

Straty mocy i sprawność transformatorów z uzwojeniami nadprzewodnikowymi wykonanymi z taśmy HTS 2G

Streszczenie. Na straty mocy transformatora nadprzewodnikowego składają się straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych, straty w żelazie, oraz straty w kriostacie i przepustach prądowych. Straty te dzielimy na straty obciążeniowe (zależna od obciążenia) oraz straty stałe (niezależne od obciążenia). Przeprowadzona została analiza porównawcza strat mocy i sprawności transformatorów konwencjonalnego i nadprzewodnikowego na przykładzie transformatora blokowego 63MVA i tej samej mocy transformatora nadprzewodnikowego, z uzwojeniami wykonanymi z taśmy nadprzewodnikowej 2G (drugiej generacji)

Abstract. Power losses in superconducting transformer consist of losses in superconducting windings, losses in iron core, losses in current leads and losses in cryostat. These losses can be divided into the load losses (depending on transformer's load) and permanent losses. The comparative analysis of power losses and efficiency of conventional and superconducting transformers for example, 63MVA copper winding transformer, and the same power rated superconducting transformer, with windings made of 2G (second generation) superconducting tape, were carried out. **Power losses and efficiency of superconducting transformer with windings made of 2G superconducting tape.**

Słowa kluczowe: straty, sprawność, transformator nadprzewodnikowy, taśma HTS 2G (2-giej generacji).

Keywords: energy losses, efficiency, superconducting transformer, 2nd generation HTS tape.

doi:10.12915/pe.2014.04.14

Wstęp

Na straty mocy transformatora nadprzewodnikowego składają się straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych, straty w żelazie, oraz straty w kriostacie i przepustach prądowych. Straty te dzielimy na straty obciążeniowe (zależna od obciążenia) oraz straty stałe (niezależne od obciążenia) [1], [2]

Straty obciążeniowe dzielimy na:

- straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych powstające na skutek przepływu prądu przez uzwojenia nadprzewodnikowe – straty od pola własnego; oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego – straty od pola zewnętrznego (straty histerezy) i straty wiropądowe
- straty w przepustach prądowych.

Straty stałe dzielimy na:

- straty w żelazie
- straty w kriostacie

Straty przemiennoprądowe w uzwojeniach nadprzewodnikowych w istotny sposób zwiększają moc układu chłodzenia i z tego powodu należy dążyć do ich ograniczenia. Wartość tych strat stanowi jednak tylko niewielki procent strat, jakie powstają w miedzianych uzwojeniach transformatorów o takich samych parametrach. Straty w żelazie i w kriostacie stanowią przeszło 60 % wszystkich strat transformatora nadprzewodnikowego [1], [2].

W artykule opisane zostały straty obciążeniowe i stałe transformatora nadprzewodnikowego oraz sposób ich wyznaczania. Przeprowadzona została analiza porównawcza strat mocy i sprawności transformatorów konwencjonalnego i nadprzewodnikowego na przykładzie transformatora blokowego 63MVA i tej samej mocy transformatora nadprzewodnikowego, z uzwojeniami wykonanymi z taśmy nadprzewodnikowej 2G (2-giej generacji)

Straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych

Straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych są stratami przemiennoprądowymi powodowanymi zmiennym polem magnetycznym. Ze względu na źródło pola straty te dzielimy na straty od pola zewnętrznego (histerezy) i wiropądowe oraz straty od pola własnego. Straty od pola zewnętrznego i wiropądowe spowodowane są polem strumienia rozproszenia uzwojeń natomiast straty od pola własnego wywołane są polem własnym od prądu płynącego przez uzwojenie.

