

균일 전류분포 및 교류손실을 고려한 다층 고온초전도 전력케이블의 설계

주진홍\*, 김석환\*, 배준한\*, 김해종\*, 조전욱\*, 성기철\*, 이지광\*\*, 홍정표\*\*\*  
 한국전기연구원\*, 우석대학교\*\*, 창원대학교\*\*\*

Design of Multi-Layer HTS Power Transmission Cable  
 Considering Balanced Current Distribution and Reducing AC Loss

Jin-Hong Joo\*, Seog-Whan Kim\*, Joon-Han Bae\*, Hae-Jong Kim\*, Jeon-Wook Cho\*, Ki-Chul Seong\*, Ji-Kwang Lee\*\*, Jung-Pyo Hong\*\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*, Uhsuck University\*\*, Changwon National University\*\*\*

**Abstract** - An HTS power cable has multi-layer conductor structure to increase the current capacity. However, usually the current is not evenly distributed among the layers. This paper describes a method to make the current distribution more uniform and hence reduce the AC loss. Also, this paper shows recommendation for future cable conductor prototypes.

1. 서 론

네덜란드의 Kamerlingh Onnes가 초전도 현상을 발견한 이래, 손실이 없는 전력전송에 관해 1961년 R. McFee가 초전도 케이블을 처음 제안했다. 1987년 임계온도가 90K이상인 고온초전도 재료가 발견되면서, 전력케이블 등의 초전도 기술은 여러 가지 실용화 방안에 대해서 활발한 연구가 추진되어왔다. 현재 덴마크는 세계 최초로 고온초전도 전력케이블을 계통에 연계 운용중에 있으며, 미국과 일본도 곧 실용화할 것으로 예상되고 있다 [1].

고온초전도 전력케이블은 기존의 구리도체 대신 전기 저항이 거의 없는 고온초전도 도체를 사용하기 때문에 저전압·대전류로 저손실 대용량 송전이 가능하다. 이로 인해, 전력계통에서 초고압 변전설비의 생략과 절연전압 레벨의 감소로 송·변전기기의 소형화 및 전력기기의 가격 저하가 가능하여 송전비용이 절감된다. 초전도 전력케이블 1회선당 높은 송전밀도는 케이블의 소형화를 가능케 하여, 향후 대용량 부하가 집중된 도심지 전력계통의 신규 설비에 대해 건설비 감소시킬 수 있어서 경제성 측면에서도 유리하다 [2].

고온초전도 케이블의 실용화를 위한 선행과제로서 낮은 교류손실과 냉각손실을 들 수 있고, 각층의 전류분포가 균등해질 때 교류손실은 저감되고, 발생하는 냉각손실 또한 감소된다 [3]. 따라서, 케이블 설계와 최적화를 위해서는 층간 전류분포를 결정짓는 파라미터들의 연구가 필요하며, 가장 중요한 변수는 선로 인덕턴스로서 다층 구조 케이블의 형상에서 산출할 수 있다 [4].

본 논문에서는 고온초전도 전력케이블의 각 층의 피치에 따른 인덕턴스를 산출하고, 간이 등가 전기회로를 통해 각 층의 전류분포와 이에 따른 교류손실을 계산하였다. 그리고 향후 케이블 제작을 고려해서 균일한 전류분포와 낮은 교류손실을 가지는 모델을 해석적인 방법을 통해 도출하였다.

2. 본 론

2.1 해석 대상

본 논문의 해석 대상은 former를 중심으로 고온초전도 선재로 구성된 4개의 도체층과 2개의 자기절드층, 그리고 이 사이에 절연층으로 구성되는 고온초전도 전력케이블로서 주요 사양은 표 1과 같다.

표 1 고온초전도 전력케이블 사양

도체층수	4 층
자기절드층수	2 층
운전 전류	1260 [A]
HTS tape 두께	0.26 [mm]
HTS tape 폭	4.04 [mm]
임계 전류	65 [A]
포머직경(도체층내경)	25.5 [mm]
층간 절연두께	0.1 [mm]
도체층 외경	28.48 [mm]
절연층 두께	4.51 [mm]
자기절드층 내경	38.54 [mm]
자기절드층 외경	39.78 [mm]
권선 피치	200 ~ 800 [mm]
전체 케이블 길이	250 [m]

2.2 해석 이론

2.2.1 저장에너지에 따른 인덕턴스

고온초전도 전력케이블의 형상은 그림 1과 같다. 케이블에 인가된 전류는 각 층에 권선된 고온초전도 tape에 흐르고 그림 2에서와 같이 권선층 내부와 외부에 자계가 형성된다. 각 층의 자기 저장에너지를 이용하여 계산한 자기 인덕턴스는 식(1)과 같다 [5].

$$L = \mu_0 \frac{\pi r_i^2}{l_{pi}^2} + \mu_0 \frac{\ln\left(\frac{D}{r_i}\right)}{2\pi} \quad (1)$$

여기서,  $l_{pi}$ 는 권선각  $\alpha$  ( $\tan \alpha = 2\pi r_i / l_{pi}$ )에 의해 주어지는  $i$ 층의 권선피치이고,  $r_i$ 는  $i$ 층 반경,  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 투자율,  $D$ 는  $i$ 층과 자속의 폐경로 중심간의 거리이다.

각 층에서의 상호 인덕턴스  $M_{ij}(=M_{ji})$ 도 안쪽의  $i$ 층과 바깥쪽  $j$ 층의 자기 저장에너지를 통해서 식(2)와 (3) 같이 표현된다 [5].

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

$$M_{i,j} = M_{j,i} = \frac{a_i a_j \mu_0}{l_{pi} l_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \text{ for } r_j > r_i \quad (3)$$

여기서,  $a_i$ ,  $a_j$ 는 각 층의 권선방향에 대한 상대적인 상수이다.

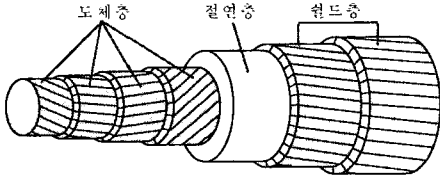
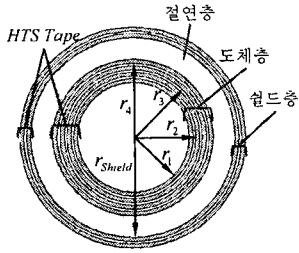


그림 1. 다층 고온초전도 전력케이블의 구조

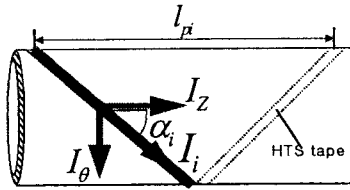


그림 2. 다층 고온초전도 전력케이블에서의 자계 분포

### 2.2.2 기하학적인 형상에 따른 인덕턴스

케이블의 형상에서 근사적인 해석방법으로 인덕턴스를 계산할 수 있다. 임의의 두 층간 상호 인덕턴스는 식(4)으로 표현된다 [6].

$$M_{ij} = M_{zij} + M_{\theta ij} \quad [H/m] \quad (4)$$

여기서,  $M_{zij}$ 는 케이블의 축방향 전류성분에 의한 상호 인덕턴스,  $M_{\theta ij}$ 는 케이블의 원주방향 전류성분에 의한 상호 인덕턴스이며,  $i=j$ 일 때는 자기 인덕턴스가 된다.

그림 2와 같이 원주방향의 자계에 의한 층간 상호 인덕턴스  $M_{\theta ij}$ 는 식(5)로 표현된다 [6].

$$M_{zij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2l_{total}}{r_j} - 1 \right) \quad (5)$$

$$\ln r_j = \ln a - \frac{b^4}{(a^2 - b^2)^2} \ln \frac{a}{b} + \frac{1}{4} \frac{3b^2 - a^2}{a^2 - b^2} \quad (6)$$

$$\ln r_j = \frac{a^2 \ln a - b^2 \ln b}{a^2 - b^2} - \frac{1}{2} \quad (7)$$

여기서,  $i < j$ 이고, 외반경  $a (= r_j + t/2)$ , 내반경  $b (= r_j - t/2)$ ,  $l_{total}$ 은 케이블의 전체 길이,  $\ln r_j$ 는 자기 인덕턴스 계산시 식(6)을, 상호 인덕턴스 계산시 식(7)을 대입한다.

그림 2와 같이 축방향 성분 자계에 의한 층간 상호인덕턴스  $M_{\theta ij}$ 는 식(8)으로 표현된다.

$$M_{\theta ij} = \mu_0 \pi r_i^2 \left( \frac{\tan \alpha_i}{2\pi r_i} \right) \left( \frac{\tan \alpha_j}{2\pi r_j} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{r_i}{r_j} \right) (\tan \alpha_i)(\tan \alpha_j) \quad (8)$$

### 2.2.3 각 층의 인덕턴스에 따른 간이등가회로

고온초전도 전력케이블의 정상상태 전류분포는 각 층에서 전압강하가 동일하다면 그림 3과 같이 간이등가 전기회로로 만들 수 있으며 식(9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ e_{s1} \\ e_{s2} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} Z_1 & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n} & M_{1,s1} & M_{1,s2} \\ M_{2,1} & Z_2 & \cdots & M_{2,n} & M_{2,s1} & M_{2,s2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \cdots & Z_n & M_{n,s1} & M_{n,s2} \\ M_{s1,1} & M_{s1,2} & \cdots & M_{s1,n} & Z_{s1} & M_{s1,s2} \\ M_{s2,1} & M_{s2,2} & \cdots & M_{s2,n} & M_{s2,s1} & Z_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{s1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $e_{s1} = e_{s2} = 0$ (섀드층 전압),  $Z_i = L_i + \frac{R_i}{j\omega}$  ( $R_i$ 는 접촉저항,  $L_i$ 는  $i$ 층 자기 인덕턴스),  $\omega$ 는 각주파수,  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 만약, 임의의 한 층의 전류가 층의 임계전류에 도달하게 되면, 운전전류의 분포가 달라지게 되므로, 각 층의 임계전류는 전류분포에 직접적인 영향을 미친다.

### 2.2.4 다층 케이블에서의 교류손실

초전도체에 교류전류와 교류자계가 인가되면 교류손실이 발생하며 그 주원인은 통전전류에 의한 자기 자계손실과 외부자계에 의한 자화손실 및 결합손실이다. 본 논문에서 자기 자계손실은 식(10)과 같은 Norris식으로 계산하였다 [7].

$$Q_i = \frac{\mu_0 f^2 c_i^2}{2\pi} \{ (2 - F_i) F_i + 2(1 - F_i) \ln(1 - F_i) \} [W/m] \quad (10)$$

여기서,  $f$ 는 주파수,  $I_{cn}$ 는  $i$ 층에서의 운전전류의 피크치,  $I_{cn}$ 는 임계전류,  $F_i = I_{in}/I_{cn}$ 는 운전전류의 피크치와 임계전류 사이의 비를 나타낸다.

자화손실은 Bean모델을 사용하며 식(11)과 같다 [8].

$$Q_i = \frac{2fB_{ij}^2}{\mu_0} \frac{\beta_i}{3} S_i \quad \beta_i < 1 \\ = \frac{2fB_{ij}^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^3} \right) S_i \quad \beta_i > 1 \quad (11) \\ \left( \because \beta_i = \frac{B_{ij}}{\mu_0 J_c} \right)$$

여기서,  $b$ 는 Bean모델상의 초전도 선재의 두께,  $J_c$ 는 임계전류밀도,  $B_{ij}$ 는  $i$ 층의 초전도 선재에 인가되는 수평자계 성분이다.

### 2.3 전류분포 및 교류손실 계산

이상의 이론을 바탕으로 각 층에 거의 균일한 전류분포가 되고, 교류손실이 작은 모델을 산출하기 위한 해석 프로그램을 작성하였다.

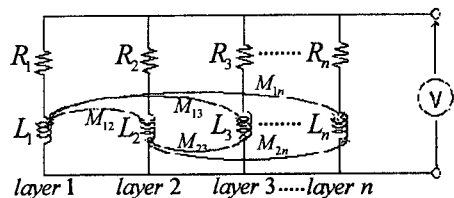


그림 3 다층 케이블의 간이 등가 전기회로

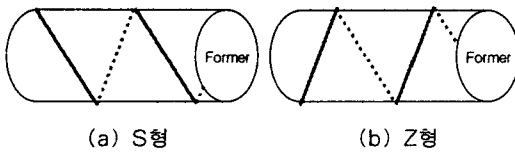


그림 4. 'S'형 권선방향과 'Z'형 권선방향

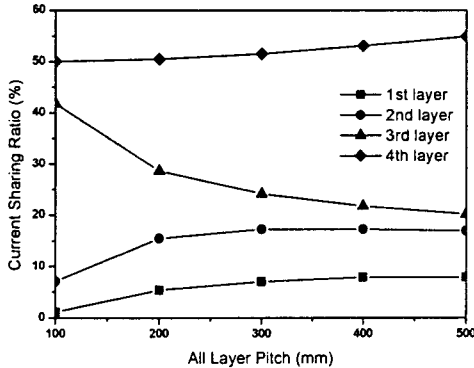


그림 5. 모든 층의 피치 증가에 따른 전류분포

표 2 'SSZZ' 해석 모델의 결과 비교

구 분	SSZZ
1층 전류분포비	24 ~ 26 [%]
2층 전류분포비	24 ~ 26 [%]
3층 전류분포비	24 ~ 26 [%]
4층 전류분포비	24 ~ 26 [%]
단위길이당 AC Loss	0.136 [W/m]

표 3 도체층 'SSZZ', 쉘드층 'SS' 모델의 해석결과

구 분	SSZZ+SS
1층 전류분포비	22.5 ~ 27.5 [%]
2층 전류분포비	22.5 ~ 27.5 [%]
3층 전류분포비	22.5 ~ 27.5 [%]
4층 전류분포비	22.5 ~ 27.5 [%]
쉘드내층 전류	- 570 [A]
쉘드외층 전류	- 750 [A]
도체층 AC Loss	0.81 [W/m]
단위길이당 전체 AC Loss	1.34 [W/m]

### 2.3.1 계산 프로그램 구성

이 프로그램은 기본적인 선재 자료와 케이블 자료를 입력후 각 층마다 임의구간에서 권선피치를 변화시켜주면 층간 도체수와 인덕턴스, 운전전류가 계산되며, 이에 따른 교류손실과 소모도체량을 계산한다. 결과는 층간 전류가 균등하게 분포되고 교류손실이 허용범위에 만족하는 값만 출력한다.

### 2.3.2 계산 결과

그림 4는 S형 권선방향과 Z형 권선방향을 도시한 것이다. 도체층이 4층인 고온초전도 케이블은 각 층의 권선방향에 따라 8개 모델로 구분된다.

- ① SSSS    ② SSSZ    ③ SSZS    ④ SSZZ  
 ⑤ SZSS    ⑥ SZSZ    ⑦ SZSS    ⑧ SZZZ

기본적으로 피치가 증가하는 층은 인덕턴스가 감소하여 층의 전류는 증가한다. 그림 5는 모든 층의 피치를

동일하게 증가시켰을 때의 전류분포를 나타내며, 최외곽층의 피치변화가 케이블의 전류분포에 큰 영향을 끼치는 것을 보여준다.

쉘드층을 고려하지 않고, 저장에너지에 따른 인덕턴스를 산출하는 방법으로 도체층의 각 층 피치를 임의범위 안에서 변화시켜 각 층의 전류분포와 교류손실을 비교하였다. 대체로 각 층에서 균일 전류분포는 'SSSS', 'ZSSS', 'SSSZ', 'SSZZ', 'SZSZ'의 5개 모델에서 나타났고, 이중 교류손실은 'SSZZ'와 'SZSZ'가 다른 모델들에 비해 10~30배 적은 것으로 계산되었다. 표 2는 'SSZZ'에 대한 전류분포비와 손실을 산출한 결과이다.

자기쉘드층을 고려한 기하학적인 형상으로 인덕턴스를 산출하여 표 2의 모델에 대한 결과를 산출하였다. 쉘드층에 유기되는 전류에 의해 모델별로 전류분포와 교류손실의 양이 변화하였다. 쉘드층에서 유기되는 전류는 도체층 전체에 미치는 자화손실을 증가시키고, 자기 전류로 인해 동전손실 또한 발생시킨다. 또한 쉘드층은 피치에 따라 쉘드층 HTS tape의 임계전류에 가까운 전류가 흐를 수 있고, 도체층의 전류분포와 손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 쉘드층의 피치도 설계시 주요한 파라미터로 사료된다.

이상의 결과를 종합할 때, 향후 케이블 제작을 위해서는 권선방향의 경우 자체도체층은 'SSZZ', 쉘드층은 'SS'로 구성하고, 쉘드층의 피치를 크게 하면 다른 모델들에 비해 손실이 5배~10배 적은 것으로 계산되었다. 이 모델에서의 전류분포와 교류손실은 표 3과 같다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 두 개의 자기쉘드층을 포함하는 4층 고온초전도 전력케이블의 기하학적인 형상에 따른 각 층의 인덕턴스 관계를 산출하였다. 이에 따른 전류분포와 교류손실에 대해 이론적 연구를 통한 해석적인 방법으로 검토하였다. 각 층의 균등한 전류분포를 위해서는 도체층의 최외곽층 권선피치는 작게 하고, 층간 권선방향은 층이 서로 교차시키면 된다. 이에 의해 교류손실도 감소된다. 그리고, 자기쉘드층의 권선피치는 크게 하고, 권선방향을 동일하게 할 때, 도체층의 전류분포는 균등해지고, 쉘드층의 자기 전류에 의한 교류손실이 작아졌다. 향후, 이상의 결과를 고온초전도 전력케이블 제작을 위한 설계에 반영하여, 제작과 실험을 통해 위 결과를 검증할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 조전욱 외 3, "고온초전도 전력케이블의 기술동향", 초전도와 저온공학, 2권 1호 1월, pp. 19-29, 2000
- [2] 조전욱, 고온초전도 케이블의 교류손실 및 자장분포 해석에 관한 연구, 연세대학교 공학박사 학위논문, 2001
- [3] 이지광, 교류 초전도선에서 필라멘트의 트루스트를 고려한 자기장 손실, 서울대학교 공학박사 학위논문, 1997
- [4] S. Krüger Olsen et., "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconduction Prototype Cable Conductor", IEEE Trans. on Appl. Supercon. Vol. 9, No.2, pp.833-835, 1999
- [5] 주진홍 외 6, "교류손실 저감을 위한 다층 고온초전도 전력케이블의 층별 피치 선정", 대한전기학회 경남지부 춘계학술대회 논문집, pp.58-61, 2002
- [6] 近藤潤次郎, "多層ケーブルの偏流を抑制する巻キピッチ角の決定法", 電気學會論文集B部門, 120卷7号, pp. 988-996, 平成12年(2000)
- [7] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying as isolated conductors and edges of thin sheets", Journal of Physics D 3, p.489 (1970)
- [8] Martin N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press Oxford, 1983