

전자기력을 고려한 24kV급 초전도 한류기용 전류리드의 최적화 배열방안

Optimal Arrangement of Current Leads for 24kV class SFCL to Minimize Electromagnetic Force

김주형¹, 송정빈¹, 황승재¹, 김광록¹, 김호민⁴, 김혜림⁵, 현옥배⁵, 고태국³, 이해근^{2,*}J. H. Kim¹, J. B. Song¹, S. J. Hwang¹, K. L. Kim¹, H. M. Kim⁴,
H-R Kim⁵, O. B. Hyun⁵, T. K Ko³, H. G. Lee^{2,*}

Abstract: Electromagnetic forces (Attractive and repulsive force), interacting between current leads show different tendency according to the arrangement of current leads on the top flange of the cryostat and the distance of each lead. Especially in case of high-current electric power devices or high-field magnets, optimal arrangement of current leads becomes one of the safety issues to be considered for minimizing the electromagnetic force acting on them. In this paper, we suggest an optimal arrangement method with three pairs of current leads for a 24kV class 650A superconducting fault current limiter (SFCL) system which has a probability of unpredicted fault currents(i.e., 20kA).

Key Words: Superconducting fault current limiter (SFCL), fault current, current lead, electromagnetic force.

1. 서 론

국내의 전력계통시스템은 병렬 구조로 사고전류를 줄이기 위해 다수의 변전소를 통해 모선을 분리한 방사상의 운전을 채택하고 있다[1]. 상기 계통에서 사고전류에 대한 대비책으로 차단기를 설치하고 있으나 전력 수요의 증가로 모선연계구간은 이미 차단기의 용량을 넘어서고 있으며, 병렬 전력계통의 특성상 대규모 정전사태가 발생하고 있다. 최근 이러한 문제를 해결하는 방안으로 초전도 한류기가 제안되고 있다. 고온 초전도체는 사고전류가 발생할 때 차단기의 동작보다 빠르게 사고전류를 감소시켜 차단기를 보호하고 안정적인 전력공급을 가능하게 하기 때문에 초전도 한류기의 도입이 필수적이며 그에 따른 연구가 활발히 진행 중이다[2].

현재 과학기술부에서 지원하는 21세기 프런티어사업으로 한국전력연구원(KEPRI)과 LS산전(LSIS)의 공동연구로 개발된 24kV 배전급 저항형 초전도 한류기

시스템은 상온에서 극저온 상태의 초전도 한류소자에 3상의 전류를 흘려주기 위해 세 쌍(6개)의 전류리드가 필요하다[3]. 한류기에 운전전류(I_{op})와 사고전류(I_f)가 인가될 때 전류리드 간에 전자기력(인력 또는 척력)이 발생하며, 리드간 거리와 배열하는 방법에 따라 다른 양상을 갖는다. 특히 한류기에 사고전류가 발생하게 되면 막대한 양의 전류가 흐르게 되고 이로 인하여 예상치 못한 리드간의 전자기력에 의하여 시스템의 안전에 문제가 야기 될 소지가 있다.

본 논문에서는 24kV급 초전도 한류기에 운전전류 및 사고전류가 흐를 때 전류리드간의 배열에 따른 전자기력의 영향을 비교 분석하였다.

2. 전류리드에 작용하는 전자기력

Fig. 1과 같이 평행한 두 전류리드에 전류(I)가 동일한 방향으로 흐르는 경우, 하나의 리드가 다른 리드로부터 자기장(B)의 영향을 받아 인력(F)이 작용한다. 식 (1)과 식 (2)를 통해 자기장과 인력의 크기를 알 수 있다[4].

$$B_+ = \frac{\mu_0 I_+}{2\pi d} \quad (1)$$

$$F = BI\ell \quad (2)$$

여기서, μ_0 는 진공상태 혹은 공기중의 투자율($4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$), d 는 전류리드사이의 거리, ℓ 은 전류리드의 길이를 나타낸다. 두 전류가 반대방향(I_+ 와 I_-)으로 흐르면 척력이 작용하며 같은 방향이면 반대로 인력이 작용한다. 전류리드의 경우 흐르는 전류의 양은 같으므로(즉 $I_+ = I_-$) 두 전류리드 사이에 작용하는 전자기력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_+ I_-}{2\pi d} = \frac{\mu_0}{2\pi d} I^2 \quad [\text{N/m}] \quad (3)$$

