

Test of an High Temperature Superconducting Power Transformer

李 喜 俊 · 車 貴 守 · 李 志 光* · 金 佑 錫** · 韓 松 擘** · 柳 炅 佑*** · 崔 景 達[§]
 (H.J. Lee · G.S. Cha · G.K. Lee · W.S. Kim · S.Y. Hahn · K.W. Ryu · K.D. Choi)

Abstract - This paper describes the test results of a single phase 3kVA high temperature superconducting power transformer. The tapes are made with Bi-2223 and have silver alloy as the matrix. Four double pancake windings are used. Among them two double pancake windings are connected in series for high voltage winding and the others are connected in parallel for low voltage winding. The rated voltage and current of primary winding and secondary winding are 220/110V, 13.7/27.3A. Fundamental characteristics are obtained through short circuit and no load test. The over load capability and characteristics are investigated.

Key Words : HTS Transformer, double pancake winding, no load test, short circuit test

1. 서 론

전력시스템을 구성하는 초전도전력기기 중에서 고온초전도 변압기는 중요한 기기중의 하나로서 비교적 빨리 실용화 될 것으로 예상되고 있다.

초전도변압기가 갖는 장점은 효율이 높고, 무게 및 부피가 감소하며, 절연유를 사용하지 않으므로서 안전하고 환경친화적이며, 과부하내력이 증가하는 것 등이다. 저온초전도 변압기에 비해 고온초전도 변압기는 저온 용기의 구성이 간단하고 과부하에 대해 상대적으로 안정적이며, 초전도 상태를 유지하기 위한 냉각비용이 저렴하다.[1,2]

고온초전도선재의 성능이 향상됨에 따라 최근에는 고온초전도변압기를 제작되고 있다. 1996년에 일본 Kyushu대학교에서는 500kVA 단상고온초전도 변압기를 개발하였고, 1998년에 다국적기업인 ABB를 중심으로 해서 3상 630kVA 초전도변압기를 개발했고 1999년에는 미국의 Waukesha에서 단상 1MVA 초전도변압기를 개발하였고 5MVA급 고온초전도 발전기의 설계를 수행하고 있다. 국내에서도 1998년에 3상 100kVA 저온초전도변압기를 개발한 이후에 고온초전도 변압기를 개발하기 위한 연구를 진행 중이다.[3,4]

본 연구에서는 고온초전도변압기를 설계 및 제작하여 특성시험을 수행했다. 초전도변압기의 1차측과 2차측 권선은 더블팬케이크형태로 제작했다. 권선에 사용한 선재는 Bi-2223테이프이고 변압기 철심과 함께 액체 질소로 냉각시켰다. 고온초전도변압기의 1차와 2차의 정격전압은 각각 220V와 110V이고 권선된 턴수는 120턴과 60턴이다. 4개의 더블팬케이크를 제작하여 철심의 같은 각에 위치시켰다. 유한요소방법을 사용하여 더블팬케이크의 최적의 권선 형상을 찾아 권선을 배치하였다. 권선된 4개의 더블팬케이크는 고압측 권선은 2개의 더블팬케이크를 직렬로 연결하였으며 저압측 권선은 2개의 더블팬케이크를 병렬로 연결하였다.

무부하시험 단락시험 부하시험을 하여 변압기의 등가회로 상수를 구하였고, 돌입전류에 대한 영향을 조사하였다.

2. 변압기 설계

표1은 고온초전도선재에 대한 사양이다. BICC사에서 제조한 Bi-2223선재를 사용하였는데, 필라멘트 영역이 전 영역에서 차지하는 면적은 51.7%이며 고온초전도테이프의 모재는 은합금으로 제작되었고, 필라멘트 소선은 37가닥이며 필라멘트는 트위스트는 되어 있지 않다. 고온초전도선재 10cm에 외부자장을 인가하지 않고 $1 \mu V/cm$ 기준으로 임계전류를 측정하면 임계전류는 40.0A로서 이를 전류밀도로 나타내면 J_c 는 $8.74 \times 10^3 [A/cm^2]$ 이다.

권선은 더블팬케이크형태로 권선하였는데 팬케이크형 권선마다 30턴씩 원형으로 권선하여 모두 60턴을 권선하였다. 제작된 보빈의 내측 반지름은 62.5 mm 외측 반지름은 92.5 mm이며 한 개의 더블팬케이크 권선시 사용한 선재의 길이는 30.2m이다.

正 會 員 : 順天鄉大 電氣工學科 博士課程
 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授
 * 正 會 員 : 又石大 電氣工學科 助教授
 ** 正 會 員 : 서울大 電氣工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 서울大 電氣工學科 教授
 § 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 教授
 接受日字 : 2000年 3月 1日
 最終完了 : 2000年 8月 16日

표 1 고온초전도선재 사양

Table 1 Specifications of the HTS tape

재질	BSCCO-2223
모재	은합금
테이프 폭	3.54mm
테이프 두께	0.25mm
필라멘트 영역 폭	2.615mm
필라멘트 영역 두께	0.175mm
트위스트	NO
필라멘트수	37
임계전류	40A (1 μ V/cm criterion, No field)

그림 1은 Bi-2223 고온초전도 선재의 횡단면과 종단면도이다.

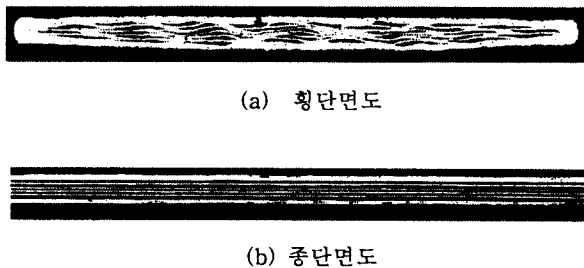


그림 1 고온초전도선재의 종단면도
Fig. 1 The cross sections of the high T_c superconducting tape

그림 2는 각 권선에 대해 임계전류를 1 μ V/cm을 기준을 적용해서 측정한 결과로 각 권선의 임계전류는 22, 23, 23, 26A이었다. 권선된 임계전류가 낮은 이유는 권선과 권선 사이에 외부자계의 영향에 의해 임계전류가 낮아진다. 1차 정격전류는 13.7A이므로 약 40%여유를 두고 제작하여 과전류에 의한 열화를 방지하였다.

변압기의 특성을 나타내는 중요한 지표의 한가지인 V/T는 식(1)에 의해 결정할 수 있다. 여기에서 R은 단상인 경우 0.7이고, P는 변압기의 용량을 나타낸 것이며, f는 주파수, Q는 단상일 경우 1이다. 계산된 V/T는 1.8이다.[4]

$$V/T = R \times \left[\frac{P}{(\%IZ/5)^{1/2}} \right]^{1/2} \times \left(\frac{f}{60} \right)^{0.376} \times Q \quad (1)$$

표 2는 제작된 고온초전도변압기의 사양으로서 변압기 철심의 구조는 내철형이며, 사용한 철심은 30PH139 방향성 규소 강판을 사용하였는데 강판의 두께는 0.3 mm이며 질량은 7.65 g/Cm³ 철심의 점적율은 95%이다. 제작한 철심의 단면적은 적층 두께와 폭이 86 mm, 85 mm 이고 철심의

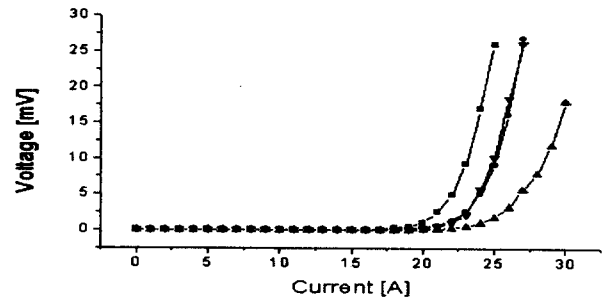


그림 2 각 변압기 권선에 대한 임계전류 측정
Fig. 2 The critical currents of the transformer windings