Straty od pola zewnętrznego (straty histerezy)

W nadprzewodniku indukują się powierzchniowe prądy ekranujące, które przeciwdziałają głębszej penetracji wnętrza nadprzewodnika przez strumień magnetyczny zewnętrznego pola magnetycznego (pola strumienia rozproszenia). Kiedy zewnętrzne pole magnetyczne jest niewielkie, penetracja nadprzewodnika występuje jedynie w warstwie powierzchniowej. Jednak wzrost wartości pola magnetycznego powoduje zanik prądów ekranujących i penetrację nadprzewodnika prawie w całej objętości [3].

Ze względu na silną anizotropię, zewnętrzne pole magnetyczne prostopadłe do powierzchni uzwojenia powoduje większe straty niż pole równoległe do powierzchni uzwojenia. Z tego względu w celu wyznaczenia całkowitych strat od pola zewnętrznego, należy wyznaczyć składową promieniową pola (prostopadłą do powierzchni przewodu) oraz składową osiową pola (równoległą do powierzchni). Straty histerezy od pola prostopadłego, na metr długości taśmy w uzwojeniu, wyznaczamy ze wzoru (1), a straty histerezy od pola równoległego, na metr długości taśmy w uzwojeniu – ze wzoru (2) [1]:

$$(1) p_{\perp} = K \cdot f \frac{w^2 \pi}{\mu_0} B_C B_{\perp} \left[\frac{2B_C}{B_{\perp}} \ln \left(\cosh \frac{B_{\perp}}{B_C} \right) - \tanh \frac{B_{\perp}}{B_C} \right]$$

$$(2) p_{\parallel} = \begin{cases} \frac{2f \cdot C \cdot A_C}{3\mu_0 B_p} \rightarrow B_{\parallel} \leq B_p \\ \frac{2f \cdot C \cdot A_C \cdot B_p}{3\mu_0} (3B_{\parallel} - 2B_p) \rightarrow B_{\parallel} > B_p \end{cases}$$

gdzie: A_C – pole przekroju taśmy, w – szerokość taśmy, C – stosunek pola przekroju warstwy nadprzewodnika do pola przekroju taśmy, B_C – krytyczne pole penetracji nadprzewodnika, B_p – pole magnetyczne, przy którym następuje pełna penetracja nadprzewodnika (B_p i B_C – zależą od temperatury), K – współczynnik geometryczny kształtu taśmy, B_{\perp} i B_{\parallel} – składowe: prostopadła i równoległa pola,

Całkowite straty od pola zewnętrznego są sumą strat od obu składowych pola zewnętrznego w całej długości taśmy w każdym uzwojeniu.

Straty histerezy są wprost proporcjonalne do grubości warstwy nadprzewodnika. Głównym sposobem ich ograniczenia jest wykonanie taśmy nadprzewodnikowej 2G

o jak najmniejszej grubości warstwy nadprzewodnika. Jednak minimalna grubość warstwy, ograniczona jest względami technologicznymi. Jeżeli wymiary nadprzewodnika w kierunku prostopadłym do pola magnetycznego są niewielkie, również uzyskujemy ograniczenie strat histerezyowych.

Wartość strat histerezyowych zależy także od typu i budowy uzwojeń oraz ich wymiarów promieniowych (grubości).

Uzwojenia nadprzewodnikowe transformatorów wykonuje się najczęściej, jako cewkowe, w postaci cewek pojedynczych lub podwójnych, oraz warstwowe [3], [4], [5].

Uzwojenia warstwowe są łatwe do wykonania, charakteryzują się zwartą budową i jednolitą powierzchnią. Strumień rozproszenia jest na większej długości uzwojenia równoległy do jego powierzchni i tylko na końcach uzwojenia ulega zakrzywieniu. Składowa prostopadła pola magnetycznego jest niewielka, i nie powoduje dużego wzrostu indukowanych strat przemiennoprądowych w warstwach rezystywnych taśmy 2G. Przy uszkodzeniu taśmy nadprzewodnikowej w uzwojeniu warstwowym konieczne jest przewinięcie całego uzwojenia, co jest wadą tego wykonania ze względu na koszt taśmy.

