

STUDIUM NAD KOMPENSACJĄ ODBIORNIKÓW MONSTRUALNYCH

Leszek S. Czarnecki, IEEE Life Fellow, Louisiana State University, USA

Przedmiotem artykułu są rozważania nad możliwością kompensacji pieców łukowych najwyższej mocy, sięgających setek MVA. Piece takie zużywają olbrzymie ilości energii elektrycznej przy niskim współczynniku mocy. Ponadto, zmienność ich mocy, asymetria i odkształcenie prądów mogą powodować znaczące obniżenie jakości zasilania w w systemie rozdzielczym. Odbiorniki takie wymagają kompensacji, i to, ze względu na szybką zmienność parametrów pieca, kompensacji adaptacyjnej. Wielkości prądów potrzebnych do kompensacji pieców najwyższej mocy są niestety poza zasięgiem obecnie dostępnych łączników półprzewodnikowych, to jest tyrystorów i tranzystorów. Dlatego w artykule tym analizuje się możliwość wydzielenia z prądów kompensacyjnych składników nie wymagających kompensacji adaptacyjnej zmniejszając je do poziomu, na którym kompensacja adaptacyjna może być możliwa.

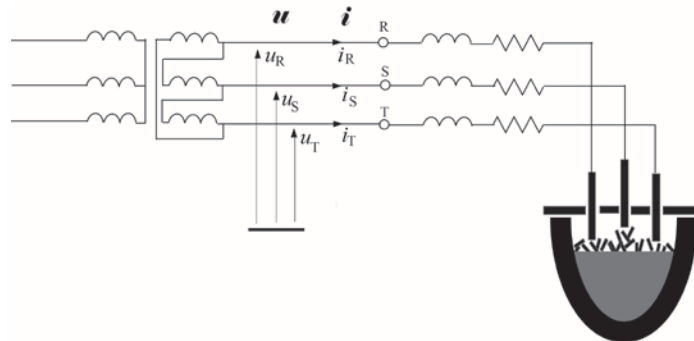
Study on compensation of monstrous loads

Possibility of compensation of ultra-high power AC arc furnaces of the power in the order of hundreds MVA is the subject of studies in this paper. Such furnaces consume enormous amount of electric energy at low power factor. Moreover, power variability, current asymmetry and distortion can substantially reduce the supply quality in the distribution system. Such loads should be compensated and, due to fast variability of the furnace parameters, compensation should be adaptive. The magnitude of needed compensation currents is out of the range of presently available semiconductor switches such as thyristors and transistors. Therefore, the possibility of separation of the current components from the compensating current that not require adaptive compensation, thus reduction of the power of an adaptive compensator is the subject of presented studies.

1. WSTĘP

Przymiotnik “monstrualny” użyty w tytule wymaga wyjaśnienia, gdyż nie jest to przymiotnik używany w elektrotechnice do charakteryzowania odbiorników. Lecz jak nazwać pojedynczy odbiornik energii elektrycznej o mocy porównywalnej z mocą milionowego miasta, z przypadkowo znikającymi, nieokresowymi prądami przewodowymi? Takimi właśnie odbiornikami są piece łukowe ultra wielkiej mocy, sięgającej obecnie 750 MVA. W normalnej klasyfikacji odbiorników elektrycznych piec łukowy jest niczym innym jak tylko niezrównoważonym, generującym odkształcenia prądu odbiornikiem trójfazowym. Jednak metody kompensacji odbiorników mocy rzędu pojedynczych MVA mogą, ze względu na poziom mocy, nie mieć zastosowania w przypadku kompensacji pieców łukowych ultra wielkiej mocy. Dlatego piece takie trzeba traktować jako osobną grupę odbiorników, określonych w tym artykule jako odbiorniki monstrualne.

Struktura zasilania pieca łukowego wraz z transformatorem zasilającym pokazana jest na Rys. 1.



Rys. 1. Struktura zasilania pieca łukowego.

Każdą pieca jest uziemiona, lecz ze względu na wykładzinę ceramiczną jej wnętrza, oporność wnętrza pieca względem ziemi jest tak wysoka, że piec łukowy trzeba traktować jako odbiornik nieziemiony. Oznacza to, że piec nie może pracować z palącym się tylko jednym łukiem.

Roczne zużycie energii pieca łukowego o takiej mocy, przyjmując, że pracuje on ze współczynnikiem mocy $\lambda = 0.7$, może być rzędu $4,5 \cdot 10^9$ kWh, co przy cenie energii na poziomie 0,11 \$/kWh oznacza, że roczny rachunek za energię elektryczną może sięgać 500 milionów dolarów. Liczby te nie są oczywiście dokładne, ilustrują one jedynie rząd zużycia energii i jej koszt.

W normalnych układach rozdzielczych moc transformatora jest kilkadziesiąt razy większa od łącznej mocy odbiorników. Nie może to być spełnione [1] w przypadku zasilania pieca łukowego. Tak wielkie transformatory nie są dostępne i piece łukowe najwyższej mocy zasilane są z transformatorów o mocy porównywalnej z mocą pieca. Powoduje to wielkie straty energii w transformatorze oraz niezwykle wielką zależność napięcia na elektrodach pieca od prądu łuków.

