

교류용 초전도선에서의 자기자계 손실에 관한 연구

°이지광, 차귀수*, 한송엽
서울대학교 전기공학부, * 순천향대학교 전기·전자공학부

Analysis of Self-Field Losses in AC Superconducting Wire

Ji-kwang Lee, Gueesoo Cha*, Song-yop Hahn
Seoul National University, * Soonchunhyang University

Abstract - Phase difference of external magnetic field and self field is known to do an important role in the generation of the AC loss. This paper analize the AC loss of AC superconducting wire in combined action of an AC transport current and AC magnetic field for various phase differences.

1. 서 론

초전도 전력기기에 사용되는 교류용 초전도 선재는 안정성을 높이고, 결합 손실 등을 감소시키기 위해 극세의 필라멘트들이 꼬여있는 형태를 하고 있기 때문에 전송 전류가 흐를 때 발생되는 자기자계는 선재 축방향에 평행한 성분과 원주 방향의 성분을 가지게 되며, 이때 초전도 선재에서 발생하는 손실도 두 방향의 자계 성분을 다 고려하여야 한다.[1,2] 한편, 전력기기 응용에 있어 외부자계와 자기자계가 동시에 존재하면서 두 자계 사이의 위상이 꼭 일치되지 않고, 위상차를 가지게 되는 경우가 많은데 이러한 경우의 손실해석에 대한 연구가 필요하다. 초전도선에서 발생하는 자기자계손실은 외부자계가 존재하는 경우는 그렇지 않은 경우에 대해 다른 양상을 보이며, 두 자계 사이의 위상차에 대해서도 매우 큰 영향을 받게 된다[3]. 본 논문에서는 초전도 필라멘트들의 트위스트를 고려하여 전송전류가 흐르는 초전도선에서 발생하는 자기자계손실에 대해 외부자계가 없는 경우와 외부자계가 있는 경우, 외부자계와 자기자계의 위상차가 있는 경우, 선재 축방향의 외부자계 성분이 있는 경우 손실 계산 방법을 제시하고, 임의의 교류용 초전도 선재 모델에 대한 해석을 통하여 그 결과를 살펴본다.

2. 자기자계 손실식

초전도 선재에 전송 전류를 흘리게 되면 초전도

필라멘트를 통해서 전류가 흐르게 되고 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 경계 바깥쪽과 안쪽에서 발생하는 자기 자계 손실은 각 영역에서의 전류밀도와 유기기전력을 구함으로서 알 수 있다.

2.1 각 영역의 전류밀도

실제로 초전도 선재내의 초전도 필라멘트의 개수는 수천 ~ 수십만개에 이르고 초전도 필라멘트는 상전도체인 안정화재에 균일하게 박혀 있으므로 초전도 필라멘트들이 동심원의 형태로 층별로 규칙적으로 배열되어 있다고 가정하고, 같은 층의 필라멘트에는 같은 전류가 흐른다고 가정했을 때 전류 불포화 영역에서의 전류분포는 이웃하는 두 층에 위치한 두 개의 필라멘트 사이의 결합 자속(Coupling flux)를 계산함으로써 알 수 있다. 자계의 확산정도를 나타내는 자기확산시간(Magnetic diffusion time constant)보다 짧은 시간 범위 내에서는 자계의 확산을 무시할 수 있으므로 불포화영역에서의 결합 자속은 영이 된다고 할 수 있다.[1,3] 이러한 가정으로부터 전류 불포화 영역에서의 필라멘트 층 r_i 내에 흐르는 전류량은 식(1)과 같고, 전류밀도는 식(2)와 같다.

$$I(r_i, t) = \frac{\frac{\pi}{l_{\text{ff}}} \mu_0 I_s(t) (2r_i \Delta r + \Delta r^2) \pm 2\pi \int_{r_i}^{r_i + \Delta r} B_{\text{ex},z}(t) r dr}{\frac{l_{\text{ff}}}{2\pi} \mu_0 \ln(1 + \frac{\Delta r}{r_i}) + \frac{\pi}{l_{\text{ff}}} \mu_0 (2r_i \Delta r + \Delta r^2)} \quad (1)$$

단, $\Delta r = r_j - r_i$

$$j(r_i, t) = \frac{I(r_j, t) - I(r_{sat}, t)}{2\pi r_i \Delta r} \quad (2)$$

이 때, I_{ϕ} 는 트위스트 피치, r_i 는 i 층의 반경, r_j 는 j 층의 반경이다. 전류 밀도는 필라멘트들이 꼬여 있는 형태를 하고 있기 때문에 축 방향 성분, 원주 방향 성분을 가지고 각각의 성분은 그림 1과 같이 선재의 x-y 단면과 y-z 단면을 통해 흐르게 되는 전류량은 같게 된다는 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

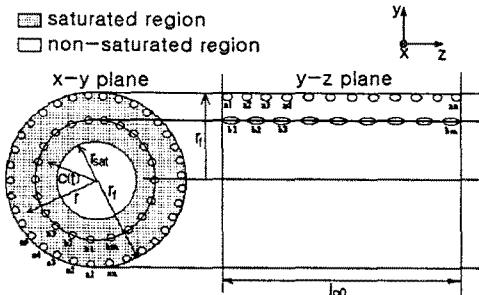


그림 1 초전도 선재의 단면

전류밀도 성분은 전류 불포화 영역에서는 식(3), 식(4)와 같고, 포화영역에서는 Kim and Anderson 모델을 이용하면 식(5), 식(6)과 같이 표현된다.

$$j_x(r_i, t) = j(r_i, t) \frac{l_{\phi}}{\sqrt{(\pi r_i)^2 + l_{\phi}^2}} \quad (3)$$

$$j_\theta(r_i, t) = j(r_i, t) \frac{\pi r_i}{\sqrt{(\pi r_i)^2 + l_{\phi}^2}} \quad (4)$$

$$j_{\alpha}(r, t) = \frac{l_{\phi}}{\sqrt{(\pi r)^2 + l_{\phi}^2}} \frac{j_{\phi}B_0}{B_{\alpha}(t) + B_0} \quad (5)$$

$$j_{c\phi}(r, t) = \frac{\pi r}{\sqrt{(\pi r)^2 + l_{\phi}^2}} \frac{j_{\phi}B_0}{B_{\alpha}(t) + B_0} \quad (6)$$

2.2 전류 포화영역 및 이동 경계

식(3)~식(6)과 같이 구한 전류분포를 이용하여 전류 포화영역이 최대로 되는 시점에서의 전류 포화영역과 불포화영역의 경계 r_{sat} 는 전송 전류가 최대 또는 최소치가 되는 순간이며, 이 경계는 초전도 선재에 흐르는 전류의 총량은 항상 전송전류와 같아야 한다는 조건으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_p = \pi(r_j^2 - r_{sat}^2) \lambda j_{\phi} + I(r_{sat}) \quad (7)$$

식(7)에서 $I(r_{sat})$ 는 $r=r_{sat}$ 내의 영역에서 흐르는 전류를 나타낸다.

한편, 교류 전송전류에 대한 이동경계 $c(t)$ 는 다음과 같은 개념으로부터 식(8)과 같이 표현된다

전송전류 = 이동 경계 바깥 영역에서 흐르는 전류
+ 이동 경계 안쪽 포화영역에서 흐르는 전류
+ 이동 경계 안쪽 불포화영역에서 흐르는 전류

$$c(t) = \sqrt{\frac{I_p(t) + \pi \lambda (r_j^2 + r_{sat}^2) j_c(B) - I(r_{sat}, t)}{2\pi \lambda j_c(B)}} \quad (8)$$

2.3 유기기전력 및 자기자계 손실식

유기 기전력을 구하기 위해서는 교류 전송전류에 의해 발생하는 자기자계의 시간에 따른 변화량을 알아야 한다. 자기자계는 이동 경계 c 의 바깥영역과 안쪽영역에서 각각 다른 성분을 가지게 되며, 각각 전송전류 I_t 로써 표현할 수 있다. 각 영역에서 전송전류에 의해 발생된 자계는 멕스웰 방정식으로부터 구해지며, 이를 이용하여 각 영역에서 발생하는 유기기전력을 구하면 $0 < r < c$ 인 영역에서는 식(9), $c < r < r_f$ 인 영역에서는 식(10)과 같다.

$$E_x(r, t) = -\frac{\pi r^2 \mu_0}{l_{\phi}^2 + (2\pi r)^2} \frac{d}{dt} [I_t(t) - I(r_{sat}, t)] \quad (9)$$

$$E_\theta(r, t) = -\frac{\pi r^2 2\pi r}{l_{\phi}^2 + (2\pi r)^2} \frac{\mu_0}{l_{\phi}} \frac{d}{dt} [I_t(t) - I(r_{sat}, t)]$$

$$E_x(r, t) = -\frac{\mu_0 l_{\phi}^2}{2\pi (l_{\phi}^2 + (2\pi r)^2)} \ln \frac{r}{c} \frac{dI_t(t)}{dt} \quad (10)$$

$$E_\theta(r, t) = -\frac{\mu_0 l_{\phi} r}{l_{\phi}^2 + (2\pi r)^2} \ln \frac{r}{c} \frac{dI_t(t)}{dt}$$

따라서, 식(3)~식(6)과 식(9), 식(10)을 이용하여 자기자계 손실을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{sf} = \frac{2f}{\pi r_f^2} \int_0^{1/2} \int_0^{r_f} \lambda \vec{E} \cdot \vec{j} 2\pi r dr dt \quad (11)$$

3. 자기자계 손실 해석

자기자계 손실 계산을 위한 교류용 초전도 선재의 사양은 표1과 같다.

외부자계가 없고 전송전류만 있을 때의 전송전류 크기에 대한 자기자계 손실은 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 전송전류가 클수록 이동경계 안쪽에서의 손실을 무시할 수 없음을 알 수 있다. 그림 3은 전송전류가 28[A_{peak}]이고, 0.25 [T_{peak}]의 외부자계가 선재축에 대해 청방향으로 인가되는 경우에 대해 두 자계사이의 위상차 0° ~ 180°에 대한

표 1. 손실 계산을 위한 교류용 선재 사양

선재 직경	0.151 [mm]
필라멘트 직경	0.4 [μm]
트위스트 피치(z-twist)	1.5 [mm]
CuNi:NbTi	2.1:1.0
필라멘트 수	19800
필라멘트 영역 직경	0.14 [mm]

자기자계 손실의 계산값이다. 위상차 90°에서 최소의 자기자계 손실이 발생하고, 90°를 중심으로 대칭되는 양상을 보임을 알 수 있다. 그럼 4는 초전도 선재축과 외부자계의 사이각이 85°로서 외부자계중 선재축방향 성분을 가지고 있는 경우의 두 자계사이의 위상차에 대한 자기자계 손실값이다. 위상차 90°에서 최소이며, 90°를 중심으로 비대칭이 됨을 알 수 있다.

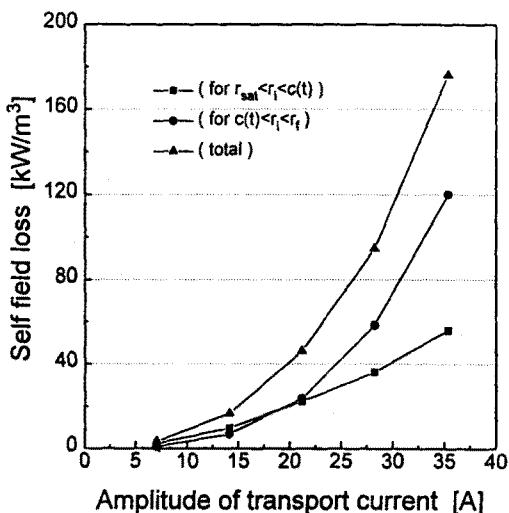


그림 2. 전송전류의 크기에 대한 자기자계 손실

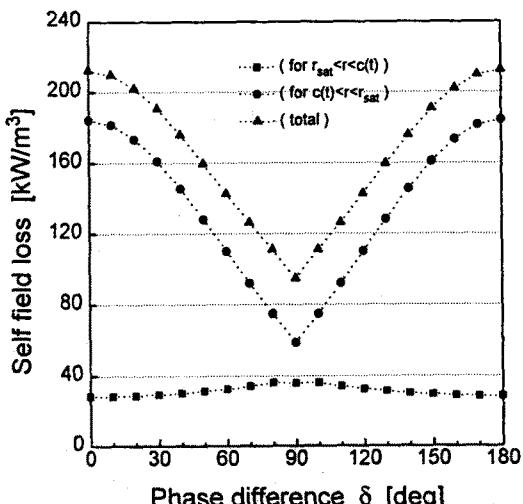


그림 3. 전송전류와 횡방향 외부자계와의 위상차에 따른 자기자계 손실

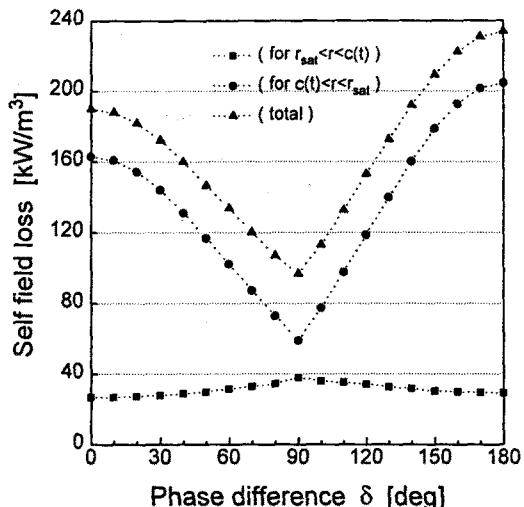


그림 4. 축 방향 자계 성분을 갖는 외부자계와 전송전류의 위상차에 따른 자기자계 손실

4. 결 론

본 연구에서는 교류의 외부자계가 인가되는 초전도선에 교류의 전송전류가 흐를 때 외부자계와 자가자계사이의 위상차에 대한 자기자계 손실을 초전도 필라멘트들의 트위스트를 고려하여 계산하는 방법을 제시하였다. 필라멘트들의 트위스트를 고려함으로써 지금까지는 계산할 수 없었던 이동경계의 안쪽에서 발생하는 손실까지 계산할 수 있게 되었으며 계산 결과에 의하면 이 손실은 무시할 수 없을 정도로 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 위상차 90°에서 항상 최소의 자가자계 손실이 발생함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.Fabbrecator, and R.Musenich, "Self Field Effect in the Critical Current Measurement of Superconducting Wires and Cables," Cryogenics, Vol.29, pp.920-925, 1989
- [2] 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 Trans. on ASC, vol.3, No.1, pp.122-125, 1993
- [3] S.Fukui, O.Tsukamoto, and N.Amemiya, "Dependence of Self Field AC Losses in AC Multifilamentary Composites on Phase of External AC Magnetic Field," IEEE Trans. on ASC, vol. 5, No.2, pp.733-736, 1995