Uzwojenia cewkowe, przy uszkodzeniu taśmy nadprzewodnikowej, pozwalają na wymianę pojedynczej cewki z uszkodzoną taśmą, a nie całego uzwojenia. Wadą uzwojeń cewkowych są większe wartości strat przemiennoprądowych, ze względu na większą wartość składowej prostopadłej pola magnetycznego, spowodowaną niejednorodną budową uzwojenia (odstępny między cewkami). W celu zmniejszenia strat przemiennoprądowych zmniejsza się liczbę zwojów w pojedynczej cewce, zwiększając jednocześnie ich liczbę. W celu zmniejszenia liczby połączeń rezystywnych między cewkami stosuje się uzwojenia cewkowe podwójne.

Straty wiropądowe

Straty wiropądowe powstają w całej objętości warstw rezystywnych nadprzewodników 2G w wyniku przepływu prądów wirowych, indukowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne. Straty wiropądowe można wyznaczyć ze wzoru (3) [3]:

$$(3) \quad p_w = \frac{a}{\rho} \left(\frac{f}{100} \right)^2 B^2$$

gdzie: B – zewnętrzne pole magnetyczne, f – częstotliwość, a – grubość warstw rezystywnych taśmy, ρ – rezystywność warstw rezystywnych taśmy.

Straty te możemy ograniczyć poprzez zmniejszenie procentowego udziału warstw rezystywnych w całej taśmie nadprzewodnikowej. Jednak ze względu na wymaganą wytrzymałość mechaniczną taśm nadprzewodnikowych oraz ich parametry elektryczne udział ten jest dosyć wysoki i wynosi 90 – 95 % dla taśm 2G. Także zwiększenie rezystywności materiału matrycy oraz materiałów warstw stabilizujących, w temperaturze 77 K, wpływa na zmniejszenie tych strat. Ze względu na dużą rezystywność warstw stabilizujących oraz tlenkowe podłoża nadprzewodnika w taśmach 2G, indukowane w nich straty wiropądowe są znacznie ograniczone.

Straty od pola własnego

Straty od pola własnego wywołane są polem własnym od prądu płynącego przez uzwojenie nadprzewodnikowe. Straty od prądu transportu w pojedynczej taśmie HTS wyznaczane są z równania Norrisa, (4) [1]:

$$(4) \quad p_{wt} = \frac{I_c \cdot \mu_0 \cdot f}{\pi} \left[\left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) \cdot \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) - \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \right]$$

gdzie: I_t – prąd transportu, I_c – prąd krytyczny taśmy

Prąd transportu I_t jest równy maksymalnemu prądowi w każdej taśmie – $I_t = I_{max}/n$ (gdzie n liczba taśm uzwojenia pierwotnego lub wtórnego). Całkowite straty własne całego uzwojenia HTS równe są sumie strat wszystkich zwojów uzwojenia. Straty pola własnego zależą od gęstości prądu, w ale w małym stopniu od pola zewnętrznego.

Straty w przepustach prądowych

Straty w przepustach prądowych są sumą strat rezystywnych (straty Joule'a) oraz strat przewodzenia ciepłego materiału przepustu [1], [2] [4].

W celu zminimalizowania dopływu ciepła do wnętrza kriostatu, na drodze przewodzenia ciepłego, stosuje się sekcjonowanie przepustów prądowych.

Na przepusty prądowe pracujące w zakresie temperatur (100 – 40) K stosuje się lite materiały nadprzewodnikowe lub taśmy nadprzewodnikowe – tzw. niskotemperaturowe nadprzewodnikowe przepusty prądowe. Dla Nadprzewodnikowych przepustów prądowych przejmuje się, że maksymalna ilość ciepła przewodzona przez parę przepustów wynosi (0,3 – 0,5) W.

