

Piotr Gruszczyński

KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ
W DOŁOWYCH SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH
NISKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie. Przeanalizowano techniczno-ekonomiczne aspekty kompensacji mocy biernej w dołowych sieciach elektroenergetycznych NN. Uwzględniono możliwość zwiększenia obciążalności przewodów i transformatorów, zmniejszenie spadków napięć, i zmniejszenie strat energii elektrycznej.

1. Wstęp

Kopalnie węgla kamiennego należą do grupy odbiorców o dużym poborze mocy i energii elektrycznej. Z odbiorów kopalnianych do grupy charakteryzującej się najniższą wartością współczynnika mocy należą odbiory dołowe. Duże zapotrzebowanie mocy biernej przez odbiory dołowe wpływa w istotny sposób na współczynnik mocy całej kopalni, stwarzając konieczność jej kompensacji. Wytworzona w tym celu na powierzchni na wysokim napięciu moc bierna przesyłana jest kablami do podziemi aż do końcowych odcinków sieci niskiego napięcia.

Moc bierna obciąża elementy układu elektroenergetycznego, ogranicza przepustowość urządzeń, wywołuje spadki napięcia i powoduje występowanie strat mocy czynnej. Zastosowanie kompensacji mocy biernej w sieciach dołowych NN mogłoby odciążyć od przesyłu mocy biernej całą podziemną sieć WN jak również część sieci NN, w zależności od miejsca usytuowania urządzeń kompensujących.

W ogólnoprzemysłowej gospodarce elektroenergetycznej kompensacja mocy biernej rozpatrywana jest głównie z punktu widzenia strat mocy czynnej. Celem tak pojętej kompensacji jest zmniejszenie całkowitych kosztów wytwarzania i przesyłania energii elektrycznej. W dołowych sieciach elektroenergetycznych NN równorzędne, a w szczególnych przypadkach nawet większe, znaczenie może mieć przepustowość elementów sieci względnie spadki napięcia. Wynika to z faktu, że sieć NN stanowi w układzie elektroenergetycznym zasadnicze ograniczenie mocy jednostkowej odbiorników. Moce przewoźnych stacji transformatorowych są ograniczone ze względu na możliwości transportowe w wyrobiskach podziemnych, przekroje przewodów ograniczone są koniecznością uzyskania odpowiedniej giętkości.

Przeprowadzona zostanie analiza poszczególnych aspektów kompensacji oraz ich znaczenie na obecnym etapie rozwoju elektryfikacji podziemi kopalń w Polsce.

2. Zwiększenie obciążalności przewodów i transformatorów

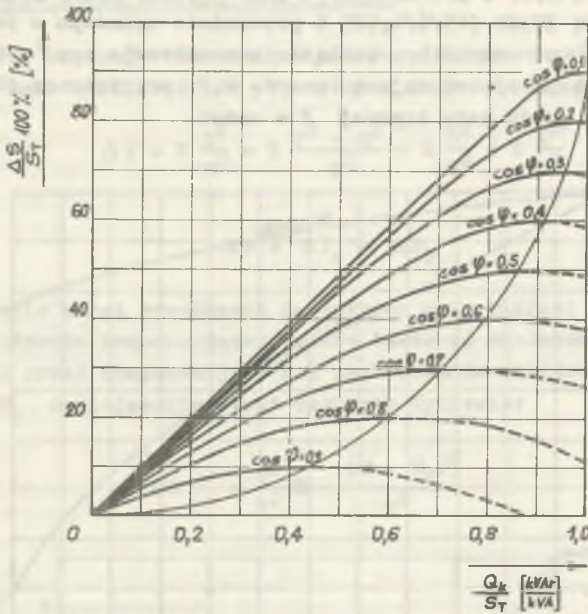
Stosowane w dołowych sieciach elektroenergetycznych kable i przewody oponowe górnicze na napięcie $U_n = 1$ kV posiadają obciążalność długotrwałą, której wartość dla przekroju s_n stanowi ok. 80% wartości obciążalności długotrwałej odpowiadającej przekrojowi o jeden stopień większemu s_{n+1} . W przypadku gdy dopuszczalna długotrwała obciążalność przewodów decyduje o ich zastosowaniu, wówczas kompensując moc bierną w miejscu jej poboru, można by podjąć próbę stosowania przekrojów o jeden stopień mniejszych. Wymagałoby to praktycznie zwiększenia współczynnika mocy o ok. 0,15 w zakresie wartości początkowej $\cos \varphi_p = 0,5-0,7$ (bez poboru dodatkowej mocy czynnej).

