

변압기용 권선의 전자장 해석

박찬배, 김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원
서울대학교 전기컴퓨터 공학부, 한국산업기술대학교 에너지 대학원

Electromagnetic Analysis of Transformer windings

Chan-bae Park, Woo-Seok Kim, Song-yop Hahn,
Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo and Gye-Won Hong
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University,
Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University

p-chanbae@hanmail.net

Abstract - This paper presents electro-magnetic analysis of 1MVA High T_c Superconductivity transformer designed conceptually. A winding type of this transformer is a double pancake type, and a transformer of solenoidal winding type is selected to be compared with it. Both transformers have the same sizes and the same turns. Results of the analysis are compared with results of solenoidal winding. And, in this paper, leakage inductances are calculated too. There are a lot of methods to calculate inductance including Neumann Formula, Energy conservation and so on. In this paper, Energy conservation method are selected.

1. 서 론

대용량의 고온 초전도 변압기 개발 현황을 보면, 미국 Waukesha 주도의 5/10MVA, 26.4kV/4.16kV, 단상 1MVA 변압기, 일본 Kyushu대학의 1MVA, 22.9kV/6.9kV, 500kVA 단상 변압기, 그리고 유럽 ABB사의 10MVA, 69kV/13kV, 3상 변압기를 들 수 있다. 문헌[1],[2]

이에 한국도 2001년 9월을 시작으로 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 1MVA, 22.9kV/6.9kV 단상 변압기 개발에 착수를 했다. 따라서 본 논문에서는 변압기 개념 설계에 의한 1MVA, 22.9kV/6.9kV 단상 변압기를 바탕으로 전자장 수치해석을 행하였다. 해석 권선의 형태는 고압측과 저압측을 교호 배치한 더블 팬케이크 권선을 택하였으며, 이를 같은 용량의 솔레노이드 권선 해석 결과와 비교하였다. 그리고 각 권선의 수직 자장 분포를 통한 이론적 임계전류값을 구했다. 또한 초전도 변압기에서의 켈치는 보통의 초전도 마그네트의 켈치와는 달리 자기 인덕턴스의 에너지가 아닌 누설 인덕턴스의 에너지가 주열로 변환된다. 이에 두 가지 경우의 변압기에서의 누설 인덕턴스를 구해 보았다.

2. 본 론

2.1 전자장 해석 이론

일반적으로 변압기의 1차, 2차 권선은 서로 절연된 별개의 공간을 차지하고 있기 때문에, 1차 혹은 2차 권선에만 쇄교하는 누설자속이 생기게 되고, 이것은 각각의 권선에서 자기 인덕턴스에 영향을 주게 된다. 이에 변압기의 등가회로를 얻기 위해 이러한 변압기 정수를 구해야 한다.

인덕턴스를 계산하는 방법은 Neumann Formula, Energy conservation, Effective inductance 등 여러 가지가 있다. 하지만 테입 형태의 단면을 갖는 초전도 선재의 특수성 때문에 선재의 형상에 크게 영향을 받지 않는 Energy conservation 방법을 본 논문에서는 사용하였다. 문헌[3]

우선 Energy conservation 방법의 대략적인 요약은 다음과 같다. 임의의 체적내에 연속적인 전류분포가 있을 때 자기에너지 W_m 를 구하는 일반적인 식을 보면,

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{A} \cdot \vec{J} dv \quad (1)$$

이고, 여기서 \vec{A} 는 벡터 포텐셜이며, \vec{J} 는 전류밀도이다. 따라서 (1)식의 우변에 Vector identity를 적용하면,

$$\nabla \cdot (\vec{A} \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{A}) - \vec{A} \cdot (\nabla \times \vec{H}) \quad (2)$$

$$\vec{A} \cdot \vec{J} = \vec{H} \cdot \vec{B} - \nabla \cdot (\vec{A} \times \vec{H}) \quad (3)$$

이고, (1)식에 (3)식을 대입함으로써,

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{H} \cdot \vec{B} dv - \frac{1}{2} \oint_S (\vec{A} \times \vec{H}) \cdot \vec{a}_n ds \quad (4)$$

식을 얻을 수 있다. 여기서 식(4)에서 V 이 충분히 크다고 고려하면, 이것의 표면 S 위의 점들은 전류로부터 꽤 멀어지게 되고, 이에 R 이 무한히 커지면 결국 표면적분항은 사라지게 된다. 따라서 누설 자속이 존재하는 전 공간에 대한 자기에너지는

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{H} \cdot \vec{B} dv \quad (5)$$

식과 같이 요약된다. 문헌[4]

따라서 (5)식과

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + 2 M I_1 I_2 \quad (6)$$

식을 이용하여 변압기의 인덕턴스를 구할 수 있으며, 여기서 $L_{1,2}$ 는 도체 1,2 에서의 자기 인덕턴스이고, M 는 도체 1,2 사이의 상호 인덕턴스이고, $I_{1,2}$ 는 도체 1,2 에 흐르는 전류이다. 문헌[5]

2.2 변압기 해석 결과 및 분석

전자장 해석을 위해 솔레노이드형 권선의 변압기와 더블 팬케이크형 권선의 변압기를 모델로 삼았다. 두 모델은 권선의 형상을 제외하고는 철심 규격이나 1차 및 2차측의 권선 턴수와 전류 밀도는 동일하다.

