

Metoda obliczania pełnej i optymalnej kompensacji mocy biernej nieliniowych odbiorników jednofazowych lub trójfazowych niesymetrycznych przy zasilaniu źródłami rzeczywistymi sinusoidalnymi

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono koncepcję metody obliczeń kompensacji optymalnej i pełnej (w sensie Fryzego) odbiornika nieliniowego. Przyjęto założenie, że jedyną przyczyną odkształcenia jest odbiornik nieliniowy. Sformułowano warunki redukcji odbiornika nieliniowego po kompensacji pełnej do quasi-liniowego rezystora o znanej charakterystyce $P = f(U)$. Pokazano, że kompensacja pełna nie zawsze gwarantuje minimum wartości skutecznej prądu w linii zasilającej a nawet może w przypadku odbiornika nieliniowego spowodować jej wzrost. W tym celu dla uzyskania efektywnego zmniejszenia prądu sformułowano algorytm kompensacji optymalnej. Na wybranych przykładach zilustrowano i potwierdzono różne możliwe sytuacje kompensacji optymalnej w obwodach liniowych i nieliniowych.

Abstract: The paper presents the concept of the method and algorithm for optimal compensation of reactive power and full (in the Fryze sense) on the set of non-linear. It was assumed that the only source of strain is non-linear receiver. Formulated conditions for the reduction of non-linear receiver compensated fully for quasi-linear resistor of known characteristics $P = f(U)$. It was shown that full compensation does not always guarantee a minimum RMS current in the power supply line even if the receiver can result in a non-linear increase. For this purpose, in order to obtain an effective reduction of the current optimal compensation algorithm formulated. Using examples, illustrated and confirmed various possible situations the optimum compensation of linear and nonlinear circuits **The method of calculation full and optimum reactive power compensation for non-linear single-phase or three-phase asymmetrical receivers by the power supply real sinusoidal sources**

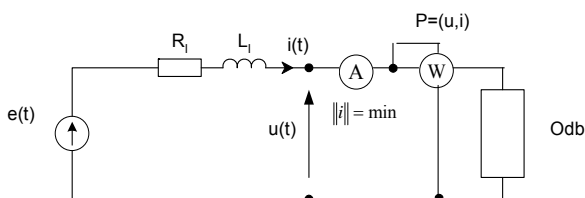
Słowa kluczowe: teoria mocy, prądy niesinusoidalne, mocy biernej, kompensacja optymalna .

Keywords: power theory, non-sinusoidal current, reactive power, optimum compensation

doi:10.12915/pe.2014.09.54

Wstęp

W aspekcie ekonomicznym wymagany jest oczywisty warunek, aby przesyłanie energii elektrycznej ze źródła do odbiornika było możliwe przy najmniejszej wartości skutecznej prądu w linii. Pozwala to na zmniejszenie wydatków inwestycyjnych (zmniejszenie przekroju przewodów linii przesyłowych) jak również kosztów eksploatacyjnych związanych ze stratami energii w przewodach linii. Powoduje to również obniżenie spadków napięcia a więc poprawę jakości przesyłanej energii.



Rys.1 Schemat układu wyjściowego jednofazowego

przedmiot analizy. Przy zadanym przebiegu okresowym SEM (siła elektromotoryczna) idealnego źródła $e(t)=e(t+T)$ i nie zerowych parametrach linii $R_l \neq 0$, $L_l \neq 0$, napięcie zasilające odbiornik; realizuje źródło rzeczywiste (źródło elastyczne zależne od obciążenia) $u(t) \neq e(t)$.

W przypadku przyjęcia zerowych parametrów linii $R_l = 0$, $L_l = 0$, $u(t) = e(t)$ źródło zasilające jest idealne (źródło sztywne).

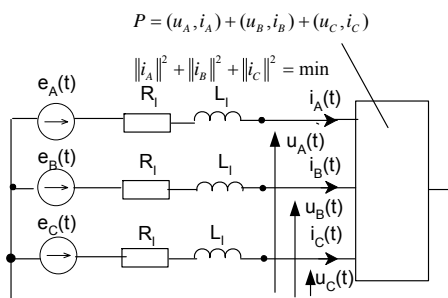
W przypadku źródła (sztywnego) idealnego $e(t)$ o przebiegu okresowym sinusoidalnym lub niesinusoidalnym, zagadnienie minimalizacji prądu dla dowolnego odbiornika (liniowego lub nieliniowego), sprowadza się do pełnej kompensacji mocy biernej absolutnej w sensie Fryzego, która stanowi oddzielny przedmiot wielu opracowań i jest przedmiotem wielu publikacji [1,2,6,7,8,9,10] a szczególnie w nowym ujęciu przedstawionym w [11].

