

외부자장 인가시 더블팬케이크 권선에서 발생하는 교류손실

이희준, 이승욱, 차귀수, 이지광\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*, Seoul National University\*\*

AC Loss of the Double Pancake Winding by External Field

Hee-Joon Lee, Seung-Wook Lee, Guesoo Cha, Ji-Kwang Lee\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*, Seoul National University\*\*

**Abstract** - Magnetization loss which is generated in HTS wire varies with the direction of the external magnetic field. This paper calculates the magnetization loss in an HTS transformer winding, where effects of the direction of magnetic field are considered. Kim model is used to consider the variation of the critical current with magnetic field and Brandt equation is used to calculate the loss by perpendicular magnetic field in transformer winding. Magnetization loss in an HTS transformer can be calculated more precisely with this paper.

1. 서 론

고온 초전도체는 저온 초전도체보다 비열이 높아 안정도가 향상되었고 액체질소(77K)를 냉매로 사용하기 때문에 냉각소요비용의 감소 등으로 고온초전도체를 이용한 전기기기의 응용에 관심이 높아지고 있으며, 초전도 변압기, 초전도 전류제한기, 초전도 송전케이블 등에 장선이 용이한 BSCCO 선재가 주로 사용되고 있다.

전력기기에 사용되는 초전도 선재에는 교류전류와 교류자장이 인가되기 때문에 교류손실이 발생하게 되며, 이 자장에 의하여 고온 초전도선의 임계전류가 감소되고 이는 초전도 선재의 임계전류를 제한하게 된다.

초전도 변압기에서 발생하는 교류손실은 변압기의 전체적인 효율뿐만 아니라 고온초전도 권선의 냉각 안정화 한계를 저하시키기 때문에 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 고온초전도 선재를 사용한 전력용 기기를 교류환경에서 사용하기 위해서는 교류손실에 대한 해석이 절대적으로 필요하게 되었다.

본 논문에서는 초전도 변압기에서 발생하는 교류손실 중에서 동작전류에 의해 권선에서 발생하는 자장을 권선을 구성하는 초전도 테이프에 인가되는 자장으로 생각하여 이에 의한 자화손실을 계산하였다.

자화손실을 정확하게 계산하기 위하여 더블팬케이크 권선에서 발생하는 자장을 수평성분의 자장과 수직성분 자장으로 나누어 Brandt식을 이용하여 손실을 계산하였다.

2. 외부자장에 의한 자화손실

테이프 형상의 고온 초전도 선재에서의 교류손실은 자기장의 방향에 따라 크게 영향을 받게되므로 고온 초전도 선재를 사용한 전력용장치 설계에서 자장의 방향을 고려하여 손실을 계산 하여야한다.

본 논문에서는 고온 초전도선에 가해지는 자장을 초전도 선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 초전도 선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향 자장으로 나누어서 자화손실을 계산한다.

그림 1과 같이 초전도선에 외부자장  $B_m$ 이 인가 될

때 수평성분 자장은  $B_{||} = B_m \cos \theta$ 이고 수직성분 자장은  $B_{\perp} = B_m \sin \theta$ 이다.

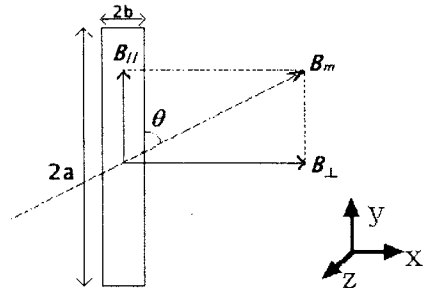


그림 1. 고온초전도 테이프에 인가되는 외부자장  
 Fig 1. External magnetic field applied to an HTS tape

외부자장이 고온 초전도 선에 인가되면 고온초전도선의 임계전류밀도  $J_c$ 가 감소하게 된다. 유한 요소법을 사용하여 계산된 더블팬케이크 권선의 코일에서 자장에 의하여 각 요소에서 임계전류밀도는 수평방향 자장성분에 의하여 감소하는 임계전류밀도  $J_{c||}$ 와 수직방향 자장성분에 의하여 감소하는 임계전류밀도  $J_{c\perp}$ 를 Kim model을 사용하여 나타내면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$J_{c||} = \frac{\alpha_{||}}{B_m + B_{o||}} \quad (1)$$

$$J_{c\perp} = \frac{\alpha_{\perp}}{B_m + B_{o\perp}} \quad (2)$$

$B_{o||}, B_{o\perp}$ 는 각각  $J_{c||}, J_{c\perp}$ 가 반으로 줄어드는 외부자장 값이며,  $\alpha_{||}, \alpha_{\perp}$ 는  $B_m = B_{o||}, B_m = B_{o\perp}$ 일 때의  $J_{c||}$ 와  $J_{c\perp}$ 로부터 얻을 수 있다.

