

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZANIA STRAT W TRANSFORMATORACH ROZDZIELCZYCH

STRESZCZENIE

W artykule wskazano na dużą rolę transformatorów rozdzielczych w systemie dystrybucji energii oraz scharakteryzowano technologiczne możliwości zmniejszenia strat jałowych i obciążeniowych. Podano wymagania przepisów UE odnośnie do strat w transformatorach suchych i olejowych oraz możliwości wprowadzenia transformatorów energooszczędnych.

Słowa kluczowe: Transformatory rozdzielcze, straty jałowe i obciążeniowe, optymalizacja konstrukcji, energooszczędność

ANALYSIS OF THE LOSSES DECREASE POSSIBILITIES IN TRANSFORMERS

The important role of distributing transformers in power distribution system was indicated and technological possibilities unproductive and load losses decrease were characterized. The UE regulations concerning dry and oil transformers losses and possibilities of energy saving transformers were presented in the paper.

Keywords: distributing transformers, unproductive and load losses, construction optimization, energy saving

1. WSTĘP

Jednym z ważniejszych zadań w polityce energetycznej każdego kraju jest racjonalne użytkowanie energii, w tym podejmowanie działań dla racjonalizacji użytkowania energii elektrycznej. Coraz bardziej atrakcyjne staje się stosowanie nowoczesnych technologii i energooszczędnych urządzeń. W tym zakresie istotną rolę odgrywają transformatory energetyczne stanowiące jeden z ważniejszych elementów systemu elektroenergetycznego.

W artykule przedstawiono zarówno działania podejmowane przez konstruktorów oraz producentów transformatorów i efekty ograniczania strat w transformatorach rozdzielczych, jak i korzyści wynikające ze stosowania transformatorów energooszczędnych.

2. ROLA TRANSFORMATORÓW ROZDZIELCZYCH

W 2000 roku w zakładach energetycznych w kraju zainstalowanych było ponad 230 tys. sztuk transformatorów o łącznej mocy 117 GVA, z czego 29% zainstalowanej mocy przypadało na transformatory o napięciach górnych: 220 i 400 kV, 40% na transformatory 110 kV i średnich napięć oraz 31% na transformatory rozdzielcze. Udział transformatorów rozdzielczych w ogólnej liczbie zainstalowanych transformatorów jest bardzo duży i wynosi około 98%. Pojedyncze moce znamionowe tych transformatorów są niewielkie, a ich zakres zawarty jest w przedziale od kilkunastu kVA do 1600 kVA, w niektórych przypadkach nawet więcej.

Transformatory rozdzielcze odgrywają podstawowe znaczenie w zakresie transformowania energii produkowanej w elektrowniach dla odbiorcy finalnego. Średnia moc statyczna zainstalowanych transformatorów rozdzielczych wynosi 162 kVA, a średnia moc transformatorów dla wszyst-

kich poziomów napięcia wynosi powyżej 500 kVA. Wynik ten jest rezultatem znacznie większej dynamiki przyrostu liczby stacji transformatorowych ŚN/nn niż pozostałych poziomów napięciowych.

Transformatory są urządzeniami długowiecznymi. Pod względem okresu eksploatacji krajowe transformatory rozdzielcze można zakwalifikować do jednej z trzech grup:

- 1) transformatory pracujące krócej niż 10 lat – około 25%,
- 2) transformatory pracujące od 10 do 25 lat – około 50%,
- 3) transformatory pracujące ponad 25 lat (nawet do 50 lat) – około 25%.

Wynika z tego, że w eksploatacji znajduje się jeszcze bardzo dużo transformatorów wyprodukowanych w latach 60. i 70. ubiegłego wieku, a więc transformatorów o kilkudziesięcioletnim okresie eksploatacji.

Są to w większości transformatory wyprodukowane przez jednego z trzech głównych producentów krajowych:

- 1) ABB Sp. z o.o.,
- 2) ALSTROM T&D Transformers (obecnie AREVA T&D),
- 3) TV Żychlińskie Transformatory.

