

차폐층을 고려한 고온초전도 전력 케이블의 전류분류 해석

이종화¹, 임성훈², 고석철³, 박충렬¹, 한병성¹, 황시돌³

¹전북대학교 전기공학과, ²전북대학교 공업기술연구소, ³한국전력연구원

Analysis of Current Distribution of HTSC Power Cable Considering Shield Layer

Jong-Hwa Lee¹, Sung-Hun Lim², Seokcheol Ko³, Chung-Ryul Park¹, Byoung-Sung Han¹, and Si Dole Hwang³

¹Chonbuk National Univ.,

²The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National Univ.,

³Korea 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 distribution at conducting layers was investigated through the analysis of the equivalent circuit for HTSC power cable with shield layer and compared with the case of without shield layer. The transport current distribution due to of the contact resistance and the pitch was improved in the case of HTSC power cable with shield layer from the analysis.

1. 서 론

고온초전도 전력케이블은 영저항 특성을 이용하여 무손실 송전을 가능케 함으로써 증가하는 전력 수급에 따른 기존 전력케이블의 한계를 극복해 줄 새로운 해결책으로 많은 주목을 받고 있다. 대전류 송전을 위해서 다층 구조를 갖는 고온초전도 전력케이블은 일반 전력케이블과는 달리 각 층의 인덕턴스가 다르므로 층별 흐르는 송전 전류도 불균일하게 된다. 이를 분석하기 위해 자기 인덕턴스를 포함한 층간의 상호 인덕턴스를 계산하였고 계산된 인덕턴스와 부하단을 포함한 전원단자의 양끝단에서 접촉저항으로 구성된 회로방정식의 해를 구하였다 [1].

고온초전도 케이블의 도체부의 전류분류에 영향을 미치는 파라미터로 각 층의 접촉저항, 피치, 케이블 길이등이 있으나 균등전류분류를 위한 최적의 설계값을 찾기에 어려움이 있다.

본 논문에서는 고온초전도 전력케이블의 차폐층이 도체부의 전류분류를 향상시켜주는 역할로서 작용함을 분석하였다. 이를 위해 차폐층이 존재할 경우, 접촉저항, 피치 및 케이블의 길이가 각층의 전류분류에 미치는 영향을 조사하였으며 차폐층이 존재하지 않은 경우와 비교 분석하였다.

2. 구조 및 등가회로

도체부와 차폐층을 포함한 다층 구조를 갖는 고온초전도 전력 케이블은 일정한 피치를 가진 수십개의 테이프를 권선틀에 병렬로 연결하고 자장에 의한 임계전류의 저하를 감소시키기 위해 서로 인접한 층은 권선 방향을 반대로 한 적층구조를 갖는다.

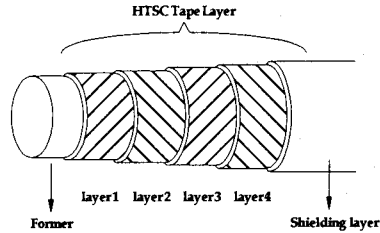


그림 1. 4층의 도체층과 1층의 차폐층을 갖는 고온초전도 전력케이블의 구조

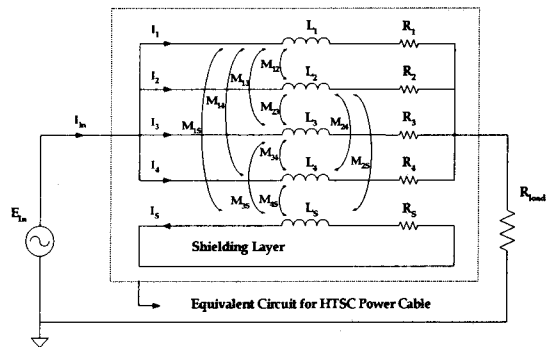


그림 2. 차폐층을 포함한 고온초전도 전력케이블의 등가회로

그림 1에서 보는 것처럼, 초전도케이블의 각 층간에는 절연체로 절연이 되어 있으며, 4층의 도체부와 1층의 차폐층을 갖는다. 그림 1로부터 각 층의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 및 접촉저항을 포함한 그림 2의 등가회로를 유도할 수 있다.

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

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

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

$$E = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_1} \\ \overline{I_2} \\ \vdots \\ \overline{I_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(1), (2)에서 l_{pi} 는 권선각에 의한 권선피치를 나타내며, D는 i 층과 송전전류의 리턴패스의 중심사이의 거리를, a_i , a_j 는 각각 i , j 층의 권선방향을 의미한다.

3. 차폐층 유·무에 따른 전류분류 분석

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

표 1. 다층 고온초전도케이블 설계 사양 [] 차폐층

권선방향	+ - + - [+]
권선틀 직경	40 mm
테이프두께 [초전도체+Ag]	0.18 mm
필라멘트 두께 [초전도체]	0.12 mm
절연층 두께	0.1 mm

3.1 접촉저항 및 케이블 길이에 따른 전류분류 분석

각 층의 접촉저항이 $10 \mu\Omega$, $50 \mu\Omega$, $100 \mu\Omega$ 으로 증가함에 따라 길이에 따른 전류분류의 변화가 나타나기 시작하였으며 접촉저항이 클수록 전류분류 차가 작아졌고, 길이가 증가함에 따라 전류분류 차가 증가함을 그림 3에서 비교할 수 있다. 이는 케이블의 길이가 작을 경우에는 저항성분이 지배적이지만 길이가 증가할수록 인덕턴스 성분이 지배적으로 나타난 결과로 분석할 수 있다.

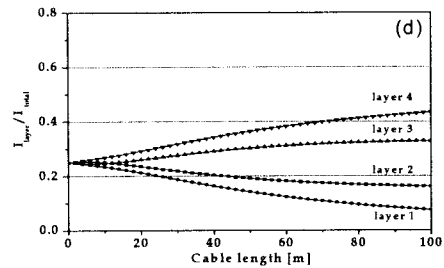
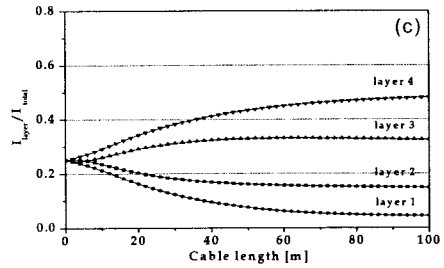
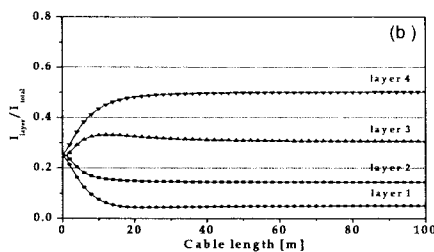
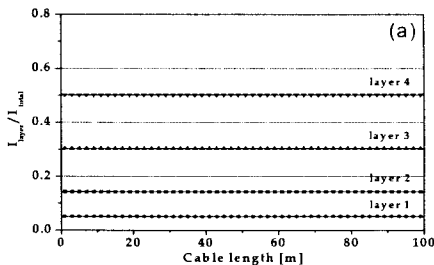
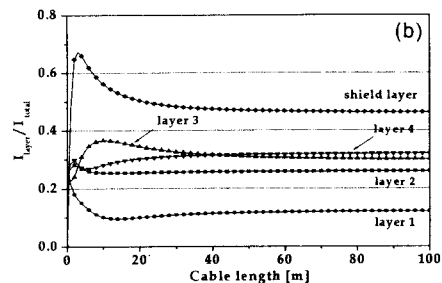
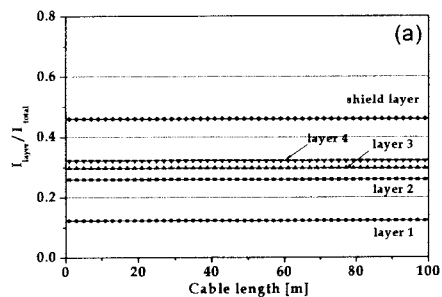


그림 3. 차폐층이 존재하지 않을 경우 케이블 길이에 따른 각층의 전류분류 변화 (a) $0 \mu\Omega$ (b) $10 \mu\Omega$ (c) $50 \mu\Omega$ (d) $100 \mu\Omega$

차폐층이 없는 경우와 동일하게 설계된 고온초전도 전력케이블의 차폐층이 존재할 경우 전류분류변화를 조사하였으며 그림 4는 이에 대한 각 층의 전류분류를 보여준다. 접촉저항이 $0 \mu\Omega$ 인 경우(그림 4.(a)), 도체부 각 층의 전류분류차가 차폐층이 존재하지 않은 경우(그림 3.(a))에 비해 향상됨을 비교할 수 있다. 접촉저항이 증가함에 따라 차폐층이 존재하지 않은 경우처럼 전류분류차가 향상됨을 볼 수 있으며 반면에 3층이 4층보다 큰 전류가 도통함을 관찰할 수 있다. 즉, 차폐층이 존재할 경우인 3층의 임계전류가 전체전류용량을 결정하게 됨을 분석할 수 있다.



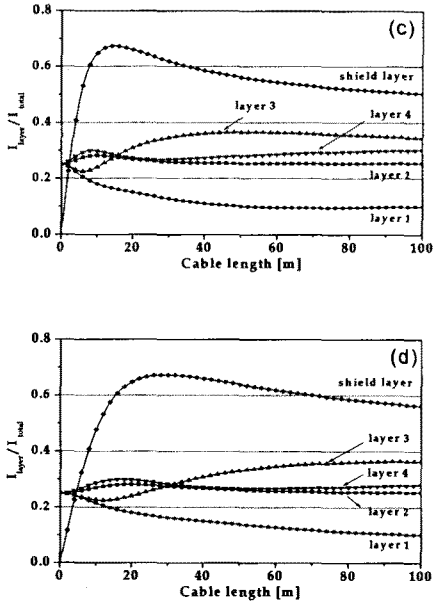


그림 4. 차폐층 존재시 접촉저항 크기에 따른 전류분류 변화
(a)0μΩ (b)10μΩ (c)50μΩ (d)100μΩ

3.2 피치 길이에 따른 전류분류 분석

차폐층의 존재 유무에 따라 피치 길이가 전류분류에 미치는 영향을 조사하였다. 이때, 케이블 길이는100m이며 접촉저항은 10μΩ 으로 설정하였다.

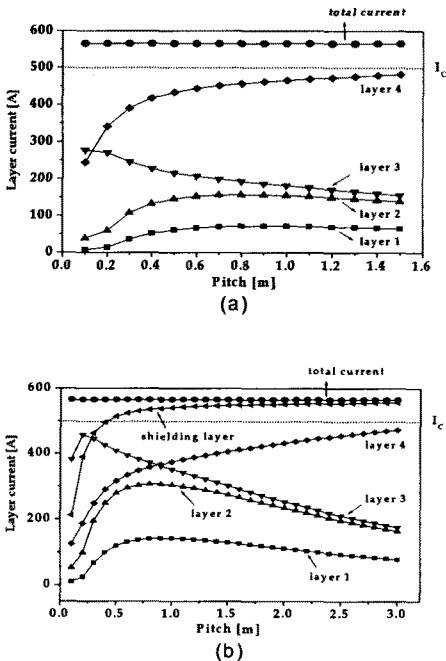


그림 5.차폐시 유·무시 피치에 따른 전류분류 변화
(a)차폐층이 존재하지 않을 때 (b)차폐층이 존재할 때

차폐층이 존재하지 않을 경우(그림 5.(a))에 피치길이가 증가함에 따라 전류분류는 상이함을 보이며 최소가 되는 피크값이 없었지만 차폐층이 존재할 경우(그림 5.(b))에는 피치가 0.9m 지점에서 전류분류의 차가 최소가 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 적절한 피치값을 조절하므로써 전류분류 향상을 가져올 수 있다.

4. 결 론

다층고온초전도 전력케이블의 자기 및 상호 인덕턴스를 포함한 등가회로 모델을 이용하여 차폐층 존재 여부에 접촉저항 따른 각 층의 전류분류와 피치에 따른 전류분류를 수치해석적인 방법으로 상호관계를 조사하였다. 고온초전도 전력 케이블의 설계 사양에 차폐층이 없는 경우 각 층의 균등한 전류 분류를 위해서는 접촉저항이 증가하여야 하며, 여기에 차폐층이 존재할 경우 균등 전류분류는 더욱 향상됨을 알 수 있었다. 피치 또한 차폐층이 없을 경우에 전류분류가 최소가 되는 피치값이 없었지만 차폐층 존재 시 전류분류 차가 최소가 되는 피크값을 확인할 수 있었다.

이로부터 각 층의 균등한 전류분류 위해서는 케이블 설계시 차폐층이 존재해야되다는 결론을 얻었다.

향후 다층고온초전도 케이블의 균등전류분류에 영향을 미치는 적절한 파라미터를 찾고 이에 따른 통전손실과 교류손실의 변화를 연구하고자 한다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [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.