본 논문에서는 용이한 해석을 위하여 한류기의 저온조 상판에 길이(ℓ)가 일정한 6개의 전류리드가 Fig. 2와 같이 동심원 상에 배열되어있고 정상운전전류(I_{op})는 890Apeak이며 630Arms에 해당한다. 더 높은 전류값인 650A로 가정하였고, 사고전류(I_f)는 20kApeak로 가정하였다. 이 값은 14kArms에 해당한다. 전류리드 상호간에 작용하는 힘은 식 (2)에서 B 와 I 에 비례하며 3상의 위상차는 다른 두 상의 전류파형의 영향이 가장 큰 120° 로 최대가 되는 극한의 조건으로 계산하였다.[5]

¹학생회원 : 고려대 신소재공학과

²정 회 원 : 고려대 신소재공학과

³정 회 원 : 연세대 전기공학과

⁴정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

⁵정 회 원 : 한국전력연구원 초전도그룹

*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr

원고접수 : 2007년 8월 9일

심사완료 : 2007년 9월 17일

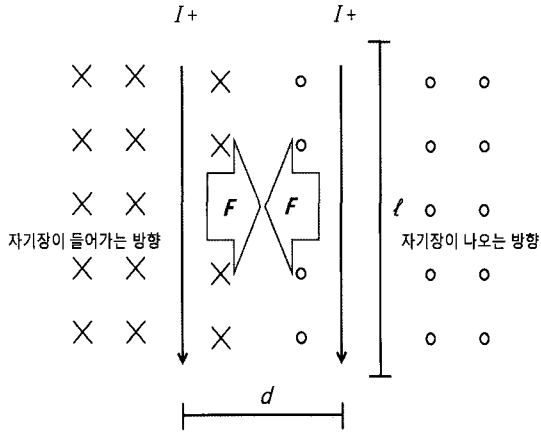


Fig. 1. Electromagnet force between two long straight parallel current leads.

2.1. 한류기 전류리드가 순차적인 배열일 경우

2.1.1. 정상운전전류 (I_{op}) 650A가 흐를 때 작용하는 전자기력

순차적인 배열일 경우는 Fig. 2에서 보여 지는 전류 리드 A, B, C, D, E, F가 순서적으로 (+)(-)(+)(-)(+)(-)의 방향으로 전류가 흐르도록 배열했을 경우를 의미한다. 전류리드에 650A의 운전전류 (I_{op})가 통전 될 경우 6개의 전류리드가 받는 단위길이 당 전자기력은 모두 대칭이 된다. 그리고 인가된 전류에 따라 작용하는 단위길이 당 전자기력은 리드 A를 기준으로 척력과 인력이 번갈아 작용하며 그때 단위길이 당 전자기력의 타입을 Table 1에 정리하였다.

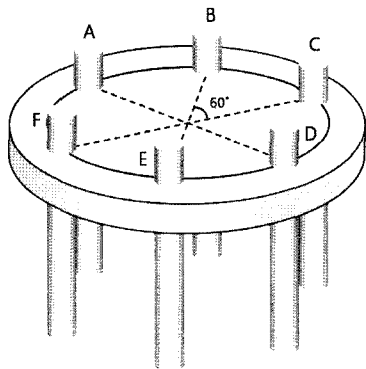


Fig. 2. Schematic diagram for arrangement of six current leads(3 pairs) on the top flange of the cryostat.

Table 1. Description of electromagnetic force types acting on current leads in the steady state.

두 리드에 흐르는 전류의 방향	힘의 종류
A(⊗) and B(⊙)	척력
A(⊗) and C(⊗)	인력
A(⊗) and D(⊙)	척력
A(⊗) and E(⊗)	인력
A(⊗) and F(⊙)	척력

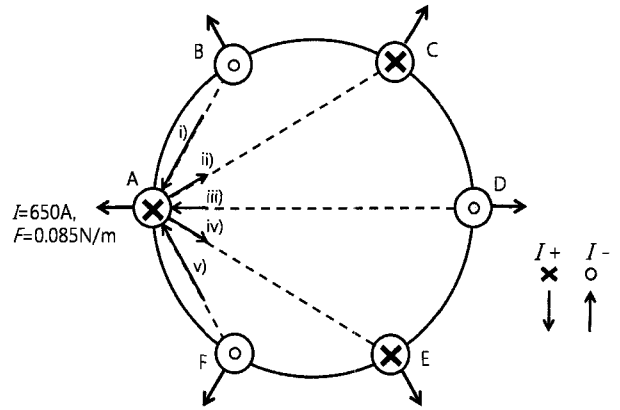


Fig. 3. Forces per unit length acting on current leads in the steady state case(same order coordination).

리드사이에 작용하는 단위길이 당 전자기력의 크기 (F)는 식 (3)에 전류값 (I)과 거리 (d) 및 투자율 (μ_0)를 대입하여 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi d} I^2 = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi \times d} \times 650^2 \text{ [N/m]} \quad (4)$$

Fig. 3은 순차적으로 배열된 전류리드에 3상의 교류 전류가 흐를 때 작용하는 단위길이 당 전자기력의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 전류리드 A를 기준으로 리드 B, C, D, E, F사이에 작용하는 힘은 서로 상쇄되고 180도 방향으로 놓여있는 리드 A와 D사이의 척력만 작용됨을 벡터 합을 통해 알 수 있고, 계산결과 리드마다 0.085N/m의 단위길이 당 전자기력이 저온조 상판의 중심에서 대칭방향으로 가해짐을 알 수 있다.

2.1.2. 사고전류 (I_f) 20kA가 흐를 때 작용하는 전자기력

초전도 한류기는 사고모드 시 전류리드에 급격히 높은 사고전류 (I_f)가 흐르게 되므로 거리 (d)는 정상상태 조건과 동일하고 사고전류를 20kA로 가정하면 식 (3)을 통해 각 전류리드에 가해지는 힘 (F/ℓ)을 계산할 수 있다. Fig. 4는 순차적으로 배열된 전류리드에 사고전류가

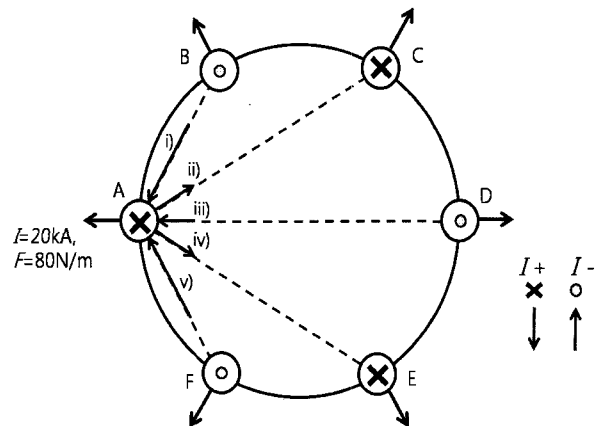


Fig. 4. Forces per unit length acting on current leads in a fault mode(same order coordination).

Table 2. Electromagnetic forces per unit length in the steady state and a fault mode(same order coordination).

상호작용하는 두 리드	d [m]	$F(650A)$ [N/m]	$F(20kA)$ [N/m]
A and B (i)	0.5	0.169	160
A and C (ii)	0.866	0.098	92
A and D (iii)	1	0.085	80
A and E (iv)	0.866	0.098	92
A and F (v)	0.5	0.169	160

흐를 때 그에 따라 작용하는 단위길이 당 전자기력의 크기와 방향을 나타내고 있다. 계산된 상호간의 힘은 리드 A와 D 사이의 단위길이 당 전자기력을 제외하고 상쇄되어 정상상태(0.085N)의 경우보다 약 947배 큰 80N/m의 척력이 대칭방향으로 가해짐을 알 수 있다. Table 2에 정상상태와 사고모드 시 전류리드에 작용하는 단위길이 당 전자기력을 비교하여 정리하였다.

2.2. 한류기 전류리드가 임의적인 배열일 경우

2.2.1. 정상운전전류(I_{op}) 650A가 흐를 때 작용하는 전자기력

임의적인 배열일 경우, Fig. 2에서 보여지는 전류리드 A, B, C, D, E, F에 각각 (+)(+)(-)(-)(+)(-)의 방향으로 전류가 흐른다고 가정하였다. 한류기의 저온조 상판에 임의로 배열된 전류리드에서 발생하는 단위길이 당 전자기력의 방향은 순차적으로 배열된 경우와 달리 인력과 척력이 불규칙적으로 작용하며 그때 작용하는 힘의 타입을 Table 3에 정리하였다. Fig. 5는 임의적으로 배열된 전류리드에 흐르는 운전전류와 그에 따라 작용하는 단위길이 당 전자기력의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 각각의 리드 상호간에 작용하는 힘의 총합은 벡터합의 결과로 얻을 수 있는데, 순차적으로 배열된 전류리드의 경우와는 달리 상쇄되는 인력과 척력이 대칭이 아니므로 임의의 방향으로 더 큰 단위길이 당 전자기력이 작용하게 됨을 알 수 있다.

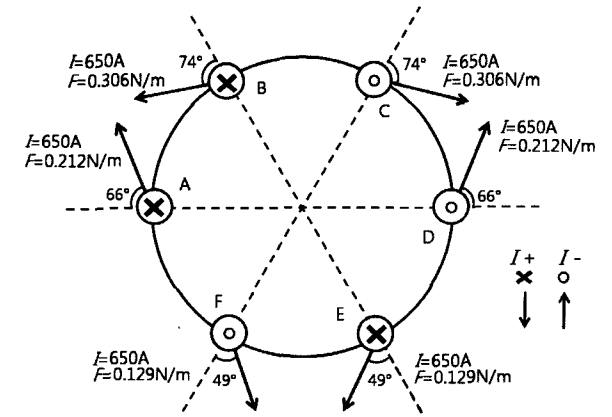


Fig. 5. Electromagnetic force per unit length acting on each current lead in the steady state(random coordination).

Table 3. Types of electromagnetic force acting on current leads(random coordination).

두 리드에 흐르는 전류의 방향	힘의 종류
A(\otimes) and B(\otimes)	인력
A(\otimes) and C(\odot)	척력
A(\otimes) and D(\odot)	척력
A(\otimes) and E(\otimes)	인력
A(\otimes) and F(\odot)	척력

Table 4. Electromagnetic forces per unit length in the steady state and a fault mode(random coordination).

리드	$F(650A)$ [N/m]	$F(20kA)$ [N/m]
A	0.212	202
B	0.306	288
C	0.306	288
D	0.212	202
E	0.129	122
F	0.129	122

2.2.2. 사고전류(I_f) 20kA가 흐를 때 작용하는 전자기력

임의로 배열된 전류리드에 사고전류가 흐를 경우 식 (5)와 같이 계산 된다.

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi d} I^2 = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi \times d} \times (2 \times 10^4)^2 \text{ [N/m]} \quad (5)$$

Fig. 6으로 부터 임의로 배열된 전류리드에 사고전류(20kA)가 흐를 때 각 전류리드에는 급격히 증가한 최대 288N/m의 단위길이 당 전자기력이 작용하는 것을 알 수 있다.

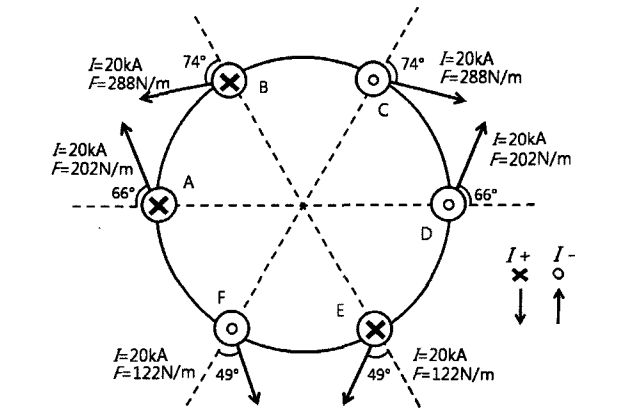


Fig. 6. Electromagnetic force per unit length acting on each current lead in a fault mode(random coordination).

임의로 배열된 전류리드에서 발생하는 단위길이 당 전자기력의 방향은 순차적으로 배열된 경우와 달리 인력과 척력이 불규칙적으로 작용한다. 중심으로부터 외곽방향을 기준으로 전류리드사이에서 작용하는 모든 힘들을 벡터 합 해본 결과, 리드 A는 리드 B와의 인력과 리드 F와의 척력이 가장 강하게 작용하며, 리드 C, D, E와의 영향에 의해 리드 B방향으로 66°만큼 벗어나게 되고, 리드 B역시 리드 A와의 인력과 리드 C와의 척력, 그리고 리드 D, E, F의 영향으로 리드 A방향으로 74°만큼 벗어난 288N/m의 척력이 작용한다. 전류리드 C는 리드 B와의 척력과 리드 D와의 인력이 크게 작용하고, 리드 A, E, F의 영향으로 리드 D 방향으로 74° 기울어진 288N/m의 척력이 작용하며, 리드 D는 리드 C와의 인력과 리드 E와의 척력에 가장 강하게 영향을 받는다. 또한 리드 A, B, F의 영향을 벡터 합으로 계산하면, 리드 C방향으로 66° 기울어진 202N/m의 척력이 작용하며, 리드 E는 리드 D와 리드 F에 동시에 척력이 작용한다. 그러나 리드 A, B와의 인력과 리드 C의 척력으로 인해 리드 F의 방향으로 49° 벗어난 122N/m의 척력이 작용하고, 리드 F 역시 마찬가지로, 리드 A와 리드 E에 같은 척력이 작용하나 리드 B와의 척력과 리드 C, D와의 인력으로 인해 리드 E의 방향으로 49° 벗어난 122N/m의 척력이 작용하게 된다. Table 4에 정상상태와 사고모드 시 전류리드에 작용하는 단위길이 당 전자기력을 나타내었으며, Table 5에 순차적으로 배열된 전류리드와 임의적으로 배열된 전류리드의 단위길이 당 전자기력을 비교하여 정리하였다.

2.3. 리드간의 거리(d)에 따른 전자기력의 변화

두 전류리드 사이의 전자기력 F는 식 (3)으로부터 거리 d에 반비례함을 알 수 있고, 이는 제작된 전류리드가 한류기 상판에 고정시키는 배열 방식에 따라 전류리드 상호간에 작용하는 인력 또는 척력의 영향에 미치는 효과가 크다는 것을 나타낸다.

Fig. 7은 20kA의 사고전류가 흐를 때 리드간의 거리와 단위길이 당 전자기력의 상관관계를 보여준다. 전류리드 간격이 0.3m인 경우에는 267N, 0.6m인 경우에는 133N, 1m인 경우에는 80N의 단위길이 당 전자기력이 작용하게 되며, 이것은 리드간의 거리가 줄어들수록 전자기력의 영향이 커진다는 것을 의미하고, 한류기 시스템이 요구하는 6개의 전류리드가 한류기 상판에 부착 되는 경우에 리드간의 거리 확보가 중요하다는 것을 보여준다.

Table 5. Electromagnetic forces per unit length acting on current leads in case of same order coordination and random coordination, respectively(in a fault mode).

