

Kazimierz Zakrzewski

Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej

STRATY OD POLA ROZPROSZENIA W STALOWYCH CZĘŚCIACH KONSTRUKCYJNYCH TRANSFORMATORÓW Z UWZGLĘDNIENIEM NIELINIOWOŚCI MAGNETYCZNEJ

LEAKAGE FLUX POWER LOSSES IN STRUCTURAL PARTS OF TRANSFORMERS TAKING INTO ACCOUNT MAGNETIC NONLINEARITY

Streszczenie: W pracy podano wzory analityczne pozwalające na określenie strat powierzchniowych i tendencji do wzrostu strat całkowitych w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatora. Wykorzystano prawo modelu transformatora wprowadzając skale modelowania strat. Nieliniowość magnetyczna została uwzględniona poprzez wprowadzenie parabolicznej funkcji natężenia pola magnetycznego w zależności od indukcji $H=f(B)$ [2]. Określono stosunek wzrostu wymienionych strat w częściach stalowych do strat podstawowych w uzwojeniach, w funkcji skali wzrostu wymiarów liniowych transformatora m_l .

Abstract: The analytical formulae for surface power losses and increase tendency of total losses in structural parts of transformer are given. The scales of power losses modeling in model law of transformer were used. The magnetic nonlinearity of steel is taken into account by parabolic function $H=f(B)$ [2]. The relation of power losses in structural parts increase to fundamental losses in windings increase in function of linear modeling scale m_l is presented in the paper.

Słowa kluczowe: transformatory, straty mocy, prawo modelu

Keywords: transformers, power losses, model law

1. Wstęp

W latach 50-tych XX wieku zanotowano szybki rozwój konstrukcji transformatorów o znacznie większych napięciach znamionowych i mocach niż poprzednio, związanych z szybkim rozwojem energetyki światowej. W krajach wysokorozwiniętych moc urządzeń zainstalowanych w elektrorowniach wzrastała dwukrotnie w ciągu kolejnych dziesięciu lat.

W Polsce, w latach 60-tych XX wieku, wzrost ten był jeszcze szybszy, a wspomniany okres został skrócony do siedmiu lat. Stwierdzono przy tym znaczny wzrost strat dodatkowych ponad straty podstawowe w uzwojeniach budowanych transformatorów, spowodowany skutkami rosnących strumieni rozproszenia.

Strumienie te powodowały straty dodatkowe w uzwojeniach i poza uzwojeniami w częściach konstrukcyjnych, wykonanych ze stali: w pokrywach, kadziach, belkach mocujących rdzeń, śrubach łączących pokrywę z kadzią, w kominkach izolatorów przepustowych itp.

W Polsce, istotny przełom w konstrukcji i technologii transformatorów energetycznych nastąpił w 1962 r., co było spowodowane zakupem w fabryce austriackiej ELIN-UNION

licencji na dwie jednostki blokowe RTx 140000/220 i RTx 16000/110 oraz autotransformator sprzęgający sieci 110 kV i 220 kV typu RTdx P125000/200 [3]. Licencja była realizowana w Fabryce Transformatorów i Aparatury Trakecyjnej ELTA w Łodzi.

Uruchomienie produkcji tych transformatorów miało ogromny wpływ na rozwój energetyki w Polsce poprzez rozwój konstrukcji nowych jednostek w ELCIE i wyposażenia w innych zakładach kooperujących.

Już wtedy stosowano ekranowanie kadzi blachą miedzianą o grubości 4 mm, lecz okazało się, że nie można było uniknąć szkodliwych przegrzań na styku kadzi z pokrywą oraz tam gdzie ekran blaszany stawał się nieciągly. Obserwowano nagrzewanie się sąsiednich śrub łączących kołnierze i pokrywy. W rezultacie zaczęto stosować ekrany z pakietów blachy transformatorowej, spełniające raczej rolę boczników magnetycznych, „odciągających” strumień z powierzchni stalowych. W tym zakresie prowadzone były prace w Instytucie Elektrotechniki Oddział Transformatorów w Łodzi, z udziałem Katedry Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej. Sprawa odpowiedniego ekranowania

jest w dalszym ciągu zagadnieniem aktualnym, gdyż musi być rozwiązywana oddzielnie dla każdej konstrukcji transformatorów, które mogą wykazywać różne usytuowanie odpływów, zawierać odprowadzenia w postaci szyn równoległych, różne odległości uzwojeń od kadzi i pokryw itp.