Stabilność łuków utrzymywana jest cewkami indukcyjnymi włączonymi w przewody zasilania i elektrody pieca sterowane są tak, aby moc czynna P była porównywalna z jego mocą bierną Q . Oznacza to, że w warunkach pracy symetrycznej współczynnik mocy utrzymywany jest [3, 4] na poziomie $\lambda = 0,7$. Przerwanie łuku powodujące asymetrię prądów, która obniża współczynnik mocy pieca poniżej $\lambda = 0,5$.

Ze względu na odkształcenie i asymetrię prądów oraz zmienność mocy, szczególnie w pierwszej fazie pracy, to jest po załadowaniu nowego wsadu, kiedy zmienność prądów jest najbardziej przypadkowa, piece łukowe należą do grupy odbiorników o najgorszej jakości odbioru energii elektrycznej [2]. Niska jakość odbioru powiększa nie tylko straty przesyłowe energii, lecz także obniża jakość zasilania w systemie rozdzielczym, gdyż asymetria, odkształcenie i zmiany wartości skutecznej prądu powodują asymetrię, odkształcenie i wahania wartości skutecznej napięcia w systemie.

Piece łukowe wymagają kompensacji z uwagi na trzy niezależne od siebie powody. Pierwszym z nich jest potrzeba redukcji przesyłowych strat energii. Drugim powodem jest możliwość, poprzez podwyższenie w wyniku kompensacji, napięcia na elektrodach, zwiększenia mocy pieca. Trzecim powodem jest potrzeba redukcji szkodliwego oddziaływania pieca na jakość zasilania w systemie rozdzielczym.

Piec łukowy jest odbiornikiem o szybko zmieniających się, nawet w czasie pojedynczego okresu, parametrach. Kompensacja, jeśli ma być pełna, powinna tę zmienność uwzględniać. Powinna to być kompensacja adaptacyjna.

Możliwości łączeniowe przy tak wielkich mocach i prądach są jednak ograniczone. Pomimo, że są obecnie dostępne tyrystory mogące pracować przy prądzie 46 kA oraz tranzystory pracujące przy prądzie 2 kA, łączniki takie mogą nie wystarczać do adaptacyjnej kompensacji pieca o prądach rzędu setek kA. Dlatego, myślą przewodnią przedstawionego w tym artykule studium jest podział prądu kompensacyjnego na składowe nie wymagające kompensacji adaptacyjnej, oraz na składowe, które nie mogą być bez takiej adaptacyjnej kompensacji zredukowane.

2. PORÓWNAWCZY PIEC ŁUKOWY

Dwoma najważniejszymi parametrami odróżniającymi wzajemnie konkretne piece łukowe są ich moce oraz napięcie zasilania. Aby studium to można było odnieść do dowolnego pieca, w artykule tym analizowany będzie piec, z łukami traktowanymi jako idealne zwarcie, o rezystancji fazowej pieca wraz zasilaniem, R , równej reaktancji fazowej dla harmonicznej podstawowej $X_1 = R = 1,0 \Omega$. Piec taki zasilany jest napięciem sinusoidalnym i symetrycznym o wartości skutecznej $U = U_0 = 1000$ V. Moc czynna mierzona na zaciskach RST pieca jest równa $P = P_0 = 1,5$ MW, zaś moc bierna $Q = Q_0 = 1,5$ MVar, to jest moc pozorna pieca $S = S_0 = 2,1$ MVA.

Przy zespolonej wartości skutecznej napięcia na zacisku R równej $U_{R0} = U_0 = 1000$ V, zespolona wartość skuteczna prądu przewodowego wynosi

$$I_{R0} = 707,1e^{-j45^\circ} \text{ A.}$$

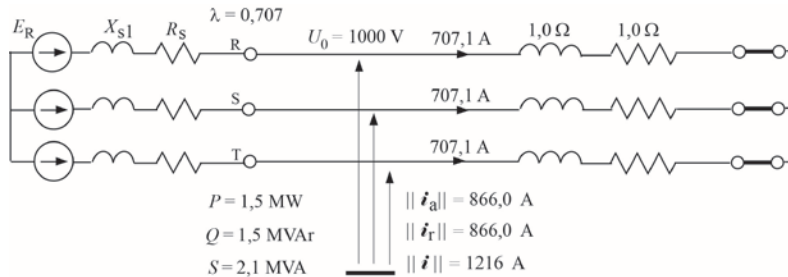
Wartość skuteczna przewodowego prądu czynnego $I_a = 500$ A, zaś jego trójfazowa wartość skuteczna

$$\|\dot{I}_a\| = \sqrt{3} I_a = 866,0 \text{ A.}$$

Taką samą wartość skuteczną ma przewodowy prąd bierny $I_r = 500 \text{ A}$. Jego trójfazowa wartość skuteczna

$$\|\dot{I}_r\| = \sqrt{3} I_r = 866,0 \text{ A.}$$

Wyniki analizy pieca porównawczego pokazane są na Rys. 2.



Rys. 2. Parametry prądu i moce porównawczego pieca łukowego w warunkach pracy symetrycznej.

