POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 74 Electrical Engineering 2013

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA WPŁYWU PRZEKRACZANIA DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA MOCY W SIECI NN NA PRACĘ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Minimalna wartość współczynnika mocy w sieci elektroenergetycznej jest ograniczona a jego wartość określają przepisy. Za dotrzymywanie wartości współczynnika mocy odpowiada odbiorca energii elektrycznej, jednak aktualnie drobni odbiorcy energii elektrycznej nie ponoszą żadnych konsekwencji finansowych za niedotrzymywanie tego parametru, jakkolwiek spółki dystrybucyjne ponoszą koszty zwiększonych strat energii. W referacie, przy wykorzystaniu programu Mathcad, przedstawiono propozycję szacowania dodatkowych strat energii powodowanych obniżoną wartością współczynnika mocy.

1. WPROWADZENIE

W oparciu o Ustawę z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo Energetyczne, tekst jednolity z późniejszymi zmianami, wraz z aktami wykonawczymi a w szczególności z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r. nr 93, poz. 623 wraz z późniejszymi zmianami, do parametrów jakościowych energii elektrycznej należy między innymi wymaganie, by Odbiorca nie pobierał mocy większej od mocy umownej przy współczynniku tg φ nie większym niż 0.4. Zwykle, w praktyce inżynierskiej, nie używa się jednak określenia „współczynnik tg φ" lecz współczynnik mocy cos φ. Dla tg φ = 0.4 wartość współczynnika mocy cos φ = 0.929.

Wartość współczynnika mocy jest powiązana z takimi parametrami należącymi również do parametrów jakościowych energii elektrycznej jak wartość napięcia i wartość mocy pobieranej. Aktualnie często mówi się, że ochrona środowiska polega w dużym stopniu na zmniejszeniu zużycia energii elektrycznej, by przez jej nadmierne wytwarzanie nie powodować dodatkowego zanieczyszczania środowiska.

* Politechnika Poznańska.

Zmniejszone zużycie energii elektrycznej polega nie tylko na ograniczeniu poboru mocy czy energii ale w dużym stopniu na ograniczaniu strat związanych z jej wytwarzaniem i przesyłaniem. Straty mocy w systemie elektroenergetycznym są szacowane na około 10% mocy wytwarzanej. Przy dużej mocy systemu straty te są duże, dlatego konieczne jest każde działanie mające na celu ograniczanie strat. Do takich działań należy między innymi ograniczanie wytwarzania i przesyłania mocy biernej, co w znacznym stopniu jest związane z wartością współczynnika mocy. Należy rozróżniać moc bierną indukcyjną i pojemnościową. W sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia, praktycznie zawsze, przesyłana i odbierana jest moc bierna indukcyjna. Moc ta jest dostarczana z sieci rozdzielczej średniego napięcia. Ta sieć jest z kolei zasilana z sieci przesyłowej o napięciu 220 kV lub 400 kV, połączonej bezpośrednio z elektrowniami. Generatory w elektrowniach są przystosowane do wytwarzania mocy biernej indukcyjnej. Ich znamionowy współczynnik mocy musi się mieścić w przedziale od 0.8 do 1, przy przewzbudzeniu. Aktualnie, w krajowym systemie elektroenergetycznym, tylko generatory w elektrowni Żarnowiec, które ze względu na współpracującą z nimi linię 400 kV zwykle pracują przy niedowzbudzeniu, co oznacza, że nie wytwarzają mocy biernej indukcyjnej.

