

초전도 선재 조합에 따른 비대칭 무유도성 코일의 교류 손실 특성 연구

A Study on AC loss Characteristics of Asymmetric non-inductive coils with Combination of Superconducting wires

김진섭¹, 황영진², 나진배², 최석진², 김영재², 이지호¹, 이우승¹, 장기성², 고태국^{3,*}

J. S. Kim¹, Y. J. Hwang², J. B. Na², S. J. Choi², Y. J. Kim², J. H. Lee¹, W. S. Lee¹,
K. S. Chang², and T. K. Ko^{3,*}

Abstract: A hybrid superconducting fault current limiter (SFCL) with fast switch had been previously suggested by our research group. To make a hybrid SFCL, different superconducting wires were wound two pancake coils so that two pancake coils had asymmetric configuration. The impedance of the asymmetric non-inductive coils are zero with applied normal current. However during the fault, currents were distributed unequally into the two pancake coils because each superconducting wires have different electrical characteristics. This unequal distribution of current causes effective magnetic flux which generate repulsive force. Fast switch was thus opened by the repulsive force applied to the aluminum plate which consists of SFCL. In this paper, the AC loss characteristics of the asymmetric non-inductive coils with combinations of superconducting wires were studied and calculated by related experiments and finite element method (FEM) simulation. From these results, we suggested the appropriate combination of two superconducting wires to be used for the asymmetric non-inductive coils.

Key Words: AC loss, asymmetric non-inductive coil, hybrid SFCL, superconducting wire.

현재 연세대학교에서는 비대칭 무유도성 코일을 이용한 하이브리드 형태의 한류기가 연구되고 있다[1]. 연세대학교에서 제시하는 하이브리드형 한류기는 서로 다른 두 초전도 선재로 권선된 비대칭 무유도성 코일과 저항형 초전도 한류기가 직렬로 연결되어 있고, 상온도체로 권선된 리액터가 병렬로 연결된 구조를 가진다.

사고 전류 발생 시에는 비대칭 무유도성 코일을 구성하는 선재들 간의 전기적 특성 차이에 의해 스위치가 동작하여 1주기 이내에 회로를 차단하게 된다. 이에 따라, 비대칭 무유도성 코일 부분에 인가되는 사고 전류는 1주기 이내로 제한되고, 1주기 이후의 사고전류는 리액터에서 제한하게 함으로써 초전도 선재의 양을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 순수 저항형 한류기에서와 마찬가지로 정상 운전 시에는 상용 주파수의 교류 전류가 비대칭 무유도성 코일에 그대로 인가되므로 교류 손실이 발생하게 되며 이는 시스템의 안정적인 운용과 냉각 부하에 영향을 미치기 때문에 교류 손실량의 평가와 손실 저감에 대한 연구가 반드시 필요하다[2]. 그럼에도 불구하고 비대칭 무유도성 코일의 경우 사고 시 켄치 특성에 의한 전류 분배나 단락특성 및 자장 특성 등에 대한 연구들은 진행되어 왔으나 교류 손실 연구는 이루어지지 않았다[1].

따라서 본 연구에서는 비대칭 무유도성 코일에 권선되는 초전도 선재의 조합별 교류 손실을 유한 요소법을 이용한 해석과 실험을 통하여 비교 분석하였다.

1. 서 론

전력 수요가 급증함에 따라 전력 계통은 그 규모가 커지고 있으며, 이에 따라 사고 전류에 의한 전력 계통의 불안정성 또한 증대되고 있다. 이에 따라, 안정적인 전력 계통의 운영을 위해서 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter)가 이에 대한 해결책으로써 국내·외 연구기관들에서 활발하게 연구되고 있다. 이러한 초전도 한류기는 유도형, 저항형, 하이브리드형 등 다양한 형태로 연구되고 있으며,

2. 본 론

2.1. 유한 요소법을 이용한 교류 손실 계산

초전도 선재의 경우, 통전 전류에 의해 발생하는 교류 손실은 초전도 벌크와 단일 샘플일 경우가 각기 다르다. 그 이유는 상용화된 초전도 선재의 경우 안정화(stabilizer)층과 기판(substrate)층에서의 추가적인 손실이 발생하기 때문이다. 이와 더불어 코일의 경우에는 선재에서 발생하는 자기장이 인접한 선재에서 발생하는 외부자기장의 영향을 받기 때문에 단일 선재에서의 교류손실과는 다른 특성을 나타내게 된다[3-5]. 본 연구에서는 교류 전류 통전 시 초전도 코일에서 발생하는 교류 손실을 예측하기 위해 상용 해석 프로그램인 Infolytica 社의 MagNet을 이용한 전자기장 해석을 수행하였다. 그림 1은 60 Hz 주파수를 갖는 교류 전류 통전 시 344S 선재와 SCS4050 선재 조합을 갖는 비대칭 무유도성 코일의 자장 분포에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

자장 분포 해석 결과를 이용하여 교류 손실량을 산

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 석사과정

²학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 박사과정

³정회원 : 연세대 공과대학 전기전자공학부 교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2010년 10월 08일

심사완료 : 2011년 03월 16일

게재확정 : 2011년 03월 16일

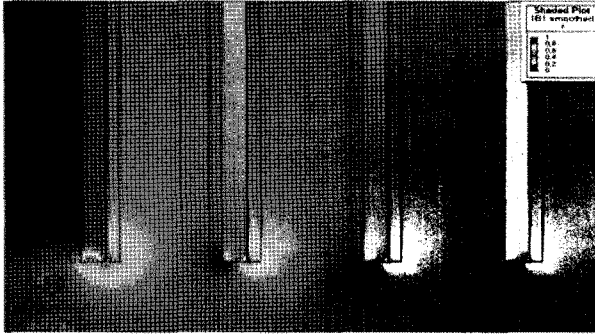


Fig. 1. Magnetic field distribution in a cross-section of the asymmetric non-inductive coil.

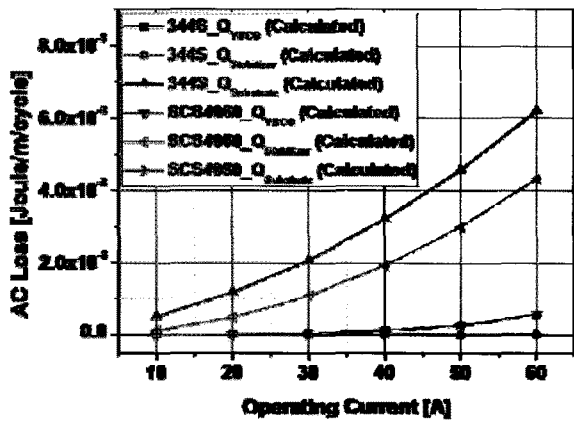


Fig. 2. AC loss of each layers of association 344S with SCS4050.

출하기 위해서는 각 초전도 선재 별 구조와 물성 값을 확인해야 한다. YBCO CC 선재는 YBCO 층(1 μm)과 안정화 층(20~25 μm), 기판 층(50~75 μm), 버퍼 층, 은 층 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 버퍼 층은 매우 얇은 산화 절연물이기 때문에 시변 자장에 의해 와전류가 거의 발생하지 않으며 은 층은 안정화 층이나 기판 층에 비해 매우 얇기 때문에 버퍼 층과 은 층에서 발생하는 손실량은 무시하였다[6]. 따라서 초전도 코일에서 발생하는 교류 손실(Q_{total})은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{total} = Q_{YBCO} + Q_{stabilizer} + Q_{substrate} \quad (1)$$

식 (1)에서 Q_{YBCO} 는 초전도 층에서 발생하는 통전 손실과 자화 손실의 합을 나타낸다. 이 중, 통전 손실 ($Q_{YBCO-transport}$)은 Norris strip model식인 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다[7].

식 (2)에서 I_C 는 선재의 임계 전류이며 I_M 은 통전 전류이다. i_m 은 정규화한 통전 전류(I_M/I_C)이며 J_C 는 YBCO 층의 임계 전류 밀도이다.

