

병렬도체에서 선재의 배열형상에 따른 비접촉식 전류분류 측정

Current sharing measurement using non-contact method for parallel HTS tapes conductor according to tape array geometry

변상범¹, 박명진², 최석진³, 박상호², 이승욱⁴, 김우석², 이지광⁵, 최경달^{6*}

S. Byun¹, M. Park², S. Choi³, S. Park², S. Lee⁴, W. Kim², J. Lee⁵, K. Choi^{6*}

Abstract: An HTS conductor with parallel HTS tapes is essential for a large power HTS device to flow a large current. One of the most important factor for this conductor is a current distribution. Non-uniform current distribution in parallel tapes makes the critical current of the conductor low and the AC losses high. In this paper we proposed a non-contact method which measured each current in parallel tapes by using an array of Hall sensors. A matrix can be derived from this array for calibration. The current distributions of 4 and 6 parallel tapes were measured.

Key Words: Current distribution, Hall sensor, HTS.

1. 서 론

현재 개발 중인 변압기, 케이블, 한류기 모터중인 초전도 전력기기 수백 A 또는 수천 A의 대전류를 요구한다. 지금까지 개발된 고온 초전도 선재는 구리선에 비해 작은 면적으로 많은 전류를 흘릴 수 있지만, 2세대 초전도 선재의 1 cm 폭의 임계전류가 280 A로 전력기기에서는 적용하기에는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고온 초전도 선재를 여러 가닥 병렬로 적층하여 사용 한다.

적층된 병렬선재를 이용하여 코일을 제작하는 경우, 병렬선재를 구성하는 각 소선의 임피던스 차이에 의해 소선 간에 전류의 불균형이 발생하게 되고, 이로 인해 교류손실의 증가 및 통전 전류의 감소 등이 발생하게 된다. 따라서 병렬선재간의 임피던스 차이를 줄이고, 소선간의 전류 평행을 위해 소선을 일정한 간격으로 전위 시키는 방법을 이용한다[2]. 또한 제작된 병렬 선재의 각 소선에 흐르는 전류를 측정하여 전류 분류가 균일 또는 불균일하게 발생 되는지 확인할 필요가 있다.

본 논문에서는 홀 센서를 이용하여 각 소선에 통전

전류를 측정하였다. 먼저 수치 해석 방법을 이용하여 병렬 선재의 해석 모델에 전류를 통전 시킬 때 발생하는 자장을 측정하여 매트릭스를 구성하고, 완성된 매트릭스를 통해 병렬 선재에 흐르는 전류를 계산 할 수 있는지 확인하였다. 구리바를 이용하여 4 가닥과 6가닥의 병렬 선재를 제작하고, 전류 분류 측정을 위해 각 병렬 선재의 소선 수만큼의 홀센서를 병렬 도체 주위에 배치하였으며, 이를 통해 병렬 선재의 각 소선간의 전류 분포를 측정하였다.

2. 본 론

2.1. 홀센서를 이용한 측정 방법

소선에 전류가 흐르면, 소선 주위에 자기장이 형성된다. 이때의 자장을 홀센서로 측정하고 자장값을 이용하여 각 가닥에 흐르는 전류를 측정할 수 있다. 그림 1은 병렬 선재의 배열과 홀센서의 위치를 보여주고 있다. 그림 1처럼 직선 도선상의 전류가 흐를 때 발생하는 도선 주위의 자속밀도는 식 (1)로 나타낼 수 있다. G_{ij} 는 자장을 측정하는 센서의 위치이다. 그림 1과 같이 n개의 선재에 전류가 흐를 때 발생하는 P_i 점에서의 자속 밀도는 각각의 전류원 $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$ 에 의해 발생한 자속 밀도를 서로 중첩하여 나타 낼 수 있으며, 각 지점에서의 자속 밀도의 크기는 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)를 다시 정리 하면 식 (3)과 같이 매트릭스의 형태로 나타 낼 수 있다.

$$B_i = \mu_0 G_{ij} I_j \quad (1)$$

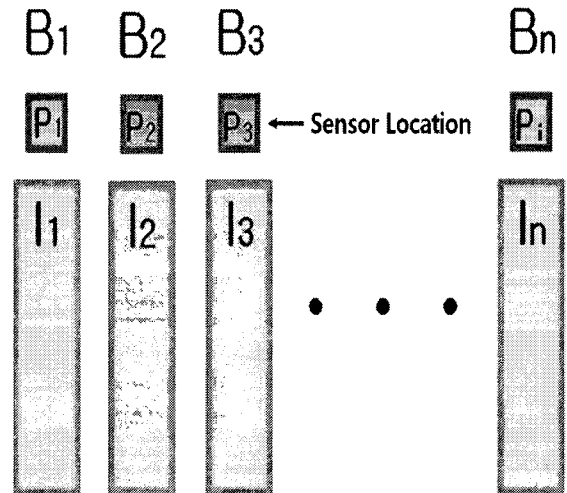


Fig. 1. Locations of current regions and hall sensors.

