ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1981

Seria: ELEKTRYKA z. 75 Nr kol. 681

Tadeusz RODACKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

Andrzej DUDA

Instytut Elektrotechniki
WSI Opole

# TYRYSTOROWE UKŁADY SZYBKIEJ KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ

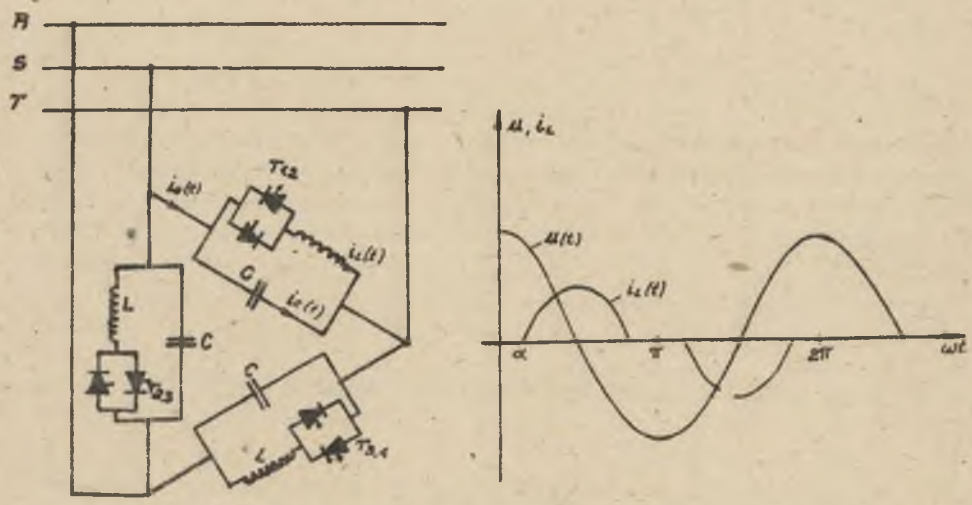
Streszczenie. W artykule omówiono układy kompensacji mocy biernej z tyrystorowo sterowanym dławikiem oraz kompensatory z komutacją wymuszoną. Podano podstawowe zależności opisujące ich pracę i warunki kompensacji mocy biernej.

## 1. Układ z tyrystorowo sterowanym dławikiem

Układ z tyrystorowo sterowanym dławikiem pozwala na kompensację mocy biernej metodą pośrednią. Polega ona na wytwarzaniu niezmiennej mocy biernej pojemnościowej (równej maksymalnemu zapotrzebowaniu) przez baterię kondensatorów C i zużyciu części tej mocy zbędnej do kompensacji w równolegle pracującym regulowanym dławiku L. W układzie tym obwody siłowe każdej fazy składają się z baterii kondensatorów, do której równolegle podłączony jest układ składający się z dwóch przeciwrównolegle pracujących tyrystorów i dławika (rys. 1). Każda faza zasilana jest napięciem $u = \sqrt{2}\,U \cos t$. Przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów $\alpha$ (liczonego od chwili uzyskania przez napięcie zasilające wartości maksymalnej) w zakresie od 0 do $\frac{\pi}{2}$ uzyskuje się zmianę amplitudy pierwszej harmonicznej prądu, a co za tym idzie możliwość regulacji pobieranej mocy biernej. Amplituda pierwszej harmonicznej prądu fazowego kompensatora $I_{k1m}(\alpha)$ jest równa różnicy amplitudy prądu kondensatora i amplitudy pierwszej harmonicznej prądu dławika

$$I_{k1m}(\alpha) = U_m \omega C - I_{L1m}(\alpha).$$

Zależność $I_{L1} = f(\alpha)$ znajdujemy rozkładając w szereg Fouriera funkcję określającą czasowy przebieg prądu dławika $i_{L(t)}$.




Rys. 1. Schemat ideowy układu z tyrystorowo sterowanym dławikiem oraz przebiegi napięcia i prądu $i_{L(t)}$

Ponieważ

$$i_L(t) = \frac{U_m}{\omega L}(\sin\omega t - \sin\alpha),$$

otrzymamy

$$I_{Lim}(\alpha) = \frac{U_m}{\omega L}\left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi}\right).$$

Wartość średnią $I_{śr}$ i skuteczną I prądu płynącego przez jeden tyrystor określają zależności

$$I_{śr} = \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{U_m}{\omega L}\left[2\cos\alpha - (\pi - 2\alpha)\sin\alpha\right],$$

$$I = \frac{U_m}{\omega L}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{3}{2}\sin 2\alpha + (\pi - 2\alpha)\sin 2\alpha\right)}.$$

Prąd dławika $i_L(t)$ ma dla kątów wysterowania $\alpha \neq 0$ kształt impulsów o długości $(\pi - 2\alpha)$. Z tego względu zawartość wyższych harmonicznych w prądzie dławika zależy od kąta wysterowania tyrystorów. Wartość amplitudy n-tej harmonicznej prądu $i_L$ w stosunku do maksymalnej wartości amplitudy prądu dławika (dla $\alpha = 0$) można dla danego kąta $\alpha$ obliczyć z równania

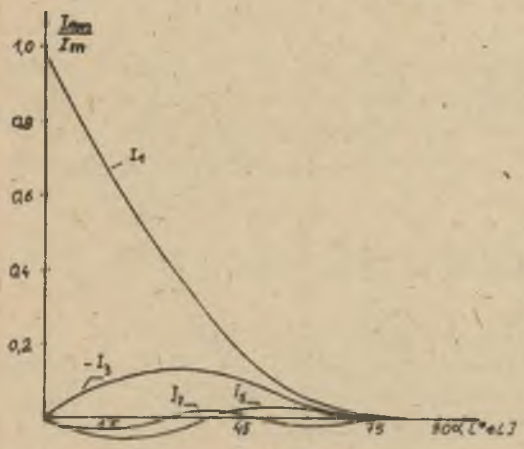
$$\frac{I_{nm}}{I_n} = \frac{4}{\pi}\left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \sin\alpha\frac{\cos n\alpha}{n}\right].$$

gdzie:

$n = 2k+1, \quad k = 0,1,2...$

$I_m = \frac{U_m}{\omega L}$.

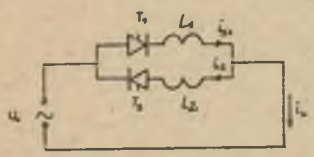
Zależności te w formie graficznej przedstawiono na rys. 2. Z powyższego równania wynika, że w prądzie dławika występują tylko harmoniczne nieparzyste. Należy tu również zwrócić uwagę na fakt, że w prądzie przewodowym kompensatora nie występują harmoniczne, których numery są krotnościami trzech, ponieważ dławiki połączone są w trójkąt. Jak wynika z przedstawionych rozważań moc bierna wnoszona przez wyższe harmoniczne prądu jest niewielka w porównaniu z mocą bierną harmonicznej podstawowej i w praktycznych obliczeniach można ją pominąć, tym bardziej że udział ten zmniejsza się im większa jest moc zwarciowa systemu elektroenergetycznego. W celu ewentualnego zmniejszenia zawartości wyższych harmonicznych w prądzie kompensatora można w miejsce baterii kondensatorów zastosować odpowiednio dobrany filtr L,C wyższych harmonicznych.




Rys. 2. Wykresy zależności $\frac{I_{nm}}{I_m} = f(\alpha)$

## 2. Układ z tyrystorowym sterownikiem o rozdzielonych dławikach

Kompensator mocy biernej przedstawiony na rys. 1 można zmodyfikować, wprowadzając w miejsce indukcyjności L - połączonej szeregowo z przeciwrównoległym układem dwu tyrystorów - układ przedstawiony na rys. 3. Składa się on z dwóch przeciwrównolegle połączonych tyrystorów, przy czym szeregowo z każdym z nich połączony jest jeden dławik L1 i L2. Jeśli napięcie zasilania ma przebieg $u=U_m \sin\omega t$ prąd wyjściowy sterownika $i_L$ jest równy sumie prądów płynących przez dławiki $i_{L1}$ i $i_{L2}$, przy czym:




Rys. 3. Sterownik z rozdzielonymi dławikami

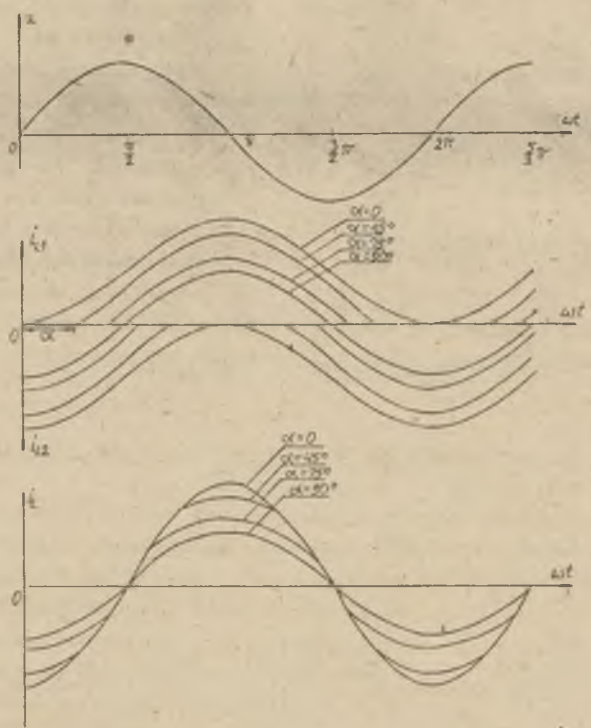
$$i_{L1} = \frac{U_m}{\omega L_1}(\cos\alpha - \cos\omega t) \quad \text{dla} \quad i_{L1} \geq 0,$$

