

초전도 변압기 권선의 전류분류

이동근*, 김우석**, 김성훈***, 최경달*, 주형길*, 홍계원*, 한진호*, 이희균*
 *한국산업기술대학교, **기초전력공학공동연구소, ***서울대학교

Current Distribution in The Winding of a Superconducting Transformer

Dong-Kun Lee*, Woo-Seok Kim**, Sung-Hoon Kim***, Kyeong-Dal Choi*,
 Hyeong-Gil Joo*, Gye-Won Hong*, Jin-Ho Han*, Hee-Gyoon Lee*
 *Korea Polytechnic University,
 **Electrical Engineering and Science Research Center,
 ***Seoul National University

energy29@kpu.ac.kr

Abstract - This paper deals with current distribution analysis of the windings of a superconducting transformer with BSCCO-2223 High Tc Superconducting (HTS) tapes. Current distribution of HTS windings wound in parallel is analyzed by electromagnetic field analysis of finite element method and verified by experiments. For the sake of uniform current distribution, windings must be transposed so to make the impedances of each strands same. The parallel HTS tapes were transposed between the pancakes via non-superconducting joints because it is hard to make transpositions inside the pancake windings. In order to measure current distribution, test windings are fabricated and experimented for both transposed and non-transposed windings. We compared test results with calculated ones.

1. 서 론

국내외에서 개발되고 있는 고온초전도 변압기는 그 권선의 형태에 따라서 크게 솔레노이드 형태와 팬케이크 형태로 나뉘어 질 수 있다. 세계적으로 진행되고 있는 고온초전도 변압기의 형태가 대부분 솔레노이드 형태임에 비하여 팬케이크 형태의 고온초전도 변압기의 연구가 진행되고 있는 곳은 그리 많지 않다. 이는 고온초전도 선재의 특성으로 인하여 팬케이크 형태의 권선에서는 선재의 성능 저하 및 교류손실의 증가가 같은 용량의 솔레노이드 권선과 비교해 볼 때, 상대적으로 매우 커지므로 결과적으로 부피의 증가와 효율의 감소를 가져오기 때문이다.

그러나 변압기의 용량과 정격전압이 증가할수록 권선에서의 고전압 분배나 절연의 측면에서 솔레노이드 형태보다 더 특성이 우수한 팬케이크 형태의 권선이 더 유리해지며, 또한 최근 BSCCO 선재의 성능이 매우 우수해짐에 따라 국내에서도 팬케이크 형태의 고전압 변압기가 개발 중이다. 또한 변압기의 용량이 증가함으로 선재에 대전류가 흐르게 되는데, 대전류를 흘리기 위해 병렬선재를 사용하게 된다. 그러나 병렬선재를 사용할 경우 각 선재의 약간의 임피던스 차이가 발생하게 된다. 초전도 선재는 저항이 0이기 때문에 약간의 임피던스 차에 의해 불균일한 전류분류가 나타날 수 있다. 심지어 전체전류 방향에 반대가 되는 전류가 나타나 수도 있다. 본 논문에서는 불균일한 전류분류 문제를 해결하기 위해 전위를 하였다.

본 논문에서는 위 변압기의 저압측 권선에 사용될 시험용 병렬권선을 설계하고 고온초전도 병렬권선에서의 전류분류를 해석하였다. 이를 검증하기 위해 실제 ASC사의 BSCCO-2223 선재를 사용하여 병렬권선을 제작하였다. 그리고 제작된 병렬권선으로 전류분류 시험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 권선사양

전류분류 해석에 사용될 병렬권선의 간단한 사양을 표1에 나타내었다.

이 전류분류에 사용될 권선은 일반 고압 변압기에서도 많이 사용되는 형태인 팬케이크 형태의 권선을 사용하며 절선의 편의를 위해 두층의 권선이 하나의 보빈에 감기게 되는 더블 팬케이크 형태의 권선을 한다. 전체 권회수 및 적절한 전류분류를 위하여 보빈의 개수를 네 개로 분할하였다. 각 권선의 배치는 교호배치 형태를 취하게 된다.

