

Tadeusz Glinka

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

STRATY MOCY I SPRAWNOŚĆ TRANSFORMATORÓW

POWER LOSSES AND EFFICIENCY OF TRANSFORMERS

Streszczenie: W artykule zdefiniowano sprawność energetyczną transformatorów. Stały postęp technologii blachy transformatorowej owocuje obniżeniem stratności i wzrostem indukcji nasycenia rdzenia. Stwarza to warunki do zmniejszenia masy rdzenia i w mniejszym stopniu zmniejszenia masy uzwojenia. Podano przykłady strat mocy jałowych i obciążeniowych transformatorów rozdzielczych produkowanych w latach 60. XX w. i produkowanych obecnie. Od 01 lipca 2021 r. Komisja Unii Europejskiej [8] i Normy Europejskie [6,7] ustaliły dalsze obniżenie strat mocy i zwiększenie sprawności w instalowanych transformatorach.

Abstract: The article defines the energy efficiency of transformers. The constant advancement in transformer sheet technology results in a reduction in loss and an increase in core saturation flux density. This creates conditions for reducing the core mass and, to a lesser extent, for reducing the winding mass. Examples of no-load and load losses of distribution transformers manufactured in the 1960s and currently manufactured are given. From 01 July 2021, the European Union Commission [8] and European Standards [6,7] have established a further reduction of power losses and an increase in efficiency in installed transformers.

Słowa kluczowe: Transformatory energetyczne, straty mocy, sprawność, normy transformatorowe

Keywords: Energy transformers, power losses, efficiency, transformer standards

1. Maksymalna sprawność energetyczna transformatora

Transformatory energetyczne są istotnymi urządzeniami systemu elektroenergetycznego, którego początkiem są źródła energii elektrycznej. System energetyczny jest rozgałęziony i obejmuje trójfazową sieć elektroenergetyczną w Polsce o napięciu od 400 kV do 400 V. Punkty rozgałęzień systemu elektroenergetycznego tworzą transformatory. Energia elektryczna od źródła, to jest od elektrowni, do odbiorcy jest co najmniej trzy razy transformowana. Transformatory w systemie generują straty energii napięciowe ΔW_U i prądowe ΔW_I . Moc strat napięciowych ΔP_{Fe} wydzielają się w rdzeniu magnetycznym transformatorów, a wartość ich jest stała i nie zależy od mocy obciążenia P . Straty mocy obciążeniowe ΔP_{Cu} wydzielają się w uzwojeniu i są funkcją kwadratu prądu obciążenia, czyli kwadratu mocy pozornej obciążenia S^2 . Koszt energii strat ($\Delta W_U + \Delta W_I$) ponosi właściciel transformatora, koszty te powinny być minimalizowane. Minimalny koszt energii rozpraszanej (zamienianej na ciepło) w transformatorze uzyskuje się wówczas gdy sprawność energetyczna η_E transformatora jest maksymalna. W eksploatacji transformatorów dąży się zatem do maksymalnej sprawności energetycznej η_E transformatora

$$\eta_E = \frac{W}{W + \Delta W_U + \Delta W_I}$$

W - energia pobrana z transformatora w czasie obliczeniowym T np. jednego dnia $T = 24$ godz., tygodnia $T = 168$ godz., bądź jednego roku, $T = 8760$ godz.

$$W = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T S(t) \cos\varphi(t) dt$$

$P(t)$ – jest przebiegiem mocy czynnej w czasie, $S(t)$ – jest przebiegiem mocy pozornej, a $\cos\varphi(t)$ przebiegiem współczynnika mocy w czasie. Dla $\cos\varphi(t) = 1$ transformator jest obciążany mocą czynną, sprawność transformatora będzie maksymalna. Przy obciążeniu transformatora wyłącznie mocą bierną $\cos\varphi(t) = 0$, sprawność transformatora będzie równa zero. Rozpatrujemy sprawność przy $\cos\varphi(t) = 1$. Energia pobrana z transformatora w czasie T