Niniejsza praca, nawiązująca do znanego prawa modelu transformatora, stanowi próbę określenia względnego wzrostu strat w stalowych częściach konstrukcyjnych-nieekranowanych, odniesionego do wzrostu strat podstawowych w uzwojeniach transformatora. Stanowi wyjaśnienie teoretyczne zagadnienia, które spowodowało powszechne stosowanie sposobów zmniejszania strumienia rozproszenia wchodzącego do stalowych części konstrukcyjnych podczas normalnej pracy transformatorów.

2. Modelowanie strat w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatora

Analiza strat w stalowych częściach konstrukcyjnych metodami polowymi dotyczy w istocie określenia strat wywołanych polem magnetycznym strumienia rozproszenia, lub w przypadku zdarzającego się niekiedy przewzbudzenia, strumieniem wychodzącym z rdzenia magnetycznego, ulegającego silnemu nasyceniu.

Przestrzenny rozkład strumieni magnetycznych wskutek znacznej różnicy przenikalności magnetycznej stali wobec dielektryka zbliża rozkład pola w częściach do propagacji fali płaskiej wnikażącej do masywnego żelaza [2,4]. W pracy doktorskiej Autora wykazano, że udział strat histerezowych w porównaniu ze stratami wiropądowymi w masywnym żelazie, zwłaszcza w obszarze silnych pól jest znikomy [8].

W pracy [4] podano wzór na straty mocy czynnej przypadające na jednostkę powierzchni masywnego żelaza w warunkach występowania sinusoidalnego natężenia pola magnetycznego, stycznego do powierzchni o amplitudzie H_{ps} , częstotliwości przemagnesowania f , przenikalności magnetycznej (statycznej) μ_s i przewodności elektrycznej γ_s materiału.

Straty powierzchniowe wynoszą

$$\Delta P_s = a_p \sqrt{\frac{\pi f \mu_s}{\gamma_s}} \frac{H_{ps}^2}{2} \quad (1)$$

gdzie, a_p współczynnik powiększenia strat zawarty w granicach 1,4 - 1,6.

Zakładając, że nieliniowość magnetyczna zostanie uwzględniona za pomocą aproksymacji wierzchołkowej statycznej charakterystyki magnesowania $B = f(H)$ parabolą n -tego stopnia [2,5] można napisać

$$H = C_1 B^n \quad (2)$$

oraz

$$\mu_s = \frac{1}{C_1^n} H^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \quad (3)$$

Skala natężenia pola magnetycznego jest powiązana ze skalą indukcji

$$m_H = m_B^n \quad (4)$$

Skala przenikalności

$$m_\mu = m_B^{(1-n)} = m_H^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \quad (5)$$

Na podstawie wzoru (1) możemy wprowadzić skalę strat powierzchniowych

$$m_{\Delta ps} = \sqrt{\frac{m_f m_\mu}{m_\gamma}} m_H^2 \quad (6)$$

uzależnioną od skali natężenia pola magnetycznego, częstotliwości, przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej.

Uwzględniając (5) możemy napisać

$$m_{\Delta ps} = m_H^{\left(\frac{3n+1}{2n}\right)} \sqrt{\frac{m_f}{m_\gamma}} \quad (7)$$

Skala strat całkowitych uzyskana przez pomnożenie wzoru (7) przez skalę wzrostu powierzchni (m_l)² wynosi

$$m_{ps} = m_{\Delta ps} m_l^2 = m_l^2 m_H^{\left(\frac{3n+1}{2n}\right)} \sqrt{\frac{m_f}{m_\gamma}} \quad (8)$$

3. Wykorzystanie prawa modelu do modelowania strat w stalowych częściach konstrukcyjnych

Prawo wzrostu dotyczy modelowania w warunkach $m_f = m_\gamma = 1$ [5]. Z prawa przepływu, przy zachowaniu skali liczby zwojów $m_z = 1$ wynika równość

$$m_\theta = m_I m_z = m_H m_I = m_j m_I^2 \quad (9)$$

gdzie m_θ – skala przepływu, m_I – skala prądu, m_j – skala gęstości prądu.