Jeśli piec łukowy, zasilany napięciem o wartości skutecznej U , ma moc pozorną S , to jego prądy są równe prądom pieca porównawczego pomnożonym przez współczynnik skalujący

$$a = \frac{U_0 \cdot S}{U \cdot S_0}. \quad (1)$$

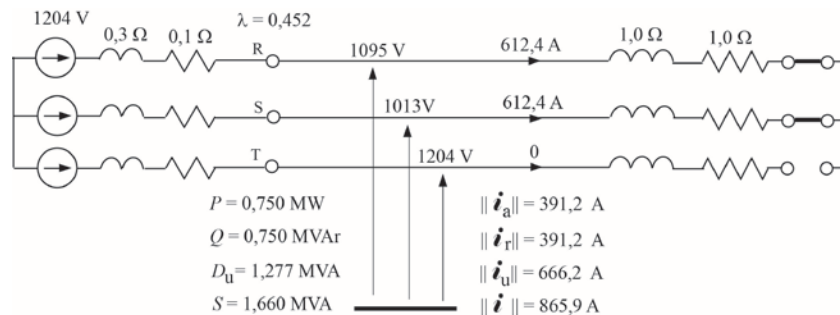
Współczynnik skalujący, na przykład, dla pieca o mocy pozornej $S = 250 \text{ MVA}$ przy napięciu $U = 400 \text{ V}$ wynosi $a = 298$. Dla podobnego pieca o mocy $S = 750 \text{ MVA}$ współczynnik ten wynosi $a = 893$. Oznacza to, że wartość skuteczna prądu przewodowego może wynosić $I = 631 \text{ kA}$. Można ją zmniejszyć jedynie poprzez podwyższenie napięcia. Przy napięciu $U = 1500 \text{ V}$, współczynnik skalujący wynosi $a = 238$, a zatem $I = 168 \text{ kA}$.

Piec porównawczy zasilany jest poprzez transformator o impedancji zwarciowej $Z_{s0} = R_{s0} + jX_{s0}$, a zatem, praca pieca z mocą S_0 wymaga, aby transformator na otwartych zaciskach miał napięcie o wartości skutecznej

$$E_{R0} = |U_{R0} + (R_{s0} + jX_{s0})I_{R0}|. \quad (2)$$

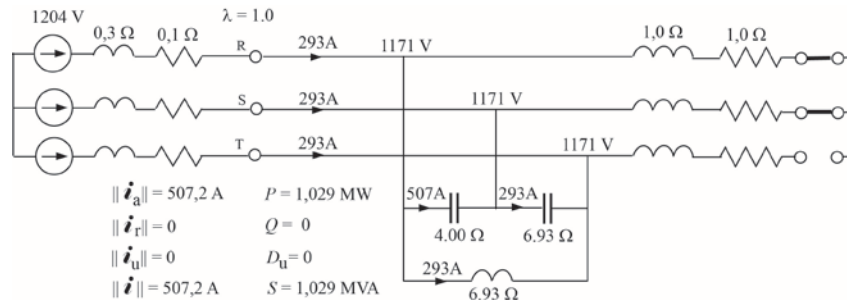
Przyjmijmy, że impedancja zwarciowa transformatora ma wartość $Z_{s0} = (0,1 + j0,3) \Omega$. W takim przypadku, aby utrzymać moc pieca, wartość skuteczna napięcia na zaciskach transformatora otwartego winna wynosić $E_{R0} = 1204 \text{ V}$.

Przerwanie łuku w jednej z faz redukuje moc czynną P pieca o połowę i jego współczynnik mocy do wartości $\lambda = 0,45$, gdyż pojawia się w prądzie zasilania prąd niezrównoważenia \dot{I}_u . Trójfazowe wartości skuteczne składowych fizycznych prądów oraz moce, a także prądy i napięcia fazowe przy przerwie łuku w fazie T, pokazane są na Rys. 3.



Rys. 3. Parametry, prądy i moce porównawczego pieca łukowego w warunkach pracy z przerwaniem łukiem w fazie T.

Piec z przerwaniem łukiem może być zrównoważony kompensatorem reaktancyjnym. Metoda obliczania jego parametrów w warunkach asymetrii napięciowej podana została w artykule [6]. Ponieważ kompensator włączony na zaciskach RST zmienia napięcia fazowe na tych zaciskach, proces obliczania parametrów reaktancyjnych LC kompensatora jest procesem iteracyjnym. W przypadku ilustrowanym na Rys. 3, proces ten jest zbieżny do parametrów podanych na Rys. 4.



Rys. 4. Parametry prądu i moce porównawczego pieca łukowego z kompensatorem równoważącym.

Warto zauważyć, że poprawie współczynnika mocy towarzyszy także wzrost mocy czynnej pieca, obniżonej pierwotnie przerwaniem łuku. Kompensator, redukując spadki napięcia na transformatorze zasilającym, podwyższył napięcie na elektrodach pracujących.

Stan pracy pieca łukowego ilustrowany na Rys. 2 i Rys. 3 jest uproszczony przyjęciem, że łuki reprezentują idealne zwarcie, a więc piec jest odbiornikiem liniowym. Jest on jednak odbiornikiem nieliniowym, generującym odkształcenie prądu. Według artykułu [4], współczynnik odkształcenia prądu w pierwszej fazie wytopu może sięgać 35%. Oznacza to, że wartość skuteczna prądu odkształconego generowanego w piecu porównawczym może mieć wartość

$$\|\mathbf{i}_G\| = 0,35 \times \|\mathbf{i}\| \approx 0,35 \times 866 = 312 \text{ A.}$$

Nawet pomijając, spowodowany harmonicznymi prądu wzrost wartości skutecznej napięcia pieca, prąd generowany \mathbf{i}_G może obniżyć współczynnik mocy do wartości

$$\lambda = \frac{\|\mathbf{i}_a\|}{\sqrt{\|\mathbf{i}\|^2 + \|\mathbf{i}_G\|^2}} = \frac{391}{\sqrt{866^2 + 312^2}} = 0,42.$$

3. SKŁADOWE PRĄDU PIECA WYMAGAJĄCE KOMPENSACJI

Kompensacji wymagają trzy prądy pieca łukowego, prąd bierny $\mathbf{i}_i(t)$, prąd niezrównoważenia $\mathbf{i}_u(t)$ oraz prąd generowany nieliniowością łuku $\mathbf{i}_G(t)$.

