컴팩트형 고온 초전도 전력 케이블의 기대 효과와 경제성 평가

Effect of compact HTS superconduction power cable and evaluation of its economical efficiency

최상봉*, 성기철**, 조전욱**, 정성환*, 김대경*, 김학만*, 전영환*

S.B.Choi*, K.C.Seong**, J.W.Cho**, S.H.Jeong*, D.K.Kim*, H.M.Kim*, Y.H.Jun*

Abstract : This paper presents the possible application of a HTS superconducting power cable for transmitting electric power in metropolitan areas, reflecting its important distinction such as compactness for installation in underground ducts and considerable efficiency improvement comparable to present underground cables.

In this paper, we investigated characteristic and market scale compact HTS transmission cable which is possible to install in underground ducts, and reviewed its economical efficiency comparing to present existed CV cable from point of view such as cost for cable construction and duct or tunnel installation.

Key Words : superconducting power cable, economical efficiency, duct, tunnel

1. 서 론

초전도의 특징은 흐르는 전류의 밀도가 통상 전력기기의 운전전류밀도에 비해 약 1,000배 이상으로 크기 때문에 전력케이블에 초전도를 적용하게 되면 소형(컴팩트)대용량 케이블의 실현이 가능할 것으로 기대된다. 이와 같은 효과는 특히 고온초전도의 경우에 특히 크며 액체질소냉각의 초전도체의 출현에 따라 기존의 지중송전용 관로에 인입이 가능할 정도의 크기로 현재 초고압케이블(154kV)이상의 송전용량을 전송할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 컴팩트한 케이블의 필요성은 인구밀집지역인 대도시권에서 제일 우선적으로 요구되는데 관로에 포설 가능한 컴팩트형 고온초전도 케이블의 적용은 지중선 건설 공사비의 절감 및 지하공간을 효율적으로 이용할 수 있기 때문에 전력계통으로의 도입 효과가 매우 클 것으로 판단된다[1][2]. 한편, 외국의 경우, 미국을 위시로 하여 일본 등에서 차세대 전력송전 시스템으로서 고온 초전도 케이블을 이용한 송전 케이블의 적용을 현실로 받아들이고 있으며 이에 따라 케이블 송전 용량 증대 및 지중화 공사시 공사비 절감을 목적으로 초전도 케이블의 계통 적용 기술 개발에 매진하고 있다. 또한 초전도 케이블의 계통 적용시 그에 따른 신뢰성 및 경제성 평가를 통한 검토 등을 통해 초전도 케이블의 계통 도입 방안에 대한 연구가 진행중이다. 특히 초전도 케이블의 대도시 도입에 따른 전력계통의 과도 안정도 및 전압 안정도 그리고 순시전압 저하와 송전 손실에 대한 평가와 관련된 연구를 추진 중이다[3][4][5]. 그러나 국내의 경우, 지금 현재 고온 초전도 케이블의 개발이 초기 단계가 진행중이며 전력구에 포설되어 있는 전력 케이블을 고온 초전도 케이블로 교체하여 사용할 경우, 관로에 포설할 수 있을 정도로 케이블의 소형화가 가능하여 투자비를 절반이상으로 줄일 수 있어 초전도 케이블의 계통 적용에 대한 도입 효과와 경제성 검토에 대한 연구개발의 필요성이 제고되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점에 직면하여 국내의 현재 지중송전 케이블 설치 현황을 기반으로 하여 향후 컴팩트형 고온 초전도 케이블의 도입 효과와 시장 규모 및 경제성에 대한 검토를 수행하였다.

* 정 회 원 : 한국전기연구원 지중시스템 연구그룹
** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용 연구그룹
원고접수 : 2001년 10월 05일
심사완료 : 2001년 11월 05일

2. 본 론

2.1. 국내 송전선로의 현황

우리 나라 송전선로의 회선 긍장 현황을 전압계급별로 구분하여 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 알 수 있듯이 우리 나라 송전선로는 1990년대 들어 꾸준한 부하 증가로 인해 기간계통인 154kV 송전선로가 급격히 증가하고 있고 345kV 송전선로도 완만한 상승세를 유지하는 반면 66kV 송전선로의 감소가 두드러지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 향후 대전력 송전선로인 765kV 송전선로도 1990년대 후반 들어 조금씩 상승함을 보여 주고 있다. 이는 초고압 송전선로의 확충이 대세이기 때문인 것으로 분석된다. 다음은 우리 나라 송전선로의 현황을 가공선과 지중선으로 구별하여 살펴보았다.

가. 가공 송전선로

가공 송전선로의 전압계급별 회선 긍장의 추이를 다음 그림 2에 도시하였다. 가공 송전선로의 긍장은 66kV를 제외하고는 거의 완만한 상승세를 나타내고 있어 국내에 가공 송전선로의 증가는 향후 크지 않을 것임을 알 수 있다. 전압계급별 회선 긍장의 추이를 구체적으로 살펴보면 기간계통인 154kV와 345kV 가공 송전선로의 비율이 2.0~2.3배 정도로 일정간격을 유지하고 있음을 알 수 있으며 앞으로도 이 비율 변화에는 큰 변화가 없을 것으로 판단된다. 한편 가까운 장래에 향후 대전력 기간망인 765kV 가공 송전선로는 급증할 것으로 예상된다.

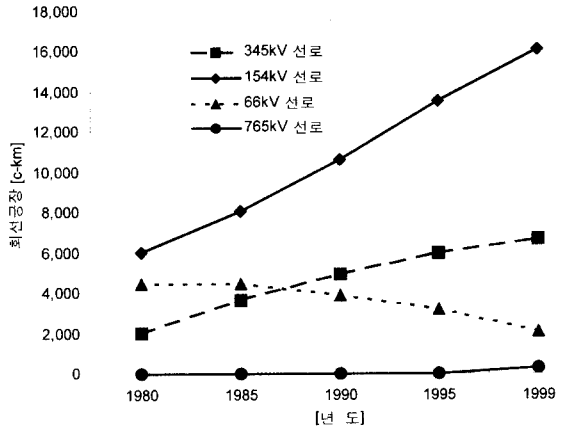

그림 1. 국내 송전선로의 전압계급별 회선 긍장 추이
Fig. 1. Trend of transmission line length in domestic

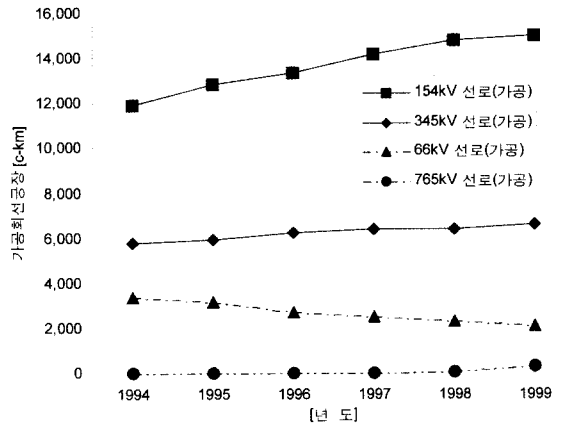

그림 2. 가공 송전선로의 전압계급별 회선 긍장 추이
Fig. 2. Trend of overhead power line in domestic

나. 지중 송전선로

지중 송전선로의 전압계급별 회선 긍장의 추이를 다음 그림 3에 도시하였다. 지중 송전선로의 긍장은 154kV의 상승세가 두드러지고 있음을 알 수 있는데 그 이유는 최근 들어 서울을 비롯한 대도시 중심부에 154kV 지중 송전선로가 많이 포설 됐기 때문이며 향후에도 이와 같은 154kV 지중 송전선로의 증가 추이는 계속될 것으로 전망된다.

한편, 지중 송전선로와 가공 송전선로의 회선 긍장에 대한 비율을 살펴보면 154kV 계통 전압의 경우, 1994년 5%에서 1999년 7.4%로 지중 송전선로의 신장율이 꾸준히 증가함을 알 수 있었으며 345kV 계통 전압의 경우는 최근 들어 약 1.4%를 유지하고 있으며 이 비율도 향후 커질 것으로 전망된다.

다. 전력 손실률

국내의 전력손실률은 1990년 대 들어 급격히 감소하고 있으며 최근 들어 154kV 이상의 고압 계통의 경우는 약 4%로 포화되고 있으며 66kV 이하 저압계통의 경우는 거의 손실이 없는 것으로 나타나고 있다. 다음 그림 4는 전압계급/연도별 손실률을 도시하였다.

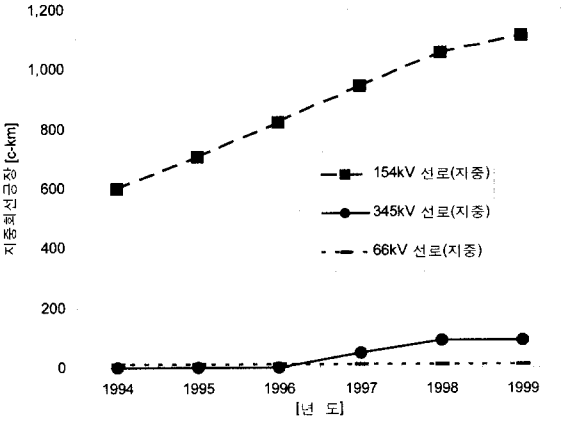

그림 3. 지중 송전선로의 전압계급별 회선 긍장 추이
Fig. 3. Trend of underground power line in domestic

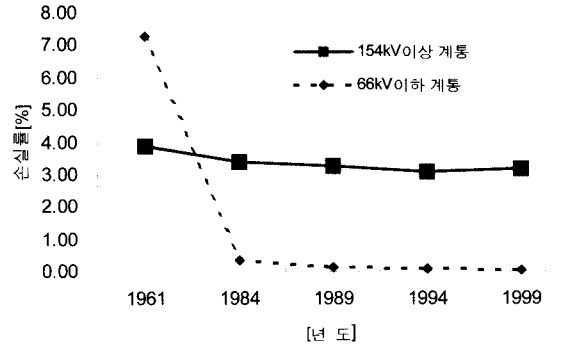

그림 4. 전압계급별 전력손실률의 추이
Fig. 4. Trend of power loss in domestic

2.2. 고온 초전도 케이블의 특징과 시장규모

가. 관로형 고온 초전도 케이블의 특징

지금 현재 대도시 중심부에 전력 공급은 주로 지중 송전계통을 통하여 이루워지고 있다. 그러므로 향후 전력수요 증가에 따라 새로운 지중송전 루트의 확충이 필연적이지만 중장기적인 측면에서 보면 지하철, 통신, 수도 등으로 고밀화된 대도시의 지하공간에 새로운 전력구를 신설하는 것은 매우 곤란할 것으로 예상된다. 따라서 이에 대한 해결책으로 보다 단면이 적은 관로에 고온 초전도체를 이용한 컴팩트한 케이블을 설치하면 코스트 절감이 가능할 뿐만 아니라 지하공간을 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

현재 대도시 중심부에 전력공급은 약 500MVA/회선의 345kV 케이블로 수요 근방지까지 송전하는 형태이다. 345kV 종래 케이블의 경우, 송전용량은 발열에 의해 제한되기 때문에 500MVA의 케이블이 2회선으로 전력구에 포설하는 경우, 포설 폭으로서 800mm 정도가 필요하다. 이에 반하여 액체 질소 냉각의 고온초전도 케이블의 경우에는 구리에 비해 약 1000배 이상의 전류밀도로 통전이 가능하기 때문에 도체부분의 단면적이 상당히 적어진다. 한편, 케이블 외경은 절연과 냉각을 고려하여 결정하게 되는데 우리나라의 경우, 전압 154kV일 때가 가장 적을 뿐만 아니라 관로에 설치가 가능한 150mm가 된다.

한편, 금속계 초전도 케이블의 경우는 도체부분의 단면적은 적지만 액체 헬륨 냉각을 위해 질소쉴드를 포함하여 4층 열절연 구조가 필요하므로 외경은 360mm 정도가 되어 관로에 포설하기 곤란하다. 따라서 고온 초전도 케이블만이 관로에 설치가 가능하여 이로 인한 토목비가 많이 차지하는 케이블 건설비용을 절감할 수 있다. 또한 고온 초전도 케이블은 이와 같은 장점으로 단면이 작은 관로에 설치가 가능한 컴팩트한 시스템을 구축할 수 있으므로 컴팩트형 고온초전도 케이블 관련 연구가 일본 및 국내를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 다음 표 1은 154kV 1GVA 용량의 고온초전도 케이블과 기존의 케이블과의 장점을 비교하였다.

표 1. 기존 케이블과의 장점 비교
Table 1. Comparison of merit between existed cable and superconductor cable

항 목	고온초전도 케이블	저온초전도 케이블	OF 케이블
① 컴팩트	전압154kV 단면150mm	전압154kV 단면475mm	전압345kV 단면800mm
② 냉각 시스템의 운용·보수성	질소냉각 (○)	헬륨냉각 (△)	간접냉각 (○)
③ 송전 비용	150	80~90	100
④ 관로 설치	○	×	×

비고 :
①은 송전용량을 1GVA로 한 경우
③은 OF 케이블의 송전비용이 100인 경우
④는 관로내경 200mm인 경우

나. 컴팩트 고온 초전도 케이블의 시장 규모

고온 초전도 케이블 기술에 대한 국내외 동향을 살펴보면 미국, 유럽, 일본 등에서 미래의 전력송전 시스템으로서 고온 초전도 케이블을 이용한 송전케이블의 적용을 적극적으로 검토하고 있으며 이에 따라 케이블 송전용량 증대 및 지중화 공사시 공사비 절감을 목적으로 컴팩트 고온 초전도 케이블의 계통 적용 기술에 매진하고 있다. 따라서 이와 같은 고온 초전도 케이블이 적용되는 시장은 주로 기존의 154kV와 345kV의 케이블에 대체되는 규모를 가질 것이다. 다음 표 2와 표 3은 각각 1995년부터 1999년까지 5년간의 154kV와 345kV 케이블 회선 길이와 시장 현황에 대한 과거 실적 추이를 도시하였으며 표 4은 이를 근간으로 2001년부터 2020년까지의 향후 지중송전 케이블의 규모를 예측하여 제시하였다.

따라서 향후 고온 초전도 케이블의 시장은 위의 표 3에서 예측한 기존 케이블이 규모가 될 것으로 판단된다. 그러므로 본 논문에서는 예측된 회선길이와 한국전력에서 제시한 케이블 포설을 위한 투융자 단가 비용을 근간으로 하여 고온초전도 케이블의 국내 시장 규모를 다음 표 4와 같이 154kV, 345kV 전압계급별로 구분하여 예측하였다.

2.3. 고온 초전도 케이블의 경제성 평가

본 논문에서는 이와 같은 컴팩트형 고온 초전도 케이블을 154kV로 회선당 1GW의 용량을 국내에 도입한 경우, 한전의 투융자 단가 비용을 기본으로 하여 기존 전력케이블과 관로에 설치 가능한 컴팩트 고온

표 2. 지중송전 케이블 과거 실적 추이〔단위 : c-km〕
Table 2. Trend of underground power line for 5 Years

구분 / 전압별	회선길이				
	1995	1996	1997	1998	1999
345kV	-	-	49	71	93
154kV	709	822	943	1,055	1,112
합계	709	822	992	1,126	1,205

표 3. 지중송전 선로의 시장 현황〔단위 : 10억원〕
Table 3. Trend of marketing condition of underground power line 〔unit : a billion〕

구분 / 전압별	시장 규모				
	1995	1996	1997	1998	1999
345kV	-	-	92	134	175
154kV	520	602	691	773	815
합계	520	602	783	907	990

표 4. 지중 송전 케이블의 향후 증설 계획
Table 4. Trend of extension of underground power line

구분 / 전압별	회선길이 c-km				
	2001	2005	2010	2015	2020
345kV	162	289	446	604	761
154kV	1,344	1,769	2,279	2,798	3,318
합계	1,506	2,058	2,725	3,402	4,079

표 5. 고온 초전도케이블의 국내시장 규모 예측 〔단위:10억원〕
Table 5. Estimation of HTS power line in domestic marketing scale 〔unit:a billion〕

	연도				
	2001	2005	2010	2015	2020
345kV	305	544	840	1,137	1,433
154kV	985	1,296	1,670	2,051	2,431
고온초전도 케이블의 시장 규모	1,290	1,840	2,510	3,188	3,864

초전도 케이블의 건설비용을 산출하여 경제성을 비교 검토하였다. 다음 표 6은 "2000년 한전 투융자 단가 산출 내역"에 따른 345kV OF케이블과 154kV CV 케이블의 케이블 건설 비용을 도시하였다. 한편, 다음 표 7은 표 6에서 케이블 건설 단가와 전력구 관로 설치 비용을 포함하여 각 항목별로 154kV급 고온초전도 케이블과 CV케이블의 건설비용을 비교 도시하였다. 표 7에서 도시하는 바와 같이 회선당 km당 케이

블 건설비용은 기존 CV 케이블에 비해 컴팩트형 고온 초전도 케이블 비용이 약 2배 정도 높으나 고온 초전도 케이블이 회선당 정격용량이 3배 정도 높기 때문에 전체 회선을 비교하면 고온 초전도 케이블이 기존 케이블의 케이블 건설비용 보다 투자비가 적게 들어가는

표 6. "2000년 한전 투융자 단가 내역서
〔단위:백만원/c-km〕
Table 6. An itemized statement in unit cost for investment in year 2000 of KEPCO
〔unit : million won/c-km〕

구 분	전압 계급	
	345kV OF 케이블	154kV CV 케이블
재료비	1,608	631
노무비	196	149
경 비	79	59
계	1,883	839

표 7. 대상케이블의 건설비용 비교(1GW 송전의 경우)
Table 7. Comparison of construction cost between object of cable(in case of 1 GW)

종류 / 항목	고온 초전도 케이블	CV 케이블
정격전압〔kV〕	154	154
정격용량〔GVA〕	1	0.33
회선 수〔CCT〕	1	3
케이블 건설비용 〔억원/km·회선〕	16.8	8.4
케이블 건설비용 〔억원/km〕	16.8	25.2
전력구·관로 설치 비용〔억원/km〕	9	80
총 건설 비용 〔억원/km〕	25.8	105.2

것을 알 수 있다. 또한 이와 같은 컴팩트형 고온 초전도 케이블의 경우, 모든 케이블을 관로에 포설할 수 있으나 기존 CV케이블의 경우는, 송전 및 배전회선과의 조합에 따라 전력구 또는 관로에 포설해야 하므로 이들 설치비용을 포함하여 고온 초전도 케이블과 기존 CV 케이블과의 총 건설비용을 비교하면 전자가 후자에 비해 약 ¼ 정도의 투자비 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

3. 사례검토

본 사례검토에서는 표 2에서 제시한 기존의 지중 송전 케이블로부터 표 3과 같이 예측한 지중 송전 케이블의 향후 포설 계획 데이터를 이용하여 국내에 고온 초전도 케이블 도입시, 기존 케이블과의 경제성면에 대한 비교검토를 수행하였다. 본 사례검토에서 다음과 같은 가정하에 양 방식의 경제성을 비교 검토하였다. 즉, 첫째, 우선 기존 지중 송전선로의 포설방식을 살펴보면 345kV인 경우는 모두 전력구에 포설하며 154kV인 경우는 송전 4회선 이하일 경우에만 관로식에 포설하기 때문에 본 검토에서는 345kV의 경우는 전 선로가 그리고 154kV 선로의 경우는 약 50%가 전력구에 포설되어 있는 것으로 가정하였다. 둘째, 일반적으로 표준 전력구에는 약 8회선이 포설되므로 이를 기준으로 기존 케이블의 경제성을 산출하였다. 셋째, 초전도 케이블의 용량이 기존 케이블에 비해 약 3배이기 때문에 초전도 케이블 길이를 기존 케이블 길이의 ⅓로 적용하여 비교 검토하였다. 다음 표 8은 지중 송전 케이블의 향후 증설계획에 근거하여 2020년까지 연도별로 기존 케이블과 초전도 케이블과의 경제성을 케이블 비용, 전력구 및 관로 비용 그리고 총 건설비용의 각 항목별로 비교 검토한 결과를 요약하여 도시하였다.

표 8. 항목별 대상케이블의 경제성 비교 검토
Table 8. Comparison of economic cost between object of cable by items

연도	안	소요회선길이〔km〕	경제성〔단위 : 100억원〕			
			케이블 비용	전력구 및 관로 비용		총 건설 비용
				전력구	관 로	
2001	초전도	502	84.3		45.2	129.5
	기 존	1,506	143.3	83.4	60.5	287.2
2005	초전도	686	115.3		61.7	177.0
	기 존	2,058	202.8	117.4	79.6	399.8
2010	초전도	908	152.6		81.7	234.3
	기 존	2,725	275.2	158.6	102.5	536.3
2015	초전도	1,134	190.5		102.1	292.6
	기 존	3,402	348.5	200.3	125.9	674.7
2020	초전도	1,360	228.5		122.4	350.9
	기 존	4,079	421.7	242.0	149.3	813.0

4. 결 론

다음은 본 논문의 결과와 특징을 요약하여 설명하였다.

(1) 관로형 컴팩트 고온 초전도 케이블을 대도시의 지하 관로에 설치하면 기존 케이블에 비해 비용 절감을 달성할 수 있을 뿐만 아니라 지하공간을 유용하게 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 향후 송전선 건설은 지역 환경을 고려할 때 지중 송전 케이블의 포설이 주류가 될 것이며 이때 관로에 포설가능한 컴팩트 고온초전도 케이블이 기대된다.

(3) 사례검토 결과 고온 초전도 케이블을 사용할 경우 총 건설 투자비는 기존 CV 케이블의 투자비에 약 43%가 될 것으로 예상되어 우리 나라 대도시 지역에 고온 초전도 케이블의 설치 가능성을 얻었다.

(3) 국내에 향후 고온 초전도 케이블 시장은 2010년에 약 2조 5천억원 그리고 2020년에는 약 3조 8천억원의 시장 규모를 형성할 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

〔1〕Ministry of Commerce, Industry and Energy, "5th Long Term Power Supply and

Demand Forecast in Korea", 2000. 1
[2]K.C,Seong et el. "A Study on the Application Effects of HTS Power Cable"", The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics Vol. 2, No 2. 2000. pp, 32-36
[3]Hideo Ishii, "Assessment of compact High-Tc Superconducting AC Power Cable and its Application", JIEE, Vol 33, No 3., 1988 pp, 145-151
[4]Haruhito Taniguchi, "Expectation of Superconductivity Application to Power System", 平成 11年 電氣學生全國大會, 1999
[5]Takeyoshi Kato et al, "Evaluation of total Transmission Loss and Refrigerating Energy to operate Superconducting Cables in a Future Metroplitan Elelctric Power System", T. IEE Japan, Vol.114-B, No. 12, 1994.
[6]Sang Bong Choi et el, "Long-term Load Forecasting in Metropolitan Area Considering Economic Indicator", Trans. KIEE. Vol 49B, NO. 8, 2000.

저 자 소 개

최상봉(崔商鳳)
1958년 02월 12일생, 1981년 아주대 공대 전자공학과 졸업, 1991년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1989년~현재 한국전기연구원 지중시스템 연구그룹 선임연구원

성기철(成耆哲)
1956년 02월 20일생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원전기공학과 졸업(공학석사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원

조전욱(趙全旭)
1960년 03월 02일생, 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원전기공학과 졸업(공학석사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

정성환(鄭聖煥)
1964년 03월 10일생, 1987년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 박사과정, 1990년~현재 한국전기연구원 지중시스템 연구그룹 선임연구원

김대경(金大景)
1958년 02월 20일생, 1981년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 한양대 대학원 전기공학과 졸업, 1999년 영국 UMIST 박사과정, 1990년~현재 한국전기연구원 지중시스템 연구그룹장

김학만(金學萬)
1966년 02월 11일생, 1991년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 Facts & Power Quality Group 선임연구원

전영환(全瑩煥)
1961년 02월 8일생, 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 Univ. of Southern California 전기공학과 졸업(석사), 1996년 동경대학교 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 Facts & Power Quality Group 그룹장