

고조파에 의한 초전도 직류 전력케이블의 손실 특성 분석

Harmonics based loss characteristics analysis of HTS DC power cable

김성규¹, 김석호², 박민원^{3,*}, 유인근³, 이상진⁴, 조전욱⁵, 심기덕⁵, 원영진⁶, 황시돌⁷

S. K. Kim¹, S. H. Kim², M. W. Park^{3,*}, I. K. Yu³, S. J. Lee⁴, J. W. Cho⁵,
K. D. Sim⁵, Y. J. Won⁶, S. D. Hwang⁷

Abstract: An HTS DC power cable is expected to perfectly eliminate transmission loss caused by resistance. However, when the HTS DC power cable is applied to the power system, loss of the HTS DC power cable is generated due to harmonics caused by HVDC converter. We designed and analyzed the HTS DC power cable with a critical current of 1 kA to investigate the loss characteristics using a finite element method package. In this paper, the loss characteristics caused by harmonics in the HTS DC power cable were analyzed according to order and magnitude of harmonics. Based on the analysis results, the critical current of HTS DC power cable considered with the rated current could be determined to minimize the capacity of cooling system for the design the HTS DC power cable.

Key Words: Loss, FEM, Harmonics, HTS DC power cable.

1. 서 론

최근 한국을 비롯한 전세계 적으로 초전도 전력 케이블에 관한 연구가 활발히 진행중에 있다[1]. AC와 DC 초전도 전력케이블을 비교하였을 때, 초전도 AC 케이블의 전력 운용 능력은 전력 시스템의 안정성의 문제 때문에 한계점을 가진다. 특히 장거리 케이블에서, 초전도 AC 케이블의 충전 전류는 부하 전류의 중요한 한 부분이 될 수 있다. 게다가 장거리 초전도 AC 케이블의 큰 정전용량은 전력 시스템에 전압 조정 문제를 일으키는 용량성 부하로 작용한다.

이에 전력 시스템은 AC 케이블의 일정 길이에 따라 무효전력 보상을 필요로 하게 된다. 하지만 초전도 DC 케이블에서는 이와 같은 문제가 없다. 또한 초전도 AC 케이블은 초전도 DC 케이블과 달리 추가적인 손실로 초전도 충전 기관 및 안정화 층에서 자속에 의한 히스테리시스 손실과 자기장 변화에 의한 와전류 손실을 가진다. 초전도 DC 케이블은 DC 시스템에서 운전하는 동안 히스테리시스 손실이나 와전류 손실이 없지만, DC 케이블 양 끝단에서의 전력변환에 의해 발생된 고조파 때문에 실제 시스템에서는 초전도 층의 히스테리시스 손실과 기관 및 안정화 층에서의 와전류 손실이 발생한다[2].

본 논문에서는 초전도 DC 케이블을 디자인하여 고조파의 차수와 크기에 따라 전자장 해석을 수행하였고, 전자장 해석 결과를 이용하여 초전도 DC 케이블의 손실을 분석하였다. 먼저 DC 전류에 각 차수의 고조파 성분을 크기별로 포함시켜 케이블의 손실을 계산하였고, 고조파 성분이 포함되지 않은 DC 전류에 의한 케이블을 이루고 있는 선재의 각 층별 손실을 계산하여 고조파 성분에 의한 손실을 계산하였다. 이 결과는 고조파에 의한 초전도 DC 전력케이블의 손실이 초전도 AC 전력케이블에 비해 매우 작음을 나타내며, 초전도 DC 케이블의 운전 전류와 고조파 성분의 크기 및 차수에 의한 손실을 예측하여 초전도 DC 케이블의 길이와 손실에 따른 극저온 냉각 시스템의 용량을 결정할 수 있는 하나의 지표가 될 것으로 생각된다.

2. 본 론

2.1. FEM 해석 모델

초전도체는 비선형 E - J (전계와 전류 밀도) 특성을 가진다. 초전도체의 비선형성은 상전도체와 뚜렷하게 대조되며, 이 특성은 본 논문에서 FEM 모델을 통해 반영되었다. 또한, 본 논문에서는 초전도 선으로 rolling-assisted biaxially textured substrate (RABiTS) type 선재를 사용하였고, RABiTS의 자화는 손실에 큰 영향을 주기 때문에 이것 또한 FEM 모델에 반영되었다. 여러 가지 FEM 해석 형태 중에 하나인 H-field 형태를 이용한 맥스웰 방정식의 근사치는 초전도 층의 AC loss를 예측하기 위해 제안되었고, 좋은 결과를 나타낸다[3,4]. 맥스웰 방정식은 몇 가지 상태변수를 이용하여 다른 형태로 정리하여 나타낼 수 있고, 이를 x축과 y축의 성분으로 나누어 스칼라 형태로 정리하여 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 H-field 형태에서 사용된 2차원 모델링에 대한 지배 방정식은 다음 식 (1)-(4)와 같다. 식 (1)-(3)을 통하여 초전도 층 내부의 전류 분포와 전기장을 계산할 수 있고, 식 (1)-(3)을 통하여 식 (4)에서 본 논문

¹학생회원 : 창원대학교 전기공학과 석사과정

²정 회 원 : 창원대학교 기계공학과 교수

³정 회 원 : 창원대학교 전기공학과 교수

⁴정 회 원 : 위덕대학교 에너지전기공학부 교수

⁵정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

⁶정 회 원 : 한국전력공사

⁷정 회 원 : 전력연구원 전력계통연구실

*교신저자 : paku@changwon.ac.kr

원고접수 : 2011년 09월 01일

심사완료 : 2011년 09월 26일

게재확정 : 2011년 09월 27일

에서 설계된 초전도 DC 케이블의 고조파에 의한 손실을 계산할 수 있다.

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial y} = 0, \quad \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$E = \rho(J)J \quad (2)$$

$$J = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3)$$

$$P = \int_A E \times J dA [W/m] \quad (4)$$

여기에서, H 와 E 는 2차원 영역에서의 자기장과 전기장, μ 는 각 층의 투자율, ρ 는 초전도체의 E - J 관계를 나타내는 비저항 그리고 J 는 초전도체의 전류밀도를 나타낸다.

고조파에 의한 초전도 DC 케이블의 손실 해석을 위해 임계전류 1 kA의 DC 케이블을 설계하였고, FEM 해석 모델을 개발하였다. 케이블 및 선재의 사양은 표 1과 같다. FEM 모델내의 초전도체는 4개의 층으로 모델링 하였으며, 케이블의 통전층은 단층으로 모델링 하였다. 모델링된 초전도 DC 케이블의 형태는 그림 1과 같다.

Table 1. Specification of the HTS wire and HTS DC power cable.

	Parameters	Specifications
Wire	Width	4 mm
	Thickness	0.19 mm
	Critical current	100 A
	Substrate type	RABiTS
	Stabilizer type	Brass
	Substrate thickness	70 μ m
	Stabilizer thickness	60 μ m
Cable	Number of wire	10 EA
	Inner radius	8 mm

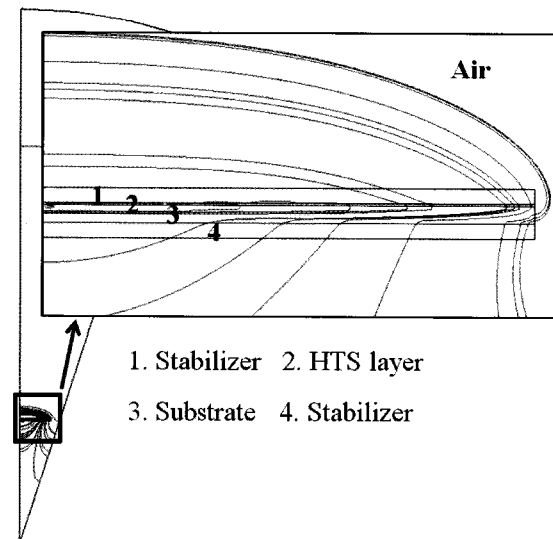


Fig. 1. The magnetic field analysis result of HTS DC power cable.

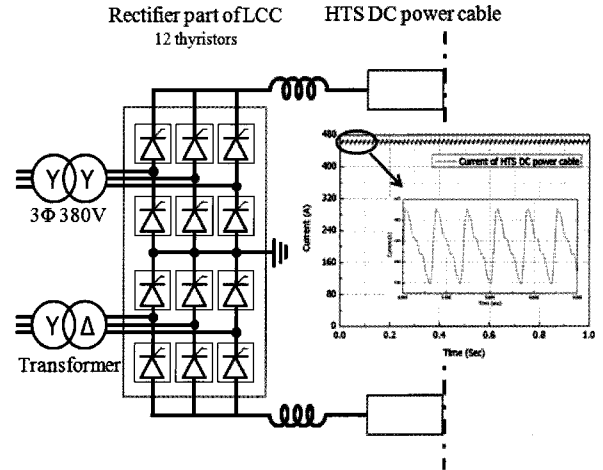


Fig. 2. Jeju & Haenam HVDC system and Harmonics of DC side.

Table 2. Harmonics of DC side.

Order	Magnitude	Rate
0 th (DC)	463 A	100%
12 th	5.363 A	1.16%
24 th	2.829 A	0.61%
36 th	1.261 A	0.27%
48 th	0.317 A	0.07%
60 th	0.565 A	0.12%

2.2. 해석 결과

2.2.1 HVDC 시스템의 고조파

본 연구에서는 그림 2와 같은 실제 운전중인 300 MW급 제주도-해남 HVDC 시스템을 고려하여 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션 된 고조파가 포함된 DC 송전전류 결과를 FEM에 적용하였고, 나아가 고조파의 차수와 크기에 따른 초전도 DC 케이블의 손실에 대해서 분석하였다. HVDC 시스템의 AC/DC 컨버터는 사이리스터의 순차적 스위칭의 결과로 DC 측에 고조파를 발생시킨다. 초전도 DC 케이블의 손실 해석을 위하여 DC 케이블 양 끝단에 연결된 HVDC 컨버터에서 발생하는 고조파 전류에 대해 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 계통 시뮬레이션을 위하여 제주도와 해남간 HVDC 시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하였고, 그 결과 중 DC측 전류에 대해서 FFT를 이용하여 분석하였다. FFT를 통해 분석된 고조파 전류는 표 2와 같다.

2.2.2 HVDC 시스템에 적용된 초전도 케이블의 손실

계통 시뮬레이션을 통한 FFT 결과를 FEM 모델에 적용 하였고, 그 결과는 그림 3 과 같다. 제주도와 해남 HVDC 시스템에 초전도 DC 케이블이 적용 될 경우 운전전류가 0.95 kA일 때 27.8 mW/m가 발생하며, 이는 초전도 케이블의 임계전류인 1 kA의 95% 수준인 950 A의 전류에서 발생한 손실로 22.9 kV/50 MVA급 초전도 AC 케이블의 I_0/I_c 가 40% 수준일 때의 손실인 0.85W/m/phase에 비해 작은 값을 알 수 있다. 더불어 초전도 DC 케이블과 상전도 DC 케이블 그리고 초전도 AC 케이블의 각 손실값을 비교해 보았으며, 비교된 통전 전류의 크기는 0.8 kA이다. 본 논문에서 설계된 초전도 DC 케이블의 경우

그 손실은 약 1.5 mW/m이며, 현재 제주도에 설치되어 있는 상전도 DC 케이블의 경우 100 km 케이블 전체의 저항이 약 2.5 Ω으로 16 W/m의 손실값을 가진다.

초전도 AC 케이블의 경우 같은 전류레벨에서의 손실값 비교를 위하여 Albany project를 통해 설계된 3상 일괄형 초전도 케이블을 비교대상으로 하였으며, 손실값은 0.34 W/m/phase이다[5]. 초전도 AC 케이블의 경우에도 작은 손실값을 가지지만 이 손실값은 임계전류가 2.7 kA 일 때의 경우로 임계전류대비 운전전류가 30% 일 때의 결과이다. 이를 바탕으로 비교해 볼 때 초전도 DC 케이블의 손실값은 매우 작은 값을 확인 할 수 있다.

그림 3은 본 논문에서 설계된 초전도 DC 케이블을 제주도 HVDC 시스템에 적용했을 때의 손실 결과를 나타낸다. 초전도 DC 케이블의 손실은 대부분 초전도 층과 기판의 히스테리시스 손실에서 발생하고, 기판과 안정화 층의 와전류 손실은 10^{-7} W/m로 초전도 DC 케이블의 손실에서 무시 할 수 있을 만큼 매우 작은 것으로 확인되었다. 단, 본 논문에서 모델링된 RABiTS 선재는 자기특성을 가지고 운전전류가 75% 이하에서 초전도 층에서 발생하는 손실보다 큰 값을 가지기 때문에 기판의 자화손실은 와전류 손실과 달리 초전도 DC 케이블의 손실에 영향을 주는 것을 확인 하였다.

2.2.3 고조파에 따른 초전도 DC 케이블의 손실

고조파에 차수와 크기에 따른 초전도 DC 케이블의 손실을 분석하기 위해 12차, 24차, 36차 고조파 각각에 대해 그 크기별로 손실 해석을 실시하였다. 손실 해석은 DC 전류에 각각의 고조파 차수별로 몇 가지의 크기를 산정해 실시하였고, 고조파가 포함되지 않은 DC 전류에 대한 손실 해석을 통하여 고조파에 의한 손실량 만을 계산하였다.

그림 4~7은 각각 DC, 12차, 24차, 36차 고조파 전류에서의 고조파 크기와 운전전류 증가에 따른 손실 해석 결과를 보여 준다. 그림 4에서 보는 것과 같이 DC 전류에 의한 손실은 각 초전도 선재마다 가지고 있는 상태전이의 급격한 정도를 나타내는 n-value에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그림 5~7은 각 고조파 성분에 의한 손실값을 나타내며, 그 손실 값은 운전전류가 90%에서 12차 고조파

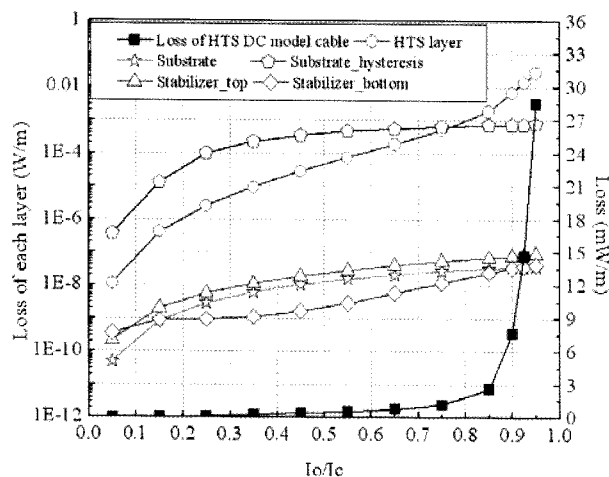


Fig. 3. Loss characteristics of HTS DC power cable in Jeju-Haenam HVDC system.

성분의 크기가 운전전류의 5%일 때 5 mW/m 이하로 매우 작은 값을 확인 할 수 있다. 여기에서도 볼 수 있듯이 고조파에 의한 손실값 역시 n-value의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 초전도 DC 케이블의 손실에 대한 고조파 차수와 크기의 관계는 표 3에서 보는 것과 같이 고조파의 차수가 증가함에 따라, 고조파의 크기가 증가함에 따라 커지는 것을 확인 할 수 있으며, 고조파에 의한 초전도 DC 케이블의 손실은 고조파의 차수에 의한 것보다 고조파의 크기에 의한 변화폭이 더 큰 것을 확인 할 수 있다.

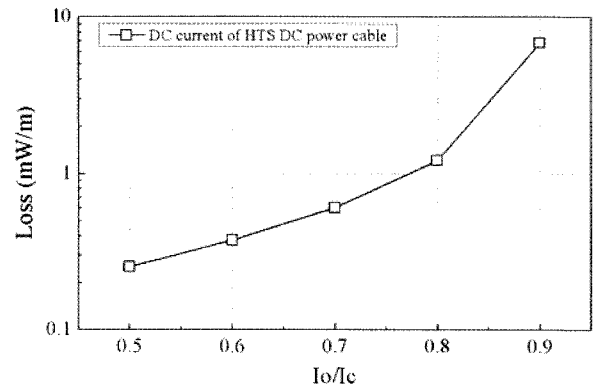


Fig. 4. Loss of HTS DC power cable caused by DC current.

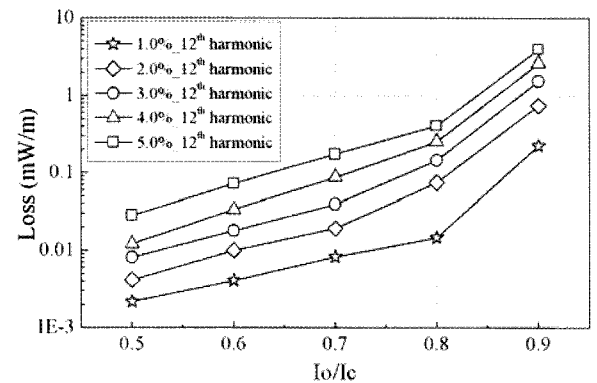


Fig. 5. Loss of HTS DC power cable caused by 12th harmonic.

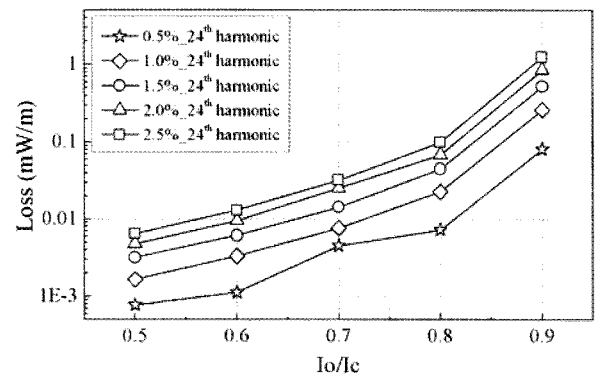


Fig. 6. Loss of HTS DC power cable caused by 24th harmonic.

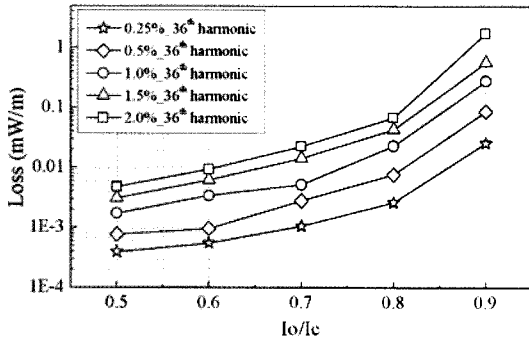


Fig. 7. Loss of HTS DC power cable caused by 36th harmonic.

Table 3. Loss characteristic by magnitude and order of harmonics.

	1% harmonic @Io=0.9 kA	2% harmonic @Io=0.9 kA
12th harmonic	2.24E-4 W/m	7.44E-4 W/m
24th harmonic	2.62E-4 W/m	8.48E-4 W/m
36th harmonic	2.84E-4 W/m	1.77E-3 W/m

2.2.4 초전도 케이블의 손실 비교

본 논문의 해석결과를 통해 초전도 케이블에서 발생하는 손실에 대해서 고조파 성분, DC 전류, AC 전류, 외부로부터의 열 침입으로 나누어 비교해 보았다. 각 손실값의 비교는 운전전류가 0.8 kA일 때를 기준으로 하였다. 그림 8과 같이 초전도 DC 케이블의 고조파 성분에 의한 손실값은 1 mW/m 이하로 DC 전류에 의한 손실 1.2 mW/m, AC loss에 의한 열 손실 0.34 W/m 그리고 외부로부터 열침입에 의한 열 손실 2.85 W/m와 비교해 매우 작은 값을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 초전도 DC 케이블의 계통 적용에 있어 발생하게 될 고조파에 의한 손실에 대해서 전자장 해석을 통하여 분석하였다.

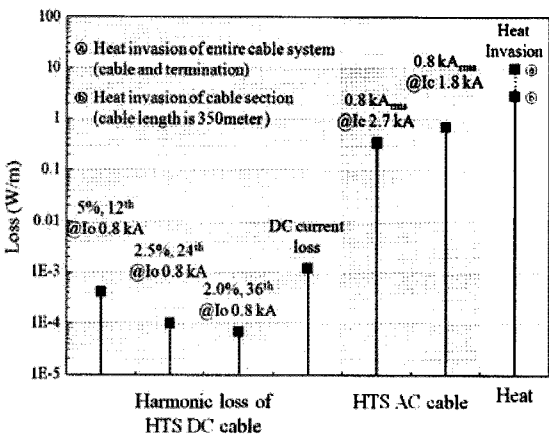


Fig. 8. Comparison between harmonics based loss of HTS DC power cable and AC loss of HTS AC power cable.

고조파의 크기에 따라 그 값이 다르지만, 일반적인 전류형 HVDC 컨버터에서 발생하는 고조파에 의한 초전도 DC 케이블의 손실은 초전도 선재의 n-value에 의해 결정되는 DC 전류의 손실보다 작은 것을 확인하였고, 초전도 AC 케이블의 AC loss와 극저온 용기 외부로부터의 열 침입에 의한 손실과 비교해서 매우 작은 값을 확인하였다. 또한 초전도 DC 케이블의 고조파에 의한 손실은 고조파의 차수와 크기에 비례함을 확인하였다.

본 연구의 결과를 통하여 초전도 DC 케이블의 실 계통 적용에 있어 초전도 DC 케이블의 손실을 줄이기 위한 초전도 DC 케이블의 최적화 설계 보다 다른 분야의 기술 개발이 필요한 것으로 생각된다. 그리고 손실 없이 대용량의 전력을 보낼 수 있는 초전도 케이블의 장점이 최대한 발휘되는 초전도 DC 케이블의 상용화 가능성을 평가하는 좋은 계기가 될 것으로 생각된다.

감사의 글

This work was supported by the Power Generation & Electricity Delivery of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy (No. 2011T100200041)

참 고 문 헌

- [1] J. Cho, J.H. Bae, H.J. Kim, K.D. Sim, K.C. Seong, H.M. Jang, D.W. Kim, "Development and Testing of 30 m HTS Power Transmission Cable", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 15, No. 2, pp. 1719-1722, 2005.
- [2] P. Chowdhuri, C. Pallem, J.A. Demko, M.J. Gouge, "Feasibility of Electric Power Transmission by DC Superconducting Cables", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 15, No. 4, pp. 3917-3926, 2005.
- [3] S. Kim, K. Sim, J. Cho, H.M. Jang, M. Park, "AC Loss Analysis of HTS Power Cable With RABiTS Coated Conductor", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 20, No. 3, pp. 2130-2133, 2010.
- [4] R. Brambilla, F. Grilli, and L. Martini, "Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors", Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, pp. 16-24, 2007.
- [5] H. Yumura, Y. Ashibe, H. Itoh, M. Ohya, M. Watanabe, T. Masuda, and C.S. Weber "Phase II of the Albany HTS cable project", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 19, No. 3, pp. 1698-1701, 2009.

저 자 소 개



김성규(金成奎)
1986년 2월 3일생, 2008년 창원대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김석호(金錫鎬)
1975년 3월 2일생, 1997년 KAIST 기계공학과 졸업, 1999년 동 대학원 기계공학 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2005년 1월~2010년 6월 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원, 현재 창원대학교 기계공학과 교수.



박민원(朴敏遠)
1970년 2월 12일생, 1995년 창원대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사/공학박사), 2001년 10월~2004년 8월 한국전기연구원 차세대 초전도 응용기술개발사업단 기술팀장, 현재 창원대학교 전기공학과 부교수.



유인근(劉仁根)
1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월~1988년 2월 한국전기연구원 선임연구원 (지중송전연구실장), 현재 창원대학교 전기공학과 교수.



이상진(李相鎭)
1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



심기덕(沈基德)
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 책임연구원.



원영진(元永秦)
1959년 11월 30일생, 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1982년 KEPCO 입사, 현재 KEPCO 계통계획팀장.



황시돌(黃時玿)
1957년 1월 12일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1980년 KEPCO 입사, 현재 KEPRI 신에너지그룹 책임연구원.