그리고 자화 손실($Q_{YBCO-magnetization}$)은 Brandt와 Indenbom식 (3)에 의해 계산할 수 있다[8].

$$Q_{YBCO-transport} = \frac{\mu_0 I_C J_C}{\pi} [(1-i_m)\ln(1-i_m) + (1+i_m)\ln(1+i_m) - i_m^2] \quad (2)$$

$$\cong \frac{\mu_0 I_C J_C}{\pi} \left(\frac{i_m^4}{6} + \frac{i_m^6}{24} \right) \cong \frac{\mu_0 J_C I_M^3}{6\pi I_C^2}$$

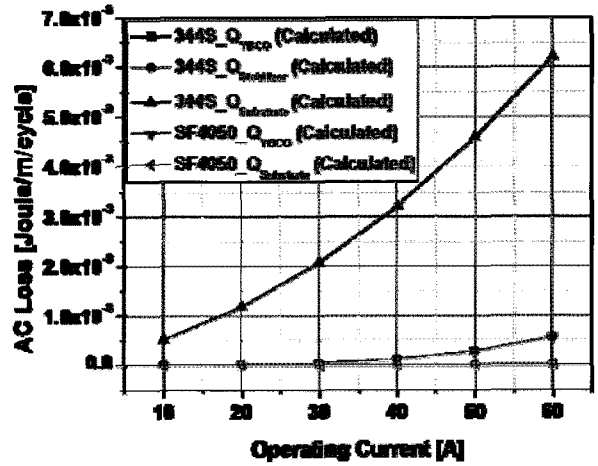


Fig. 3. AC loss of each layers of association 344S with SF4050.

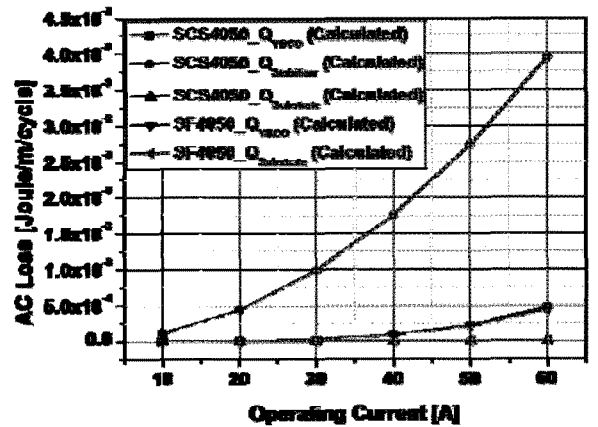


Fig. 4. AC loss of each layers of association SCS4050 with SF4050.

$$Q_{YBCO-magnetization} = I_C w B_m g \left(\frac{\pi w B_m}{\mu I_C} \right) \quad (3)$$

$$g(x) = \frac{2}{x} \ln \cosh x - \tanh x$$

식 (3)에서 w 는 선재의 너비를 말하며 B_m 은 YBCO 층의 너비 방향으로 인가되는 수직 자장을 의미하고, I_C 는 선재의 임계 전류를 의미한다.

기판 층에서의 교류 손실 ($Q_{substrate}$)은 기판 층에서 발생하는 자화 손실과 와전류 손실의 합을 나타내며, 344S 선재의 경우, 기판 층이 자성체인 Ni-5at%W으로 이루어져 있기 때문에 그 물성치를 고려한 식 (4)에 의해 자화 손실을 계산할 수 있으며 와전류 손실 역시 식 (5)에 의해 계산할 수 있다[6]. 따라서 기판 층에서의 교류 손실은 식 (4)와 (5)의 합으로 계산된다.

Table 1. Structure of AMSC 344S.

	두께	재질
안정화층	50 μm	Stainless steel 316L
섀트	1 μm	Silver
초전도체	1 μm	YBCO
기판층	75 μm	Ni-5%W

Table 2. Structure of Superpower SCS4050.