2. WPŁYW MOCY BIERNEJ NA PRACĘ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

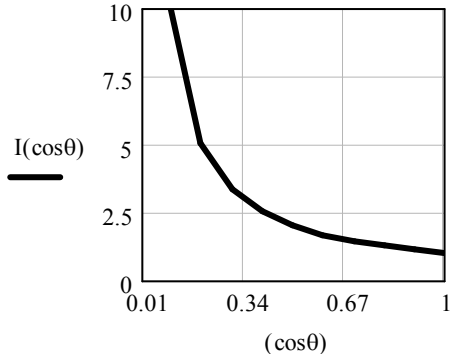
W sieci elektroenergetycznej, przy pobieranej wartości mocy czynnej P natężenie prądu I zależy od wartości współczynnika mocy cosφ, zgodnie ze wzorem

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\theta}$$

którym U jest napięciem międzyfazowym. Wpływ wartości współczynnika mocy na natężenie prądu przy mocy P, pokazano na rys. 1. Iloczyn prądu i napięcia jest mocą pozorną S. Moc pozorna S = P + jQ, gdzie Q jest mocą bierną.

Wartości na rysunku 1 przedstawiono w jednostkach względnych odniesionych do natężenia prądu przy cosφ = 1. Z rysunku wynika, że przy stałej wartości mocy czynnej natężenie prądu wzrasta przy maleniu wartości współczynnika, czyli przy wzroście przenoszonej mocy biernej. Jeśli cosφ = 1 moc bierna jest równa 0, a natężenie prądu jest najmniejsze. Z tego wynika, że każda przemiana energii powinna się odbywać przy maksymalnej wartości współczynnika mocy. Ponieważ urządzenia elektromagnetyczne takie jak maszyny elektryczne i transformatory potrzebują dla swego działania mocy biernej indukcyjnej, należy zawsze rozważać możliwość wytwarzania takiej mocy w miejscu jej zapotrzebowania, by odciążać generatory od jej wytwarzania a sieć od przesyłania mocy biernej. Ponieważ taka sytuacja nie zawsze jest technicznie możliwa i ekonomicznie uzasadniona, należy

tak planować gospodarkę mocą bierną indukcyjną, by straty mocy czy energii były jak najmniejsze. Równocześnie należy mieć na uwadze, że przy wytwarzaniu mocy biernej indukcyjnej generatory pracują przy przewzbudzeniu, a zatem przy dużej wartości prądu wzbudzenia, która wpływa na zwiększenie momentu maksymalnego, czyli na powiększenie przeciążalności. Tak więc dla zwiększenia stabilności systemu elektroenergetycznego generatory powinny wytwarzać moc bierną indukcyjną. W takim przypadku jaki występuje w elektrowni w Żarnowcu, kiedy z konieczności generatory pracują przy niedowzbudzeniu, czyli przy małym prądzie wzbudzenia, trzeba się liczyć z możliwością niestabilnej pracy generatora w systemie elektroenergetycznym.



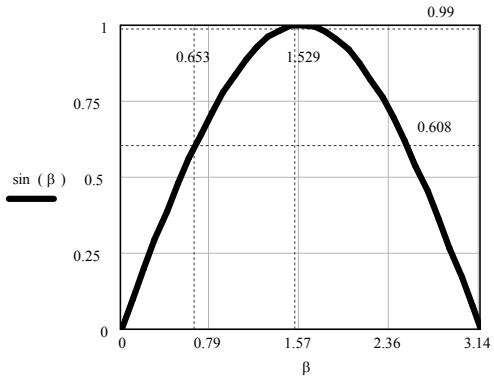
Rys. 1. Zależność natężenia prądu od wartości współczynnika mocy

Dla przykładu można podać, że np. generator o mocy 37,5 MVA, 6.3 kV podczas pracy w warunkach znamionowych, to jest przy współczynniku mocy 0.8 indukcyjnym i przy znamionowym prądzie wzbudzenia wynoszącym 310 A oraz kącie mocy (obciążenia) 37.4 stopnia, kiedy oddaje do sieci 22.5 MVAr mocy biernej indukcyjnej ma przeciążalność 1.64, to przy małym niedowzbudzeniu, przy prądzie wzbudzenia 0.7 prądu znamionowego (217 A), przy kącie mocy 87.7 stopnia i przy współczynniku mocy 0.9 poj. kiedy oddaje do sieci 16.35 MVAr mocy biernej pojemnościowej ma przeciążalność tylko 1.0008. Charakterystykę momentu, na której zaznaczono punkty pracy generatora, w funkcji kata obciążenia β pokazano na rys. 2. W obu rozważanych punktach obciążenia generatora straty mocy w uzwojeniu twornika są jednakowe, bo w obu przypadkach prąd twornika jest znamionowy. Przy niedowzbudzeniu mniejsze są straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia, bo mniejszy jest prąd wzbudzenia. Na rysunku 2 zaznaczono kąt obciążenia β = 37.4 (0.653) dla pracy znamionowej oraz kąt β = 87.7 (1.529) przy niedowzbudzeniu. Na rysunku łatwo zauważyć. że przy niedowzbudzeniu punkt pracy jest bliski momentowi maksymalnemu, czyli że przeciążalność prądnicy jest minimalna.

Moc bierną wytwarzaną przez maszyny synchroniczne można obliczać ze wzoru:

$$Q_s(k_u) := 3 \cdot k_u \cdot \frac{U_n \cdot \left[E_w \cdot \left(X_q \cdot \cos\beta + R_t \cdot \sin\beta \right) - k_u \cdot U_n \cdot \left(X_q \cdot \cos\beta^2 + X_d \cdot \sin\beta^2 \right) \right]}{R_t^2 + X_d \cdot X_q}$$

We wzorze U_n jest napięciem zasilającym, E_w indukowaną siłą elektromotoryczną, R_t, X_d oraz X_q są parametrami maszyny



Rys. 2. Charakterystyka momentu maszyny synchronicznej

Straty mocy ΔP, między innymi w uzwojeniach generatorów czy silników oraz w sieci zasilającej, oblicza się ze wzoru

$$\Delta P = I^2 R,$$

w którym R jest rezystancją tego elementu obwodu elektrycznego dla którego oblicza się straty mocy spowodowane przepływem prądu I. Zwykle wartość rezystancji podaje się po przeliczeniu do temp. 75^0 C. Dla tej temperatury wartość strat mocy jest większa niż dla temperatury np.20 stopni.

Prostym wzorem można też obliczać spadki napięć, tak w linii zasilającej transformator jak w samym transformatorze. Ten prosty wzór, $\Delta U = I(R \cdot \cos\varphi +/- X \cdot \sin\varphi)$, z wystarczającą dla praktyki eksploatacyjnej dokładnością umożliwia obliczanie (ΔU) spadku napięcia.

W zależności od elementu obwodu dla którego oblicza się spadek napięcia, R jest albo rezystancją odcinka linii albo rezystancją uzwojenia transformatora lub generatora. Podobnie reaktancja X reprezentuje indukcyjność linii lub uzwojeń transformatora czy generatora. W sieciach przesyłowych X ma charakter pojemnościowy, co oznacza, że linie o tym napięciu nie pobierają mocy biernej indukcyjnej.

Łatwo zauważyć, że każdy wzrost natężenia prądu w obwodzie np. do transformatora zwiększa straty mocy w linii zasilającej. Dlatego obowiązujące przepisy wymagają, by odbiorcy energii elektrycznej, zwłaszcza w sieci nn, moc bierną pobierali o najmniejszej wartości, czyli przestrzegali zasady by przy każdym obciążeniu nie była przekraczana wartość tgφ = 0.4**.** W celu ograniczania natężenia prądu czyli strat mocy w liniach zasilających zaleca się kompensować moc bierną w miejscu jej poboru, przez stosowanie kondensatorów lub silników synchronicznych.

