

2중 연선 초전도 케이블에서 소선내의 필라멘트의 트위스트 방향이 자기자계 손실에 미치는 영향

The Influence on Self Field Losses in 2nd Stage Superconducting Cable for Different Twist Direction of Filaments

이지광*, 차귀수**, 한송엽***

Ji-kwang Lee*, Guesoo Cha**, Song-yop Hahn***

Abstract: Strands composing multistage superconducting cables for AC power applications have twisted structure in each stage for lower AC loss and higher stability. So, when transport currents flow in a cable, each strand is exposed to longitudinal and azimuthal magnetic fields produced by transport current flowing in strand itself and longitudinal and transverse magnetic fields by transport current flowing in twisted cable. In this paper, we study the influence on self field losses generated in second stage superconducting cable for different twist direction of filaments in a strand considering twist of strands in cables.

Key Words: superconducting cable, twist direction, transport current, self field loss

1. 서 론

초전도 전력기에 사용되는 교류용 초전도 케이블은 전류용량을 증가시키기 위해 다수의 소선들을 묶어 다중연선으로 제작되며, 안정성을 높이고 결합 손실 등을 감소시키기 위해 소선들이 꼬여 있는 형태를 하고 있기 때문에[1] 케이블의 축과 각 소선들의 축은 서로 다르게 된다. 이러한 소선과 케이블의 축 불일치 때문에 케이블에 전송전류가 흐를 때 한 소선이 받는 자계는 모든 소선에 흐르는 전류들이 만들어 내고 이는 소선 축방향과 횡방향으로의 두가지 성분을 갖게 되며[2]-[5] 이러한 자계들은 그 소선에 대해 외부 인가자계처럼 작용하게 된다. 또한, 소선내의 필라멘트들도 꼬여 있는 구조를 하고 있기 때문에 그 소선 자체에 흐르는 전송전류에 의해서도 자기자계라고 불리는 축방향과 원주방향의 자계가 발생하게 된다. 따라서, 케이블을 구성하고 있는 임의의 소선은 자기자계와 외부자계 등 두 종류의 교류자계를 동시에 경험하게 된다. 이러한 두 자계는 동상이며 두 자계의 합성자계는 각 소선내에서의 전송전류분포, 전류포화영역, 교류자계에 의해 발생하는 유기기전력을 변화시키게 되고 결과적으로 발생하는 자기자계 손실을 변화시킨다[6]. 소선내의 필라멘트들의 트위스트 방향이 반대가 되면 소선 자체에 흐르는 전류에 의한 자기자계의 방향이 변하게 되고 합성자계도 변하게

되어 전류분포, 전류포화영역, 유기기전력을 변화시켜 자기자계 손실도 바뀌게 된다. 본 논문에서는 2000[A]급의 전송전류용량을 갖는 2중연선 초전도케이블((6+1)×(6+1))에 대하여 1차 케이블, 2차 케이블의 트위스트를 고려하여 소선내의 필라멘트들의 트위스트 방향을 달리하였을 때, 자기자계 손실이 받는 영향을 살펴본다.

2. 2중연선 초전도케이블의 구조 및 발생 자계

하나의 초전도소선에 흐를 수 있는 전류는 대략 수십 암페어 정도이므로 대전류를 흘리기 위해서는 여러가닥의 소선을 묶어서 사용하고 결합전류에 의해서 발생하는 손실을 줄이기 위해서 이들을 꼬아서 그림 1과 같이 케이블로 만든다. 그림에서 가운데에 위치한 소선을 중심으로 해서 6가닥의 소선이 트위스트되어 있는 것을 볼 수 있다. 이를 1차케이블이라 하고 여러가닥의 1차케이블을 다시 꼬아서 2차케이블을 만든다. 전송전류가 수천 암페어 정도이면 일반적으로 2차 또는 3차 케이블을 사용한다. 그림 2는 일반적으로 많이 사용되는 6가닥의 소선을 묶어서 만든 (6+1)×(6+1) 2케이블의 구조이다. 그리고 각 차수의 케이블의 트위스트 방향은 시계방향 또는 반시계방향이 되고 시계방향

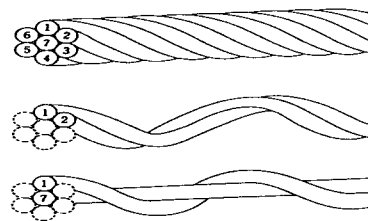


그림 1. 트위스트된 1차케이블의 구조.
Fig. 1. Structure of a twisted 1st stage cable.

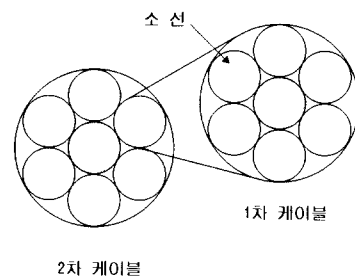


그림 2. (6+1)×(6+1) 2차케이블의 구조.
Fig. 2. Structure of a (6+1)×(6+1) 2nd stage cable.

* 정 회 원 : 우석대학교 전기공학과 전임강사

** 정 회 원 : 순천향대학교 전기공학과 교수

*** 정 회 원 : 서울대학교 전기공학부 교수

접수일자 : 1999년 3월 29일

최종완료 : 1999년 4월 19일

으로 트위스트한 것을 % 트위스트, 반시계방향으로 트위스트한 것을 S 트위스트라고 한다. 이와같은 구조로 제작된 초전도 케이블에서는 임의의 소선의 축방향과 케이블의 축방향이 서로 다르게 된다. 소선들의 축방향을 따라서 흐르는 전송전류는 케이블의 축방향성분과 케이블의 원주방향성분으로 나눌 수 있고 전류에 발생하는 자계에도 원주방향성분 뿐만이 아니라 축방향성분도 존재한다. 다중케이블의 경우에 각 차수에 해당하는 케이블의 트위스트 피치가 서로 다르기 때문에 축방향 자계성분은 이 트위스트 피치에 의해서 주기성을 띠게 되어 직류성분과 교류성분이 혼합된 형태가 된다.

각각의 초전도소선은 트위스트된 상태로 축방향으로 진행하므로, 2차케이블에 흐르는 전송전류에 의해서 임의의 소선에 인가되는 자계는 Biot-Savart의 법칙을 이용해서 계산할 수 있다.

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{i=6} \sum_{j=-N}^N \frac{\mu_0 I_i d\vec{l}_{ij} \times \vec{a}_{ij}}{4\pi r_{ij}^2} \quad (1)$$

여기서 I_i 는 i 번째 소선에 흐르는 전류이고 r_{ij} 는 자계를 발생시키는 소선의 전류소와 자계를 경험하는 소선 사이의 거리이다. N 은 트위스트 피치에 해당하는 계산 스텝이다. 임의의 소선에 가해지는 자계는 모든 소선에 의해서 발생하는 자계를 합해서 구할 수 있다. 식(1)에 의해서 발생한 자계 중에서 소선의 축방향을 나타내는 단위벡터를 \vec{a}_i 이라고 할 때에 소선의 축방향성분의 자계 B_i 과 횡방향성분의 자계 B_t 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$B_i = \vec{B} \cdot \vec{a}_i \quad (2)$$

$$B_t = \sqrt{|\vec{B}|^2 - B_i^2} \quad (3)$$

식(2),(3)에 의해 발생한 자계는 초전도 케이블내의 소선에 대해 외부 인가 자계처럼 작용하게 된다.

3. 자기자계 손실 계산 이론

식(2),(3)에 의해 계산된 자계를 케이블을 구성하는 임의의 소선에 인가되는 외부 인가자계로 고려하고 소선에 교류 전송전류가 흐를 때 자기자계 손실을 구하기 위해서는 외부 인가 자계의 방향성분들을 고려하여 전류 밀도와 유기기전력을 구해야 한다. 초전도 소선에 교류 전송전류가 가해지면, 전류는 소선의 최외곽 부분에 위치한 필라멘트들부터 임계 전류밀도로 흐르게 되고 전송전류의 증가 또는 감소에 따라 점차 안쪽에 위치한 필라멘트들로 임계 전류밀도 영역이 확장되게 되어서 전류밀도 분포 변화가 발생한다. 교류 전송전류가 최대 또는 최소가 되는 시점에서 최대의 전류 포화영역이 결정되고, 그 이외의 시점에서는 전류 포화영역도 두 부분으로 나뉘게 된다. 즉 임계 전류밀도치로 (+)방향으로 흐르는 부분과 (-)방향으로 흐르는 부분이 존재하게 된다. 이와같이 (+)방향으로 흐르는 부분과 (-)방향으로 흐르는 부분의 경계인 이동 경계는 전송전류의 증가 또는 감소 반주기 동안에 소선의 최외곽의 필라멘트에서 시작하여 전류 포화영역의 최대치까지 변하게 되므로 전류밀도, 전류포화영역, 이동경계 등을 계산할 수 있다.

본 논문의 계산에서는 초전도 필라멘트들이 동심원의 형태로 층별로 규칙적으로 배열되어 있다고 가정하고, 같은

층의 필라멘트에는 같은 전류가 흐른다고 가정하였다. 초전도 케이블내의 초전도 소선에서 인접한 두 층사이의 결합자속은 소선에 흐르는 전류에 의한 자기자계와 케이블을 구성하는 전체 소선들에 의한 외부자계의 합으로 표현될 수 있으며, 전류 불포화 영역에서의 전류분포는 이 결합자속이 영이 된다고 가정함으로써 계산할 수 있다. 필라멘트의 트위스트를 고려하여 계산된 전류밀도는 소선 축방향과 원주방향의 성분을 가지며 불포화 영역에서는 식(4), 식(5)와 같고, 전류 포화 영역에서는 Kim and Anderson 모델을 이용하면 식(6), 식(7)과 같이 표현된다

$$j_z(r_i, t) = j(r_i, t) \frac{l_{p0}}{\sqrt{(\pi r_i)^2 + l_{p0}^2}} \quad (4)$$

$$j_\theta(r_i, t) = j(r_i, t) \frac{\pi r_i}{\sqrt{(\pi r_i)^2 + l_{p0}^2}} \quad (5)$$

$$j_{cz}(r, t) = \frac{l_{p0}}{\sqrt{(\pi r)^2 + l_{p0}^2}} \frac{j_{c0} B_0}{B_{cx}(t) + B_0} \quad (6)$$

$$j_{c\theta}(r, t) = \frac{\pi r}{\sqrt{(\pi r)^2 + l_{p0}^2}} \frac{j_{c0} B_0}{B_{cx}(t) + B_0} \quad (7)$$

여기서, $j(r_i, t)$ 는 전류불포화영역의 전류밀도, $B_{cx}(t)$ 는 식(1)에서 구한 외부 인가자계(케이블의 소선들에 흐르는 전류에 의해 한 소선에 인가되는 자계)이다. l_{p0} 는 소선의 트위스트 피치, r 은 전류포화영역내의 임의의 반경이다.

전류포화영역의 크기와 이동경계는 임의의 시간에 한 소선의 전체 전류는 항상 그 시점에서의 전송전류의 크기와 같다는 개념으로부터 구할 수 있다. 전류 포화영역이 시작되는 반경 r_{sat} 는 교류전송전류의 피크값에서 결정되므로 식(8)로 부터 구할 수 있고, 이동경계 $c(t)$ 는 임의의 시간에 대해 식(9)와 같이 표현된다.

$$I_p = \pi(r_f^2 - r_{sat}^2) \lambda j_c(B) + I(r_{sat}) \quad (8)$$

$$c(t) = \sqrt{\frac{I_t(t) + \pi \lambda (r_f^2 + r_{sat}^2) j_c(B) - I(r_{sat}, t)}{2\pi \lambda j_c(B)}} \quad (9)$$

여기서, $I_t(t)$ 는 교류 전송전류, I_p 는 전송전류의 피크값, $j_c(B)$ 는 외부자계 $B_{cx}(t)$ 의 피크값에서의 전류 포화영역의 전류밀도, $I(r_{sat}, t)$ 는 임의의 시간 t 에서 반경 $r=r_{sat}$ 내의 영역에서 흐르는 전류, r_f 는 소선내의 필라멘트 영역의 반경, $I_t(t)$ 는 임의의 시간 t 에서의 전송전류값, λ 는 초전도체의 점적율이다.