표 2 고온초전도변압기 사양

Table 2 Specifications of the transformer

전압	220/110 V
정격 전류	13.7/27.3 A
용량	3kVA
턴수	120/60
권선 길이	120.8m
V/T	1.8
무게	34.6kg
철심 창 치수	60×120 mm ²
철심 단면적	85×86 mm ²

무게는 34.6 kg이다. 권선을 용이하게 하기위해서 고압측과 저압측 권선을 더블 팬케이크형태로 권선 하였으며 제작된 4개의 더블팬케이크권선은 같은 치수로 제작되었다. 고압측에는 120턴을 저압측에는 60턴을 권선 하였으며 더블팬케이크권선하나당 감긴 선재의 길이는 30.2 m로 사용된 선재의 총 길이는 120.8m이다.

더블팬케이크 권선 배치는 누설리액턴스와 자화리액턴스는 권선의 위치에 따라 차이가 있다. 권선배치는 유한요소 방법을 사용하여 최적 형상을 찾아 저압-고압-고압-저압으로 배치하였다. 고압측에 2개, 저압측에 2개 총 4개의 더블팬케이크 권선을 사용하는데 고압측에 사용된 더블팬케이크 두개는 직렬로 연결하고 저압측에 사용된 더블팬케이크 두개는 병렬로 권선하여 과도 상태시에 변압기에 흐르는 큰 전류에 의해서 변압기가 열화 되는 것을 방지하였다.

그림 3은 제작한 단상 3kVA 고온초전도변압기 단면도이다. 철심의 길이는 290 mm, 230 mm이며 C코아 형태의 권철심으로 제작되었으며, 고온초전도변압기 창의 크기는 60 mm, 120 mm이고, 철심의 한쪽에 더블팬케이크권선이 위치한다.

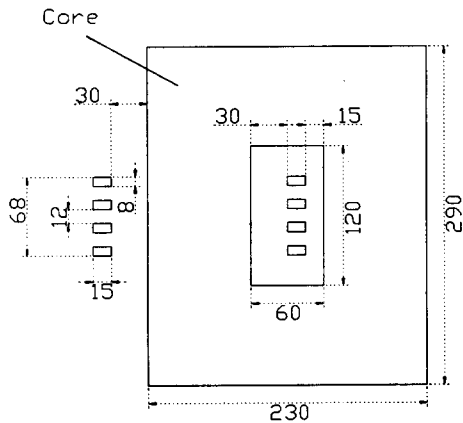


그림 3 고온초전도변압기의 단면도
Fig. 3 Cross-section of the HTS transformer

그림 4는 제작한 단상 3kVA 고온초전도변압기이다. 극저온 용기는 외부로부터 열 에너지 도입을 막기 위해 용기의 외벽과 내벽 사이에 진공 층을, 그리고 복사열을 막기 위한 Super insulation 층을 두었으며 FRP를 사용하여 제작해서 누설자속에 의해 용기의 내벽에 와전류가 발생하는 것을 방지하도록 하였다. 극저온 용기 안에 변압기를 고정하기 위하여 열절연 특성이 좋은 베이크라이트 판을 사용하여 상부 플랜지와 변압기를 고정하고 그 사이에 대류열 및 복사열을 차단하는 방열판을 여러개 삽입하였다. 또한 변압기의 지지 및 고정에 사용된 구조재도 가능한 FRP로 제작된 것을 사용해서 와전류손을 줄이도록 하였다.

