

Ryszard NAWROWSKI\*  
Zbigniew STEIN\*  
Maria ZIELIŃSKA\*

## **PRÓBA ILOŚCIOWEGO PRZEDSTAWIENIA WPLYWU CHARAKTERYSTYCZNYCH PARAMETRÓW TRANSFORMATORÓW ROZDZIELCZYCH NA MOC BIERNĄ I STRATY MOCY W SIECIACH NISKIEGO NAPIĘCIA**

W referacie podjęto próbę matematycznego przedstawienia wpływu takich zmienionych parametrów nowoczesnych transformatorów energetycznych jak prąd magnesujący i straty mocy w rdzeniu na ograniczenie strat mocy oraz moc bierną przy przesyłaniu energii w sieciach rozdzielczych, zwłaszcza niskiego napięcia.

### **1. WPROWADZENIE**

Ustawa z 15 kwietnia 2011 roku o „Efektywności energetycznej” określa krajowy cel w zakresie oszczędnego gospodarowania energią. Ustawa między innymi zaleca przeprowadzanie audytów efektywności energetycznej różnych obiektów mających na celu podejmowanie działań zmierzających do oszczędności energii. Oszczędności energii mają być uzyskane między innymi przez nabycie nowego urządzenia lub wymianę albo modernizację urządzenia, które nie spełnia wymagań w zakresie oszczędności energii. W celu poprawienia efektywności energetycznej ustawa wymienia, między innymi, takie rodzaje przedsięwzięć jak: ograniczanie przepływu mocy biernej, ograniczanie strat sieciowych w ciągach liniowych oraz strat (mocy) w transformatorach. Nowe rodzaje blach transformatorowych przeznaczonych do zastosowania w transformatorach energetycznych w sposób naturalny spowodowały nie tylko zmniejszenie strat mocy w rdzeniach transformatorów ale również, w znaczący sposób, ograniczyły natężenie prądu magnesującego (prądu stanu jałowego) czyli pobór mocy biernej w stanie jałowym transformatora. Niestety straty mocy w uzwojeniach, czyli tzw. strat obciążeniowych, praktycznie ograniczyć nie można. Transformatory energetyczne, zwłaszcza o regulacji liczby zwojów w stanie bez napięciowym, należą do obiektów technicznych o największej trwałości i niezawodności, dlatego w

---

\* Politechnika Poznańska.

najmniejszym stopniu podlegają wymianie na jednostki nowe charakteryzujące się udoskonalonymi parametrami eksploatacyjnymi. Duża trwałość eksploatowanych transformatorów, znacznie przewyższająca trwałość 30 lat przyjmowaną podczas ich projektowania, nie zachęca do zastępowania ich transformatorami nowymi, o korzystniejszych parametrach w zakresie oszczędności energii elektrycznej. Wymianę transformatorów uzasadniano brakiem środków finansowych oraz małą podażą na rynku. Wymiany transformatorów nie przyspieszyło nawet wprowadzenie, w roku 1999, nowej normy: „Napięcia znormalizowane IEC”, która zmieniła wartości znamionowych napięć sieci i urządzeń prądu przemiennego z wartości 220/380 V na 230/400 V. Zmiana wartości znamionowych napięć sieci prądu przemiennego wymusiła zmianę znamionowych wartości napięć transformatorów energetycznych z 230/400 V na 242/420 V. Określona w normie dopuszczalna odchyłka napięcia od wartości znamionowej wynosząca +/- 10% nie okazała się wystarczającym bodźcem do wymiany transformatorów o poprzednich wartościach napięć znamionowych a równocześnie o dawnych wartościach parametrów. Aktualnie zakłady produkujące transformatory w swoich ofertach handlowych oferują nadal, w dużej ilości, jednostki nie odpowiadające wymaganiom obowiązującej normy. Warto dodać, że nie zgodnie z obowiązującą normą dotyczącą napięć znamionowych, produkowane są również silniki prądu przemiennego oraz między innymi prądnice do zespołów prądotwórczych. W takiej sytuacji, pomijając brak środków finansowych, trudno realizować wymagania „Ustawy o efektywności energetycznej” w zakresie wymiany urządzeń na jednostki o mniejszej energochłonności.

## **2. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI PRZYDATNE DO OBLICZEŃ STRAT MOCY I POBORU MOCY BIERNEJ**

Straty mocy w stanie jałowym są istotne dlatego, że w praktycznie nie zmiennej wartości występują przez cały okres przyłączenia transformatora do źródła zasilania. We współcześnie produkowanych transformatorach straty te są, w porównaniu ze stratami obciążeniowymi stosunkowo małe, np. rzędu dwudziestu kilku procentów. Sprawności transformatorów nie zalicza się do parametrów znamionowych bo nie ma ona wartości stałej zależy ona od obciążenia transformatora mocą czynną. Można mówić, że sprawność eksploatacyjna transformatora, przy znamionowej mocy pozornej, zależy od współczynnika mocy obciążenia.

Sprawność transformatora opisuje się wzorem (1):

$$\eta = \frac{S \cos \theta}{S \cos \theta + \Delta P_0 + \Delta P_{obc}} \quad (1)$$

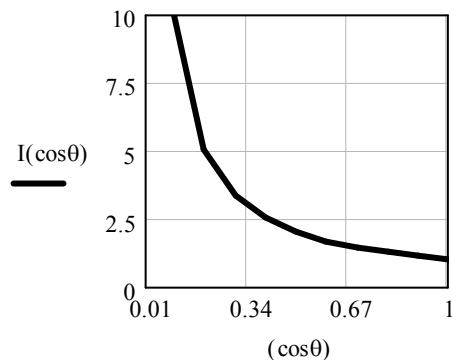
w którym:  $S \cos \theta$  - moc oddana (wychodząca  $P_{od}$ ),  $\Delta P_0$  - straty jałowe,  $\Delta P_{obc}$  - straty obciążeniowe.

Jeśli np. transformator o mocy znamionowej  $S_n = 400$  kVA, prądzie stanu jałowego  $I_0 = 1.02\%$ , stratach jałowych  $P_0 = 854$  W, stratach obciążeniowych  $\Delta P_{obc} = 3967$  W będzie obciążony prądem znamionowym przy współczynniku mocy  $\cos\varphi = 1$ , to sprawność będzie  $\eta = 0.988$ , przy  $\cos\theta = 0.8$  sprawność zmaleje do wartości 0.995 a przy  $\cos\theta = 0.7$  będzie jeszcze mniejsza i wynosi 0.983. W transformatorach starszych typów wartości te będą trochę mniejsze bo większe są straty mocy w stanie jałowym. Wartość strat mocy (obciążeniowych) jest często podawana dla temperatury  $75^{\circ}\text{C}$ . Dla wymienionego transformatora ta wartość strat mocy wynosi 4676 W. Przy obliczaniu sprawności transformatora z uwzględnieniem temp. uzwojenia  $75^{\circ}\text{C}$  dla  $\cos\theta = 1$  otrzymuje się  $\eta = 0.986$ . Wartość ta jest mniejsza niż sprawność obliczona dla rezystancji uzwojenia przy temperaturze uzwojenia  $20^{\circ}\text{C}$ .

W obwodach trójfazowych obciążonych mocą czynną  $P$  natężenie prądu  $I$  oblicza się wg zależności (2):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\theta} \quad (2)$$

w którym  $U$  jest napięciem międzyfazowym a  $\cos\theta$  jest współczynnikiem mocy obciążenia. Wpływ wartości współczynnika mocy na natężenie prądu pokazano na rys.1



Rys. 1. Zależność natężenia prądu od wartości współczynnika mocy

Wartości na rysunku przedstawiono w jednostkach względnych odniesionych do natężenia prądu przy  $\cos\theta = 1$ . Z rysunku wynika, że przy stałej wartości mocy czynnej natężenie prądu wzrasta przy maleniu wartości współczynnika, czyli przy wzroście przenoszanej mocy biernej.