2.2.1 솔레노이드 형 권선

솔레노이드 권선의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of Solenoidal Winding

	Prim. Winding	Second.Winding
Number of layers	4	2
Conductors	1	4
Number of Turns	222/layer	128/layer
Strand Cross Section	Bi-2223 tape 4.1mm×0.21mm	

Fig.1 은 정격전류를 흘렸을 때의 자장 분포를 보여준다. 즉 권선에 인가되는 자장의 세기가 가장 클 때이다. 권선은 안쪽부터 저압, 고압, 고압의 배치를 이루고 있다. 문헌[6]

Fig.2는 권선의 끝단에 걸리는 수직자장의 분포를 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 솔레노

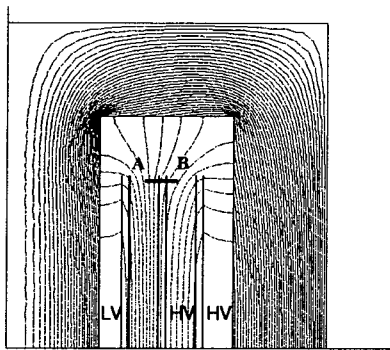


Fig. 1. Field distribution of Solenoidal winding

이드 권선 형태에서는 선재에 걸리는 수직자장

의 최고값이 약 0.024[T] 정도임을 알 수 있다.

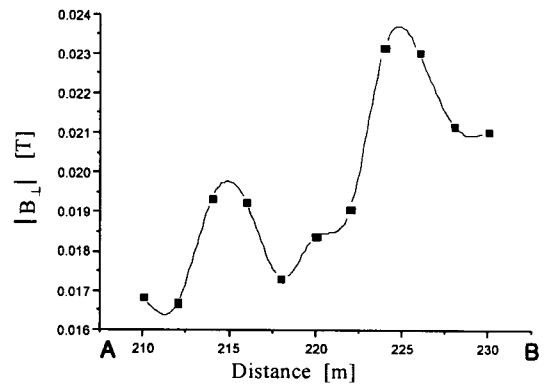


Fig. 2. Perpendicular field distribution of Solenoidal winding

2.2.2 더블 팬케이크 형 권선

더블 팬케이크 권선의 사양은 Table 2 와 같다.

Table 2. Characteristics of Double pancake winding

	Prim. Winding	Second.Winding
Number of double pancake	4	4
Conductors	1	4
Number of Turns	222/pancake	64/pancake
Strand Cross Section	Bi-2223 tape 4.1mm×0.21mm	

Fig.3 은 1,2차 측에 정격전류를 흘렸을 때의 권선부에서의 자장분포를 보여준다. 권선은 저압, 고압, 저압의 교호 배치로 고압 권선과 저압 권선이 이웃하고 있는 부분에서 자속이 집중되는 것을 볼 수 있다. 이는 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이며, 이 부분의 선재가 수직 자장의 영향을 가장 많이 받아 임계전류가 떨어질 것이다.