W założeniu $m_j = 1$

$$m_H = m_I \quad (10)$$

Podstawiając (10) do (8) otrzymujemy

$$m_{ps} = m_I^{\left(\frac{7n+1}{2n}\right)} \quad (11)$$

Jeżeli odwzorowanie prądu wynosi

$$m_I = m_I^2 \quad (12)$$

to zależność skali modelowania strat od skali prądu daje się zapisać

$$m_{ps} = m_I^{\left(\frac{7n+1}{4n}\right)} \quad (13)$$

Straty podstawowe w uzwojeniach, zgodnie z prawem wzrostu, są proporcjonalne do trzeciej potęgi wymiarów liniowych

$$m_{pu} = m_I^3 \quad (14)$$

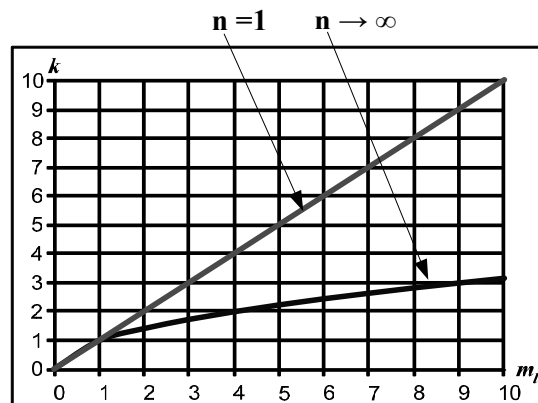
Stosunek strat w stalowych częściach konstrukcyjnych do strat podstawowych jak wyżej wynosi

$$k = \frac{m_{ps}}{m_{pu}} = \frac{m_I^{\left(\frac{7n+1}{2n}\right)}}{m_I^3} = m_I^{\left(\frac{n+1}{2n}\right)} \quad (15)$$

Obszar zmienności współczynnika k dla wartości granicznych $n=1$ oraz $n \rightarrow \infty$ został przedstawiony na rys.1.

W tabelicy 1 przytoczono wyniki obliczeń według wzoru (15). Przykładowo, jeżeli straty dodatkowe w częściach konstrukcyjnych dla jednostki „wyjściowej” $m_I = 1$ wynoszą w jednostkach względnych 0,2 strat podstawowych, to przy braku nasycenia w jednostce o wymiarach liniowych czterokrotnie większych wyniosą już 0,8, a w stanie silnego

nasycenia stanowią ok. 0,4 strat podstawowych.



Rys. 1 Obszar zmienności współczynnika k w funkcji skali wymiarów liniowych m_I

Tablica 1 Zależność wzrostu strat w częściach konstrukcyjnych w odniesieniu do strat podstawowych w uzwojeniach w zależności od wyjściowego udziału strat i nasycenia magnetycznego

m_I	1	2	3	4	6	8	10
	n = 10 silne nasycenie magnetyczne						
k	0,1	0,14	0,17	0,2	0,25	0,28	0,32
	0,2	0,28	0,34	0,4	0,49	0,57	0,63
	0,3	0,42	0,51	0,6	0,74	0,85	0,95
	n = 1 brak nasycenia						
k	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0
	0,3	0,6	0,9	1,2	1,8	2,4	3,0

4. Zależność wzrostu strat w stalowych częściach konstrukcyjnych od skali modelowania prądu

Badaniom strat dodatkowych poza uzwojeniami poświęcono wiele prac, lecz nie wykorzystując teorii modelowania [4]. W szczególności badano zależność tych strat na konkretnych transformatorach w funkcji prądu obciążenia transformatora, tak jak dla prototypu ($m_I = 1$), aby można było ustalić charakterystykę doświadczalną, istotną dla eksploatatorów transformatorów.

