'96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (1996. 7. 22~24)

초전도 선재에서의 자기 자계 손실 해석

°이 지광*, 김 우석*, 한 송엽*, 김 호성**, 차 귀수***
* : 서울대학교 전기공학과 ** : 중앙대학교 전기공학과 *** : 순천향대학교 전기공학과

Self-field loss analysis of multifilamentary superconducting wire

Ji-kwang Lee*, Woo-seok Kim*, Song-yop Hahn*, Ho-sung Kim**, Guee-soo Cha***
* : Seoul Nat'l University ** : Choongang University *** : Soonchunhyang University

Abstract - The estimation of AC losses is demanded for higher efficiency and stability in AC use of superconducting coils. Hysteresis loss occured by a.c. transport current is called of self field loss, and it is major part of losses generated in a.c. superconducting wire in case of located in low external magnetic field as superconducting transformer with iron core, or in short twist pitch wire, multiply stacking cable. In this paper, we calculate self field loss of superconducting wire

1. 서 론

초전도 사고 전류 제한기, 초전도 변압기에 사용되는 교류용 초전도 선재는 전송 전류에 의해 발생된 자기 자계가 외부 자계에 비해 상대적으로 크게 되므로 자기 자계 효과가 크게 된다. 초전도 선재는 안정성과 결합 전류 손실 등을 감소시키기 위해 극세의 초전도 필라멘트들이 꼬여있는 형태를 하고 있기 때문에 전송 전류가 흐를 때 발생되는 선재 축방향에 평행한 성분과 원주 방향의 성분을 가지게 되며, 이때 초전도 선재에서 발생하는 손실도 두 방향의 자계 성분을 다 고려하여야 한다. 지금까지 발표된 논문에서 초전도 선재의 직경이 선재내의 필라멘트들이 꼬여 있는 주기인 트위스트 피치에 비해 10배 보다 매우 작은 경우에는 선재 축방향의 자계 성분의 영향이 매우 작다고 여겨 무시하여 왔다. 그러나 근래 들어서 사용되는 교류용 초전도 선재에서는 결합 손실 감소와 안정성을 증가 시키기 위해 트위스트 피치를 줄여주기 때문에 선재 축방향 성분의 자계도 고려해 주어야 한다. 본 논문에서는 임계 전류 밀도 모델을 이용하여 전송 전류가 흐르는 교류용 초전도 선재에서 발생하는 자기 자계 손실을 축 방향의 자계 성분까지 고려하여 해석하고 새롭게 고려된 성분에 의한 영향을 알아보고자 한다.

2. 자기 자계 손실식

초전도 필라멘트들이 동심원의 형태로 규칙적으로 박혀 있는 초전도 선재에 전송 전류를 흘리게 되면 초전도 필라멘트를 통해서 전류가 흐르게 된고 임계 전류 밀도도 전송 전류가 흐르게 되는 초전도 필라멘트 영역인 전류 포화 영역은 선재의 최외곽 층에 위치한 필라멘트로부터 형성되어 점차 안쪽으로 확장되고 이때의 전류 포화 영역의 경계를 이동 경계라 한다. 전송 전류가 최대치 또는 최소치에 이르게 되면 전류 포화 영역은 최대가 되며 최대치를 지나 감소하거나 최소치를 지나 증가하는 시점에서는 전송 전류가 다시 최외곽의 필라멘트로부터 흐르게 되는데 이때의 전송전류는 이동경계를 중심으로 반대 방향으로 임계 전류 밀도로 흐르게 된다. 이 때, 이동 경계의 바깥쪽 영역에서는 원주 방향의 시변 자계 성분이 발생하게 되고, 안쪽 영역에서는 선재 축 방향의 시변 자계가 발생하게 되고, 이러한 시변 자계에 의해 초전도 필라멘트에서는 각각 축 방향, 원주 방향의 전계가 발생하여 자기 자계 손실을 만들게 된다. 이동 경계 바깥쪽과 안쪽에서 발생하는 자기 자계 손실식은 다음과 같이 구할 수 있다.

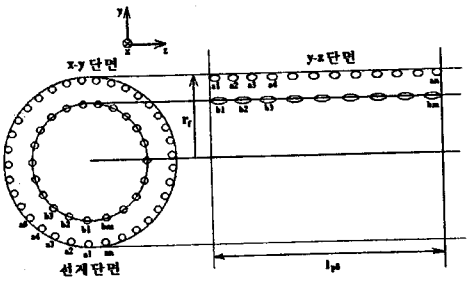

그림 1 초전도 선재의 단면

초전도 필라멘트에 흐르는 전송 전류의 임계 전류 밀도는 필라멘트들이 꼬여 있는 형태를 하고 있기 때문에 축 방향 성분, 원주 방향 성분을 가지게 각 성분은 그림 1과 같이 선재의 x-y단면과 y-z단면을 통해 흐르게 되는 전류량은 같게 된다는 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_{cz} = \frac{l_{p0}}{\sqrt{l_{p0}^{\ 2} + (\pi r_f)^2}} J_c \qquad (1)$$

$$J_{c\theta} = \frac{\pi r_f}{\sqrt{l_{p0}^{\ 2} + (\pi r_f)^2}} J_c \qquad (2)$$

초전도 선재에서 필라멘트 영역의 반경을 r_f , 트위스트 피치를 l_{p0} , 전송 전류를 $I_t(t)(= I_m \cdot \cos\ \omega t)$, 이동 경계를 C 라 하면 각 영역에서의 자계는 다음과 같다.

$$H_{sf,z}(r) = \frac{I_t - \pi\lambda J_{cz}(r_f^2 - r^2)}{2\pi r} \qquad (c < r < r_f) \qquad (3)$$

$$H_{sf,z}(r) = \frac{I_t - I(r)}{l_{p0}} \qquad (0 < r < c) \qquad (4)$$

시변 자계에 의해 발생하는 전계는 다음과 같다.

$$E_{sf,z}(r) = -\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\partial I_t}{\partial t}\ln\frac{r}{c} \qquad (c < r < r_f) \qquad (5)$$

$$E_{sf,\theta(r)} = -\frac{\mu_0}{2 l_{p0}}\, r\, \frac{dI_t}{dt} \qquad (0 < r < c) \qquad (6)$$

따라서, 각 영역에서 발생하는 단위 길이당 순간 전력 손실은 다음과 같다.

$$p_{sf,z}(t) = \frac{\mu_0 l_{p0}\lambda J_c \pi r_f^2}{4\pi\sqrt{l_{p0}^2 + (\pi r_f)^2}}\frac{dI_t}{dt}\left[\ln\left(1 - \frac{i_m}{2} + \frac{i}{2}\right) + \left(\frac{i_m}{2} - \frac{i}{2}\right)\right] \quad \left(i = \frac{I}{I_c},\ i_m = \frac{I_m}{I_c}\right) \qquad (7)$$

$$p_{sf,\theta}(t) = -\frac{\pi^2 r_f \mu_0 \lambda J_c}{3 l_{p0}\sqrt{(\pi r_f)^2 + l_{p0}^2}}\frac{dI_t}{dt}\left(c^3 - r_{sat}^3\right) \qquad (8)$$

여기서 이동 경계 C는 전송 전류가 시변이므로 시간에 따른 함수가 되고 전송 전류의 감소하는 반주기 동안에는 다음 식과 같다.

$$c = r_f\left(1 - \frac{I_m}{2I_c} + \frac{i}{2I_c}\right) \qquad (9)$$

식 (7), 식 (8)을 이용하여 단위 체적당 한 주기 동안의 평균 전력 손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{sf,z} = \frac{f\mu_0 I_c^2}{2\pi(\pi r_f^2)} g_z(i_m) \qquad [W/m^3] \qquad (10)$$

단, $g_z(i_m) = 2(1 - i_m)\ln(1 - i_m) + 2i_m - i_m^2$

$$P_{sf,\theta} = \frac{f\mu_0 I_c^2}{3 l_{p0}^2} g_\theta(i_m) \quad [W/m^3] \qquad (11)$$

단, $g_\theta(i_m) = 3i_m^4 - 8i_m^3 + 6i_m^2$

식 (10), 식 (11)에서 전송 전류의 크기에 따른 손실비를 나타내 주는 함수 $g_z(i_m)$, $g_\theta(i_m)$은 그림 2와 같다.

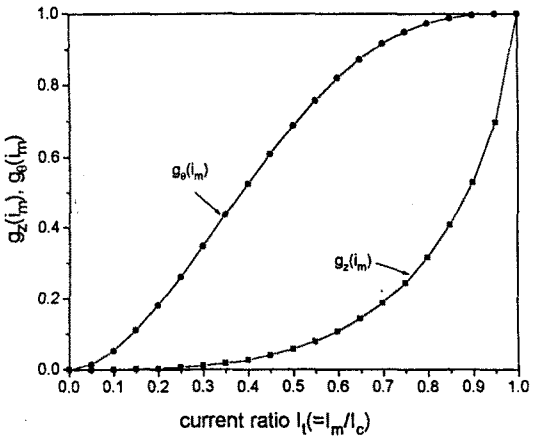

그림 2 전송 전류 크기에 따른 $g_z(i_m)$, $g_\theta(i_m)$

전송 전류가 임계 전류의 70% 이상이 되면 θ 방향의 전계에 의한 손실의 증가보다 z 방향의 전계에 의한 손실의 증가가 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

3. 해석 결과

자기 자계 손실을 계산하기 위한 초전도 선재 사양은 표 1과 같다.

표 1 초전도 선재 사양

소선 반경	0.07 [mm]
필라멘트 반경	0.25 [μm]
Cu : CuNi : NbTi	0.5 : 2.3: 1.0
트위스트 피치	1.4 [mm]
필라멘트 갯수	19800 [개]

트위스트 피치에 대한 자기 자계 손실을 그림 3에 보인다. 트위스트 피치가 1[mm]이하가 되면 θ 방향의 발생 전계에 의한 자기 자계 손실을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

전송 전류의 크기에 따른 자기 자계 손실 변화를 그림 4에, 주파수에 따른 손실 변화를 그림 5에 보인다.

그림 4에서 전송 전류가 15[A] 이하일 경우에는 θ 방향의 발생 전계에 의한 자기 자계 손실이 z방향의 자기

자계 손실 보다 더 크게 되므로 트위스트 피치가 선재 직경의 10배라 할 지라도 선재 축방향으로 발생하는 자계에 의한 손실을 무시할 수 없게됨을 알 수 있다. 그림 5의 경우 주파수에 따라서는 손실이 일정하게 증가함을 알 수 있다.

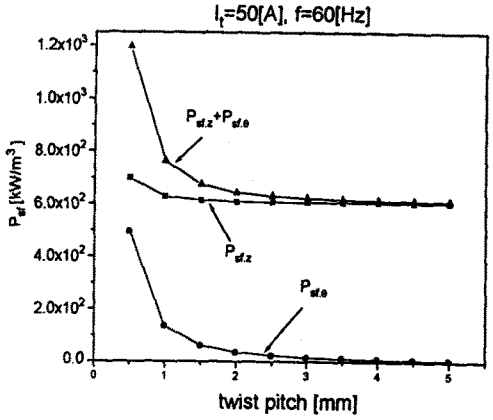

그림 3 트위스트 피치에 따른 자기 자계 손실

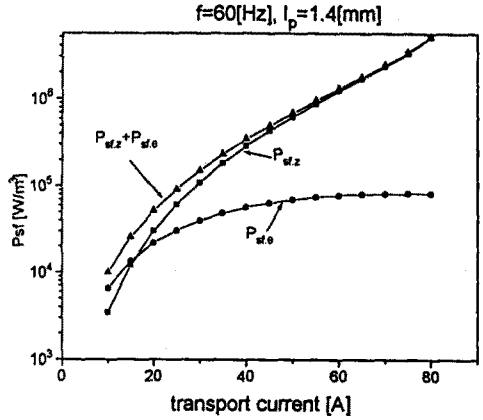

그림 4 전송 전류 크기에 따른 손실 변화

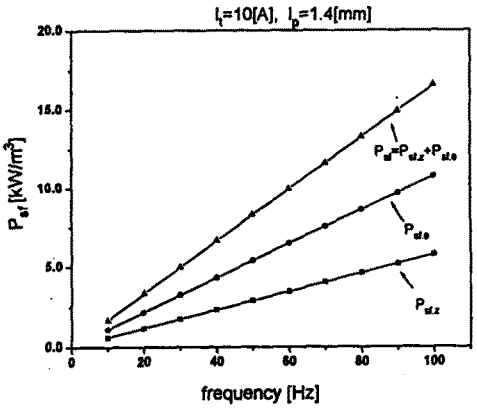

그림 5 주파수에 따른 손실 변화

4. 결 론

교류용 초전도 선재에서 전송 전류가 흐를 때 발생하는 자기 자계 손실식을 유도하고 전송 전류의 크기, 트위스트 피치, 주파수에 대한 자기 자계 손실 변화를 알아 보았다. 지금까지 발표된 바에 의하면 트위스트 피치가 선재 직경의 10배 이상인 경우에는 선재 축 방향의 자계에 의한 자기 자계 손실을 무시해 왔으나, 전송 전류의 크기가 작은 경우에 대해서는 선재 축 방향 자계에 의한 손실을 무시할 수 없음을 알게 되었다.

참 고 문 헌

[1] P.Fabbricator, R.Musenich, "Self Field Effect in the Critical Current Measurement of Superconducting Wires and Cables, "Cryogenics, Vol.29, 1989

[2] N.Amemiya, I.Hlasnik, N.ikeda and O.Tsukamoto, "Current Distribution in Strand and Instability in AC Superconducting Cable," ICFA Workshop on AC Superconductivity, 1992

[3] K.Funaki et al., "Additional AC Losses due to Alternating Magnetic Field Component Longitudinal to Strand Axis in the Armature Winding of Fully Superconducting Generator," IEEE Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, 1993

[4] S.Funaki et al., "Electric Field and Losses at AC Self Field Mode in MF Composites," Proc Magnet Technology 13, Victoria, Canada, Sep, 1993