Ze względu na redukcję przesyłowych strat energii, a więc ze względu na wysokość rachunku za energię elektryczną, najważniejsza jest redukcja prądu biernego, gdyż obciąża on system rozdzielczy w ciągu całego cyklu wytopu. Ponadto, w czasie ostatniej i najdłuższej, lecz spokojnej fazy pracy pieca, odkształcenie prądu i jego asymetria mają najmniejsze wartości.

Ze względu na zaburzające oddziaływanie pieca na system rozdzielczy, najważniejsza jest redukcja prądu niezrównoważenia $\mathbf{i}_u(t)$. Wartość skuteczna tego prądu może mieć niemal dwukrotnie wyższą wartość od wartości skutecznej prądu czynnego. Prąd niezrównoważenia pojawia się przy każdym przerwaniu łuku. Może pojawiać się on głównie w początkowej, niespokojnej fazie pracy pieca. Ponieważ przerwanie łuku może nie być symetryczne, to jest w pojedynczym okresie T prąd łuku znika tylko w jednym pół-okresie, znacząco może wzrosnąć także odkształcenie prądu. Przerwanie jednego łuku powoduje ponadto zmniejszenie napięcia na pozostałych elektrodach, które pracują wówczas szeregowo z dwoma, szeregowo połączonymi łukami. Powoduje to zwiększenie odkształcenia prądu dwóch pracujących elektrod. Dlatego w niespokojnej fazie pracy pieca kompensacji wymaga także prąd generowany $\mathbf{i}_G(t)$. Przerwaniu łuku towarzyszy także, jak to widać z Rys. 2 i 3, przeszło dwukrotne zmniejszenie

się prądu biernego oraz czynnego, $\dot{i}_r(t)$, $\dot{i}_a(t)$. Zmiany te, poprzez oddziaływanie na napięcie w systemie rozdzielczym, mogą zaburzać pracę innych odbiorców, czyli mogą obniżać jakość zasilania w systemie rozdzielczym.

O ile w spokojnej fazie pracy pieca może on być traktowany jako odbiornik o stałych parametrach, nie wymagający kompensacji adaptacyjnej, to w fazie niespokojnej tylko kompensacja adaptacyjna może zmniejszać zaburzające oddziaływanie pieca na system rozdzielczy.

W przypadku odbiorników o tak wielkiej mocy i zmienności parametrów kompensacja adaptacyjna ograniczona jest mocą łączeniową i szybkością łączników półprzewodnikowych. Aby była ona możliwa, z prądów kompensujących trzeba wyodrębnić składowe nie wymagające kompensacji adaptacyjnej. Głównym do tego kandydatem jest prąd bierny pieca w spokojnej fazie jego pracy. Jego kompensacja wymaga baterii kondensatorów włączonych tak, jak pokazano na Rys. 5.

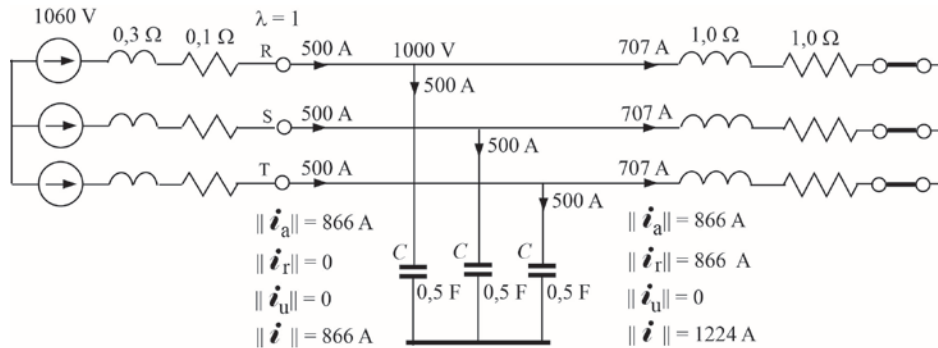
Zachowanie mocy pieca, przy skompensowanym prądzie biernym, pozwala zmniejszyć, jak to ilustruje Rys. 5, napięcia zasilania a więc i moc transformatora zasilającego. Pojemność C kondensatorów można oszacować ze znajomości rezystancji i reaktancji pieca. W przypadku pieca porównawczego

$$\omega_1 C = -B_e = 0,5 \text{ S}$$

gdzie B_e jest susceptancją równoważną pieca [5], [6], równą

$$B_e = \text{Im}\{Y_{RS} + Y_{ST} + Y_{TR}\}. \quad (3)$$

Przyjmijmy w celu uproszczenia obliczeń, że częstotliwość napięcia zasilania jest znormalizowana tak, że $\omega_1 = 1 \text{ rad/s}$. Wówczas potrzebna pojemność kompensująca wynosi $C = 0,5 \text{ F}$.



Rys. 5. Prądy pieca porównawczego ze skompensowanym prądzie biernym.