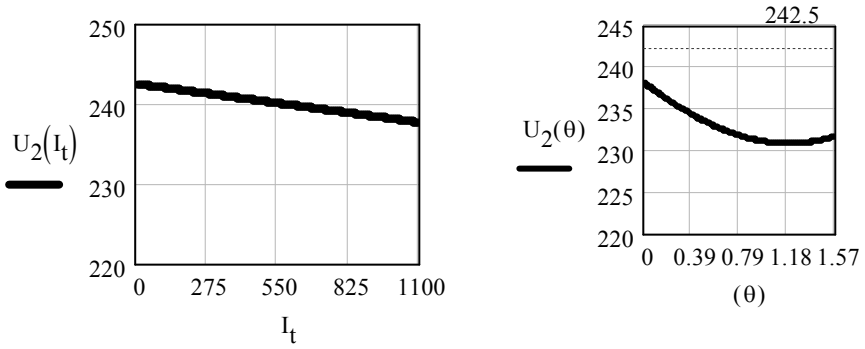
3. ZASADY DOBORU MOCY TRANSFORMATORA

Zmniejszać straty mocy w liniach zasilających a równocześnie zmniejszać pobór z sieci elektroenergetycznej mocy czynnej i biernej można przez stosowanie nowoczesnych urządzeń energooszczędnych, np. transformatorów. W nowszych konstrukcjach transformatorów, w porównaniu z transformatorami wyprodukowanymi w latach wcześniejszych, mniejsze są straty mocy w rdzeniu, czyli mniejsza jest pobierana moc czynna i mniejszy jest prąd magnesujący a zatem mniejszy jest pobór z sieci mocy biernej magnesującej (indukcyjnej). Ponieważ natężenie prądu jest mniejsze, mniejsze są straty mocy w liniach zasilających, mniejsze są też spadki napięć

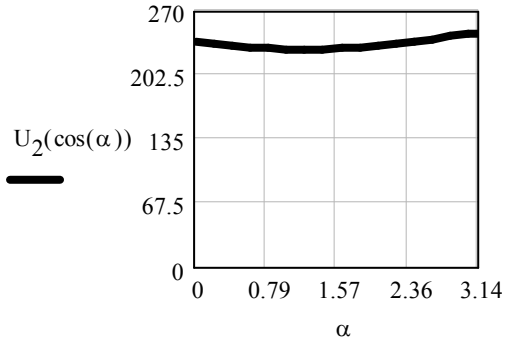
Napięcie wyjściowe (wtórne) transformatora jest mniejsze od wejściowego (pierwotnego) o spadek napięcia, czyli $U_2 = U_1 - \Delta U$, jedynie przy pojemnościowym obciążeniu transformatora napięcie może wzrastać. Znamionowe napięcie wyjściowe transformatora jest napięciem strony wtórnej nieobciążonego transformatora. W przypadku transformatora SN/nn, będzie to np. 15575/420 – 242.5 V, gdzie 242.5 jest znamionowym napięciem fazowym strony wtórnej. Należy mieć na uwadze, że takie napięcia znamionowe transformatora dotyczą znamionowego napięcia sieci niskiego napięcia 400/231 V. Przy obciążeniu transformatora prądem znamionowym, przy cosφ = 0.8, napięcie wyjściowe U_2 = 230.9 V, natomiast przy cosφ = 0.929 (czyli przy tangens φ = 0.4) napięcie wyjściowe wzrasta do wartości 233.3 V. Na rys.3 a oraz b pokazano wpływ natężenia prądu na napięcie wyjściowe transformatora przy stałej wartości współczynnika mocy obciążenia. Na rys. 4 pokazano wpływ współczynnika mocy na wartość napięcia wyjściowego. Na rys. 5 pokazano zależność spadku napięcia w transforrmatorze od wspolczynnika mocy, przy znamionowym prądzie obciążenia.

Moc znamionowa transformatora jest mocą pozorną na podstawie której wyznaczany jest znamionowy prąd uzwojenia (dolnego napięcia). Natężenia tego prądu nie należy przekraczać. Jeśli zatem obciążenie transformatora określoną mocą czynną będzie odbywało się przy współczynniku mocy mniejszym od jedności to trzeba zwracać uwagę na możliwość przeciążenia uzwojeń transformatora, gdy natężenie prądu przekroczy wartość znamionową. W takich przypadkach należy albo ograniczyć pobór mocy, albo zainstalować nowy

transformator o większej mocy albo dołączyć dodatkowy transformator. Dla przykładu można podać, że w przypadku transformatora o mocy 800 kVA dopuszczalne obciążenie mocą czynną wynosi 800 kW ale przy cosφ = 1, ale już przy zalecanej przez przepisy wartości tgφ = 0.4, czyli cosφ = 0.929, dopuszczalna moc czynna obciążenia wynosi tylko 743 kW.