Przepusty prądowe wysokotemperaturowe, pracujące w zakresie temperatur (300 – 100) K, wykonane są z rurek lub przewodów miedzianych o zmiennej średnicy wewnętrznej. Przepusty o większej średnicy w temperaturze wyższej i mniejszej średnicy w niższej, pozwalają zminimalizować przepływ ciepła na drodze przewodnictwa i ograniczyć straty Joule'a.

Przepływ ciepła przez przepusty miedziane do wnętrza kriostatu obliczamy ze wzoru (5):

$$(5) \quad P_p = \frac{\lambda_{Cu(T)} \cdot S}{l} (T_1 - T_2)$$

gdzie: $\lambda_{Cu(T)}$ – współczynnik przewodzenia miedzi w zależności od temperatury pracy, S – pole przekroju przepustu, l – długość przepustu, T_1 , T_2 – temperatura wyższa i niższa.

Straty Joule'a generowane przez przepust obliczmy z wzoru

$$(6) \quad P_J = I^2 \frac{\rho_{Cu(T)} \cdot l}{S}$$

gdzie: $\rho_{Cu(T)}$ – rezystywność miedzi w zależności od temperatury pracy (tabela 1).

Tabela 1. Rezystywność miedzi w zależności od temperatury

temperatura, K	200 K	200 K	50 K	20 K
$\rho_{Cu}, \Omega m$	$10,5 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-11}$

Straty w żelazie

Straty w żelazie nie zależą od obciążenia transformatora. Do określenia tych strat konieczna jest znajomość masy rdzenia oraz współczynnika stratności blachy. Współczynnik ten określa stratę mocy w 1 kg blachy transformatorowej przy częstotliwości sieciowej i określonej wartości indukcji magnetycznej [1].

Ze względu na znacznie większą gęstość prądu w uzwojeniach nadprzewodnikowych, transformator nadprzewodnikowy może mieć mniejsze napięcie zwojowe, pozwalające na zmniejszenie wymiarów i masy rdzenia, co prowadzi wprost do zmniejszenia strat w żelazie [1]

Straty w kriostacie

Chłodzenie uzwojeń nadprzewodnikowych realizowane jest w kriostatach, w których wytwarzana i utrzymywana jest wymagana temperatura pracy. Kriostaty uzwojeń transformatorów nadprzewodnikowych są wykonane z materiału niemagnetycznego i nieprzewodzącego prądu elektrycznego, najczęściej z włókna szklanego nasączonego żywicą epoksydową.

Straty mocy w kriostacie są sumą ciepła dopływającego do wnętrza kriostatu przez boczne jego powierzchnie na drodze przewodzenia i promieniowania cieplnego. Są to straty stałe, niezależne od obciążenia [1], [2].

W przypadku powierzchni bocznych kriostatu i ciepłego otworu (układ cylindryczny), korzystamy ze wzorów:

- pole powierzchni bocznej ścianki i ekranów, (7)

$$(7) \quad S_c = \pi \cdot d \cdot l$$

gdzie: d – średnica rozpatrywanej powierzchni cylindrycznej, l – wysokość rozpatrywanej powierzchni

- przepływ ciepła przez przewodzenie, (8)

$$(8) \quad P_{prz_c} = \frac{(T_1 - T_2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln \frac{d_{zew}}{d_{wew}}}$$

gdzie: T_1 i T_2 – odpowiednio temperatura niższa i wyższa, d_1 i d_2 – odpowiednio średnica zewnętrzna i wewnętrzna rozpatrywanej warstwy izolacji, λ – współczynnik przewodzenia ciepła

Izolacją termiczną kriostatu może być izolacja stała, próżnia lub cieć kriogeniczna. W przypadku wierzchnich i spodnich powierzchni kriostatu i ciepłego otworu (układ płaski) stosujemy wzory:

- pole powierzchni płaskich, (9)

$$(9) \quad S_p = \pi \frac{(d)^2}{4}$$

- przepływ ciepła przez przewodzenie, (10)

$$(10) \quad P_{prz_p} = \frac{(T_1 - T_2) \cdot \lambda \cdot S_p}{l}$$

W wszystkich przypadkach przepływu ciepła przez promieniowanie obliczamy ze wzoru (11):

$$(11) \quad P_{pr} = \varepsilon_b \cdot \sigma_s \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

gdzie: ε_b – współczynnik emisyjności rozpatrywanej powierzchni, σ_s – stała Stefana – Boltzmana

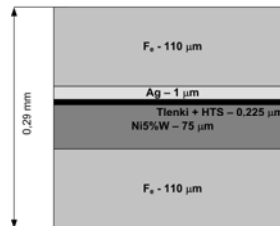
Straty w uzwojeniach podczas zwarcia

W transformatorze nadprzewodnikowych oprócz strat stałych w żelazie i kriostacie oraz strat obciążeniowych w uzwojeniach i przepustach prądowych, występują jeszcze straty w warstwach rezystywnych uzwojeń nadprzewodnikowych. Straty te występują w stanie zwarcia na skutek przepływu ustalonego prądu zwarcia przez warstwy rezystywne uzwojeń (taśmy) nadprzewodnikowych, po przejściu uzwojeń do stanu rezystywnego i pojawieniu się rezystancji uzwojeń.

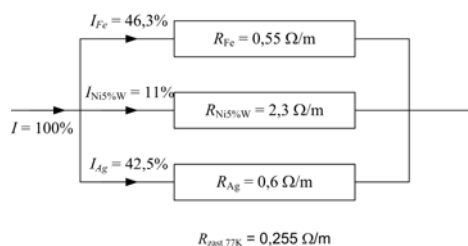
Taśmy nadprzewodnikowe 2G składają się z szeregu warstw, z których można wyróżnić: warstwy stabilizatora, odpowiadające za parametry mechaniczne i termiczne

taśmy, warstwy podłoża decydujące o jej parametrach elektrycznych, oraz warstwę nadprzewodnika.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono strukturę taśmy 2G 344S produkcji American Superconductor, procentowy rozływ prądu w warstwach rezystywnych taśmy oraz ich rezystancję.



Rys. 1. Struktura taśmy HTS 2G 344S



Rys. 2. Procentowy rozływ prądu w warstwach rezystywnych taśmy 344S, oraz rezystancja warstw

Wartość tych strat zależy od wartości ustalonego prądu zwarcia, a więc od zastępczej rezystancji uzwojeń nadprzewodnikowych w stanie rezystywnym (w 77K), oraz od czasu, po którym prąd zwarcia zostanie wyłączony. Zbyt duża wartość tych strat, spowodowana dużą rezystancją uzwojeń w stanie rezystywnym lub też zbyt długim czasem trwania zwarcia, może prowadzić do nadmiernego przegrzania uzwojeń, a w konsekwencji do zwiększonego ubytku ciekłego azotu, oraz do wydłużenia czasu, po którym uzwojenie ponownie przejdzie do stanu nadprzewodzącego. W skrajnym przypadku może też doprowadzić do zniszczenia uzwojenia.