Aby piec zrównoważyć w warunkach przerwania łuku oraz skompensować jego moc bierną, kondensator winien mieć susceptancje międzyprzewodowe określone [5] wzorami

$$\begin{aligned} T_{RS} &= (\sqrt{3} \text{Re} A - \text{Im} A - B_e)/3 \\ T_{ST} &= (2 \text{Im} A - B_e)/3 \\ T_{TR} &= (-\sqrt{3} \text{Re} A - \text{Im} A - B_e)/3 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie A oznacza [5] admitancję niezrównoważenia odbiornika,

$$A = \text{Re} A + j \text{Im} A = -(Y_{ST} + \alpha Y_{TR} + \alpha^* Y_{RS}), \quad \alpha = 1e^{j120^\circ}. \quad (5)$$

Jeśli przerwany jest łuk w fazie R, wówczas admitancje międzyfazowe pieca porównawczego mają wartości

$$Y_{RS} = 0, \quad Y_{ST} = \frac{1}{2 + j2} = 0,25 + j0,25 \text{ S}, \quad Y_{TR} = 0$$

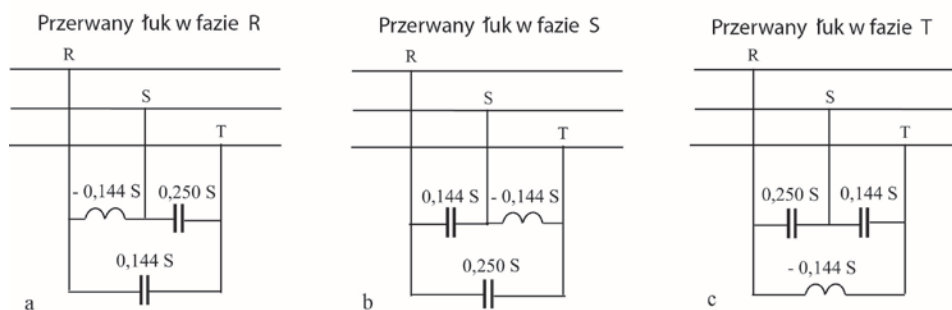
zatem

$$B_e = -0,250 \text{ S}, \quad \text{Re } A = -0,250 \text{ S}, \quad \text{Im } A = 0,250 \text{ S},$$

a więc susceptancje kompensatora równoważącego, obliczone z (4), winny mieć wartości

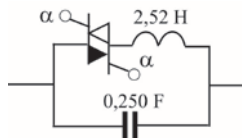
$$T_{RS} = -0,144 \text{ S}, \quad T_{ST} = 0,250 \text{ S}, \quad T_{TR} = 0,144 \text{ S},$$

Ponieważ susceptancja T_{RS} jest ujemna, jest to więc susceptancja cewki indukcyjnej. Pozostałe susceptancje są susceptancjami kondensatorów włączonych tak, jak jest to pokazane na Rys. 6a. Rozkład potrzebnych susceptancji kompensujących przy przerwie łuku w fazach S i T pokazany jest na Rys. 6b oraz 6c.



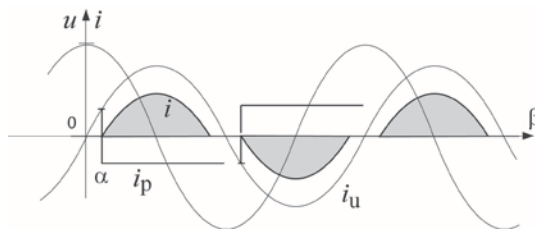
Rys. 6. Rozkład susceptancji kompensatora równoważącego przy przerwie łuku w fazach R, S oraz T.

Równoważenie pieca porównawczego wymaga więc możliwości zmiany każdej z trzech susceptancji międzyprzewodowy kompensatora w granicach od $T_{\min} = -0,144 \text{ S}$ do $T_{\max} = 0,250 \text{ S}$. Można taką zmianę uzyskać łącznikiem tyrystorowym w obwodzie pokazanym na Rys. 7.



Rys. 7. Dwójnik o susceptancji T dla harmonicznej podstawowej zmienianej kątem zapłonu tyrystora od $-0,144 \text{ S}$ do $0,250 \text{ S}$.

Przebieg prądu w gałęzi z tyrystorem pokazany jest na Rys. 8. Jest on sumą składowej ustalonej $i_u(t)$, która jest prądem sinusoidalnym opóźnionym względem napięcia na gałęzi o kąt $\pi/2$, oraz składowej przejściowej $i_p(t)$, pojawiającej się w momencie włączenia tyrystora. Przy założeniu, że cewka indukcyjna jest bezstratna, składowa przejściowa ma wartość stałą.



Rys. 8. Przebieg prądu tyrystora z cewką indukcyjną.