Table 1. 병렬권선 사양
 Table 1. Specification of The Parallel Winding

Specification	Value
No. of turns	28 [turns]
Length of wire	63.024 [m]
Outer dia. of winding	150 [mm]
Inner dia. of winding	208.24 [mm]

2.2 권선형태 및 전위

대용량화됨에 따라 전류용량이 고온초전도 선재 한 가닥의 임계전류값을 넘게 될 수 있다. 본 논문에서는 대전류를 흘리게 되는 경우를 고려하여 4개의 고온초전도 선재를 병렬로 사용한다. 이렇게 고온초전도 선재를 병렬로 권선하는 경우, 각 선재 양단에서의 임피던스의 차이에 의하여 전류의 불평형이 발생하게 된다. 팬케이크 형태의 권선에서는 솔레노이드 형태에 비하여 임피던스의 차이가 매우 적게 되나, 고온초전도 선재와 같이 저항성분이 거의 없는 경우에는 약간의 임피던스 차이에 의하여 매우 큰 전류의 불평형이 발생하게 된다. 이러한 불평형 전류는 전체 임계전류의 감소를 가져오므로 반드시

시 전위를 하여 가능한 임피던스의 균형을 맞추어야 한다.

더블 팬케이크 권선의 내부에서는 전위를 하기가 매우 어려우므로 본 논문에서는 저압측 4병렬 권선을 도체수와 같이 4개의 더블 팬케이크로 나누고, 각 더블 팬케이크의 연결 시 3회 전위를 행하는 방법을 택하였다. 그림 1에 전류분류를 위한 권선의 전체적인 모습을 나타내었다.

Table2. 각 보빈의 권 회수

Table2. Number of Turns of Windings of Each Bobbins

	tape 1	tape 2	tape 3	tape 4
Bobbin 1	28.75	28.25	27.75	27.25
Bobbin 2	28.25	27.75	27.25	28.75
Bobbin 3	27.75	27.25	28.75	28.25
Bobbin 4	27.25	28.75	28.25	27.75
Total	112	112	112	112

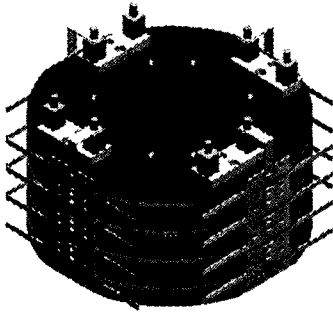


Fig.1. 병렬권선의 전체 구조

Fig.1. Total Configuration of The Parallel Windings

총 권회수가 112회이므로 권선은 권회수가 28회인 더블팬케이크 권선 4개로 구성된다. 각 권선은 4개의 도체가 병렬로 권선되어 있으므로, 각 도체를 보빈의 외경에서 90° 간격으로 배열된 단자에 접합하였다. 같은 방법으로 구성된 4개의 더블팬케이크 권선은 전체 권선을 조립할 때, 90°씩 회전시켜 단자를 상전도 접합하여 병렬 도체의 전위를 구성하였다. 병렬권선이 모두 권선된 후 병렬 도체 각각의 권회수를 112회로 맞추기 위해서 표 2에서 나타낸 바와 같이 각각의 권회수를 조절하여 단자에 접합하였다. 권선을 위한 보빈은 베이클라이트로 제작하였으며 권선의 턴 간 절연은 선재에 캡톤 필름을 3층 wrapping하여 사용하였다.

