

Modelowanie prądu włączania transformatora nadprzewodnikowego w środowisku PSpice

Streszczenie. W pracy opisano model numeryczny jednofazowego transformatora nadprzewodnikowego. Wprowadzone dodatkowo zależności matematyczne umożliwiły wyznaczenie wartości średniej i skutecznej prądu w kolejnych okresach, a także obliczenie ilości ciepła, które wydziela się w uzwojeniach podczas włączania nieobciążonego transformatora na pełne napięcie sieci zasilającej. Wyznaczono obliczeniowo i porównano przebiegi oraz parametry impulsów prądu włączania transformatora o mocy 21 MVA z uzwojeniami nadprzewodnikowymi.

Abstract. The paper discusses numerical models of single-phase superconducting transformers. The addition of mathematical relationships made it possible to determine the average and effective current in subsequent periods, and to calculate the amount of heat that is released in the windings when switching the unloaded transformer to the full voltage of the supply network. The waveforms and impulses of the inrush current of 21 MVA transformers with superconducting windings were calculated and compared. (**Numerical models of single-phase superconducting transformers**)

Słowa kluczowe: transformator nadprzewodnikowy, uzwojenia HTS, prąd włączania, model PSpice.

Keywords: superconducting transformer, HTS Winding, inrush current, PSpice model.

Wstęp

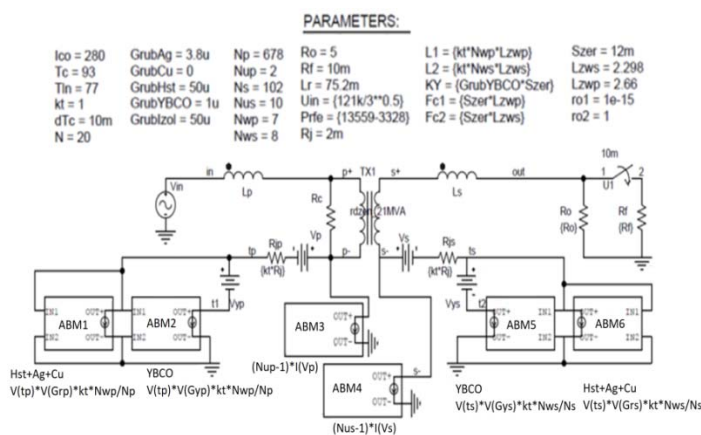
Podczas włączania transformatora do sieci zasilającej występuje stan nieustalony, który powoduje wielokrotne przekroczenie prądu znamionowego zasilanego uzwojenia. Duże amplitudy impulsów oraz długi czas zaniku tego stanu prowadzi do pogorszenia jakości energii elektrycznej. Prąd włączania nieobciążonego transformatora do sieci stanowi także zagrożenie dla izolacji uzwojeń, której degradacja może powodować zwarcia i uszkodzenie transformatora [1-8].

Prąd włączania jest szczególnie niebezpieczny w przypadku transformatora nadprzewodnikowego, powodując nagle przejście uzwojeń do stanu rezystywnego, co może prowadzić do ich uszkodzenia. Uzwojenia transformatorów nadprzewodnikowych są najczęściej wykonywane z bardzo drogiego warstwowego przewodu drugiej generacji wykorzystującego nadprzewodnik wysokotemperaturowy (HTS) na bazie itru (YBCO) lub innego pierwiastka ziem rzadkich [4-15]. Ponieważ badanie modelu fizycznego transformatora nadprzewodnikowego podczas jego włączania do sieci, podobnie jak podczas zwarcia ruchowych, mogłoby prowadzić do jego zniszczenia, konieczne staje się modelowanie tego procesu. Symulacja komputerowa umożliwia wszechstronne badania numeryczne pozwalające na optymalny dobór rozwiązań i parametrów konstrukcyjnych transformatora nadprzewodnikowego [2, 8, 13-17].