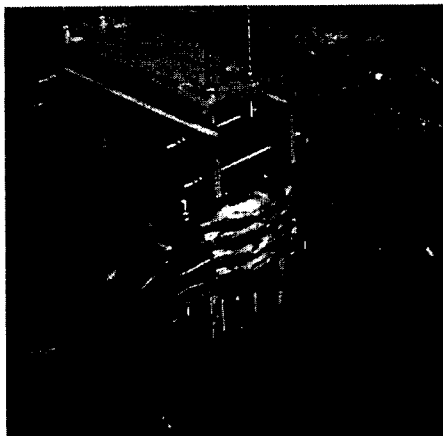


그림 4 단상 3kVA 고온초전도변압기
Fig. 4 The 3kVA HTS transformer

3. 손 실

철심내부에서 자속밀도는 식(2)을 이용해서 계산할 수 있는데 사용된 철심의 점적율 sf 가 0.95에서 자속밀도는 0.973T이다. 제작한 고온초전도변압기 철심의 무게가 34.6kg

이므로 손실곡선을 사용하여 철손을 구하면 16.6W이다.

$$B_m = \frac{V/T \times 10^6}{4.44 \times f \times A_c \times sf} \quad (2)$$

여기서 A_c 는 철심의 단면적으로 7310 mm²이다.

고온초전도테이프에 시변자계가 인가될 때에 발생하는 교류손실 중에서 자화손실은 초전도테이프 전 영역에서 완전침투가 발생한다고 가정하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3} \right) \text{ Joule/m}^3/\text{cycle}, \beta > 1 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{B_m}{B_p}$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad [T]$$

위 식에서 β 는 자속의 침투 정도를 나타내는 계수이며, B_p 는 선재의 중심까지의 침투 자속밀도이다. 권선영역에서 자장 B_m 이 10 mT이고 사용된 초전도선의 필라멘트 영역의 폭 $2a$ 는 0.175mm, 필라멘트 영역의 임계전류밀도 J_c 는 $8.74 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 이므로 한 주기당 자화손실은 64.9 Joule/m³/cycle 이것으로부터 권선된 총 자화손실을 계산하면 214mW이다.[5]

그림 5는 유한요소방법을 사용하여 정격운전시 고온초전도 권선이 저압-고압-고압-저압 상태로 배치된 경우 자화손실 밀도를 나타내고 있다. 저압권선과 고압권선 사이 즉 첫 번째 권선과 두 번째 권선 사이 및 세 번째 권선과 네 번째 권선 사이에서 자장의 세기가 강할 뿐만 아니라 이 부분에서 초전도선재에 인가 되는 자장의 방향도 초전도선재에 수직 방향이기 때문에 손실이 많이 발생한다. 이 그림 5의 왼쪽에 있는 그림은 철심 안쪽에 위치한 권선을 확대한 것으로서 이때 권선에서의 최대자속밀도는 48mT이다.

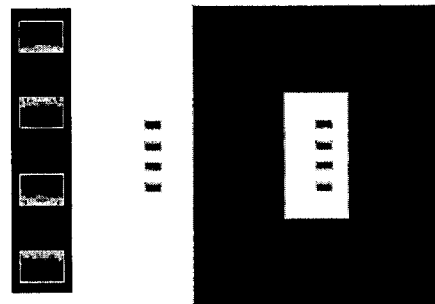


그림 5 HTS코일의 손실밀도
Fig. 5 Flux distribution near the coil area

통전전류에 의해서 발생하는 자기자계손실은 다음과 같은 Norris식을 이용해서 구할 수 있다.[6]

$$Q = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left[\left(1 - \frac{i_p}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{i_p}{I_c}\right) + \left(2 - \frac{i_p}{I_c}\right) \frac{i_p}{2I_c} \right] \text{ J/m/cycle} \quad (4)$$

위 식에서 I_c 는 임계전류이고 i_p 는 통전전류의 최대치이므로 한주기당의 자기자계손실은 1.59×10^{-5} J/m/cycle이고 이로부터 구한 자기자계 손실은 114.7mW이다. 고온초전도선재의 자화손실과 자기자계손실을 모두 고려한 교류손실은 328.7mW로서 자화손실과 자기자계손실이 비교적 적은 이유는 변압기의 용량이 작고, 더블팬케이크 권선을 교호배치했기 때문에 초전도 권선에 인가되는 자장의 세기가 낮고 권선에 흐르는 전류가 13.6A비교적 적은 수준이기 때문이다.