Rys. 3. Zależność napięcia wyjściowego transformatora od natężenia prądu, przy stałej wartości współczynnika mocy

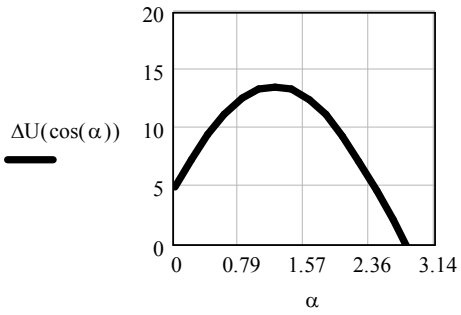


Rys. 4. Zależność napięcia wyjściowego transformatora od współczynnika mocy, przy znamionowym prądzie obciążenia

Gdy współczynnik mocy, jak to zwykle bywa, wynosi tylko 0.8, to dopuszczalna moc czynna obciążenia maleje do wartości 640 kW. Przy obciążeniu transformatora o mocy 800 kVA mocą 743 kW przy cosφ = 0.929, natężenie prądu wzrośnie do wartości 1184 A, przy znamionowej wartości prądu 1100 A. Spowoduje to wzrost strat mocy w uzwojeniu o prawie 10% i odpowiedni wzrost temperatury uzwojenia.

Przy mocy obciążenia 800 kW, przy cosφ = 0.8, natężenie prądu wzrasta do wartości 1375 A. Natężenie prądu wzrasta wprawdzie tylko o 25%, ale straty mocy w uzwojeniu wzrastają już o 50%. W takim przypadku konieczne jest zainstalowania transformatora o mocy 1000 kVA, którego prąd znamionowy

wynosi 1375 A czyli tyle ile musi dopłynąć do transformatora obciążonego mocą 800 kW, przy cosφ = 0.8. Przy takim obciążęniu transformator będzie obciążony znamionowo. Obciążenie transformatora prądem mniejszym od znamionowego zmniejsza straty mocy w uzwojeniu z kwadratem zmniejszonej wartości prądu.



Rys. 5. Zależność spadku napięcia w transformatorze od współczynnika mocy

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przy przesyle energii elektrycznej, również w sieciach niskiego napięcia, należy przestrzegać zasady przenoszenia mocy biernej o jak najmniejszej wartości. Przenoszenie mocy biernej zwiększa nie tylko straty mocy, ale zwiększa również spadki nnapięć. Duże wartości przenoszonej mocy biernej wymuszają stosowanie urządzeń o parametrach zawyżonych w stosunku do potrzebnej mocy czynnej.

LITERATURA

[1] Stein Z. Eksploatacja maszyn elektrycznych. Rozdz. 5.6 w Poradniku Inżyniera Elektryka, WNT, Warszawa 2007.
[2] Stein Z. Zielińska M. Zagadnienia kompensacji mocy biernej w zakładach przemysłowych. Materiały ZKwE, Poznań, 2008.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE EXCESS OF THE POWER FACTOR VALUE ABOVE ITS ALLOWABLE LEVEL IN THE LV NETWORK ON OPERATION OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM

Minimum value of the power factor in an electric power network is restrained to the value defined by appropriate regulations. The electric energy consumer is responsible for maintaining proper value of the power factor, nevertheless, minor consumers bear no financial consequences for inobservance of required value of the parameter. On the other hand, the distribution companies are charged with the cost of increased power loss. The present paper includes a proposal of estimation of additional power losses caused by reduced level of the power factor. The estimation is carried out with the use of the Mathcad software.