

Analysis of AC Losses in HTS Transformer with Double Pancake Windings

金鍾泰[†] · 金佑錫^{*} · 金聖勳^{*} · 崔景達^{**} · 朱亨吉^{**} · 洪啓源^{**} · 韓軫皓^{**} · 李喜均^{***}
 (Jong-Tae Kim · Woo-Seok Kim · Sung-Hoon Kim · Kyeong-Dal Choi · Hyeong-Gil Joo ·
 Gye-Won Hong · Jin-Ho Han · Hee-Gyoun Lee)

Abstract - AC loss is one of the important parameters in HTS (High Temperature Superconducting) AC devices. Among the HTS AC power devices, the transformer is the essential part in the electrical power system. But unfortunately, the transformer is the worst HTS device concerning AC loss because of very large magnetization loss due to high magnetic field applied to the HTS wire. We calculated the magnetization losses in HTS pancake windings for transformer according to the operating temperature. Two kinds of arrangement of HTS pancake windings were adopted for calculation of AC losses of a shell type transformer, and the analysis results were presented and discussed.

Key Words : AC Loss, HTS Transformer, Double Pancake

1. 서 론

초전도 전력기기는 고효율기기이면서도 소형·경량화가 가능한 전력기이라는 장점을 가지고 있기 때문에 이를 실용화시키기 위한 많은 연구가 선진 각국에서 계속되고 있다. 특히, 1986년에 고온초전도체가 발견된 이후, 이어서 고온초전도체의 선재화에 성공하면서 고온초전도 선재를 이용한 여러 가지 전력기기의 개발에 대한 연구가 세계적으로 진행되어 왔으며 현재 국내·외의 전력산업 부분에서 활발한 연구가 진행 중이다[1]. 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기로 고온초전도 변압기를 손꼽고 있다. 현재 초전도 응용기기에서 많이 사용되고 있는 고온초전도 선재는 초전도체의 방향성을 일치시켜 주기 위해서 테이프 형태로 제작되어 있다. 이러한 테이프 형상의 초전도 선재에 교류전류가 흐르면 선재에 교류손실이 발생하게 된다. 이 교류손실은 초전도 변압기뿐만 아니라 다른 교류 초전도 응용기기에서 매우 중요한 요소로 작용한다. 따라서 초전도 변압기 설계에 앞서서 교류손실 계산이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 1 MVA 고온 초전도 변압기 권선에 인가되는 누설자장에 의해 발생하는 교류손실에 대한 연구를 하였으며, 초전도 권선의 형태와 동작온도에 따라서 변화되는 교류손실에 대한 해석을 수행 하였다.

2. 본 론

2.1 1 MVA 고온 초전도 변압기 권선 해석모델

1 MVA 고온 초전도 변압기 해석을 위한 권선의 형상은 교호배치와 동심배치를 사용 하였으며 철심은 단상 3각 외철형을 채택하였다. 1 MVA 고온 초전도 변압기의 사양을 표 1에 나타내었고 각각의 설계 변수 값을 표 2에 나타내었다.

2.1.1 교호배치 권선

교호배치권선은 더블 팬케이크 형태를 사용하였으며 4개의 모듈(Module)로 구성되었고 누설자장 값을 줄이기 위해 각각의 모듈을 고압-저압-고압으로 나누어 구성하였으며 그림 1(가)에 나타내었다.

2.1.2 동심배치 권선

누설자장의 영향을 줄이기 위해 본 논문에서는 교호배치 권선과 같이 변압기 권선을 분할하는 방법을 사용하였다. 각 보빈은 고압-저압-고압으로 각각 20개로 나누었다. 이런 경우 대부분의 누설 자속이 선재에 수평으로 가해져서 교호배치와 비교할 때 교류손실이 줄어들게 된다. 동심배치권선의 형태를 그림 1(나)에 나타내었다.

