

DOI: 10.5604/20830157.1130174

TECHNOLOGIE TRANSFORMATORÓW NADPRZEWODNIKOWYCH

Łukasz Woźniak^{1,2}, Paweł Surdacki¹

¹Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ²ENEA Wytwarzanie S.A.

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd prowadzonych badań, budowy i technologii transformatorów nadprzewodnikowych. Podano korzyści stosowania i produkcji transformatorów z nadprzewodników wysokotemperaturowych. Porównano budowę transformatora konwencjonalnego i transformatora nadprzewodnikowego. Przedstawiono rodzaje konstrukcji nadprzewodnikowych przewodów nawojowych oraz transformatorów nadprzewodnikowych. Porównano parametry transformatora konwencjonalnego oraz nadprzewodnikowego, a także straty energetyczne występujące w obu typach transformatorów.

Słowa kluczowe: przewody nadprzewodnikowe, transformatory nadprzewodnikowe, straty

TECHNOLOGIES OF SUPERCONDUCTING TRANSFORMERS

Abstract. In the paper, an overview of the current research, the construction and technology of superconducting transformers has been presented. The benefits of using and production of high temperature superconducting transformers have been shown. The parameters of the conventional and superconducting transformer have been compared. Moreover, different structures of superconducting winding wires and transformers have been elucidated. In addition, the power losses occurring in both conventional and high-temperature superconducting transformers have been discussed.

Keywords: superconducting tapes, superconducting transformers, losses

Wstęp

Mimo dużej sprawności energetycznej transformatorów traci się w nich ponad 5% wytwarzanej energii elektrycznej. Większość tych strat powstaje w uzwojeniach wykonanych z miedzi. Straty energii w stalowych rdzeniach zostały bardzo ograniczone w latach 80-tych ubiegłego stulecia i nic nie wskazuje na możliwości dalszych znacznych ograniczeń strat w żelazie. Pierwsze próby budowy transformatorów z uzwojeniami z nadprzewodnika Nb-Ti oraz z rdzeniem ferromagnetycznym i bezrdzeniowych, w latach 70-tych ubiegłego stulecia, nie odniosły sukcesu. Badania nad transformatorami z nadprzewodnikowymi uzwojeniami wysokotemperaturowymi podjęto w latach 90-tych XX wieku, wykorzystując włókniste (matrycowe) przewody bizmutowe (Bi-2212 i Bi-2223 [5].

1. Przewody nadprzewodnikowe

W przewodach nadprzewodnikowych występuje połączenie właściwości magnetycznych i elektrycznych materiału objawiających się zanikiem rezystancji elektrycznej w określonych warunkach. Przewody te znajdują się w stanie nadprzewodzącym, gdy punkt ich pracy wyznaczony przez temperaturę, gęstość prądu oraz natężenie pola magnetycznego leży poniżej charakterystycznej dla danego materiału nadprzewodnikowego powierzchni krytycznej wyznaczonej przez temperaturę, indukcję magnetyczną i gęstość prądu.

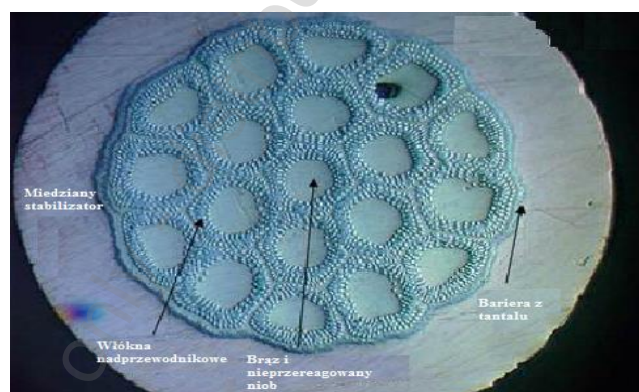
Ze względu na wartość temperatury krytycznej T_C wprowadzono podział przewodów nadprzewodnikowych na:

- niskotemperaturowe (LTS – Low Temperature Superconductor),
- wysokotemperaturowe (HTS – High Temperature Superconductor).

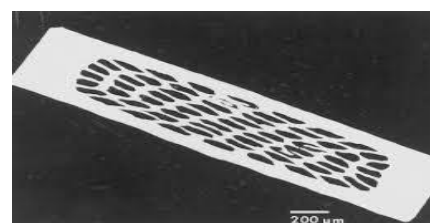
Umowną granicą rozdzielającą nadprzewodniki LTS i HTS jest temperatura krytyczna $T_C = 25$ K.

1.1. Nadprzewodnikowe przewody nawojowe

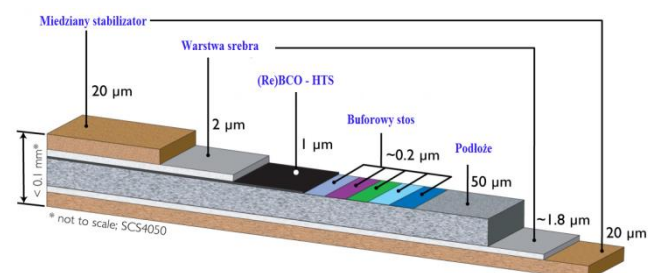
Przemysłowa produkcja przewodów nawojowych z nadprzewodników niskotemperaturowych rozpoczęła się w latach 60-tych. Są to przewody NbTi oraz Nb₃Sn, w postaci drutów o strukturze włóknistej, w matrycy metalowej (Cu, Cu-Sn) pełniącej funkcję stabilizatora elektrycznego i termicznego (rys. 1) [15]. Po odkryciu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w 1986 roku rozpoczęto w latach 90-tych produkcję ceramicznych przewodów I generacji Bi-2212 i Bi-2223 (rys. 2) o strukturze włóknistej i kształtek monolitycznych oraz przewodów II generacji YBCO w postaci taśm warstwowych (rys. 3).



Rys. 1. Przekrój przewodu nadprzewodnikowego Nb₃Sn [15]



Rys. 2. Przekrój taśmy warstwowej I generacji BSCCO [10]



Rys. 3. Taśma warstwowa II generacji YBCO [10]

1.2. Porównanie przewodów nadprzewodnikowych i miedzianych

Z porównania parametrów przewodu nadprzewodnikowego (tabela 1) i przewodu miedzianego (tabela 2) na prąd znamionowy 100 A oraz 300 A widać, że pole przekroju poprzecznego przewodu nadprzewodnikowego wysokotemperaturowego jest stukrotnie mniejsze od pola przekroju przewodu miedzianego. Dzięki temu rozmiary oraz masa transformatora

nadprzewodnikowego mogą być znacznie mniejsze, niż transformatora konwencjonalnego.

Tabela 1. Parametry przewodów nadprzewodnikowych firmy Super Power [6]

Typ przewodu	SCS4050	SCS12050
Prąd krytyczny	100 A	300 A
Szerokość taśmy	4 mm	12 mm
Grubość taśmy	0,1 mm	0,1 mm
Przekrój poprzeczny	0,4 mm ²	1,2 mm ²

Tabela 2. Parametry przewodu miedzianego wykorzystywanego w transformatorze konwencjonalnym [6]

Typ przewodu	Cu	Cu
Prąd znamionowy	100 A	300 A
Przekrój poprzeczny	40 mm ² ($J=2,5 \text{ A/mm}^2$)	120 mm ² ($J=2,5 \text{ A/mm}^2$)

2. Transformatory nadprzewodnikowe

Transformatory nadprzewodnikowe mają uzwojenia nawinięte przewodami nadprzewodnikowymi. Zastosowanie tych przewodów pozwala na ograniczenie strat mocy w uzwojeniu transformatora oraz na zwiększenie jego sprawności i gęstości mocy. We współczesnych transformatorach nadprzewodnikowych stosuje się uzwojenia z nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS), których temperatura krytyczna jest w zakresie 90 K – 110 K. Temperatura ta przekracza temperaturę wrzenia ciekłego azotu (77 K). Dlatego też do chłodzenia transformatorów nadprzewodnikowych HTS stosowany jest ciekły azot. Ciekły azot jest znacznie tańszy od ciekłego helu stosowanego przy chłodzeniu nadprzewodników niskotemperaturowych (LTS). Ponadto ciekły azot jest niepalny i bardziej przyjazny dla środowiska [5].

Transformatory nadprzewodnikowe, ze względu na większe gęstości prądu (około dziesięciokrotnie), mają mniejsze objętości i mniejszą masę niż transformatory konwencjonalne. Mniejsze straty w uzwojeniu oznaczają również większą sprawność. Z analiz wynika, że możliwa jest redukcja wymiarów transformatora o 30 - 40%. Główną zaletą transformatorów nadprzewodnikowych jest jednak możliwość znacznego zwiększenia obciążenia znamionowego. Takie warunki pracy wymagają zwiększenia mocy chłodzenia, a nie zwiększenia wymiarów, jak w transformatorze konwencjonalnym, w którym przeciążenie prowadzi do uszkodzenia izolacji. Powoduje to również większą odporność na zwarcia transformatora nadprzewodnikowego. Ponieważ napięcie zwarcia transformatora z uzwojeniami HTS jest mniejsze, mniejsza jest zmienność napięcia i wobec tego łatwiejsza regulacja napięcia. Pod względem ryzyka zapalenia i ochrony środowiska, ciekły azot LN₂ jest bardziej przyjaznym medium chłodzącym niż olej [9].

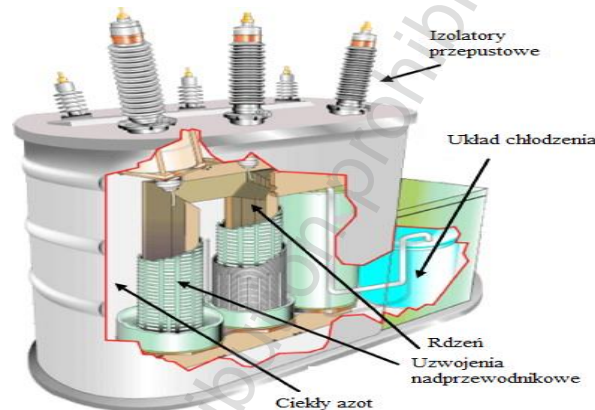
2.1. Konstrukcje transformatorów nadprzewodnikowych

Wyróżnia się trzy podstawowe konstrukcje transformatorów nadprzewodnikowych:

- transformatory bezrdzeniowe - transformatory powietrzne, w których nie występuje rdzeń magnetyczny [4, 8, 14],
- transformatory z rdzeniem ciepłym - transformatory, w których uzwojenia nadprzewodnikowe utrzymywane są w temperaturze kriogenicznej, a rdzeń magnetyczny odizolowany jest cieplnie od uzwojeń transformatora i utrzymywany jest w temperaturze ośrodka zewnętrznego (np. powietrza) [2, 7],
- transformatory z rdzeniem zimnym - transformatory, w których uzwojenia nadprzewodnikowe i rdzeń magnetyczny utrzymywane są w temperaturze kriogenicznej, będąc jednocześnie odizolowane cieplnie od otoczenia zewnętrznego [3, 13].

Ze względów energetycznych (duża moc, gęstość mocy i sprawność transformatora) w warunkach przemysłowych najczęściej wykorzystywane są transformatory z rdzeniem ciepłym oraz transformatory z rdzeniem zimnym [8].

Transformator składa się z uzwojeń wykonanych z przewodów nadprzewodnikowych, rdzenia, izolatorów przepustowych oraz kriostatu (rys. 4). Pozostałe elementy budowy są identyczne jak w transformatorze konwencjonalnym.



Rys. 4. Konstrukcja transformatora nadprzewodnikowego (HTS) [16]

2.2. Rozwój konstrukcji transformatorów HTS

W tabeli 3 przedstawiono rozwój konstrukcji transformatorów nadprzewodnikowych na przestrzeni 17 lat. Jedną z pierwszych konstrukcji transformatorów nadprzewodnikowych o mocy 500 kVA i napięciu 6,6 kV/3,3 kV opracowano w Japonii w 1996 r. W roku 2013 w Japonii skonstruowano transformator HTS o mocy 10 MVA. Największe nadprzewodnikowe transformatory wysokotemperaturowe o mocy 60 MVA wyprodukowano w Korei w 2010 roku oraz w USA w 2013 roku. Na przestrzeni 3 lat w Stanach Zjednoczonych zwiększono moc transformatora nadprzewodnikowego sześciokrotnie.

Tabela 3. Rozwój konstrukcji transformatorów HTS na przestrzeni 17 lat [11]

ROK	KRAJ	MOC	NAPIĘCIE
1996	Japonia	500 kVA	6,6 kV / 3,3 kV
1997	Szwajcaria	630 kVA	13,7 kV / 0,4 kV
1998	USA	1 MVA	13,8 kV / 6,9 kV
2010	USA	10 MVA	24,9 kV / 4,2 kV
2010	Japonia	2 MVA	66 kV / 6,9 kV
2010	Korea	60 MVA	154 kV / 23 kV
2010	Francja	41 kVA	2,05 kV / 0,41 kV
2013	USA	60 MVA	138 kV / 13,8 kV
2013	Japonia	10 MVA	66 kV / 6,9 kV

2.3. Porównanie parametrów transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego

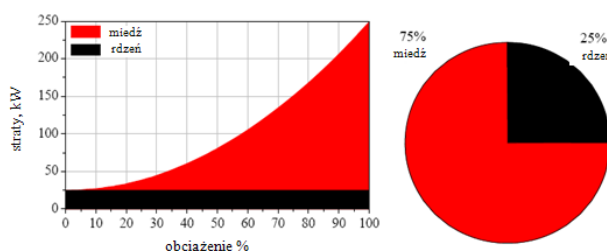
W tabeli 3 porównano transformator konwencjonalny o mocy 60 MVA oraz transformator nadprzewodnikowy o mocy 60 MVA. Obydwa transformatory mają identyczną moc, napięcie górnego i dolnego uzwojenia oraz prądy górnego i dolnego uzwojenia. Różnica w ich budowie polega na zastosowaniu innego typu przewodu na uzwojenia. W transformatorze konwencjonalnym zastosowano przewody miedziane, natomiast w transformatorze nadprzewodnikowym HTS wykorzystano przewody II generacji YBCO. Różnica jest również w sposobie chłodzenia uzwojeń oraz rdzenia. Można również zauważyć, że rozmiary oraz masa transformatora nadprzewodnikowego jest dużo mniejsza. Jedną z istotniejszych zalet tego transformatora są trzykrotnie mniejsze straty całkowite. W przypadku analizowanego transformatora konwencjonalnego straty całkowite wynoszą 133 kW, natomiast w transformatorze nadprzewodnikowym 40,7 kW.

Tabela 4. Porównanie parametrów transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o jednakowych mocach 60 MVA [1, 4]

Parametry	Transformator konwencjonalny	Transformator nadprzewodnikowy
Moc	60 MVA	60 MVA
Napięcie górne / dolne	15 kV / 23 kV	15 kV / 23 kV
Prąd górny / dolny	225 A / 1506 A	225 A / 1506 A
Materiał uzwojenia	miedź	YBCO
Chłodzenie uzwojeń	olej izolacyjny	ciekły azot
Chłodzenie rdzenia	olej izolacyjny	-
Wymiary rdzenia (H x W)	2590 mm x 3150 mm	2429 mm x 2674 mm
Waga transformatora	27,2 t (bez oleju)	16,6 t (bez ciekłego azotu)
Straty całkowite	133 kW	40,7 kW

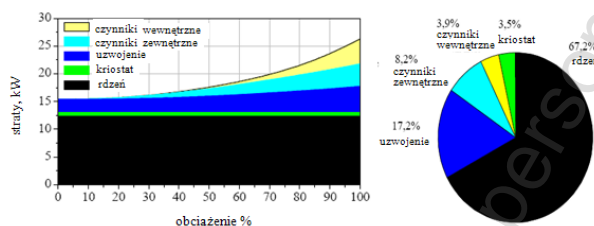
2.4. Porównanie strat w transformatorze konwencjonalnym i nadprzewodnikowym

Na rys. 5 zestawiono straty jakie występują w transformatorze konwencjonalnym. Straty występują głównie w miedzianych uzwojeniach (75% ogólnych strat) oraz w rdzeniu (25% ogólnych strat). W transformatorze konwencjonalnym, zwiększenie obciążenia transformatora powoduje szybki, prawie dziesięciokrotny wzrost strat w uzwojeniach miedzianych. Natomiast w rdzeniu straty pozostają na tym samym poziomie bez względu na obciążenie.



Rys. 5. Zależność strat w uzwojeniu i rdzeniu transformatora konwencjonalnego od obciążenia [1]

Na rys. 6 zestawiono straty w transformatorze nadprzewodnikowym. Straty występują głównie w rdzeniu (67,2% ogólnych strat), w uzwojeniach nadprzewodnikowych (17,2% ogólnych strat) oraz spowodowane są czynnikami zewnętrznymi i wewnętrznymi (12,1% ogólnych strat), a także chłodzeniem (3,5% ogólnych strat).



Rys. 6. Zależność strat w transformatorze nadprzewodnikowym od obciążenia [1]

2.5. Podsumowanie

W przypadku transformatorów konwencjonalnych nawet przy sprawności 99,4% całkowite straty energii w systemie energetycznym mogą dochodzić do 40% energii wyprodukowanej (ze względu na dużą liczbę transformatorów). Straty całkowite w transformatorach konwencjonalnych są kilkukrotnie wyższe, niż straty w transformatorach nadprzewodnikowych.

Transformatory nadprzewodnikowe mają mniejsze rozmiary oraz mniejszy ciężar, niż ich konwencjonalne odpowiedniki, co ma znaczenie podczas ich transportu.

Transformatory nadprzewodnikowe mogą pracować przy obciążeniu wyższym od znamionowego bez wpływu na żywotność transformatora. W transformatorze konwencjonalnym obciążenie większe od znamionowego pociąga za sobą ryzyko przyspieszonego starzenia się izolacji.

W transformatorach nadprzewodnikowych brak jest oleju chłodzącego, co eliminuje ryzyko pożarów i zagrożeń dla środowiska. Nie trzeba budować i następnie eksploatować

przeciwpożarowej instalacji zraszaczowej, jak jest to w przypadku transformatorów konwencjonalnych.

Przeszkodą w przemysłowej produkcji transformatorów nadprzewodnikowych są duże koszty, jednak ceny taśm nadprzewodnikowych, które wykorzystuje się na uzwojenia maleją, co stwarza nadzieję, że produkcja transformatorów nadprzewodnikowych w przyszłości będzie mniej kosztowna.

Literatura

- [1] Berger A., Cherevatskiy S., Noe M., Leibfried T.: Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers, Journal of Physics, Conference Series, volume 234, part 3, 032004, 2010.
- [2] Bohno T., Tomioka A., Imaizumi M., Sanuki Y., Yamamoto T., Yasukawa Y., Ono H., Yagi Y., Iwadate K.: Development of 66 kV/6.9 kV 2 MV A prototype HTS power transformer, Physica C 426-431 (2005) 1402-1407.
- [3] Chen M., Xiao Q. L., Wang W., Chung K., Kim S.: The magnetic properties of the ferromagnetic materials used for HTS transformers at 77 K; IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, June 2003, 87-91.
- [4] Fontana G.: Coreless transformers with high coupling factor, Rev. Sci. Instrum., vol. 66, no. 3, pp. 2641-2643, 1995, 2641-2643.
- [5] Janowski T., Wojtasiewicz G.: Nadprzewodnikowe maszyny elektryczne. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6/2008, ss. 157-160.
- [6] Janowski T. and Wojtasiewicz G.: Possibility of using the 2G HTS superconducting transformer to limit short-circuit currents in power network, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, June 2012, 1051-1055.
- [7] Jelinek Z., Timoransky Z., Zizek F., Piel H., Chovanec F., Mozola P., Jansak L., Kvitkovic J., Usak P., Polak M.: Test results of 14 kVA superconducting transformer with Bi-2223/Ag windings, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, no. 2, June 2003, 512-513.
- [8] Jeż R.: Analiza właściwości transformatora nadprzewodnikowego ze względu na maksymalne wykorzystanie nadprzewodnika HTS, Rozprawa doktorska, Gliwice 2011.
- [9] Kalsi S.S., Application of high temperature superconductors to electrical power equipment, John Wiley & Sons Inc.
- [10] Larbalestier D., Gurerich A., Feldmann D.M., Polyanski A.: High - Tc superconducting materials for electric power applications, Nature, 414 (2001), 368-377.
- [11] Morandi A., Trevisani L., Ribani P., Fabbri M., Martini L., Bocchi M.: Superconducting transformers: key design aspects for power applications, 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007), 1890-1899.
- [12] Pérez B., Álvarez A., Suárez P., Cáceres D., Ceballos M., Obradors J., Granados and Bosch R.: AC losses in a toroidal superconducting transformer, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, No. 2, June 2003, 2341- 2344.
- [13] Schlosser R., Schmidt H., Leghissa M., Meinert M.: Development of high-temperature superconducting transformers for railway applications, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, June 2003, 391-395.
- [14] Suárez P., Álvarez A., Pérez B., Cáceres D., Cordero E., Ceballos M.: Influence of the shape in the losses of solenoidal air-core transformers, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005, 1855-1858.
- [15] Weeren H.: Magnesium diboride superconductor for magnet applications, PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands, Enschede 2007.
- [16] Yamaguchi H., Kataoka T.: Stability analysis of air-core superconducting power transformer, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997, 1013-1016.

Mgr inż. Łukasz Woźniak

e-mail: woźniak.lukasz1988@gmail.com

Doktorant w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Specjalista ds. transformatorów i rozdzielni w Elektrowni Kozienice, ENEA Wytwarzanie S.A.



Dr hab. inż., Paweł Surdacki, prof. PL

e-mail: p.surdacki@pollub.pl

Profesor nadzwyczajny w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Zajmuje się silnoprądowymi urządzeniami nadprzewodnikowymi.