$$i_{L2} = \frac{U_m}{\omega L_2}(-\cos\alpha - \cos\omega t) \quad \text{dla} \quad i_{L2} \leqslant 0.$$

Przy założeniu $L_1 = L_2 = L$, otrzymamy:

$$i_L(t) = \begin{cases} -2\, I_m \cos\omega t & \text{dla} \quad i_{L1} > 0 \;\; \text{i} \;\; i_{L2} < 0 \\ I_m(\cos\alpha - \cos\omega t) & \text{dla} \quad i_{L2} = 0 \\ I_m(-\cos\alpha - \cos\omega t) & \text{dla} \quad i_{L2} = 0 \end{cases}$$

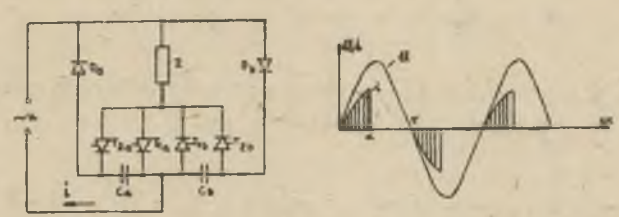
Wynika stąd, że prąd sterownika ma przebieg ciągły dla $0 \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{2}$, a dla $\frac{\pi}{2} \leqslant \alpha \leqslant \pi$ ma przebieg impulsowy, analogiczny jak w układzie z pkt. 1 (kąt wysterowania $\alpha$ liczony jest od przejścia napięcia przez 0). Na rys. 4 przedstawiono przebiegi napięcia i prądów $i_{L1}$, $i_{L2}$, $i_L$ dla różnych kątów $\alpha$ z przedziału $0 \leqslant \alpha \leqslant \frac{\pi}{2}$.




Rys. 4. Przebiegi napięcia i prądów w sterowniku o rozdzielonych dławikach

## 3. Tyrystorowe kompensatory mocy biernej z komutacją wymuszoną

Przekształtnik tyrystorowy zasilany z sieci prądu przemiennego może być wykorzystany jako kompensator mocy biernej, jeżeli zastosujemy komutację wymuszoną tyrystorów. Komutacja wymuszona pozwala na załączanie i wyłączanie tyrystorów w dowolnej chwili czasowej, co pozwala na uzyskanie wyprzedzenia przebiegu napięcia zasilania przez pierwszą harmoniczną prądu.



Rys. 5. Schemat ideowy jednofazowego kompensatora mocy biernej z komutacją wymuszoną oraz przebiegi napięcia i prądu

Na rys. 5 przedstawiono schemat prostego jednofazowego kompensatora z komutacją wymuszoną. Zakładając, że obciążenie układu ma charakter rezystancyjny oraz że załączenie tyrystorów głównych następuje na początku każdego półokresu napięcia zasilającego prąd i(t) można określić równaniem:

$$i(t) = \begin{cases} I_m \sin\omega t & \text{dla} \quad 0 \leqslant \omega t < \alpha \\ 0 & \text{dla} \quad \alpha < \omega t < \pi \end{cases}$$

gdzie:

$I_m = \frac{U_m}{R}$, $u(t) = U_m \sin\omega t$,

$\alpha$ - kąt wyłączenia tyrystora głównego.