2.2. 고온 초전도 변압기 전자장 해석

고온초전도 변압기 권선부에서 발생하는 교류손실 계산을 하기에 앞서 수치해석 프로그램을 사용하여 초전도변압기 권선을 사용한 1 MVA 고온초전도 변압기의 권선형태에 따른

† 교신저자, 學生會員 : 한국산업기술대학교 에너지대학원 석사과정
E-mail : cass@kpu.ac.kr

* 正 會 員 : 기초전력공학공동연구소 전임연구원

** 正 會 員 : 한국산업기술대학교 에너지대학원, 교수

*** 正 會 員 : 한국산업기술대학교 신소재공학과, 교수

接受日字 : 2004年 9月 25日

最終完了 : 2004年 11月 26日

표 1 고온초전도 변압기 사양

Table 1 Specification of HTS Transformer

사 양	값	단 위
Phase(상)	1	
용 량	1	MVA
정격 1차 전압	22.9	kV
정격 2차 전압	6.6	kV
정격 1차 전류	44	A
정격 2차 전류	152	A

표 2 고온 초전도 변압기 권선형태에 따른 설계변수

Table 2 Design Parameter of Each HTS Transformer

	교호배치	동심배치
턴 수	832 / 240	832 / 240
권선 수	8 / 4	20 / 20 / 20

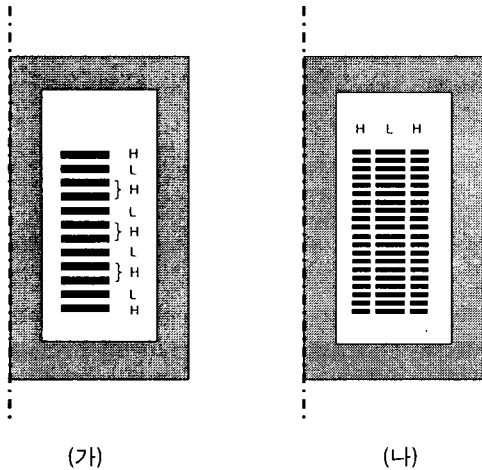


그림 1 교호 / 동심배치 권선 배치
Fig 1 Winding arrangement of each type

전자장 해석을 하였으며 그 결과를 그림 2, 3에 나타내었다. 교호배치 권선에서 누설자장은 고온초전도 선재에 수직으로 가해지며, 이 자장으로 고온초전도 권선에서의 임계 전류 값의 감소뿐만 아니라 많은 교류손실을 발생시킨다. 동심배치 권선은 누설자장의 대부분이 선재에 수평으로 가해져서 교호배치에 비해 적은 교류손실을 발생시킨다.

2.3 고온초전도 변압기의 교류손실 해석

고온초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 2가지로 나눌 수 있는데 하나는 외부 자장에 의한 손실과 다른 하나는 자기 자장에 의한 손실로 나눌 수 있다. 팬케이크형태의 권선의 경우 자기 자장에 의한 손실은 외부 자장에 의한 손실에 비해 매우 작아서 무시할 수 있다[2].

따라서 본 논문에서는 초전도권선에 외부자장에 의해 발생하는 교류손실 중 자화손실만을 고려하여 해석하였다. 초전도선재를 이용한 권선의 전류에 의해 발생하는 자장은 권선내의 각각의 테이프에 외부인가 자장으로 작용하여 초전

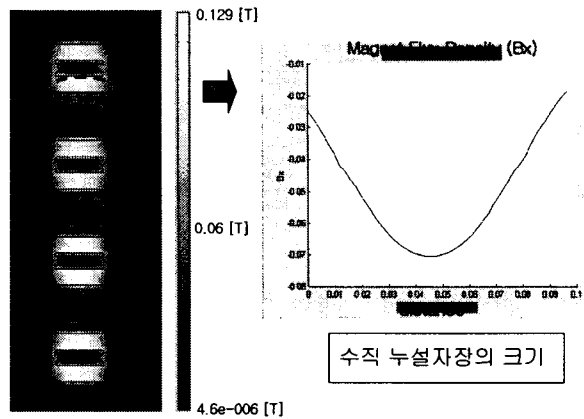


그림 2 교호배치 권선의 전자장 해석
Fig 2 Analysis of magnetic field for the HTS transformer with reciprocal arrangement