Niewielka część transformatorów tej grupy pochodzi z importu.

3. STRATY W TRANSFORMATORACH ROZDZIELCZYCH

Transformatory są czynnymi elementami systemu energetycznego, które zużywają określoną część energii elektrycznej. Przesyłana energia wywołuje w nich określone straty, z którymi należy się liczyć przy wyznaczaniu kosztów wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Odpowiedni dobór transformatorów i ich ekonomiczna eks-

* Doktorantka Wydziału EAIiE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

platacja, może prowadzić do uzyskania oszczędności w eksploatacji całego systemu elektroenergetycznego.

Wielkość strat energii w transformatorach zdeterminowana jest przez producenta, a wynika z warunków eksploatacji określonych przez kupującego. Niskie straty transformatora są związane zwykle z koniecznością zastosowania droższych materiałów, a zatem wyższą ceną transformatora, lecz w efekcie wpływają na obniżenie kosztów eksploatacji.

Straty energii w transformatorach energetycznych można podzielić na dwie grupy, a mianowicie na:

- 1) **straty jałowe**, zwane inaczej stratami w rdzeniu transformatora;
- 2) **straty obciążeniowe**, nazywane również stratami w przewodach uzwojenia lub stratami w miedzi, które można klasyfikować według przyczyn ich powstania.

Podstawowe znaczenie dla transformatorów rozdzielczych, wobec na ogół występujących bardzo znacznych zmian obciążeń, odgrywają straty jałowe. Zasadniczy wpływ na powstawanie strat jałowych w żelazie odgrywają dwa czynniki:

- 1) właściwości materiałów magnetycznych,
- 2) technologia składania rdzeni.

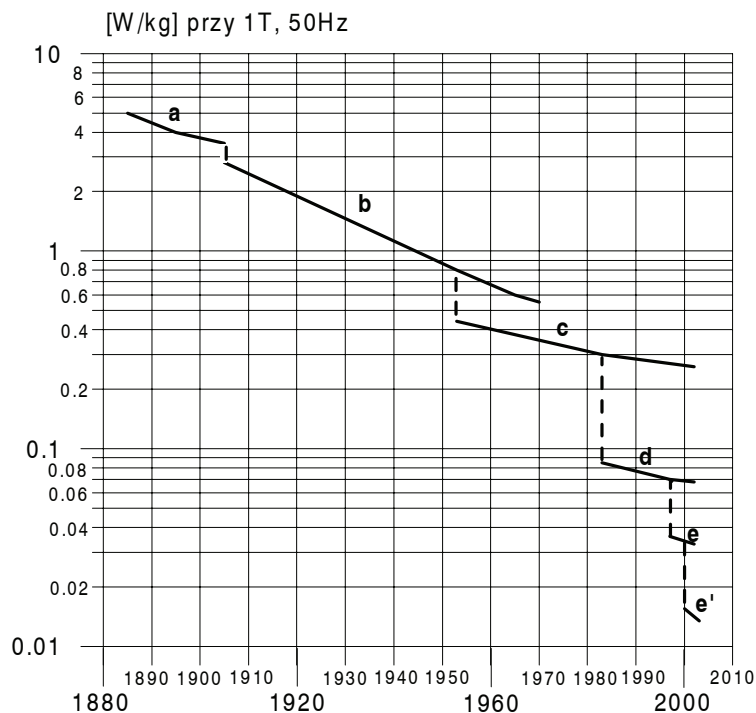
Aby więc wpłynąć na te straty, należy przeanalizować właściwości i cechy materiałów magnetycznych, z których wykonywane są rdzenie oraz technologię wykonania rdzeni, a w szczególności staranność ich składania. Dlatego w ostatnich latach zastosowano szereg nowych rozwiązań technologicznych i materiałowych. Prace w tej dziedzinie są wciąż kontynuowane i postępują bardzo szybko. Wyniki badań prowadzonych w dziedzinie materiałów magnetycznych wy-

korzystywane są również w innych urządzeniach elektrycznych, głównie w silnikach elektrycznych. W przyszłości badania te mogą mieć coraz znaczący wpływ na postęp techniczny w energetyce i ochronę środowiska.