Straty mocy  $\Delta P$ , między innymi w sieci zasilającej, oblicza się z równania:

$$\Delta P = I^2 R \quad (3)$$

w którym  $R$  jest rezystancją tego elementu obwodu elektrycznego dla którego oblicza się straty mocy spowodowane przepływem prądu  $I$ . Często wartość rezystancji podaje się po przeliczeniu do temp.  $75^{\circ}\text{C}$ .

Równie prostym wzorem można obliczać spadki napięć tak w linii zasilającej transformator jak w samym transformatorze. Spadek napięcia wyznacza się z zależności (4):

$$\Delta U = I(R \cos \theta \pm X \sin \theta) \quad (4)$$

W zależności od elementu obwodu dla którego oblicza się spadek napięcia,  $R$  jest albo rezystancją odcinka linii albo rezystancją uzwojenia np. transformatora. Podobnie reaktancja  $X$  reprezentuje indukcyjność linii lub uzwojeń transformatora. Łatwo zauważyć, że każdy wzrost natężenia prądu dopływającego do transformatora zwiększa straty mocy w linii zasilającej. Z tego powodu 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  $\text{tg} \theta \leq 0,4$  lub  $\cos \theta$  był większy od wartości 0.928.

### 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ MOCY BIERNEJ, STRAT MOCY I SPADKÓW NAPIĘĆ

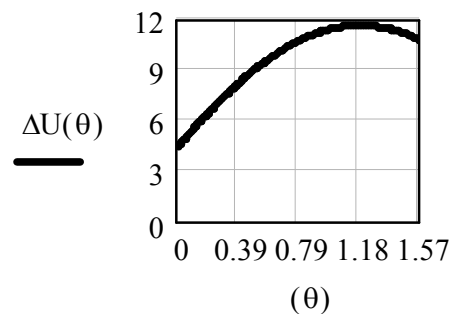
Wartość mocy biernej pobieranej przez transformator, nazywana mocą bierną magnesującą, zwykle ocenia się na podstawie wartości procentowej prądu stanu jałowego. W transformatorach dużych mocy wartość ta była zwykle mała, natomiast w transformatorach energetycznych małych mocy, wartość ta była duża, niekiedy przekraczała nawet 10%. Wynika z tego, że wartość mocy biernej magnesującej transformatora była nawet rzędu 10% jego mocy znamionowej. W obecnie produkowanych transformatorach, nawet małej mocy, prąd stanu jałowego jest zwykle rzędu 1%, co znaczy, że znacznie zmalała wartość mocy biernej pobieranej przez transformatory w stanie jałowym. Należy mieć na uwadze, że wartość mocy biernej pobieranej z sieci przez obciążony transformator zależy od mocy biernej pobieranej przez odbiorniki zasilane z transformatora. Dlatego współczynnik mocy obciążenia transformatora nie powinien być mniejszy od określonego przez przepisy. Jeśli wartość tego współczynnika jest mniejsza należy zastosować kompensację mocy biernej. Im mniejszą wartość ma współczynnik mocy tym większe są straty mocy a także większe spadki napięć.

Transformator o mocy 400 kVA może być obciążony mocą czynną 370.4 kW jeśli będzie dotrzymana określona przepisami wartość  $\text{tg} \theta = 0,4$  ( $\cos \theta = 0,927$ ). Przy zmniejszeniu współczynnika mocy do wartości 0.8 dopuszczalna moc czynna zmaleje do wartości 325 kW. Zmniejszenie współczynnika mocy do wartości 0.7 spowoduje zmniejszenie obciążenia mocą do wartości 289 kW. Jeśli przy większej grupie odbiorców dostawca energii nie spowoduje utrzymania wymaganej wartości

współczynnika mocy będzie musiał zainstalować nowy transformator o większej mocy lub zainstalować dodatkowy transformator. W każdym z tych przypadków zwiększy się pobór mocy biernej oraz wzrost strat mocy. Tak więc uzasadniona jest kompensacja mocy biernej, która umożliwi wykorzystanie maksymalnej mocy czynnej transformatora. Zainstalowanie transformatora o mocy 630 kVA powoduje wzrost strat jałowych, w zależności od producenta oraz oferty, np. z wartości 940 W, przez 1250 W nawet do 1650 W. Obciążeniowe straty mocy są również różne. W zasadzie dla analizy wartości strat mocy oraz prądu stanu jałowego należy posługiwać się kartą prób, którą niektórzy producenci dołączają do zakupionego transformatora. Parametry znamionowe transformatorów podawane przez producentów w ofertach handlowych są różne i na ogół mało szczegółowe. Często nie są podawane informacje jakiej temperatury uzwojenia dotyczą podane obciążeniowe straty mocy. Nie zawsze są też zamieszczone wartości prądów stanu jałowego.