이 결과로부터 기화된 가스를 다시 액체로 만드는 데에 소용되는 전력의 비율인 COP를 25로 잡으면 교류손실은 8.2W가 되어 초전도변압기에서 발생하는 교류손실은 철손이 절반 수준이 되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 극저온용기에서 발생하는 손실등 기타손실은 고려하지 않았다.[7]

4. 변압기 시험

무부하 시험시 1차 전압을 정격전압의 10%에서 100%까지 증가시키며 1차 전류와, 역률을 측정하였다. 그림 6는 무부하 시험 결과를 나타낸 것이다. 1차측 전압이 증가하면 여자전류는 1.46A에서 1.54로 증가하고, 자화리액턴스는 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 1차측 전압이 214V일 때 여자전류는 1.54이므로 이로부터 자화리액턴스를 구하면 143 Ω이다.

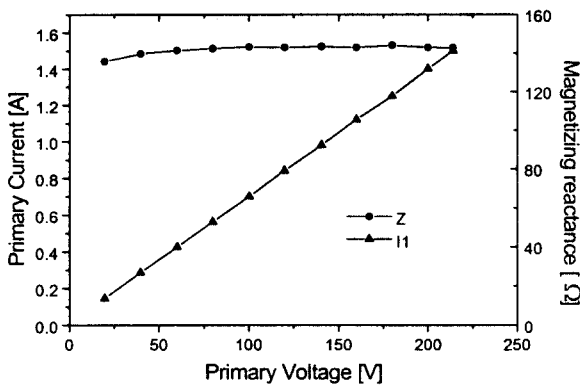


그림 6 무부하시험시 1차전압 변화에 따른 1차전류 및 자화리액턴스
Fig. 6 Primary current and magnetizing reactance versus primary voltage in no-load test.

단락시험시 변압기의 2차 정격전류까지 단락 전류를 증가시키었다. 그림 7는 단락회로시험 결과로서 1차 전압 변화에 따른 단락 전류의 변화와 내부 임피던스의 변화를 나

타낸 것이다. 1차 전압이 증가하면 단락 전류는 일정 비율로 증가하나, 내부 임피던스는 단락전류가 12.5A까지는 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 내부임피던스는 정격전류에서 1Ω으로, 0.069pu이다. 단락시험시 단락전류를 임계전류까지 흘려 보았으나, 고온초전도선재는 켄치를 발생하기 위한 최소 교란 에너지도 매우 크므로 안정성이 좋아 켄치가 발생하지 않았다.

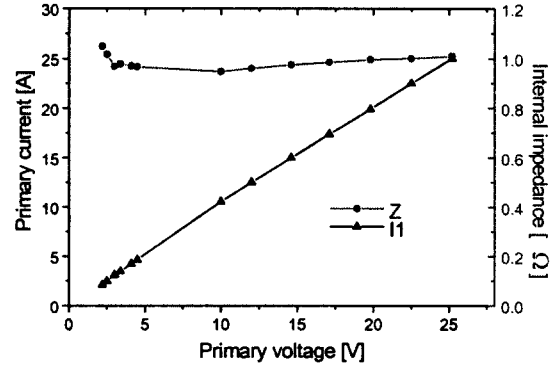


그림 7 단락회로시험시 1차전압대 1차전류 및 내부임피던스
Fig. 7 Primary current and internal impedance versus primary voltage in short circuit test.

그림 8은 단락회로 시험시 1차 전류를 임계전류까지 증가시킨 것이다. 1차전류가 10.56A에서 전압의 역률은 0.208에서 0.195까지 감소되고 1차의 전류는 증가하였다. 그러나 1차 전류가 19.9A 까지 증가하면 역률이 다시 증가하여 역률이 0.214가 되는데 그 이유는 고온초전도 선재에서 저항이 발생되기 때문이다.