$$W = P_{sr} T$$

ΔW_U - oznacza energię strat napięciowych

$$\Delta W_U = \Delta P_{Fe} T$$

ΔW_I – oznacz energię strat obciążeniowych

$$\Delta W_I = \int_0^T \Delta P_{Cu}(t) dt = \Delta P_{Cu sr} T =$$

$$\Delta P_{CuN} T \int_0^T \left(\frac{I_{sr}}{I_N}\right)^2 dt$$

Przy $\cos\varphi(t) = 1$

$$\Delta W_I = \Delta P_{CuN} T \left(\frac{P_{sr}}{P_N}\right)^2$$

ΔP_{CuN} – oznacza strat mocy w uzwojeniach przy prądzie znamionowym I_N (znamionowej mocy obciążenia $P_N = S_N$ przy $\cos\varphi = 1$). Sprawność energetyczną η_E transformatora wyraża równanie

$$\eta_E = \frac{P_{sr} T}{P_{sr} T + \Delta P_{Fe} T + \Delta P_{CuN} T \left(\frac{P_{sr}}{P_N}\right)^2}$$

Maksymalną sprawność energetyczną $\eta_{E max}$ transformatora uzyskuje się gdy

$$\frac{d\eta_E}{dP_{sr}} = 0$$

Z rozwiązania powyższych równań otrzymujemy informację, że transformator ma maksymalną sprawność energetyczną $\eta_{E max}$ gdy

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{CuN} \left(\frac{P_{sr}}{P_N}\right)^2$$

Przebieg mocy obciążenia $P(t)$ transformatorów energetycznych jest funkcją stochastyczną. Z danych statystycznych przebiegów mocy obciążenia transformatorów zainstalowanych w rozdzielczych stacjach energetycznych wiadomo, że wartość średnia mocy P_{sr} jest ponad dwa razy mniejsza od mocy znamionowej S_N . Bazując na tej wiedzy transformatory energetyczne projektuje się o stosunku strat w żelazie ΔP_{Fe} do strat znamionowych w uzwojeniu ΔP_{CuN} w znamionowych warunkach pracy

$$\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{CuN}} = \left(\frac{P_{sr}}{S_N}\right)^2 = \frac{1}{3} \div \frac{1}{5}$$

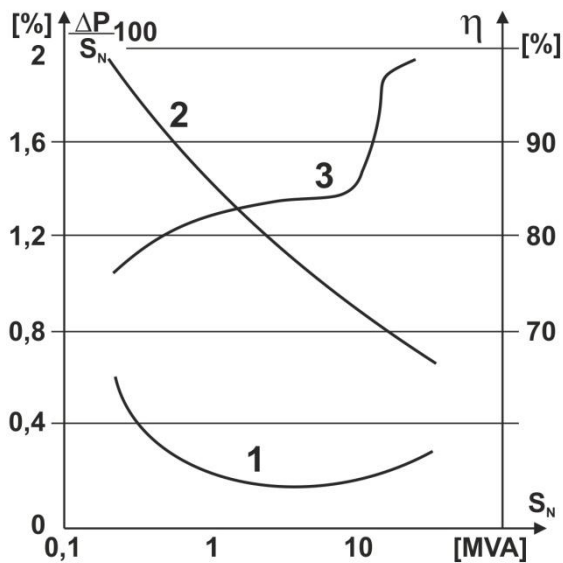
2. Straty mocy w transformatorze

Rdzenie transformatorów są wykonane z blachy transformatorowej. Transformatory w latach 60. XX wieku w Polsce spełniały wymagania polskich normy: PN-56E-06040, PN/E-81100, PN/E081101, PN/E081102, gdyż w PRLu normy były prawem. Rdzenie magnetyczne transformatorów wykonywano z blachy transformatorowej o grubości 0,35 mm i stratności $\Delta p_{Fe} = 1,3$ W/kg w polu magnetycznym o indukcji 1 T, 50 Hz. Była to blacha walcowana na gorąco izotropowa. Wiele transformatorów wyprodukowanych z tej blachy, mimo swojego wieku i strat mocy, jeszcze jest zainstalowanych u odbiorców energii i pracuje. Uzwojenia są wykonane z miedzi elektrolitycznej o rezystywności $\rho = 1,7 \Omega \cdot m$ w temperaturze 20°C. Oto kilka przykładów strat jałowych $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe}$ i strat obciążeniowych ΔP_{Cu} oraz sprawności transformatorów przy znamionowych warunkach pracy i $\cos\varphi = 1$ z lat 60. XX wieku zestawiono w Tabeli 1.