¹학생회원 : 한국산업기술대 에너지대학원 석사과정

²정 회 원 : 기초전력연구원, 연구원

³정 회 원 : 벡터필드코리아, 연구원

⁴정 회 원 : LS 산전, 연구원

⁵정 회 원 : 우석대 전기전자공학과 부교수

⁶정 회 원 : 한국산업기술대 에너지대학원 교수

*교신저자 : choidal@kpu.ac.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 03월 24일

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \mu_0 G_{11} I_1 + \mu_0 G_{12} I_2 + \mu_0 G_{13} I_3 + \dots + \mu_0 G_{1n} I_n \\
 B_2 &= \mu_0 G_{21} I_1 + \mu_0 G_{22} I_2 + \mu_0 G_{23} I_3 + \dots + \mu_0 G_{2n} I_n \\
 B_3 &= \mu_0 G_{31} I_1 + \mu_0 G_{32} I_2 + \mu_0 G_{33} I_3 + \dots + \mu_0 G_{3n} I_n \\
 &\vdots \\
 B_n &= \mu_0 G_{n1} I_1 + \mu_0 G_{n2} I_2 + \mu_0 G_{n3} I_3 + \dots + \mu_0 G_{nn} I_n
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i1} & \dots & Z_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}
 \tag{3}$$

식 (3)에서 Z_{ij} 는 식 (4)으로 표현된 값으로서, Z_{ij} 의 첫 번째 첨자 i 은 자장의 측정 점을 나타내며, 두 번째 첨자 j 은 전류가 흐르는 테이프를 나타낸다.

$$Z_{ij} = \mu_0 G_{ij} \tag{4}$$

홀센서는 자장의 측정값을 전압으로 나타내므로 비례상수 k 를 이용하여 홀센서에서의 자장과 전압의 관계를 식(5)와 같이 나타낼 수 있고, 식 (5)에 식 (3)을 대입하면 식(6)과 같은 행렬식으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_i &= k B_i \\
 &= k Z_{ij} I_j \\
 &= K_{ij} I_j
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & \dots & K_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}
 \tag{6}$$

병렬도체를 구성하는 임의의 선재에 흐르는 전류는 각 홀센서의 측정 전압을 이용하여 식(7)로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & \dots & K_{ij} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}
 \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 병렬 선재에 흐르는 전류의 값을 측정 할 수 있는지의 확인 여부를 위해 유한 요소법인 마그넷 프로그램을 사용하여 검증하였다. 아래 그림 2는 병렬 도체의 배열 형상과 홀센서의 위치를 나타내었으며, 마그넷 프로그램을 사용하여 위의 각각의 해석 모델을 구현하고, 한 가닥의 구리도체에 전류가 흐를 때 발생한 자장을 각각 계산하여 [K] 행렬을 구성하였다. 그 후에 병렬 선재에 임의의 전류를 인가하여

Fig. 2. parallel copper tapes conductor according to tape array geometry.

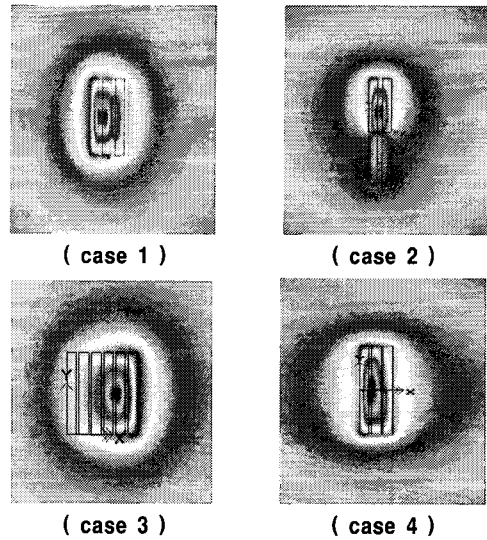


Fig. 3. Flux density distribution around current region.

발생한 자장값을 각각의 홀 센서 위치에서 계산하여 각 소선에 흐르는 전류 값을 계산하였다. 그림 3은 병렬 선재의 배열과 자속밀도의 분포를 나타내었으며, 계산 결과는 표 1에 나타내었다.

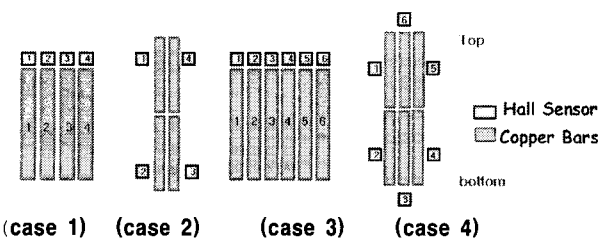
Table 1 Results of current distribution of each case in FEM

	case 1		case2	
	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	80 A	80 A	30 A	30 A
선재 2	60 A	60 A	20 A	20 A
선재 3	40 A	40 A	10 A	10 A
선재 4	20 A	20 A	40 A	40 A
	case 3		case 4	
	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	10 A	10 A	10 A	10 A
선재 2	20 A	20 A	50 A	50 A
선재 3	30 A	30 A	40 A	40 A
선재 4	40 A	40 A	30 A	30 A
선재 5	50 A	50 A	20 A	20 A
선재 6	60 A	60 A	60 A	60 A

2.2 홀센서의 특성 시험

홀 센서를 이용한 비접촉식 전류분류 측정을 하기 위해서는 구리 도체에 일정한 전류가 흐를 때 발생하는 자장을 홀센서로 측정한 전압값이 일정해야 하며, 전압값은 자장의 크기에 비례하여 선형적으로 증가해

Table 2 The specifications of the hall sensor



모델명	A 1321 ELHLT-T
입력 전압	5 V (± 0.5)
기본 전압	2.5 V (± 0.075)
민감도	5 mV/G
측정 온도	- 40° to 150°
크기	3 * 2 * 0.9

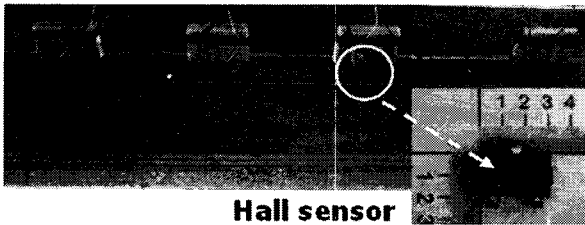


Fig. 4. Installations of hall sensors to test sensor property and size.

야 한다. 표 2에 센서의 제원을 나타내었고, 그림 4는 홀센서의 특성 시험을 위한 센서의 부착과 홀센서의 크기를 나타내고 있다. 이 실험은 홀센서의 선형성을 위한 실험이며, 실험 결과는 그림 5에 나타 내었다.

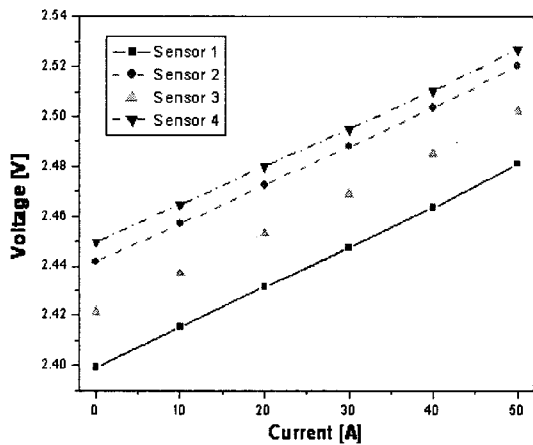


Fig. 5. Linear properties of hall sensors.

2.3 병렬 구리 도체 제작

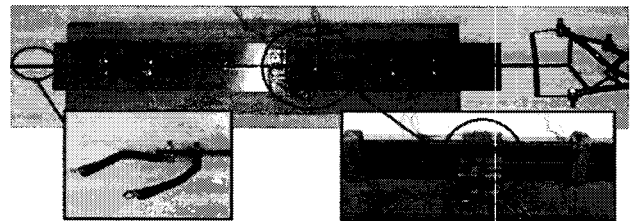
비접촉식으로 병렬 도체의 전류 분류를 측정하기 위해 4가닥과 6가닥의 병렬 구리 선재를 제작하였다. 4가닥은 4×1, 2×2 배열로 제작하고, 6가닥은 6×1, 3×2의 배열로 제작하였다. 제작된 병렬 선재의 한쪽 부분은 병렬구리 선재의 전류 값 제어와 선재에 흐르는 전류를 측정 하기위해 각각의 소선이 분리되도록 제작 하였고, 다른 한쪽은 공통 전류가 흐르도록 제작하였다. 병렬구리도체에 사용된 구리는 세로 15 mm 두께 1.9 mm 길이 1 m로 최대 132 A의 전류를 흘릴 수 있으며, 제작된 병렬 선재를 오른쪽 그림 6에 보여 주고 있다. 그림 6의 Case (A)는 4×1, 6×1 배열의 병렬 구리선재이고, Case (B)는 2×2, Case (C)는 3×2 배열의 병렬선재이다.

3. 실험방법

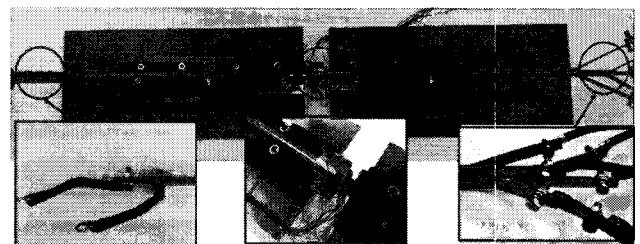
그림 7은 전류 분류 측정을 위한 실험 개략도이다. 우선 각 병렬 선재에서 한 가닥의 소선에 전류를 흘려 주어 각각의 센서에서 측정 한 자장 값으로 [K] 행렬식을 완성 하였다. 완성된 행렬식에 병렬 선재에 전류가 흐를 때 발생하는 자장을 각각의 센서에서 측정 한 후 역행렬로 계산하여 각 가닥에 흐르는 전류를 계산 하였다.



Case (A)



Case (B)



Case (C)

Fig. 6. An installation of parallel conductor which is consisted of four copper bars and locations of hall sensors on supports.

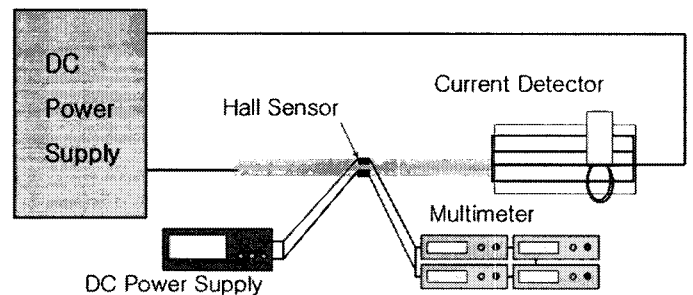


Fig. 7. Measurement set up for current distribution test.

표3 과 표4는 4병렬 도체에 각각의 소선에 전류가 흐를 때 각 가닥에 흐르는 전류 값을 측정 한 값이다. 입력 전류를 측정 한 방법은 각 가닥에 분기된 부분에

전류 측정계를 사용하여 측정한 값이다. 오른쪽의 계산 전류는 홀센서를 사용하여 각 가닥에 흐르는 전류를 측정된 것이다. 또한 강제로 전류 불균형을 발생시키기 위해 저항을 연결하였다. 측정 결과를 볼 때 4가닥 병렬선재 case 2의 전류 측정 오차가 가장 크게 발생하였으며, 이때 발생한 최대 오차는 3% 미만이다.

표 5와 표 6은 6가닥의 병렬 도체에 흐르는류를 측정된 결과이다. case 4의 경우 6가닥에 전류가 모두 흐를 때 오차가 가장 컸으며, 이때 발생하는 최대의 오차는 8% 미만이다.

Table 3 The current distribution in 4-parallel conductor of case 1

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	50.8 A	50.9 A	55.2 A	55 A
선재 2	0 A	0 A	60.1 A	59.9 A
선재 3	0 A	0 A	0 A	0 A
선재 4	0 A	0 A	0 A	0 A
	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	20.7 A	21 A	15.5 A	15.7 A
선재 2	19.8 A	19.5 A	18 A	18 A
선재 3	0 A	0 A	13.7 A	13.8 A
선재 4	19.9 A	19.9 A	18 A	17.9 A

Table 4 The current distribution in 4-parallel conductor of case 2

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	0 A	0 A	61 A	61 A
선재 2	0 A	0 A	0 A	0 A
선재 3	39.7 A	39.7 A	0 A	0 A
선재 4	0 A	0 A	39 A	39.3 A
	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	72.1 A	73.2 A	78.2 A	78.1 A
선재 2	40.4 A	37.9 A	42.5 A	42.1 A
선재 3	27.3 A	28.6 A	28.9 A	28.2 A
선재 4	0 A	0.1 A	49.8 A	50.6 A

Table 5 The current distribution in 6-parallel conductor of case 3

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	0 A	- 0.3 A	78.2 A	78.1 A
선재 2	39.1 A	40.3 A	42.5 A	42.1 A
선재 3	0 A	-1.5 A	28.9 A	28.8 A
선재 4	43 A	44.3 A	49.8 A	50.9 A
선재 5	0 A	- 0.4 A	0 A	- 0.3 A
선재 6	57.4 A	57.6 A	0 A	0 A