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 맥스웰 방정식으로부터 구해지며, 이를 이용하여 각 영역에서 발생하는 유기기전력의 축방향과 원주방향성분은 구하면 $0 < r < c$ 인 영역에서는 각각 식(10), 식(11), $c < r < r_f$ 인 영역에서는 식(12), 식(13)과 같다. 따라서, 식(4)~식(7)과 식(10)~식(13)을 이용하여 자기자계 손실은 식(14)와 같이 표현된다.

$$E_z(r, t) = -\frac{\pi r^2 \mu_0}{l_{p0}^2 + (2\pi r)^2} \frac{d}{dt} [I_t(t) - I(r_{sat}, t)] \quad (10)$$

$$E_{\theta}(r, t) = -\frac{\pi r^2 2\pi r}{l_{\theta 0}^2 + (2\pi r)^2} \frac{\mu_0}{l_{\theta 0}} \frac{d}{dt} [I_1(t) - I(r_{sat}, t)] \quad (11)$$

$$E_z(r, t) = -\frac{\mu_0 l_{\theta 0}^2}{2\pi (l_{\theta 0}^2 + (2\pi r)^2)} \ln \frac{r}{c} \frac{dI_1(t)}{dt} \quad (12)$$

$$E_{\theta}(r, t) = -\frac{\mu_0 l_{\theta 0} r}{l_{\theta 0}^2 + (2\pi r)^2} \ln \frac{r}{c} \frac{dI_1(t)}{dt} \quad (13)$$

$$P_{sf} = \frac{2f}{\pi r_f^2} \int_0^{l/2f} \lambda \left[\int_0^{r_{in}} (E_z(r, t) j_z(r, t) + E_{\theta}(r, t) j_{\theta}(r, t)) 2\pi r dr \right. \\ \left. + \int_{r_{in}}^c (E_z(r, t) j_{zc}(r) + E_{\theta}(r, t) j_{\theta c}(r)) 2\pi r dr \right. \\ \left. + \int_c^{r_i} (E_z(r, t) j_{zc}(r) + E_{\theta}(r, t) j_{\theta c}(r)) 2\pi r dr \right] dt \quad (14)$$

초전도 소선내의 필라멘트 트위스트 방향이 바뀌면 전류 불포화 영역에 흐르는 전류량이 바뀌게 되고, 따라서, 포화 영역과 불포화영역의 전류밀도, 전류포화영역의 크기, 이동경계, 유기기전력이 변하게 되어 결과적으로 자기자계 손실도 달라지게 된다.

4. 계산 사례

자기자계 손실 계산 사례를 위한 교류용 초전도 케이블의 사양은 표1과 같다. 1차 케이블에서는 트위스트가 되어 있더라도 각 소선들의 상대적인 위치가 변하지 않기 때문에 소선의 축방향 자계성분은 일정한 값이 되지만, 2차 케이블이상인 경우에는 축방향으로 진행해 나가면서 소선 상호간의 위치가 변하기 때문에 축방향 자계성분 B_z 은 소선의 위치에 따라 크기가 달라지게 되어, 발생하는 자기자계 손실도 변하게 된다. 그림 3은 1차케이블, 2차케이블 모두 Z 방향으로 트위스트된 경우에 케이블 축방향(z방향)으로 30mm 동안의 한 소선의 중심의 변화를 x-y 평면상에 그린 것이다. 2차케이블의 피치가 1차케이블의 피치의 정수배가 아니기 때문에 시작점과 끝점이 일치하지 않는 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 자기자계 손실의 계산사례로서 2000A급의 전류용량을 갖는 $((6+1) \times (6+1))$ 구조의 2차케이블을 대상으로 하고 있으므로 $2000/36 \approx 55$ 이므로 모든 소선에 균등하게 이러한 피치의 전류가 흐르는 것으로 가정하여 전류포화영역, 자기자계손실을 계산하였다.

그림 4는 55[A]의 경우에 2차케이블에서 초전도 소선들에 각각 한 소선의 중심을 따라 발생하는 자계성분들을 케이블의 한 피치에 대해 구한결과이다. 축방향 자계성분이 횡방향 자계성분보다 반 정도로 작지만 이 축방향 성분은 초전도 소선내의 전류분포에 큰 영향을 미친다. 그림 4의 계산 결과는 소선 내의 필라멘트의 트위스트 방향이 바뀌어도 동일하다. 그림 5는 필라멘트 트위스트 방향에 따른 전류포화 영역의 변화를 2차케이블의 한 피치동안 계산한 결과이다. 트위스트 방향에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있고, 자기자계 손실은 주로 전류포화 영역에서 발생하므로 (Z,Z,Z)의 경우보다 (S,Z,Z) 일 때 더 큰 손실이 발생할 것을 예측할 수 있다. 그림 6과 그림 7은 소선내의 필라멘트의 트위스트 방향이 각각 Z, S 인 경우에 대해 이동경계 내부, 외부에서 발생하는 자기자계 손실과 그 합들을 2차 케이블의 한 피치에 대해 케이블 축방향을 따라 계산한 결과이다. 이동경계 내부에서 발생하는 손실은 필라멘트들의 트위스트를 고려해 주므로서 나타나는 성분이며, 계산 결과에서 보듯이 무시할 수 없을 정도로 큼을 알 수 있다.

표 1. 2차케이블의 사양.

Table 1. Specifications of a 2nd level cable.

| | | |
|--------|--------------|---------------------|
| 소선 | 직경 | 0.25mm |
| | 필라멘트 직경 | 0.1 μm |
| | 필라멘트 수 | 885,000 |
| | NbTi:Cu:CuNi | 1:0.8:3.6 |
| | 트위스트 피치 | 2.0mm |
| | 트위스트 방향 | S 또는 Z |
| 1차 케이블 | 구조 | 6개의 소선 + 1 CuNi소선 |
| | 직경 | 0.75mm |
| | 트위스트 피치 | 6.0mm |
| | 트위스트 방향 | Z |
| 2차 케이블 | 구조 | 6개의 1차케이블 + 1CuNi침선 |
| | 직경 | 2.25mm |
| | 트위스트 피치 | 28.5mm |
| | 트위스트 방향 | Z |

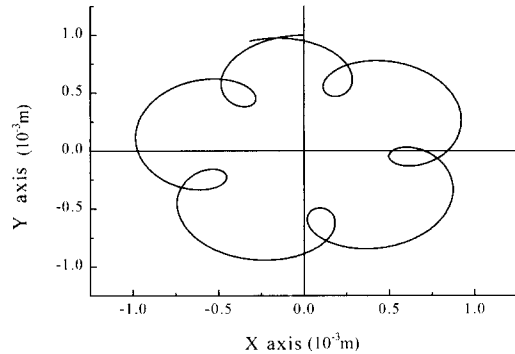


그림 3. 2차케이블에서 트위스트에 의한 소선 중심의 변화.

Fig. 3. Variation of a strand center by the twist in 2nd stage cable.

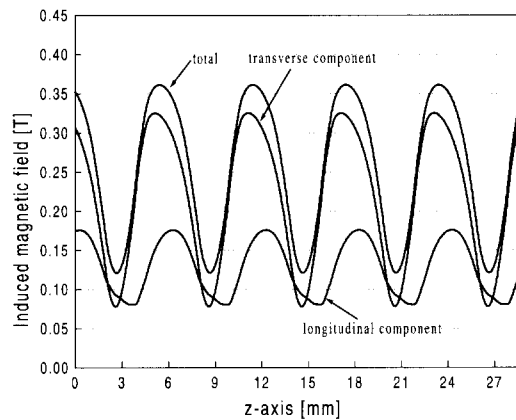


그림 4. 2차 케이블에서 케이블 전류에 의해 한 트위스트 피치에 대해 발생하는 자계성분.

Fig. 4. Induced magnetic field along a strand by cable current for one pitch of final cable.

또한, 소선내의 필라멘트 트위스트 방향에 따라 발생하는 자기자계 손실이 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있고, 결과적으로 2차케이블에서 자기자계 손실을 줄이기 위해서는 2차케이블, 1차케이블의 트위스트 방향과 소선의 트위스트 방향이 같도록 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

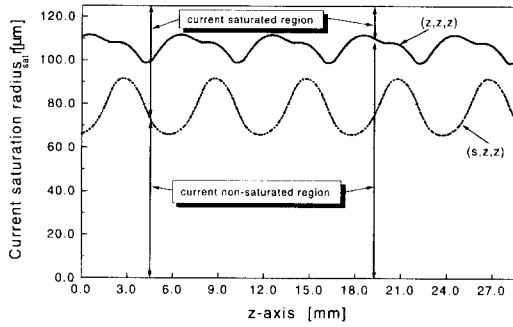


그림 5. 2차케이블의 한 피치 동안 필라멘트의 트위스트 방향에 따른 전류포화 영역의 변화.

Fig. 5. Current saturation radius for twist direction of filaments for one pitch of 2nd stage cable.

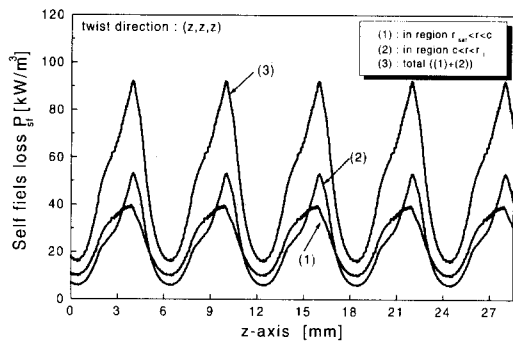


그림 6. 소선내 필라멘트가 Z 트위스트인 경우에 이동 경계 내부, 외부에서 발생하는 자기장 손실.

Fig. 6. Self field loss in inner and outer region of moving boundary in case of Z-twist.

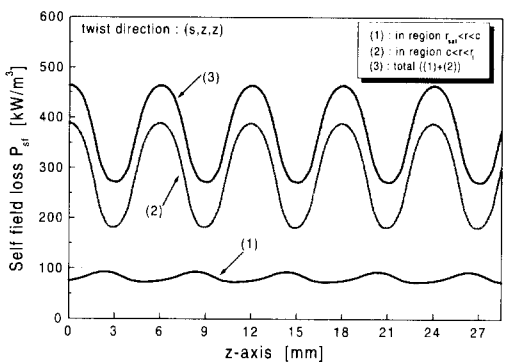


그림 7. 소선내 필라멘트가 S 트위스트인 경우에 이동 경계 내부, 외부에서 발생하는 자기장 손실.

Fig. 7. Self field loss in inner and outer region of moving boundary in case of S-twist.

5. 결 론

초전도 선재의 전력응용을 위한 대전류를 통전시키기 위해서는 다중연선 구조의 초전도케이블이 이용된다. 본 논문에서는 초전도 2차 연선 케이블에 대해 2차케이블, 1차케이블의 트위스트를 고려하여 케이블을 구성하는 소선내의 필라멘트의 트위스트 방향에 따른 소선내 전류밀도의 변화, 전류포화영역, 이동경계 등을 계산하여 자기장손실을 계산하였다. 2차케이블의 소선들에 흐르는 전류에 의해 임의의 한 소선에 유기되는 자계를 구하여 이를 외부인가자계로 생각하고 소선에 흐르는 교류전류에 의한 자기

장 손실을 계산하였다. 계산 결과로부터, 소선내의 초전도 필라멘트들의 트위스트 방향에 따라 발생하는 자기장 손실이 매우 큰 영향을 받을 수 있고, 결과적으로 2차케이블에서 자기장 손실을 줄이기 위해서는 2차케이블, 1차케이블의 트위스트 방향과 소선의 트위스트 방향이 같도록 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] S. Torii, et al., "Analysis and Degradation in AC Superconducting Cable," IEEE Trans. AS, Vol.3, No.1, pp.126-129, 1993.
- [2] K. Funaki, et al., "Theoretical Evaluation of Longitudinal AC Losses in Large Capacity Superconducting Cable for 50/60Hz Use," Cryogenics, Vol.33, No.2, pp.190-198, 1993.
- [3] N. Amemiya, et al., "Influence of Longitudinal Magnetic Field on Thermomagnetic Instability in AC Superconducting Cables," Cryogenics, Vol.33, No.9, pp.889-899, 1993.
- [4] J. L. Duchateau and B. Turck, "Self-Field Degradation Effect in Adiabatic Conditions," Cryogenics, pp.481-486, 1974.
- [5] T. Taniguchi and R. Takahashi, "Dependence of Quench Current and AC Losses on Twist Directions and Annealing of AC superconducting Cables," ICEC16, May, Japan, 1996
- [6] J.K. Lee et al., "AC Losses Characteristics of an AC Superconducting Wire in Combined Action of AC Magnetic Field and AC Transport Current," IEEE Trans. on AS, Vol.7, No.2, pp278-281, June, 1997.

저 자 소 개



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 우석대 전기공학과 전임강사.



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생, 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 순천향대 전기공학과 교수.



한송엽(韓松暉)

1939년 3월 14일생, 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1967년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1976년~1979년 블란서 로렌공과 대학원 졸업(공학박사). 현재 서울대 전기공학부 교수, 현재 당 학회 회장.