

피치길이와 결선방향에 따른 다층 고온초전도 전력케이블의 전류분류 분석

이종화, 임성훈*, 고석철, 박충렬, 한병성, 황시돌*
 전북대학교, 전북대학교 공업기술연구센터, 한국전력연구원*

Analysis of Current Distribution of Multi-Layer HTSC Power Cable due to Pitch length and winding direction

Jong-Hwa Lee, Sung-Hun Lim*, Seokcheol Ko, Chung-Ryul Park, Byoung-Sung Han, and Si Dole Hwang*
 Chonbuk National Univ.,

The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National Univ.*,
 Korea Electric Power Research Institute**

Abstract - Superconducting transmission power cable is one of interesting parts in power application using high temperature superconducting wire. One of important parameters in high-temperature superconducting (HTSC) cable design is transport current distribution because it is related with current transmission capacity and ac loss.

In this paper, the transport current and magnetic field distributions at conducting layers were investigated through the analysis of the equivalent circuit for HTSC power cable with shield layer. The transport current distribution due to the pitch length and winding direction was improved in case of HTSC power cable with shield layer.

접촉저항 및 교류손실을 반영한 등가저항을 포함한 그림 2와 같은 등가회로로 모델링 할 수 있으며 이를 이용하여 설계된 파라미터에 따른 각층의 전류분류와 자계분포를 분석할 수 있다[1].

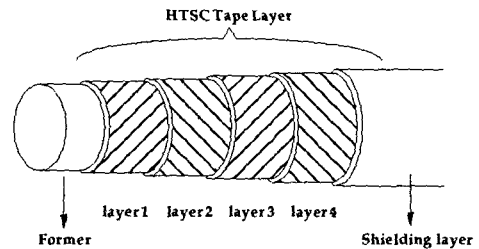


그림 1. 4층의 도체부와 1층의 차폐부를 갖는 고온 초전도 전력케이블의 구조

1. 서 론

증가하는 전력수급에 따른 기존 전력케이블의 한계를 극복하기 위한 해결책으로 고온초전도 전력케이블의 연구가 진행되고 있다. 대전류 송전을 위해서 다층 구조를 갖는 고온초전도 전력케이블은 각층 인덕턴스값의 차이로 인한 층간 전류 불균일이 발생되며 외부에서 자계가 인가되지 않아도 자체의 다른 선체에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 자계 영향으로 통전손실을 포함한 자화손실이 발생된다.

본 논문에서는 차폐층을 갖는 다층 고온초전도 전력케이블의 설계 파라미터에 따른 각층의 전류분류와 손실에 대하여 분석하였다. 발생하는 자계의 저장된 에너지로부터 자기 및 상호 인덕턴스를 계산하였고 계산된 인덕턴스로 구성된 등가회로와 전원전압, 부하단을 포함한 전원단자의 양끝단에서 접촉저항으로 구성된 회로방정식으로부터 피치길이와 결선방향에 따른 각층의 전류분류를 분석 하였다. 또한 자화손실과 통전손실이 전류분류에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 본 연구를 통하여 다층 고온초전도 케이블 제작시 각 층의 전류분류 향상을 위한 설계 자료로 활용하고자 한다.

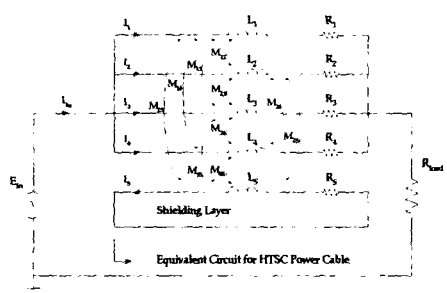


그림 2. 차폐층을 포함한 고온초전도 전력케이블의 등가 회로

2. 본 론

2.1 구조 및 등가회로

대전류 송전을 위해서는 그림 1과 같이 고온초전도 선재를 이용하여 동심 축을 갖는 틀에 수십 개의 테이프를 병렬로 일정한 피치를 갖도록 결선하여 여러층으로 적층된 구조를 갖는다. 본 논문에서는 4층의 도체부와 한층의 차폐부를 모델로 하였다.

다층으로 권선된 고온초전도 케이블은 각 층의 자기 인덕턴스와 층간의 상호 인덕턴스 및 각층의 전원단과의

그림 2에서 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스는 식 (1), (2)를 이용하여 계산할 수 있으며 설계한 케이블로부터 계산한 인덕턴스를 이용하여 다층고온초전도 케이블의 회로방정식을 식(3)과 같이 전개할 수 있다[1].

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

$$M_{ij} = M_{ji} = L_{ij} \left(\frac{a_i a_j \mu_0}{l_{ij} l_{ji}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r_i} \right) \right) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 I_1 \\ R_2 I_2 \\ R_3 I_3 \\ R_4 I_4 \\ R_5 I_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 통전손실 및 자화손실 계산

고온초전도 케이블에서 발생하는 교류손실은 주로 통전손실에 의해 발생되나 외부의 자계가 인가되지 않아야 일정한 피치로 권선된 구조상, 각층을 구성하는 선재는 나머지 층의 선재에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계로 인해 자화손실이 발생하게 된다. 이러한 손실은 고온초전도 케이블 제작시 송전전력 용량과 효율에 직접적인 관련이 되므로 이를 고려한 설계가 이루어질 필요가 있다. 각 층에서 발생하는 통전손실은 식 (4)로 표현되는 노리스 식을 이용하여 계산할 수 있으며, 이때 통전손실 계산을 위한 i 층의 전류는 식 (5)로부터 얻을 수 있다. 또한 전체 통전손실은 식(6)과 같이 각 층의 통전손실의 합으로 계산할 수 있다.

$$Q_{ci} = \frac{\mu_0 f \cdot I_{ci}^2}{2\pi} [(2 - F_i) + F_i + 2(1 - F_i) \ln(1 - F_i)] \quad (4)$$

$$F_i = \frac{I_{pi}}{I_{ci}} \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_j Q_{ci} \quad (6)$$

여기서, I_{pi} 는 i 층의 피크전류를, I_{ci} 는 i 층의 임계전류를 나타낸다.

고온초전도 케이블에서 발생하는 교류손실로서 통전손실외에 선재의 축방향 성분의 자계의 영향을 받게 되는 자화손실이 발생하게 된다. 자화손실도 통전손실과 마찬가지로 각층에서 발생하는 손실의 합으로 계산할 수 있다.

또한 선재의 권선방향에 직각인 자계성분을 이용하여 각층의 자화손실을 계산할 수 있으며, 발생하는 자화손실은 판모형을 이용한 공식에 의해 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{mi} = \frac{2 \cdot f \cdot B_{\perp}^i}{\mu_0} \frac{B_i}{3} S_i \quad \beta_i < 1$$

$$= \frac{2 \cdot f \cdot B_{\perp}^i}{\mu_0} \left(\frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^3} \right) S_i \quad \beta_i > 1 \quad (7)$$

여기서 S_i 는 i 층의 면적, J_{ci} 는 고온초전도 테이프의 임계전류 밀도, b 는 테이프 두께의 절반을 나타내며 β_i 는 식 (8)과 같이 정의 된다.

$$\beta_i = \frac{B_{\perp}^i}{\mu_0 J_{ci} b} \quad (8)$$

따라서, 케이블 전체의 자화손실은 각 층에서 발생하는 자화손실의 합으로 식 (9)과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_m = \sum_i Q_{mi} \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

다층 고온초전도 전력케이블의 전류분류 계산을 위한 설계사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 다층 고온초전도케이블 설계 사양

테이프 임계전류	50 A
권선층 직경	40 mm
테이프두께 [초전도체+Ag]	0.18 mm
필라멘트 두께 [초전도체]	0.12 mm
절연층 두께	0.1 mm

3.1 피치길이 및 결선방향에 따른 전류분류 분석

설계 파라미터에 따른 전류분류에 대한 분석으로 각 결선방향의 조합에 의해 피치길이 변화를 일정 범위 안에서 주었을 때 각층의 전류분류를 분석하였다.

각 결선방향에 의해 피치길이를 0 [m]에서 3.0 [m]까지 0.1 [m]씩 증가시켜 각각의 피치에서 각 층의 전류분류를 조사하였다. 16가지의 결선방향의 조합 중 3가지 결선방향인 경우(+++-, +-+-, +---)에만 피치길이 증가에 따라 설정된 피치범위에서 통전부의 최외각 층이 임계전류를 넘지 않았다.

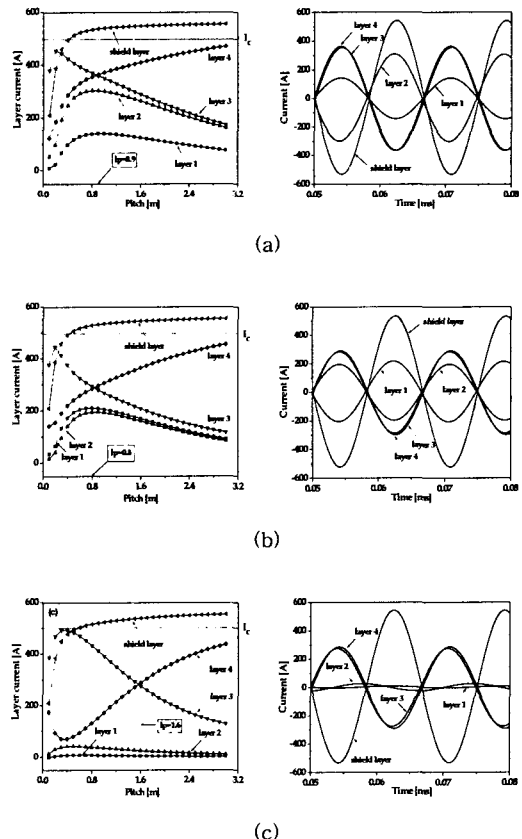


그림 3. 차폐층을 갖는 다층고온초전도 전력케이블의 결선방향 및 피치길이에 따른 각 층의 전류분류와 시간에 따른 전류 파형 변화

(a) +-+- (b) +--- (c) +++-

그림 3은 설정된 피치 범위 안에서 임계전류를 넘지 않은 각각의 결선방향에 대해 피치길이에 따른 각종의 전류분류를 보여준다. 권선방향에 대해 피치길이를 증가시키에 따라 각종의 전류분류가 최소가 되는 피치 길이 값이 존재함을 살펴볼 수 있으며 이를 각각의 그림에서 점선으로 표시하였다. 각각 0.9 [m], 0.8 [m], 1.6 [m]일 때 전류분류의 향상을 얻을 수 있었다. 또한 층별 전류분류가 최소인 피치길이를 설계한 다중고온초전도 전력케이블의 시뮬레이션을 통해 얻은 각종의 파형도 보여주고 있다.

그림 4는 결선방향의 조합중 피치길이 증가에 따라 임계 전류값을 초과한 경우 각종의 전류분류를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 최외각 층인 4층은 피치 길이 값이 일정값 이상에서 이미 임계전류 값을 초과함을 볼 수 있는데 이는 일정 피치 길이 범위내에서 전류분류차가 최소가 되는 피치길이값이 나타나지 않음을 나타내고 있다. 또한 파형에서도 전류분류가 최대인 층과 최소인 층에 흐르는 전류차가 상이함을 볼 수 있으며 위상차도 다르게 나타남을 비교할 수 있다.

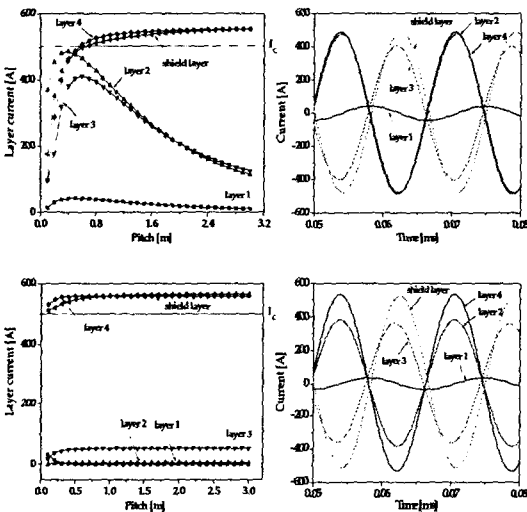


그림 4. 차폐층을 갖는 다중 고온초전도 전력케이블의 결선 방향 및 피치길이에 따른 전류분류와 시간에 따른 전류 파형 변화
(a) +---+ (b) +---+

3.2 자화손실과 통전손실

차폐층을 갖는 다중고온초전도 전력케이블의 피치길이에 따른 손실분석은 그림 5에서 보여주고 있다.

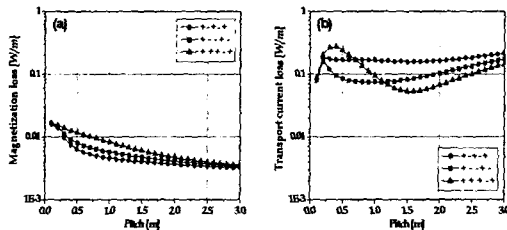


그림 5. 차폐층을 갖는 다중 고온초전도 전력케이블의 피치길이에 따른 전체자화손실 및 전체통전손실 변화
(a) 전체자화손실 (b) 전체통전손실

전체 자화손실은 피치길이가 증가함에 따라 감소되는 경

향을 보이며 그림 5의 전체 통전손실은 일정한 값에 도달된 후 크게 증가하지 않음을 볼 수 있다. 또한 전체통전손실에서는 각각의 결선방향에 대해 피치 길이값 부근에서 최소값을 확인할 수 있었다. 이로부터 차폐층을 이용할 경우 결선방향에 대해 적절한 피치 길이 값으로 설계한다면 차폐층이 없는 경우보다 자화손실과 통전손실 증가없이 전류분류를 향상시킬 수 있음을 분석을 통해 얻을 수 있었다.

4. 결 론

다중케이블에 대한 자기 및 상호인덕턴스를 포함한 등가회로 모델을 이용하여 각종의 전류분류와 유기되는 자계성분을 수치해석을 이용한 시뮬레이션을 통해 비교 분석 하였다.

설계 파라미터로써 차폐층이 존재할 경우 특정한 결선 방향과 피치길이를 설계할 경우 전류분류가 향상됨을 확인할 수 있었고 자화손실과 통전손실 역시 차폐층이 존재하지 않았을 경우보다 증가 없이 전류분류를 향상시킬 수 있음을 분석을 통해 얻을 수 있었다.

향후 본 논문의 결과를 이용하여 다중 고온초전도 케이블 제작시 각종의 전류분류 향상을 위한 설계자료로 활용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 연구개발인 초전도 전력케이블 시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것입니다.

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] H. Noji, "Ac Loss of a High-Tc Superconducting Power Cable Conductor" Vol. 10, pp.552-559,1997.
- [3] 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
- [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.