

초전도기기를 적용한 미래 저압대용량 신 배전계통

Future New Distribution System with Low voltage and Mass Capacity using HTS equipments

윤재영*, 김종율**, 이승렬***

Jae Young Yoon*, Jong-Yul Kim**, Seung Ryul Lee***

Abstract: This paper describes the construction scheme of new distribution system using HTS(High Temperature Superconducting) power equipments such as cable, transformer and FCL(fault current limiter). At present, one of the most serious problems in distribution power system, especially for metropolitan complex city, is to obtain the ROW for cable line routes, space for downtown substations and satisfy the environmental protection caused by NIMBY phenomena. Unfortunately, it is expected that this situation will get more and more worse. As the HTS technology to apply in power system is developed, HTS cable utilizing mass-capacity characteristic can be a useful countermeasure to overcome this problem. This paper describes the application methodology of 22.9kV HTS cable with low-voltage, mass-capacity characteristics replacing the 154kV conventional cable. By applying 22.9kV HTS cable, the HTS transformer with higher capacity for the reduction of space and transformer numbers of downtown substation is necessary. Also, if the leakage impedance of HTS transformer is same as or lower than that of conventional transformer, the fault current of 22.9kV bus will increase because the HTS transformer capacity is larger than that of the conventional transformer. This means the parallel application of HTS-FCL to reduce the fault current in addition to the HTS cable and transformer can be necessary. With the basic construction scheme of new distribution system, this paper describes the future study points to realize this new distribution system using HTS equipments.

Key Words: HTS cable, HTS transformer, HTS-FCL, distribution system.

1. 서 론

수도권 혹은 신도시 지역은 타 지역에 비해 부하밀도가 지극히 높으므로, 도심내부에 있는 대부분의 송

배전계통은 지중선로와 옥내 GIS 변전소로 건설되고 있다. 국내 장기 계통계획에 따르면, 향후 2015년까지 지속적인 부하성장이 예상되며, 이에 따라 추가적인 지중선로 포설과 변전소 건설이 필요하다[1]. 하지만, 지중선로와 변전소 건설에 따른 도심교통난과 과도한 건설비용 및 NIMBY 현상으로 인한 환경적 측면의 제약이 크다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로서 옥내/지하 GIS 변전소 건설확대, SF6 변압기 도입, 지중송전선로 건설 확대 등 다양한 대안이 있지만, 1990년대 이후 본격적으로 개발되기 시작한 고온초전도(High Temperature Superconducting : HTS) 케이블의 도입은 다양한 기술적 대안 중에서 환경성, 경제성, 기술성 관점에서 가장 유력한 대안으로 평가받고 있다[2].

기존에 발표된 초전도전력기기의 계통적용에 관한 자료는 동일 전압계급의 상전도 기기를 대체하는 개념이며, 개별 전력기기별로 계통적용 방안이 독립적으로 연구가 되었다[3-5]. 그러나 본 논문에서는 대도심 고밀도 부하에 대한 안정적인 전력공급을 위한 미래 대안으로서 저압, 대용량 초전도케이블을 활용하고 이와 함께 초전도변압기와 초전도한류기 등 종합적인 초전도 전력기기의 병행 적용을 가정한 신 배전계통의 구성방안을 제안하였다. 그 내용은 154kV 상전도케이블을 동일 용량의 22.9kV 초전도케이블로 대체하고, 이와 더불어 변전소 부지확보와 고장전류 감소를 위해서 각각 초전도변압기 및 초전도한류기를 병행 적용하는 것이다. 이와 같은 방안을 적용할 경우, 도심내부의 지중케이블 경과지 확보와 154kV 변전소를 22.9kV 개폐소로 전환함으로써 사회, 경제적으로 막대한 이익을 향유할 수 있는 장점을 가질 것으로 예상된다. 또한, 초전도변압기와 초전도한류기를 병행 적용함으로써 환경측면과 계통기술적인 관점에서 전력공급 신뢰도 향상을 기할 수 있을 것으로 분석된다.

2. 초전도적용 신 배전계통 기본구성

본 논문에서 기술하는 초전도적용 신 배전계통은 대도심 내부의 고밀도 집적부하에 대한 경제적, 친환경적, 안정적인 전력공급을 위하여 초전도전력기기를 적용한 저압, 대용량 방식의 배전계통을 의미한다. Fig.1은 미래 저압대용량 방식 신 배전계통의 기본 구성을 표현한 것이다. 기본내용은 도심부 전력공급의 사회적, 경제적, 환경적 측면의 효율성 제고를 위하여 초전도케이블, 초전도변압기, 초전도한류기 등 세 가지 유형의 초전도전력기기를 병행 적용하는 것이다. 이러한 신 배전계통의 기본 구성은 도심부내의 말단 154kV 변전소로부터 시작하여 단계별로 그 범위가 확장될 것

* 정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원

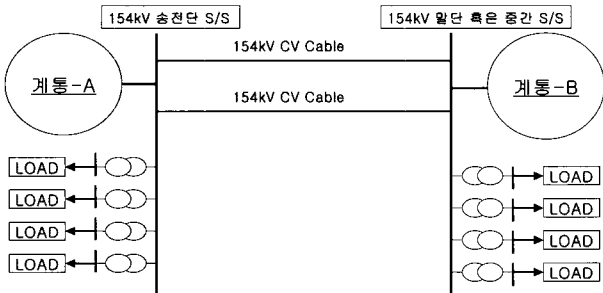
** 정 회 원 : 한국전기연구원 연구원

*** 정 회 원 : 한국전기연구원 연구원

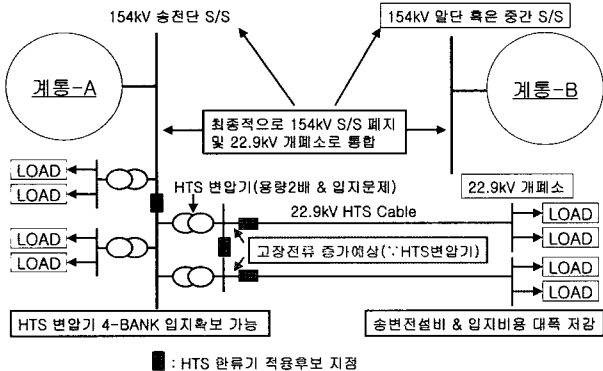
원고접수 : 2005년 1월 17일

심사완료 : 2005년 2월 15일

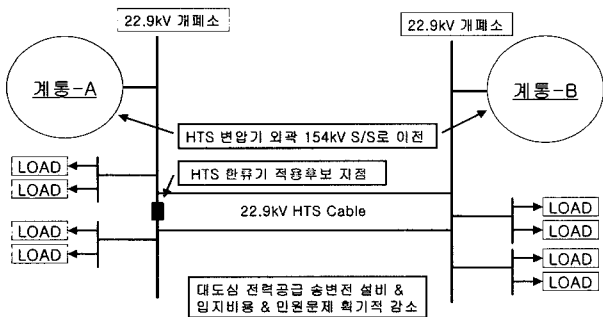
으로 예상된다. 이러한 신 배전계통의 구성내용은 도심내부 전력공급의 페르다임이 변경되는 큰 사안으로 판단되지만, 현실적으로 도심내부의 모든 154kV 변전소를 일시에 22.9kV 개폐소로 변환하는 것은 불가능하다. 따라서 점진적인 단계별 개략 적용방안이 고려되어야 하며[6], 본 논문은 여기에서 더 나아가 초전도변압기와 한류기를 포함한 초전도전력기기의 병행적용방안을 제시한 것이다. 중국적으로 초전도 전력기기가 적용되는 신 배전계통은 22.9kV 양단 선로로부터 수전받는 형태가 되므로 전력공급 신뢰도가 기존 배전계통보다 증가하는 장점을 지니고 있다.



(A) 154kV conventional power system structure in downtown.



(B) Middle stage structure of new distribution power system in downtown.



(C) Final structure of new distribution power system in downtown.

Fig. 1. Basic structure of new distribution powersystem using HTS power devices.

3. 22.9kV 저압, 대용량 초전도케이블 적용

22.9kV 저압, 대용량 초전도케이블 적용은 기존 혹은 신설예정인 154kV 상전도케이블을 동일 용량의 22.9kV 초전도케이블로 대체하는 것이다. 초기단계에서는 154kV 말단변전소부터 순차적으로 적용하며, 점차적으로 인근변전소를 포함하여 적용범위를 확장시킨다. 22.9kV 저압대용량 초전도케이블을 적용할 경우 중국적으로 도심부내의 154kV 변전소는 154/22.9kV 주변압기가 없는 22.9kV 개폐소로 변환된다. 즉, 도심부의 전력공급은 외곽지역의 154kV 변전소에서 22.9kV 초전도케이블이 담당하게 된다. 미래 배전계통이 이와 같은 전력공급 구조를 가질 경우 아래와 같은 사회적, 경제적, 환경적 이익이 발생할 것으로 예상된다.

- (154kV 변전비용 감소)

도심 154kV 변전소를 22.9kV 개폐소로 변환하면 변전소 부지비용과 모선, PT/CT, 피뢰기, 계전기 등 154kV 변전비용을 획기적으로 저감시킬 수 있다.
- (154kV 송전비용 감소)

도심부의 기존 관로 혹은 전력구와 같은 지중선로 경과지에 더 많은 회선의 케이블을 포설할 수 있으며, 이에 따라서 도심부의 지중송전 가능용량이 증가된다. 즉, 지중선로 경과지 건설에 소요되는 토목공사비와 이로 인한 교통체증 등 사회, 경제적 비용이 감소된다.
- (민원 및 환경측면 이익)

도심내부 154kV 변전소 부지확보의 어려움과 소음, 전자파 등 다양한 민원이 적어지며, 친환경적인 전력공급 체계를 구축할 수 있다.

실제 한전 계획계통에 대하여 적용 대상선로와 변전소를 선정할 때 기술적인 관점에서 고려해야 하는 기준을 다음과 같이 구상하였다.

- (적용시기 및 대상) 2010년 이후 한전 계획계통

154kV 상전도케이블과 동급 용량의 22.9kV 초전도케이블은 최소 200MVA이상의 용량을 가져야 한다. 적용대상을 선정할 때 22.9kV, 200MVA급 초전도케이블의 개발시점, 실 계통적용에 따른 제반 엔지니어링 검토기간과 지중선로 건설에 소요되는 시간을 감안해야 한다. 따라서, 154kV 상전도케이블을 대체하는 22.9kV 저압, 대용량 초전도케이블의 적용시기를 2010년 이후 한전 계획계통으로 하는 것이 합리적이다.
- (말단 수전선로) 단일 154kV 변전소로부터 수전하는 말단 154kV 변전소

말단변전소라도 2개 이상의 외곽 154kV 변전소에서 수전하는 경우, 1개 선로만 저압, 대용량화하는 경우 조류재배분에 따른 불평형 문제가 발생할 수 있다. 따라서 최초로 적용하는 대상은 외곽의 단일 154kV 변전소로부터 수전하는 말단 변전소의 지중선로를 대체하는 개념으로 적용한다. 그러나 해당 선로 전체를 대체하는 경우라면, 양 변전소를 연결하는 선로의 회선수와는 무관하게 적용할 수 있다.

○ (관로증설이 요구되는 계획 선로)

적용대상으로서 가능하면 선로회선 증설을 위해서 기존 지중선로 경과지외에 관로 증설이 요구되는 계획 선로가 바람직하다. 그 이유는 초전도케이블은 동일 용량의 상전도케이블에 비해 외경이 작아서 기존 관로에 포설할 수 있는 회선수가 증가하기 때문이다. 이는 초전도케이블의 적용에 따른 토목 공사비 절감 등 경제적인 이득을 극대화하는 효과를 나타낸다. 현재 국내에서는 OF 2000[mm] 및 CV 2000[mm] 케이블을 1공 1조 방식으로 관로 내경 200[mm]에 포설하고 있다. 향후 개발될 200MVA급 22.9kV 초전도케이블의 사양을 현 단계에서 확정적으로 언급할 수는 없다. 하지만, 개략적인 검토에 따르면 200[mm] 관로 내경 내부에 1공 3조 포설이 가능할 것으로 예상되어진다[7].

○ (주변압기 3대이상 154kV 변전소)

최소 부하용량이 154/22.9kV 60MVA 주변압기 3 BANK 이상인 말단 변전소를 선정한다. 이는 22.9kV 초전도케이블의 용량을 200MVA급으로 하는 것과 일치시키는 것이며, 대부분의 도심 내부 변전소가 해당되는 사항으로 판단된다.

○ (대상선로 길이)

저압, 대용량 초전도케이블 적용에 따른 사회, 경제적 이득을 극대화하는 관점에서는 장거리 지중선로를 대상으로 하는 것이 바람직하다. 하지만, 적용 초기단계에서의 설비관리에 따른 경험습득과 발생 가능한 문제를 고려할 경우 단거리 선로부터 단계적으로 적용하는 것도 한 가지 방안이 될 수 있다.

○ (초기단계 적용 곤란 경우)

T분기 선로 혹은 지중/가공 혼재계통에서는 위치에 따라서는 154/22.9kV 변압기 적용이 현실적으로 곤란할 수 있다. 따라서 적용 초기단계에서는 이러한 위치에 대한 적용은 일단 배제하도록 한다.

2010년 이후 한전 계획계통에 대하여 위와 같은 기준을 적용하여 대상 선로와 변전소의 1차 후보지를 열거하였으며, 이를 검토하여 향후 최종 후보지를 선정할 수 있다. <Table 1>은 적용대상 후보를 나타낸 것인데, 구체적인 선로명칭은 생략하였으며, 계통계획상에 반영되어 있는 지중선로 회선사양, 변전소 사양, 투자비 및 준공 예정시기를 기술하였다.

4. 154/22.9kV 대용량 초전도변압기 적용

저압, 대용량 방식의 22.9kV 초전도케이블을 적용하면, 대도심에 위치한 기존 혹은 신설예정인 154kV 변전소는 22.9kV 개폐소로 변경된다. 대신에, 대도심 154kV 변전소에서 사용 중이거나 신설예정이던 154/22.9kV 주변압기는 외곽 154kV 변전소로 이동시켜야 한다. 이 경우 외곽 154kV 변전소에 주변압기를 설치할 수 있는 추가적인 입지가 확보되어 있어야 한다.

다. 보통 154kV 변전소에는 Bank당 60MVA 주변압기가 최대 4-Bank까지 설치되어 있다. 따라서 22.9kV 개폐소로 변환되는 말단변전소의 주변압기까지 추가될 경우 기존 변전소로서는 부지가 없어서 설치가 불가능할 수 있다. 따라서 기존 변전소의 입지를 효율적으로 사용하고, 초전도케이블의 대용량화를 감안할 경우 154/22.9kV 초전도변압기의 적용을 고려해야 한다. 만약, 외곽 154kV 변전소에서 60MVA 상전도 주변압기를 120MVA 초전도변압기로 대체하는 경우, 말단변전소의 주변압기가 추가되더라도 전체적인 변압기 입지는 더 적어질 것으로 예상된다. 154kV 초전도변압기의 용량은 기존 상전도 변압기의 2배인 120MVA, 누설임피던스는 12% 이하가 될 것으로 예상된다. 본 경우는 Fig.1-(B)에서 외곽 154kV 변전소에 설치되어 있는 초전도변압기를 예로 들 수 있다.

Table 1. Expected site for application of 22.9kV HTS cable (200MVA).

선로명 (From-To)	회선/사양	투자비	준공시기
A-B	CV 2000(2C/2C) 1.0km	케이블 16.25억, 터널식 80.0억	2012년
A S/S	육내GIS 60M×2	변전 58.0억, 토건 40.0억	2012년
T분기-C	CV 2000(8C/4C) 0.5km	케이블 32.5억, 개착식 25.5억	2012년
C S/S	육내GIS 60M×2	변전 58.0억, 토건 40.0억	2012년
T분기-D	CV 2000(4C/4C) 1.5km	케이블 97.5억, 터널+개착 182억	2015년
D S/S	육내GIS 60M×2	변전 58.0억, 토건 40.0억	2015년
T분기-E	CV 2000(2C/4C) 0.5km	케이블 16.25억, 개착식 51.0억	2015년
E S/S	육내GIS 60M×2	변전 58.0억, 토건 40.0억	2015년
F-G	CV 1200(2C/2C) 2.0km	케이블 26.0억, 터널식 160.0억	2009년
G S/S	육내 GIS 60M×2	변전 55.93억, 토건 40.0억	2009년
H-I	CV 1200(2C/2C) 2.0km	케이블 26.0억, 터널식 160.0억	2008년
I S/S	육내 GIS 60M×2	변전 55.93억, 토건 40.0억	2008년
J-K	CV 1200(2C/2C) 2.0km	케이블 26.0억, 터널식 160.0억	2009년
K S/S	육내 GIS 60M×2	변전 55.93억, 토건 40.0억	2009년
L-M	CV 1200(2C/2C) 2.0km	케이블 26.0억, 터널식 160.0억	2009년
MS/S	육내 GIS 60M×2	변전 55.93억, 토건 40.0억	2009년
신도시지역			향후검토

*1) 2000(2C/2C) : 선중 2000[mm](해당선로 포설계획회선/포설 가능회선)
 *2) 변전소 준공은 토건과 변전을 합하여 대략 2년 소요
 *3) 지중선로 공사는 공사형태(터널식, 개착식, 관로식), 길이와 주변 환경에 따라서 다르며, 대략 1~3년이 소요됨.

5. 22.9kV 초전도한류기 적용

현재 국내 배전계통에서 차단기의 차단용량은 25kA 인데 비하여, 최대 고장전류는 10kA 미만이다. 미래 배전계통에서 분산전원의 적용이 증가하고, 공급신뢰도 향상을 위한 Spot Network 적용을 고려하더라도, 차단용량을 초과하는 고장전류 문제가 발생하지는 않을 것으로 판단된다. 그러나 변전소 주변압기 관점에서 차단용량보다는 작더라도 부하전류를 훨씬 상회하는 고장전류가 흐르면 2차권선의 손상과 수명단축이 발생할 수 있다. 또한, 중성점접지리액터(NGR: Neutral Ground Reactor)로 인해 1선지락시 건전상 상전위가 상승하고, 고장상의 경우는 전압이 하락하여 건전피더의 UVR 동작이 발생하여 건전피더까지 탈락할 수도 있다. 하지만, 배전계통에서 고장전류 통전으로 인해 위와 같은 문제점이 있다라도 근본적으로는 차단용량이 고장전류보다 크기 때문에 고장전류를 감소시키기 위한 한류기의 적용 타당성이 크다고는 할 수 없다.

하지만, 위와 같이 저압, 대용량 초전도케이블을 적용하는 신 배전계통에서 초전도변압기를 병행 적용하는 경우에는 차단용량을 상회하는 고장전류 문제가 발생할 수 있다. 초전도변압기의 누설임피던스는 상전도 변압기와 동일하거나 약간 작지만, 용량은 상전도 변압기의 2배 이상이다. 이러한 경우 고장전류는 기존 배전계통보다 훨씬 증가하게 된다. 그 이유는 154kV 등가전원임피던스 보다는 변압기 임피던스가 배전계통의 고장전류에 절대적인 영향을 미치는데, 변압기 용량에 반비례하여 임피던스가 작아지기 때문이다. <Fig. 1>에서 초전도변압기와 케이블이 병행적용되어 있는 계통의 경우 전형적으로 고장전류가 증가할 수밖에 없으며, 최종단계 신 배전계통에서는 고장전류가 차단용량을 초과할 가능성이 있다.

6. 초전도기기 적용 신배전계통의 기술적 검토과제

저압대용량 방식의 초전도케이블을 적용하는 경우, 송전급 용량을 배전급 전압으로 적용함에 따라서 전류용량 대비 리액턴스는 크고, 충전용량은 적어지는 효과가 발생하게 된다. 이에 따라서, 전압강하의 문제와 기존 상전도케이블과의 조류재배분에서 문제가 발생할 개연성이 있다. 따라서 적용사안별로 정밀한 계통검토를 통하여 이러한 문제점이 없는 지점에 배치하고 관련된 기술적 대안을 제시하여야 한다. 마찬가지로 초전도한류기를 적용하는 경우에도 실질적인 고장전류의 크기는 해당 지점의 154kV 등가전원임피던스, 초전도 변압기 사양 및 계통 구성형태에 따라서 달라지므로 구체적인 케이스별로 상세 검토가 필요하다. 또한, 초전도케이블과 초전도변압기가 병행 적용되는 신 배전계통에서 고장전류 문제로 인한 초전도한류기의 적용이 필요하다면 적용위치와 방법에 대한 검토가 되어야 한다. 22.9kV 배전계통 고장전류를 감소시키기 위한 한류기의 적용위치는 154kV와 22.9kV 모선에 배치하는 두 가지를 모두 고려할 수 있다. 154kV 모선에 초전도한류기를 설치하는 방안은 154kV와 22.9kV 양측을 모두 만족시키는 한류저항 값을 선정하기 곤란한 문제가 있지만, 고장전류의 유입통로를 원천적으로 봉쇄하는 효과가 있다. 반면에 22.9kV 모선에 설치하는 것은 한류저항 값은 적절하게 선정할 수 있지만, 개별

모선에 설치해야 하는 단점이 있다. 따라서, 이와 같은 초전도전력기기의 실 계통적용에 따른 세부 기술적인 검토가 적용사안별로 수행되어 구체적인 적용방안이 수립되어야 한다.

7. 결 론

본 논문에서는 저압, 대용량 방식의 22.9kV 초전도케이블 적용과 더불어 초전도변압기와 초전도한류기를 병행 적용하는 미래 신 배전계통의 구성을 제안하였다. 초전도 전력기기를 적용하는 미래 신 배전계통에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- 154kV 상전도케이블을 대체하는 저압, 대용량 방식의 22.9kV 초전도케이블 적용은 대도심 고밀도 부하공급에 따른 송전과 변전비용을 획기적으로 감소시키며, 환경과 민원측면에서도 막대한 사회, 경제적 이득을 줄 것으로 기대된다.
- 22.9kV 개폐소에 전력공급을 하는 외곽 154kV 변전소는 추가되는 154/22.9kV 변압기의 부지확보와 용량 증대를 위해 초전도변압기를 적용하는 것이 바람직하다.
- 대용량의 초전도변압기를 적용하면 배전계통의 고장전류가 증가하며, 이로 인해 케이스별로 초전도한류기를 병행 적용해야 할 가능성이 높아진다. 초전도한류기의 적용위치에 대해서는 별도의 추가 검토가 필요하다.
- 신 배전계통의 기본 구성은 도심내부의 말단 154kV 변전소로부터 시작하여 단계별로 그 범위가 확장되어야 할 것으로 판단된다. 중국적으로 초전도 전력기기가 적용되는 신 배전계통은 22.9kV 양단 선로로부터 수전 받는 형태가 되므로 전력공급 신뢰도가 증가하는 장점을 지니고 있다.
- 신 배전계통에서 저압, 대용량 초전도케이블 적용에 따라서 조류재배분과 전압강하와 같은 기술적인 문제가 발생할 소지가 있다. 이러한 문제점을 분석하고 기술적인 대안을 제시하기 위한 별도의 검토가 필요하다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 한국전력공사, “2002년 장기 송변전 설비계획”, 2002.
 [2] Ladie Pierluigi, Mansoldo Andrea “HTS Cable application studies and technical/ economical comparisons with conventional technologies”,

PES-WM 2002.

- [3] Richard Silbergliitt, Emile Ettetdgui, Anders Hove "Strengthening the Grid : Effect of High Temperature Superconducting Power Technologies on Reliability, Power Transfer Capacity and Energy" RAND, 2002.
- [4] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999.
- [5] V. R. Ramanan, Gilbert N. Riley, " A VISION FOR APPLICATIONS OF HTS TRANSFORMERS, International Wire & Cable Symposium Proceedings 1998
- [6] J. YOON, "Application Methodology of 22.9kV HTS Cable in Metropolitan city of South Korea", IEEE GM, 2004.
- [7] 윤재영, "22.9kV 초전도케이블 적용 가능성 분석" 초전도케이블 기획자료, 2003.
- [8] J. N. Nielsen, J. J. Ostergaard, "Applications of HTS fault current limiters in the danish utility network".
- [9] H. Kameda, "Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999.

저 자 소 개



윤재영(尹在暎)

1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 기술사(발송배전). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹장 책임연구원.



김종율(金鍾律)

1974년 7월 6일생, 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹 연구원.



이승렬(李昇烈)

1975년 9월 13일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹 연구원.