

케이블 길이에 따른 층별 전류분류를 고려한 다층 고온초전도 송전케이블의 교류손실계산

이지광\*, 이승욱, 차귀수,  
 우석대학교 전기공학과\*, 순천향대학교 정보기술공학부

AC loss of multi-layer HTS power transmission cable considering the current distribution by cable length variation

J.K.Lee\*, S.W.Lee, G.S.Cha,  
 Woosuk University\*, Soonchunhyang University

**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 calculate inductance and current distribution for 4-layer cable using the electric circuit model and compare calculation results of transport current losses by monoblock model and Norris equation

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 층의 송전 전류도 다르게 된다. 송전 전류의 불균일한 흐름은 각 층에 흐르는 전류 중 가장 많은 전류가 흐르는 층이 임계 전류를 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 송전케이블의 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 끝단에서의 전원 단자와의 접촉저항을 이용하여 회로 방정식을 구성하여 각 층에 흐르는 전류의 비를 구하여 송전 전류의 불균일 정도를 살펴보고 각 층에서 계산된 불균일한 송전전류에 의해 발생하는 교류손실을 살펴본다.

2. 본 론

고온 초전도 송전케이블은 일반적으로 4층 구조로 되어 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 임계 전류의 감소를 줄이고, 역기전력 발생량이 적도록 구성되어 있다.

2.1 인덕턴스 및 전류분류

다층 권선 구조의 인덕턴스는 층별 자기 인덕턴스와

층간의 상호 인덕턴스로 나타낼 수 있다. 그림 1은 n층 구조를 갖는 초전도 송전 케이블의 전기 회로 모델을 나타내며, 회로방정식은 식(1)과 같다. 각 층의 자기 인덕턴스 L과 상호 인덕턴스 M이 표시되어 있으며, R은 각 층에서 전원부와의 조인트 저항과 각 층에서 발생하는 교류 손실의 합을 나타낸다. 본 논문에서는 조인트 저항만을 고려한다.

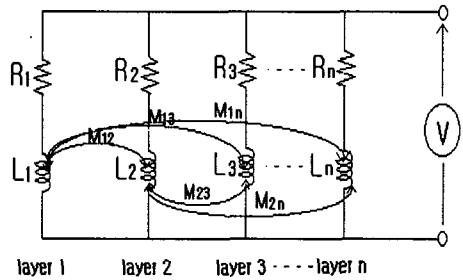


그림 1. n층의 고온초전도 송전케이블의 전기회로 모델

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

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 i층 내·외부 영역에서의 자장은 식(2), (3)과 같다. i층에서 테이프들은 트위스트 된 형태로 권선되어 있기 때문에 내부 영역에서는 축 방향의 자장만 발생하고, 외부 영역에서는 방위각 방향의 자장만 발생하게 된다.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{l_p} \quad r < r_i \text{ 인 영역} \quad (2)$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \quad r > r_i \text{ 인 영역} \quad (3)$$

여기서,  $r_i$ 는 중심으로부터 i층까지의 반경,  $l_p$ 는 권선 피치, I는 i층에 흐르는 전류이다.

초전도 케이블의 각 층의 자기 인덕턴스는 각 층에 전류 I가 흐를 때 식(2), (3)의 자장으로부터 공간에 저장된 자장에너지를 이용하여 구하고, i층과 j층간의 상

호 인덕턴스는  $i$ 층과  $j$ 층에 전류가 흐를 때  $i$ 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 존재한다는 것을 고려하여 저장된 자장에너지를 구하여 계산한다. 식(4)는 결과적으로 구해진  $i$ 층의 자기 인덕턴스이고, 식(5)는 층간의 상호 인덕턴스이다.

$$L_i = L_{cable} \left( \mu_0 \cdot \frac{\pi r_i^2}{l_p^2} + \mu_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{D}{r_i}\right)}{2\pi} \right) \quad (4)$$

$$M_{i,j} = M_{j,i} = L_{cable} \left( \frac{a_i a_j \mu_0}{l_p^2} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \right) \quad (r_j > r_i \text{ 에 대해}) \quad (5)$$

여기서,  $D$ 는  $i$ 층과 송전전류의 리턴패스의 중심사이의 거리이고,  $I_i, I_j$ 는 각각  $i, j$ 층에 흐르는 전류,  $a_i, a_j$ 는 각각  $i, j$ 의 권선 방향이다.

식(4)와 식(5)로 구해진 인덕턴스를 이용하여  $n$ 층의 초전도 케이블에 대한 식(1)의 회로 방정식을 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(6)과 같은 모노 블록 모델(monoblock model)이 주로 사용된다[3][4].

$$L = \frac{\mu_0 f I_c^2}{2\pi h^2} \{ (2 - Fh)Fh + 2(1 - Fh)\ln(1 - Fh) \} \quad (6)$$

여기서,  $I_c$ 는 케이블의 임계전류,  $f$ 는 케이블 동전 전류의 주파수,  $F$ 는 케이블 동전 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 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. 케이블에서 발생하는 교류손실을 무시하고 전류부와의 접촉저항에 의한 케이블의 저항 성분이  $0[\mu\Omega], 10[\mu\Omega], 50[\mu\Omega]$ 이라 가정한 경우에 케이블 길이에 대한 각 층의 전류비를 계산한 결과를 각각 그림 2, 그림 3, 그림 4에 보여준다. 그림 2의 계산 결과를 살펴보면 케이블 각 층의 저항이 0인 경우에는 케이블 길이에 관계없이 항상 심한 전류불균형이 일어나고

표 1. 전류분류 및 교류손실 계산을 위한 초전도 케이블

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

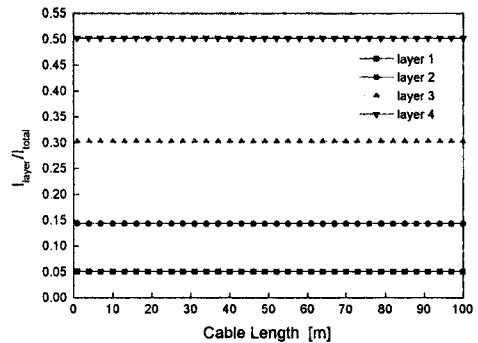


그림 2. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비(R=0)

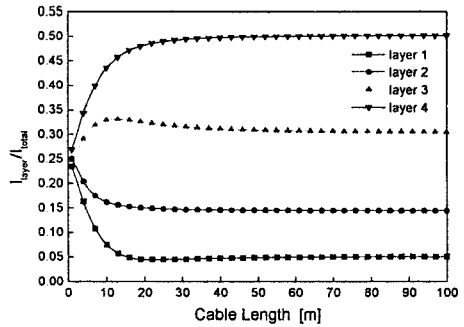


그림 3. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비 (R=10 [ $\mu\Omega$ ])

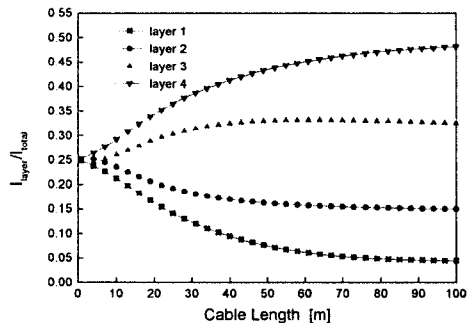


그림 4. 케이블 길이에 대한 각 층의 전류분류비 (R=50 [ $\mu\Omega$ ])

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 3과 그림 4의 결과를 비교하면 각 층의 저항이 크면 전류 불균형이 심화되는 케이블의 길이는 증가함을 볼 수 있다. 즉, 케이블의 길이가 작은 경우에는 전류가 거의 각층에 균등하게 흐르다가 길이가 늘어난다면 전류불균형이 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. 그림 3과 그림 4의 계산 결과에서 전류불균형의 정도는 케이블의 길이와 케이블의 저항성분의 비와 관계가 있음을 알 수 있고, 그림 5는 그에 대한 계산 결과로써 케이블 단위 길이당 저항값에 대한 전류분류비를 보여준다. 계산 결과로부터 각 층의 전류비가 10 [%]이내의 차이를 갖기 위해서는 단위 길이당 저항값이 5 [ $\mu\Omega$ ] 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 이러한 계산 결과는 케이블의 통전전류에 의한 교류손실을 고려하지 않고 얻은 결과로서 교류손실을 고려하게 되면 케이블 길이에 따라 교류손실도 증가하게 되고 그에 대한 저항성분도 증가하게 되므로 전류불균형의 현상은 감소하게 될 것으로 생각된다.

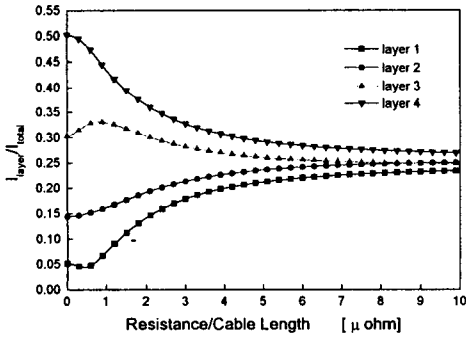


그림 5. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 각 층의 전류분류비

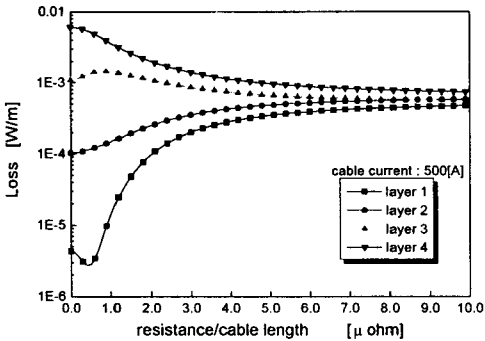


그림 6. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 각 층의 교류손실 (케이블 송전전류 : 500(A))

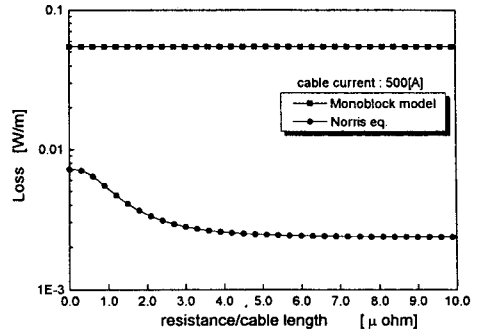


그림 7. 케이블 단위길이당 저항값에 대한 교류손실 계산비교 (케이블 송전전류 : 500(A))

그림 6은 초전도 케이블 전체의 송전전류가 500 [A]일 때 케이블 단위 길이당 저항값에 대해 각 층에서 발생하는 통전전류 손실을 노리스 식을 사용하여 구한 결과이다. 그림 7은 초전도 케이블 전체의 송전전류가 500 [A]일 때 케이블 단위 길이당 저항값에 대해 모노 블록 모델과 노리스 식을 이용하여 구한 통전전류 손실을 비교한 결과이다. 노리스 식에 의한 계산 결과와 작음을 볼 수 있는데, 이는 각 층의 전류가 다름을 고려하였기 때문이며, 모노 블록 모델의 경우보다는 더 정확한 계산 결과로 생각된다.

#### 4. 결 론

다층 구조의 송전 케이블에서는 각 층의 인덕턴스가 다르므로 각 층의 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 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 살펴보고 계산된 불균일한 송전전류에 의해 발생하는 교류손실을 살펴보았다. 각 층으로의 송전 전류의 균일성을 증가시키기 위해서는 단위 길이당 저항성분을 증가시켜야 하지만 이는 여러 가지 문제점들을 발생시키므로 인덕턴스를 감소시키거나 층별 인덕턴스를 조절할 수 있도록 하는 해결책이 필요하다. 각 층의 발생 교류손실을 고려한 전류비 계산과 각 층의 권선 피치 및 방향의 변화를 고려한 계산을 수행할 예정이다.

#### (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. Vellejo 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