W praktyce konieczność zapewnienia odpowiedniego napięcia na zaciskach odbiorników sprawia, że o przekroju przewodów decyduje zwykle wartość dopuszczalnego spadku napięcia a nie długotrwała obciążalność. Również uzyskanie przepisowych warunków wyłączania zwarc, przy obecnie stosowanych zabezpieczeniach zwarciovych, zmusza często do zwiększania prądu zwarcia przez stosowanie przekrojów większych niż wynika to z obciążenia prądowego. W tych warunkach efekt zwiększenia obciążalności przewodów drogą kompensacji jest niemożliwy do uzyskania.

Obok przewodów drugim zasadniczym elementem układu elektrycznego sieci dołowych są transformatory. Zastosowanie urządzenia kompensującego po stronie wtórnej transformatora pozwala na uzyskanie rezerwy mocy i dodatkowe obciążenie transformatora. Wielkość uzyskanej rezerwy ΔS_T , przy zastosowaniu urządzenia kompensującego o mocy Q_k , może być określona przy pomocy wzoru (1) [1]:

$$\Delta S_T = S_T - \sqrt{S_T^2 - 2 Q_T Q_k + Q_k^2} \quad (1)$$

Na rys. 1 przedstawiono graficznie zależność uzyskanej rezerwy mocy ΔS_T , wyrażonej w procentach mocy transformatora S_T , w funkcji mocy urządzenia kompensującego Q_k (wyrażonej stosunkiem Q_k/S_T) dla różnych wartości współczynnika mocy przed kompensacją $\cos \varphi_p$. Założono także, że pobór mocy czynnej nie ulega zmianie. Linia ciągła poprowadzona przez wierzchołki krzywych odpowiada kompensacji do wartości współczynnika mocy $\cos \varphi = 1$ i wskazuje maksymalne możliwości uzyskania rezerwy mocy.



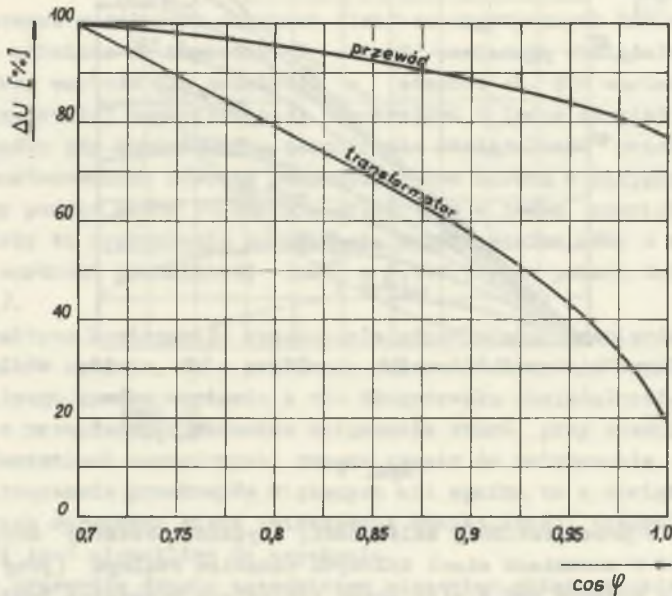
Rys. 1

Jak wynika z przedstawionej zależności, uzyskanie rezerwy mocy rzędu $0,25 S_T$ jest w warunkach sieci dołowych zadaniem realnym (przy $\cos \varphi_p = 0,6-0,7$), co mogłoby być w niektórych sytuacjach korzystne. Trudność stanowi stosunkowo duża moc urządzeń kompensujących rzędu $0,4 S_T$. Ponadto ze względu na zmienny charakter obciążenia transformatorów górniczych moc urządzeń kompensujących wymagałaby regulacji.

3. Zmniejszenie spadków napięcia

Poziom napięcia na zaciskach odbiorników zależy od spadku napięcia na drodze przesyłu energii. Przyjmując założenie upraszczające, że spadek napięcia jest równy podłużnej stracie napięcia, wpływ charakteru obciążenia na ΔU jest uzależniony w dużym stopniu od wzajemnego stosunku reaktancji i rezystancji obwodu. Tym samym wpływ kompensacji mocy biernej na spadek napięcia będzie zależał od stosunku $\frac{X}{R}$. Ponieważ drogą kompensacji mocy biernej można zmniejszyć jedynie składową bierną spadku napięcia ($IX \sin \varphi$), efekt takiej kompensacji będzie tym większy, im większy jest udział reaktancji indukcyjnej w impedancji całego obwodu. W obwodzie z przewagą rezystancji wpływ kompensacji na spadek napięcia będzie minimalny ze względu na to, że składowa czynna ($IR \cos \varphi$) nie ulegnie zmianie (zakładając, że źródło mocy biernej nie pobiera mocy czynnej).