Sytuacja ulega pewnej komplikacji w przypadku uwzględnienia dwóch lub nawet jednego z parametrów linii R_l , L_l . Należy podkreślić, że szczególnie uciążliwa jest analiza zagadnienia przy niezerowej rezystancji linii $R_l \neq 0$ [3,4,5].

W celu przedstawienia efektywnych obliczeń optymalizacji czyli osiągnięcia minimalnych strat energii, autorzy proponują przyjęcie założenia, że jedynym źródłem generującym odkształcenia prądu nie są napięcia zasilające ale elementy nieliniowe odbiornika. Przeciwnie w praktyce wymaga się zapewnienia takiej konstrukcji generatora aby odchylenie wytwarzanej w generatorze SEM $e(t)$ od sinusoidy nie przekraczało 5%. Przyjęcie proponowanego założenia jest więc w pełni uzasadnione.

Rozszerzenie metody na przypadek linii 3-fazowej wymaga przyjęcia założenia symetrycznego sinusoidalnego układu zasilającego $e_A = e(t)$, $e_B = e(t-T/3)$, $e_C = e(t-2T/3)$ oraz symetrycznej 3 fazowej 3 lub 4 przewodowej linii zasilającej (z przeplataniami), założenia, które również jest powszechnie spełnione w praktyce

Przyjęte założenia pozwalają na obliczenie kompensacji optymalnej, przy wykorzystaniu względnie prostego aparatu obliczeniowego.



Rys.2 Schemat układu trójfazowego

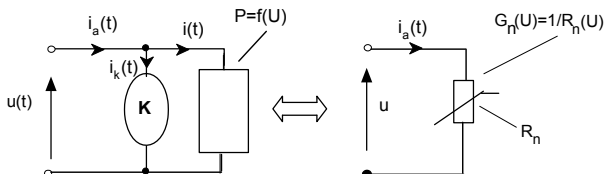
Na rys.1 przedstawiono rozpatrywany jednofazowy układ a na rys.2 trójfazowy układ i wielkości stanowiące

Zastosowanie metody przedstawiono na wybranych przykładach. Uzyskane wyniki potwierdzają potrzebę stosowania optymalnej kompensacji. W przypadku odbiorników nieliniowych sama pełna kompensacja mocy biernej absolutnej w sensie Fryzego nie zawsze wystarcza a może nawet sytuację pogorszyć, powodując wzrost pobieranego prądu. Kompensacja optymalna jeśli istnieje, wymaga w realizacji wprowadzenia odpowiednio dobranego prądu kompensacji, który może być zrealizowany przez liniową reaktancję X_K .

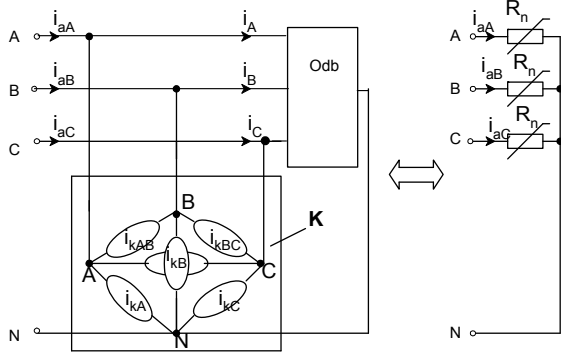
Sformułowanie metody

Punktem wyjścia proponowanej metody jest wstępne rozpoznanie odbiornika.

W tym celu przyłączamy nieliniowy odbiornik (rys.1) do sinusoidalnego źródła napięcia u i rejestrujemy przebieg prądu i oraz wartość pobieranej mocy czynnej P . Moc $P=f(U)$ jest funkcją wartości skutecznej napięcia $\|u\|=U$.



Rys.3 Redukcja odbiornika jednofazowego nieliniowego (po kompensacji mocy biernej Fryzego) do rezystora quasi-liniowego



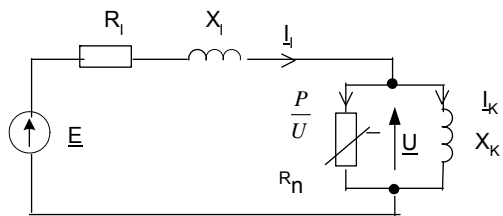
Rys.4 Redukcja odbiornika 3-fazowego nieliniowego (po kompensacji mocy biernej absolutnej) do symetrycznej gwiazdy rezystorów quasi-liniowych

Realizacja kompensacji w układach (rys. 3, 4) wymaga zastosowania jako bezstratnych elementów kompensatora K elementów parametrycznych lub nieliniowych [1, 2, 11]. Przy tym ich parametry zależą od przebiegów napięcia i prądów. Jak pokazano [11] w układach trójfazowych 4-przewodowych, pełny układ kompensacji mocy biernej absolutnej jest zupełnym czwór-biegunem o wierzchołkach (A,B,C,N).

Należy podkreślić, że pełna kompensacja mocy biernej absolutnej w sensie Fryzego, przy dowolnym zasilaniu również odkształconym, sprowadza zawsze odbiornik nieliniowy do quasi-liniowego rezystora o charakterystyce nieliniowej $P=f(U)$, konduktancji $G_n=P/U^2$, lub rezystancji $R_n=U^2/P$, a w układzie trójfazowym 4-przewodowym do gwiazdy symetrycznej rezystorów quasi-liniowych.

Podstawy teoretyczne metody

Całkowity schemat obwodu jednofazowego do optymalnej kompensacji po redukcji jak na rys. 3 i zbocznikowaniu reaktancja X_K przedstawiono na rys.5. Odpowiada on również wyodrębnionej jednej fazie odbiornika 3-fazowego.



Rys.5 Schemat obwodu quasi-liniowego jednofazowego do optymalnej kompensacji

W przedstawionym na rys. 5 obwodzie quasi-liniowym spełnione są równania zespolone, przy czym przyjęto $\underline{U}=U$

$$(1) \quad (R_l + jX_l)I_l + \underline{U} = \underline{E}$$

$$(2) \quad I_l = \frac{P}{U} - jI_K$$

Po podstawieniu (2) do (1) i przejściu do wartości modułowych, otrzymuje się

$$(3) \quad \left(R_l \frac{P}{U} + X_l I_K + U \right)^2 + \left(X_l \frac{P}{U} - R_l I_K \right)^2 = E^2$$

$$(4) \quad I_l^2 = \left(\frac{P}{U} \right)^2 + I_K^2, \quad P = f(U)$$

W dwóch równaniach powyższych jako dane są : $R_l, X_l, E, P=f(U)$, a niewiadomymi są $U=? , I_K=?$.

Wartość skuteczna prądu linii I_l jest funkcją prądu kompensacji I_K , stąd warunkiem optymalizacji czyli osiągnięcia minimum wartości I_l jest znikanie pochodnej

$$(5) \quad \frac{dI_l^2}{dI_K} = 0$$

Z warunku (5) i równości (4) wynika zależność

$$(6) \quad \frac{dI_l^2}{dI_K} = \left[\frac{d}{dU} \left(\frac{P}{U} \right)^2 \right] \frac{dU}{dI_K} + 2I_K = 0$$

Stąd

$$(7) \quad \frac{dU}{dI_K} = - \frac{I_K}{\left(\frac{P}{U} \right) \frac{d}{dU} \left(\frac{P}{U} \right)}$$

Zróżniczkujemy równanie (3) po I_K i podstawimy (7), stąd po przekształceniach wynika zależność

$$(8) \quad R_l \frac{P}{U} + X_l I_K + U = \left(X_l \frac{P}{I_K} - R_l U \right) \frac{d}{dU} \left(\frac{P}{U} \right)$$

Równanie (3) i równanie (8) stanowią podstawowy układ równań do wyznaczenia niewiadomych $U=? , I_K=?$ a na ich podstawie parametru reaktancji $X_K=U/I_K$ do zrealizowania optymalnej kompensacji mocy biernej.

Natomiast przy pominięciu w schemacie na rys.5 gałęzi z impedancją X_K czyli przyjęciu $I_K=0$ i założeniu że istnieje rozwiązanie równania (3), otrzymuje się napięcie U na odbiorniku przy pełnej kompensacji mocy biernej.