W zakresie działań prowadzących do zmniejszenia stratności rdzeni i w efekcie do obniżania strat jałowych w transformatorach należy wymienić:

- stosowanie stali amorficznej, która posiada niewiarygodnie niską stratność, bardzo dużą trwałość i kruchość mechaniczną oraz znikomą grubość; proces technologiczny opiera się na metodzie szybkiego chłodzenia roztopionego metalu w bardzo cienką taśmę mającą niekryształiczną strukturę;
- zastosowanie coraz cieńszych stali; oferowane stale magnetyczne o grubości 0,05 mm występują w postaci wąskich taśm do małych transformatorów i cewek; przy większych transformatorach dostępna jest stal o grubości 0,18 mm; niestety, przy zmniejszaniu grubości stali, bardzo szybko rosną koszty, zarówno samych surowców, jak i koszty wytworzenia rdzeni;
- stosowanie projektu rdzenia Evans na trzech nogach przy połączeniu transformatorów – Dy, prowadzące do zmniejszenia długości, kosztu i hałasu;
- wykorzystanie mechanicznych i termicznych procesów ograniczenia domeny, oprócz trawienia laserem;
- wygaśnięcie patentów na niektóre procesy produkcji żelaza amorficznego, co mogłoby zachęcić innych producentów do wejścia na rynek.

Efekty zmian stratności blach transformatorowych na przestrzeni ponad 100 lat rozwoju pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Zmiany stratności blach transformatorowych w latach 1885÷2000. a – blachy pospolite z domieszką aluminium, b – blachy wysokonakrzemione, gorącowałcowane, c – blachy anizotropowe, zimnowałcowane, d – blachy amorficzne, e – blachy nanokryształiczne, najnowsza generacja, e' – jak e lecz po obróbce cieplnej w polu magnetycznym

W ostatnich latach niestety nie wprowadzono aż tylu zmian w celu obniżenia strat obciążeniowych, jakie miały miejsce w zakresie ulepszania stali na rdzenie. Spośród najważniejszych z nich wyróżnić można:

- dostępność walcówki miedzi i aluminium, która produkowana jest w procesach odlewania ciągłego i walcowania, połączonych z metodami obróbki mechanicznej; dało to możliwość wytwórcom półfabrykatów zaferowanie drutu oraz taśmy o wiele dłuższych niż poprzednio, co spowodowało zwiększenie niezawodności transformatorów; złącza spawane lub lutowane taśm, które były nieuniknione przy prętach produkowanych z drutu walcowniczego, stanowiły słabe punkty w gotowych cewkach;
- zarówno miedź, jak i aluminium dostępne są obecnie w wielu formach blachy i folii o dużych tolerancjach rozmiarowych; taśma w znacznym stopniu została zastąpiona poprzez blachę w uzwojeniach niskonapięciowych w transformatorach rozdzielczych;
- obecnie wprowadzane są procesy walcowania ciągłego na zimno, wykorzystywane w produkcji taśmy do produkcji uzwojeń; teoretycznie oznacza to lepszą dostępność i bardziej stabilną jakość niż możliwa do uzyskania z taśmy ciągnionej.

Nowe rozwiązania technologiczne umożliwiają formowanie uzwojeń w celu uzyskania lepszej wytrzymałości mechanicznej cewek uzwojeń.

Wskazać można jeszcze na inne metody zmniejszania strat mocy w transformatorach, do których należą:

- wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa,
- nowe metody łączenia,
- stosowanie izolacji o wyższej klasie cieplnej.

Efekty sukcesywnie wprowadzanych ulepszeń i zmian widać na przykładzie transformatorów o mocy znamionowej 100 kVA. Zmiany strat jałowych i obciążeniowych tych transformatorów pokazano w tabeli 1.

Z tabeli 1 wynika, że w ciągu 43 lat stosunek strat obciążeniowych do jałowych tych transformatorów uległ podwyższeniu z 2,25 do 8,33.

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej, jak również konieczność sprostania konkurencji powoduje, że przyjęte zostały zasady obowiązujące w UE. Do wymagań europejskich zalicza się dokumenty harmonizujące, które są niezbędne w celu zmniejszenia strat i osiągnięcia zamierzonych korzyści ekonomicznych w krajach Unii Europejskiej. Dokumenty te określają zalecane poziomy strat jałowych i obciążeniowych w olejowych i suchych transformatorach rozdzielczych oraz podają formułę kapitalizacji kosztów umożliwiającą ewaluowanie strat w transformatorach stosownie do wielkości kosztów jednostkowych strat mocy i energii elektrycznej w miejscu zainstalowania transformatora.

Ich ważnym zadaniem jest również ułatwienie wymiany produktów na rynku krajowym i zagranicznym oraz polepszenie jakości, bezpieczeństwa i środowiska.

Poziomy wydajności energetycznej dla transformatorów rozdzielczych określają dwa główne dokumenty harmonizujące [3]:

- 1) HD 428 – 3-fazowe olejowe transformatory rozdzielcze 50 Hz, o mocach znamionowych od 50 kVA do 2500 kVA i największym napięciu nieprzekraczającym 36 kV,
- 2) HD 538 – 3-fazowe suche transformatory rozdzielcze 50 Hz, o mocach znamionowych od 100 kVA do 2500 kVA i największym napięciu nieprzekraczającym 36 kV.

W dokumencie HD 428 dla każdej mocy znamionowej zostały ustalone trzy poziomy maksymalnych strat obciążeniowych – A, B, C oraz trzy poziomy strat jałowych – A', B' i C'. W sumie istnieje dziewięć wariantów poziomów strat, przy czym preferuje się pięć poziomów (rys. 2).

Dokument harmonizujący HD 538 z kolei ustala dla transformatorów suchych dla każdej mocy znamionowej jeden poziom strat obciążeniowych i jałowych.

Dzięki stopniowo wprowadzanim zmianom, możliwa stała się produkcja transformatorów rozdzielczych, które spełniają zalecenia Unii Europejskiej zawarte w HD 428, odnośnie do poziomów strat jałowych i obciążeniowych.

W tabeli 2 podano preferowane poziomy strat w transformatorach rozdzielczych w wybranych krajach europejskich [6].

Tabela 1

Zmiany strat w transformatorach o mocy 100 kVA

Parametr	Wielkość strat w roku			
	1957	1967	1977	2000
ΔP_j – straty jałowe [W]	710	430	385	210
ΔP_{obc} – straty obciążeniowe [W]	2308	2284	1827	1750
Wartość stosunku strat $d = \frac{\Delta P_{obc}}{\Delta P_j}$	2,25	5,31	4,75	8,33

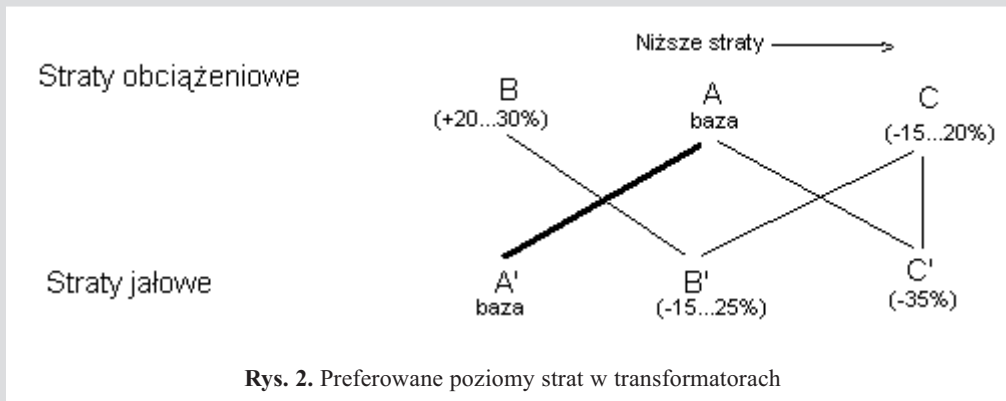


Tabela 2

Poziomy strat w transformatorach rozdzielczych w wybranych krajach

Kraj	Preferowane poziomy strat w transformatorach rozdzielczych
Belgia	C-C'
Francja	A-A', B-B' i B-C'
Niemcy	A-C', B-A' i C-C'
Hiszpania	50% spełnia C-C'

