

연방향 영향을 고려한 2층 고온초전도 전력케이블 코어 설계

주진홍, 김석환, 조전욱, 배준한, 김해종, 김해준, 성기철, 홍정표*
한국전기연구원, 창원대학교 전기공학과*

Design of a 2-Layer HTS Power Transmission Cable Core According to the effect of Winding Direction

Jin-Hong Joo, S.W. Kim, J.W. Cho, J.H. Bae, H.J. Kim, H.J. Kim, K.C. Seong, J.P. Hong*
Korea Electrotechnology Research Institute,
Dep. of Electrical Engineering, Changwon National University*

jcrimson@freechal.com

Abstract - A typical HTS power transmission cable has multi-layer conductor structure to increase the current capacity. The current distribution among the conductor tapes is controlled mainly by pitches and winding directions of the layers, because the inductance of the layer is determined by the pitch and the winding direction. 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. If we choose a good combination we can find the optimal pitches and make an even current distribution. We studied the effect of the winding direction on a 2-layer cable by a statistical way. Calculation results and discussions will be presented.

Keyword: HTS power transmission cable; Design of HTS cable; uniform current; AC Loss

1. 서 론

네덜란드의 Kamerlingh Onnes가 초전도 현상을 발견한 이래, 손실이 없는 전력전송에 관해 1961년 R. McFee가 초전도 케이블을 처음 제안했다. 이후 고온초전도 전력케이블에 대한 연구는 고온초전도 재료가 발견을 기점으로 실용화를 목표로 미국, 일본과 유럽을 중심으로 연구되어왔다. 현재 덴마크는 세계 최초로 고온초전도 전력케이블을 계통에 연계 운용 중에 있으며, 미국과 일본도 실용화를 대비해 계통에 연계해 시험 중에 있다.

초전도 전력케이블은, 높은 전류밀도를 가지는 초전도체를 사용하기 때문에, 기존 전력케이블보다 더 작은 크기로 저전압·대전류로 대용량 송전이 가능하다. 이로 인해, 전력계통에서 초고압 변전설비의 생략과 절연전압레벨의 감소로 송·변전기기의 소형화 및 전력기기의 가격 저하

가 가능하여 송전비용이 절감된다. 그리고, 적은 송전손실은 또한 전력케이블 운용단가를 낮출 수 있다. 이러한 장점을 가지는 HTS 전력케이블은 대용량 부하가 집중된 도심지 전력계통의 신규 설비에 적용시킨다면 경제적인 대체수단이 될 수 있다 [1].

HTS 전력케이블에서 요구되는 중요한 기술로는 교류손실 저감시키는 것이다. 도체층간의 균일한 전류분포가 될 때 케이블 도체의 전체 사용율을 높일 수 있으며, 교류손실 또한 줄일 수 있다 [2].

지금까지의 연구에서 낮은 임계전류를 가지는 HTS 도체를 사용하여 전류용량을 늘리기 위해서 케이블을 그림 1과 같이 복잡한 형상의 다층 구조로 설계하였다. 그리고, 각 층에서 균일한 전류분류가 되기 위한 케이블 설계 대한 연구를 진행하였다 [3,4]. 하지만 고 임계전류를 가지는 선재가 속속 개발되면서, 그림 2와 같이 층수를 낮추더라도 기존의 전류용량을 만족시킬 수 있다. 또한, 층수가 줄어들면, 케이블 제작에서 대부분의 비용을 차지하는 선재의 소요 경비가 획기적으로 줄기 때문에 더욱 경제성이 향상된다.

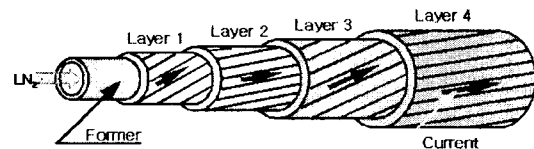


Fig. 1. Multi-Layers HTS Power Transmission Cable

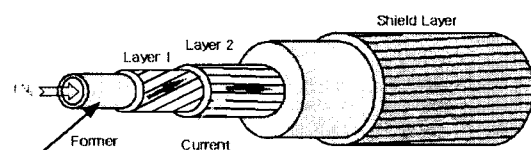


Fig. 2. 2-Layers HTS Power Transmission Cable

본 논문에서는 2층 구조의 고온초전도 전력케이블 설계를 위한 기초가 내용을 이전 연구 결과들을 이용해 다루기로 한다. 그리고, 연방향 영향에 따른 전류분류와 적정 권선피치 범위를 알아본다.

2. 본 론

2.1 설계사양

현재까지 설계가 진행된 2층 구조의 HTS 전력케이블의 설계사양과 이에 사용되는 HTS tape의 사양은 표 1, 2와 같다.

Table 1. Specification of HTS Cable

Num. of Conductor Layer	2
Num. of Magnetic Shield Layer	1
Total Current	1260 [A]
Diameter of former	25.5 [mm]
Insulation thickness	0.1 [mm]
Thickness of Insulation Layer	4.64 [mm]
Diameter of Magnetic Shield Layer	27.52 [mm]

Table 2. Specification of HTS tape

Thickness	0.3 [mm]
Width	4.1 [mm]
Critical Current @77[K]	115 [A]

2.2 선로 인덕턴스 산출방법

케이블의 형상에서 근사적인 해석방법으로 인덕턴스를 계산할 수 있다. 임의의 두 층간 상호인덕턴스는 식(1)으로 표현된다 [5].

$$M_{ij} = M_{zij} + M_{\theta ij} \quad [H/m] \quad (1)$$

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.

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

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

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

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

여기서, $i \leq j$ 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(3)을, 상호 인

덕턴스 계산시 식(4)을 대입한다.

축방향 성분 자계에 의한 층간 상호인덕턴스 $M_{\theta ij}$ 는 식(5)으로 표현된다 [5].

$$\begin{aligned} M_{\theta ij} &= \mu_0 \pi r_i^2 \left(\frac{\tan \alpha_i}{2\pi r_i} \right) \left(\frac{\tan \alpha_j}{2\pi r_j} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{r_i}{r_j} \right) (\tan \alpha_i) (\tan \alpha_j) \end{aligned} \quad (5)$$

2층 구조의 고온초전도 전력케이블의 정상상태 전류분포는 각 층에서 전압강하가 동일하다면 식(6)과 같이 계산할 수 있다 [5].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ e_{sl} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} Z_1 & M_{1,2} & M_{1,sl} \\ M_{2,1} & Z_2 & M_{2,sl} \\ M_{sl,1} & M_{sl,2} & Z_{sl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{sl} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $e_{sl} = 0$ (셴드층 전압), $Z_i = L_i + \frac{R_i}{j\omega}$ (R_i 는 접촉저항, L_i 는 i 층 자기 인덕턴스), ω 는 각주파수, $j = \sqrt{-1}$ 이다.

2.3 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(7)과 같은 Norris식으로 계산하였다 [6].

$$Q_i = \frac{\mu_0 f^2 I_{ci}^2}{2\pi} \{ (2 - F_i) F_i + 2(1 - F_i) \ln(1 - F_i) \} [W/m] \quad (7)$$

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

자화손실은 Bean모델을 사용하며 식(8)과 같다 [7].

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{2fB_{ill}^2}{\mu_0} \frac{\beta_i}{3} S_i \quad \beta_i < 1 \\ &= \frac{2fB_{ill}^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^3} \right) S_i \quad \beta_i > 1 \\ &\quad \left(\because \beta_i = \frac{B_{ill}}{\mu_0 J_c b} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

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

2.3 설계결과

2층 고온초전도 전력케이블은 연방향에 대해서 SSS, SSZ, SZS, SZZ와 같이 4개의 모델로 구분된다. 위 4개 모델에서 1층과 2층의 제작가능한 도체층 피치범위에 대해서 도체층 1층의 전류분포는 다음 그림 3, 4, 5, 6과 같다.

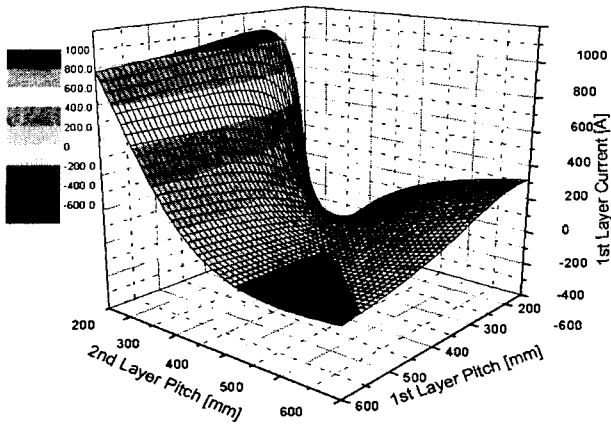


Fig. 3. SSS 1st Layer Current

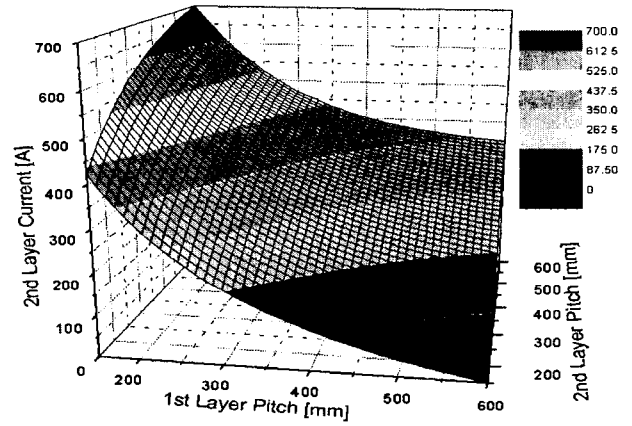


Fig. 7. SZS 2nd Layer Current

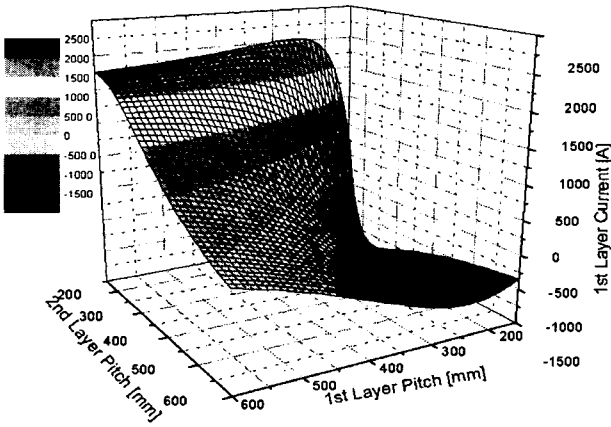


Fig. 4. SSZ 1st Layer Current

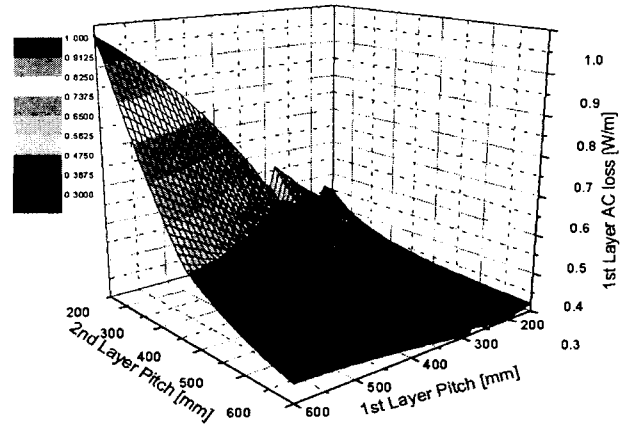


Fig. 8. SZS 1st Layer AC Loss

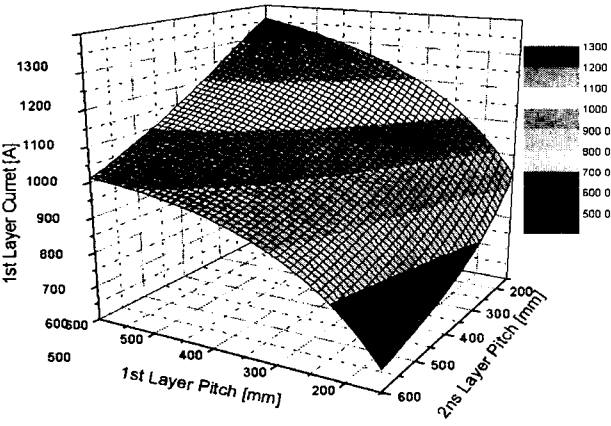


Fig. 5. SZS 1st Layer Current

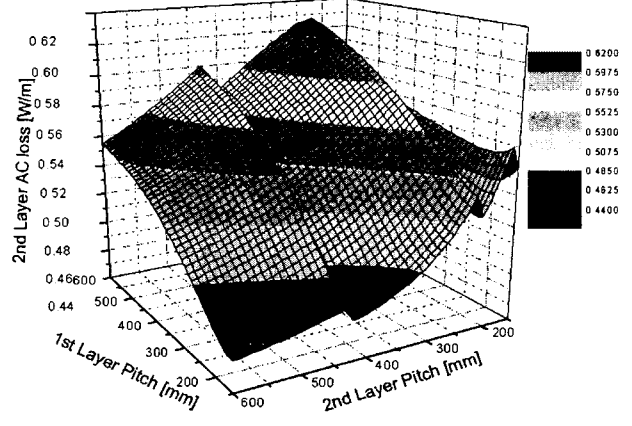


Fig. 9. SZS 2nd Layer AC Loss

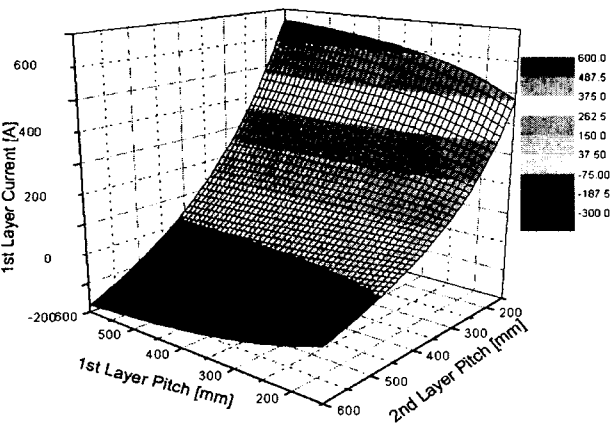


Fig. 6. SZZ 1st Layer Current

케이블의 운전전류가 1260[A]이기 때문에, 균일한 전류분포가 되기 위해서는 총당 630[A]의 전류가 흘러야 한다.

그림 3은 연방향이 SSS로 된 모델에서 1층의 전류분포이다. 범위는 -600~1000[A]를 가지며, 균일한 전류분포가 되기 위한 630[A]부분에서 피치변화에 비해 운전전류의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 또한 제작 공차를 고려할 때, 약간의 피치변동은 다른 특성을 가지는 케이블이 만들어질 수도 있다. 그리고, 역방향 성분의 전류가 흐른다면, 다른 층에서 그만큼의 전류를 더 흘려줘야 하는 등의 부담을 준다. 이런 관점에서 본다면, 그림 4, 6과 같이 연방향이 SSZ, SZZ

로 된 모델 또한 실제 케이블에 적용할 수 없는 모델로 선정할 수 있다.

그림 5와 같이 1층과 2층의 피치 범위 중에 일단 역방향 전류분포가 없고, 피치에 대한 전류분포 변화가 완만한 SZS가 2층 구조 고온초전도 전력케이블에 가장 적합한 연방향으로 산정할 수 있다. 그림 7은 연방향이 SZS일 때, 2층의 전류분포이다.

그리고 각 층의 피치 값은 impedance balance 때문에, 대부분의 연방향에서 공통적으로 1층의 경우 될 수 있는 대로 작아야 하며, 2층은 큰 값으로 가져갈 때, 각 층에서 균일한 전류가 흐를 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 8과 9는 연방향이 SZS인 모델의 피치에 따른 1층과 2층의 교류손실 분포를 나타낸 그림이다. 교류손실을 보더라도 균일한 전류가 흐를 수 있는 피치 값일 때, 적은 것을 확인할 수 있다.

이를 종합해 볼 때, 연방향은 SZS이고, 1층 피치 값은 I_c degradation이 고려된 피치 범위 중 가장 작은 값, 2층의 피치 값은 피치 범위 중 가장 큰 값을 가지도록 설계한다면, 전류분류가 동일하고 교류손실이 적은 케이블의 설계요건이 될 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 높은 임계전류 특성의 도체를 적용할 경우 기존의 전류용량을 만족시키며 도체 층수를 줄일 수 있다. 케이블 제작비용을 획기적으로 줄일 수 있는 2층 고온초전도 전력케이블 설계에 대해서 살펴보았다. 2층 구조의 고온초전도 전력케이블 설계를 위한 기초는 이미 4층 고온초전도 전력케이블에 대한 연구로 선행하였다. 두 가지 경우 모두 연방향은 층별로 서로 교차되게 하며, 1층 피치값은 작게, 2층 피치값은 크게 가져갈 때 전류분류가 좋고, 교류손실도 작다는 것을 알 수 있었다. 이는 4층 구조의 전력케이블의 결과와 유사하다[3,4]. 향후, 이상의 결과를 고온초전도 전력케이블 제작을 위한 설계에 반영하여, 제작과 실험을 통해 위 결과를 검증할 계획이다.

[감사의 글]

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조전욱, "고온초전도 케이블의 교류손실 및 자장분포 해석에 관한 연구", 연세대학교 공학박사 학위논문, 2001
- [2] 이지광, "교류 초전도선에서 필라멘트의 트위스트를 고려한 자기자계 손실", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1997
- [3] Jin-Hong Joo et al., "Pitch Calculation of 4-layer HTS Power Transmission Cable for Balanced Sharing Current", Korea-Japan Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2002.
- [4] Seok-Whan Kim et al., "Effect of Winding Direction on 4-layer HTS Power Transmission Cable", Korea-Japan Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2002.
- [5] 近藤潤次他, "多層ケーブルの偏流を抑制する巻きピッチ角の決定法", 電氣學會論文集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