외부자장이 초전도 필라멘트의 중심까지 침투하는 요소의 수평방향 완전침투 자속밀도  $B_p$ 와 임계자속밀도  $B_c$ 를 임계전류밀도를 이용해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_p = \mu_0 \times J_{c||} \times b \quad (3)$$

$$B_c = \frac{\mu_0 \times J_{c||} \times 2b}{\pi} \quad (4)$$

수평방향 자장에 의해서 발생하는 손실은 완전침투가

발생하지 않는 경우와 완전침투가 발생하는 경우로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{\Delta II} = \frac{2fB_{\Delta p}^2}{3\mu_0} \beta_{\Delta II}^3 B_{\Delta} < B_{\Delta p} \quad [Wm^3] \quad (5)$$

$$P_{\Delta II} = \frac{2fB_{\Delta p}^2}{\mu_0} (\beta_{\Delta II} - \frac{2}{3}) B_{\Delta} > B_{\Delta p} \quad [Wm^3] \quad (6)$$

위 식에서  $f$ 는 외부자장의 주파수,  $B_{\Delta p}$ 는 요소에서의 완전침투 자속밀도,  $\beta_{\Delta II} = B_{\Delta II} / B_{\Delta p}$ 이다.

수직방향 자장에 의해서 발생하는 손실을 brandt가 제안한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{\Delta} = \frac{1}{S} \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_{\Delta} B_{\Delta m} \times \left[ \frac{2}{\beta_{\Delta}} \ln(\cosh \beta_{\Delta}) - \tanh \beta_{\Delta} \right] \quad [Wm^3] \quad (7)$$

$S$ 는 초전도선의 단면적이며,  $2a$ 는 초전도선의 폭,  $B_{\Delta}$ 는 요소의 임계 침투 자속밀도,  $B_{\Delta m}$ 는 요소에서의 자속밀도,  $\beta_{\Delta} = B_{\Delta} / B_{\Delta c}$ 이다.

이들로부터 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의한 요소에서의 교류손실 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{\Delta} = P_{\Delta II} \cos^2 \theta_{\Delta} + P_{\Delta} \sin^2 \theta_{\Delta} \quad [Wm^3] \quad (8)$$

$\theta_{\Delta}$ 는 요소에 대하여 임의의 방향으로 가해지는 자장의 방향이다.

위 식들로부터 초전도 변압기의 더블팬케이크 권선에 서 발생하는 전체 자화손실은 다음과 같다.

$$P_{total} = v \cdot \lambda \cdot \sum_{i=1}^N P_{\Delta} \quad [W] \quad (9)$$

$v$ 는 권선부의 체적,  $\lambda$ 는 초전도체의 점적율,  $N$ 은 권선에서의 요소 수이다.

### 3. 고온초전도 변압기의 외부자장에 의한 손실

계산하고자 하는 고온초전도 변압기는 용량이 10kVA 이고, 정격전압 440/220V, 정격전류는 22.7/45.5A이다. 표 1은 변압기의 사양과 고온초전도 선의 사양이다. 변압기의 설계사양에 따라 고압측과 저압측의 권선 수는 196/98턴이고 권선은 더블팬케이크 형태로 권선한다.

표 1 단상 10kVA 변압기 사양과 고온초전도선 사양  
Table 1. Specification of the 10kVA HTS transformer and HTS tape

변압기 사양	1차측 전압	440 V	1차측 전류	22.73 A
	2차측 전압	220 V	2차측 전류	45.46 A
1차측 권선수	196	2차측 권선수	98	
1차측 권선 길이	136.8 m	2차측 권선 길이	136.8 m	
초전도선 사양	재질	BSCCO-2223	모재	Ag 합금
	테이프 폭	4.1 mm	테이프 두께	0.203 mm
	트위스트	NO	임계 전류	100 A

표 2는 여러 가지 권선배치가 있으나 수치 해석 결과 전류의 불균형이 최소인 고압-저압-저압-고압(H-L-L-H)인 배치와 저압-고압-저압(L-H-L)의 배치에 대하여 개방특성과 단락특성의 전압과 전류 그리고, 이로부터 구한 자화리액턴스와 누설리액턴스이다.