Warto zauważyć, że, gdy $P/U = \text{const}(U)$ i przy $I_K=0$ jeśli spełnione jest równanie (3), wtedy również spełnione jest równanie (6) czyli przy istnieniu pełnej kompensacji mocy biernej w sensie Fryzego ma miejsce kompensacja optymalna. Odpowiada to odbiornikowi o charakterze stabilizatora prądu.

Algorytm wyznaczania rozwiązania

W celu uzyskania rozwiązania układu równań (3) i (8) można zastosować jedną z wielu metod kolejnych przybliżeń. W niniejszym opracowaniu wybrano metodę Newtona-Raphsona do rozwiązania układu równań dwu zmiennych.

W celu ujednoczenia zapisu wprowadzamy zmienne u , v oraz równania

$$f_1(u, v) = 0 \quad f_2(u, v) = 0$$

Metoda Newtona-Raphsona w zapisie macierzowym, wyraża się przez macierz jacobianową, wzorem

$$(9) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_n - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{bmatrix}_n^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}_n, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Uruchomienie procesu iteracji wymaga przyjęcia odpowiednio dobranej wartości startowej przybliżenia zerowego dla $n=0$, u_0 , v_0 a zakończenie procesu; przyjęcia normy odchyłki dwóch kolejnych przybliżeń

$$(10) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}, \quad \left\| \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{n+1} - \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_n \right\| \leq \delta$$

gdzie można założyć np. $\delta = 10^{-6}$.

Przy przyjęciu oznaczeń zmiennych $u = U$, $v = I_K$ występujące funkcje f_1, f_2 oraz elementy macierzy jacobianowej w równaniu (9) wyrażają się zgodnie z równaniami (3), (8) następującymi wzorami

$$(11) f_1 = (R_l g(u) + X_l v + u)^2 + (X_l g(u) - R_l v)^2 - E^2$$

$$(12) f_2 = R_l g(u) + X_l v + u - \left(X_l \frac{f(u)}{v} - R_l u \right) \frac{dg(u)}{du}$$

przy danych $R_b, X_b, E, f(u)=P, g(u)=f(u)/u$.

Elementy macierzy we wzorze (9) wyrażają się wzorami

$$(13) \frac{\partial f_1}{\partial u} = 2(R_l g(u) + X_l v + u) \left(R_l \frac{dg(u)}{du} + 1 \right) + 2(X_l g(u) - R_l v) X_l \frac{dg(u)}{du}$$

$$(14) \frac{\partial f_1}{\partial v} = 2(R_l g(u) + X_l v + u) X_l + 2(X_l g(u) - R_l v)(-R_l)$$

$$(15) \frac{\partial f_2}{\partial u} = R_l \frac{dg(u)}{du} + 1 - \left(X_l \frac{df(u)}{du} / v - R_l \right) \frac{dg(u)}{du} - (X_l f(u) / v - R_l u) \frac{d^2 g(u)}{du^2}$$

$$(16) \frac{df_2}{dv} = X_l + (X_l f(u) / v^2) \frac{dg(u)}{du}$$

Powyższe wzory stanowiły podstawę sformułowania programu komputerowego na platformie MATLABA.

Oddzielnie sformułowano program rozwiązania równania (11) $f_1=0$ jednej zmiennej, przyjmując zależność zmiennej v od u w postaci $v = u/X_L$, gdzie X_L pozwala na uwzględnienie prądu biernego I_L w rozpatrywanych przykładach

$$(17) u_{n+1} = u_n - \frac{f_1(u)|_n}{\frac{df_1(u)}{du}|_n}, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

gdzie

$$(18) f_1(u) = (R_l g(u) + X_l u / X_L + u)^2 + (X_l g(u) - R_l u / X_L)^2 - E^2$$

$$(19) \frac{df_1(u)}{du} = 2(R_l g(u) + X_l u / X_L + u) \left(R_l \frac{dg(u)}{du} + X_l / X_L + 1 \right) + 2(X_l g(u) - R_l / X_L) X_l \frac{dg(u)}{du}$$

Przyjmujemy na starcie jako wartość przybliżoną zerową $u_0=E$, a zakończenie iteracji przy odchyłce dwóch kolejnych przybliżeń $|u_{n+1}-u_n| < \delta = 10^{-6}$.