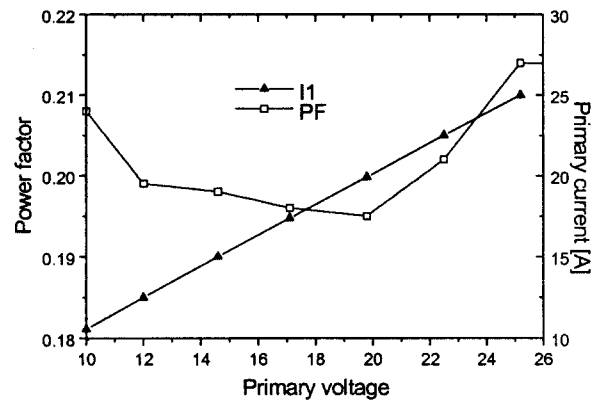


그림 8 단락회로시험시 1차전압대 1차전류와 역률
Fig. 8 Power factor and primary current versus primary voltage in short circuit test.

그림 9는 부하를 일정비율로 증가시키어 부하전류를 증가시키면서 2차 전압과 역률의 변화를 나타낸 것이다. 부하가 증가되면 2차 전압은 감소되고 역률은 증가하였다. 2차측전압은 106.5V부터 103.5V까지 변화하므로 제작된 고온초전도변압기의 전압 변동율은 2.61%이다.

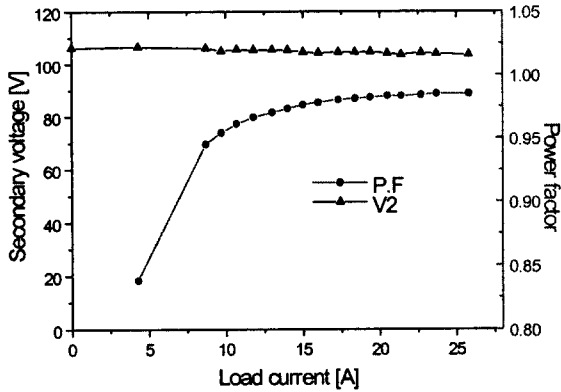


그림 9 부하전류 증가에 따른 2차전압과 역률
Fig. 9 Secondary voltage and power factor variation due to the load increase.

그림 10 (a) (b)는 전원 투입시 돌입전류에 대한 시험 파형이다. 전원 투입시 돌입전류가 운전전류 보다 2배이상 높으나 고온초전도 선재는 저온초전도체에 비해 임계온도가 높아서 실제 사용되는 동작 온도도 매우 높고, 초전도 자체의 비열과 열 전도도 역시 매우 커서 켄치가 발생되기 위한 최소 교란에너지도 매우 크므로 안정성 측면에서 유리하여 돌입전류에 대해서는 큰 문제가 되지 않았다.

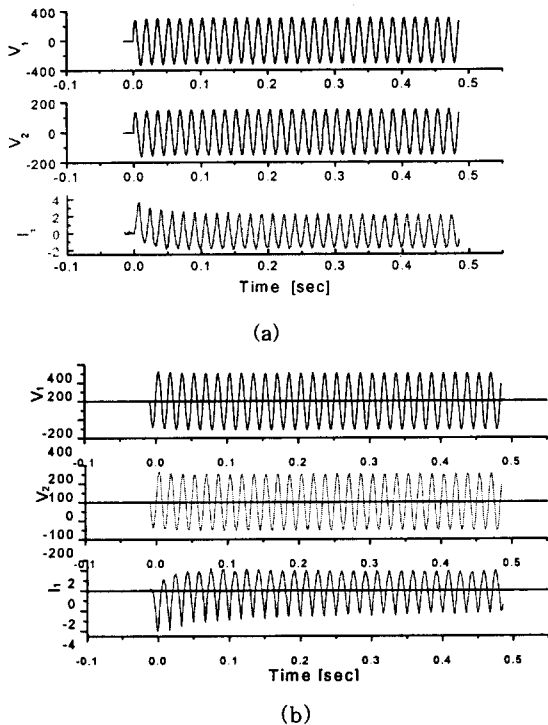


그림 10 전원 투입시 1차·2차전압과 1차전류
Fig. 10 Primary and secondary voltage and primary current upon starting.

5. 결 론

고온초전도변압기를 제작하고 무부하시험 단락시험 부하 시험을 하였다. 4개의 더블팬케이크 보빈을 만들어 Bi-2223 선재를 사용하여 권선하여 저압 고압 고압 저압순으로 배치 하였다.

고압측에 2개, 저압측에 2개 총 4개의 더블팬케이크권선을 사용하였는데 고압측 2개는 직렬로 연결하고 저압측에 사용된 2개는 병렬로 권선하였다. 병렬권선시 순환전류가 발생하지 않게 동수의 턴수로 권선하여 임피던스가 같게 하였다.

고온초전도변압기에서는 돌입전류는 큰 문제가 되지 않았다. 철손과 초전도데이프에서 발생하는 손실을 비교한 결과 철손이 초전도데이프에서 발생하는 손실 보다 많았다. 따라서 극저온 용기를 중공형으로 제작하여 철손을 상온부에 위치시키면 손실이 감소 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp. 43-49, July 1997
- [2] S.W.Schwenrerly, et al., "Performance of a 1-MVA Demonstration Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, 1999
- [3] K. Funaki, et al., "Preliminary tests of a 500kVA class oxide superconducting transformer cooled by sub-cooled nitrogen," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.7, No.2, pp.824-827, 1997.
- [4] J.K.Lee, et al., "Development of a Three Phase 100kVA Superconducting Power Transformer with Amorphous Core," IEEE, Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, 1999, pp.1293-1296
- [5] 차귀수 등, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 대한전기학회 논문지, 제48권(B), 제4호, pp.182-186, 1999
- [6] W.T.Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors carrying AC: isolated conductors and edges of thin sheets," Jour. of Physics. D, vol.3, pp.489-507, 1970
- [7] J.K.Sykulski, K.F.Goddard, R.L.Stoll, "Design and Construction of a High Temperature Superconducting Transformer," ICEM'98, Istanbul, Turkey, pp.971-975, Sept., 1998

저 자 소 개



이 희 준 (李 喜 俊)
1969년 5월 15일생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 041-530-1333
E-mail : jun1234@chollian.net



한 승 업 (韓 松 曄)
1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공학). 1995년~1996년 당 학회 회장. 현 서울대학교 공과대학 교수
Tel : 02-880-7246
E-mail : syhahn@plaza.snu.ac.kr



차 귀 수 (車 貴 守)
1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 전기공학과 졸업(공학). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수, 현 순천향대 공대 기술정보학부 교수
Tel : 041-530-1334
E-mail : gsoocha@sch.ac.kr



류 경 우 (柳 景 佑)
1962년 2월 10일 생. 1983년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업. 1995년요코하마대학원 전자정보공학과 박사. 현 전남대학교 전기공학과 교수
Tel : 062-530-1748
E-mail : kwryu@chonnam.chonnam.ac.kr



이 지 광 (李 志 光)
1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 우석대학교 전기공학과 조교수
Tel : 062-290-1476
Email : jikwang@core.woosuk.ac.kr



최 경 달 (崔 景 達)
1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업. 1993년 동 대학원 공학박사. 현 한국산업기술대학교 전기전자공학과 조교수
Tel : 032-496-8263
E-mail : choidal@kpu.ac.kr



김 우 석 (金 佑 錫)
1970년 6월12일생. 1996년 서울대공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학 대학원 졸업. 현 동 대학원 전기공학부 박사과정
Tel : 02-880-7993
E-mail : ottor@eesri-10.snu.ac.kr