4. TRANSFORMATORY ENERGOOSZCZĘDNE

Na całym świecie realizowane są programy promowania energooszczędnych transformatorów. W tym zakresie zdecydowanie przodują Stany Zjednoczone. Od kilku lat prowadzone są również działania w tym zakresie w krajach OECD oraz w Unii Europejskiej. W celu wykazania korzyści ze stosowania transformatorów energooszczędnych, charakteryzujących się niskimi stratami, a w efekcie prowadzących do oszczędności energii oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń (w tym gazów cieplarnianych – odpowiedzialnych za zmiany klimatyczne) w 2000 r. podjęto w kraju realizację projektu Supertrafo [1, 8].

W ramach tego programu działania prowadziły:

- Polskie Centrum Promocji Miedzi,
- Instytut Energetyki Oddział Transformatorów w Łodzi,
- Łódzki Zakład Energetyczny,
- European Copper Institute.

Celem projektu Supertrafo było demonstrowanie efektów ekonomicznych i ekologicznych stosowania transformatorów energooszczędnych w spółkach dystrybucyjnych. Za pomocą opracowanej w ramach projektu metody on line [4, 8] mogły być obserwowane efekty w postaci zaoszczędzonych kWh i odpowiadających im kosztów energii oraz obniżenie uciążliwości dla środowiska naturalnego. W ramach programu opracowano system pełnego monitoringu czterech stacji transformatorowo-rozdzielczych 15/0,4 kV. Pozwoliło to na opracowanie wykresów obciążeń analizowanych stacji i określenie kosztów transformacji przy założeniu transformatorów typu „super” i standardowych (tanich).

W tabeli 3 podano podstawowe dane znamionowe transformatorów rozdzielczych porównywanych w ramach projektu.

Obserwacja wyników projektu wskazuje, że jego podstawowy cel, czyli wykazanie opłacalności stosowania energooszczędnych transformatorów, został osiągnięty.

Tabela 3

Dane znamionowe transformatorów porównywanych w ramach projektu

Parametr	Moc 400 kVA Napięcie znamionowe 15,75/0,4 kV Układ połączeń Dy5 Napięcie zwarcia 4,5%				Moc 630 kVA Napięcie znamionowe 15,75/0,4 kV Układ połączeń Dy5 Napięcie zwarcia 6%			
	Stary	Tani	Super	C-C'	Stary	Tani	Super	C-C'
Rok produkcji	1975-80	2001	2001	–	1975-80	2001	2001	–
Straty stanu jałowego	1020	720	500	630	1460	900	650	800
Straty obciążeniowe	4800	4100	3200	3800	7300	6250	4400	5600

Stwierdzono również, iż opłacalność ta nie zależy tylko od poziomu strat porównywanych transformatorów, ale także od stopnia ich obciążenia. Zebrane dane o zmieniającym się obciążeniu w ciągu roku w poszczególnych stacjach pozwoliły na obliczenie strat mocy występujących w różnych transformatorach oraz obliczenie oszczędności wynikających z zastosowania droższych, energooszczędnych transformatorów.

Przeszkodą do szerszego zastosowania programu energooszczędnych transformatorów w kraju są jednak ograniczone środki finansowe na inwestycje, liberalizacja rynku i rosnąca konkurencja.

5. PODSUMOWANIE

Wymiana klasycznych transformatorów rozdzielczych na nowe energooszczędne jednostki może przynieść szereg korzyści, wśród których można wymienić:

- redukcję strat energii elektrycznej,
- redukcję kosztów transformacji energii,
- redukcję zanieczyszczenia środowiska.