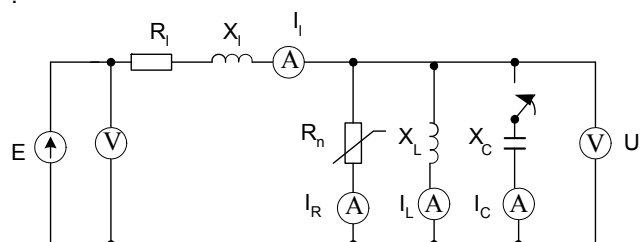
Zastosowanie metody

Podane wyżej wzory stanowiły podstawę zastosowania metody Newtona-Raphsona. Realizację algorytmu sformułowano jako dwie procedury obliczeniowe na platformie MATLABA. W pierwszej wykorzystano wzory (9-18), w drugiej wzory (19-21).

W celu sprawdzenia efektywności przebiegu obliczeń proponowaną metodą, wykonano testowe obliczenia dla układu przedstawionego na rysunku (rys.6).

Uwzględniono różne zadane parametry obwodu i charakterystyki elementu nieliniowego.

W rozpatrywanych przykładach przyjęto jako niezmiennie parametry; napięcie zasilania $E=100,45V$, parametry linii $R_l=1\Omega$, $X_l=5\Omega$, oraz dodatkowy parametr reaktancji $X_L=80/3\Omega=26,66\Omega$ określający pobór mocy biernej odbiornika. Natomiast istotnie zmienianym jest quasi-nieliniowy rezystor R_n przy różnej charakterystyce $P=f(U)=U^2/R_n(U)$. Wyznaczane są wartości wskazań przyrządów (I_l, I_R, I_L, I_C, U) oraz straty mocy w linii ΔP .



Rys.6 Schemat układu testowanego w obliczeniach

(i) W pierwszym przykładzie rozpatrzono odbiornik liniowy o wartości reaktancji $R=20\Omega$, $X_L=26,66\Omega$.

W stanie nieskompensowanym ($X_C=\infty$) otrzymano wartości:

$$U=80V, I_l=5A, I_R=4A, I_L=3A, I_C=0, P=320W, \Delta P=25W.$$

W stanie pełnej kompensacji ($X_C=X_L$), uzyskano wartości:

$$U=93,065V; I_l=4,653A, I_R=4,653A, I_L=3,489A, I_C=3,489A$$

$$P=433,05W, \Delta P=21,652W.$$

Zmniejszenie strat w linii o 13,39%

W stanie optymalnej kompensacji :

$$U=88,912V; I_l=4,548A; I_R=4,445A; I_L=3,334A; I_C=2,371A;$$

$$(X_C=37,495\Omega, X_L=26,66\Omega), I_k=I_L-I_C=0,963A$$

$$P=395,27W; \Delta P=20,69W.$$

Zmniejszenie strat w linii o 17,23%.

Jest interesujące, że kompensacja optymalna w stosunku do pełnej powoduje istotne dalsze zmniejszenie strat w linii.

(ii) W drugim przykładzie wybrano odbiornik nieliniowy o charakterystyce reaktancji $R_n=(60-U/2)\Omega$ (rezystancja maleje ze wzrostem napięcia).

W stanie nieskompensowanym przy $U=80V$, $R_n=20\Omega$, $X_L=26,66\Omega$ otrzymuje się dokładnie te same wartości jak wyżej w pkt.(i).

W stanie pełnej kompensacji ($X_C=X_L$), uzyskano wartości :

$$U=89,92V; I_l=5,978A, I_R=5,978A, I_L=3,372A, I_C=3,372A'$$

$R_n=15,04\Omega$; $P=537,60W$, $\Delta P=35,74W$.

Występuje wzrost strat w linii o 42,96%. Tym samym przy tej charakterystyce odbiornika pełna kompensacja nie jest korzystna.

Przy zastosowaniu optymalnej kompensacji otrzymuje się wyniki:

$U=81,69V$; $I_l=4,966A$; $I_R=4,265A$; $I_L=3,063A$; $I_C=0,520A$;
 $(X_C=157,11\Omega, X_L=26,66\Omega)$, $R_n=19,152\Omega$, $I_k=I_L-I_C=2,543A$;
 $P=348,46W$; $\Delta P=24,66W$.

Zmniejszenie strat w linii o 1,36% w stosunku do strat w stanie nieskompensowanym.

W tym przypadku kompensacja optymalna wprowadza nieznaczne obniżenie strat, ale jest bardziej korzystna niż kompensacja pełna. Warto zaznaczyć, że przy kompensacji optymalnej charakter wypadkowego prądu kompensacyjnego jest indukcyjny.