Dostępna była także blacha importowana o stratności $\Delta p_{Fe} = 1,1$ W/kg w polu magnetycznym o indukcji 1 T, 50 Hz. Na rynek polski transformatorów z tej blachy nie produkowano. Na rysunku 1 przedstawiono wykresy sprawności η_N i procentową wartość strat jałowych $\left(\frac{\Delta P_0}{S_N} 100\right)$ i procentową wartość strat obciążeniowych $\left(\frac{\Delta P_{Cu}}{S_N} 100\right)$ w funkcji mocy znamionowej S_N transformatorów.

Tabela 1

Moc znamionowa S_N	Napięcie znamionowe	Straty jałowe		Straty obciążeniowe		Sprawność η
		ΔP_0	$\frac{\Delta P_0}{S_N} 100$	ΔP_{Cu}	$\frac{\Delta P_{Cu}}{S_N} 100$	
kVA	kV	kW	%	kW	%	%
200	15/0,4	1,17	0,585	3,8	1,9	97,575
400	6/0,4	1,194	0,2985	6,8	1,7	98,04
1000	30/6,3	4,1	0,41	14	1,4	98,22
$10 \cdot 10^3$	44/5	27,9	0,279	78,5	0,785	98,22
$16 \cdot 10^3$	110/16,5	47	0,294	136	0,85	98,869
$25 \cdot 10^3$	110/33	47,5	0,19	173	0,692	99,125
$31,5 \cdot 10^3$	121/6,3	87,5	0,278	215,5	0,684	99,047



Rys. 1. Zależność strat mocy jałowych (1), strat obciążeniowych (2) i sprawności (3) w funkcji mocy znamionowej przy $\cos\varphi = 1$ transformatorów z lat 60. XX wieku

Inżynieria materiałowa uzyskuje stały postęp w technologii blach elektrotechnicznych i materiałów izolacyjnych. Natomiast materiały przewodzące nie zmieniają się, jest to miedź o rezystywności $1,7 \Omega\text{m}$, czasem aluminium o rezystywności $\rho = 2,7 \Omega\cdot\text{m}$. W drugiej połowie lat 60. XX w. produkowano już blachę anizotropową walcowaną na zimno, tzw. zorientowaną o obniżonej stratności: $\Delta p_{Fe} = 0,9 \text{ W/kg}$ w polu magnetycznym o indukcji 1 T, 50 Hz, poprawiono równocześnie parametry magnetyczne blachy w uprzywilejowanym kierunku magnesowania. Umożliwiło to zmianę, w roku 1969, normy transformatorowej PN-69/06040 w której obniżono granice dopuszczalnych strat jałowych ΔP_0 i strat obciążeniowych ΔP_{Cu} . W latach 70. XX wieku rdzenie transformatorów produkowano już z blachy anizotropowej o wyższej indukcji nasycenia i mniejszej stratności. Anizotropia blachy wymusiła także zmianę kształtu blach i sposób układania rdzenia [1]. Uzyskano w ten sposób obniżenie strat mocy w rdzeniu. Przykładem jest transformator rozdzielczy wyprodukowany w roku 1971 o parametrach znamionowych: 400 kVA, 6,3 kV, 400/231 V i stratach jałowych $\Delta P_0 = 0,936 \text{ kW}$ i stratach obciążeniowych $\Delta P_{Cu} = 5,63 \text{ kW}$ oraz sprawności $\eta_N = 98,385$ przy $\cos\varphi = 1$ i znamionowych warunkach pracy. Straty jałowe zostały obniżone o 258 W czyli o 21,6%, a straty obciążeniowe zostały obniżone o 1170 W czyli

o 17,2%, sprawność zwiększyła się o 0,352 punktów procentowych.

W latach następnych opracowano blachę typu MOH. Dalszy postęp technologiczny uzyskano poprzez laserową obróbkę powierzchni blachy. Każdy nowy rodzaj blachy charakteryzuje się niższą stratnością, i korzystniejszą charakterystyką magnesowania, to jest wyższą wartością indukcji nasycenia i mniejszą koercją. Blachy te różnią się także ceną. W Tabeli 2 przedstawiono ewolucję strat i sprawności w transformatorze na przestrzeni lat 1990 -1996.

