

다층 고온초전도 송전케이블의 길이에 따른 층별 전류분류 및 교류손실 계산

論 文
50B-1-2

Current Sharing and AC Loss of a Multi-Layer HTS Power Transmission Cable with Variable Cable Length

李志光* · 車貴守**
(Ji-Kwang Lee · Guee-soo Cha)

Abstract - The superconducting transmission cable is one of interesting part in power application using high temperature superconducting wire. One important parameter in HTS cable design is transport current sharing because it is related with current transmission capacity and loss. In this paper, we calculate self inductances of each layer and mutual inductances between two layers from magnetic field energy, and current sharing of each layer for 4-layer cable using the electric circuit model which contain inductance and resistance(by joint and AC loss). Also, transport current losses which are calculated by monoblock model and Norris equation are compared. As a results, outer layer has always larger transport current than inner layer, and current capacity of each layer is largely influenced by resistance per unit cable length. As a conclusion, for high current uniformity and low AC loss, we have to decrease inductances themselves or those differences.

Key Words : superconducting transmission cable, current sharing, cable length, AC loss

1. 서 론

고온 초전도 테이프를 이용한 초전도 케이블은 하나의 초전도 테이프가 흘릴 수 있는 전류용량이 제한되어 있기 때문에 대전류 송전을 위해서는 수십 개의 테이프를 동심 축을 갖는 권선 틀에 병렬로 연결하여 하나의 층을 구성하고 이러한 테이프 선재 층을 여러 개로 하여 다층 구조를 갖도록 구성된다. 이러한 다층 구조의 송전 케이블에서는 각 층의 인덕턴스가 다르므로 각 층에서 흐르는 송전 전류도 다르게 된다. 송전 전류의 불균일한 흐름은 각 층에 흐르는 전류 중 가장 많은 전류가 흐르는 층이 임계전류를 넘게 되면 초전도 상태가 깨지므로 전체 송전 전류 용량이 제한되어 결과적으로 균일한 전류 흐름에 비해 송전 능력을 크게 저하시키게 되며[1][2] 또한, 교류 손실의 증가를 가져오므로 [1] 해결해야 할 과제중의 하나이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여는 먼저 초전도 송전케이블의 각 층으로 흐르는 전류분류를 구하여 불균일 정도를 알아야 한다. 케이블의 길이가 달라지면 인덕턴스값도 달라지게 되므로 각 층으로의 전류분류량도 변하게 된다. 본 논문에서는 초전도 송전 케이블의 길이에 대한 전류분류와 교류손실에의 영향을 살펴보기 위해 초전도 송전케이블에서 초전도 테이프들로 구성된 각 층들의 길이에 따른 자기 인덕턴스와 층 간의 상호 인덕턴스를 계산하고 계산된 인덕턴스와 케이블의 양 끝단

에서의 전원 단자와의 접촉저항을 이용한 회로 방정식을 풀어서 각 층에 흐르는 전류의 비율 구함으로서 송전 전류의 불균일 정도를 계산하고 각 층에서 계산된 불균일한 송전 전류에 의해 발생하는 교류손실을 알아본다.

2. 본 론

고온 초전도 송전 케이블에서 초전도 테이프를 감는 권선 부분의 구조는 그림 1과 같다. n층 구조를 보여주고 있으며, 각 층간에는 절연체로 절연되어 있다. 또한, 각 층의 테이프들은 트위스트 되어 권선되어 있고 서로 인접한 층은 초전도 테이프의 권선 방향을 반대로 하여 쇄교 자속량을 감소시켜 자장에 의한 임계 전류의 감소를 줄이고, 발생하는 역기전력을 줄이도록 구성되어 있으며 권선의 피치는 동일하다.

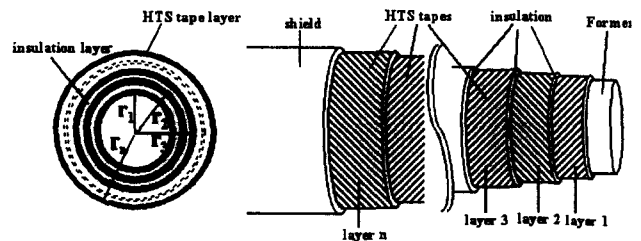


그림 1. 고온 초전도 테이프를 권선된 n층 구조의 초전도 송전케이블

Fig. 1. Schematic view of the winding in a n-layer cable.

* 正 會 員 : 又石大 電氣工學科 助教授

** 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授

接受日字 : 2000年 7月 25日

最終完了 : 2000年 12月 22日

2.1 인덕턴스 계산 및 전류분류

다층 권선 구조의 인덕턴스는 층별 자기 인덕턴스와 층간의 상호 인덕턴스로 나타낼 수 있다. 그림 2는 n층 구조를 갖는 초전도 송전 케이블의 전기 회로 모델을 보여준다. 각 층의 자기 인덕턴스 L과 상호 인덕턴스 M이 표시되어 있으며, R은 각 층에서 전원부와 접촉 저항과 각 층에서 발생하는 교류 손실을 저항으로 등가적으로 환산한 값을 포함한 층별 저항을 나타낸다.

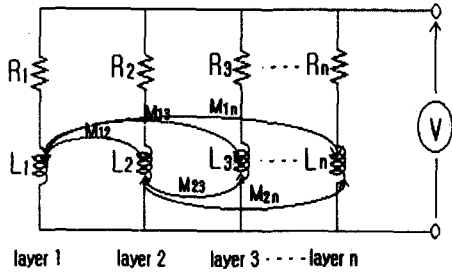


그림 2. n층으로 구성된 고온 초전도 송전케이블의 전기 회로 모델

Fig. 2. Electric circuit model of n layer HTS transmission cable

자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 저장에너지를 이용하여 구할 수 있다[1][2]. 각 층의 자기 인덕턴스는 구하고자 하는 층에만 전류가 흐를 때 발생한 자장에 의해 저장된 에너지를 계산하여 구한다. i층에 전류가 흐를 때 i층을 구성하는 초전도 테이프들은 트위스트 된 형태로 권선되어 있기 때문에 i층 내부 영역에서는 축 방향의 자장만 발생하고, 외부 영역에서는 방위각 방향의 자장만 발생하게 되므로 내·외부 영역에서의 자장은 식 (1), (2)와 같다.

$$B_{inner} = \frac{\mu_0 \cdot I_i}{l_{pi}} \quad (r < r_i \text{ 인 영역에서}) \quad (1)$$

$$B_{outer} = \frac{\mu_0 \cdot I_i}{2\pi r} \quad (r > r_i \text{ 인 영역에서}) \quad (2)$$

여기서, r은 케이블중심으로부터 i층 외부의 임의의 지점까지의 반경, ri는 케이블중심으로부터 i층까지의 반경, lpi는 i층의 권선 피치, Ii는 i층에 흐르는 전류이다.

공간 중에 저장된 에너지 밀도는 식 (3)과 같고, 초전도 테이프의 두께는 매우 얇으므로 초전도 테이프 영역에서의 저장에너지를 무시하면, i층에 흐르는 전류에 의해 자장의 형태로 공간에 저장된 에너지는 저장에너지 밀도를 나타내는 식 (3)을 각 영역에 대해 체적 적분하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

$$W_m = L_{cable} \left(\frac{1}{2\mu_0} \int_0^{r_i} B_{inner}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \, dr + \frac{1}{2\mu_0} \int_{r_i}^D B_{outer}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \, dr \right) \quad (4)$$

여기서, Lcable은 케이블의 길이, D는 i층과 송전전류의 귀로의 중심사이의 거리이다. 식 (4)에서 계산된 자장에너지 Wm와 식 (5)를 이용하여 i층의 자기 인덕턴스 Li를 구하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2} L_i I_i^2 \quad (5)$$

$$L_i = L_{cable} \left(\mu_0 \cdot \frac{\pi r_i^2}{l_{pi}^2} + \mu_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{D}{r_i}\right)}{2\pi} \right) \quad (6)$$

초전도 케이블의 각 층간 상호 인덕턴스도 마찬가지로 저장된 자장에너지를 이용하여 구할 수 있다. i층과 j층간의 상호 인덕턴스는 i층과 j층에 전류가 흐를 때 저장된 자장에너지를 구하여 계산한다. i층내의 영역에서는 i층과 j층의 전류가 만드는 축방향 성분의 자장만 있고, i층과 j층사이의 영역에서는 i층의 전류가 만드는 방위각 방향의 성분과 j층의 전류가 만드는 축방향 성분의 자장이 다 있으며, j층 외부 영역에서는 i층과 j층의 전류가 만드는 방위각 방향의 자장 성분만 존재하게 된다는 것을 고려하여 저장에너지를 구할 수 있다. 식 (7)은 i층의 반경 내의 영역에서, 식 (8)은 i층과 j층 사이 영역에서, 식 (9)는 j층 외부 영역에서 저장된 에너지를 나타낸다. 단, ri < rj이다.

$$W_{mi} = L_{cable} \left(\frac{1}{2\mu_0} \int_0^{r_i} \left[\frac{a_i \mu_0 I_i}{l_{pi}} + \frac{a_j \mu_0 I_j}{l_{pj}} \right]^2 2\pi r \, dr \right) \quad (7)$$

$$W_{mb} = L_{cable} \left(\frac{1}{2\mu_0} \int_{r_i}^{r_j} \left[\left(\frac{\mu_0 I_i}{2\pi r} \right)^2 + \left(\frac{\mu_0 I_j}{l_{pj}} \right)^2 \right] 2\pi r \, dr \right) \quad (8)$$

$$W_{mo} = L_{cable} \left(\frac{1}{2\mu_0} \int_{r_j}^D \left[\frac{\mu_0 (I_i + I_j)}{2\pi r} \right]^2 2\pi r \, dr \right) \quad (9)$$

여기서, Ii, Ij는 각각 i, j층에 흐르는 전류이고, ai, aj는 각각 i, j의 권선 방향으로서 시계방향의 경우 +1, 반시계방향의 경우에는 -1이다. i층과 j층사이의 상호 인덕턴스 Mij는 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 구하면 식 (12)와 같이 표현된다.

$$W_m = \frac{1}{2} L_i I_i^2 + \frac{1}{2} L_j I_j^2 + M_{ij} I_i I_j \quad (10)$$

$$W_m = W_{mi} + W_{mb} + W_{mo} \quad (11)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = L_{cable} \left(\frac{a_i a_j \mu_0}{l_{pi} l_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \right) \quad (r_j > r_i \text{ 인 경우}) \quad (12)$$

식 (6)과 식 (12)로 구해진 인덕턴스를 이용하여 n층의 초전도 케이블에 대한 그림 2 회로도의 회로 방정식은 식 (13)과 같이 세울 수 있다.

$$V = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & M_{2n} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & \cdots & M_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \cdots & L_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 I_1 \\ R_2 I_2 \\ R_3 I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ R_n I_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)을 풀어서 각 층에서 흐르는 전류를 계산함으로써 다층 고온 초전도 송전케이블에서 각 층별 전류 분류 값을 알 수 있다.

2.2 교류 손실 계산

초전도 송전 케이블에서는 교류 손실 계산을 위해 일반적으로 초전도 테이프 권선 부분을 하나의 블록으로 보고 교류 손실을 계산하는 식(14)와 같은 모노블록 모델 (monoblock model)을 사용하여 계산할 수 있다[3][4].

$$Q = \frac{\mu_0 f I_c^2}{2\pi h^2} \{ (2 - Fh)Fh + 2(1 - Fh)\ln(1 - Fh) \} \quad [W/m] \quad (14)$$

여기서, I_c 는 케이블의 임계전류, f 는 케이블 송전 전류의 주파수, F 는 케이블 송전 전류의 최대값과 케이블 임계전류의 비(I_p/I_c) 이고, $h = (D_o^2 - D_i^2)/D_o^2$ 로서, D_i, D_o 는 권선부의 내·외 직경이다.

본 논문에서는 초전도 송전 케이블의 교류 손실을 위의 모노 블록 모델식과 고온 초전도 테이프 선재에 대해 손실 계산식으로 잘 알려진 노리스 식을 이용하여 계산하여 그 결과 값을 비교하였다. 모노 블록 모델식은 케이블 전체에 대해 계산될 수 있는 반면에 노리스 식을 이용하면 케이블의 각 층에서의 손실을 구할 수 있으므로 층 별 손실 값을 비교할 수 있다. 임의의 i 층의 노리스 식을 이용한 손실식은 식 (15)와 같고 케이블 전체의 교류손실은 각 층들의 발생손실의 합으로서 구할 수 있다.

$$Q_i = \frac{\mu_0 f I_{cl}^2}{2\pi} \{ (2 - F_i)F_i + 2(1 - F_i)\ln(1 - F_i) \} \quad [W/m] \quad (15)$$

여기서, I_{cl} 은 케이블 한 층의 임계전류, F_i 는 i 층의

송전전류의 최대값과 케이블 한 층의 임계전류의 비 (I_{pi}/I_{cl})이다.

3. 계산 사례

초전도 송전 케이블에서의 길이에 따른 전류 분류 및 교류 손실을 계산하기 위해 이용된 케이블 사양은 표 1과 같다. 4층 구조이고, 각 층별로 권선방향은 시계방향(+)과 반시계방향(-)으로 반복되고, 권선 피치는 모든 층이 동일하다.

표 1. 전류분류 및 교류손실계산을 위한 초전도 송전케이블
Table 1. HTS transmission cable for calculation of current sharing and AC loss

층 수	4
권선 형태	+ - + -
권선 피치	320 mm
초전도 테이프 수	159
권선틀 직경	40 mm
초전도테이프 두께	0.18 mm
필라멘트 영역의 두께	0.12 mm
절연층 두께	0.1 mm
케이블의 임계전류	1590 A

케이블에서 발생하는 교류손실을 무시하고 전원부와의 접촉저항에 의한 케이블의 저항 성분이 $0[\mu\Omega], 10[\mu\Omega], 50[\mu\Omega]$ 이라 가정한 경우에 케이블 길이에 대한 각 층의 전류비를 계산한 결과가 각각 그림 3, 그림 4, 그림 5 이다. 그림 3의 계산 결과를 살펴보면 케이블 각 층의 저항이 0인 경우에는 케이블 길이에 관계없이 항상 심한 전류불균형이 일어나고, 최외곽층에 가장 큰 전류가 흐르게 됨을 알 수 있다. 이는 전류분류가 전적으로 인덕턴스에 의해 결정되고 최외곽층의 인덕턴스가 가장 작기 때문이다. 이런 경우에는 최외곽층의 테이프 선재의 임계전류에 의해 케이블 전체의 임계전류가 결정된다. 즉 안쪽 층의 선재들은 전류를 더 흘릴 수 있으나, 이미 최외곽층이 임계상태에 도달하게 되므로 케이블 전체로는 송전 능력의 저하를 가져오게 된다. 그림 4와 그림 5의 결과를 비교하면 각 층의 저항이 커질수록 전류 불균형이 심하게 나타나기 시작하는 케이블의 길이가 증가함을 볼 수 있다. 즉, 케이블의 길이가 작은 경우에는 전류가 거의 각층에 균등하게 흐르다가 길이가 늘어나면 전류 불균형이 심해지는 것을 알 수 있는데, 실제 초전도 케이블에서는 접촉저항이 케이블의 길이에 관계없이 전원부와 접촉되는 두 곳에서만 발생하기 때문에 일정한 값이 되지만 케이블 길이 증가에 의한 인덕턴스 증가로 인하여 상대적으로 저항의 영향은 작아지고 전류분류가 주로 인덕턴스에 의해 결정되어 버리기 때문이다. 따라서, 그림 4와 그림 5의 계산 결과에서 전류불균형의 정도는 케이블의 길이와 케이블의 저항성분의 비와 관계가 있음을 알 수 있고, 그 관계를 살펴보기 위한 계산으로서 그림 6은 케이블 단위 길이당 저항값에 대한 전류분류비를 보여준다.

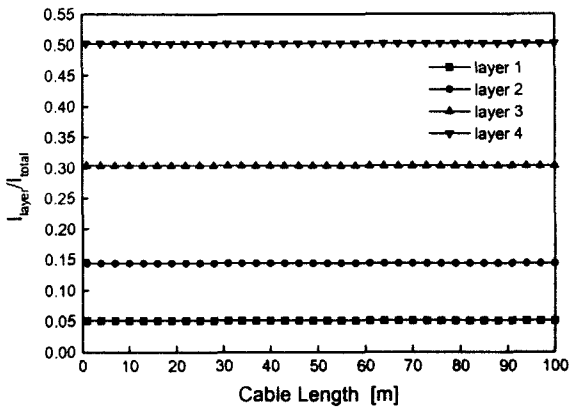


그림 3. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비 (R=0)
 Fig. 3. Current sharing ratio of each layer as a function of cable length (R=0)

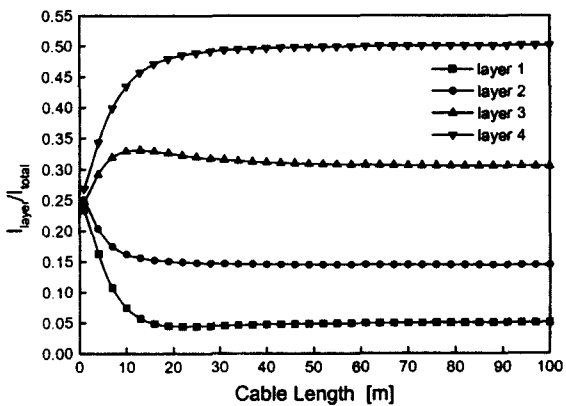


그림 4. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비 (R=10 [μΩ])
 Fig. 4. Current sharing ratio of each layer as a function of cable length (R=10 [μΩ])

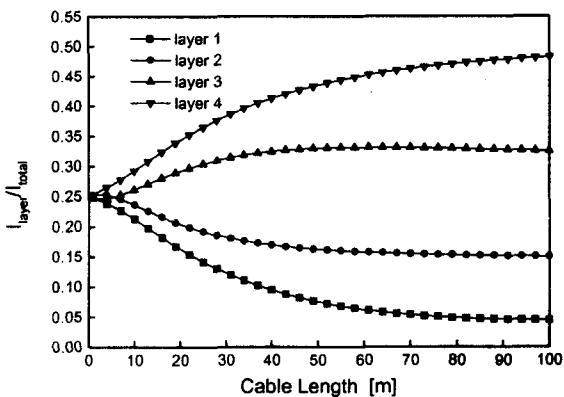


그림 5. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비 (R=50 [μΩ])
 Fig. 5. Current sharing ratio of each layer as a function of cable length (R=50 [μΩ])

계산 결과로부터 각 층의 전류비가 10 [%]이내의 차이를 갖기 위해서는 단위 길이당 저항값이 5 [μΩ] 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 즉, 케이블의 길이를 길게 할수록 최소항으로 요구되는 저항성분값이 커져야 함을 알 수 있다. 이러한 계산 결과는 케이블의 각 층에서 흐르는 송전전류에 의해 발생하는 교류손실을 노리스 식에 의해 계산한 후 등가적으로 저항으로 환산한 값을 각 층이 갖는 저항값에 포함시켜서 얻은 결과인데 교류손실의 등가저항 값은 전체저항의 1[%] 이하일 정도로 매우 작아 교류손실을 고려하지 않은 경우와 차이가 없었다.

그림 7은 초전도 케이블 전체의 송전전류가 500 [A]일 때 케이블 단위 길이당 저항값에 대해 각 층에서 발생하는 송전전류 손실을 노리스 식을 사용하여 구한 결과이다. 그림 8은 초전도 케이블 전체의 송전전류가 500 [A]일 때 케이블 단위 길이당 저항값에 대해 모노 블록 모델과 노리스 식을 이용하여 구한 송전전류 손실을 비교한 결과이다.

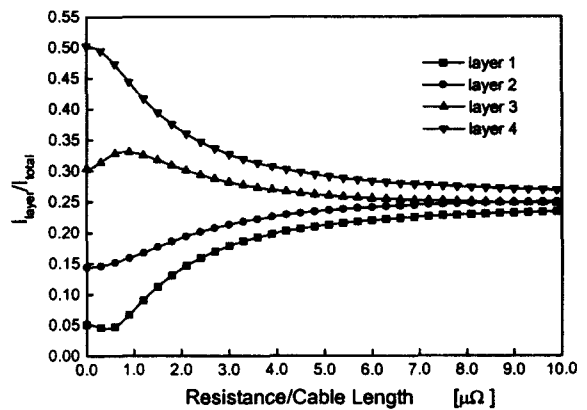


그림 6. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 각 층의 전류분류비
 Fig. 6. Current sharing ratio of each layer as a function of resistance per unit cable length

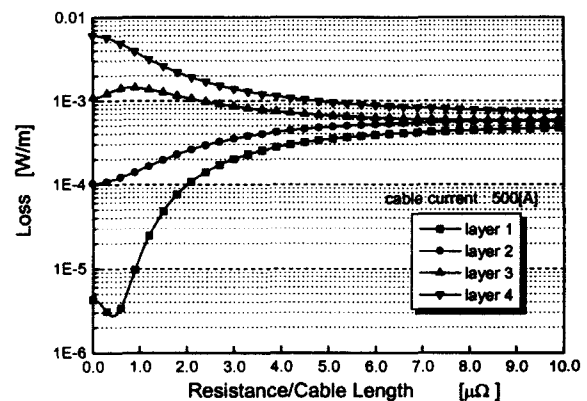


그림 7. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 각 층의 교류손실 (케이블 송전전류 :500[A])
 Fig. 7. AC losses of each layer as a function of resistance per unit cable length (transport current of cable : 500[A])

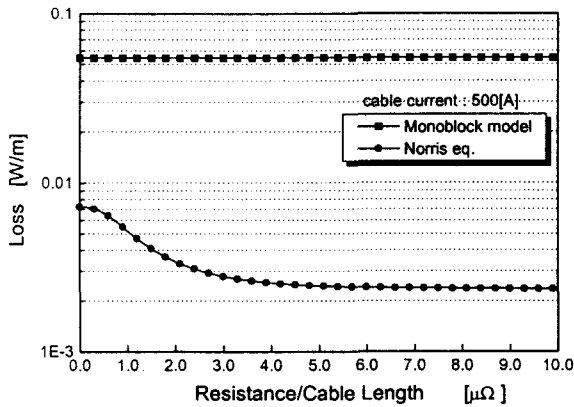


그림 8. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 교류손실 계산비교 (케이블 송전전류 : 500[A])

Fig. 8. Comparison of calculated AC losses as a function of resistance per unit cable length (transport current of cable : 500[A])

노리스 식에 의한 계산 결과가 작음을 볼 수 있는데, 이는 각 층의 전류가 다름을 고려하였기 때문이며, 모노 블록 모델의 경우보다는 더 정확한 계산 결과로 생각된다. 또한, 노리스 식에 의한 손실 계산 결과에서 알 수 있듯이 전류가 각 층에 균일하게 흐를수록 손실값이 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

다층 구조의 송전 케이블에서는 각 층의 인덕턴스가 다르므로 각 층의 송전 전류도 다르게 된다. 송전 전류의 불균

일한 흐름은 각 층에 흐르는 전류 중 가장 많은 전류가 흐르는 층이 임계전류를 넘게 되면 초전도 상태가 깨지므로 전체 송전 전류 용량이 제한되어 결과적으로 균일한 전류 흐름에 비해 송전 능력을 크게 저하시키게 되며 교류 손실이 증가하게 된다. 본 논문에서는 초전도 송전케이블의 길이에 대한 전류분류와 교류손실에의 영향을 살펴보기 위해 초전도 송전케이블에서 초전도 테이프들로 구성된 각 층들의 길이에 따른 송전 전류의 불균일 정도를 알아보고, 그러한 불균일 송전전류에 의해 발생하는 교류손실을 계산하였다. 각 층으로의 송전전류의 균일성을 증가시키기 위해서는 단위 길이당 저항성분을 증가시켜야 하지만 이는 여러 가지 문제점들을 발생시키므로 인덕턴스를 감소시키거나 층별 인덕턴스를 조절할 수 있도록 하는 해결책이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kruger et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-Layer Superconducting Prototype Cable Conductor," *IEEE Trans. on AS*, Vol.9, No.2, pp.833-836, 1999.
- [2] S.Mukoyama, et al., "Uniform Current Distribution conductor of HTS Power Cable with Variable Tape-Winding Pitches," *IEEE Trans. on AS*, 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] G. Vellego and P. Metra, "An Analysis of the Transport Losses Measured on HTSC Single-Phase Conductor Prototype," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.8, pp.476-483, 1995.

저 자 소 개



이 지 광 (李志光)

1966년 6월 1일 생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 현재 우석대 전기공학과 조교수

Tel : 063-290-1476

E-mail : jikwang@core.woosuk.ac.kr



차 귀 수 (車貴守)

1956년 7월 18일 생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 순천향대 정보기술공학부 교수

Tel : 041-530-1334

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr