

1 MW 급 고온초전도 동기 모터 특성 평가

Performance Tests of 1 MW Class HTS Synchronous Motor

백승규^{1*}, 권영길¹, 김호민¹, 이언용¹, 이재득¹, 김영준², 문태선², 박희주², 권운식²

S. K. Baik^{1*}, Y. K. Kwon¹, H. M. Kim¹, E. Y. Lee¹, J. D. Lee¹,
Y. C. Kim², T. S. Moon², H. J. Park², W. S. Kwon²

Abstract: A 1MW class HTS (High-Temperature Superconducting) synchronous motor has been developed. This motor was aimed to be utilized for industrial application such as large motors operating in large plants. The HTS field windings of the developed motor is cooled by way of Neon thermosiphon mechanism and the stator coil is cooled by water through hollow copper conductor. This paper describes performance test results of our motor, which was conducted at steady state in generator mode and motor mode.

Key Words: HTS synchronous motor, industrial application, thermosiphon, hollow copper conductor, performance test.

1. 서 론

개발된 고온초전도 동기 모터는 계자코일이 Bi-2223 고온초전도 선재로 이루어졌으며, 터빈 발전기의 축소 모델로서 시험하기 위하여 3600 rpm을 정격속도로 하였다. 그 주요 사양을 Table 1에 나타내며 부하시험을 위해서 기존의 공냉식 1.1 MW 유도 모터로 구성되는 다이내모미터에 연결된 모습을 Fig. 1에 보여준다[1].

Table 1. Major Spec. of the Developed 1 MW class HTS Synchronous Motor

정격용량	1 MW	계자코일 턴 수	3348
정격속도	3600 rpm	계자코일 초전도체	Bi-2223
주파수	60 Hz	계자코일 동작온도	30~40 K
극수	2 극	축방향 길이× 높이	2.4 × 1.2m
정격단자 전압	3300 V	전기자 슬롯 수	36
계자정격 전류	150 A	전기자 코일 턴 수	48턴/상
계자도체 전류밀도	1 1 5 A/mm ²	전기자 냉각방식	수냉식

¹정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹

²정 회 원 : 두산중공업(주) 기술연구원

*교신저자 : skbaik@keri.re.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 03월 14일



Fig. 1. Appearance of 1 MW class HTS motor and load test facility.

2. 본 론

2.1. 계자코일 냉각 및 통전

고온초전도 계자코일을 동작온도인 30 ~ 40 K까지 냉각시키기 위하여 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 모터의 외부에 위치하는 극저온 냉동 장치에서 기체 상태의 냉매를 액화하여 회전자 내부로 중력에 의하여 흘러들어가게 하는 써모사이펀(thermosiphon) 방식이 이용된다[2]. 초기 냉각시에 네온(Ne)만을 냉매로 하여 상온에서 30 K까지 냉각하는데 200 시간이 걸렸다. 냉각에 걸리는 시간을 단축 시키기 위해서 네온(27.1 K)보다 더 높은 액화점을 가지는 질소(77 K)를 이용하여 1 MW 초전도모터의 회전자 냉각실험을 수행하였다. 질소를 이용하여 예냉 후 네온가스를 이용하여 냉각시킨 냉각 그래프를 Fig. 2에 나타낸다. 회전자의 온도 기울기가 완만해지는 55 시간까지 질소를 이용하여 로터를 90 K 정도까지 냉각 시켰다. 그 후 냉동기를 정지시킨 후 내부의 액체 질소를 증발 시킨 후 네온가스를 이용하여 퍼징(Purging) 작업을 수행한 후 56 시간 부터 네온을 이용하여 로터의 온도를 30 K 이하로 냉각시켰다. 냉각에 소요된 총 시간은 78 시간이었으며, 이는 네온만을 사용하여 냉각할 경우에 소요되는 시간의 절반 이하로서 시간적인 손실을 크게 줄일 수 있었다.

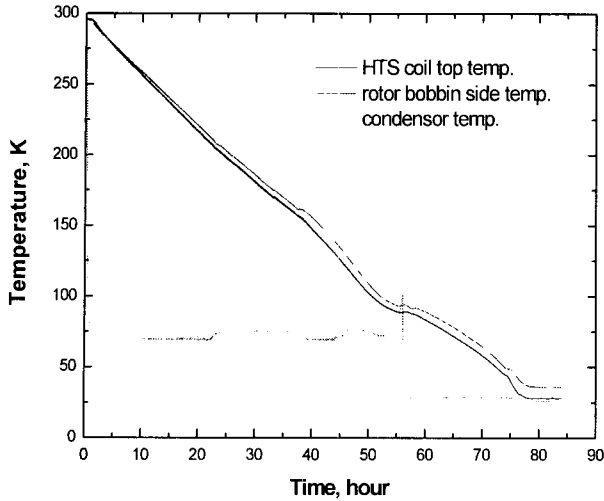


Fig. 2. Rotor cool-down curves of 1 MW class HTS motor.

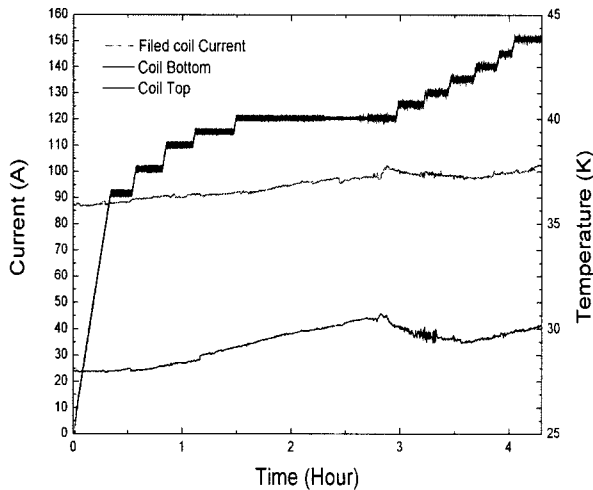


Fig. 3. Field coil current and temperature variation during excitation voltage measurement.

Fig. 3에 1 MW 고온초전도 모터의 계자코일에 150 A까지 통전시 전류 및 코일의 온도변화를 보여준다. 냉각이 완료된 고온초전도 계자코일의 온도는 상부가 36 K, 보빈에 접하는 바닥 부분이 28 K로 유지되었다. 4 시간 동안 150 A까지 상승시켰으며 150 A 통전후 계자코일의 온도는 상부가 37.5 K, 하부가 30.2 K, 으로 각각 1.5 K, 2.2 K 상승하였다. 0 A, 30 A, 60 A, 90 A, 110 A, 130 A, 150 A 통전시 초전도모터를 다이내모미터를 이용하여 전류별로 600 rpm, 1200 rpm, 1800 rpm 회전시 발전기모드에서의 역기전력을 측정하였다.

2.2. 무부하 특성 시험 결과

Fig. 4는 1 MW 고온초전도 모터를 계자코일 여자 상태에서 다이내모미터(Dynamometer)의 유도 모터로 회전시켰을 경우, 발전되는 전압과 단락 전류의 측정 데이터를 보여주고 있다. 개방회로 특성(OCC) 시험에서는 삼상의 고정자 코일 단자를 개방시킨 상태에서 코일의 선간 단자 전압을 측정하는 것이다. 그림에서와 같이 OCC 곡선은 공심형의 초전도 모터이기 때문에 회전자 전류에 따라 비례하고, 또한 식 (1)에서와 같이 회전속도에 비례하므로 600 rpm에서의 단자전압 측정

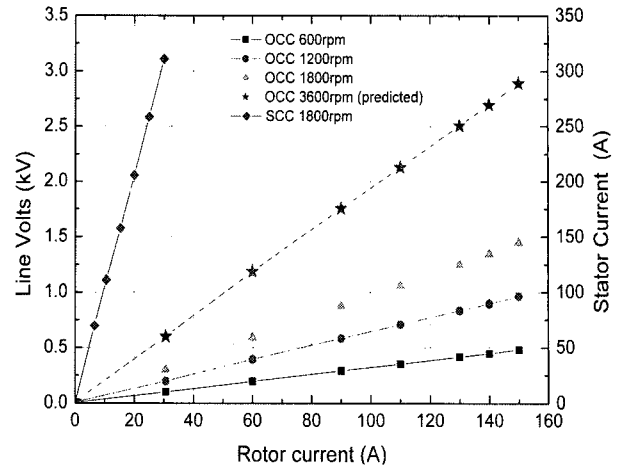


Fig. 4. Open and short circuit characteristics test result.

치의 2배가 1200 rpm에서의 측정치가 됨을 확인할 수 있었으며 3배일 경우 정확히 1800 rpm에서의 측정치가 되었다[3].

본 시험시에 다이내모미터와 초전도 모터를 연결하였을 경우 진동이 문제가 되어 3600 rpm에서 발생 전압을 측정하지는 못하였으나, 1800 rpm에서의 측정치를 2배하여 3600 rpm에서의 값을 구하였다.

$$E_{ph} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

여기서, E_{ph} 는 상당 발전 전압(역기전력),
 ω 는 각주파수,
 L_{af} 는 고정자와 회전자 코일 사이의 상호인덕턴스 최대값,
 I_f 는 회전자 전류(계자 전류)

위 식을 이용하여 상호인덕턴스 최대값 L_{af} 를 구하면, 회전자 전류 150 A, 1800 rpm에서 전기자 선간 발전 전압이 1445.6 V 이었으므로 상전압은 이를 $\sqrt{3}$ 으로 나눈 834.62 V가 된다. 이를 식 1에 대입하면 L_{af} 는 0.0417 H가 된다.

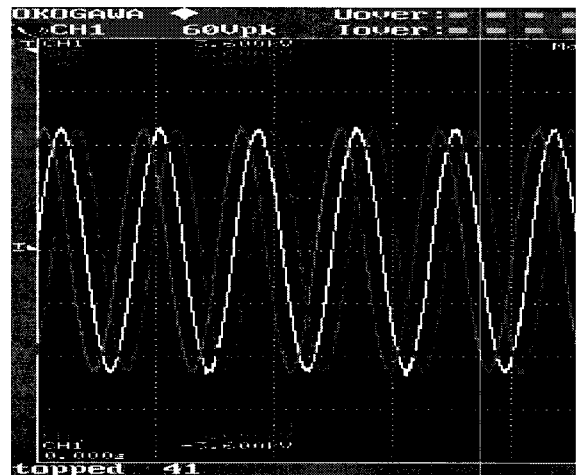


Fig. 5. Generated voltage waveforms from open circuit characteristics test(1800 rpm, Field current 150 A).

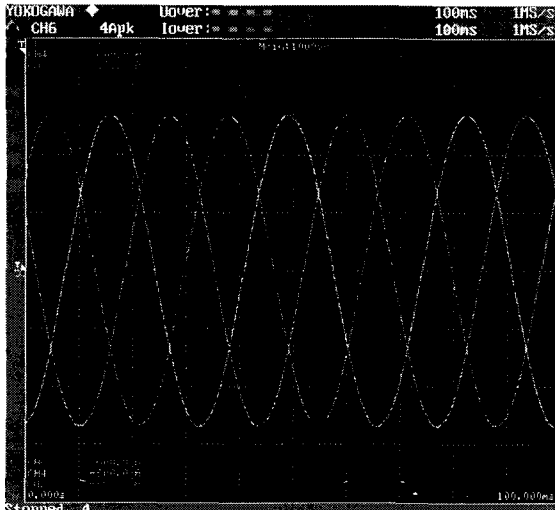


Fig. 6. Armature current waveforms during short circuit characteristics test.

Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 발전되는 전압과 전류의 파형이 매우 정현적임을 볼 수 있다. Fig. 5의 발전 전압 파형 중 한 상이 삼상 평형으로 나타나지 않는 이유는 측정 계측기(YOKOGAWA PZ4000 Power Analyzer)의 결선 방법에 의한 것으로서 극성이 바뀌어 연결되기 때문이다.

개방회로 특성 시험시 측정 결과들을 Table 2에 보인다. 이 때에는 전기자 전류가 흐르지 않지만 계자전류에 의해 발생하는 자장으로 인한 철손과 풍손 및 마찰손(Windage and Friction Loss)에 의하여 초전도모터(발전기)에 에너지가 입력된다. 이 입력값에서 계자전류가 0 A일 때의 입력인 풍손 및 마찰손을 빼면 표의 우측에 나타나는 철손이 된다[3]. 이를 전기자 단자 전압에 대하여 Fig. 7에 나타낸다.

Table 2. Core loss calculation from open circuit characteristics test(Generator mode)

계자 전류 [A]	초전도모터 입력 (Dynamometer 출력) [kW]			Core Loss [kW]		
	600 rpm	1200 rpm	1800 rpm	600 rpm	1200 rpm	1800 rpm
0	0.346	0.702	1.027	0	0	0
30	0.348	0.856	1.491	0.002	0.154	0.464
60	0.614	1.656	3.114	0.268	0.954	2.087
90	0.908	2.708	5.414	0.562	2.006	4.387
110	1.12	3.638	7.344	0.774	2.936	6.317
130	1.419	4.714	9.6	1.073	4.012	8.573
140	1.597	5.329	10.916	1.251	4.627	9.889
150	1.817	6.107	12.492	1.471	5.405	11.465

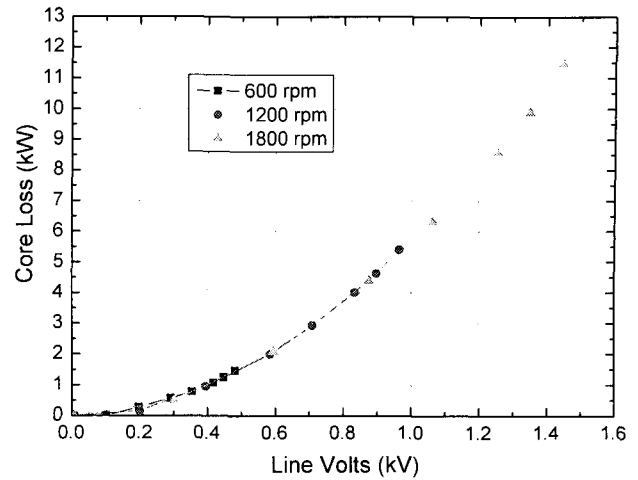


Fig. 7. Open circuit core loss curves.

$$I_{sc} = \frac{E_{ph}}{\sqrt{R_{ph}^2 + X_s^2}} \quad (2)$$

여기서, I_{sc} 는 단락전류,

E_{ph} 는 상당 발전 전압(상당 역기전력),

R_{ph} 는 전기자 코일 상당 저항,

X_s 는 동기리액턴스

단락회로 특성 시험시 전기자 전류는 식 (2)와 같이 표시되며 이를 이용하여 동기리액턴스 X_s 를 구하였다. 계자전류 30 A, 1800 rpm에서 발생하는 역기전력은 선간전압 300.7 V였고 이는 상전압으로 173.6 V가 되고 같은 조건에서 단락전류는 310.8 A였다. 상온에서 전기자 코일 상당 저항 R_{ph} 는 0.0965 Ω 이었으며 이 값을 식 2에 대입하여 동기리액턴스 X_s 를 구하면 0.4643 Ω 이 된다. 1800rpm에서 회전 주파수는 $2\pi \times 30$ 이므로 동기리액턴스를 이 값으로 나누면 상당 동기인덕턴스는 2.4632 mH가 된다. 따라서 정격속도인 3600 rpm에서의 동기리액턴스 X_s 는 1800 rpm의 두 배인 0.9286 Ω 이 된다. 3차원 전자기 유한요소해석 프로그램을 이용하여 설계시 계산된 동기리액턴스는 1.3289 Ω 이었으며 실측치가 30.12 % 적은 값을 가졌다.

Table 3. Short circuit characteristics test data(Generator mode, 1800rpm)

계자 전류 [A]	전기자 전류 [A]	전기자코일 온도 (코일 중심부) [°C]			초전도 모터 입력 (Dynamometer 출력) [kW]	Short-circuit Loss [kW]
		R상	S상	T상		
0	0.432	23.8	23.4	23.9	1.163	0.136
5.5	69.76	25.5	25.2	25.7	2.569	1.542
10.5	111.19	26.6	26.0	26.5	4.807	3.78
15.3	157.52	28.1	27.8	28.2	8.569	7.542
20	205.41	31.4	31.1	31.5	14.058	13.031
25	258.62	37.4	37.2	37.6	22.131	21.104
30	310.76	45.3	45.6	45.9	32.402	31.375

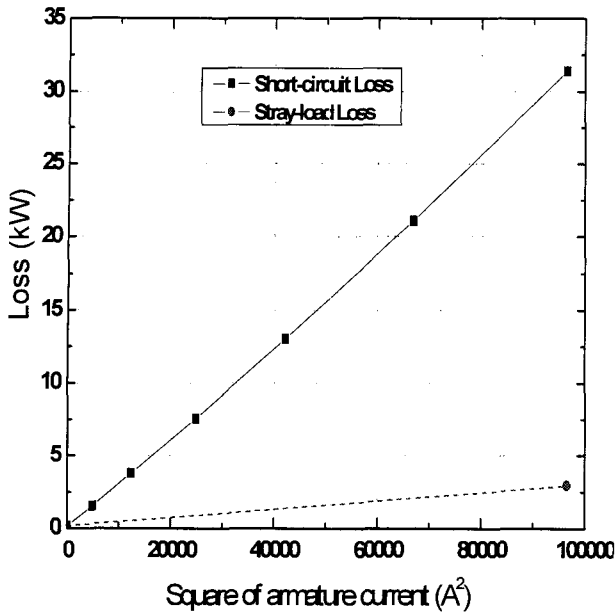


Fig. 8. Short circuit loss and stray-load Loss curves(1800rpm).

Fig. 8은 1800 rpm 회전시의 단락회로 손실(Short circuit Loss)을 보여주고 있으며, 이 값들은 Table 3의 초전도모터 입력값들에서 Table 2의 개방회로 시험시 1800 rpm에서의 풍손 및 마찰손인 1.027 kW를 빼어서 계산되었다.

$$\text{Stray-load Loss} = \text{Short circuit Loss} - \text{Core Loss} - \text{Armature } I^2R \text{ Loss} \quad (3)$$

표류부하 손실(Stray-load Loss)은 식 (3)와 같이 주어지며 계자전류 30 A일 때 개방회로 시험시 표 3.6.2의 철손(Core Loss) 0.464 kW와 Table 3의 단락회로 시험시 전기자코일에 310.76 A의 단락전류에 의한 I²R 손실(상온에서 전기자 코일 상당 저항 R_{ph} 0.0965 Ω 이용)인 27.958 kW를 단락회로 손실 31.375kW로부터 빼면 2.935 kW의 표류부하 손실이 구해진다. 이를 Fig. 8에 점선으로 나타내었다[4].

2.3. 부하 특성 시험 결과

Fig. 9은 초전도모터를 인버터를 이용하여 계자 전류 150 A, 1800 rpm에서 회전시킨 상태에서 다이내모메터를 이용하여 부하를 0에서 정격 토크 2650 Nm 까지 인가하였을 때 전기자 전류에 따른 발생 토크의 변화를 나타낸다. 그림 6은 부하의 증가에 따른 효율을 보여준다. 시험 설비의 진동 문제 때문에 3600 rpm에서 효율 측정은 못했지만 정격 토크까지 인가하였고, 동일 출력을 내기위해서 3600 rpm에서는 1800 rpm의 절반의 토크만 발생시키면 되므로 전기자 전류가 감소하여 그림에서보다 효율이 높게 나올 것이다. 따라서 정격속도인 3600 rpm에서는 기존 1 MW 유도 모터의 효율인 95 %보다 높게 나온다고 할 수 있다. 3600 rpm에서 데이터는 얻지 못했지만 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 초전도 모터의 특징인 정격 이하의 부분 부하(Partial Load)에서 높은 효율 특성은 확인할 수 있다.

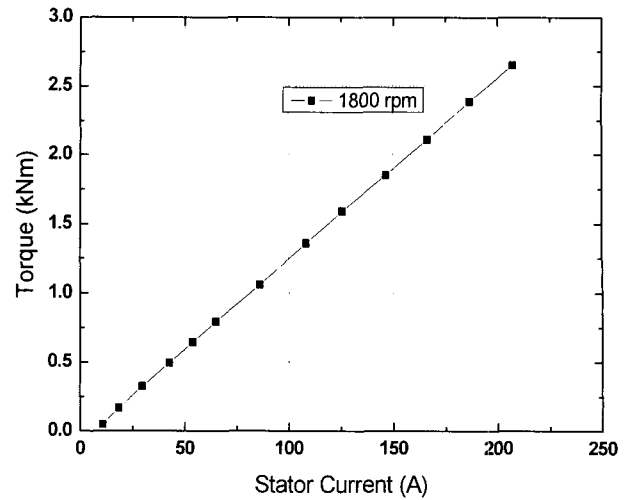


Fig. 9. Generated torque according to armature current(1800 rpm).

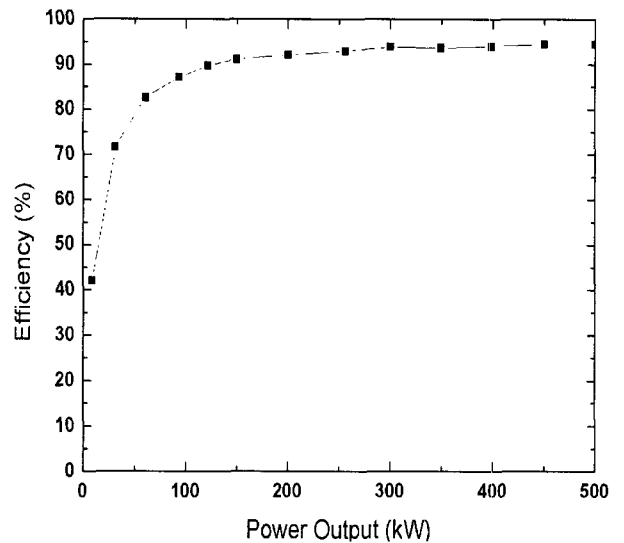


Fig. 10. Efficiency variation according to applied load(1800 rpm).

3. 결 론

1 MW 급의 고온초전도 동기 모터를 최종 조립한 후 극저온 냉동기를 운전하여, 질소와 네온 냉매를 액화하여 고온초전도 계자코일을 목표한 온도인 30~35 K로 냉각하여 유지시킬 수 있었다. 냉매를 네온만 사용할 때보다 냉각 시간을 1/3 정도 단축할 수 있었다. 냉각 후 계자코일에 정격 전류 150 A까지 통전할 수 있었으며 정격 토크 운전시에도 전류를 유지시킬 수 있었다. 다이내모메터와 초전도모터 사이의 커플링 후 진동 문제로 인하여 3600 rpm에서 시험 결과는 얻지 못하였으나, 발전 Mode에서 개방회로 특성 시험과 단락회로 특성 시험을 통하여 역기전력과 동기리액턴스 등을 도출하였다. 또한 구동 인버터를 이용하여 초전도모터를 회전시킨 후 다이내모메터를 이용하여 정격 토크까지 부하를 인가할 수 있었으며 효율을 측정하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

참고 문헌

- [1] 백승규, 손명환, 이연용, 권영길, 문태선, 박희주, 김영춘, "수냉식 1MW 고온초전도 동기모터의 설계", 한국초전도·저온공학회는논문지, 7권 3호, pp. 21~28, 2005년 9월
- [2] M. Frank et al., "Long-Term Operational Experience With First Siemens 400 kW HTS Machine in Diverse Configurations" IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 13, No. 2, pp.2120~2123, JUNE 2003
- [3] A. E. Fitzgerald et. al., "ELECTRIC MACHINERY", McGRAW-HILL, 5th edition, pp.216~259, 1991
- [4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines(IEEE Std 115-1995)", pp.27~38, December, 1995

저자 소개



백승규(白承圭)

1972년 11월 19일생, 1995년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 선임연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 그룹장



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 2002년~2004년 M.I.T. Francis Bitter Magnet Lab. Post-Doctoral Research Associate, 2004년~2007년 LG산전(주) 전력연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 선임연구원



이연용(李彦容)

1960년 5월 13일생, 1984년 창원기능대학 전기공학과 졸업, 1988년~현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 책임기사



이재득(李在得)

1975년 9월 7일생, 2001년 창원대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정, 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 위촉연구원



김영춘(金永春)

1964년 12월 26일생, 1986년 금오공과대학교 기계공학과 졸업, 1991년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 책임연구원



문태선(文泰善)

1965년 6월 3일생, 1993년 부산대학교 물리학과 졸업, 1996년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 선임연구원



박희주(朴希柱)

1970년 9월 25일생, 1995년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 1997년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 주임연구원



권운식(權雲植)

1976년 2월 2일생, 1998년 경상대 공과대학 기계공학과 졸업, 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2002년 9월 ~ 2004년 10월 한국전기연구원 초전도응용 연구그룹 위촉연구원, 2004년 11월 ~ 현재 두산중공업(주) 기술연구원 주임연구원