Tabela 2

Moc	Rok prod.	Straty jałowe ΔP_0	Straty obciąż. ΔP_{Cu}	Sprawność η	Masa m
kV A		W	W	%	kg
100	1990	360	1650	98,03	760
100	1996	260	1650	98,13	620
		210	1750	98,08	540
		150	1450	98,43	860
400	1964	1194	6800	98,04	2760
	1971	936	5630	98,385	2600
	2019	398	4577	98,77	1400

W artykule [4] wykazano, że wymiana transformatora o mocy 400 kVA z roku 1964 (Tabela 1) na transformator nowy z roku 2019 (Tabela 2) obniża straty mocy jałowe 3 razy, a straty mocy obciążeniowe o 1,5 raza. Koszt obniżenia strat energii amortyzuje koszt zakupu transformatora w czasie 3,5 roku. Jeśli uwzględnić, że w starym transformatorze należy wymienić olej aby poprawić układ izolacyjny i przedłużyć funkcjonowanie transformatora, to czas amortyzacji skraca się do 11 miesięcy.

3. Wymagania Unii Europejskiej

Jednym z priorytetów Unii Europejskiej jest środowisko i wynikające z tego priorytetu racjonalne użytkowanie energii. Unia Europejska poprzez Dyrektywy obliguje państwa członkowskie i firmy do produkcji i stosowania energooszczędnych maszyn elektrycznych i transformatorów. Komisja (UE) wydała Rozporządzenie 2019/11783 z dnia 1 października 2019 r dotyczące sprawności transformatorów [8]. Sprawność transformatorów podana w Rozporządzeniu [8] bazuje na sprawności podanej w Normie Europejskiej PN-EN 50708-3-1: 2020-10 [7]. Normy Europejskie [6,7] podają, oprócz sprawności, także maksymalne straty

jałowe i straty obciążeniowe. Tabela 3 dotyczy transformatorów zanurzonych w cieczy, a Tabela 4 dotyczy transformatorów suchych. W tabelach ujęte są zarówno transformatory obniżające jak i podwyższających napięcie.

W tabelach 3 i 4 zestawiono straty obciążeniowe ΔP_{Cu} i straty jałowe ΔP_0 , dla jednego uzwojenia o napięciu $U_N \leq 24$ kV i napięciu na drugim uzwojeniu $U_N \leq 3,6$ kV. Podane w Tabelach 3 i 4 parametry obowiązują od 01.07.2021 r.

Tabela 3. *Straty, impedancja zwarcia, sprawność i poziom mocy akustycznej dla transformatorów zanurzonych w cieczy [6,7]*

Moc znamionowa	Straty obciąż. ΔP_0	Straty jałowe. ΔP_{Cu}	LWA	Impedancja zwarcia $Z_{z\%} = u_{z\%}$	Sprawność [7, 8] η
kVA	W	W	dB(A)	%	%
≤ 25	600	63	37	4	98,251
50	750	81	39	4	98,891
100	1 250	130	41	4	99,093
160	1 750	189	44	4	99,191
250	2 350	270	47	4	99,283
315	2 800	324	49	4	99,320
400	3 250	387	50	4	99,369
500	3 900	459	51	4	99,398
630	4 600	540	52	4 or 6	99,437
800	6 000	585	53	6	99,473
1 000	7 600	693	55	6	99,484
1 250	9 500	855	56	6	99,487
1 600	12 000	1 080	58	6	99,494
2 000	15 000	1 305	60	6	99,502
2 500	18 500	1 575	63	6	99,514
3 150	23 000	1 980	64	6	99,518

Tabela 4. *Straty, impedancja zwarcia, sprawność i poziomy mocy akustycznej dla transformatorów suchych*

Moc znamionowa	Straty obciąż. ΔP_{Cu}	Straty jałowe ΔP_0	LWA	Impedancja Zwarcia $Z_{z\%} = u_{z\%}$	Sprawność [7, 8] η
kVA	W	W	dB(A)	%	%
≤ 50	1 500	180	49	6	97,790
100	1 800	252	51	6	98,016

160	2 600	360	54	6	98,345
250	3 400	468	57	6	98,570
400	4 500	675	60	6	98,619
630	7 100	990	62	6	96,590
800	8 000	1 170	64	6	98,745
1 000	9 000	1 395	65	6	98,837
1 250	11 000	1 620	67	6	98,892
1 600	13 000	1 980	68	6	98,960
2 000	16 000	2 340	70	6	98,996
2 500	19 000	2 790	71	6	99,045
3 150	22 000	3 420	74	6	99,097