리드	Same order coordination[N/m]	Random coordination[N/m]
A	80	202
B	80	288
C	80	288
D	80	202
E	80	122
F	80	122

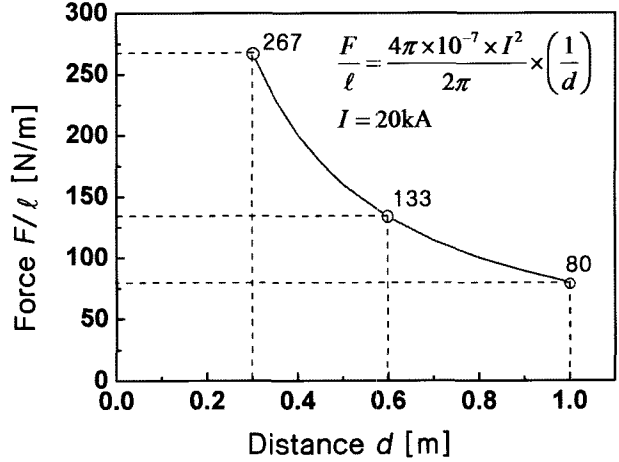


Fig. 7. Plot for electromagnetic force vs. distance between current leads.

3. 결 론

초전도 한류기의 전류리드에 사고전류(I_f = 20kA)가 흐를 경우 정상상태의 운전전류(I_{op} = 650A)에 비해 약 947배에 달하는 단위길이 당 전자기력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 사고모드 시 순차적으로 배열된 전류리드의 경우에는 단위길이 당 전자기력은 80N/m이지만 임의적으로 배열된 전류리드의 경우에는 단위길이 당 전자기력(척력)이 최대 288N/m로 약 3.6배가 증가하였다. 즉, 사고모드 시 전류리드가 임의적으로 배열된 경우에는 시스템의 안정성 문제가 야기될 수 있으며, 전류리드의 최적화 배열은 앞으로 실제 전력계통에 적용될 154kV 송전급 초전도 한류기 시스템의 사고모드에서 더 큰 문제로 부각될 것이다. 따라서 높은 전류를 흘려주어야 하는 초전도 한류기 및 고자장 마그넷과 같은 응용시스템의 경우 전자기력이 최소화 될 수 있는 전류리드의 간격과 배열을 고려한 최적화 설계가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 또한 산업자원부 전력기반조성사업센터의 고급인력양성사업을 통한 연세대학교 계통적용 신 전력기기 연구센터의 부분적인 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 김용학, 윤용범, 최효상, 현옥배, "Preliminary investigation of a proposed site for SFCL installation in the power systems," 한국초전도저온공학회논문지, Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, 1229-3008, 제4권 2호, pp. 38-41, 2002.

- [2] 심정욱, 김혜림, 박권배, 강종성, 이방욱, 오일성, 현옥배, "Fabrication and Test of the Three-Phase 6.6kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Using YBCO Thin Films," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, 제6권 3호, 1229-3008, pp. 50-55, 2004.
- [3] H. G. Lee, H. M. Kim, B. W. Lee, I. S. Oh, H.-R. Kim, O. B. Hyun, J. Sim, H. M. Chang, J. Bascunan, and Y. Iwasa, "Conduction-Cooled Brass Current leads for a Resistive Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) System," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, Issue 2, Part 2, pp. 2247-2251, June, 2007.
- [4] D. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, pp. 283, Jan, 1989
- [5] Kim, H. M. Park, K. B. Lee, B. W. Kang, J. S. Oh, I. S. Sim, J. Hyun, O. B. Kim, H. R. Lee, H. G., "Theoretical Prediction of the Quench Behavior of a SFCL Module Having a BSCCO-2212 Bulk Coil and a Shunt Coil," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, Issue 2, Part 2, pp. 1871-1874, June, 2007.



김광록(金淸祿)

1982년 8월 18일생, 현재 고려대 공대 신소재공학부 학사과정.



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 현재 한국 전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원.



김혜림(金蕙林)

1957년 10월 19일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 초전도그룹 책임연구원



현옥배(玄錫培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 초전도그룹 수석연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Unive. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Unive. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph.D), 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.



이해근(李海根)

1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.

저자 소개



김주형(金周亨)

1979년 10월 30일생, 2006년 인천대 공대 신소재공학과 졸업, 2007년 고려대 대학원 신소재공학과 석사과정.



송정빈(宋廷彬)

1978년 11월 12일생, 2005년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 2007년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정.



황승재(黃勝載)

1980년 9월 5일생, 2007년 고려대 공대 신소재공학부 졸업. 2007년 동 대학원 신소재공학과 석사과정.