Przykładowo na rys. 2 przedstawiono zależność spadku napięcia w transformatorze stacji IT3Sb 315/6/0,525 i przewodzie oponowym o przekroju żył roboczych 70 mm^2 od charakteru obciążenia w zakresie $\cos \varphi = 0,7-1,0$. Wartość spadku napięcia odpowiadającą $\cos \varphi = 0,7$ przyjęto za 100%, założono również stały pobór mocy czynnej $P = \text{const}$.



Rys. 2

Zróznicowany przebieg krzywych spowodowany jest różnym stosunkiem reaktywności do rezystancji (dla transformatora $\frac{X}{R} = 4,5$ dla przewodu oponowego $\frac{X}{R} = 0,3$). Ponieważ właśnie impedancja kabli i przewodów ma największy udział w impedancji sieci dołowych NN, wpływ kompensacji na spadek napięcia jest ograniczony.

Stosunkowo duże zmiany ΔU można uzyskać w transformatorach gdzie $X_T > R_T$. Jednak impedancja transformatora ma na ogół niewielki udział w całkowitej impedancji sieci, co sprawia, że nawet przy jego pełnym wykorzystaniu ΔU_T stanowi zwykle mniej niż połowę ogólnego ΔU .

Spadek napięcia przy rozruchu silników asynchronicznych zwartych, który ma bardzo duży wpływ na pracę sieci NN, jest w znacznej mierze wywołany nadmiernym poborem mocy biernej. Jej kompensacja, jakkolwiek w istotny sposób zmieniałaby warunki napięciowe przy rozruchu, jest z technicznego punktu widzenia trudna do zrealizowania. Natomiast kompensacja mocy biernej o wartość taką, którą silnik asynchroniczny pobiera podczas obciążenia znamionowego, ma niewielki wpływ na przebieg rozruchu.

4. Zmniejszenie strat energii elektrycznej

Straty mocy czynnej w elementach układu elektroenergetycznego o rezystancji R zależą od kwadratu przesyłanej mocy czynnej i biernej:

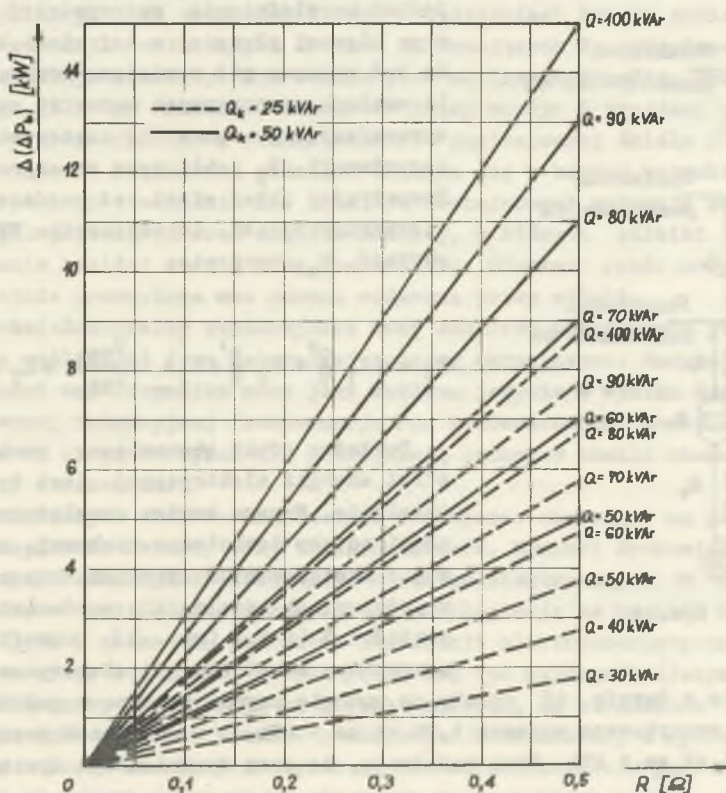
$$\Delta P = R \frac{S^2}{U^2} = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = R \frac{R^2}{U^2} + R \frac{Q^2}{U^2} \quad (2)$$