	두께	재질
안정화층	0.04 mm	Copper
선트	2 μm	Silver
초전도체	1 μm	(RE)BCO
기판층	50 μm	Hastelloy C-276

$$Q_{\text{substrate-hysteresis}} = \frac{8}{15} \left[\coth(0.28B_m)^{1.2} - \frac{1}{(0.28B_m)^{1.2}} \right] \quad (4)$$

$$Q_{\text{substrate-eddy}} = \frac{4\pi^2\beta^2}{24\rho_m\tau_m} [J/m^3] \quad (5)$$

여기서 $\beta^2 = [(aB_{m\perp a})^2 + (bB_{m\perp b})^2]$

식 (4), (5)에서 B_m 은 Ni-5at%W 재질의 기판 층에 수직 방향으로 인가되는 자장이다. 그리고 ρ_m 은 비저항 값이며 τ_m 은 시정수이다.

안정화 층에서의 교류 손실 ($Q_{\text{stabilizer}}$)은 안정화 층에서 발생하는 자화 손실과 와전류 손실의 합을 나타내는데 본 연구에서 사용된 선재들은 안정화 층이 모두 비자성체이기 때문에 자화 손실을 무시하고 와전류 손실만을 고려하였다[9].

이렇게 각 선재를 이루고 있는 층별 교류 손실을 합하면 각 선재에서 발생하는 전체 교류 손실을 계산할 수 있는데 먼저 344S 선재의 교류 손실을 층별 교류 손실의 합으로 나타내면 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 이 식 (6)을 통해 344S 선재에서 발생하는 전체 교류 손실을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} 344S_Q_{\text{total}} &= 344S_Q_{\text{YBCO}} + 344S_Q_{\text{substrate}} + 344S_Q_{\text{stabilizer}} \\ &= 344S_Q_{\text{YBCO-transport}} + 344S_Q_{\text{YBCO-magnetization}} \\ &\quad + 344S_Q_{\text{substrate-hysteresis}} + 344S_Q_{\text{substrate-eddy}} \\ &\quad + 344S_Q_{\text{stabilizer-eddy}} \end{aligned} \quad (6)$$

SCS4050 선재와 SF4050 선재의 경우는 선재를 이루는 층별 구조를 살펴봐왔을 때, 기판 층이 비자성체인 Hastelloy C-276이기 때문에 344S 선재와는 달리 기판 층에서의 자화 손실이 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, SF4050 선재의 경우는 안정화 층이 없기 때문에 344S 선재나 SCS4050 선재와는 달리 안정화 층에서 발생하는 와전류 손실이 없음을 알 수 있다. 따라서 이를 고려하면 SCS4050 선재와 SF4050 선재로 권선된 코일의 교류 손실 값은 각각 식 (7), (8)로 계산할 수 있다.

Table 3. Structure of Superpower SF4050.

	두께	재질
안정화층	n/a	n/a
선트	2 μm	Silver
초전도체	1 μm	(RE)BCO
기판층	50 μm	Hastelloy C-276

Table 4. Parameter of Pancake sample 1, 2 and 3.

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
선재	344S	SCS4050	SF4050
턴 수	16.5	16.5	16.5
선재량	3.9 m	3.9 m	3.9 m
내경	65 mm	65 mm	65 mm
외경	81 mm	80.5 mm	81 mm
임계전류	70 A	72 A	68 A

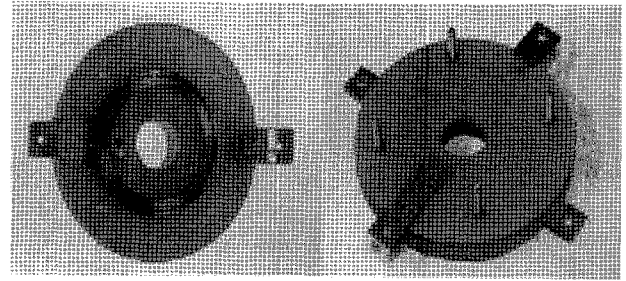


Fig. 5. Pancake coil(Left) and Fabricated asymmetric non-inductive coils(Right).