Wykorzystując teorię modelowania można uzyskać odpowiednią zależność analityczną.

Ze wzoru (9) wynika, że

$$m_H = m_j m_l \quad (16)$$

Wtedy wzór (8) przyjmuje postać

$$m_{ps} = m_j^{\left(\frac{3n+1}{2n}\right)} m_l^{\left(\frac{7n+1}{2n}\right)} \sqrt{\frac{m_f}{m_\gamma}} \quad (17)$$

Dla założonej wartości $m_l = 1$, prąd obciążenia jest proporcjonalny do gęstości prądu, stąd

$$m_{ps} = m_l^{\left(\frac{3n+1}{2n}\right)} \quad (18)$$

Wykładnik potęgi przy skali prądu uzyskuje następujące graniczne wartości: dla $n = 1$ (charakterystyka magnesowania prostoliniowa) wynosi 2, dla $n \rightarrow \infty$, czyli znacznego nasycenia magnetycznego, możliwego do osiągnięcia w praktyce eksploatacyjnej transformatora, jest równy 1,5.

Ta ostatnia zależność była wcześniej badana w Katedrze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej, lecz w przy założeniu innej aproksymacji charakterystyki magnesowania. W pracy [4] podano wzór (7.39), będący wynikiem aproksymacji charakterystyki magnesowania o

postaci $\sqrt{\mu H} = f(H)$ autorstwa J. Turowskiego. Według wzoru (7.39) wykładnik przy prądzie dla silnych nasyceń wynosi 1,6 i jest bliski wartości 1,5 wynikającej ze wzoru (18), wykorzystującego zależność paraboliczną $H=f(B)$.

5. Wnioski

Przedstawione w pracy rozumowanie wyjaśnia szybszy wzrost strat dodatkowych w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatora w odniesieniu do wzrostu strat podstawowych w uzwojeniach w zależności od wzrostu wymiarów liniowych, a przez to wzrostu mocy znamionowej.

Zjawisko to zostało wyraźnie zauważone w latach 50-tych ubiegłego stulecia, kiedy zaczęto budować coraz większe jednostki transformatorowe, o zwiększonych wymiarach liniowych i parametrach zmieniających się w przybliżeniu z prawem modelu

Spowodowało to konieczność ekranowania elektromagnetycznego lub magnetycznego, głównie kadzi i pokryw transformatorów.

6. Literatura

- [1] Jeziernski E.: *Transformatory*. WNT, Warszawa 1975
- [2] Nejman L. R.: *Powierzchnostnyj efekt w ferromagnitnych tielach*. GEI, Leningrad – Moskwa 1949
- [3] Pewca W.: *Transformatory produkowane przez Zakład ELTA, specyficzne cechy konstrukcyjne i technologiczne, Transformatory w eksploatacji*. Energo-Complex, kwiecień 2005, ss. 23-42
- [4]. Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*. WNT, Warszawa 1993
- [5] Zakrzewski K.: *Modelowanie fizyczne pól i strat obciążeniowych w transformatorach*. Rozprawy Elektrotechniczne 1979, t.25, z.2, ss. 401-418
- [6] Zakrzewski K.: *Modelowanie pól elektromagnetycznych w projektowaniu transformatorów*. Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXVIII, 3/2002, ss. 59-63
- [7] Zakrzewski K.: *Physical modelling of leakage field and stray losses in steel constructional parts of electrotechnical devices*. Archiv für Elektrotechnik 73 (1990), pp. 319-324
- [8] Zakrzewski K.: *Analiza pola elektromagnetycznego w masywnym żelazie metodą numeryczną*. Archiwum Elektrotechniki, z.3, 1969, ss.569-585

Autor

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski
Instytut Mechatroniki i Systemów
Informatycznych Politechniki Łódzkiej,
ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź,
e-mail: kazimierz.zakrzewski@p.lodz.pl

Recenzent

prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski