초전도케이블/한류기 실계통 적용 변전소 및 설치위치 선정 기술검토

Determination of a Substation and Installation Site for applying Superconducting Cable/FCL to Real Power Grid

양병모[1,*], 원영진[2], 김병헌[3], 강지원[4], 윤재영[5], 이승렬[6], 문영현[7]

B.M Yang[1,*], Y.J Won[2], B.H Kim[3], J.W Kang[4], J.Y Yoon[5], S.R Lee[6], Y.H Moon[7]

Abstract: In attempts to closely study the effect of high efficiency, friendly environment HTS(High Temperature Superconducting) cable and SFCL (Superconducting Fault Current Limiters) on power system, several projects were carried out around the world. Promising results have been achieved in terms of cable capacity and reliability. commercial HTS cable and SFCL, however, must not only be only be feasible, but meet practical requirements as well. To facilitate the transition of HTS cable technology from the Lab. to the Real Grid, a New project for applying 22.9kV HTS cables and SFCL to the commercial Power Grid supported by Government has just started in KEPCO. Target of this project is to operate two 22.9kV, 50MVA, 150MVA HTS cables and two 22.9kV 630A, 3000A SFCL in a KEPCO Grid in order to demonstrate its reliability and stable operation.
This paper will present the technology for selecting appropriate site and its plan for installation & operating of 22.9kV HTS cables & SFCL in KEPCO Grid.

Key Words: SFCL, HTS cable, Power system.

1. 서 론

현재 전력계통시스템에서 화석연료의 고갈과 지구온난화의 심화로 인하여 고효율 친환경 에너지 공급시스템 구축의 중요성이 크게 대두되고 있으며 이러한 문제점을 해결하고자 초전도케이블과 초전도한류기가 미래 전력계통시스템의 상용화 기술로 크게 부각되고 있다. 초전도케이블은 DC 저항이 영(Zero)인 초전도선을 이용하여 기존 케이블보다 3~4배의 전력전송을 할 수 있는 차세대 미래의 친환경 대용량 송배전선로이다. 초전도한류기는 전력계통의 고장전류를 제한하는 역할을 하는 전력기기로서 고장전류 문제를 해결할 수 있는 친환경 미래기술이다. 현재 해외에서는 Table 1과 같이 초전도케이블 및 초전도한류기의 연구개발을 통한 실계통 적용 운전사례가 있다[1-4].

국내에서도 정부지원아래 2000년부터 본격적으로 초전도케이블 및 초전도한류기의 개발 및 실증시험을 통한 신뢰성 확보를 위하여 노력하였다[5]. 지금은 한국전력공사가 주도하고 LS전선이 참여하여 정부지원으로 국내 실계통 적용 가능성을 확인하기 위한 배전급 22.9kV 초전도케이블 및 초전도한류기의 실계통 적용기술개발을 위한 연구과제가 정부지원으로 착수하게 되었다[6]. 이와 관련하여 초전도케이블과 초전도한류기의 실계통 시범적용을 위한 변전소 선정이 최우선적으로 선행되어야 한다. 본 논문에서는 계통운영, 기기설치 등 다양한 관점에서 상세 기술검토를 통해서 대상 변전소를 선정하고, 초전도기기 설치위치 선정을 위한 검토를 하였고 향후 초전도케이블과 초전도한류기의 설치 및 운영방안에 대하여 기술하였다.

Table 1. Power system application of HTS cable and SFCL.

국가	미국	일본	중국	유럽
케이블	13.2kV, 34.5kV, 138kV 소규모 실계통 운전 중	66kV 개발 완료 실계통 적용 설계 단계	35kV 운전 중	50kV 6km 검토 중 (네덜란드)
한류기	110kV, 138kV 개발 중	66kV 단상('05년)	35kV 시험 중	110kV 개발 중(독일)

2. 초전도전력기기 실계통적용 계획

미래 친환경 고효율 기술로 개발 중인 초전도전력기기 중에서 국내외적으로 가장 상용화 기술에 근접하고 있는 것은 초전도케이블과 초전도한류기이다. 국내에서 초전도케이블은 한국전력공사(전력연구원), 한국전기연구원, LS전선이 중심이 되어 배전급 22.9kV 50MVA 초전도케이블 개발 및 실증시험을 완료한 상태이다. 초전도한류기는 한국전력공사(전력연구원)과 LS산전이 공동으로 22.9kV 630A급 피더용 복합형 초전도한류기를 개발하였고 2009년 실증시험을 완료할 계획이며, 22.9kV 3kA급 모선용 초전도한류기는 2010년 개발완료 예정이다. 현재는 한국전력공사의 주도 하에 기 개발된 22.9kV급 초전도케이블과 한류기를 실계통에 시범 적용을 추진하고 있으며 상세 적

[1]정 회 원 : KEPCO 전력연구원 선임연구원
[2]비 회 원 : KEPCO 부장
[3]비 회 원 : KEPCO 전력연구원 책임연구원
[4]정 회 원 : KEPCO 전력연구원 책임연구원
[5]정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원
[6]정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원
[7]정 회 원 : 연세대학교 공과대학 전기공학과 교수
*교신저자 : bmyang@kepco.co.kr
원고접수 : 2009년 08월 14일
심사완료 : 2009년 09월 02일
게재확정 : 2009년 09월 02일

용계획은 아래와 같다.

그림 1은 실 계통에 22.9kV급 초전도케이블과 한류기를 도식화 한 것으로, 초전도케이블은 50MVA 용량으로 변압기 2차측 모선에 약 500m길이로 설치되고, 초전도한류기인 경우 630A은 부하선로에 설치하고 3kA는 변압기 2차측 모선에 초전도케이블과 직렬로 설치할 계획이다.

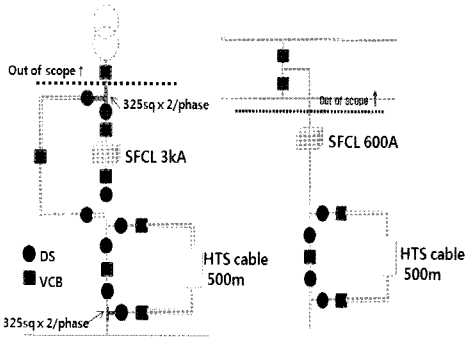

Fig. 1. One-line diagram of HTS cable/FCL application system.

그림 2는 초전도케이블과 초전도 한류기의 설치 및 관리의 용이성을 위해 배전반의 형태로 구성하였다. 초전도케이블의 연결부위는 154kV 주 변압기 2차측 개폐기(CB) 후단에서 22.9kV 모선 전단 사이에 연결하였고, 초전도한류기 피더형인 경우, 22.9kV 부하선로(D/L) 연결하고, 모선용 초전도한류기는 154kV 변압기 2차측 개폐기(CB) 후단에서 22.9kV 모선 전단에 설치하였다.

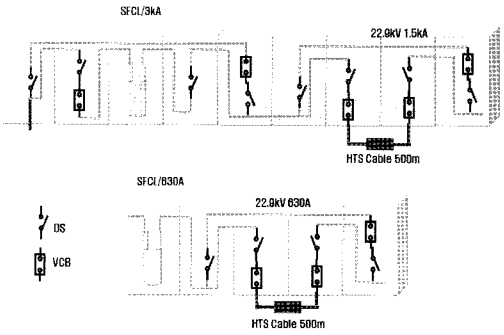

Fig. 2. Distributing board concept of HTS cable/FCL application system.

그림 3은 실 계통 적용을 위한 운영자 중심 인터넷 기반 모니터링시스템 구축을 표현한 것으로 초전도기기 실 계통적용시 발생할 수 있는 제반사항들을 SCADA연계를 통해 감시 및 제어할 수 있도록 구성하였다.

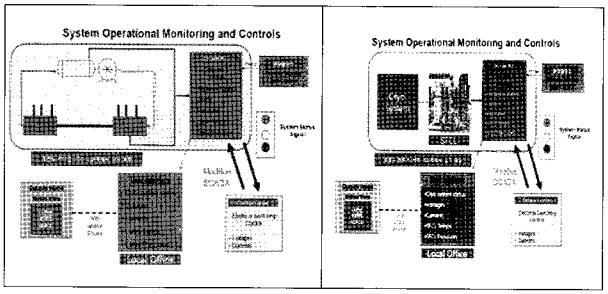

Fig. 3. Concept of monitoring system.

3. 초전도기기 실계통 적용 변전소 선정

3.1. 1차 후보변전소 선정

초전도케이블 및 초전도한류기의 실계통 적용 후보변전소 선정을 위해서는 다양한 관점에서 상세 검토기준이 필요하다. 본 연구를 위해서 고려할 수 있는 선정기준은 아래와 같다.

○ 변전소 형태 : 옥외철구/옥외GIS & 유인 변전소
- 유인변전소 기준
  · 유인변전소 : 초전도기기 설치 및 비상시 유지보수관리 측면 유리
  · 무인변전소 : 사고대응 불리 → 후보대상 제외
- 옥외철구/옥외GIS 변전소 기준
  · 옥외철구/옥외GIS 변전소 : 초전도전력기기 설치 유리
  · 옥내/지하GIS 변전소 : 초전도전력기기 설치공간 확보 불가능 → 후보대상 제외

○ 부하량 : 최대부하 100MVA 이상
- 변전소 전체 최대부하 100MVA 이상, 변압기 1뱅크 당 최대부하 35MVA 이상 (50MVA 초전도케이블 부하전류 70% 이상 통전 가능 수준)
- 주 변압기 3뱅크 이상 (사고/복구시 부하절체 가능 수준)

○ 여유 부지: 기기설치 공간 확보가능(도면검토)
- 초전도케이블(500m) 포설 및 냉각시스템 설치

○ 접근성 : 서울 ~ 대전 인근
- 초전도전력기기 유지보수 및 긴급복구 가능

○ 부하특성 : 주요부하 제외 → 고장파급영향 小
- 부하특성 고려 → 도심/공단 지역 제외
- 가능한 고장파급영향이 작은 부하 위주

본 연구에서는 상기 기준에 따라서 1차적으로 국내 154kV 변전소 682개소(2009년 3월 현재)에 대한 기본 검토를 수행하였다. 그 결과 총 682개소의 154kV 변전소 중에서 1차 후보변전소 4개소(성거, 용인, 성남, 이천)를 선정하였다. 2009년 이전에 말단변전소 관점에서 적용후보변전소로 거론되던 의성변전소는 부하수준이 약 61MW로서 상기 100MVA 부하조건을 만족하지 못하여 50MVA급 초전도케이블 시범적용에는 적합하지 못하며, 500m의 케이블 설치 및 냉각제어동 건설을 위한 부지가 상대적으로 협소하기 때문에 1차 후보변전소에서 제외가 되었다.

3.2. 1차 후보변전소 상세 기술검토

1차로 선정된 후보변전소 4개소(성거, 용인, 성남, 이천)에 대해서, 상기 선정기준 검토를 포함한 현장검토를 통해서 심도 깊은 기술검토를 실시하였다. 특히, 변전소 운영관점과 초전도케이블/한류기 운용효과 및 설치관점에서 아래와 같은 고려사항을 중점적으로 검토하였다.

○ 초전도케이블/한류기 운용효과 관점
- (초전도케이블) 50MVA 통전특성 고려
  : 50MVA 초전도케이블 부하전류 70% 이상 통전 가능 수준
- (초전도한류기) 고장전류 제한특성 고려
  : 154kV 모선 고장전류 20kA 이상

: 22.9kV 모선 고장전류 7kA 이상

○ 변전소 운영관점
- 초전도기기 고장시 Back-up 설비로 자동이체
- 유지보수측면에서 부하절체 가능 여부
- 초전도기기 리드선 길이 최소화
- 23kV측 중요부하선로 측면에서는 도심 및 공단 집중 지역 검토
- 변압기와 초전도전력기기의 연결공사를 위한 휴전작업일 고려

○ 초전도 케이블/한류기 설치관점
- 모선절체 및 초전도전력기기 연결을 위한 모선변경 공사 측면 → 옥외철구형보다 옥외 GIS가 용이함
- 설치공간, 시공성, 자재운송, 유지보수 측면
- 초전도케이블 단말, 냉각동, 제어실 등 기기 및 부대시설 설치공간
- 초전도케이블 포설 및 시공 고려; 관로설치 등
- 피더용 초전도 한류기 설치를 위한 공간
- 자재수송 용이성 및 공사용 중장비 공간
- 냉동설비 전원 확보

상기 초전도기기 운용효과 및 변전소 운영관점에서 상세 검토한 내용을 요약하면 아래와 같다.

○ 50MVA급 초전도케이블 70% 이상 부하전류 통전능력을 감안할 때, 용인변전소와 이천변전소가 가장 유리하다.

○ 초전도한류기 고장전류 제한관점에서는 고장전류가 클수록 유리한데, 이를 고려할 때 성거, 용인, 이천변전소가 적합하다.

○ 초전도전력기기 고장시 백업설비로 자동전환이 가능하도록 구성하고, 가능한 순간정전까지 방지할 수 있는 방안을 강구해야 한다.

○ 변전소 운영측면에서는 비상시 및 유지보수시 주변압기 1뱅크를 계통에서 분리(휴전)할 경우, 최대부하율이 모든 변전소에서 100%가 되지 않으므로 최대부하관점에서 부하절체에 큰 문제는 없을 것으로 예상된다.

○ 모선절체작업 측면에서는 성거, 성남는 23kV측이 옥외철구형으로 부하 절체시 단로기 조작 등의 어려움이 예상된다. 특히, 성거변전소는 변전소 공간 협소로 BUS-SEC 차단기가 일부만 있어 곤란한데, 이는 고장복구 측면에서도 매우 취약함을 의미한다. 용인, 이천변전소는 GIS로 모선절체에 큰 어려움이 없기 때문에 유리하다.

○ 중요부하 측면에서는 도심에서 떨어져 있으며 공단 집중 지역이 아닌 이천변전소와 용인변전소가 가장 유리하다.

○ 변압기와 초전도 전력기기 측의 연결시 각 변전소의 최대부하시기를 피하여 연결이 가능하도록 설치시기를 고려할 필요가 있다.(휴전작업일-2일 고려)

○ 기타사항으로 성남변전소는 2011년에 인근의 사택과 유휴부지를 활용하여 옥내변전소를 건설하고 옥외철구형 변전소를 철거할 계획이 있어 향후 활용성 부분에서 불리하다.

초전도케이블/한류기 설치공사 관점에서 고찰사항은 아래와 같다.

Table 2. Comparative investigation for substation and HTS devices operation.

항목 \ 변전소			성거	용원	성남	이천
최대부하현황('08년)			152.3MW	247.9MW	178.2MW	219.7MW
변압기 Bank/용량			4 Bank 240MVA	6 Bank 360MVA	5 Bank 300MVA	5 Bank 300MVA
1뱅크당 부하			38.1MW	41.3MW	35.6MW	43.9MW
1Bank 고장시 부하(율)			50.7MW (84.6%)	49.6MW (82.6%)	44.5MW (74.2%)	54.9MW (91.5%)
중요부하			공장부하多	에버랜드	도심부하	도시외곽
고장전류	154kV 3상단락		20.3 kA	25.5 kA	14.8 kA	25.8 kA
	22.9 kV모선	3상단락	7.2 kA	7.25 kA	7.04 kA	7.25 kA
		1선지락	6.74 kA	6.76 kA	6.62 kA	6.76 kA
기술적 문제점			고장복구 매우취약	-	2011년 옥내GIS화	-
변압기 NGR 유무			有	有	有	有

○ 초전도케이블 단말, 냉각동, 제어룸 등 기기 및 부대시설 설치 공간 확보 측면에서 이천변전소가 가장 유리하며, 용인변전소도 어느 정도의 공간확보가 가능하다. 성거변전소는 공간 확보가 불가능하며, 성남변전소는 성거변전소보다는 상대적으로 약간의 여유 공간이 존재하지만, 초전도기기 설치하기에는 공간이 협소하다.

○ 초전도케이블용 관로확보 공간 측면에서는 부지가 넓고 여유 공간이 많은 이천변전소가 가장 유리하다. 타 변전소는 케이블 설치를 위한 루트확보공간이 협소하여 불리하다.

○ 배전선로용 초전도한류기 설치공간 측면에서 보면 옥외철구형 설비가 설치된 성거, 성남변전소가 유리하며 GIS가 설치된 개소가 불리하다. 그러나, 이천변전소는 변전소 여유 공간 측의 울타리에 배전선로 인출 입상주가 있어 입상 주를 활용하여 연결을 용이하게 할 수가 있다.

○ 냉동기 전원확보 측면에서는 성남변전소 이외에는 추가 전원확보 방안을 강구해야한다.

○ 자재수송 용이성 및 공사용 중장비 공간 확보측면에서는 이천변전소가 가장 유리하다. 성남변전소는 도심지를 통해야하고, 용인변전소는 진입로가 협소하며, 특히 변전소 내 여유 공간으로 진입하기위한 공간이 약 3m 이하로서 자재수송 및 중장비 진입에 어려움이 있다. 성거변전소는 전체적으로 진입공간이 협소하다.

3.3. 최종 후보변전소 선정

상기 기술검토결과를 바탕으로 1차 후보변전소의 우선순위를 정하면, (1순위)이천변전소, (2순위)용인변전소 (3순위)성남변전소, (4순위)성거변전소, 순이다.

결론적으로, 이천변전소가 변전소 전체 부하관리 부분에서는 다소 불리한 면이 있으나, 다른 부분에서는 최상의 조건을 가졌으므로, 최종 후보변전소로 선정하였다.

Table 3. Comparative investigation for installation of HTS cable/FCL.

항목 \ 변전소명		성거	용인	성남	이천
설치공간 (15m×14m)		X	○	△	◎
케이블 Route 전력구 /관로	기시설활용	X	△	△	△
	추가 건설	X	X	X	◎
냉동기전원 확보 (200kW+α)		X (150kW)	X (150kW)	○ (300kW)	X (150kW)
자재수송 용이성		○	△ 진입로협소	△ 도심외치	◎

*) ◎ : 매우유리, ○ : 유리, △ : 보통, X : 불리

4. 초전도기기 적용대상변압기 및 피더선정

4.1. 초전도케이블 적용대상 변압기 선정

초전도케이블 적용을 위한 변압기 선정을 위해서 우선적으로 고려할 사항이 중요부하 연결여부와 설치공간이다. 각 관점별로 대상변전소 선정을 위한 고찰을 하면 아래와 같으며, 잠정적으로는 이천변전소 내 #5 주변압기를 적용대상 변압기로 선정한 상태이다.

○ 중요부하 최소 연결 변압기
- 중요고객의 민원을 최소한으로 하기 위해서는, 가능한 공장 등의 중요부하가 연결되어 있지 않은 주변압기(M.Tr)를 선택해야 한다. 그러나, 현재 이천 변전소 내 모든 M.Tr에 중요부하가 존재한다.
- 따라서, 주변압기별 배전선로(D/L)를 재배치하여 가능한 해당 M.Tr에 중요부하가 적게 연결이 되도록 하는 것이 바람직하다.

○ 초전도기기 설치 유리한 변압기 : #5 M.Tr
- 변압기와 초전도기기 간 설치거리가 가까워야지만 리드선이 짧아지고, 리드선 사고발생 가능성이 작아진다.
- 초전도케이블 단말 및 부대설비(냉각/제어설비 등)의 설치공간 확보가 유리한 변압기를 선정해야 한다.
- 상기 설치측면에서의 고려할 사항을 검토한 결과, 이천 변전소 내에서는 대상변압기로서 #5 M.Tr이 가장 유력할 것으로 판단된다(Fig.4).

4.2. 초전도한류기 적용피더 선정

초전도한류기 적용을 위한 피더 선정을 위해서는 아래와 같이 몇 가지 고려사항들이 있다. 아래 고찰사항을 토대로 현재로서는 진가D/L이 유력한 후보로 거론되고 있으나 아직 확정되지는 않은 상태이다.

그림 4는 인천변전소 전경을 나타낸 것이다. 주변압기와 초전도케이블 및 초전도 한류기의 실제설치장소와 초전도케이블의 설치경로를 사진에서 나타내고 있다.

○ 기기설치/운전 관점 : 타 설비와 가까운 위치 유리
- 현재 초전도한류기의 설치방안으로서, 전주로부터 리드선을 설치하여 한류기와 연결하는 방안을 고려하고 있다.
- 이 때, 초전도한류기 설치/운전 측면에서 (변압기~전주) 간 거리가 짧고 기타 초전도관련 설비와 가까운 것이 유리하다.

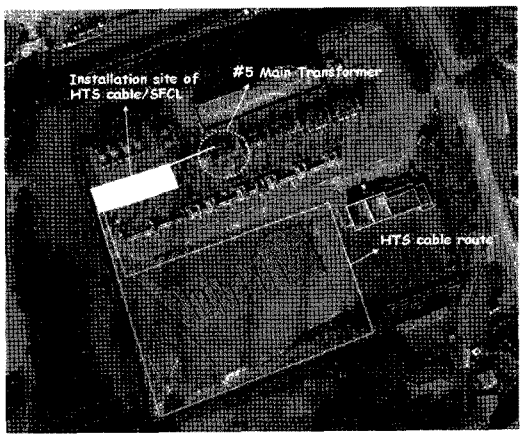

Fig. 4. Icheon substation.

○ 전위 보호기기 少 / 多 → 가능한 적은 것이 유리.
- 초전도한류기가 기존 보호시스템에 주는 영향을 확실하게 확인하고 문제발생시 대안을 제시하기 위해서는, 배전선로의 보호시스템이 가능한 단순한 것이 유리하다.

○ 구별 거리 短 / 長 → 가능한 긴 것이 유리.
- 보호협조 측면에서는 보호기기 간의 거리가 큰 것이 유리하다.

○ 케이블 / 가공선로 → 가공선로가 많은 피더 유리
- 다양한 계통고장(3상단락, 1선지락 등) 및 배전선로의 재폐로동작에 대한 초전도한류기의 대응동작을 확인하기 위해서는 가공선로가 많은 피더(가공비율이 최소 70% 이상)가 유리하다.

○ 부하배분 / 중요도
- 민원의 최소화를 위해서는 중요부하가 적은 피더가 유리하다.

○ 고장빈도수 : 고장이력 데이터 활용
- 초전도한류기의 고장전류 제한능력 시험을 위해서는 고장빈도수가 높은 피더가 유리하다.

5. 결 론

초전도전력기기 실계통적용을 위한 후보변전소 선정을 위하여 변전소 운영관점과 초전도 케이블/한류기의 적용관점에서 최종 검토한 결과 경기도 이천변전소가 최종 후보변전소로 선정되었다. 또한, 잠정적으로 이천변전소 내 초전도기기 적용대상 변압기로는 #5 주변압기로 선정하였으며, 초전도한류기 적용피더로는 아직 상세검토 중에 있으나 진가D/L이 가장 유력한 후보로 거론되고 있다. 피더선정까지 완료가 된 후, 변전소 상세 계통설계를 진행하고, 변전소 모선변경공사 및 기타 연구를 진행할 계획이다. 향후 2013년까지 이천변전소에서 배전급 초전도케이블 및 초전도한류기의 설치, 운전, 성능 평가를 통하여 미래 전력계통시스템의 초전도전력기기에 대한 상용화 가능성을 국내외적으로 널리 알릴 수 있는 좋은 기회라고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 프론티어사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 2008 미국 DOE (Department of Energy) peer review 자료.
[2] 초전도응용기술개발사업단, "초전도케이블 적용가능성 분석" 2006.
[3] 초전도응용기술개발사업단, "초전도한류기 적용가능성 분석" 2006.
[4] Proceeding of 8th Annual EPRI Supercond -uctivity Conference, Nov. 2008.
[5] Kang-Sik Ryu, "Overview of the Development of the Advanced Power System by the Applied Superconductivity Technologies Programme in Korea", Supercond. Sci. Tchno., Vol.19, pp.102-108, 2006.
[6] "초전도 전력기기 실계통 운영기술 개발과제 착수회의", 전기신문, 2008.12.

저 자 소 개

양병모(梁炳模)
1969년 4월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 1997년 KEPCO 전력연구원 입사, 현재 KEPCO 전력연구원 선임연구원.

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

김병헌(金炳憲)
1963년 8월 22일생, 1985년 건국대 공대 전기공학과 졸업, 1985년 KEPCO 입사, 현재 KEPCO 전력연구원 책임연구원.

강지원(姜地原)
1965년 1월 6일생, 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기공학 졸업(공학박사) 현재 KEPCO 전력연구원 책임연구원.

윤재영(尹在暎)
1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1994년 기술사 (발송배전), 1998년 동 대학원 전기공학 과 졸업(공박), 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터 책임연구원.

이승렬(李昇烈)
1975년 9월 23일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터 선임연구원.

문영현(文永鉉)
1952년 3월 11일생, 1975년 서울대 공대 전기학과 졸업, 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1983년 Oregon State Univ. 대학원졸업(공박), 현재 연세대 공대 전기전자공학과 교수.