

대용량 초전도 변압기 권선용 다중선재의 특성

김우석*, 이승목*, 황영인**, 장데레사**, 이희균**, 홍계원**, 최경달**, 한송업*

*기초전력연구원, **한국산업기술대학교

Characteristics of Multiply Laminated HTS tapes for the Windings of Large Power Superconducting Transformers

W.S. Kim*, S. Lee*, Y.I. Hwang**, T. Chang**, H.G. Lee**, G.W. Hong**, K.D. Choi**, and S.Hahn*

*Electrical Engineering and Science Research Institute, **Korea Polytechnic University

Abstract - A high temperature superconducting power transformer gets its advantages over the conventional ones when the rated capacity of the HTS transformer becomes 30 MVA or more. The standard capacity of the recent 154 kV/ 22.9 kV power transformer is 3 phase 60 MVA in Korea which means that the rated current of the secondary becomes more than 1,500 amps. Considering the current capacities of the HTS wires being developed recently, it is inevitable to use the HTS wires in parallel in order to be applied to the power transformer. But nonuniform distribution of currents and large AC losses are major problems in parallel HTS windings setting aside the difficulties of making parallel windings. To solve these problems, several kinds of multiply laminated HTS wires were fabricated and tested for the application of these multiple wire to an HTS power transformer. Test results were compared with that of each other and the best were selected for the application to an HTS power transformer.

1. 서 론

최근에 국내외에서 개발되고 있는 고온초전도 응용 전력기기의 추이를 살펴보면 점차적으로 고전압화, 대용량화되어 가고 있음을 알 수 있다. 이는 대표적인 고온초전도 전력응용기기인 초전도변압기, 한류기, 케이블, 모터 등이 연구의 단계를 지나서 실용화, 상용화에 그 목표를 두고 개발이 진행되고 있음을 나타낸다. 따라서 각 분야의 초전도 전력기기들은 전력계통에 실제 투입될 수 있는 조건을 개발에 반영하고 있는 실정이며, 그 중 가장 가혹한 운전 조건을 만족하여야 하는 것이 바로 초전도 변압기이다[1].

초전도 변압기의 경우 강한 교류 누설차장이 초전도권선에 직접 인가될 뿐 아니라, 송배전급 전압을 감당하여 하며, 증가는하는 전력수요에 따라 용량이 점점 증가하고 있으므로 대전류가 인가될 수 있어야 한다. 따라서, 초전도 변압기는 고자장, 고전압, 대전류의 가혹한 환경에서 초전도상태를 유지해야 하는 어려움을 극복하여야 한다.

고온초전도 변압기가 일반 변압기에 비하여 경제성을 가지기 위해서는 정격용량이 적어도 30 MVA 이상이 되어 비로소 경제성을 가질 수 있다고 알려져 있다[2]. 또한 현재 154 kV/22.9 kV 변압기의 표준용량은 3상 60 MVA이며, 정격운전시 2차측 상전류는 1,500 A가 넘는다. 지금까지 개발된 고온초전도 선재의 성능을 감안할 때, 단일 선재를 통해 훌릴 수 있는 교류전류는 최대 100 A를 넘기 힘든 실정이다. 따라서 초전도 변압기나 케이블과 같이 대전류를 흘려야 하는 초전도 전력기기에

서는 여러 선재를 병렬로 결합하여 사용하는 것이 불가피하다. 그러나 이러한 병렬 권선의 경우 병렬의 수가 증가할수록 권선방법에 어려움이 발생하고, 병렬 선재간의 통전전류의 불균형을 해소하기 위한 전위의 과정도 매우 복잡하게 된다. 더구나 초고압 변압기에서 채택할 수밖에 없는 디스크 권선의 경우 십 수 가닥의 고온초전도 선재를 전위시켜 가며 병렬로 권선하는 것은 거의 불가능한 것으로 생각된다.

본 논문에서는 이러한 문제에 대한 해결책의 일환으로 대전류를 인가할 수 있도록 여러 선재를 권선 작업 전에 미리 결합시켜 다중선재를 제작하는 방법을 제안하였다. 중소규모 배전용 초전도 변압기에 사용될 수 있는 전류용량인 500 A 급의 고온초전도 다중선재를 여러 가지 형태로 제작하고, 각각의 특성시험을 통하여 가장 적합한 형태의 다중선재를 선정하였다.