Rozwijając powyższą funkcję w szereg Fouriera otrzymujemy

$$i(t) = \frac{U_m}{2\pi R}\Big[(2\alpha - \sin 2\alpha)\sin\omega t + (1 - \cos 2\alpha)\cos\omega t +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+1)\sin 2n\alpha - n\sin 2(n+1)\alpha}{n(n+1)} \sin(2n+1)\omega t +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+1)\cos 2n\alpha - n\cos 2(n+1)\alpha - 1}{n(n+1)} \cos(2n+1)\omega t.$$

Z powyższej zależności wynika, że dla pierwszej harmonicznej prądu przekształtnik pobiera z sieci moc czynną

$$P = \frac{U^2}{2\pi R}(2\alpha - \sin 2\alpha)$$

oraz jest źródłem mocy biernej indukcyjnej

$$Q = -\frac{U^2}{2\pi R}(1 - \cos 2\alpha) = -\frac{U^2}{\pi R}\sin^2\alpha.$$

Przeanalizujemy dla przykładu przypadek kompensacji trójfazowego odbiornika o mocy $P_o$ i współczynniku obciążenia $\cos\varphi_o$

$$i_o(t) = I_o \sin(\omega t - \varphi_o) \quad \text{gdzie:} \quad I_o = \sqrt{\frac{2}{3}}\,\frac{P_o}{U\cos\varphi_o}$$

dla kompensatora

$$i_k(t) = I_{km}\sin\omega t \quad \text{dla} \quad 0 < \omega t < \alpha ,$$

gdzie

$$I_{km} = \frac{U_m}{R}.$$

Uwzględniając tylko pierwszą harmoniczną można napisać

$$R = \frac{3\,U^2(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2\pi P_k}.$$

Wypadkowy prąd fazowy $i(t)$ układu odbiornik-kompensator jest równy

$$i(t) = \begin{cases} i_o(t) + i_k(t) = \sqrt{I_o^2 + I_k^2 + 2I_oI_k\cos\varphi_o}\,\sin(\omega t - \psi) & \text{dla} \quad 0 < \omega t < \alpha \\ i_o(t) & \text{dla} \quad \alpha < \omega t < \pi , \end{cases}$$

gdzie

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{I_o\sin\varphi_o}{I_o\cos\varphi_o + I_k} = \left[\frac{1}{1 + \frac{2\pi}{(2\alpha - \sin 2\alpha)}\frac{P_k}{P_o}}\right]\operatorname{tg}\varphi_o.$$

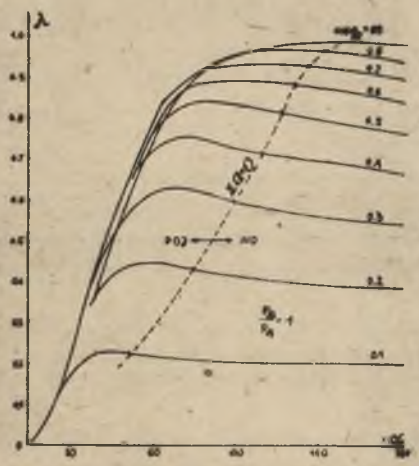
Po obliczeniu wartości skutecznej prądu $i(t)$ można obliczyć wypadkowy współczynnik mocy układu $\lambda$ określony jako

$$\lambda = \frac{P_o + P_k}{3UI} = \left(1 + \frac{P_k}{P_o}\right)\left[\frac{1}{2\pi}\left[1 + \frac{4\pi^2 \cos\varphi_o}{(2\alpha - \sin 2\alpha)^2}\left(\frac{P_k}{P_o}\right)^2 + \right.\right.$$

$$+ \frac{4\pi \cos\varphi_o}{2\alpha - \sin 2\alpha}\left(\frac{P_k}{P_o}\right)\Big]\Big[2\alpha - \sin 2(\alpha - \psi) - \sin 2\psi +$$

$$\left. + 2\pi - 2\alpha + \sin 2\varphi_o + \sin 2(\alpha - \varphi_o)\right]^{-\frac{1}{2}} \cos\varphi_o.$$

Rodzinę funkcji $\lambda = f(\alpha)$ obliczonych dla założenia $\frac{P_k}{P_o} = 1$ i różnych wartości $\cos\varphi_o$ przedstawia rys. 6.




Rys. 6. Wykresy zależności $\lambda = f(\alpha)$

Z zależności przedstawionych powyżej można również obliczyć wartość kąta $\alpha$, przy którym sumaryczna moc bierna odbiornika i kompensatora jest równa zeru