Model komputerowy transformatora nadprzewodnikowego w środowisku PSpice

Opracowany model komputerowy jednofazowego transformatora nadprzewodnikowego (rys. 1) składa się z dwóch podukładów. Pierwszy podukład to transformator semi-idealny z rdzeniem ferromagnetycznym opisanym równaniami Jilesa–Athertona [4], [5]. Transformator ten posiada pełne sprzężenie magnetyczne uzwojeń bezstratnych, a model rdzenia uwzględnia zjawiska histerezy. Współczynniki modelu rdzenia przedstawiono w tabeli 1. Drugi podukład składa się z elementów podłużnych schematu zastępczego transformatora: indukcyjności rozproszenia po stronie pierwotnej L_p i wtórej L_s oraz rezystancji uzwojenia pierwotnego R_p i wtórnego R_s . Elementem poprzecznym jest rezystancja R_c reprezentująca straty wiroprądowe. Do wykonania uzwojeń zaproponowano dwa rodzaje warstwowych taśm nadprzewodnikowych SCS12050 oraz SF12050 firmy Superpower Inc. (Furukawa Electric Group). Model

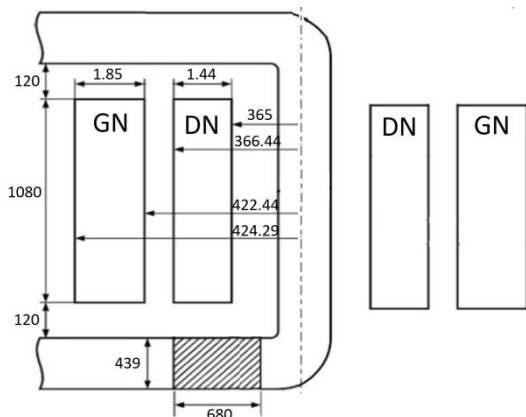
matematyczny taśm uwzględnia płynne przechodzenie warstwy nadprzewodnika YBCO do stanu rezystywnego, w którym zależność pomiędzy natężeniem pola elektrycznego i gęstością prądu opisana jest potęgowym prawem Rhynera [9], [10]. Warstwy podłoża taśmy (Hastelloy) i laminacji (srebro i miedź) modelowane są blokami ABM 1 i 6, warstwy nadprzewodnikowe YBCO – blokami 2 i 5. Bloki ABM 3 i 4 modelują parametry elektryczne pełnych uzwojeń. Wymiary i budowę jednofazowego transformatora nadprzewodnikowego (HTS) ilustruje rysunek 2. W tabeli 2 zestawiono dane znamionowe modelowanego transformatora.



Rys. 1. Schemat modelu transformatora HTS w środowisku PSpice

Tabela 1. Parametry modelu rdzenia transformatora

Parametr	Opis	Wartość
AREA	Pole przekroju rdzenia	3160 cm ²
PACK	Współczynnik upakowania rdzenia	0,90
PATH	Średnia długość drogi strumienia w rdzeniu	463 cm
GAP	Szczelina powietrzna rdzenia	0,11 mm
MS	Magnetyzacja nasycenia	1,50 MA/m
A	Parametr kształtu krzywej magnesowania	7,23 A/m
C	Stała odkształceń elastycznych ścian domen	0,3
K	Stała odkształceń nieelastycznych ścian domen	10 A/m



Rys.2. Podstawowe wymiary transformatora HTS (bez zachowania proporcji)

Tabela 2. Dane znamionowe transformatora HTS o mocy 21 MVA

Parametr	Transformator HTS
Materiał rdzenia (blacha elektrotechniczna)	ET 114-27
Szerokość / grubość taśmy HTS, mm	SF12050 12 / 0,055 SCS12050 12 / 0,1
Prąd krytyczny taśmy HTS, A	280
Napięcie po stronie pierwotnej, kV	69,86
Napięcie po stronie wtórnej, kV	10,5
Prąd po stronie pierwotnej, A	301
Prąd po stronie wtórnej, A	2000
Liczba taśm równoległych w uzwojeniach GN/DN	2/10
Indukcja robocza, T	1,63
Całkowita liczba zwojów uzwojeń GN/DN	712/102
Długość przewodu GN/DN, m	3791 / 2360