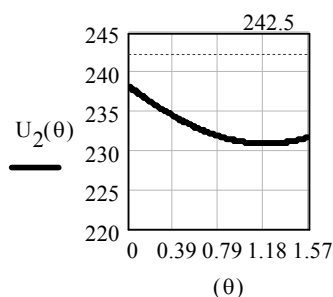
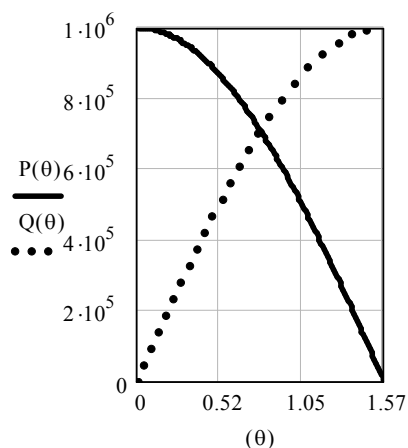
Spadki napięć w transformatorach zależą nie tylko od parametrów transformatora ale również od współczynnika mocy obciążenia. Znamionowe wartości napięć strony wtórnej dotyczą stanu jałowego transformatora zasilonego napięciem znamionowym na zaczeple podstawowym.

Na rys. 2 przedstawiono wpływ współczynnika mocy (kąta  $\theta$  na wartość spadku napięcia. Na rys. 3 przedstawiono wpływ współczynnika mocy na wartości napięć strony wtórnej. Wartość 1.57 na tym wykresie dotyczy kąta  $\theta = 90^\circ$ . Należy mieć na uwadze, że przy przekompensowaniu mocy biernej indukcyjnej napięcie wyjściowe transformatora będzie wzrastać.



Rys. 2. Spadek napięcia w funkcji kąta  $\theta$

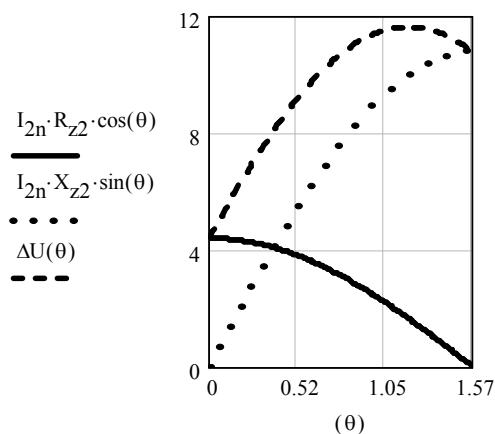
Na rys. 4, dla transformatora o mocy znamionowej  $S_n = 1000$  kVA, przedstawiono wpływ współczynnika mocy na możliwości wykorzystania mocy znamionowej z podziałem na moc czynną  $P$  oraz moc bierną  $Q$ .

Rys. 3. Wpływ kąta  $\theta$  na wartość napięcia wtórnegoRys.4. Wpływ współczynnika mocy na wartość mocy czynnej  $P$  oraz mocy biernej  $Q$  transformatora o znamionowej mocy pozornej  $S_n = 1000$  kVA

Rysunek 5 przedstawia wpływ współczynnika mocy na spadek napięcia w transformatorze  $\Delta U(\theta)$  oraz jego składowe czynną i bierną

W tabeli 1 zebrano różne charakterystyczne wartości wielkości ilustrujące możliwości wykorzystania transformatora o mocy 1000 kVA przy założeniu, że przez uzwojenia transformatora płynie prąd znamionowy. W tabeli 1 zestawiono moc czynną  $P$ , moc bierną  $Q$ , współczynnik mocy  $\cos\theta$ ,  $\tan\varphi$ , kąt  $\varphi$ , spadki napięć w transformatorze oraz wartości napięć strony wtórnej przy różnych wartościach współczynnika mocy.