2. 대전류용 고온초전도 다중선재

대전류 인가를 위해 고온초전도 선재를 병렬로 사용할 때 전류의 불균형 분포 및 교류손실 등이 문제가 되는 경우는 주로 권선을 하여 사용하는 경우이다. 권선에서는 각 병렬 선재간의 임피던스의 불균형이 심해지므로 이를 맞추기 위해서 초전도 변압기의 경우 선재를 반드시 전위하여 사용하게 된다. 레이어 권선을 채택하는 초전도 변압기의 경우에는 권선 도중 수차례의 전위를 수행하는 것이 일반적이며[3], 디스크 권선의 경우에는 권선 도중의 전위에 어려움이 있으므로 디스크와 디스크를 접합하는 부분에서 전위를 시도하기도 한다[4].

그러나 이 두 가지 경우 모두 선재의 병렬 수가 증가할수록 매우 복잡하고 어려워지며, 완벽한 전위를 구성하는 것이 불가능하게 된다. 따라서 본 논문에서는 권선 전에 미리 전위된 고온초전도 다중선재를 제작하여 권선 시의 편의와 보다 균형적인 전류분포를 이루고자 한다. 본 논문에서는 배전용 초전도 변압기에 적당한 전류용량인 500 A급의 전류를 인가할 수 있는 병렬 선재의 샘플을 제작하는 것을 목표로 하였다.

2.1 대전류용 고온초전도 다중선재의 제작

500 A급 대전류용 고온초전도 다중선재의 제작을 위
표 1. 사용된 고온초전도 선재의 사양

specification	value
Thickness	0.21 mm
Width	4.1 mm
Critical current density	13.5 kA/cm ²
Critical current	126 A
Max. stress	75 MPa
Max. strain	0.15 %
Min. bending Dia.	100 mm

표 2. 제작된 고온초전도 샘플의 사양

Samples	Insulation	Transposition	Length	Number of Conductor
Sample A	No	No	100 cm	8
Sample B	No	Yes	100 cm	8
Sample C	Yes	No	100 cm	8
Sample D	Yes	Yes	100 cm	8

해서 8개의 고온초전도 선재를 적층하여 사용하였다. 사용된 고온초전도 선재의 임계전류는 각 100 A 이상이지만, 적층효과 및 권선시 전류용량 감소를 고려하여 8개의 고온초전도 선재를 사용하는 것으로 결정하였다. 사용된 고온초전도 선재의 사양을 표 1에 나타내었다.

실험에 사용된 대전류용 고온초전도 다중선재의 형태는 크게 4가지로 분류할 수 있다. 각 선재 간 절연의 유무와 전위의 유무의 조합에 의한 4가지 형태의 고온초전도 다중선재 샘플을 모두 제작하였으며, 각 샘플의 재현성을 보장하기 위하여 같은 형태의 다중선재를 각 3 샘플씩 제작하였다. 제작된 고온초전도 다중선재 샘플의 길이는 모두 1 m로 제작하였으며 각 샘플의 사양을 표 2에 나타내었다.

2.2 고온초전도 다중선재의 특성해석

표 1에서 주어진 고온초전도 선재의 임계전류는 외부자장이 가해지지 않은 자기 자장하에서의 값이며, 실제 고온초전도 선재의 임계전류의 크기는 선재가 경험하는 자기장에 크게 영향을 받게 된다. 특히 테이프 형상을 가지고 있는 고온초전도 선재는 선재의 면에 수직방향으로 가해지는 차속밀도에 의해 급격히 임계전류가 감소하는 특성을 보인다[5]. 본 논문에서 제안하는 바와 같이 여러 선재를 적층해서 사용하는 경우에는 인접한 선재에 흐르는 전류에 의해 발생한 자장이 영향을 주게 되므로, 제작된 고온초전도 다중선재의 임계전류밀도는 단일선재의 임계전류밀도에 비하여 감소하게 된다. 이를 예측하기 위하여 제작된 다중선재의 단면에 대하여 2차원 정자장 해석을 수행하였으며, 이 해석 결과에 의하여 임계전류의 크기를 예측하기 위해 임계전류의 수직방향 자속밀도의 영향을 나타내는 그래프에 부하곡선을 그려 임계전류의 값을 예측하였다. 그림 1에 제작된 샘플의 단면에서의 정자장 해석 결과를 나타내었고, 그림 2에 임계전류의 값을 예측하기 위한 전류-자장 관계 그래프를 나타내었다.

그림 1, 2 는 모두 2차원 해석에 의한 결과이므로 선재간 절연이나 전위의 효과는 따로 해석이 불가능하지만, 샘플 선재의 임계전류 자체를 예측하는 방법으로는 사용 가능하다고 할 수 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 8개의 고온초전도 선재를 그림 1과 같은 형상으로 적층한 다중선재의 임계전류는 656 A ~ 880 A 정도가 나올 것으로 예측할 수 있다.

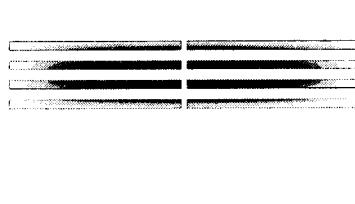


그림 1. 제작된 고온초전도 다중선재의 단면에서의 정자장 해석결과

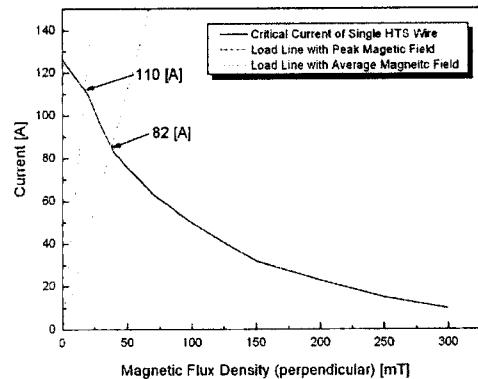


그림 2. 임계전류 예측을 위한 전류-자장 관계

3. 고온초전도 다중선재의 특성시험

고온초전도 다중선재의 특성을 파악하기 위해서는 권선의 형태로 제작하여 특성시험을 수행해야 하지만, 본 논문에서는 그보다 이전 단계로 제작된 고온초전도 다중선재의 샘플을 직선의 형태로 고정하고 임계전류 및 교류손실을 측정하였다. 그림 3에 시험에 사용된 샘플의 특성시험 전의 모습을 나타내었다.

4가지 서로 다른 형태의 고온초전도 다중선재를 각각 3개씩의 동일한 샘플을 제작하였으며, 각 샘플에 직류전류를 인가하면서 양단 전압을 측정하여 임계전류를 구하였다. 임계전류를 구하기 위한 전압은 그림 4에 나타낸 바와 같이 바깥쪽으로 드러난 4개의 선재에 대하여 8개의 전압법을 구성하여 측정하였다. 각각 측정된 4개의 전압의 크기는 인가한 직류 전류의 크기에 따라서 같은 값으로 변화하였으므로, 전류 도입 시 직류전류의 불균등 분포는 일어나지 않은 것으로 판단되었다. 그림 5에 임계전류 시험의 결과를 나타내었으며, 측정된 임계전류의 결과를 표 3에 나타내었다.

임계전류의 측정결과는 농밀한 형태의 다중선재라도 샘플별로 조금씩 다른 값을 보였으나, 이는 제작상의 오류나 사용된 고온초전도 선재의 부분적인 성능차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 측정된 임계전류값은 앞서 계산된 임계전류 예측 범위에 잘 들어가는 것을 알 수



그림 3. 세자된 다중선재 샘플의 특성시험 전의 모습

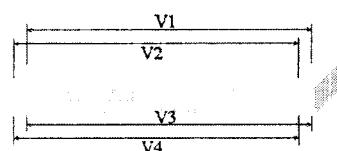


그림 4. 전압측정을 위한 전압탭의 구성

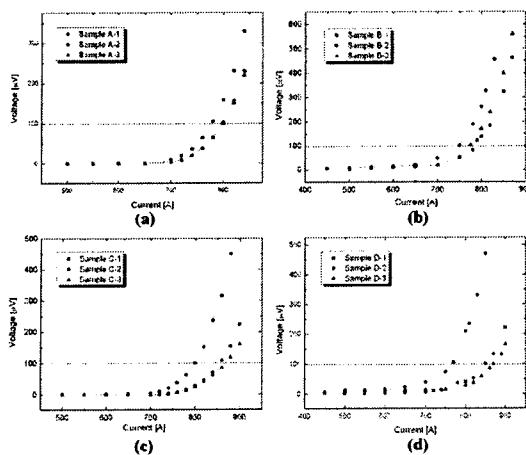


그림 6. 제작된 고온초전도 다중선재의 임계전류 시험 결과 (a) sample A (b) sample B (c) sample C (d) sample D

있으며, 고온초전도 선재에 인가되는 수직 자속밀도의 최대값으로 추정한 656 A의 임계전류에 비하여 전체적으로 큰 값을 보이는 이유는 정자장 해석에서 고려하지 못한 고온초전도 선재의 자기차장 폐효과에 기인한 것으로 생각된다. 표 3에 정리된 임계전류 측정 결과를 보면 자기차장하에서의 임계전류특성은 선재간 절연이 되어 있는 Sample C와 Sample D가 거의 비슷한 정도로 우수한 것을 알 수 있다. 이는 짧은 고온초전도 다중선재가 권선화 되어 있지 않고 자기차장하에 있는 경우에는 선재간의 전위는 임계전류특성에 큰 영향을 주지 않으며 각 선재간의 절연이 임계전류특성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

동일한 샘플들 중 가장 특성이 좋은 샘플을 각 형태별로 하나씩 선정하여 교류손실을 측정하였다. 인가전류를 0에서부터 700 A까지 증가시키며 샘플별로 같은 조건에서 교류손실을 측정하였으며, 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 교류손실의 측정 결과에 의하면 직류 임계전류의 경우와 마찬가지로 역시 선재 간 절연이 교류손실에도 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 다만, 선재간 절연을 하지 않은 경우에는 선재간의 전위가 오히려 교류손실을 약간 증가시키는 것을 알 수 있으며, 선재간의 절연을 한 경우에는 각 선재를 전위함으로써 저전류 부근에서 약간의 교류손실 감소 효과를 보이는 것을 알 수 있었다. 실제로 고온초전도 병렬선재의 경우에 선재간의 전위가 특성에 영향을 주는 환경은 외부자기장이 인가되는 경우나 혹은 권선으로 제작되어 임피던스의 차이가 심하게 나타나는 경우이므로, 이번 논문에서 수행한 짧은 길이의 샘플 시험에서는 그 영향이 많이 나타나지 않은 것으로 판단할 수 있다.

표 3. 측정된 샘플별 임계전류 결과

Samples	Critical Current
Sample A-1	780 [A]
Sample A-2	800 [A]
Sample A-3	800 [A]
Sample B-1	790 [A]
Sample B-2	750 [A]
Sample B-3	775 [A]
Sample C-1	860 [A]
Sample C-2	800 [A]
Sample C-3	865 [A]
Sample D-1	850 [A]
Sample D-2	770 [A]
Sample D-3	870 [A]

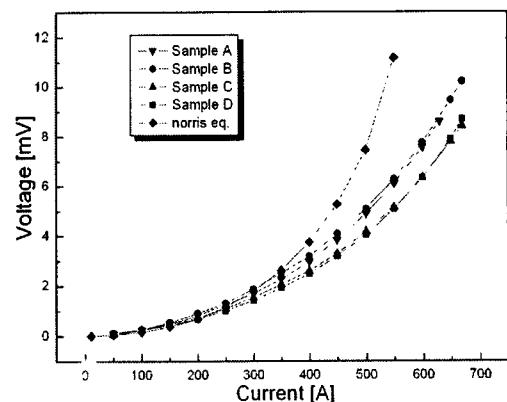


그림 6. 제작된 고온초전도 다중선재 샘플의 인가전류에 따른 교류손실 측정결과

4. 결 론

최근 고전압화, 대용량화되어 가고 있는 고온초전도 전력기기의 개발에 따라 대전류를 인가할 수 있는 고온초전도 권선의 필요성이 점차적으로 증대되고 있다. 특히 고온초전도 전력용 변압기와 같이 고전압, 고자장, 대전류의 가혹한 조건에서 운전하여야 하는 기기의 경우 대전류를 안정적으로 인가할 수 있는 병렬권선의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 고온초전도 전력용 변압기등의 권선에 사용될 수 있는 고온초전도 다중선재의 샘플을 각 형태별로 제작하고 특성시험을 통하여 비교 분석하여 적용가능성을 검토하였다. 시험결과에 의하여 짧은 다중선재의 경우에는 선재간의 절연이 선재의 성능향상에 도움을 주는 것을 알 수 있었으며 선재간의 전위효과는 본 논문에서의 경우와 같은 샘플 시험에서는 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 추후 이러한 다중선재를 사용하여 권선을 구성하게 되면 선재간 전위의 효과가 보다 더 분명하게 나타날 것으로 예상된다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformer," IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp.43-49, July, 1997
- [2] S.H. Kim, W.S. Kim, S. Hahn, K.D. Choi, H.G. Joo, and G.W. Hong, "Feasibility study of an HTS transformer," 한국초전도저온공학회 학술대회, pp.229-232, February, 2002
- [3] W. Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV single-phase model for a 3MVA HTS power transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1578-1581, March, 2001
- [4] W.S. Kim, S. Hahn, K.D. Choi, H.G. Joo, and G.W. Hong, "Design of a 1 MVA high T_c superconducting transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp.2291-2293, June, 2003
- [5] S.H. Kim, W.S. Kim, W.G. Min, C.B. Park, S.J. Lee, J.T. Kim, D.K. Lee, K.D. Choi, H.G. Joo, G.W. Hong, J.H. Han, and S. Hahn, "Analysis of perpendicular magnetic fields on a 1 MVA HTS transformer windings with flux diverters," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp.932-935, June, 2004