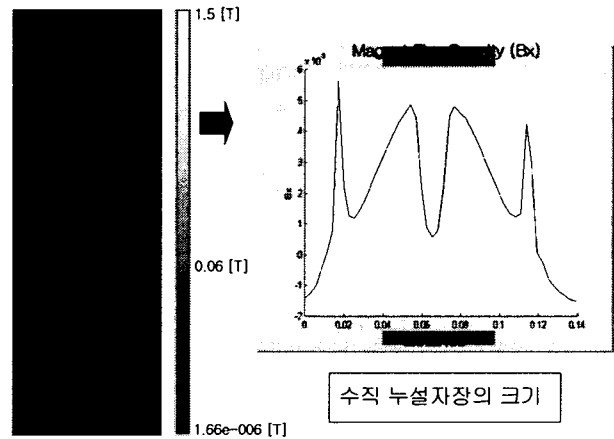


그림 3 동심배치 권선의 전자장 해석
Fig 3 Analysis of magnetic field for the HTS transformer with concentric arrangement

도선재의 자화손실을 발생시킨다. 1 MVA 고온 초전도 변압기에서 발생하는 손실을 계산하기 위해 먼저 변압기를 모델링하고, 이를 유한요소법을 통한 수치해석을 사용하여 변압기 권선부에 흐르는 전류에 의한 자장을 해석하였다. 변압기 전체에서 발생하는 자장 중 권선부에 인가되는 자장을 계산하여, 이를 초전도선재의 수직방향과 수평방향 외부자장의 성분으로 나누어 각 요소에서 발생하는 손실을 계산하였다. 수평성분을 계산할 때 식(1)을 사용하였고 수직성분을 계산할 때는 식(2)을 사용하였다[3][4].

$$P = \frac{fB_m^2 \cdot \beta}{2\mu_0 \cdot 3} \quad \beta < 1 \tag{1}$$

$$P = \frac{fB_m^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^2} \right) \quad \beta > 1$$

$$P = K \frac{f\pi a}{b\mu_0} B_c B_m \left(\frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta_{\perp} \right) \tag{2}$$

f : 주파수, B_m : 최대 자장, B_p : 완전침투자장
 B_c : 임계침투자장, $\beta = B_m/B_p$, $\beta_{\perp} = B_m/B_c$
 a: 초전도 선재의 폭, b: 초전도 선재의 두께

각 권선 배치에 따른 자화손실을 수평자장과 수직자장으로 나누어 그림 4에서 나타내었다. 계산된 자화손실은 특히 교호배치 시 수평자장의 영향은 거의 없고 대부분을 수직자장이 차지하고 있다. 동심배치에서는 교호배치보다 많은 수평방향 손실과 적은 수직자장 손실을 보여주고 있다. 그림 5에서 동작온도에 따른 각 권선형상의 자화손실의 변화 경향을 보이고 있다. 그림 5에 따르면 동작온도의 변화는 2개의 영역으로 나누어 볼 수 있는데 왼쪽은 온도에 따라 교류손실이 감소하는 영역이고 오른쪽은 그 반대의 경우이다. 어떤 특정 포인트(Point)를 기준으로 자화손실이 증가하다가 감소하는 부분이 발생하게 되는데 전류가 증가하면 선재에 가해지는 자장 또한 증가하고 자장이 증가하게 되면 그 포인트가 왼쪽으로 움직이게 된다. 이 결과는 비록 초전도 권선의 동작온도가 낮아 임계전류가 높다고 해서 꼭 교류손실 값이 감소하는 것은 아니라는 것을 보여준다. 초전도 선재의 경우 보다 많은 전류를 흘려주기 위해 권선을 과냉각하여 높은 임계전류 값을 갖게 한다. 비록 높은 임계전류 값과 자장 값을 가진다고 해서 반드시 교류손실이 줄어드는 것은 아니라는 것을 계산결과 확인할 수 있었다.

그리고 교호배치보다 동심배치에서 누설자장이 초전도 선재에 수평으로 가해져서 교호배치보다 더 적은 자화손실 값을 갖게 된다. 따라서 교호배치 보다 동심배치가 교류손실 면에서 더 유리하다고 할 수 있겠다.

그러므로 고온 초전도 변압기의 교류손실을 줄이기 위해서는 권선의 형상뿐만 아니라 동작온도도 함께 고려하여 설계하여야 한다.

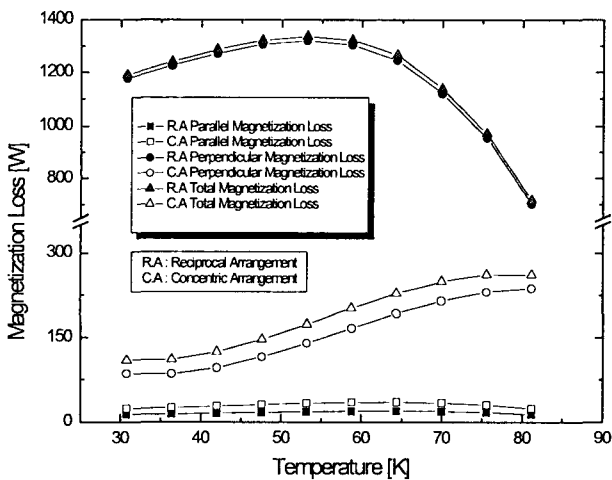


그림 4 권선배치와 구성요소에 따른 자화손실
 Fig 4 Calculated magnetization losses of each type and each component

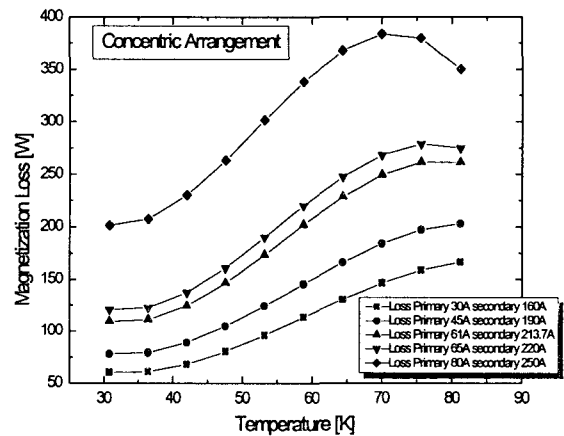
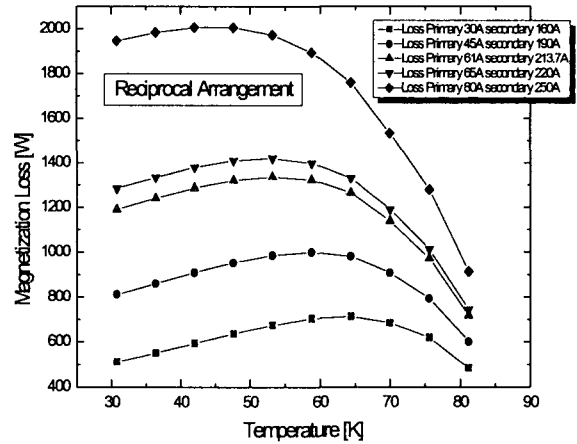


그림 5 동작온도에 따른 자화손실 변화 경향
 Fig 5 Tendency of magnetization loss variation according to the operating temperature

3. 계산 방법의 검증

계산방법의 타당성을 검증하기 위해서 4개의 더블 팬케이크 권선의 교류손실을 측정하여 수치해석 값과 비교하였다. 그림 6에 시험용 권선형상을 나타내었고 그림 7에서 측정된 값과 계산된 값을 비교하였다. 40A의 전류가 흐를 때 측정된 값과 계산된 값은 약 13%의 오차를 가진다. 이 결과는 교류손실의 정확한 값을 얻지는 못했지만 계산을 통하여 동작온도에 따른 교류손실의 변화의 경향을 확인할 수 있었다.



그림 6 시험 권선 형상
 Fig 6 Fabricated winding for test

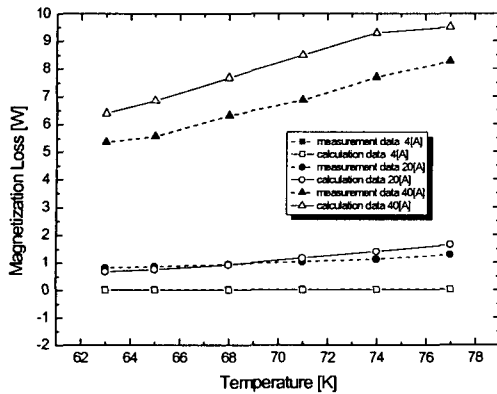


그림 7 측정된 값과 계산 값의 비교
 Fig 7 Comparison between measured and calculated AC loss

4. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통해 초전도 변압기의 동작온도와 권선 형상에 따른 교류 손실의 변화를 계산해 보았다. 특히 팬케이크 형태의 과냉각 초전도 변압기의 경우 임계전류가 증가한다고 해서 교류손실이 항상 감소하는 것이 아니기 때문에 이런 교류손실의 변화의 경향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 교류손실 측면에서 교호배치보다 동심배치가 더 유리하다. 따라서 설계자는 변압기 설계에 앞서 교류손실을 줄이기 위해 권선형태와 동작온도를 고려하는 것이 중요하다. 그리고 계산되어진 결과는 향후에 있을 1 MVA 고온 초전도 변압기 프로토타입의 시험에서 검증 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론 티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] K.D Choi, H.J. Lee, G. Cha, K.W. Ryu, W.S. Kim and S.Y. Hahn, "Test of a High Tc Superconducting Power Transformer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, Issue 1, March, pp. 853-856, 2000.
 [2] J. K. Lee and G. Cha, "AC loss calculation of a multi-layer HTS transmission cable considering the twist of each layer,"IEEE Transactions on Magnetics, vol. 11, pp.2433-2436, March 2001.
 [3] M. N Wilson, "Superconducting Magnet", Clarendon Press, Oxford, 1983.
 [4] A. Wolfbrandt, N. Magnusson and S. Hornfeldt, "AC losses in a BSCCO/Ag tape carrying ac transport currents in AC magnetic fields applied in different

orientations," IEEE Transactions on ASC, vol. 11, pp. 4123-4127, 2001.

[5] Sung-Hoon Kim, et al., "Comparison of reciprocal and concentric winding arrangement of HTS transformer," Progress in Superconductivity, vol. 5, No. 1, pp.61-64, 2003.
 [6] K. Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV single-phase model for a 3 MVA HTS power transformer," IEEE Transactions on ASC, vol. 11, No.1, pp.1578-1581, 2001.
 [7] W. S. Kim, et al., "Design of a 1MVA high Tc superconducting transformer," IEEE Transactions on ASC, vol. 13, pp.2291-2293, June 2003.
 Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, March 1993.
 [5] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.

저 자 소 개



김 종 태 (金鍾泰)

1973년 1월 9일생. 2003년 한국산업기술대학교 전기전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기전공 석사과정
 Tel : 031-496-8047
 Fax : 031-496-8339
 E-mail : cass@kpu.ac.kr



김 우 석 (金佑錫)

1970년 6월 12일생. 1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 2002년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 기초전력공학공동연구소 전임연구원.
 Tel : 02-880-7993
 Fax : 02-883-0827
 E-mail : ottor@eesri.snu.ac.kr



김 성 훈 (金聖勳)

1973년 5월 20일생, 1999년 동아대학교 전기전자·컴퓨터공학부졸업, 2000년 서울대학교공대 전기·컴퓨터 공학부(공학석사), 2004년 동대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 전임연구원.
 Tel : 02-880-7993
 Fax : 02-883-0827
 E-mail : new28@snu.ac.kr



최 경 달 (崔景達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 교수.

Tel : 031-496-8263
Fax : 031-496-8279
E-mail : choidal@kpu.ac.kr



한진호 (韓軫皓)

1964년 8월 7일생. 1987년 서울대 기계공학과 졸업. 1989년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1996년 Univ. of Wisconsin Madison Mechanical Engineering(공학박사) 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 조교수

Tel : 031-496-8210
Fax : 031-496-8339
E-mail : jinohan@kpu.ac.kr



주형길 (朱亨吉)

1964년 10월 08일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 부교수.

Tel : 031-496-8249
Fax : 031-496-8259
E-mail : hgjoo@kpu.ac.kr



이희균 (李喜均)

1958년 3월 1일생. 1981년 서울대 금속공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사). 1986년 동대학원 재료공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대학교 신소재공학과 조교수.

Tel : 031-496-8306
Fax : 031-496-8339
E-mail : hglee@kpu.ac.kr



홍계원 (洪啓源)

1956년 4월 3일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 전기공학과 졸업(공학석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 부교수.

Tel : 031-496-8270
Fax : 031-496-8279
E-mail : gwhong@kpu.ac.kr