Należy jeszcze wyjaśnić, że celowo wyniki obliczeń podano z 4-cyfrowym przybliżeniem aby była dostrzegalna subtelna różnica ilościowa między optymalną a pełną kompensacją.

(iii) W przykładzie trzecim rozpatrzmy odbiornik, w którym charakterystyka $P=f(U)$ jest taka, że $P/U=\text{const}(U)$. Ten przypadek ma miejsce np. gdy $R_n=U/4\Omega$, wtedy $U=80V$, $R_n=20\Omega$, $X_L=26,66\Omega$.

A więc również w obwodzie nieskompensowanym wartości napięcia i prądów są identyczne jak w przypadku pkt.(i) oraz (ii).

W stanie pełnej kompensacji ($X_C=X_L$) uzyskano wartości:

$U=94,438V$; $I_l=4A$; $I_R=4A$; $I_L=3,541A$; $I_C=3,451A$; $R_n=23,60\Omega$,
 $P=377,75W$; $\Delta P=16W$.

W tym przypadku otrzymujemy zmniejszenie strat o 36%.

Rozpatrzony przypadek jest interesujący, ponieważ zgodnie z równaniem (6) przy $P/U=\text{const}(U)$ oznacza, że spełniony jest równocześnie warunek dla kompensacji optymalnej. Warto podkreślić, że jest to własność uniwersalna takiego elementu nieliniowego jako stabilizatora prądu $P/U=I_R=\text{const}(u)$.

W rozpatrywanym przykładzie z rys.6 uwzględniono dodatkowo, bardziej ogólną nieliniową zależność rezystancji od napięcia jako funkcji potęgowej $R_n(U)=20(U/80)^m$. W tym przypadku również mamy w stanie nieskompensowania przy $U=80V$, $R_n=20\Omega$, $X_L=26,66\Omega$ wyniki jak w pkt.(i).

Wyniki dla $m<1$ (pominięto tutaj zamieszczenie wartości liczbowych dla $m=3/4; 1/2; 0; -1; -2,5, \dots$), potwierdzają, że kompensacja pełna bez optymalizacji nie zapewnia minimalizacji prądu w linii.

Natomiast gdy $m>1$ czyli przy nieliniowości charakterystyki typu łukowego $U^{(m-1)} I = \text{const}$ nawet przy istnieniu stanu kompensacji pełnej, równania (3) i (8) mogą nie określać kompensacji optymalnej. Oznacza to, że metoda Newtona-Raphsona nie jest zbieżna, bądź zbieżna do wartości nie realizowalnych fizycznie (ujemnych lub zespolonych).

(iv) Rozważmy bardziej szczegółowo rozpatrywany już przykład z rys.6 ale dla charakterystyki $R_n=20(U/80)^m$ oddzielnie dla:

(a) przy $m=-1,5$; (b) przy $m=1,5$

W przypadku (a), stan nieskompensowany jest identyczny jak w przykładzie (i).

W stanie pełnej kompensacji ($X_C=X_L$) uzyskano wartości:

$U=91,045V$; $I_l=5,527A$; $I_R=5,527A$; $I_L=3,414A$; $I_C=3,414A$
 $P=503,22W$, $\Delta P=30,59W$.

Występuje wzrost strat w linii o 22,2%.

Podobnie jak w przykładzie (ii) i przy tej charakterystyce kompensacja pełna nie jest korzystna.

Przy zastosowaniu optymalnej kompensacji otrzymuje się wyniki:

$U=83,06V$; $I_l=4,9166A$; $I_R=4,394A$; $I_L=3,119A$; $I_C=0,910A$;
 $(X_C=91,28\Omega, X_L=26,66\Omega)$, $R_n=18,90\Omega$, $I_k=I_L-I_C=2,205A$;
 $P=348,46W$; $\Delta P=24,17W$.

Występuje zmniejszenie strat w linii o 3,3% w stosunku do strat w stanie nieskompensowanym. Również i w tym przypadku kompensacja optymalna powoduje nieznaczne obniżenie strat, ale jest bardziej korzystna niż kompensacja pełna przy której występował wzrost strat.

W przypadku (b) stan nieskompensowany jest identyczny jak w przykładzie (i).