$$Q_o + Q_k = 0,$$

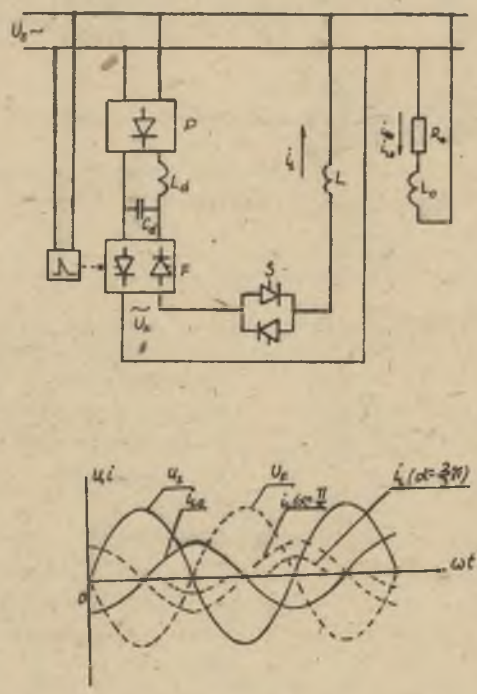
po podstawieniu odpowiednich zależności uzyskamy dla pierwszej harmonicznej

$$2\frac{P_k}{P_o}\,\mathrm{ctg}\,\varphi_o = (2\alpha - \sin 2\alpha).$$

Rozwiązanie tego równania dla $\frac{P_k}{P_o} = 1$ i różnych wartości $\cos\varphi_o$ przedstawiono na rys. 6 linią przerywaną. Z wykresów tych wynika, że dla każdego $\cos\varphi_o$ istnieją dwie optymalne wartości kąta $\alpha$: jedna zapewniająca maksymalny współczynnik mocy $\lambda$ i druga, przy której sumaryczna moc bierna układu odbiornik-kompensator jest równa zeru.

## 4. Kompensatory z komutacją wymuszoną i pośredniczącym obwodem prądu stałego

Na rys. 7 podano schemat blokowy kompensatora mocy biernej indukcyjnej z pośredniczącym obwodem prądu stałego. Układ składa się z: prostownika P, filtru $L_d - C_d$, falownika F, sterownika S i dławika L. Napięcie wyjściowe falownika $u_F$ jest przesunięte w fazie względem napięcia sieci zasilającej $u_s$ o kąt $\pi$. Zakładając, że obciążenie falownika jest czysto in-




Rys. 7. Schemat blokowy kompensatora z pośredniczącym obwodem prądu stałego oraz przebiegi prądów i napięć w układzie

dukcyjne, a kąt wysterowania $\alpha$ tyrystorów sterownika S wynosi $\frac{\pi}{2}$, to prąd dławika $i_L$ jest prądem sinusoidalnym opóźnionym o kąt $\frac{\pi}{2}$ względem napięcia falownika. Oznacza to, że prąd $i_L$ wyprzedza o kąt $\frac{\pi}{2}$ napięcie sieci zasilającej, czyli że ma charakter pojemnościowy.

Regulację skutecznej wartości prądu dławika $i_L$ można uzyskać poprzez:

- regulację napięcia stałego zasilającego falownik (poprzez zastosowanie prostownika sterowanego),
- przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów sterownika w zakresie od $\frac{\pi}{2}$ do $\pi$.

Pracę kompensatora ilustrują przebiegi napięć i prądów przedstawione na rys. 7.

LITERATURA

[1] GYUGGI I., OTTO R.A., PUTMAN T.H.: Principles and application of static, thyristor-controlled shunt compensators. IEEE - Transactions, 1978.

[2] ERLICKI M., EMANNUEL-EIGELES A.: New Aspects Power Factor Improvement (część I i II). IEEE - Transactions, 1968.

[3] Materiały na krajową konferencję napędu elektrycznego i energoelektroniki. Kraków 1977.

[4] TUNIA H., WINIARSKI B.: Podstawy Energoelektroniki. WNT, Warszawa 1980.

[5] DĄBROWSKI W., MARKIEWICZ H.: Kompensacja mocy biernej obciążeń szybkozmiennych przy występowaniu przebiegów odkształconych prądu i napięcia. Przegląd Elektrotechniczny nr 3, 1978.

Wpłynęło do Redakcji w maju 1980

Recenzent:
Doc. dr Zbigniew Białkiewicz

## ТИРИСТОРНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ БЫСТРОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Р е з ю м е

В работе описаны управляемый статический источник реактивной мощности с тиристорно управляемыми реакторами, а также тиристорные компенсаторы с внутренней коммутацией. Представлены основные зависимости, описывающие их работы и условия компенсации реактивной мощности.

## THE THYRYSTOR-CONTROLLED DEVICES FOR REACTIVE POWER COMPENSATION

S u m m a r y

The paper describes and analyses the thyrystor-controlled devices for reactive power compensation, particularly the static, thyristor-controlled inductor type compensator and devices with controlled firing and execution angles of the thyristors.