Porównanie strat transformatorów konwencjonalnego i nadprzewodnikowego

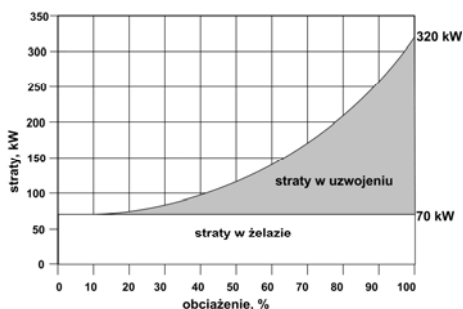
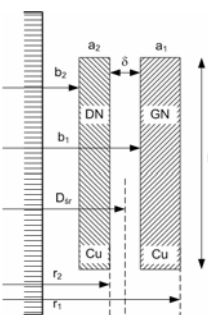
Porównanie strat przeprowadzono dla transformatorów: konwencjonalnego i nadprzewodnikowego, o mocy 63MVA. Dla celów analizy przyjęto, że oba transformatory pracują w sposób ciągły przez 8760 h, przy obciążeniu znamionowym. Obliczone w ten sposób straty są stratami maksymalnymi. W praktyce jednak transformator nie pracuje przez cały rok przy obciążeniu znamionowym i rzeczywiste straty mocy są mniejsze. Zależą one od rocznej krzywej obciążenia transformatora. W przypadku transformatora konwencjonalnego opisanego w publikacji Eugeniusza Jezierskiego „Transformatory, budowa i projektowanie” (tab. 2) [6] ustalono, że transformator, przeznaczony do pracy w bloku z generatorem, będzie miał stosunek strat w miedzi do strat w żelazie około 3,5. Konsekwencją wybranego stosunku strat są dość duże straty w żelazie (70 kW) a małe w miedzi (250 kW).

W przypadku transformatora nadprzewodnikowego wymiary rdzenia, wysokość uzwojeń Lu oraz szerokość szczeliny δ , a także liczba zwojów uzwojenia GN i DN są takie same jak w transformatorze konwencjonalnym [7]. Założono, że uzwojenia transformatora wykonane zostaną z taśmy nadprzewodnikowej 2G 344S, o prądzie krytycznym 90 A.

Rozkład strat w żelazie i uzwojeniach transformatora konwencjonalnego, w zależności od obciążenia, przedstawia rys. 3.

Tabela 2. Parametry transformatora konwencjonalnego 63 MVA

Parametry elektryczne			
częstotliwość, Hz	50		
napięcie strony: pierwotnej/ wtórnej, kV	121/10.5		
prąd znamionowy uzwojenia GN, A	301		
prąd znamionowy uzwojenia DN, A	2000		
Parametry uzwojenia			
przekrój przewodu uzwojenia GN, mm ²	45,2		
przekrój przewodu uzwojenia DN, mm ²	23,1		
Wymiary rdzenia magnetycznego			
przekrój żelaza kolumny, m ²	0,405		
przekrój żelaza jarzma, m ²	0,426		
Wymiary uzwojenia			
a_1 , m	0,09	δ , m	0,057
a_2 , m	0,075	L_{u1} , m	1,36
b_1 , m	0,561	D_{sr1} , m	1,08
b_2 , m	0,430	l_{sr1} , m	3,41
r_1 , m	0,651	zwoje	479 / Z_{GN} / Z_{DN}
r_2 , m	0,505	warstwy	$m_{GN} = m_{DN}$ 6



Rys. 3 Straty mocy transformatora konwencjonalnego 63MVA

Stałe straty w żelazie stanowią 21,8% całkowitych strat transformatora konwencjonalnego przy obciążeniu znamionowym. Pozostałe 78,2% stanowią straty główne i dodatkowe w uzwojeniach.

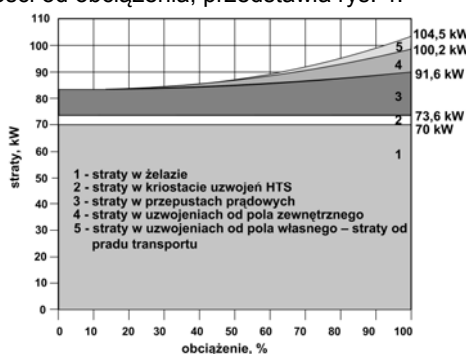
W transformatorze nadprzewodnikowym oprócz stałych strat w żelazie oraz strat w uzwojeniach HTS zależnych od obciążenia (straty od pola zewnętrznego i straty od prądu transportu) występują dodatkowe straty w przepustach prądowych oraz straty w kriostacie. Wartość strat transformatora nadprzewodnikowego 63MVA, z uzwojeniami wykonanymi z taśmy HTS 344S zamieszczono w tabeli 3 [8].

Powyższe straty dotyczą transformatora nadprzewodnikowego z uzwojeniami chłodzonymi ciekłym azotem. W przypadku chłodzenia kontaktowego straty są większe o moc chłodziarki kontaktowej.

Tabela 3. Straty transformatora nadprzewodnikowego z uzwojeniami wykonanymi z taśmy 2G 344S

Straty	Wartość, kW
stałe straty w żelazie	70
straty w uzwojeniach HTS przy obciążeniu znamionowym:	
od pola zewnętrznego	8,6
od pola wewnętrznego	4,5
straty w przepustach prądowych przy obciążeniu znamionowym	18
straty w kriostacie (nie zależne od obciążenia)	3,4
Łączne straty w transformatorze	104,5

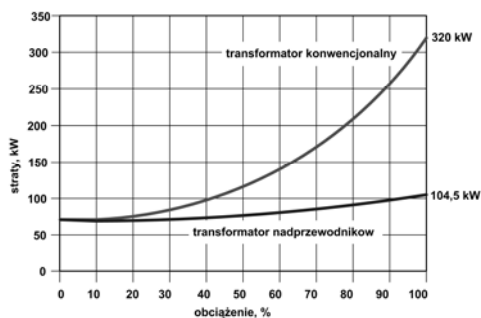
Rozkład strat w żelazie, uzwojeniach i elementach konstrukcyjnych transformatora nadprzewodnikowego, w zależności od obciążenia, przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Straty mocy transformatora nadprzewodnikowego 63MVA

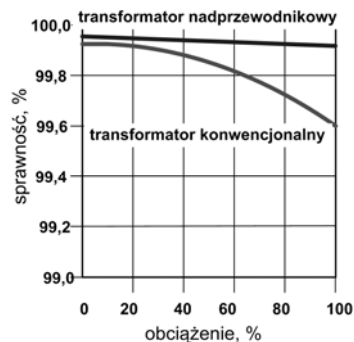
Dla transformatora nadprzewodnikowego straty stałe (w żelazie oraz w kriostacie) stanowią aż 71,1% całkowitych strat transformatora przy obciążeniu znamionowym. Pozostałe 32,8% stanowią straty w: przepustach prądowych – 17,2%; uzwojeniach od pola zewnętrznego – 8,2%, uzwojeniach od prądu transportu – 3,9%

Porównanie strat w transformatorach: konwencjonalnym i nadprzewodnikowym, w zależności od obciążenia, przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Straty mocy w transformatorach: konwencjonalnym i nadprzewodnikowym 63MVA

Całkowite straty transformatora nadprzewodnikowego stanowią jedynie 32,6% strat transformatora konwencjonalnego. Straty stałe transformatora nadprzewodnikowego są większe od strat stałych transformatora konwencjonalnego o wartość strat w kriostacie. Natomiast straty obciążeniowe transformatora nadprzewodnikowego stanowią jedynie 12,5% strat obciążeniowych transformatora konwencjonalnego.



Rys. 6. sprawność transformatorów: konwencjonalnego i nadprzewodnikowego 63MVA

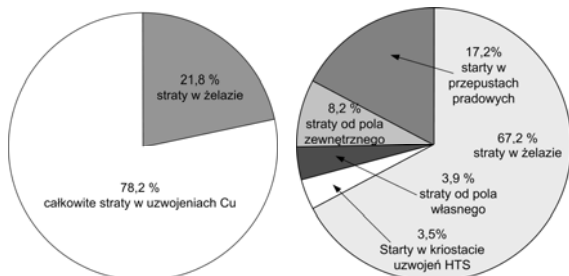
Rysunek 6 przedstawia rozkład sprawności transformatorów: konwencjonalnego i nadprze-

wodnikowego, w zależności od obciążenia.

Roczne straty energii transformatora nadprzewodnikowego, wynoszące 915 MWh, stanowią 32,8% strat energii transformatora konwencjonalnego, wynoszących 2803 MWh.

Powyższe wartości są wartościami maksymalnymi, przy założeniu, że transformatora pracuje przy obciążeniu znamionowym 8769 h rocznie

Strukturę rocznych straty energii transformatorów: konwencjonalnego i nadprzewodnikowego, przedstawiają wykresy na rys. 7.



Rys. 7. Roczne straty energii transformatorów: a) – konwencjonalnego, b) – nadprzewodnikowego

Podsumowanie

Na straty mocy transformatora nadprzewodnikowego składają się straty w uzwojeniach nadprzewodnikowych, straty w żelazie, oraz straty w kriostacie i przepustach prądowych. Straty te dzielimy na straty obciążeniowe (zależna od obciążenia) oraz straty stałe (niezależne od obciążenia).

Straty prądu przemiennego w uzwojeniach nadprzewodnikowych w istotny sposób zwiększają moc układu chłodzenia i z tego powodu należy dążyć do ich ograniczenia. Wartość tych strat stanowi jednak tylko niewielki procenta strat, jakie powstają w miedzianych uzwojeniach transformatorów o takich samych parametrach.

Z porównania transformatora konwencjonalnego o mocy 63 MVA i tej samej mocy transformatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi, wynika, że całkowite straty transformatora nadprzewodnikowego stanowią jedynie 32,6% strat transformatora konwencjonalnego. Straty stałe transformatora nadprzewodnikowego są większe od strat

stałych transformatora konwencjonalnego o wartość strat w kriostacie. Natomiast straty obciążeniowe transformatora nadprzewodnikowego stanowią jedynie 12,5% strat obciążeniowych transformatora konwencjonalnego.

Roczne straty energii transformatora nadprzewodnikowego, wynoszące 915 MWh, stanowią 32,8% strat energii transformatora konwencjonalnego, wynoszących 2803 MWh, oczywiście przy założeniu, że oba transformatory pracują przy obciążeniu znamionowym 8769h rocznie.

LITERATURA

- [1] Berger A., Chevatskiy S., Noe M., Leibfried T., Comparison of the Efficiency of Superconducting and Conventional Transformers, *Journal of Physics, Conference Series*, 234 (2010) 032004
- [2] Hyoungwoo L., Guesoo Ch., Ji-Kwang L., Kyung-Woo R., AC Losses of Pancake Winding and Solenoidal Winding Made of YBCO Wire for Superconducting Transformer, *IEEE Trans. On Applied Superconductivity*, Vol. 17, No 2, June 2007, pp. 1951-1954.
- [3] Oomen M. R., AC Losses in Superconducting Tapes and Wires, *M. R. Oomen 2000*
- [4] Morandi A., Trevisani L., Ribani P. L., Fabbri M., Martini L., Bocchi M., Superconducting Transformer: Key Design Aspects for Power Applications, *Journal of Physics: Conference Series*, 97 (2008) 012318
- [5] Kamijo H., Hata H., Fukumoto Y., Tomioka A., Bohno T., Yamada H., Ayai N., Yamasaki K., Kato T., Iwakuma M., Funaki K., Development of Low AC Loss Windings for Superconducting Traction Transformer, *Journal of Physics: Conference Series*, 234 (2010) 032027
- [6] Jezierski E. *Transformatory: Budowa i projektowanie.*, WNT 1965
- [7] Lee Ch., Soek B.Y., Design of the 3 Phase 60 MVA HTS Transformer With YBCO Coated Conductor Winding, *IEEE Trans. On Applied Superconductivity*, Vol. 15, No 2, June 2005, pp. 1867-1870.
- [8] Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B., Experimental investigation of the model of superconducting transformer with the windings made of 2G HTS tape, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3. 2012, article number: 5500604.

Autorzy: dr inż. Grzegorz Wojtasiewicz, Instytut Elektroenergetyki w Warszawie, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin, E-mail: g.wojtasiewicz@iel.waw.pl