Potencjalne oszczędności energii z tytułu wdrożenia transformatorów energooszczędnych w Europie szacowane są w przybliżeniu na 22 TWh/rok, co odpowiada około 1170 mln euro według cen z 1999 r. [6]. Efekty oszczędnościowe z tytułu stosowania transformatorów energooszczędnych można porównać do rocznego zużycia energii w ponad 5,0 milionach gospodarstw domowych lub energii wyprodukowanej przez trzy największe europejskie elektrownie węglowe.

Racjonalny dobór transformatorów rozdzielczych olejowych i suchych do pracy w stacjach charakteryzujących się zmiennym obciążeniem, umożliwia metoda kształtowania strat przyjęta w dokumentach harmonizujących Unii Europejskiej (HD 428 i HD 538), zgodnie z którą dla danego przebiegu obciążenia dobowego istnieje możliwość wyboru jednej z dziewięciu kombinacji poziomów strat jałowych i obciążeniowych.

Należy sądzić, że ze względu na długi okres eksploatacji transformatorów rozdzielczych, wdrażanie transformatorów energooszczędnych będzie następować stopniowo.

Od 2000 r. ograniczone działania w zakresie wprowadzenia w kraju programu energooszczędnych transformatorów podjęto w ramach programu Supertrafo. Wskazały one na możliwość akceptacji wzrostu ceny transformatorów

energooszczędnych o ok. 80% w porównaniu z ceną transformatorów tradycyjnych.

Proponuje się szersze stosowanie transformatorów energooszczędnych, które mogą prowadzić do efektywności zużycia energii i zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko, w tym zmniejszenia globalnego ocieplenia.

Literatura

- [1] Bagiński A., Kaczmarek J., Kersz I., Pinkiewicz I.: *Doświadczenia z rocznego prowadzenia projektu supertrafo*. Materiały Seminarium „Transformatory rozdzielcze”, Wisła – Jawornik 2003, 167–176
- [2] Krajewska A., Kersz I.: *Współczesne problemy transformatorów rozdzielczych*. Nowa Elektrotechnika, nr 3 (7), 2005, 8–9
- [3] Makowski S.: *O potrzebie zmiany metody kształtowania strat w transformatorach rozdzielczych*. Materiały Seminarium „Transformatory rozdzielcze”, Wisła – Jawornik 2003, 189–199
- [4] Pinkiewicz I.: *Doświadczenia z monitorowania on-line obciążenia transformatorów rozdzielczych w ramach projektu "SUPERTRAF0"*. Mat. Konf. „Straty energii elektrycznej w Spółkach Dystrybucyjnych”, Poznań, 24–25 czerwca 2002
- [5] Projekt Thermie B Nr STR-1678-980-BE: *Potencjał oszczędności energii w Unii Europejskiej poprzez zastosowanie energooszczędnych transformatorów rozdzielczych*
- [6] Strzałka K.: *Wpływ transformatorów rozdzielczych na oszczędność energii elektrycznej*. Praca dyplomowa wykonana w Katedrze Elektroenergetyki AGH pod kierunkiem J. Furgała, Kraków 2005
- [7] Strzałka K.: *Aktualne problemy transformatorów rozdzielczych*. Biuletyn Techn. O/Kr SEP, nr 29, grudzień 2005, 8–15
- [8] Targosz R.: *Supertrafo – projekt demonstracji on-line efektów zastosowania transformatorów energooszczędnych*. Materiały Seminarium „Transformatory rozdzielcze”, Wisła – Jawornik 2003, 155–159

Wpłynęło: 21.04.2006

Katarzyna STRZAŁKA



Urodzona w dniu 23 czerwca 1981 r. w Krakowie. Ukończyła X Liceum Ogólnokształcące w Krakowie. Absolwentka kierunku Elektrotechnika Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Jest członkiem Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Aktualnie kontynuuje naukę na studiach doktoranckich na tym samym kierunku.

e-mail: kstrzalka@op.pl