2.3 전류분류 해석

본 논문에서는 전류분류 해석을 위한 임피던스 계산은 FEM으로 하였다. 먼저 병렬권선을 모델링한 후 각 선재에 전류를 흘려서 그 때 경계내에서의 에너지를 구했다. 구하여진 에너지를 식 1에 적용하여 자기 인덕턴스와 상호인덕턴스를 구한다. 그림 2는 전위하지 않은 경우와 전위한 경우의 인덕턴스 비교를 나타내고 있다.

$$L_i = 2W_i, \quad M_{ij} = W_{ij} - W_i - W_j \quad (1)$$

계산되어진 인덕턴스를 식2, 식3에 적용하여 각 선재

에 흐르는 전류를 해석해 보았다. 전류분류해석은 실제 시험에서 사용되어질 Shunt저항을 고려해서 계산되었다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 전위하지 않은 경우보다 상당히 균일한 인덕턴스를 얻을 수 있었다. 그림 3은 전위하지 않은 경우와 전위한 경우 각 선재에 흐르는 전류를 나타내고 있다.

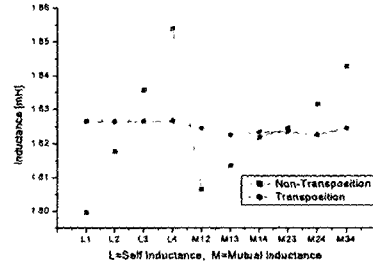


Fig.2. 전위하지 않은 경우와 전위한 경우 인덕턴스 비교

Fig.2. Comparison between The Inductances of Non-Transposed Windings and Transposed ones

$$Z = -j\omega L + R \quad (2)$$

$$I = Z^{-1} \times V \quad (3)$$

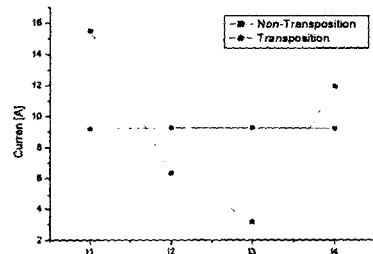


Fig.3. 전위하지 않은 경우와 전위한 경우 전류 비교

Fig.3. Comparison between The Currents of Non-Transposed Windings and Transposed ones

2.3 전류분류 시험

고온초전도 병렬 권선의 전류분류 해석을 검증하기 위해서 시험용 권선을 설계 제작하였고 제작되어진 고온 초전도 병렬 권선은 극저온(77K) 상태에서 시험 하였다. 병렬권선의 시험 사진을 그림 4에 나타내었다.

먼저 하나의 더블 팬케이크 권선에 대한 전류분류를 측정해 보았다. 교류 전류를 서서히 흘려주며 각 Shunt 저항을 통해 초전도 병렬선재 각각에 흐르는 전류를 측정하였다. 그림 5는 하나의 권선에서 측정된 전류값과 해석되어진 전류값의 비교를 나타내고 있다. 병렬선재 각각에 흐르는 전류의 크기가 상당히 불균일하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

다음은 전위되어진 네 개의 더블 팬케이크 권선에 대한 시험을 하였다. 그림 6은 해석되어진 전류파형과 측정된 전류분류 파형을 나타내고 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 수치해석을 통해서 해석되어진 전류 파형과 시험을 통해 측정된 전류 파형이 크거나 위상이 거의 같고 상당히 균일한 전류분류가 나타남을 알 수 있었다. 그림 7은 측정된 전류값과 해석되어진 전류값의 비교를 나타

내고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 각 선재의 전류가 9A~9.5A 사이에 고르게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

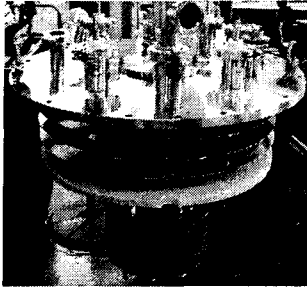


Fig.4. 냉동조 Top Plate에 부착된 시험 권선
Fig.4. Test Windings Attached to The Top Plate of The Cryostat