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	61.6 A	61 A	32.8 A	31.1 A
선재 2	33.6 A	33.8 A	28.4 A	31.4 A
선재 3	22.4 A	21 A	36.9 A	34.3 A
선재 4	39.9 A	41.4 A	34.9 A	36.1 A
선재 5	0 A	- 0.5 A	33.8 A	32.8 A
선재 6	62.3 A	62.4 A	32.9 A	33.7 A

Table 6 The current distribution in 6-parallel conductor of case 4

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	41.9 A	43.2 A	19.2 A	19.6 A
선재 2	0 A	1.1 A	0 A	0.7 A
선재 3	46.6 A	45.4 A	23.1 A	22 A
선재 4	0 A	0.4 A	0 A	0.5 A
선재 5	40.9 A	40.3 A	18.9 A	17.6 A
선재 6	0 A	- 0.3 A	19.7 A	19.8 A

	입력전류	계산전류	입력전류	계산전류
선재 1	29.8 A	29.2 A	32 A	31.6 A
선재 2	31.9 A	33.3 A	31.2 A	32.5 A
선재 3	30.6 A	29.1 A	30.2 A	29 A
선재 4	0 A	0.8 A	32.7 A	33.1 A
선재 5	27.1 A	25.6 A	30.1 A	28 A
선재 6	29.5 A	31.4 A	32.7 A	34.8 A

4. 결 론

초전도 전력기에 고온 초전도 선재를 사용하기 위해서는 여러 가닥의 선재를 병렬로 적층하여 사용해야 한다. 제작된 병렬 선재의 최대의 효율을 내기 위해서는 각 가닥에 흐르는 전류가 균일해야 하고, 전류가 균일하게 흐르게 하기 위해서는 가장 먼저 각 가닥에 흐르는 전류 값을 알아야 한다.

본 논문에서는 홀 센서의 특성을 실험하고, 병렬도체를 제작하여 전류 분류 측정 실험을 하였다. 병렬도체의 배열 형상에 따라 전류 분류 측정이 결과에 차이를 보였고, 각 가닥에 흐르는 전류를 정확하게 측정하지 않았지만, 각 선재에 흐르는 전류값의 패턴을 알 수 있었다. 이때 발생한 오차는 홀 센서로 자장값을 측정할 때 거리에 따라 노이즈 성분이 포함되어 있다고 판단된다.

앞으로 센서의 위치를 변경하여 전류 분류를 측정하고 가장 결과가 좋은 센서의 위치에서 센서를 고정시킬 수 있는 센서 홀더를 제작하겠다. 또한 교류에서의 전류 분류 실험을 진행하여 최종적으로 락스바에서 실험을 진행 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 변상범, 이승욱, 황영인, 장대례사, 최경달 "다중 적층 초전도 선재의 전류 분포가 교류손실에 미치는 영향", 대한전기학회논문집, B 권, p1279-1280, 2006
- [2] 김우석, 이승욱, 황영인, 장대례사, 이회균, 홍계원, 최경달, 한송엽, "대용량 초전도 변압기 권선용 다중선재의 특성", 대한전기학회논문집, B 권, p1216-1218, 2005

저 자 소 개



변상범 (卞相範)

1981년 3월 20일생, 2007년 2월 한국 산업기술 대학교 전공 학과 졸업. 현재 동 대학원 전기 공학과 석사 과정.



박명진 (朴明陣)

1973년 12월 7일생, 1999년 순천향대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학박사), 현재 기초전력연구원 선임 연구원.



최석진 (崔錫鎭)

1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 위덕대학교 산학 협력단 연구원.



박상호 (朴相浩)

1969년 2월10일생, 1996년 한국해양대 전기공학과 졸업(공학석사), 2004년 동 대학원(공학박사), 현재 한국산업기술대 겸임교수.



최경달 (崔景達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업, 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1993년-1997년 기초 전력공학공동연구소 전임연구원, 1998년-현재 한국산업기술대학교 에너지 대학원 교수



이승욱 (李昇勳)

1973년 12월 23일생, 1999년 순천향대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 2004년 현재 기초전력연구.



김우석 (金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학교 공과대학 대학원 졸업 (공학석사), 2002년 동 대학교 공과대학 대학원 졸업(공학박사), 2005-2007 MIT/FBML Researcher, 2002-현재 기초전력연구원 전임연구원



이지광 (李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 전기 공학과 졸업, 1991년 동 대학원 졸업 (공학석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 우석대학교 전기전자공학과 부교수.