦИЯХ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ Kusters'a и Moore'a ЦЕПЕЙ
С ДЕФОРМИРОВАННЫМИ ПРОБЕГАМИ

Резюме

Проведен анализ предлагаемого Кустерсом и Моором распределения кажущейся мощности источников в цепях с деформированными пробегами и проверена степень пригодности предлагаемой ими идеи для улучшения коэффициента мощности источников. Показано, что вопреки утверждениям авторов, компенсация величины называемой „опережающей реакционной мощностью” Q_c может не обеспечить максимальной, возможной при емкостной компенсации, величины коэффициента мощности. Ошибочным является мнение авторов, что мощность Q_{cr} , остающаяся после компенсации мощности Q_c , не компенсируется при помощи пассивной ветви.