

HTS SMES Application Simulation for Power Quality Simulation

김 아 룡* · 김 경 훈* · 김 진 근* · 박 민 원† · 유 인 근** ·
이 상 진*** · 박 정 도*** · 이 동 영***

(A-Rong Kim · Gyeong-Hun Kim · Jin-Geun Kim · Minwon Park ·
In-Keun Yu · Sangjin Lee · Jung-Do Park · Dong-Young Yi)

Abstract - Wind power generation system (WPGS) of Ulleung Island causes frequency and voltage fluctuation due to wind speed variation during night time. Superconducting magnetic energy storage (SMES) system can overcome the fluctuations through the fast response time of energy charging and discharging. The SMES system should be connected to the terminal of the WPGS for frequency stabilization. To demonstrated the effectiveness of SMES system for power quality improvement, Ulleung Island power network was modeled in a real time digital simulator (RTDS). The RTDS-based simulation results of power quality improvement with SMES are investigated and discussed in detail.

Key Words : Wind power generation system, Utility frequency, Superconducting magnetic energy stroage, Real time digital simulator

1. 서 론

최근 화석연료의 감소와 지구 온난화 등의 문제로 인해 신재생에너지 사용 요구가 점차 증가하고 있는 추세이다. 특히 풍력발전시스템은 높은 효율과 낮은 설치비용으로 인해 각광받고 있는 신재생에너지원 중 하나로 꼽힌다. 100% 풍력발전으로 전기를 공급받는 덴마크의 그린아일랜드인 Samsø섬과 비슷한 예로 우리나라의 울릉도가 2009년 그린아일랜드로 선포되었다. 소형풍력을 단계적으로 보급하기 시작하여 태양광, 태양열, 지열 등 신재생에너지 시설들이 차례로 도입될 예정이다. 현재 울릉도에는 2000년에 설치된 600 kW급 풍력발전기 1기가 설치되어있다. 하지만 풍속에 따라 변동하는 출력으로 인해 가동 20일 만에 정전을 일으키는 등 울릉도 전력품질 저하현상을 일으켜 가동이 중단되었다. 이러한 풍력발전의 출력변동은 계통의 전압과 주파수에 영향을 미치므로 이러한 변동을 감소시키거나 안정화시킬 수 있는 제어가 필요하다 [1-3].

본 연구에서는 계통에 연계된 풍력발전 시스템으로 인한 주파수 변동을 우리나라 주파수 규정인 60 ± 0.2 Hz 이내로 안정화시키기 위해 초전도 에너지 저장장치 (SMES : superconducting magnetic energy storage)를 고려하였다 [4-7]. 풍력출력을 안정화하기 위해 SMES는 풍력 단지의

출력 터미널부분에 설치되어 이를 보상하는 역할을 하게 된다. 전력품질 개선에 있어 SMES의 유효성을 입증하기 위한 시뮬레이션은 실시간 전력계통 시뮬레이터인 real time digital simulator (RTDS)내에서 이루어졌다. 전력품질 저하 현상과 SMES 시스템의 영향을 알아보기 위해서 울릉도 계통을 모의하였으며, 600 kW급 풍력발전 시스템의 계통 연계로 인한 계통 유·무효 전력, 주파수, 전압 등의 상태변화와 SMES 시스템의 운전 기법에 대해 소개하였다.

2. SMES 이용한 울릉도 계통 주파수 안정화

2.1 울릉도 계통 모델링

RTDS내 모의된 울릉도계통은 그림 1과 같이 2개의 디젤발전기와 2개의 수력발전기, 1개의 풍력발전기, 부하로 나뉜다 [1]. 각 발전기 사이의 선로 정수는 각 발전기들의 거리를 고려하여 나타내었으며, 발전기의 turbine은 각각의 speed droop값에 의해 governor free 모드로 동작하게 모의되었다. Speed droop값이란 발전기 2기 이상을 병렬운전시킬 때 출력에 따른 주파수 변동 특성을 나타내는 것으로, 주파수 변화에 따른 발전기의 출력 특성이 결정된다.

그림 2는 speed droop 값에 따른 주파수 변화를 나타낸 것으로, 모의된 울릉도 계통의 부하를 그림 2(a)는 0.57 kW에서 5.2 kW로, 그림 2(b)는 5.2 kW에서 0.57 kW로 변화시켰을 때 각각 주파수 변화를 나타낸 것이다. RTDS내 모의된 울릉도 계통의 각 발전기 speed droop값은 IEEE 규정에 의해 결정되었으며, 그에 따라 governor free 운전을 하게 된다 [10]. 모의된 울릉도 계통은 3상 6.6 kV로 각 발전기의 사양은 표 1에 나타내었다. 이때 speed droop값은 정상상태에서의 permanent speed droop값을 나타낸 것이다.

* 정 회 원 : 창원대 공대 전기공학과 박사과정
** 시니어회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수
*** 정 회 원 : 위덕대 공대 에너지전기공학부 교수
† 교신저자, 정회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수
E-mail: paku@changwon.ac.kr
접수일자 : 2010년 9월 13일
최종완료 : 2010년 10월 28일

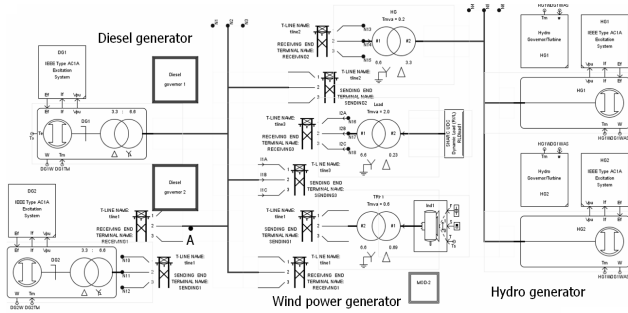


그림 1 RTDS내 모델링 된 울릉도 전력 계통
Fig. 1 Ulleung Island power network in RTDS

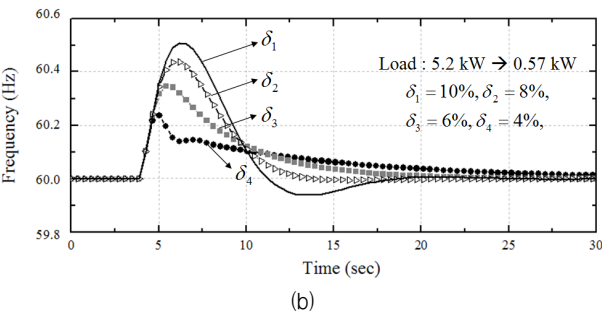
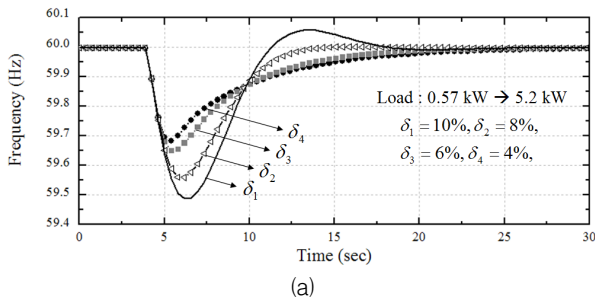


그림 2 Speed droop값에 따라 변화하는 계통의 주파수 변화 (a) 부하 증가 시 (b) 부하 감소 시
Fig. 2 Utility frequency fluctuation in different speed droop value (a) load increased (b) load decreased

표 1 울릉도 계통 각 발전기의 사양
Table 1 Facilities specifications of generators

	Rated capacity	Governor speed droop
Diesel 1	0.5 MW	8 %
Diesel 2	1.5 MW	8 %
Hydro 1	0.1 MW	5 %
Hydro 2	0.1 MW	5 %
WPGS	0.6 MW	-

RTDS내 모델링한 풍력발전기는 울릉도에 설치된 풍력발전기와 같은 농형유도발전기 (SCIG : squirrel cage induction generator)로 용량은 600 kW이다. 낮일 때 풍력발전기를 제외한 울릉도 계통의 총 용량은 평균 6.7 MW로 풍력발전기의 용량은 전체 발전기 용량의 약 9%를 차지하며, 풍속의 변화 크기는 1m/s 이내이므로 풍속에 의한 풍력

발전 출력은 울릉도 계통에 큰 영향을 끼치지 않는다. 하지만 밤일 때 풍력발전기는 표 1에서와 같이 울릉도 계통의 총 용량인 평균 2.2 MW의 약 21%를 차지하며, 풍속은 7m/s에서 12m/s로 변화한다. 그러므로 울릉도 계통의 주파수는 풍속에 의해 변화하게 되고, 이는 전압변동이나 정전 등 계통 품질 저하의 원인이 된다. 그림 3(a)는 밤일 때, 변화하는 풍속을 나타낸 것으로 이에 따라 주파수가 변동하는 것을 볼 수 있다. 또한 governor free 모드로 운전하고 있던 각 발전기들은 주파수 변동에 따라 유·무효 전력을 그림 3(b)와 그림 3(c)와 같이 출력하였다. 이때, 부하의 소비전력은 밤 시간대 울릉도 평균 소비전력인 2 MW로 모의하였으며, 시뮬레이션 동안 변화하는 풍속은 2010년 2월 2일 저녁 9시 이후 울릉도 풍속 변화를 참고하였다.

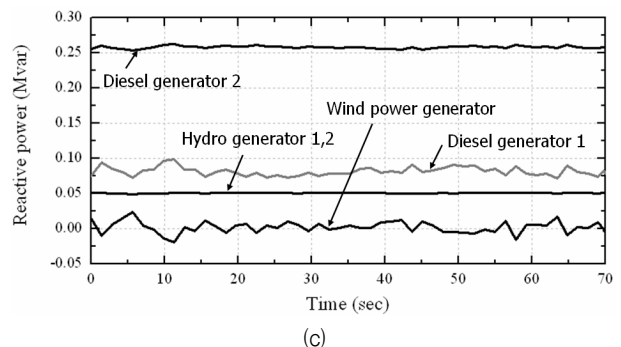
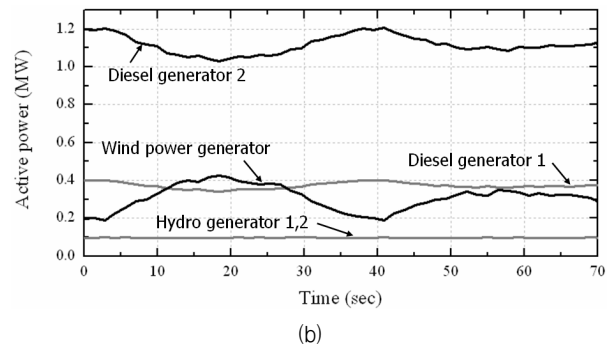
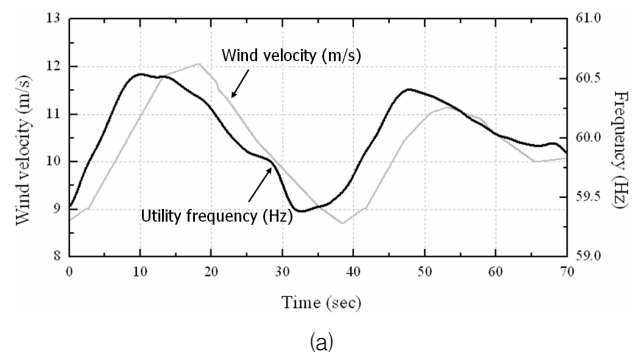


그림 3 풍속 변화에 의한 전력 계통 상태 (a) 풍속과 주파수 변화 (b) 발전기 유효 출력 (c) 발전기 무효 출력
Fig. 3 power network status according to wind velocity (a) wind velocity and frequency variation (b) active power of generators (c) reactive power of generators

2.2 SMES를 이용한 주파수 안정화 시뮬레이션

풍속에 의해 변동하는 주파수를 안정화시키기 위해, 그림 1의 A지점에 SMES 시스템을 병렬로 연결하였다. SMES는 그림 4(a)에서 나타내는 것과 같이 DC/AC converter, DC/DC chopper, Y-Δ변압기로 이루어져 있다. DC/AC converter는 계통으로부터 무효전력을 공급받아 DC link단을 일정한 전압으로 유지시켜 주는 역할을 하게 된다. DC/DC chopper는 SMES의 전류를 충·방전 하는 역할을 하게 되며 그림 4(b)에서 스위칭을 결정하는 제어 블록 다이어그램을 나타내었다. SMES가 전류 (I_{SMES})를 충·방전하게 되는 reference (I_{ref})는 풍력 발전 시스템의 출력 (P_{WG})을 low pass filter를 통과 시킨 값 (P_{G_ref})과 계통의 전력 (P_G)을 비교하여 결정하였다. 본 시뮬레이션에서 SMES 코일은 RTDS내에서 이상적인 인덕터 모델로 모의되었으며, SMES 시스템의 사양은 표 2에 나타내었다.

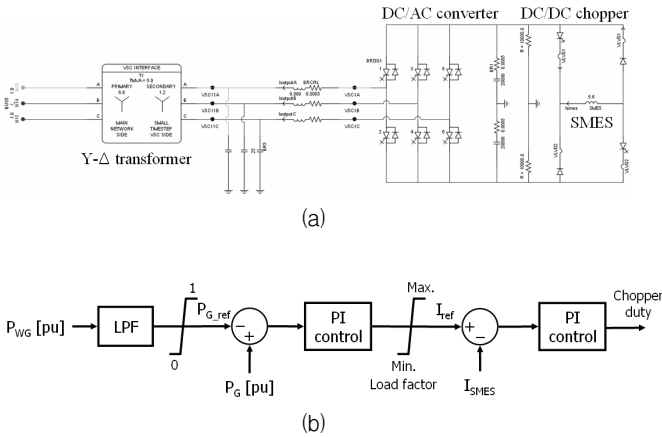


그림 4 RTDS내 모의된 SMES 시스템 (a) SMES 시스템 회로도 (b) DC/DC chopper의 제어 블록 다이어그램
 Fig. 4 SMES system in RTDS (a) circuit diagram of SMES system (b) control block diagram of DC/DC chopper

표 2 SMES 시스템의 사양
 Table 2 Specifications of SMES system

Inductance	5.6 H
Rated current	945 A
Energy capacity	2.5 MJ
DC link voltage	2 kV

SMES 시스템으로 인한 계통의 변화는 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 울릉도 계통 주파수를 나타낸 것으로 SMES 시스템이 계통에 적용되기 전과 비교했을 때 보다 훨씬 평탄한 것을 알 수 있다. 그 크기는 우리나라 주파수 규정인 60 ± 0.2 Hz를 벗어나지 않는다. 그림 5(b)는 계통의 전압 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, SMES 적용 전 계통의 전압 역시 주파수와 마찬가지로 큰 폭으로 변동하는 것을 볼 수 있으며, SMES로 인해 안정화 된 이후, 계통의 전압 변동 폭이 작아진 것을 볼 수 있다. 그림 5

(c)는 각 발전기의 유효전력 출력을 나타낸 것이다. SMES로 인해 주파수가 안정화됨에 따라 유효출력 역시 평탄한 출력을 보이고 있다.

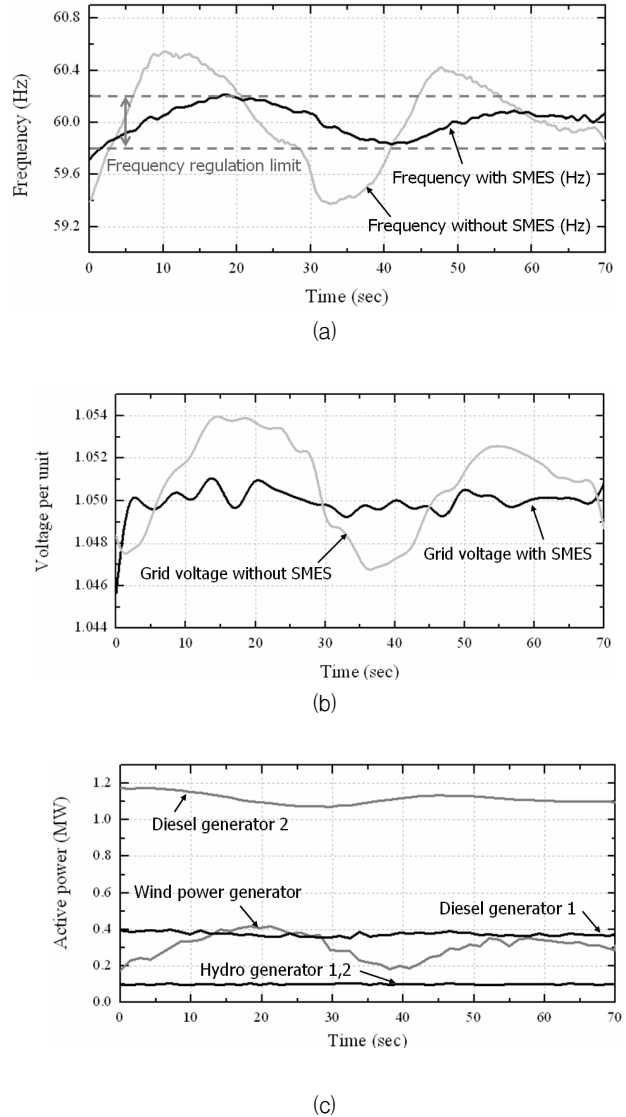


그림 5 SMES에 의한 전력계통 상태 (a) 주파수 변화 (b) 계통의 전압 (c) 발전기의 유효전력 출력

Fig. 5 Power network status by SMES system (a) utility frequency (b) utility voltage (c) active power of generators

그림 6은 주파수 안정화 시 계통에 병렬로 연결된 SMES의 전류변화와 유효전력 출력을 나타낸 것이다. 시뮬레이션된 SMES는 500 A로 초기 충전 후 제어를 시작하였으며, 이후 그림에서와 같이 주파수 안정화를 위한 SMES 전류의 지속적인 충·방전을 볼 수 있다. 그림 5와 6에서 본 시뮬레이션 결과를 통해 2.5 MJ SMES 시스템으로 풍력발전 시스템이 포함된 울릉도 계통 주파수를 충분히 안정화 시킬 수 있다는 것이 증명되었다.

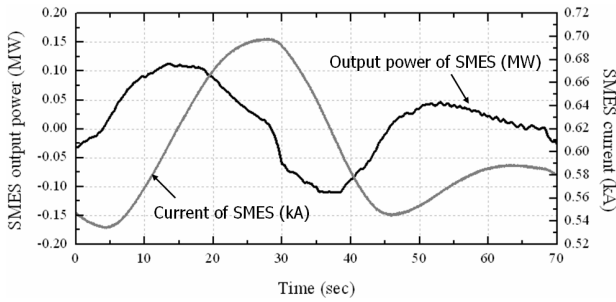


그림 6 SMES의 전류 및 유효전력 출력
 Fig. 6 Current and active power of SMES system

3. 결 론

본 논문에서는 전력 계통품질 개선을 위해 초전도 에너지 저장장치인 SMES를 이용하였다. 이를 증명하기 위해 울릉도 계통이 모델링 되었으며, 각 발전기는 speed droop값에 따라 모델링 되었다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 풍속에 의해 변화하는 풍력의 출력변화에 따라 변동하는 주파수를 안정화 하는데 SMES가 유용하다는 것이 증명되었으며, 나아가 태양광발전 단지, 풍력발전 단지 등 분산전원 시스템이 연계된 계통의 전력 품질을 개선하는데 있어 SMES가 좋은 해결책이 될 것이라 예상된다. 향후 풍력단지가 증가될 제주도를 모의할 예정이며, 이에 따른 SMES의 최적용량과 운전 기법에 대해서 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] H.Y. Jung, A.R. Kim, J.H. Kim, M. Park, I.K. Yu, S.H. Kim, K. Sim, H.J. Kim, and K.C. Seong, T. Asao and J. Tamura, "A study on the operating characteristics of SMES for the dispersed power generation system," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3 pp.2028-2031, Jun. 2009.

[2] A.R. Kim, H.R. Seo, G.H. Kim, M. Park, I.K. Yu, Y. Otsuki, J. Tamura, S.H. Kim, K. Sim, and K.C. Seong, "Operating characteristic analysis of HTS SMES for frequency stabilization of dispersed power generation system," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 1334-1338, Jun. 2010.

[3] Z. Lubosny, "Wind Turbine Operation in Electric Power Systems," Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 1st ed, Zbigniew Lubosny, pp. 132-162, 2003.

[4] A.R. Kim, G.H. Kim, K.M. Kim, J.G. Kim, D.W. Kim, M. Park, I.K. Yu, S.H. Kim, K. Sim, and K.C. Seong, "Design and manufacturing of a SMES model coil for real time digital simulator based power

quality enhancement simulation," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 1339-1343, Jun. 2010.

[5] T. Asao, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M. Kubo, Y. Matsumura, A. Kuwayama, and T. Matsumoto "Evaluation method of power rating and energy capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage system for output smoothing control of wind farm," Electrical Machines and systems, ICEMS, vol.8, pp.302-307, 2007.

[6] H.K. Yeom, S.J. Park, Y.J. Hong, D.Y. Kho, K.C. Seong, H.J. Kim and T.B. Seo, "An experiment study of the conduction cooling system for the 600kJ HTS SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.18, no.2, pp.741-744, Jun. 2008.

[7] P. Tixador, M. Deleglise, A. Badel, K. Berger, B. Bellin, J. C. Vallier, A. Allais, and C.E. Bruzek, "First Tests of a 800kJ HTS SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond.,vol.18, no.2, pp.1967-1972, Jun. 2008.

[8] L.Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE PROCEEDINGS-C, Vol.139, No.4, JULY 1992

[9] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters", IEEE Trans. on Power electronics, Vol.13, No.2, pp.315- 322, March 1998.

[10] IEEE Guide for the application of turbine governing systems for hydroelectric generating units, IEEE Standard 1207TM-2004, 2004.

저 자 소 개



김 아 룡 (金 아 룡)

1983년 7월 6일생. 2006년 국립창원대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김 경 훈 (金 慶 勳)

1982년 10월 1일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 8월 ~ 2007년 2월 한국전기연구원 신재생 에너지 그룹 위촉연구원, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김진근 (金鎭瑾)

1981년 9월 12일생. 2008년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



이상진 (李相鎭)

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 졸업, 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1996년 4월 ~ 1997년 12월 한국 고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원, 1996년 5월 ~1997년 4월 프랑스 Ecole Centrale de Lille-1,2EP 객원연구원, 2008년 7월 ~ 2009년 6월 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory 객원연구원, 1998년 3월 ~ 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



박민원 (朴敏遠)

1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월 ~ 2004년 8월 한국 전기연구원 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단 기술팀장, 2004년 9월~현 창원대학교 전기공학과 부교수



박정도 (朴正道)

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



유인근 (劉仁根)

1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월 ~ 1988년 2월 한국 전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월 ~ 현 창원대학교 전기공학과 교수



이동영 (李東映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수