czyli:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_b \quad (3)$$

Zmniejszenie strat wywołanych przepływem mocy biernej zależy nie tylko od mocy urządzenia kompensującego, lecz także od wielkości przepływającej mocy biernej przed kompensacją. Przy zastosowaniu urządzenia kompensującego o mocy Q_k zmniejszenie strat czynnych wyniesie:

$$\Delta(\Delta P_b) = \frac{Q^2}{U^2} R - \frac{(Q - Q_k)^2}{U^2} R \quad (4)$$



Rys. 3

czyli

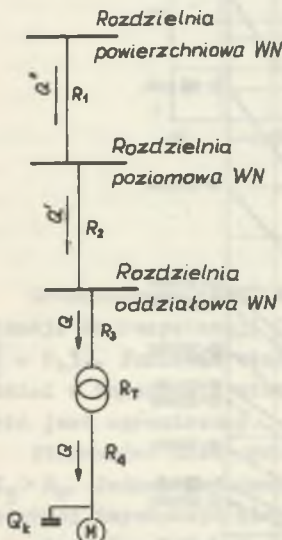
$$\Delta (\Delta P_b) = Q_k(2Q - Q_k) \frac{R}{U^2} \quad (5)$$

Na rys.3 przedstawiono wykresy obrazujące zmniejszenie strat mocy czynnej $\Delta (\Delta P_b)$ w funkcji rezystancji sieci o napięciu znamionowym 500 V, dla różnych wartości mocy biernej Q , przy zastosowaniu urządzeń kompensujących o mocy $Q_k = 25$ i 50 kVAr. Pozwalają one na szacunkowe określenie zmniejszenia strat $\Delta (\Delta P_b)$ w dołowych sieciach elektroenergetycznych o napięciu $U_n = 500$ V.

Chcąc uzyskać maksymalne efekty zmniejszenia strat mocy należałoby instalować urządzenia kompensujące w końcowych odcinkach sieci NN ze względu na stosunkowo dużą rezystancję kabli i przewodów oponowych. Przykładowo: rezystancja jednostkowa przewodu oponowego o przekroju 70 mm^2 wynosi $0,25 \Omega/\text{km}$, rezystancja transformatora stacji IT3Sb 315/6/0,525 wynosi $0,007 \Omega$, rezystancja jednostkowa kabla o przekroju 35 mm^2 Cu 6 kV wynosi $0,52 \Omega/\text{km}$, co po sprowadzeniu na napięcie 500 V daje $r_k = 0,004 \Omega/\text{km}$.

Obliczanie $\Delta (\Delta P_b)$ w sieciach WN wymaga jednak uwzględnienia rzeczywistej wartości mocy biernej płynącej w tej sieci, która może być większa niż w miejscu kompensacji. W obliczeniach szacunkowych można to uwzględnić wprowadzając do wzoru (5) zastępczą wartość rezystancji R_z obliczoną ze wzoru (6) [2]. Rozpatrując układ sieci od rozdzielni powierzchniowej WN do odbiornika NN (rys.4) wartość R_z wyniesie:

$$R_z = (R_1 \frac{Q''}{Q} + R_2 \frac{Q'}{Q} + R_3) \left(\frac{U_{NN}}{U_{WN}} \right)^2 + R_T + R_4 \quad (6)$$



Rys. 4

Dokładny efekt ekonomiczny zmniejszenia strat energii elektrycznej jest trudny do ustalenia. Wymaga bowiem uwzględnienia trudności natury techniczno-ruchowej, wiążących się z instalowaniem urządzeń kompensujących w podziemiach kopalni. Dla porównania jednak wartości $\Delta (\Delta P_b)$ (rys. 3) określić można szacunkowy koszt energii elektrycznej.

Zgodnie z taryfą A2 opłaty za energię czynną pobraną w godzinach obciążenia szczytowego wynoszą 1,00 zł za 1 kWh, a w godzinach pozaszczytowych 0,26 zł za 1 kWh. Przy założeniu, że przy dwuzmianowym systemie pra-

cy udział strefy szczytowej wyniesie średnio w ciągu roku 20%, średni koszt jednostkowy energii elektrycznej wyniesie:

$$k_{\text{śr}} = 0,2 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,26 = 0,41 \text{ zł/kWh}$$

Zakładając następnie średnie wykorzystanie czasu pracy maszyn na ok. 10 godz. w ciągu doby, to w ciągu 300 dni roboczych w roku szacunkowy koszt energii elektrycznej czynnej, zużytej przez 1 kW mocy wyniesie:

$$K = 0,41 \cdot 10 \cdot 300 = 1230 \text{ zł}$$

Jest to również suma, którą zaoszczędzić można w ciągu roku z tytułu zmniejszonych opłat za energię czynną, zmniejszając straty mocy czynnej o 1 kW.