Z wartości podanych w tab.1 wynikają wartości mocy biernej jaką trzeba by skompensować dla uzyskania oczekiwanych wartości współczynnika mocy. Np. jeżeli transformator jest obciążony mocą 800 kW przy  $\cos\theta = 0.8$ , to po zastosowaniu kondensatora o mocy 230 kVAr można zwiększyć obciążenie transformatora o 126 kW i uzyskać wymaganą przez przepisy wartość  $\tan\theta = 0.4$ .



Rys. 5. Wpływ współczynnika mocy na spadek napięcia i jego składowe

Tabela 1. Wyniki obliczeń charakterystycznych parametrów obciążenia transformatora

P	Q	$\cos\theta$	$\text{tg}\theta$	$\theta$	$\Delta U$	$U_2$
[kW]	[kVA]	-	-	-	[V]	[V]
1000	0	1	0	0	4,4	238
926	316	0,92	0,4	22	8,0	234
800	600	0,8	0,75	37	9,9	232
700	430	0,7	1,11	48	11	231

Z rys. 5 wynika, że spadek napięcia w transformatorze jest najmniejszy przy obciążeniu czysto-rezystancyjnym ( $\cos\theta = 1$ ) a przy innych wartościach współczynnika mocy spadek ten wzrasta. W linii zasilającej SN spadek napięcia zmienia się podobnie jak w transformatorze. Natężenie prądu po stronie pierwotnej transformatora, jest z uwzględnieniem przekładni, analogiczne do natężenia prądu po stronie wtórnej ponieważ prądy stanu jałowego mają małą wartość. Im prąd obciążenia ma charakter bardziej czynny ( $\cos\theta$  bliski jedności) tym natężenie prądu po stronie pierwotnej mniej się różni od natężenia prądu po stronie wtórnej. Straty mocy w uzwojeniach (tzw. obciążeniowe straty mocy) wpływają w niewielkim stopniu na natężenie prądu w uzwojeniu pierwotnym, Straty te zmniejszają wartość sprawności. Np. w transformatorze o mocy 400 kVA, 15/0.42 kV, w którym prądy znamionowe strony pierwotnej i wtórnej mają wartości odpowiednio 14.7 A oraz 550 A, łączne straty mocy w transformatorze ( $\Delta P_j + \Delta P_{\text{obe}}$ ) wynoszą 5530 W. Natężenie prądu reprezentującego te straty ma wartość 0.213 A lub 0.14 % znamionowego prądu strony pierwotnej. Można stwierdzić, że wpływ tego prądu na straty mocy w linii zasilającej i na spadki napięć jest minimalny.

#### **4. WNIOSKI KOŃCOWE**

Dla racjonalizacji zużycia energii elektrycznej duże znaczenie ma każda oszczędność energii, także w transformatorach i liniach elektroenergetycznych. Dlatego w możliwie największym stopniu należy stosować zmodernizowane transformatory energetyczne o zmniejszonych stratach mocy i minimalnej wartości prądu stanu jałowego. Wszystkie aktualnie produkowane urządzenia elektryczne przeznaczone do użytkowania w sieciach niskiego napięcia takie jak transformatory, silniki i prądnice powinny mieć napięcia znamionowe zgodne z obowiązującymi przepisami.

#### **LITERATURA**

- [1] Jezierski E: Transformatory. WNT 1983.
- [2] Ustawa o efektywności energetycznej z 4 marca 2011.

#### **AN ATTEMPT OF QUANTITATIVE DESCRIPTION OF THE EFFECT OF CHARACTERISTIC PARAMETERS OF THE DISTRIBUTING TRANSFORMERS ON REACTIVE POWER AND POWER LOSSES IN LOW VOLTAGE NETWORKS**

The paper presents an attempt of mathematical description of the effect of the parameters of modern power transformers on reduction of power losses and reactive power during power transmission in the distribution grids. Such parameters as magnetizing current and core power loss are considered, particularly in case of the low voltage networks.