권선의 배치를 LHL의 순서로 권선한 것이 자화리액턴스가 크며, 누설리액턴스는 작기 때문에 이 권선법을 채택하여 1차측에 196턴을 권선하고, 2차측에 98턴의 권선을 병렬로 연결하여 손실 계산을 하였다.

표 2. 개방회로특성 및 단락회로 특성

Table 2. Characteristic of Open-circuit test and Short-circuit test

권선 배치	개방 시험			단락 시험		
	전압 [V]	전류 [A]	자화리액턴스 [Q]	전압 [V]	전류 [A]	누설리액턴스 [Q]
HLLH	440	5.09	86.4	13.54	22.73	0.595
LHL	440	5.07	86.85	12.51	22.73	0.55

그림 2는 손실계산에 사용된 변압기의 해석영역이다. 왼쪽 그림은 변압기의 형상이고 오른쪽 그림은 권선부분을 확대한 그림이다.

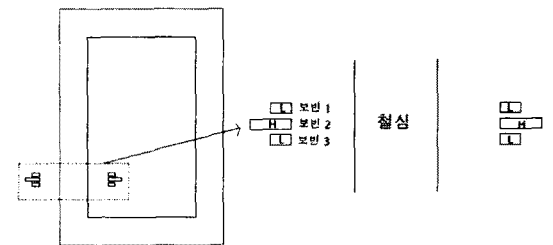


그림 2. 고온 초전도 변압기의 단면  
Fig 2. Cross-section of the HTS Transformer

그림 3은 초전도 변압기내의 전체 자력선 분포와 권선 부분의 자력선 분포를 확대해서 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다른 부분에서 자장이 초전도선에 수직 방향으로 가해지는 것을 확인할 수 있으며 변압기의 권선에서 발생하는 손실의 대부분이 저압측 권선과 고압측 권선이 마주보는 부분에서 발생하게 될 것이다.

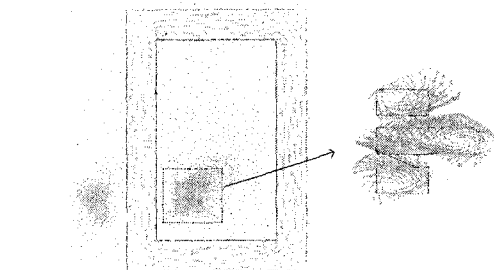


그림 3. 초전도 변압기에서의 자력선 분포  
Fig 3. Flux line of the HTS Transformer

그림 4는 권선 부분에서의 전체 자속밀도와 권선부의 자속밀도를 확대하여 나타낸 것이다.

권선 부분에서의 최대 자속밀도는 119mT이고 최소

자속밀도는  $0.43 \times 10^{-1} \text{mT}$ 이다.

자력선 분포에서도 알 수 있는 바와 같이 고압측 권선과 저압측 권선이 마주 보는 쪽의 자장이 강한 것을 확인할 수 있다.

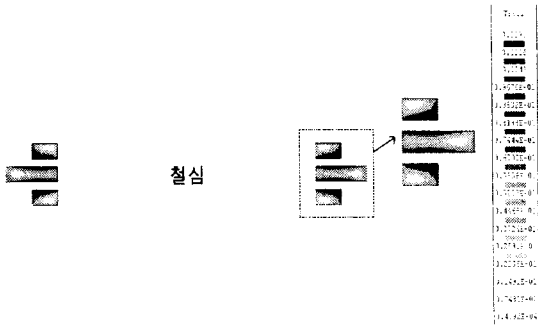


그림 4. 권선에서의 자속밀도 분포  
Fig 4. Flux density distribution in the winding area

고온 초전도 변압기의 전 부하시 각 보빈에 인가되는 외부자장에 의하여 발생하는 교류손실을 계산하면 그림 5와 같다.