5. Zakończenie

Specyfika procesu technologicznego w podziemiach kopalń zmniejsza efektywność wszelkich naturalnych środków zmierzających do podwyższenia wartości współczynnika mocy. Nie zawsze jest możliwe całkowite wyeliminowanie biegu jałowego silników. Charakter pracy maszyn i urządzeń uniemożliwia dobór mocy silników i transformatorów dostosowanej ściśle do obciążenia. Obciążenie większości silników zmienia się w bardzo szerokich granicach. Przebiegi obciążenia np. silników kombajnowych wykazują szereg krótkotrwałych przeciążeń oraz dłuższe momenty, w których silniki obciążone są znacznie poniżej swojej mocy znamionowej. Wówczas pobór mocy biernej kilkakrotnie przewyższa moc czynną oddawaną przez silnik.

W efekcie naturalny współczynnik mocy odbiorów przodkowych jest bardzo niski, a możliwości jego naturalnej poprawy ograniczone. Radykalna poprawa wartości współczynnika mocy jest możliwa jedynie w wyniku dostarczenia mocy biernej indukcyjnej (kompensacja np. kondensatorami statycznymi). Uzyskane tą drogą korzyści nie przesądzają jednak w chwili obecnej o celowości jej stosowania.

Z technicznych efektów kompensacji praktyczne znaczenie ma jedynie możliwość uzyskania rezerwy mocy transformatorów. Warunki środowiskowe podziemi kopalń zmuszają do stosowania urządzeń elektrycznych w specjalnym wykonaniu, co najczęściej utrudnia ich eksploatację ze względu na szczupłość miejsca i przenośny charakter instalacji elektroenergetycznych NN.

Kondensatory statyczne, które wydają się być najdogodniejszym technicznym rozwiązaniem kompensacji na niskim napięciu, są stosunkowo kosztowne i zajmują dużo miejsca. Obecnie produkowane kondensatory z syciwem syntetycznym, których rozmiary i ciężar są znacznie mniejsze w porównaniu z jednostkami olejowymi, wymagałyby adaptacji do warunków kopalnianych z uwagi

na brak komory przyłączeniowej i niedostateczną wytrzymałość na uszkodzenia mechaniczne, co wiąże się z dalszym wzrostem ciężaru i rozmiarów.

Oznacza to konieczność kompensacji mocy biernej na powierzchni kopalni na napięciu 6 kV, w celu poprawy ogólnego współczynnika mocy całej kopalni. Okolicznością korzystną jest fakt, że na powierzchni kopalni istnieje najczęściej możliwość wykorzystania do kompensacji mocy biernej przewzbudzonych silników synchronicznych dużej mocy.

Zagadnienie kompensacji mocy biernej w dołowych sieciach NN może jednak nabrać większego znaczenia przy dalszym postępie w budowie kondensatorów energetycznych jak również przy ewentualnych zmianach relacji cen na kondensatory i energię elektryczną.

LITERATURA

- [1] Majmin S.R. i inni: Racjonalnoje rozmieszczeniejje kondensatornych ustanowok na ugotlnych szachtach. Gornaja elektromiechanika i awtomatika. Resp. mieżwied. nauczno-tiechn. sbornik. Charkow, 1968, Wyp. 9.
- [2] Majmin S.R. i inni: Ekonomiczeski celesoobraznaja moszcznost nisko-woltnych rudnicznich wzrywobiezopasnych kondensatorow. Gornaja elektromiechanika i awtomatika. Resp. mieżwied. nauczno-tiechn. sbornik. Charkow, 1969, Wyp. 13.
- [3] Gruszczyński P., Krasucki F., Zarański T.: Wstępna analiza celowości stosowania kompensacji mocy biernej w górniczych sieciach elektroenergetycznych NN (niepublikowana) Praca IEIAG: RG1/NB/3/1972.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье проведён анализ технико-экономических аспектов компенсации реактивной мощности в подземных электроэнергетических сетях низкого напряжения. Учитывается также возможность увеличения нагрузки на проводах и трансформаторах, уменьшение падения напряжения и уменьшение потерь электроэнергии.

COMPENSATION OF THE REACTIVE POWER IN THE UNDERGROUND ELECTROENERGETICAL NETS

S u m m a r y

In this paper have been analysed the technical and economical aspects of the reactive power compensation in the underground electroenergetical low voltage nets. There have been considered possibilities for increasing the load capacity of cables and transformers, decreasing the voltage drops and power losses.