Badanie prądu włączania transformatorów nadprzewodnikowych

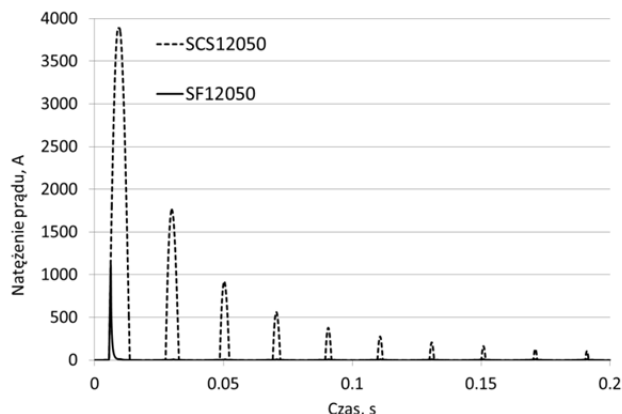
Model komputerowy przygotowany w środowisku PSpice umożliwił uzyskanie przebiegów prądu włączania transformatorów nadprzewodnikowych. Analizie komputerowej poddano pierwszych dziesięć impulsów prądu jednokierunkowego (rys. 3). Pierwszy impuls prądu włączania (rys. 4a) transformatora HTS z taśmą SCS12050 osiąga 3888 A, zaś kolejne impulsy w tym przypadku szybko maleją. W przypadku transformatora z taśmą SF12050 amplituda pierwszego impulsu wynosi 1114 A. Dla dziesiątego impulsu prądu włączania (rys. 4b) transformatora HTS z taśmą SCS12050 uzyskano amplitudę 106,3 A. W przypadku taśmy SF12050 wynosi ona 11,9 A. Zbiorcze porównanie wyników przebiegu prądu włączania przedstawiono w tabeli 3.

Podczas analizy wyników zaznaczono przedziały, gdzie impulsy prądu włączania przekraczają wartość prądu krytycznego I_c uzwojenia pierwotnego transformatora. Uzwojenie pierwotne transformatora wykonano z dwóch równolegle połączonych ze sobą taśm. Przebiegi prądu włączania z zaznaczonymi poziomem I_c przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Przebiegi pozwalają zauważyć pojedyncze przekroczenie prądu krytycznego dla taśmy SF12050 i cztery malejące dla taśmy SCS12050. Czas w którym prąd krytyczny przekraczany jest przez impulsy prądu włączania dla transformatora SF12050, wynosi $t_{SF}=4,51$ ms, natomiast dla SCS12050, wynosi $t_{SCS}=74$ ms.

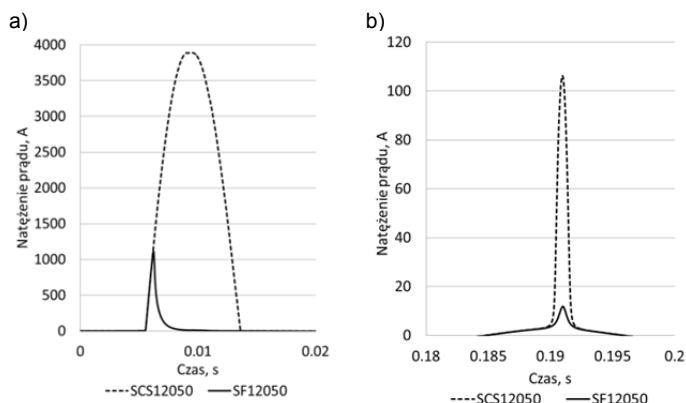
Podczas symulacji obliczono kąt γ , który jest kątem odpowiadającym czasowi trwania prądu jednokierunkowego. Uzyskane wyniki wartości kąta γ dla pierwszych dziesięciu impulsów prądu włączania przedstawiono na rys. 7.

Tabela 3. Wyniki symulacji impulsu prądu jednokierunkowego

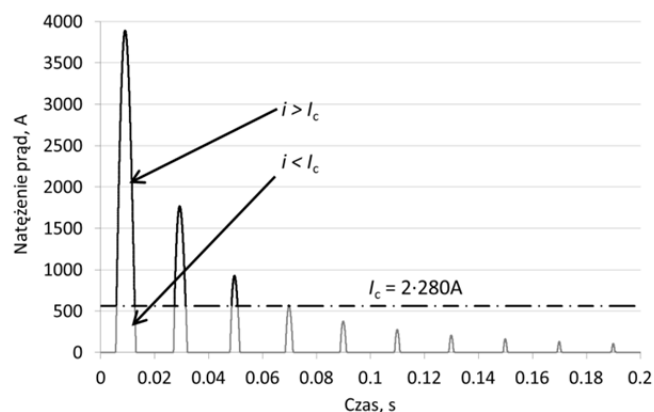
Parametr	SCS 12050	SF 12050
Maksymalny impuls prądu jednokierunkowego (pierwsza amplituda), A	3888	1114
Wartość impulsu prądu jednokierunkowego po czasie 0,2 s (10 amplituda)	106,3	11,9
Stosunek amplitudy dziesiątej do pierwszej i_{10}/i_1	2,73%	1,07%



Rys.3. Przebieg prądu włączania transformatorów HTS



Rys.4. a) Pierwszy impuls prądu włączania, b) dziesiąty impuls prądu włączania



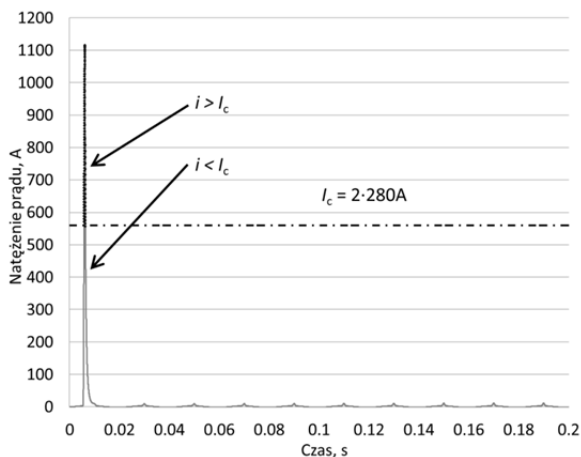
Rys.5. Przebieg prądu włączania dla transformatora z uzwojeniami SCS12050 z zaznaczonym poziomem I_c

Obliczone wartości średnie I_{sr} i skuteczne I_{sk} pierwszych dziesięciu impulsów prądu włączania transformatorów HTS zostały przedstawione na rysunkach 8 i 9. Wartość średnia I_{sr} i skuteczna I_{sk} została obliczona na podstawie wzorów odpowiednio (1) i (2):

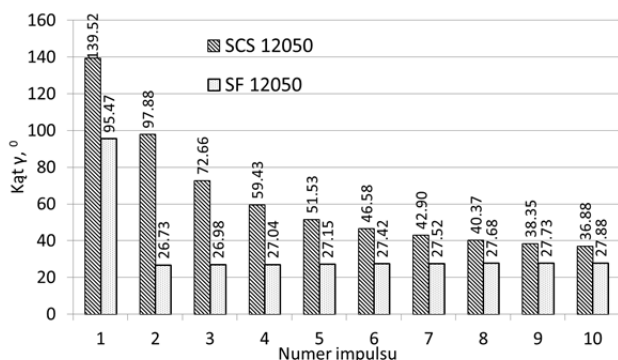
$$I_{sr} = \frac{1}{T} \sum_{j=n}^{n+k} \frac{i_j + i_{j+1}}{2} \Delta t_j \quad (1)$$

$$I_{sk} = \frac{1}{T} \sum_{j=n}^{n+k} \frac{i_j^2 + i_{j+1}^2}{2} \Delta t_j \quad (2)$$

gdzie: i_j oraz i_{j+1} – to j -ta i następną po niej wartość prądu włączania w czasie pojedynczego okresu, Δt_j – przyrost czasu między kolejnymi próbkami prądu.



Rys.6. Przebieg prądu włączania dla transformatora z uzwojeniami SF12050 z zaznaczonym poziomem I_c



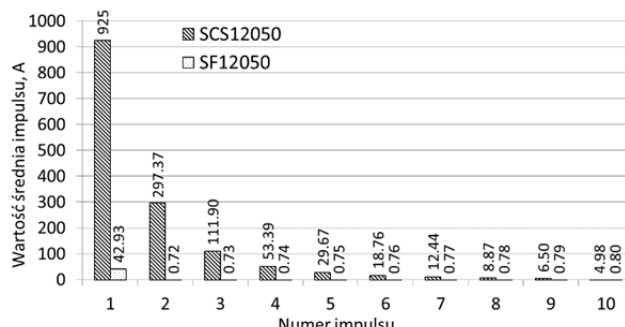
Rys.7. Wartość kąta γ dla transformatorów HTS

Pierwszy impuls prądu dla transformatora z uzwojeniami HTS wykonanymi z taśmy SCS12050 charakteryzuje się wartością średnią 925,6 A, podczas gdy wartość średnia drugiego impulsu jest ponad trzy razy mniejsza, tj. 297,3 A. Wartość skuteczna pierwszego i drugiego impulsu prądu włączania dla uzwojenia SCS12050 wynosi odpowiednio 1677 A oraz 645,1 A. Natomiast dla transformatora z uzwojeniami HTS wykonanymi z taśmy SF12050 pierwszy impuls prądu ma wartość średnią 42,93 A, drugi impuls osiąga 0,72 A. Wartość skuteczna pierwszego impulsu prądu jednokierunkowego transformatora z uzwojeniami SF12050 wynosi 162,9 A, a drugiego 2,48 A.

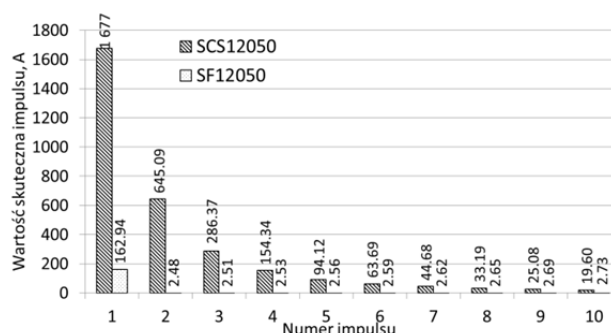
Przyrosty temperatury uzwojeń pierwotnych transformatorów nadprzewodnikowych SCS12050 i SF12050 przedstawiono na rysunku 10. Największy przyrost temperatury osiąga transformator nadprzewodnikowy, którego uzwojenia wykonano z taśmy SCS12050.

Podczas trwania pierwszego impulsu prądu jednokierunkowego temperatura HTS SCS12050 wzrosła o 46,63 K. Dla transformatora nadprzewodnikowego SF12050 przyrost temperatury w tym samym czasie wzrósł o 15,66 K. Uzwojenia nadprzewodnikowe najczęściej

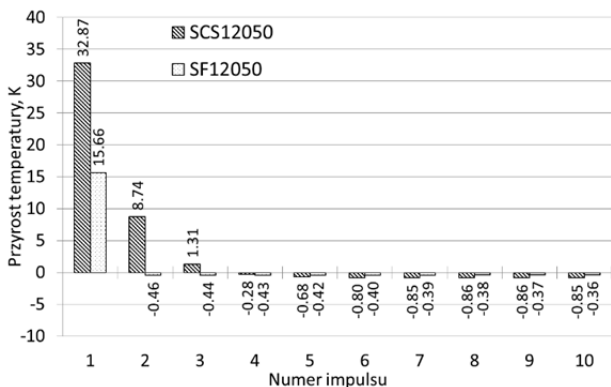
chłodzone są ciekłym azotem i w normalnych warunkach pracy mają temperaturę około 77 K. Temperatura krytyczna przewodów SCS12050 i SF12050, wynosi 93 K. W stanie nieustalonym w przypadku uzwojeń pierwotnych transformatora HTS wykonanego z taśmy SF12050 w czasie pierwszego impulsu nie przekroczona jest temperatura krytyczna.



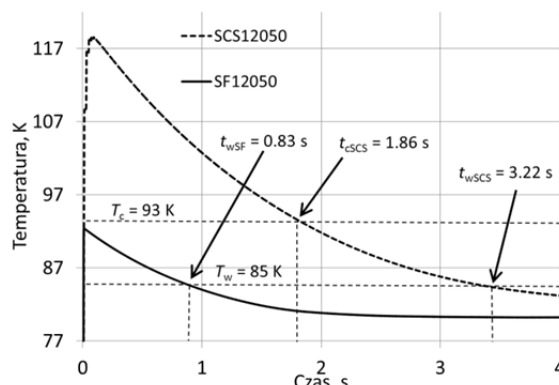
Rys.8. Wartości średnie impulsów prądu włączania transformatorów HTS



Rys.9. Wartości skuteczne impulsów prądu włączania transformatorów HTS



Rys.10. Przyrost temperatury uzwojenia pierwotnego transformatorów HTS



Rys.11. Czas chłodzenia uzwojenia pierwotnego do temperatury $T_c=93$ K oraz $T_w=85$ K.

Uzwojenie transformatora wykonane z taśmy SCS12050 w czasie pierwszych dwóch impulsów osiąga temperaturę 118,61 K. Czas potrzebny do schłodzenia uzwojenia pierwotnego przedstawiono na rysunku 11. Uzwojenie pierwotne wykonane z taśmy SF12050 zostanie schłodzone do temperatury 85 K po 0,83 s. W przypadku uzwojeń wykonanych z taśmy SCS12050 czas schłodzenia do temperatury krytycznej wynosi 1,86 s, a do temperatury 85 K 3,22 s.

Wnioski

W pracy przedstawiono analizę prądu włączania za pomocą modeli komputerowych transformatorów nadprzewodnikowych.

Przekroczenie wartości prądu krytycznego podczas włączania transformatora HTS do sieci, może spowodować że transformator wyjdzie ze stanu nadprzewodzenia. Powrót do stanu nadprzewodnictwa zależy od warunków chłodzenia. Opracowane zależności matematyczne uwzględniają charakterystykę przejścia przewodu nawojowego HTS oraz wyznaczenie przebiegów impulsów prądu włączania we wszystkich stanach pracy transformatora.

Przedstawiony w pracy model komputerowy umożliwia na etapie projektowania transformatorów, obliczenie wartości maksymalnej impulsów prądu włączania oraz czas jego zaniku. Przy użyciu opracowanego modelu można przewidzieć czy uzwojenia transformatora HTS przejdą do stanu rezystywnego. Umożliwia on również obliczenie temperatury uzwojeń, dzięki temu można ograniczyć ryzyko termicznego uszkodzenia.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Surdacki, prof. PL, Politechnika Lubelska, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: p.surdacki@pollub.pl; dr inż. Leszek Jaroszyński, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: l.jaroszynsl.i@pollub.pl; mgr inż. Łukasz Woźniak, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: wozniak.lukasz1988@gmail.com;

LITERATURA

- [1] S. S. Kalsi, High temperature superconductors to electric power equipment, IEEE Press, Wiley, 2011.
- [2] T. Janowski, G. Wojtasiewicz, L. Jaroszyński, „Transformatory nadprzewodnikowe”, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ISBN 978-83-61956-54-9, 2016.
- [3] A. Berger, S. Chevatskiy, M. Noe, T. Leibfried, „Comparison of the efficiency of superconducting and conventional

- transformers”, Journal of Physics, Conference Series, vol. 234, 032004, doi:10.1088/1742-6596/234/3/032004, 2010.
- [4] P. R. Wilson, J. N. Ross, A. D. Brown, „Optimizing the Jiles-Atherton model of hysteresis by a genetic algorithm”, IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 2, pp. 989-993, Mar. 2001.
- [5] R. Du, P. Robertson, „Dynamic Jiles-Atherton model for determining the magnetic power loss at high frequency in permanent magnet machines”, IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 6, pp. 7301210, June 2015.
- [6] G. Komarzyniec, „Prąd włączania transformatorów nadprzewodnikowych”, Monografia, Polit. Lubelska, 2017.
- [7] P. Surdacki, L. Jaroszyński, Ł. Woźniak, “PSPICE Modeling of the Inrush Current in a 10 kVA Superconducting Transformer”, 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE) - Conference
- [8] D. Hu, Z. Li, Z. Hong, and Z. Jin, “Development of a single-phase 330kVA HTS transformer using GdBCO tapes”, Physica C: Superconductivity and its applications, vol. 539, pp. 8–12, 2017.
- [9] V. S. Vysotsky et al., “Development and test results of HTS windings for superconducting transformer with 1 MVA rated power”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, Jun. 2017.
- [10] S. Hellmann, M. Abplanalp, L. Hofstetter, M. Noe, “Manufacturing of a 1-MVA-class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, Jun. 2017.
- [11] I. Masataka et al., “Development of a 3 φ-66/6.9 kV-2 MVA REBCO superconducting transformer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, Jun. 2015.
- [12] A. Laphorn, P. Bodger, W. Enright, “A 15-kVA high-temperature superconducting partial-core transformer-Part 1: Transformer modeling”, IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, pp. 245-252, Jan. 2013.
- [13] K. Funaki et al., “Development of a 22kV/6.9kV single-phase model for a 3MVA HTS power transformer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no. 1, pp. 1578-1581, Mar. 2001.
- [14] P. Tixador, G. Donnier-Valentin, E. Maher, “Design and construction of a 41 kVA Bi/Y transformer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 2331-2336, Jun. 2003.
- [15] A. Berger, M. Noe, A. Kudymow, “Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 1384-1387, Jun. 2011
- [16] K. Funaki et al., “Preliminary tests of A 500 kVA-class oxide superconducting transformer cooled by subcooled nitrogen”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 824-827, Jun. 1997.
- [17] E. P. Volkov et al., “The first in Russia HTSC transformer 1 MVA 10/0 4 kV”, Proc. Russian Acad. Sci. Power Eng., no. 5, 2016.