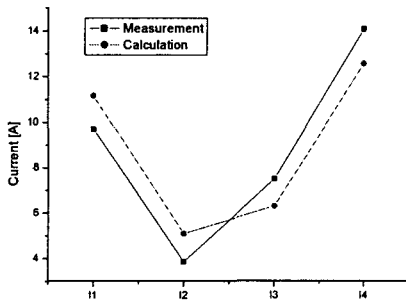
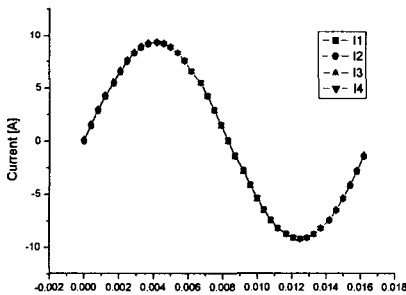
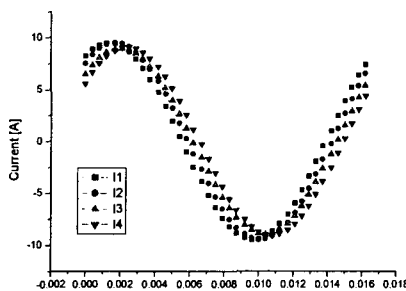


Fig.5. 하나의 권선에서 해석된 전류와 측정된 전류 비교
Fig.5. Comparison between Calculated Current and Measured Current in A Winding



a. 해석된 전류분류 파형
a. Wave Form of Calculated Current



b. 측정된 전류분류 파형
b. Wave Form of Measured Current

Fig.6. 네 개의 권선에서 전위된 전류분류 파형
Fig.6. Wave Form of Current Distribution with Transposition in Total Windings

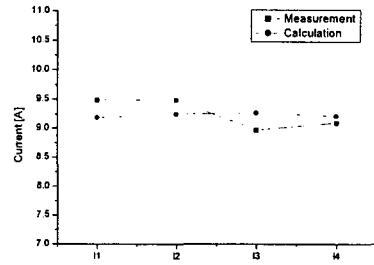


Fig.7. 네 개의 권선에서 해석된 전류와 측정된 전류 비교
Fig.7. Comparison between The Currents of Calculation and Measurement in Total Windings

3. 결 론

본 논문에서는 팬케이크 형태의 권선을 갖는 시험용 고온초전도 병렬권선을 설계하고 병렬권선에 대한 전류 분포현상을 해석하였다. 또한 해석결과를 검증하기 위해 ASC사의 BSCCO-2223 선재를 사용하여 병렬권선을 제작 및 시험하였다. 초전도 선재의 특성에 의하여 발생할 수 있는 전류 불균형을 최소화하기 위하여 병렬 선재 간에 전위를 하였으며, 제작된 병렬권선을 통해 균일한 전류분류를 얻었다. 본 연구는 대용량의 초전도 변압기 뿐만 아니라 고온초전도 응용에서 실제 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김우석, 김성훈, 최경달, 주형길, 홍계원, 한진호, 박정호 송희석 한송엽, "전위를 고려한 고온초전도 변압기용 병렬권선의 설계 및 제작," KIASC Conference 2003, pp.203-205, 2003
- [2] 이희준, 차귀수, 이지광, 최경달, 류경우, 한송엽, "10kVA 고온초전도변압기의 특성해석 및 제작," 한국초전도·저온공학회논문지 제2권, 제2호, pp.37-43, 2000
- [3] 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도변압기," 대한전기학회 논문지, 제50B권, 제2호, pp.65-72, 2001
- [4] 김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원, "1MVA 고온초전도 변압기 개념설계," KIASC Conference 2002, pp.233-236, 2002
- [5] M.Iwakuma, K.Nishimura, K.Kajikawa, K.Funaki, H.Hayashi, K.Tsutsumi, "Current Distribution in Superconducting Parallel Conductors Wound into Pancake Coils" IEEE Transaction on Applied Superconductivity, VOL. 10, No.1, March 2000