보빈1과 보빈2, 보빈3에서의 손실은 각각 9.7W, 21.7W, 9.7W이며 초전도 변압기에서 수평방향 자장에 의한 전체 손실은 2.3W 이고 수직방향 자장에 의한 전체 손실은 38.8W이다.

그림 6은 부하가 변할 때 고온초전도 변압기의 교류 손실 계산 결과이다.

부하가 정격부하의 3/4부하인 경우의 손실은 33.63W이고 정격부하의 1/2부하, 1/4부하인 경우에 손실은 각각 23.11W, 8.54W이다.

부하가 줄어들수록 전체적인 손실은 감소하며 특히 수직성분의 자장에 의한 손실이 적어지는 것을 확인할 수 있다.

계산 결과에 의하면 초전도선에 수직으로 가해지는 외부자장에 의한 손실이 수평으로 가해지는 외부자장에 의한 손실보다 대략 20배정도 크다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 변압기의 권선에서 발생하는 손실을 줄이기 위해서는 초전도선에 수직방향으로 인가되는 자장을 감소시키는 것이 매우 중요함을 알 수 있었다.

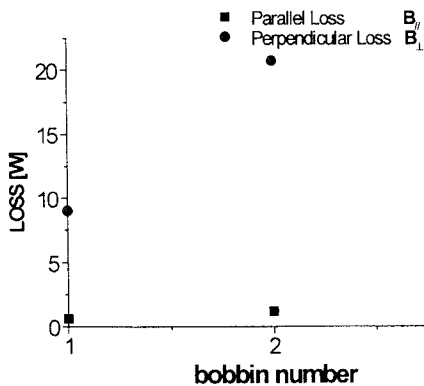


그림 5. 각 보빈에서 발생하는 수평, 수직 손실  
Fig 5. Parallel and Perpendicular Loss generated in each bobbin

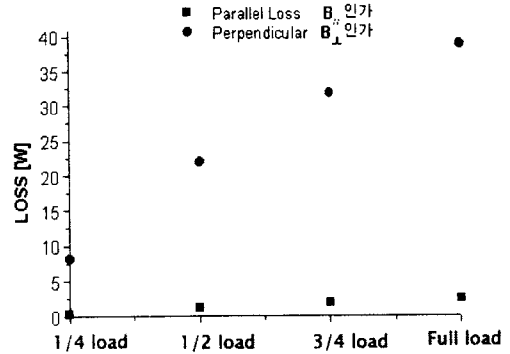


그림 6. 부하에 따른 수평, 수직 손실  
Fig 6. Parallel and Perpendicular Loss in each load

#### 4. 결 론

고온 초전도선을 사용한 전력기기에서 교류자장손실은 전력기기의 효율뿐만 아니라 고온 초전도 권선의 냉각 안정화 한계 또한 저하시키기 때문에 중요하게 고려되어야 한다.

본 논문에서는 고온초전도선을 사용한 변압기의 권선에 인가되는 외부자장에 의해서 발생하는 자화손실을 수평, 수직방향자장으로 나누어 계산해 보았다.

계산 결과에 의하면 고압권선과 저압권선이 만나는 부분에서 수직방향의 자장이 초전도선에 인가되었으며 손실의 대부분이 수직방향의 자장에 의해서 발생됨을 알 수 있었다.

따라서 고온 초전도체를 사용한 전력기기를 설계함에 있어서 수직방향의 자장을 줄이는 노력이 필요하다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] C.P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962
- [2] W.T. Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and Edges of thin Sheets," Journal of Phys. D: Applied Phys., Vol.3, pp.489-507, 1970.
- [3] E.H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev.B, vol.48, pp.12893- 12906, Nov., 1993.
- [4] W.J. Carr, AC Loss and macroscopic theory of superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, NewYork, 1983.
- [5] N. Magnusson and S. Hornfeldt, "Losses in HTS Carrying AC Transport Currents in AC External Magnetic Fields," IEEE Trans. on AS, Vol.9, No.2, pp.785-788, 1999.
- [6] A. Wolfbrandt, N. Magnusson and S. Hornfeldt, "AC Losses in a BSCCO/Ag Tape Carrying AC Transport Current in AC Magnetic Fields Applied in Different Orientations," Applied Superconductivity Conference 2000, Virginia, USA, Sept., 2000
- [7] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983