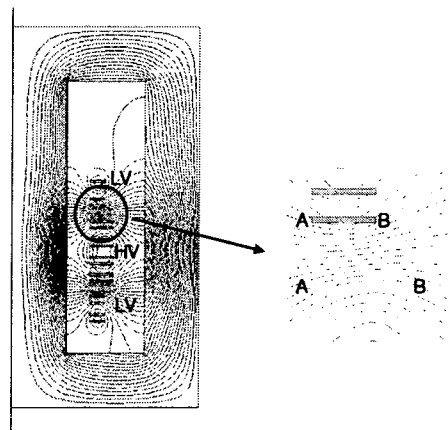


Fig. 3. Field distribution of Double pancake winding

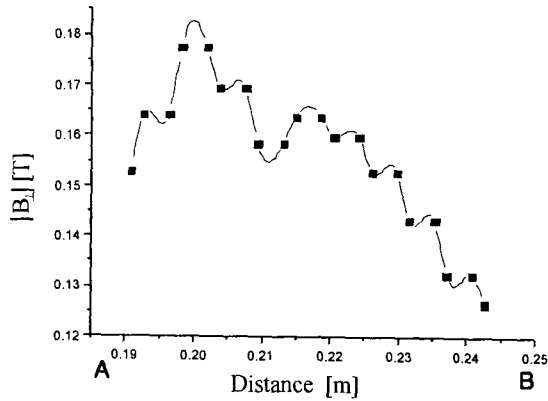


Fig. 4. Perpendicular field distribution of High voltage winding

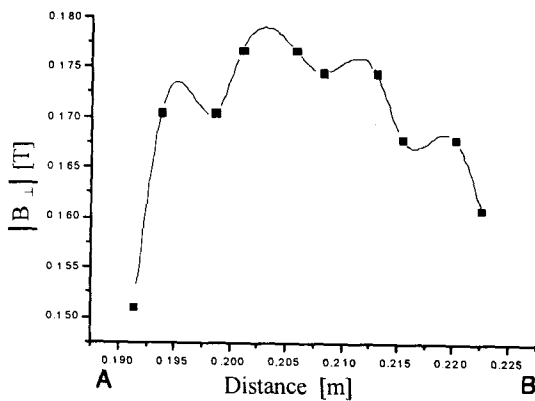


Fig. 5. Perpendicular field distribution of Low voltage winding

Fig.4 와 Fig.5 는 고압측 권선과 저압측 권선이 만나는 부분에서 권선에 걸리는 수직 자장 값의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 고압측 권선과 저압측 권선 모두에 약 0.18 ~ 0.185 [T]의 수직 자장이 걸리고 있음을 알 수 있다. 이는 상당히 큰 자장값으로 임계전류를 제한하는 요인이 될 것이다.

2.2.3 결과 분석

Table 3은 솔레노이드형 권선의 변압기와 더블 팬케이크형 권선의 변압기의 등가회로를 얻기 위해서 인덕턴스 계산을 한 결과를 보여주고 있다. 인덕턴스는 앞에서 언급한 Energy Method를 이용하여 구하였다.

위의 Table 3 를 보면 알 수 있듯이 솔레노이드형 권선에 비해 더블 팬케이크형 권선의 2차측 누설 인덕턴스 값이 약 1/3 정도 작은 것을 볼 수가 있다. 이것은 고압측과 저압측의 적절한 교호 배치를 통해 얻은 것이라 할 수 있겠다. 하지만 앞서서도 언급했듯이, 솔레노이드형 권선에 비해 더블 팬케이크형 권선이 수직 자장의 영향을 더 받기 때문에 임계전류가 상당히 떨어질 것이다. 이론적 방법에 의해 더블 팬케이크형 권선에서의 임계전류값을 계산해보면, 권선의 벤드

Table 3. Inductance calculation results

Solenoid Winding		
Self inductance	Prim.	84.432[H]
	second.	7.012[H]
Mutual inductance		24.256[H]
Leakage inductance	Prim.	2.94×10^{-1} [H]
	second.	1.93×10^{-2} [H]
Double Pancake Winding		
Self inductance	Prim.	86.951[H]
	second.	7.21[H]
Mutual inductance		24.986[H]
Leakage inductance	Prim.	2.75×10^{-1} [H]
	second.	6.7×10^{-3} [H]

다이어가 꽤 크고, 과냉각방법을 고려했을 때, 약 200A ~ 220A 정도의 전류값을 얻었다. 이 전류값은 피크치 전류의 근처이므로 다소 선재에 걸리는 수직 자장을 줄일 수 있는 방안의 모색이 앞으로 필요하겠다.

3. 결 론

지금까지 개념적 설계 방법에 따른 1MVA 급 대용량 더블 팬케이크 고온초전도 변압기의 전자장 해석을 했으며, 같은 용량의 솔레노이드형 변압기의 해석 결과와 비교를 해 보았다. 더블 팬케이크형 권선이 솔레노이드형 권선에 비해 더 큰 수직 자장의 영향을 받지만, 이것은 냉각 시스템의 성능 개선으로 불리한 임계전류를 충분히 극복할 수 있을 것이다. 하지만 인덕턴스 측면에서 봤을 때는 더블 팬케이크형이 솔레노이드형에 비해 누설 인덕턴스가 상당히 적었으며, 이는 곧 변압기 효율 및 특성 향상에 좋은 영향을 줄 것이다.

앞으로의 과제는 3차원 해석을 통해서 더블 팬케이크 권선의 변압기에 대한 더 정확한 파라미터를 계산하고, 권선 배치를 최적화하며, 전압원을 사용한 모델도 해석을 할 것이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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, March 2001

[2] M. Iwakuma, et al., "Current Distribution in Superconducting Parallel Conductors Wound into Pancake Coil", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 10, no.1, pp.861-864, March 2000

[3] Frederick W. Grover, "Inductance Calculations", pp.163-176, 1946

[4] David K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", pp.277-281, 1989

[5] Frank B.J. Leferink, "Inductance Calculation: Methods and Equations", IEEE, pp.16-22, 1995

[6] M. Iwakuma, et al., "Ac Loss Properties of a 1MVA Single-Phase HTS Power Transformer", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, no.1, pp.1482-1485, March 2001