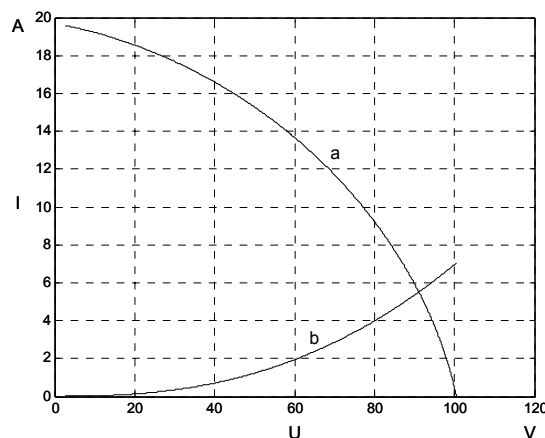
W stanie pełnej kompensacji ($X_C=X_L$) uzyskano wartości:

$U=95,09V$; $I_l=3,668A$; $I_R=3,668A$; $I_L=3,569A$; $I_C=3,569A$;
 $R_n=25,91\Omega$, $P=348,88W$, $\Delta P=13,46W$

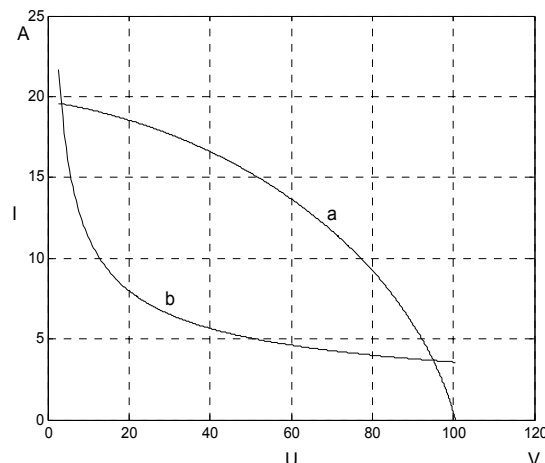
W tym przypadku otrzymujemy zmniejszenie strat o 46,15% w stosunku do stanu nieskompensowanego.

Jak już wspomniano wcześniej dla $m>1$ wyznaczenie kompensacji optymalnej na podstawie równań (3) i (8) metodą iteracyjną Newtona-Raphsona nie jest efektywne.

W tej sytuacji, gdy kompensacja pełna daje zadawalające obniżenie strat, nie istnienie rozwiązania układu równań (3) i (8) nie jest istotne.

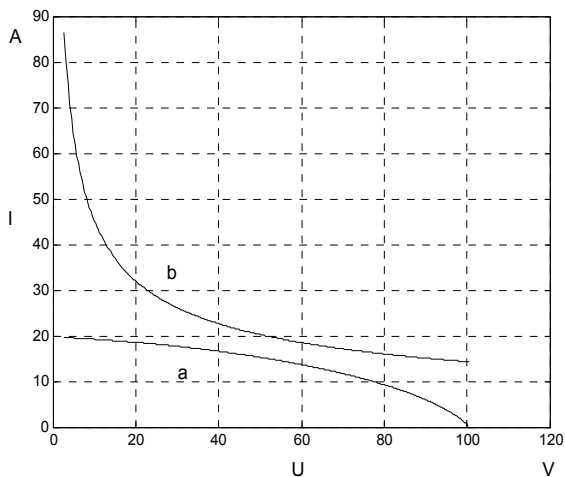


Rys.7 Ilustracja rozwiązania kompensacji pełnej dla $m=-1,5$, $R_n=20(U/80)^m$



Rys.8 Ilustracja rozwiązania kompensacji pełnej dla $m=1,5$, $R_n=20(U/80)^m$

Na rysunkach (rys.7, 8, 9) przedstawiono wykresy obrazujące możliwość rozwiązania kompensacji pełnej przy $m=-1,5$ i $m=1,5$. Na wykresie rys.9 przedstawiono również osobliwą sytuację nie istnienia rozwiązania kompensacji pełnej przy nieznacznie zmienionej charakterystyce typu łukowego $R_n=5(U/80)^{1,5}$.



Rys.9 Ilustracja braku rozwiązania kompensacji pełnej dla $m=1,5$ $R_n=5 (U/80)^m$

Na powyższych wykresach jedna z krzywych (a) przedstawia zależność między prądem I a napięciem U zgodnie ze wzorem (3) przy $I_k=0$, natomiast druga krzywa (b) jest to zależność $I=U/R_n(U)$ wynikająca z charakterystyki elementu nieliniowego.

