

## 다층 고온 초전도케이블에서의 전류분류 및 손실 계산

이승욱, 차귀수, 이지광\*, 한송엽\*\*  
 순천향대학교 전기공학부, \*우석대학교 전기공학과, \*\*서울대학교 전기공학부

### Current Distribution and Loss Calculation of a Multi-layer HTS Transmission Cable

S.W.Lee, G.S.Cha, J.K.Lee\*, S.Y.Hahn\*\*  
 Soonchunhyang University, \*Woosuk University, \*\*Seoul National University

e-mail : leeso23@enterprise.sch.ac.kr

**Abstract** - Superconducting transmission cable is one of interesting part in power application using high temperature superconducting wire as transformer. One important parameter in HTS cable design is transport current distribution because it is related with current transmission capacity and loss. In this paper, we present the calculation theory of current distribution for multi-layer cable using the electric circuit model and in example, calculation results of current distribution and AC loss in each layer of 4-layer HTS transmission cable.

#### 1. 서 론

초전도 송전케이블은 일반적으로 일반 구리도체보다 100배 이상의 전류밀도를 가지므로 대용량의 전력 송전이 가능하고, 부피도 크게 줄일 수 있는 장점을 가지므로 고온 초전도체를 이용한 고온 초전도 테이프 선재의 전력응용 분야에서 초전도 변압기와 더불어 가장 실용화 가능성이 높은 분야로 전망되고 있다. 고온 초전도 테이프를 이용한 초전도 케이블은 하나의 초전도 테이프가 흘릴 수 있는 전류용량이 제한되어 있기 때문에 대전류 송전을 위해서는 수십 개의 테이프를 동심축을 갖는 권선 틀에 병렬로 연결하여 하나의 층을 구성하고 이러한 테이프 선재 층을 여러 개로 하여 다층 구조를 갖도록 구성된다. 이러한 다층 구조의 초전도 송전 케이블에서는 각 층의 인덕턴스가 다르므로 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 층에서 흐르는 전류를 구하여 불균일 정도를 알아야 한다. 본 논문에서는 초전도 송전 케이블에서 초전도 테이프들로 구성된 각 층들의 자기 인덕턴스와 층 간의 상호 인덕턴스를 계산하고 계산된 인덕턴스와 케이블의 양 끝단에서의 전원 단자와의 접촉저항을 이용하여 회로 방정식을 구성하여 각 층에 흐르는 전류의 비를 구하여 송전 전류의 불균일 정도를 살펴본다. 또한, 각 층에서 계산된 불균일한 송전전류에 의해 발생하는 교류손실을 살펴본다.

#### 2. 본 론

고온 초전도 송전 케이블에서 초전도 테이프를 감는 권선 부분의 구조는 그림 1과 같다. 가장 일반적으로 사용되는 4층 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 감소 시켜 자장에 의한 임계전류의 감소를 줄이고, 발생하는 역기전력을 줄이도록 구성되어 있으며 권선의 피치는 동일하다.

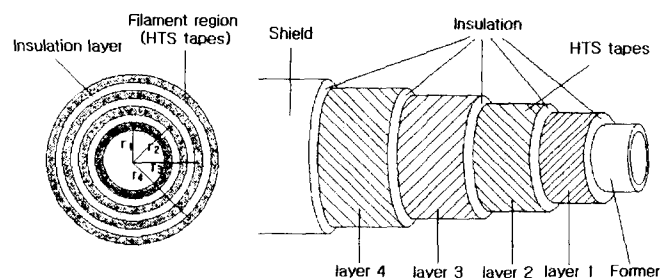


Fig. 1. Schematic view of the winding in a four layer cable.

## 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  $L$ 과 상호 인덕턴스  $M$ 이 표시되어 있으며,  $R$ 은 각 층에서 전원부와의 조인트 저항과 각 층에서 발생하는 교류 손실의 합을 나타낸다.

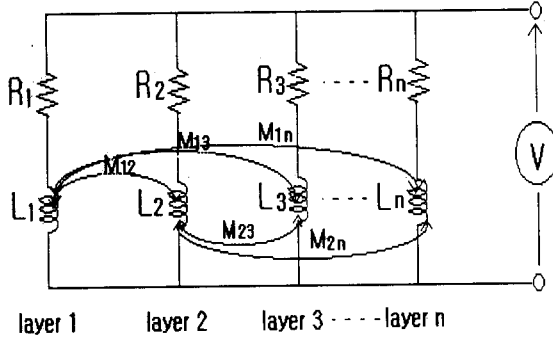


Fig. 2. Electric circuit model of n layer HTS transmission cable

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.  $i$ 층에 전류가 흐를 때  $i$ 층 내·외부 영역에서의 자장은 식 (1), (2)와 같다.  $i$ 층에서 테이프들은 트위스트 된 형태로 권선되어 있기 때문에 내부 영역에서는 축 방향의 자장만 발생하고, 외부 영역에서는 방위각 방향의 자장만 발생하게 된다.

$$B_{inner} = \frac{\mu_0 \cdot I}{l_p} \quad \text{for } r < r_i \quad (1)$$

$$B_{outer} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r_i} \quad \text{for } r > r_i \quad (2)$$

여기서,  $r_i$ 는 중심으로부터  $i$ 층까지의 반경,  $l_p$ 는 권선 피치,  $I$ 는  $i$ 층에 흐르는 전류이다.

공간중에 저장된 에너지 밀도는 식 (3)과 같고, 초전도 테이프의 두께는 매우 작아 초전도 테이프 영역에서의 저장에너지를 무시하면,  $i$ 층에 흐르는 전류에 의해 단위길이 당 저장에너지는 식 (3)을 각 영역에 대해 면적 적분하여 식(4)와 같이 구할 수 있다.

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

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

여기서,  $D$ 는  $i$ 층과 송전전류의 리턴패스의 중심사이의 거리이다. 식 (4)에서 계산된 자장에너지  $W_m$  [J/m]와 식 (5)를 이용하여  $i$ 층의 자기 인덕턴스를 구하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (5)$$

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

초전도 케이블의 각 층간 상호 인덕턴스도 마찬가지로 저장된 자장에너지를 이용하여 구할 수 있다.  $i$ 층과  $j$ 층간의 상호 인덕턴스는  $i$ 층과  $j$ 층에 전류가 흐를 때 저장된 자장에너지를 구하여 계산한다. 식 (7)은  $i$ 층의 반경 내의 영역에서, 식 (8)은  $i$ 층과  $j$ 층 사이 영역에서, 식 (9)는  $j$ 층 외부 영역에서 단위 길이당 저장된 에너지를 나타낸다. 단,  $r_i < r_j$ 이다.

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

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

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

여기서,  $I_i, I_j$ 는 각각  $i, j$ 층에 흐르는 전류이고,  $a_i, a_j$ 는 각각  $i, j$ 의 권선 방향이다. 식들로부터 알 수 있듯이,  $i$ 층내의 영역에서는  $i$ 층과  $j$ 층의 전류가 만드는 축방향 성분의 자장만 있고,  $i$ 층과  $j$ 층 사이의 영역에서는  $i$ 층의 전류가 만드는 방위각 방향의 성분과  $j$ 층의 전류가 만드는 축방향 성분의 자장이 다 있으며,  $j$ 층 외부 영역에서는  $i$ 층과  $j$ 층의 전류가 만드는 방위각 방향의 자장 성분만 존재하게 된다.  $i$ 층과  $j$ 층 사이의 상호 인덕턴스는 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 구하면 식 (12)와 같이 표현된다.

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

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

$$M_{i,j} = M_{j,i} = \frac{a_i a_j \mu_0}{l_p^2} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \quad \text{for } r_j > r_i \quad (12)$$

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.

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

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 모노 블록 모델(monoblock model)이 주로 사용된다[3][4].

$$L = \frac{\mu_0 f I_c^2}{2\pi h^2} \{ (2 - Fh)Fh + 2(1 - Fh)\ln(1 - Fh) \} \quad (14)$$

여기서,  $I_c$  는 케이블의 임계전류,  $f$  는 케이블 통전 전류의 주파수,  $F$  는 케이블 통전 전류의 최대값과 케이블 임계전류의 비 ( $I_b/I_c$ ) 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 층별 손실 값을 비교할 수 있다.

## 3. 계산 사례

초전도 송전 케이블에서의 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.

Table 1. HTS transmission cable spec for calculation

층 수	4
권선 형태	+ - + -
권선 피치	320 mm
초전도 테이프 수	159
권선티플 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 전원부와 접촉저항이 케이블의 저항 성분이 0라고 가정한 경우와  $10 \mu\Omega$  이라고 가정한 경우의 케이블 각 층의 전류비를 계산한 결과를 그림 3, 그림 4에 보여준다.  $10 \mu\Omega$  은 다른 여러 논문들에서 실험적으로 얻은 값이므로 본 논문의 계산에서도 이 값을 사용하였다. 그림 3은 권선 피치가 320mm인 경우, 그림 4는 400mm인 경우이다.

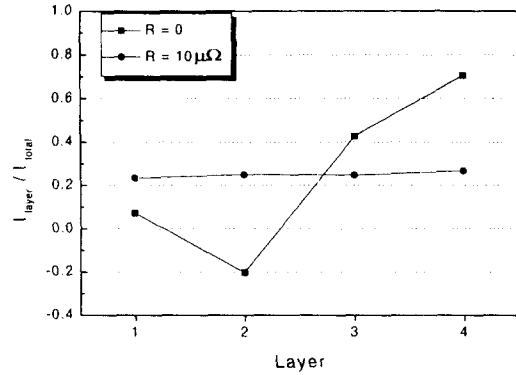


Fig .3. Relative current ratio in each layer ( $l_p = 320 \text{ mm}$ )

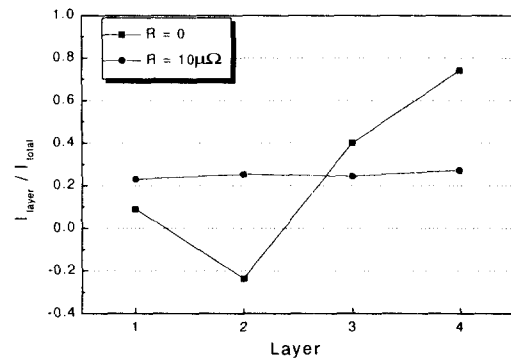


Fig .4. Relative current ratio in each layer ( $l_p = 400 \text{ mm}$ )

그림 3과 그림 4의 결과를 비교하면 전류비는 권선 피치와는 거의 무관한 것을 알 수 있는데 이는 단위 길이에 대해 계산된 인덕턴스 값을 이용하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 계산 결과로부터 저항 성분을 고려하면 각 층에 흐르는 전류비가 거의 동일함을 알 수 있는데, 인덕턴스 값에 비해 저항 성분이 상대적으로 큰 영향을 주기 때문으로 생각된다. 저항 성분을 0 이라고 가정한 경우에는 각 층의 전류비가 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 심지어는 반대 방향으로 흐르는 층도 있음을 알 수 있다. 실제 초전도 케이블에서는 접촉저항이 있는데 이 저항은 케이블의 길이에 관계없이 전원부와 접촉되는 두 곳에서만 발생하기 때문에 일정한 값이 되지만 케이블의 길이가 늘어나면 인덕턴스 값들은 제곱에 비례하여 증가하므로 실제의 송전 케이블의 경우에는 길이가 매우 길기 때문에 접촉저항의 영향은 사라지게 되어

위의 계산 결과에서 저항이 0 인 경우에 접근하게 된다. 케이블에서 길이가 늘어나면 교류손실도 증가하게 되므로 저항이 0인 경우와는 다르게 되지만 저항은 길이에 비례하고 인덕턴스는 길이의 제곱에 비례하므로 케이블의 길이가 매우 길어지게 되면 역시 저항이 0인 경우의 계산결과에 접근하게 될 것이다. 그림 5와 그림 6은 저항 성분이 각각 0 인 경우와  $10 \mu\Omega$  인 경우에 모노 블록 모델과 노리스 식을 이용하여 구한 통전 전류 손실을 비교한 결과이다. 노리스 식에 의한 계산 결과가 작음을 볼 수 있는데, 이는 각 층의 전류가 다름을 고려하였기 때문이며, 저항 성분이 0 일 때에 비해  $10 \mu\Omega$  일 때 더 작은 손실이 발생하는 것은 각 층에 분류되어 흐르는 전류가 거의 동일하기 때문이다. 그림 7과 그림 8은 저항 성분

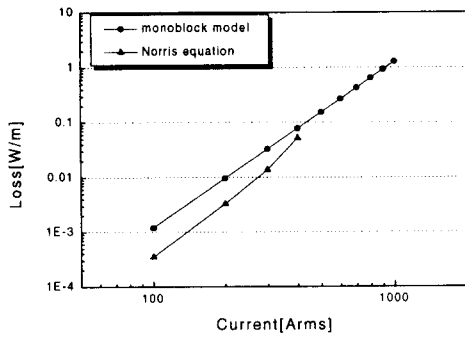


Fig .5. Transport current loss of HTS cable(  $R = 0$  )

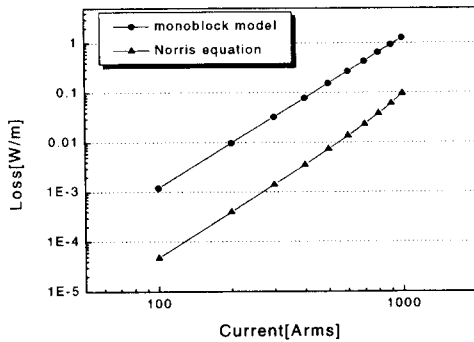


Fig .6. Transport current loss of HTS cable(  $R = 10 \mu\Omega$  )

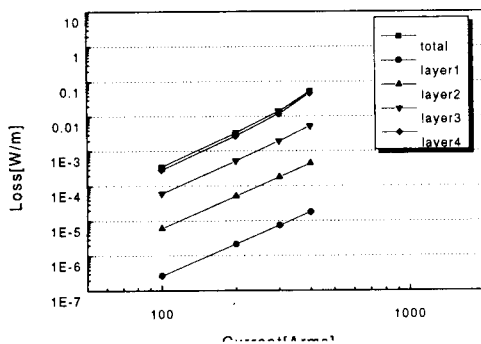


Fig .7. Transport current loss in each layer of HTS cable(  $R = 0$  )

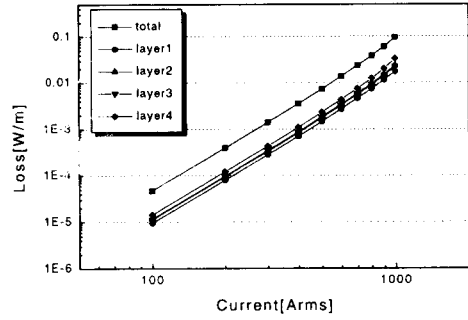


Fig .8. Transport current loss in each layer of HTS cable(  $R = 10 \mu\Omega$  )

이 각각 0 인 경우와  $10 \mu\Omega$  인 경우에서 노리스 식에 의해 각 층에서 발생하는 손실 값을 계산하여 비교한 결과이다. 저항성분이 0일 때는 전류비가 매우 불균일하고 가장 바깥층에서 흐르는 전류가 전체전류의 대부분을 차지하므로 가장 바깥층에서 대부분 발생한다. 저항 성분이  $10 \mu\Omega$  일 때는 거의 동일한 전류비를 가지므로 손실 역시 각 층에서 비슷하게 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

초전도 송전케이블의 각 층에서 흐르는 전류의 불균일성은 케이블의 통전 능력과 교류 손실에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 각 층들의 자기 인덕턴스와 층 간의 상호 인덕턴스를 계산하여 각 층에 흐르는 전류의 비를 구하였고 각 층에 흐르는 전류에 의해 발생하는 교류손실을 살펴보았다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Kruger et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-Layer Superconducting Prototype Cable Conductor," Trans. on IEEE AS, Vol.9, No.2, 1999, pp.833-836
- [2] S.Mukoyama, et al., "Uniform Current Distribution conductor of HTS Power Cable with Variable Tape-Winding Pitches," Trans. on IEEE AS, Vol.9, No.2, 1999, pp.1269-1272
- [3] H.Noji, "AC Loss of a High-Tc Superconducting Power-Cable Conductor," Supercond. Sci. Technol., Vol.10, 1997, pp.552-556
- [4] G. Vellego and P. Metra, "An Analysis of the Transport Losses Measured on HTSC Single-Phase Conductor Prototype," Supercond. Sci. Technol., Vol.8, 1995, pp.476-483