

다층 고온초전도 전력케이블의 설계 파라미터를 통한 전류분류 해석

이중화*, 임성훈*, 고석철*, 박식*, 강형곤**, 한병성*

전북대학교 전자정보공학부*, 전북대학교 반도체물성 연구센터**

Analysis of Current Distribution with Design Parameters of HTS Cable with Multi-Layer

Jong-Hwa Lee*, Sung-Hun Lim*, Seokcheol Ko*, Sig park*, Hyeong-Gon Kang**, Byong-Sung Han*
Jeonbuk National Univ

Abstract

One important issue in the design and the optimization for conductor of a superconducting cable is the control of the current distribution flowing at each layers. In this paper, we calculated the self inductance of each layer and the mutual inductance between two layers from the magnetic field energy and investigated the effects of design parameters on the self and mutual inductances for 4-layer conductors with transport current distribution at each layer.

Key Words : Superconducting cable, Self inductance, Mutual inductance, magnetic field energy

1. 서 론

산업화와 함께 전력수요의 증가는 기존 전력 케이블이 극복해야 할 문제를 야기시켰고 이에 대한 방안으로 고온초전도 케이블 개발에 대한 연구를 가속화시키게 되었다. 고온초전도 전력케이블은 다층구조상, 각 층의 저항성분과 인덕턴스값의 차이로 인한 층간 전류 불균일이 발생되고 각 층의 인덕턴스가 달라 송전 전류도 다르게 되지만 대전류 통전이 가능하므로 동일용량을 송전 할 경우 기존의 전력케이블보다 저전압으로 대전류 대용량 송전이 가능하다[1-3].

본 논문에서는 다층구조의 고온초전도 케이블을 설계하여 권선방향에 따른 각층의 자기 인덕턴스 및 층간의 상호 인덕턴스의 변화를 조사하였고, 이로부터 각 층의 전류변화를 살펴 보았다. 향후 설계 파라미터에 따른 자계분포 변화를 통해 교류손실 감소와 균등전류분배를 위한 방안을 마련하고자 한다.

2. 본 론

2.1 구조 및 등가회로

고온초전도 선재를 이용하여 대전류 송전을 위해서는 그림 1과 같이 동심 축을 갖는 틀에 수십 개의 테이프를 병렬로 연결한 테이프 선재층을 여러개로 하여 다층구조를 갖도록 하였다.

다층으로 권선된 고온초전도 케이블은 각 층의 자기 인덕턴스와 층간의 상호 인덕턴스 및 각층의 전원단과의 접촉저항을 포함한 교류손실을 반영한 등가저항으로 구성된 그림 2와 같은 등가회로로 모델링할 수 있으며 등가회로에 대한 방정식으로 부터 설계된 파라미터에 따른 전류분류를 분석할 수 있다[4].

그림 2에서 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스는 식 (1), (2)를 이용하여 계산할 수 있고 설계한 케이블로부터 계산한 인덕턴스를 이용하여 4층의 고온초전도 케이블의 회로방정식을 식 (3)과 같이 전개할 수 있다[4]. 이때 식 (3)의 해를 계산함으로써 고온초전도 케이블의 층별 전류분류값을

구할 수 있다.

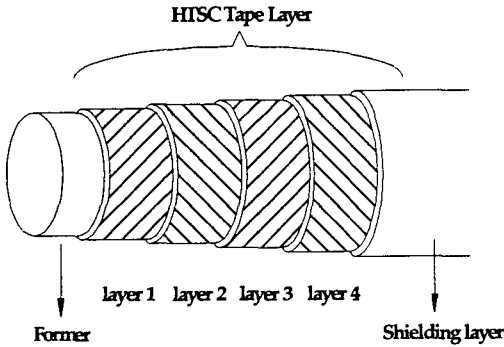


그림 1. 4층 구조로 권선된 고온초전도 케이블 구조.

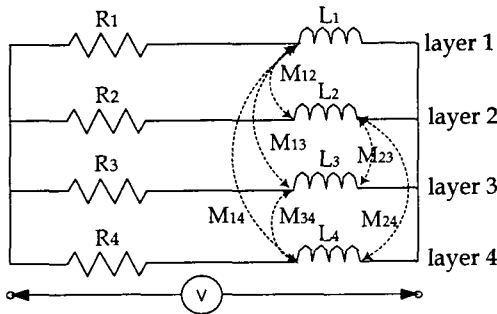


그림 2. 4층 고온초전도 케이블을 해석을 위한 회로.

$$L_i = L_{lg} \left(\mu_o \frac{\pi r_i^2}{l_{pi}^2} + \mu_o \frac{\ln \left(\frac{D}{r_i} \right)}{2\pi} \right) \quad (1)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = L_{lg} \left(\frac{a_i a_j \mu_o}{l_{pi} l_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r_i} \right) \right) \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & M_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \cdots & L_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \cdot \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 전류분류 계산

케이블의 설계파라미터에 따라 각 층의 자기인덕턴스를 포함한 층간의 상호인덕턴스값이 다르게 되며, 상이한 값들로 인해 불균일한 전류분류요인이 된다. 본 논문에서는 설계파라미터 중에서도 각 층의 권선방향에 따른 인덕턴스 변화와 이에 따른 각 층의 전류분류를 조사하였다. 전류분류 계산을 위한 케이블의 설계파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 전류분류 계산을 위한 다층고온초전도 사양.

케이블 길이	1000 m
권선방향	+-+ or ++++
권선피치	320 mm
권선틀 직경	40 mm
초전도 테이프 두께	0.18 mm
필라멘트 영영의 두께	0.12 mm
절연층 두께	0.1 mm

그림 3은 권선방향에 따른 층별 자기 인덕턴스를 보여준다. 권선방향에 관계없이 바깥층으로 갈수록 자기인덕턴스가 감소되는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 케이블의 전류분류가 바깥층으로 갈수록 증가되는 것을 그림 6, 7로부터 확인 할수 있다. 이는 케이블의 전체 임계전류가 최바깥층으로부터 결정되므로 케이블의 송전능력 저하를 가져오게 되므로 이를 고려한 설계가 이루어져야 할것으로 사료된다.

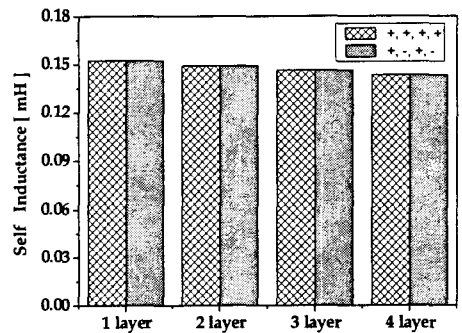


그림 3. 권선방향에 따른 층별 자기인덕턴스.

그림 4와 5는 권선방향에 따른 상호인덕턴스값들의 변화를 보여준다. i층에 흐르는 전류로 인한 j층에 유기되는 자계로부터 계산된 상호인덕턴스(M_{ij})

값과 j 층에 흐르는 전류에 의해 i 층에 유기되는 자계로부터 계산된 상호인덕턴스(M_{ji})값의 차이가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이는 중심에 적층된 다층 케이블의 비대칭적인 구조로 기인한 것이며 식 (2)에서 유도한 상호인덕턴스는 적층된 전체층의 두께를 작게할 경우에만 성립됨을 입증하는 결과이다. 상호인덕턴스값은 권선방향을 반대로 한 경우(그림 4)가 권선방향을 같은 방향으로 한 경우(그림 5)에 상호인덕턴스값이 약간 감소됨을 비교할 수 있다.

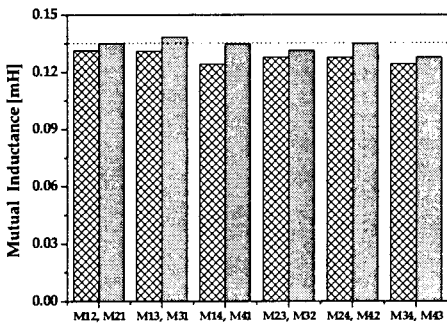


그림 4. 권선방향을 반대로 한 경우 상호인덕턴스

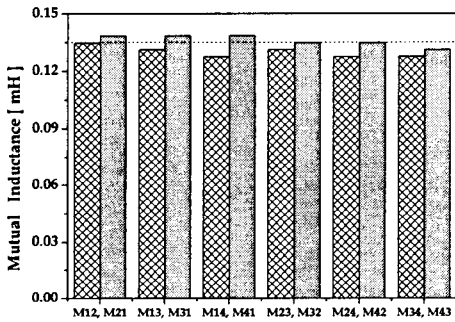


그림 5. 권선방향을 동일하게 한 경우 상호인덕턴스.

그림 6과 7은 이웃하는 두 층의 권선방향을 반대로 한 경우와 같은 방향으로 결선한 경우의 각 층에 흐르는 전류파형을 보여준다. 바깥층으로 갈수록 자기인덕턴스값이 작아짐으로 인해 바깥층으로 갈수록 층에 흐르는 전류크기가 증가되는 것을

확인할 수 있다. 반면에 권선방향을 반대로 한 경우에 각층에 흐르는 전류의 크기차이가 같은 방향으로 한 경우보다 감소되는 것을 그림 6과 7로부터 비교할 수 있다. 이로 볼 때 권선방향을 반대로 한 경우가 층간의 상호인덕턴스가 감소됨으로서 각층의 전류흐름의 균일성이 권선방향을 같은 방향으로 한 경우보다 향상되는 것으로 분석할 수 있다.

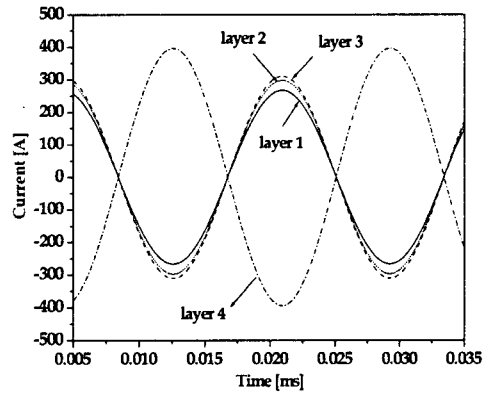


그림 6. 이웃하는 두층의 권선방향을 반대로 한 경우의 각 층의 전류 변화

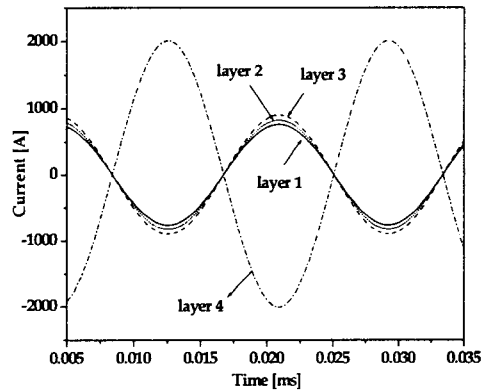


그림 7. 이웃하는 두층의 권선방향을 동일하게 한 경우의 각 층에 유기되는 축방향 자계 성분.

3. 결 론

본 논문에서는 다층고온초전도 케이블의 이웃하는 두 층의 권선방향을 반대방향으로 설계한 경우와 같은 방향으로 설계한 경우에 각 층의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 계산하여 비교하였다. 각 층의 전류분류의 균일성에 영향을 미치는 파라미터를 분석하고 이를 수치해석을 이용한 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

다층고온초전도 케이블의 각 층의 전류균일에 직접적인 영향은 각 층의 자기인덕턴스에 의해 좌우되었으며, 이때 각 층의 자기인덕턴스값에 차이가 발생할 경우, 층간의 상호인덕턴스크기를 작게 설계하는 것이 전류분류의 균일성이 향상됨을 본 논문으로부터 확인할 수 있었다.

향후 다층고온초전도 케이블의 균등전류분류에 영향을 미치는 파라미터를 분석하고자 하며 이에 따른 동전손실과 교류손실의 변화를 연구하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 한국전력연구원의 지원하에 전력산업기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] S. Kruger et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, pp. 833 - 836, 1999.
- [2] S. Nukoyama, et al., "Uniform Current Distribution conductor of HTS Power Cable with Variable Tape-Winding Pitches", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, pp. 1269-1272, 1999.
- [3] H. Noji, "AC Loss of a High-Tc Superconducting Power Cable Conductor", Supercond. Sci. Technol., Vol. 10, pp. 552 - 556, 1997.
- [4] Ji-kwang Lee and Guesoo Cha, "Magnetic Field and Magnetization Loss Calculation in an HTS Transmission Cable Considering the Axial Field Component of

SC Tape", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, pp. 1624-1627, 2002.