$$\begin{aligned} SCS4050_Q_{\text{total}} &= SCS4050_Q_{\text{YBCO}} + SCS4050_Q_{\text{substrate}} + SCS4050_Q_{\text{stabilizer}} \\ &= SCS4050_Q_{\text{YBCO-transport}} + SCS4050_Q_{\text{YBCO-magnetization}} \\ &\quad + SCS4050_Q_{\text{substrate-eddy}} + SCS4050_Q_{\text{stabilizer-eddy}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} SF4050_Q_{\text{total}} &= SF4050_Q_{\text{YBCO}} + SF4050_Q_{\text{substrate}} \\ &= SF4050_Q_{\text{YBCO-transport}} + SF4050_Q_{\text{YBCO-magnetization}} \\ &\quad + SF4050_Q_{\text{substrate-eddy}} \end{aligned} \quad (8)$$

그림 2, 3, 4는 비대칭 무유도성 코일에 권선한 각각의 초전도 선재 조합에 따른 교류 손실의 계산 결과를 층별로 나누어서 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 344S 선재에서는 기판 층에서, SCS4050선재는 안정화 층에서, SF4050 선재에서는 YBCO 층에서의 교류 손실이 가장 큼을 알 수 있다.

또한, 조합을 구성하여 각 선재의 층별 교류 손실을 합산할 경우 344S 선재와 SCS4050 선재 조합에서 가장 큰 교류손실이 발생하며 SCS4050 선재와 SF4050 선재의 조합에서 가장 적은 교류 손실이 발생하는 것으로 나타났다.

3. 실험 및 결과 분석

3.1. 실험에 이용한 선재들의 사양

본 실험에서는 교류 손실 계산 시 적용하였던 선재 조합과 동일하게 American Superconductor社(AMSC社)에서 만든 344S 선재와 Superpower社의 SCS4050 선재와 SF4050 선재를 이용하여 팬케의 코일을 제작하였다. 각 선재들의 너비는 4 mm로 동일하며 두께는 344S 선재는 0.15 mm, SCS4050 선재는 0.1 mm, SF4050 선재는 0.055 mm이다. 더불어 각 선재의 세부

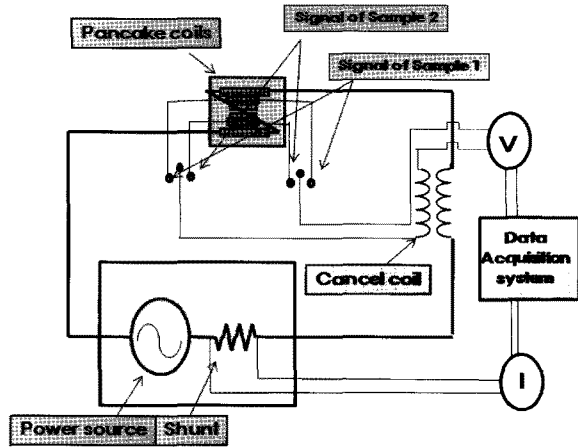


Fig. 6. Schematic drawing of the electric method.

사양들은 표 1, 2, 3에 명시하였다.

팬케익 코일 권선 시 권선되는 선재의 길이와 권선 수를 동일하게 맞추기 위하여 캡톤 테이프를 이용하여 선재의 두께를 동일하게 하여 권선을 하였고, 샘플 제작 후, 외경이 81 mm에서 오차범위 0.5 mm 이내임을 확인하였다.

3.2. 비대칭 무유도성 코일의 제작

실험에 사용된 비대칭 무유도성 코일은 그림 5와 같으며 제작한 각 샘플들의 사양은 표 4에 나타내었다. 두 개의 팬케익 코일 간격은 1 mm로 하였으며 동일한 방향으로 권선한 후, 서로 마주보는 방향으로 조립함으로써 정상 운전 시 두 팬케익 코일에 전류가 흐르는 방향이 반대가 되게 하여 무유도성을 갖게 하였다.

3.3. 교류손실 측정을 위한 실험 방법

본 실험에서는 교류 손실 측정을 위해 통전법이 사용되었다. 통전법은 시료에 교류 전류를 인가하여 전압을 측정하고 이를 통해 유효 전력을 산출하는 방법으로서, 측정 과정이 비교적 간단하며 측정 시간이 짧다. 통전법을 이용한 교류손실 측정 시, 초전도 시료에서 발생하는 저항성 성분만을 추출하기 위하여 시료와 전류 리드 등의 인덕턴스 성분은 상쇄 코일을 이용하여 제거하였다[10].

본 실험에서 시료의 출력 전압은 KEITHLEY 2181A nano-voltmeter를 통해 측정하였으며, 전류는 셉트 저항을 이용하여 측정하였다. 각각의 측정값은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 추출하였다.

실험의 구성도는 그림 6과 같다. 정상 운전 시, 비대칭 무유도성 코일이 무유도성을 유지하기 위해서는 두 개의 팬케익 코일에 동일한 양의 전류가 통전되어야 한다. 하지만, 비대칭 무유도성 코일을 구성하는 팬케익 코일들을 병렬연결 시 집합 저항 및 라인 저항의 차이 등이 전류 분배에 영향을 미칠 수 있으며, 본 실험에서는 정상 시 교류 손실을 비교 분석하는 것이 목적이기 때문에 비대칭 무유도성 코일을 구성하는 팬케익 코일들 간 연결 형태를 직렬 구조로 하였다. 각각의 샘플의 전압 신호 탭은 파워 서플라이에서 연결되는 구리바가 아닌 초전도 선재에 직접 연결하여 구리바 저항으로 인한 오차를 최소화 하였다. 통전 전류는 샘플들의 임계전류 중 최소인 68 A보다 작은 값인 10 A, 20 A, 30 A, 40 A, 50 A, 60 A로 설정하였으며, 통전 전류의 주파수는 전류의 크기와 상관없이 상용 주파수와 동일한 60 Hz로 설정하였다. 실험은 액체 질

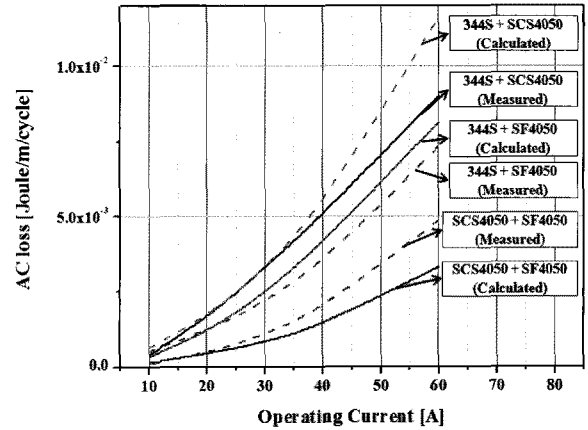


Fig. 7. AC loss of the coils with the variations of the peak current.

소를 이용하여 77 K의 동작 온도에서 수행하였다.

3.4. 조합별 교류 손실 결과

그림 7은 선재 조합 별 비대칭 무유도성 코일의 교류손실 측정결과를 해석 결과와 함께 나타내었다. 각각의 조합에 따른 실험 결과와 계산 결과를 살펴보면 전류가 높아질수록 오차가 커지기는 하지만 전체적으로 유사한 양상을 띠는 것을 알 수 있다. 교류 손실 측면에서 세 가지 조합들을 비교해보면 344S 선재와 SCS4050 선재의 조합이 가장 불리하며, SCS4050 선재와 SF4050 선재의 조합이 가장 유리한 조합이라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비대칭 무유도성 코일의 교류 손실의 특성을 연구하였다. 초전도 선재의 조합에 따른 비대칭 무유도성 코일의 교류 손실을 비교 분석하였으며 선재의 구조적 특성에 의해 SCS4050 선재와 SF4050 선재의 조합이 가장 작은 교류 손실이 발생함을 확인하였다. 이는 해석을 바탕으로 한 계산 결과에서 살펴보면 344S 선재에서 기판 층이 비자성체인 Ni-5%W이기 때문에 자화 손실이 추가 발생하는 것[4]과 SF4050 선재에서 안정화 층이 없기 때문에 와전류 손실이 발생하지 않는 것이 영향을 주는 것을 알 수 있다.

본 연구를 통해 AMSC社와 Superpower社의 다양한 2G 선재 조합에 따른 교류 손실 특성을 실험과 해석을 통해 비교 분석함으로써 향후, 비대칭 무유도성 코일의 한류기 적용 시 유용한 데이터를 확보할 수 있었다. 하지만, 비대칭 무유도성 코일의 특징 상 교류 손실 이외에 단락 특성 및 사고 시 자장 발생 특성 등의 요소들도 고려되어야 하므로 선재 조합에 따른 특성 변화에 대한 좀 더 다각적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2010-0018852).

참 고 문 헌

- [1] D. K. Park, K. S. Chang, S. E. Yang, Y. J. Kim, M. C. Ahn, Y. S. Yoon, H. M. Kim, J. W. Park, T. K. Ko, "Analytical and Experimental Studies on the Hybrid Fault Current Limiter Employing Asymmetric Non-Inductive Coil and Fast Switch", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1896, June 2009.
- [2] K. S. Chang, S. E. Yang, D. H. Jang, D. K. Park, M. C. Ahn, K. D. Sim, H. K. Kang, B. Y. Seok, T. K. Ko, "AC loss Measurement of Bifilarly Wound Magnet Using Coated Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No.2, pp. 1883, June 2007.
- [3] J. Ogawa, H. Nakayama, S. Odaka, O. Tsukamoto, "AC loss characteristics of YBCO conductors carrying transport currents in external AC magnetic fields", Cryogenics, Vol. 45, No. 1, pp. 23-27, 2005.
- [4] M. Suenaga, M. Iwakuma, T. Sueyoshi, T. zumi, M. Mimura, Y. Takahashi and Y. Aoki, "Effects of a ferromagnetic substrate on hysteresis losses of a YBa₂Cu₃O₇ coated conductor in perpendicular ac applied magnetic fields", Physica C: Superconductivity, Vol. 468, No. 15, pp. 1714-1717, 2008.
- [5] D. K. Park, J. S. Bang, S. E. Yang, Y. S. Yoon, M. C. Ahn, Kideok Sim, T. K. Ko "Theoretical and Experimental Analysis of AC Loss Characteristic of Bifilar Pancake Coil With Coated Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 1232, June 2008.
- [6] Doan N. Nguyen, Pamidi V. P. S. S. Sastry, and Justin Schwartz, "Numerical calculations of the total ac loss of Cu-stabilized YBa₂Cu₃O_{7-s} coated conductor with a ferromagnetic substrate", Journal of Applied Physics, Vol. 101, No. 5, pp. 053905, 2007.
- [7] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac : isolated conductors and edges of thin sheets", Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 3, No. 4, pp. 489, 1970.
- [8] Ernst Helmut Brandt and Mikhail Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Phys. Rev. B 48, Vol. 48, No. 17, pp. 12893-12906, 1993.
- [9] T. Fukuda, T. Kakeshita, and K. Kindo, "Effect of high magnetic field and uniaxial stress at cryogenic temperatures on phase stability of some authentic stainless steels", Materials Science and Engineering A 438-440, pp. 212-217, 2006.
- [10] K. W. Ryu, Y. H. Ma, B. J. Choi, S. D. Hwang, "Influence of tape's critical currents and current distributions on AC loss measurement in a multi-tape conductor", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 1, pp. 47, March 2005.

저 자 소 개



김진섭(金珍燮)
1984년 10월 8일생, 2010년 건국대 공대 전기공학과 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



황영진(黃英珍)
1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2010년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



나진배(羅鎭培)
1976년 9월 19일생, 2001년 충청대 공대 컴퓨터공학과 졸업, 2006년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 박사과정.



최석진(崔錫鎭)
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



김영재(金永宰)
1981년 6월 7일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



이지호(李知浩)
1986년 10월 22일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



이우승(李愚丞)
1987년 2월 19일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



장기성(張基盛)
1981년 9월 23일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2007년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 연세대 학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.