Uwagi i wnioski

Wykonane obliczenia na wybranych przykładach sprawdziły efektywność przedstawionej metody obliczania pełnej i optymalnej kompensacji. Interpretacje uzyskanych wyników potwierdziły potrzebę ujęcia minimalizacji prądu (strat w linii) jako metody optymalizacji.

Jak wiadomo [1, 2, 11] w obwodach liniowych lub nieliniowych zasilanych sztywnymi źródłami warunkiem minimalizacji prądu jest pełna kompensacja mocy biernej w sensie Fryzego.

Przy zasilaniu źródłami elastycznymi kompensacja mocy biernej nie wystarcza do minimalizacji prądu a w przypadku odbiornika nieliniowego może nawet spowodować jego wzrost. Radykalną poprawą dla odbiornika nieliniowego jest zastosowanie prezentowanej metody optymalizacji

Zakończenie

W podsumowaniu końcowym należy podkreślić, że w opisanej metodzie przyjęto realistyczne założenia co do sinusoidalnego przebiegu SEM źródeł oraz symetrii układu 3-fazowego i symetrii linii zasilającej. Stanowiło to podstawę sformułowania w powiązaniu z koncepcją kompensacji mocy biernej absolutnej w sensie Fryzego efektywnej metody kompensacji optymalnej (minimalizacji prądu).

Przedstawiona koncepcja metody w efekcie końcowym umożliwia redukcję dowolnego odbiornika jednofazowego, lub 3-fazowego, liniowego, nieliniowego symetrycznego lub

niesymetrycznego do jednofazowego lub 3-fazowego symetrycznego układu quasi-liniowego rezystancyjnego z poborem dodatkowego prądu kompensacyjnego realizowanym przez 1 lub 3 elementy reakcyjne (typu L lub C). W kompensatorze synchronicznym odpowiada to stanowi przewzbudzenia lub niedowzbudzenia prądu magnesującego wirnika.

Autorzy uważają, że prezentowana metoda z uwagi na nieskomplikowany aparat obliczeniowy może znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu zagadnień kompensacji optymalnej w sieciach energetycznych.

LITERATURA

- [1] A.Skopec, Cz. Stec, *Moc bierna absolutna jako podstawa teorii pełnej kompensacji prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu w układach jednofazowych i trójfazowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R.87 NR 1/2011, s. 220-22
- [2] A.Skopec, Cz.Stec, P.Janik, Z. Waclawek: *Teoretyczne aspekty realizacji pełnej kompensacji w obwodach prądu niesinusoidalnego*, Przegląd elektrotechniczny, R.88 NR 8/2012, s. 295-302
- [3] M. Siwczyński : *O współzależności między mocą bierną a stabilnością napięcia zasilania w przypadku okresowych niesinusoidalnych przebiegów napięcia i prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87 NR 6/2011, s.169-173
- [4] M. Siwczyński: *Energetyczna teoria obwodów*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami i Energią PAN, Kraków 2003
- [5] M. Siwczyński: *Metody optymalizacyjne w teorii mocy obwodów elektrycznych*. Monografia 183;seria „Inżynieria Elektryczna”. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1995
- [6] L.S. Czarniecki, *Currents Physical Components (CPC) concept: a fundamental for power theory*, Przegląd Elektrotechniczny, R.84, NR 6/2008, s.28-37
- [7] Czarniecki L. S., *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [8] S. Fryze: *Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki*, PWN Warszawa-Wrocław, 1966, Teoria mocy w obwodach elektrycznych, 197-256
- [9] S.Fryze: *Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny , NR 7/1931, s.193-203
- [10] Inveited paper: *Tutorials from International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Przegląd Elektrotechniczny, NR6/2010 s.1-56
- [11] A.Skopec, Cz. Stec: *Metoda pełnej kompensacji mocy biernej absolutnej prądów niesinusoidalnych układu trójfazowego czteroprzewodowego w dziedzinie czasu*, Przegląd Elektrotechniczny, R.89, NR 11/2013, s. 175-188.

Autorzy. Dr hab. inż. Adam Skopec, emerytowany prof. P.Wr. Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 53-370 Wrocław,

Dr inż. Czesław Stec, Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 53-370 Wrocław,
E-mail: czeslaw.stec@gmail.com