Zespolona wartość skuteczna harmonicznej podstawowej prądu określona jest wzorem

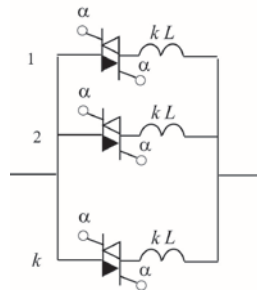
$$I_1 = -j \left(1 - \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right) \frac{U}{\omega_1 L} \quad (6)$$

zatem gałąź ta ma dla harmonicznej podstawowej susceptancję

$$T = \text{Im}\left\{\frac{I_1}{U_1}\right\} = -\frac{1}{\omega_1 L} \left(1 - \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}\right) \quad (7)$$

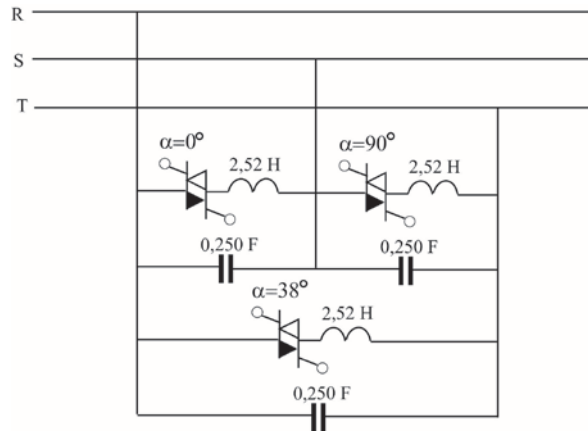
a więc równą $T_{\min} = -1/\omega_1 L$, dla kąta zapłonu $\alpha = 0$ oraz $T_{\max} = 0$ dla $\alpha = \pi/2$. Gałąź taka jest także źródłem harmonicznych prądu, poczynając od harmonicznej trzeciego rzędu. Harmoniczne te można traktować łącznie z harmonicznymi generowanymi w łukach pieca.

Moc łączeniowa dostępnych obecnie tyrystorów jest bardzo wysoka. Firma Infineon Technologies oferuje pojedyncze tyrystory o prądzie roboczym 46 kA przy napięciu 1600 V. Ponieważ włączana tyrystorem cewka indukcyjna wymaga do wytwarzania dodatniego i ujemnego impulsu prądu dwóch tyrystorów, wartość skuteczna prądu takiej cewki może być większa o $\sqrt{2}$ od prądu łączenia pojedynczego tyrystora, to znaczy, może sięgać wartości 65 kA. Wtedy, gdy wartość ta jest ciągle zbyt niska, trzeba użyć kilka równolegle połączonych, włączanych tyrystorami cewek indukcyjnych tak, jak jest to pokazane na Rys. 9.



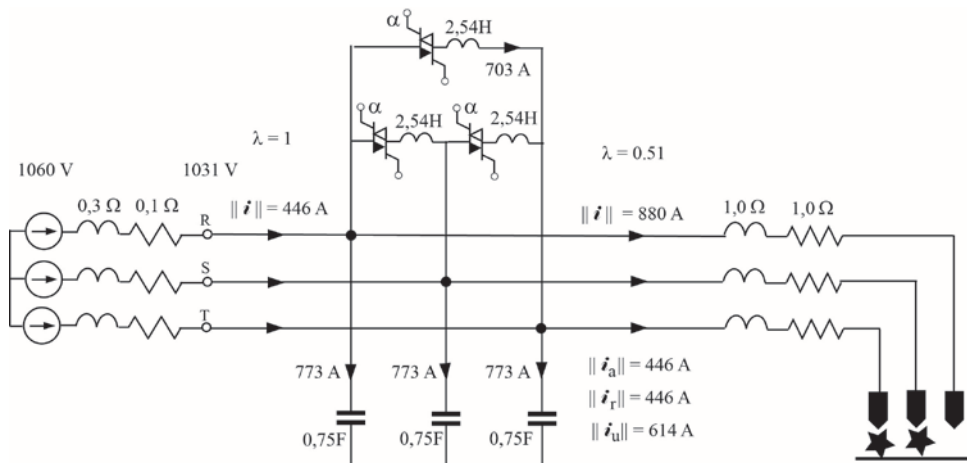
Rys. 9. Blok włączanych tyrystorami cewek indukcyjnych.

Dwójniki o susceptanci dla harmonicznej podstawowej T kontrolowanej tyrystorami połączone w trójkąt tworzą kompensator adaptacyjny, pokazany na Rys. 10. Jeśli łuk przerwany jest w fazie R, wówczas kąty zapłonu powinny wynosić, odpowiednio, $\alpha_{RS} = 0^\circ$, $\alpha_{ST} = 90^\circ$, $\alpha_{TR} = 38^\circ$. Wartości tych kątów przy przerwach w innych fazach wynikają z Rys. 6.



Rys. 10. Adaptacyjny kompensator równoważący pieca porównawczego.

Aby obniżyć napięcie kondensatorów i umożliwić uziemienie ich obudów, kondensatory mogą być połączone w gwiazdę. Oznacza to trzykrotne zwiększenie pojemności kondensatorów, z zachowaniem oczywiście ich mocy. Po takim przekształceniu kompensator równoważący ma strukturę pokazaną na Rys. 11. Wartości skuteczne prądów i wartości współczynnika mocy podane na tym rysunku zostały obliczone z pominięciem harmonicznych, to znaczy łuk traktowany jest jeszcze jako odbiornik liniowy.



Rys. 11. Adaptacyjny kompensator równoważący pieca porównawczego.

Porównując pojemność kondensatorów kompensujących w warunkach zrównoważonej pracy pieca, których wartość podane jest na Rys. 5, z pojemnością potrzebną do kompensacji adaptacyjnej, podaną na Rys 11, widać, że kompensacja adaptacyjna wymaga większej o 50% pojemności kondensatorów. Zatem wtedy, gdy w stanie pracy zrównoważonej tyrystory przerywają prąd wszystkich cewek indukcyjnych kompensatora, piec jest przekompensowany.

Tę pojemnościową moc bierną można skompensować mocą bierną gałęzi indukcyjnych kompensatora równoważącego. Aby kompensator ten był odbiornikiem wyłącznie mocy biernej, kąty zapłonu tyrystorów muszą być takie same. Kompensacja nadwyżki mocy biernej kondensatorów wymaga takiego kąta zapłonu, przy którym susceptancja dla harmonicznej podstawowej każdej gałęzi z cewką indukcyjną ma wartość $T = -0,25/3 = -0,083$ S. Rozwiązując równanie (7) otrzymuje się $\alpha = 43^\circ$. W ten sposób, zarówno w niespokojnej fazie wytopu jak i w spokojnej fazie pracy pieca, zarówno prąd bierny jak i prąd niezrównowazenia mogą być całkowicie skompensowane. Pozostaje jeszcze problem redukcji odkształcenia prądu zasilania.

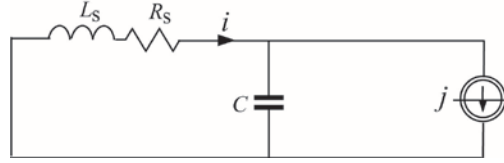
4. REDUKCJA ODKSZTAŁCENIA PRĄDU ZASILANIA

Największe odkształcenia prądu pieca pojawiają się w pierwszej, niespokojnej fazie wytopu, przy przerwie jednego z łuków, szczególnie wtedy, gdy łuk pali się tylko w połowie okresu. Pojawia się wówczas harmoniczna prądu drugiego rzędu. Należy tu jednak zwrócić uwagę na to, że traktowanie prądu łuku jako przebiegu okresowego może być bardzo odległym przybliżeniem właściwości tego prądu. Zatem także i termin „harmoniczna” prądu musi być używany z dużą rezerwą.

Kompensacja prądów odkształconych pieca łukowego kompensatorem kluczującym, wymagającym łączników tranzystorowych, ze względu na zbyt niską moc łączeniową tranzystorów, nie wchodzi w rachubę. Pozostają do tego celu wyłącznie urządzenia reaktancyjne. Mogą to być w szczególności reaktancyjne filtry rezonansowe.

W przypadku gdy piec łukowy wyposażony jest w adaptacyjny kompensator równoważący, piec jest takim kompensatorem, jak to pokazano w poprzednim rozdziale, przekompensowany. Filtry rezonansowe są dla harmonicznej podstawowej napięcia zasilania równoważne pojemności, która powodowałaby dodatkowe przekompensowanie pieca. Dlatego ich użycie w obecności równowazenia adaptacyjnego nie wydaje się być wskazane.

Jest natomiast korzystne z perspektywy możliwości redukcji odkształcenia prądu zasilania to, że piece łukowe najwyższej mocy zasilane są z transformatorów o względnie niskiej mocy, porównywalnej z mocą pieca. Oznacza to, że transformator taki ma względnie wysoką indukcyjność zwarciovą L_s , która z pojemnością C kompensatora równoważącego tworzy, ze względu na prąd zasilania $i(t)$, filtr dolno-przepustowy, pokazany na Rys. 12. Symbol j na tym rysunku reprezentuje generowany w łuku prąd odkształcony.



Rys. 12. Filtr dolnoprzepustowy utworzony przez transformator i pojemność kompensującą.

Transmitancja prądowo-prądowa takiego filtra ma przebieg

$$B(j\omega) = \frac{I(j\omega)}{J(j\omega)} = \frac{1}{1 - \omega^2 L_s C + j\omega R_s C} \quad (8)$$

przy czym jej moduł może być aproksymowany funkcją

$$|B(\omega)| = \left| \frac{1}{1 - \omega^2 L_s C} \right| = \left| \frac{1}{1 - 2 \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2} \right| \quad (9)$$

gdzie

$$\omega_g = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L_s C}} = b \omega_1 \quad (10)$$

jest częstotliwością graniczną filtra. Filtr taki tłumí wszystkie składowe harmoniczne prądu $i(t)$ o częstotliwości większej od częstotliwości granicznej filtra, tj. w obszarze częstotliwości $\omega > \omega_g$. Tłumienie poszczególnych harmonicznych określone jest wartością $B(\omega)$ dla częstotliwości harmonicznych $\omega_n = n\omega_1$, mianowicie

$$B_n = \frac{I_n}{J_n} = |B(n\omega_1)| = \left| \frac{1}{1 - 2 \left(\frac{n}{b} \right)^2} \right|. \quad (11)$$

Ponieważ moc zwarciowa, na fazę, transformatora zasilanego napięciem E jest równa

$$S_T = E I_z = \frac{E^2}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 L_s^2}} \quad (12)$$

zatem, biorąc pod uwagę, że $R_s \ll \omega_1 L_s$, indukcyjność zwarciowa transformatora ma wartość

$$L_s \approx \frac{E^2}{\omega_1 S_T}. \quad (13)$$

Pojemność C określona jest mocą bierną Q na fazę pieca. Trzeba przy tym uwzględnić konieczność jej powiększenia o 50% tak, aby kompensator równoważący mógł mieć zdolność adaptacyjną. Winna mieć ona wartość

$$C = 1,5 \times \frac{Q}{\omega_1 U_1^2} = 1,5 \times \frac{S \sin \varphi_1}{\omega_1 U_1^2} = 1,5 \times \frac{S}{\omega_1 U_1^2} \sqrt{1 - \lambda_1^2}, \quad (14)$$

gdzie S jest mocą pozorną na fazę pieca. Zatem częstotliwość graniczna filtra

$$\omega_g = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L_s C}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_T}{1,5 \times S}} \frac{1}{\sqrt{1 - \lambda_1^2}} \frac{U_1}{E} \omega_1. \quad (15)$$

Przyjmując, $U_1 \approx E$, oraz $\lambda_1 \approx 0,71$, otrzymuje się częstotliwość graniczną

$$\omega_g = b \omega_1 \approx 1,65 \sqrt{\frac{S_T}{S}} \times \frac{U_1}{E} \times \omega_1. \quad (16)$$

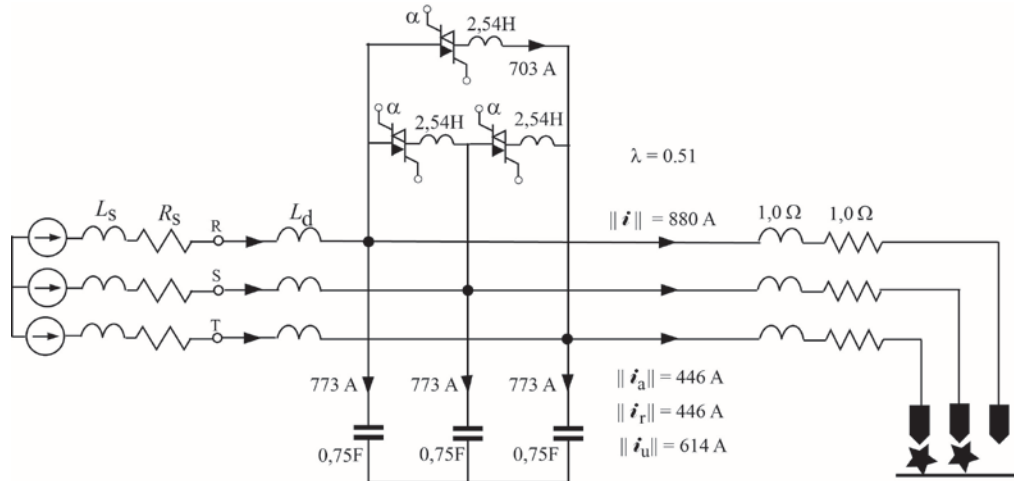
Jeśli więc moc transformatora jest równa mocy pieca, tj. $S_T \approx S$, to częstotliwość graniczna wynosi $\omega_g \approx 1,65 \omega_1$, a więc wszystkie harmoniczne prądu są w obszarze tłumienia. W szczególności

$$B_2 = 0,52, \quad B_3 = 0,18, \quad B_4 = 0,10.$$

Niestety, ze wzrostem względnej mocy transformatora zasilającego S_T , rośnie także częstotliwość graniczna ω_g i obniża się tłumienie harmonicznego prądu. Można to tłumienie powiększyć włączając szeregowo cewki indukcyjne, tak jak jest to pokazane na Rys. 13. Włączenie takich cewek obniża częstotliwość graniczną do wartości

$$\omega_g' = \frac{\omega_g}{\sqrt{1 + L_d/L_s}} \quad (17)$$

Obniża to jednak także i napięcie zasilania, a zatem i moc pieca. Aby odtworzyć pierwotną moc pieca, transformator musi być zasilany wyższym napięciem.



Rys. 13. Adaptacyjny kompensator równoważący z dodatkowymi cewkami indukcyjnymi.

5. WNIOSKI

Przedstawione studium pokazuje, że istnieją obecnie środki techniczne pozwalające równoważyć piec łukowy nawet największych mocy, kompensować ich moc bierną i znacząco obniżyć odształcenie prądu zasilania. Przerwanie łuku gwałtownie zmniejsza jednak moc pieca i jego prądy zasilające. Nie wydaje się jednak, aby istniał jakiś sposób przeciwdziałania skutkom takich zmian, poza zwiększaniem mocy zwarciowej systemu zasilającego piec łukowy.

LITERATURA

- [1] G. Mazznti, A. Fragiacomio, "The state of art about electric arc furnaces for steel use and the compensation pf and their perturbing effects on the grid", *Proc. of 2012 Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives Automation and Motion*. 2012.
- [2] K. Jagiela, J. Rak, M. Gala, M. Kępiniski, "Identification of electric power parameters of ac arc furnace low voltage system", *Proc. of the 14 Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, 2010.
- [3] F. Martell, A.R. Izaguirre, M.E. Macias, "CPC power theory for analysis of arc furnaces", *Proc. of XII Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC 2015*, Lagow, Poland.
- [4] A.R. Izaguirre, M.E. Macias, F. Martell, "Accurate CPC power analysis under extreme EAF's distortion conditions", *Proc. of XII Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC 2015*, Lagow, Poland.
- [5] L.S. Czarnecki, "Powers and compensation in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 6. Compensation of three-phase unbalanced systems in sinusoidal conditions," *On-line Journal: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, www.elektro-innowacje.pl, Vol. 6, 2011, No. 4, pp. 51-57.
- [6] L.S. Czarnecki, P.D. Bhattarai, "A method of calculation of LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces", accepted for publication in *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2016