W Rozporządzeniu [8] podano współczynniki korygujące, które należy zastosować do strat obciążenia i strat jałowych. Dla transformatora o podwójnej wartości napięcia, to jest posiadającego poziom izolacji wyższy, na jednym uzwojeniu i pełnej mocy znamionowej dostępnej na obu uzwojeniach, straty obciążeniowe mogą być większe o 10%. Jeżeli transformatory są przystosowane do regulacji napięcia, to strat obciążenia mogą być powiększone o 10%. W przypadku transformatora o wyższym napięciu i posiadającego przyłącza zaczepów do regulacji napięcia, można uwzględnić obie poprawki. Straty transformatorów z uwzględnieniem współczynników korygujących, należy mierzyć podczas testu, wraz ze wszystkimi urządzeniami determinującymi pracę transformatorów, np. włączonych pompach obiegowych oleju i wentylatorach chłodzących.

4. Podsumowanie

Zdefiniowano sprawność energetyczną transformatorów i na przykładach pokazano jak straty mocy w transformatorach zmniejszały się, a sprawność rosła na przestrzeni lat 1960 – 2019, uzyskano to dzięki stałemu postępowi technologii blachy transformatorowej. Mniej więcej co 10 lat produkowano blachę transformatorową o korzystniejszych parametrach, to jest mniejszej stratności i większej indukcji nasycenia. Stwarzało to warunki do zmniejszania masy rdzenia i w mniejszym stopniu zmniejszenia masy uzwojenia. Dzięki temu uzyskiwano obniżenie masy transformatora i obniżenie strat mocy jałowych i obciążeniowych. Po-

równując np. transformator o mocy 400 kVA z lat 60. XX wieku z transformatorem obecnie produkowanym, to straty mocy jałowe są mniejsze trzykrotnie, a straty obciążeniowe półtorakrotnie. Od 01 lipca 2021 r. Komisja Unii Europejskiej [8] i Normy Europejskie [6,7] ustaliły dalsze obniżenie strat mocy i zwiększenie sprawności w instalowanych transformatorach. Należy dodać, że transformatory energetyczne są urządzeniami o stosunkowo wysokiej sprawności energetycznej.

Literatura

- [1]. Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory. Wydawnictwo PWN, ISBN978-83-01-20115-9. 2018 r.
- [2]. Jeziński E.: Transformatory. Podstawy teoretyczne. PWT, 1965 r.
- [3]. Jeziński E., Gogolewski Z., Kopczyński Z., Szmit J.: Transformatory. Budowa i projektowanie. PWT. 1963.
- [4]. Kałużna U.: Kryteria wymiany transformatora na transformator nowy. Napędy i Sterowanie ISSN 1507-7764. Nr. 6/2020, ss. 30 – 34.
- [5]. Sobota J.: Transformatory olejowe o rdzeniu z taśm amorficznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. ELEKTRYKA Z. 155 z 1996 r. PL ISSN 0072-4688 ss. 113 – 119.
- [6]. Norma Europejska. PN-EN 50708-2-1: 2020-10. Transformatory. Dodatkowe wymagania europejskie. Część 2-1 Transformatory średniej mocy. Wymagania ogólne. (EN 50708-2-1: 2020. Power transformers - Additional European requirements: Part 2-1 Medium power transformer - General requirements).
- [7]. Norma Europejska. PN-EN 50708-3-1: 2020-10. Transformatory. Dodatkowe wymagania euro-

pejskie. Część 3-1 Transformatory dużej mocy. Wymagania ogólne. (EN 50708-3-1: 2020. Power transformers - Additional European requirements: Part 3-1 Medium power transformer - General requirements).

[8]. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 2019/11783 z dnia 1 października 2019 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 548/2014 z dnia 21 maja 2014 r. w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/1125/WE w odniesieniu do transformatorów elektroenergetycznych małej, średniej i dużej mocy. Dziennik urzędowy Unii Europejskiej, z dnia 25.10.2019 r. L 272/107-120.

Artykuł będzie opublikowany także w e-piśmie: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia