

고온초전도 케이블의 대도시 계통적용을 위한 모델링 및 송전용량과 전압계급의 검토

A Study on System Modeling, Capacity and Voltage rating to supply HTS Power Transmission Cable to Metropolitan Area

최상봉*, 성기철**, 정성환*, 김대경*, 김학만*, 문영환*

S.B.Choi*, K.C.Seong**, S.H.Jeong*, D.K.Kim*, H.M.Kim*, Y.H.Moon*

Abstract: It becomes difficult and high in cost to construct new ducts and/or tunnels for power cables in metropolitan areas. This paper presents possible applications of an HTS superconducting power cables for transmitting electric power in metropolitan areas. Reflected were its important distinction such as compactness for installation in underground ducts and considerably high efficiency compared with present underground cables. In this paper, system modeling, transmission capacity and voltage class of compact HTS cables which should be applied to existing ducts were reviewed. Based on this, the following items on urban transmission system are examined.

- (1) A method of constructing a model system to introduce high temperature superconducting cables to metropolitan areas is presented.
- (2) The maximum outer diameter of HTS cables to be accommodated in existing ducts is calculated based on the design standards for current cable ducts.
- (3) The voltage level that can be accommodated by existing ducts is examined.

Key Words: superconducting power cable, transmission capacity, voltage class, system modeling

1. 서 론

최근 들어 대도시의 정보화 및 인텔리전트화가 추진되어 향후 전력수요의 증대가 예상된다. 한편 대도시 중심부의 전력공급은 경관의 향상 및 지상공간의 확보 곤란으로 인해 지하 송전선이 주류를 이루고 있다. 따라서 도시내에 전력공급 선로의 확충을 위해 지중송전선의 건설이 필요하다. 그러나 대도시내의 지하공간은 기존의 지하철, 통신, 수도, 빌딩 등으로 과밀화되어 있어 지중 송전선을 포설하기 위한 관로와 전력구를 건설하기 곤란할 것으로 예상된다. 또한, 현재 상황을 고려하면 지중 케이블 신설비용의 대부분을 전력

구 건설과 같은 토목비가 차지하고 있는데 향후 토목비의 증가가 예상되어 송전비용이 동반 상승하게 될 것이다. 이와 같은 송전비용을 저감하기 위해서는 시설관로를 대체하여 신설비용을 줄일 수 있는 소형 대용량 송전케이블의 필요성이 제고되고 있다. [1][2] [3][4] 이와 같은 면에서 고온 초전도 선재는 비교적 저렴한 액체질소로 초전도 상태를 유지할 수 있을 뿐만 아니라 선재의 단위 면적 당 흐르는 전류(임계 전류밀도)를 구리와 같은 상전도 금속 선재와 비교하여 약 1,000배 이상 크게 흘릴 수 있는 장점이 있다. 이와 같은 고온 초전도 선재를 도체로 이용한 고온 초전도 송전 케이블은 대용량 송전을 소형화한 케이블로 실현할 가능성이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 고온 초전도 송전 케이블을 대도시 계통에 적용할 경우에 필요한 계통 모델링과 송전용량 그리고 전압계급에 대하여 구체적으로 검토하였다.

2. 본 론

2.1. 현용 케이블 관로의 설계 기준

지중 케이블 종류별, 포설 방식별로 우리나라 지중 관로에 적용하기 위한 관 내경 설계 기준은 다음과 같다. 이때 관 내경은 케이블의 최대 외경, 장래의 용량 증가, 경제성 등을 고려하여 선정한다.

- (1) 1공 1조 포설
 $D \geq 1.3 d, D \geq d + 30mm$ 를 동시에 만족해야 한다.
- (2) 1공 3조 포설
 $2.16d + 30mm \leq D \leq 2.85d$ 또는 $D \geq 3.15d$ 를 만족해야 한다.
즉, $2.85d < D < 3.15d$ 의 범위의 내경을 갖는 관을 사용하면 안된다.
단, D: 관 내경(mm), d: 케이블 최대 외경(mm)
- (3) 케이블 종류별 사용 관 내경은 다음 표 1을 표준으로 한다.

따라서 이와 같은 설계기준에 근거하여 3상 일괄형 HTS 초전도 케이블을 1공 1조로 기존 관로 200mm ϕ 에 수납하기 위한 케이블 최대 외경은 앞서 설명한 1공 1조 관로 설계 기준에 따라 최대 153mm로 산정된다.

2.2. HTS 케이블 계통적용을 위한 모델계통

일반적으로 지중 케이블은 온도상승에 의해 전류용량이 제한되기 때문에 초전도 도체를 이용하여 이

* 정 회 원 : 한국전기연구원 지중시스템 연구그룹
** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용 연구그룹
원고접수 : 2002년 03월 27일
심사완료 : 2002년 05월 13일

표 1. 케이블 종류별 표준사용 관 너경

Table 1. The diameter of standard ducts based on various cables

선 종	도체규격	인 입 방식	관로내경	비 고
66kV 단심 XLPE케이블	400mm ²	1공1조	100mm	OF:유입 케이블 XLPE:가교 폴리에틸렌 전력케이블
154kV 단심 OF케이블	2,000m ² 이하	1공1조 1공3조	200mm 300mm	
154kV 단심 XLPE케이블	1,200m ² 이하 2,000m ² 이하	1공1조 1공3조	200mm 300mm	

제약조건을 완화시키면 전류용량을 크게 할 수 있다. 따라서 1GW급의 대용량 송전을 할 경우에도 고전압이 아닌 154kV급의 저전압으로 송전이 가능하다. 다음 그림 1은 1GW를 송전할 경우에 각종 케이블의 단면도를 도시하였다. 그림 1에서 제일 상단에 표시한 케이블은 액체 헬륨 냉각의 금속계 초전도 케이블로서 액체 헬륨 외측에도 열 절연을 위해 질소 쉴드가 필요하다. 그림 중간에 위치한 고온 초전도 도체를 이용한 액체 질소 냉각 케이블의 경우에는 2단 열 절연이 필요하지 않기 때문에 케이블을 상당히 소형화시킬 수 있다. 따라서 고온 초전도 도체를 이용한 액체 질소 냉각 케이블의 경우에는 현재 관로에 포설한 지중 케이블을 대체하여 전류 용량을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 마지막으로 제일 하단에 위치한 동일한 용량을 송전할 경우의 CV케이블과 비교하면 어느 정도 소형화가 되는지를 비교할 수 있다. 지중 케이블의 경우에는 케이블을 수납할 수 있는 전력구와 관로의 건설비가 매우 큰 부분을 차지하기 때문에 소형화의 장점이 매우 크다. 한편, 우리나라의 대도시 지역은 고도 정보화에 동반하여 사회 활동의 중심으로 대용량·고밀도 전력소비 지역을 형성해왔다. 따라서 이와 같은 지역에 전력을 고신뢰도로 공급하기 위해 대도시 송전계통은 통상 다음과 같은 형태로 구성되어 있다. 즉, 대도시 주변부는 345kV의 외곽선이 건설되고 외곽선 상에 수 개의 거점 변전소는 원격지에 편재되어 있는 대용량 화력 발전소와 원자력 발전소 등에서 345kV의 가공선에 의해 전송된 대전력을 집약시킨다. 외곽선상의 거점 변전소 또는 도시 근교의 해안 화력 발전소에서는 도시부로 향하는 가공 송전선과 이에 접속된 지중 케이블이 다방향으로 대도시 구심을 향해 설치되어 있다. 다음 그림 2는 이와 같은 대도시 송전계통의 구성도를 도시하고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 고온 초전도 케이블을 대도시 전력시스템에 적용하기 위한 모델계통에 대하여 검토하였으며 이때 필요한 고온 초전도 케이블의 전류밀도는 10^6A/cm^2 이다. 다음 그림 3은 우리나라에서 적용하고 있는 기존의 케이블 계통과 고온 초전도 케이블을 적용 검토한 모델 계통에 대하여 도시하였다. 그림 3에서 상단에 위치한 계통도는 기존 케이블의 대도시 지역의 일반적인 계통 공급 구성도를 표시하였다. 즉, 기존 케이블은 대부분 발전소로부터 전송된 765kV 또는 345kV 송전선로 중 일부는 도심 외곽에 위치한 345/154kV 변전소를 통해 154kV로 강압한 후 관로나 전력구에 포설되며 나머지는 도심내에 있는 154/22.9kV 변전소를 통해 22.9kV 배전급으로 강압되어 전력구나 관로에 포설되는 형태이다. 한편, 그림 3의 하단에 위치한 계통도는 개발된 고온 초전도 케이블의 대도시 지역에서 의 계통 공급

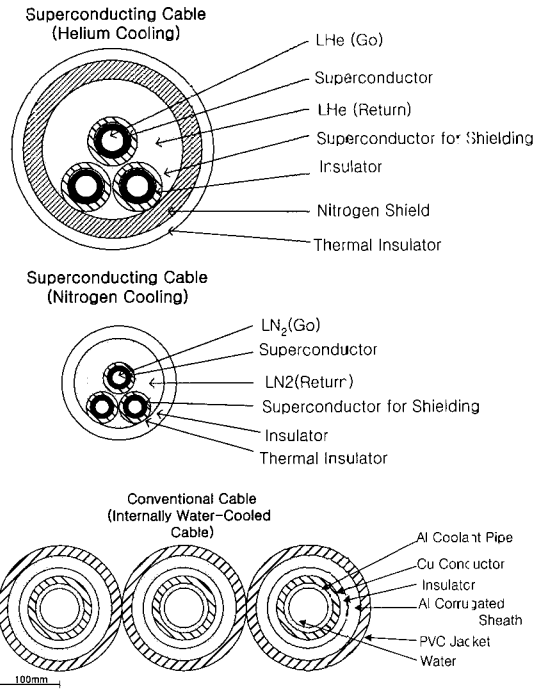


그림 1. 1GW 송전시 각종 케이블의 단면 형상
Fig. 1. Cross section diagram of various cable when 1GW capacity is transmitted

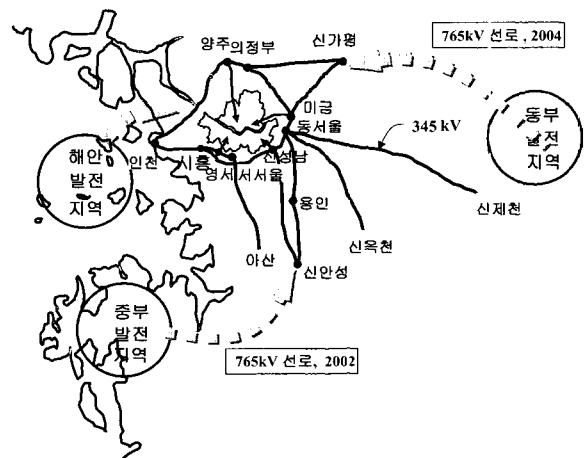


그림 2. 대도시 지역의 송전계통 구성도
Fig. 2. Power system configuration in metropolitan area

구성도를 도시하였다. 즉, 개발된 고온 초전도 케이블은 발전소로부터 전송된 전력을 345kV/154kV 변전소로부터 강압시켜 모두 냉각시스템을 겸비한 관로에 포설하는 형태를 취함으로써 전력구를 건설하지 않아 많은 공사비를 절감할 수 있는 계통 공급 방식을 제시하고 있다.

2.3. 소형 고온 초전도 케이블의 개념설계

(1) 케이블 송전용량의 검토

우리나라 기존의 계통의 경우, 345kV 변전소가 도심외곽에서 환상망으로 구축되어 이 변전소에서 도심의 154kV 변전소를 거쳐 320MW로 송전하고 있다. 그러나 이와 같은 시스템의 경우 매년 전력 수요의 증가

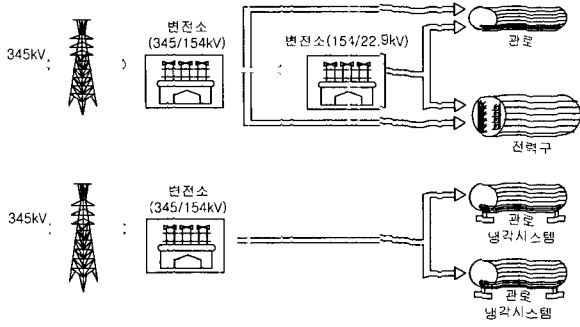


그림 3. 고온 초전도 케이블 적용검토를 위한 모델계통도

Fig. 3. Model system configuration to apply superconducting cable to metropolitan area

율을 3.8%로 가정하면 30년 후에 현재의 3배의 용량을 송전할 필요가 발생된다. 그러나 대도시의 지하 공간은 지하철과 가스 그리고 수도·통신선 등 공공 매설물로 인해 지금도 과밀화된 상태이다. 따라서 향후 미래에 증가되는 부하에 대처하기 위해 현재의 상태에서 새로운 지중 케이블의 관로나 전력구를 확보하는 것은 기술적으로나 경제적인 측면에서 곤란할 것으로 예상된다. 한편, 기설 관로나 전력구에 GW급의 상전도 케이블과 금속계 초전도 케이블을 포설하기 위해서는 발열과 설계 면에서 냉각·단열 등에 대한 특별한 공법을 도입하지 않는 한 곤란할 것으로 예상된다. 이와 같은 면에서 고온 초전도 도체가 케이블용 소재로 실용화되면 발열이 거의 없고 단열층도 간단한 구조로 설계될 수 있기 때문에 기존 상전도 케이블과 금속계 초전도 케이블에 비해 케이블 외경을 줄일 수 있다. 이렇게 되면 기설 관로나 전력구를 이용하여 현재 사용중인 상전도 케이블을 고온 초전도 케이블로 교체하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 대도시에서는 계통의 신뢰도를 고려하여 통상 복수 루트의 케이블 계통으로 전력을 공급하는데 우리나라의 154kV의 경우, 통상적으로 1 루트 당 송전전력은 330MW 정도로 볼 수 있으며 전력 수요의 증가율을 3.8%로 가정한 경우 30년 후의 루트 당 증가는 약 690 MW로 볼 수 있다.[5] 또한 통상적으로 수요의 예측이 최대 20~30년인 경우를 고려하면 미래에 1루트 당 송전전력은 최대 1GW가 된다. 이 정도의 전력을 송전하려면 개발중인 400kV CV 케이블로도 송전이 가능하지만 케이블 외경이 365mm정도가 되어 200mm ϕ 의 기설 관로에 포설이 곤란하여 새로운 루트를 확보할 필요가 있다.

이상의 검토에서 알 수 있는바와 같이 고온 초전도 도체에 의해 소형화한 케이블이 개발되면 부하 증가에 따른 송전용량 증대시 다른 케이블로는 불가능한 기존 관로나 전력구를 이용한 교환이 가능하여 비용절감이 기대될 뿐만 아니라 도시 형성의 관점에서 도시 공간을 효율적으로 도모할 수 있는 장점이 있다.

(2) 케이블 계통 전압의 검토

모델 계통은 고온 초전도 케이블이 기존 관로에 포설하는 것을 전제로 하였기 때문에 이를 고려하여 케이블 계통 전압을 결정하여야 한다. 즉, 전압을 낮추면 절연층이 얇아지지만 전류가 증가하여 교류손실이 증대되기 때문에 이를 보상하기 위한 냉매 환경은 크게 된다. 역으로 전압을 높이면 냉매 환경은 작아지만 절연층이 두꺼워진다. 결국, 초전도 케이블의 외경

을 결정하는 요인은 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 냉각관점에서는 전압이 낮을수록 더 많은 전류를 흘려 보내야 하기 때문에 교류손실이 증대되어 단열관을 크게 해야 한다.

② 절연관점에서는 전압이 낮을수록 케이블 외경이 작다.

따라서, 1GW의 송전용량에 다음 그림 4에서 도시한 바와 같이 66kV의 전압에서 케이블 외경이 130mm ϕ 로 가장 적고 그 다음으로 154kV의 전압에서 150mm ϕ 로 양쪽 모두 기존 관로 200mm ϕ 에 포설이 가능하다. 이때 필요한 J_c 는 $1 \times 10^6 A/cm^2$ 이다. 이상의 검토 결과 및 기존 계통의 전압계급에 154kV가 존재하는 것을 고려하여 케이블 전압계급은 154kV로 설정하는 것이 타당하다고 판단된다.

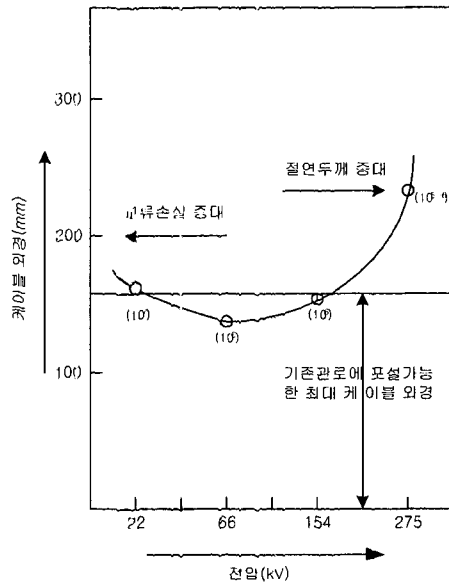
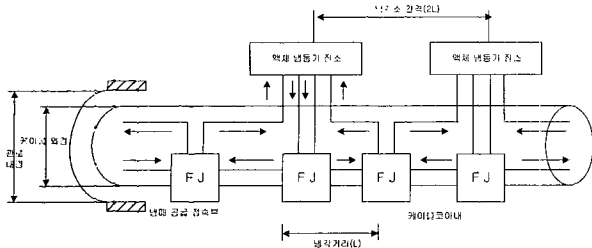


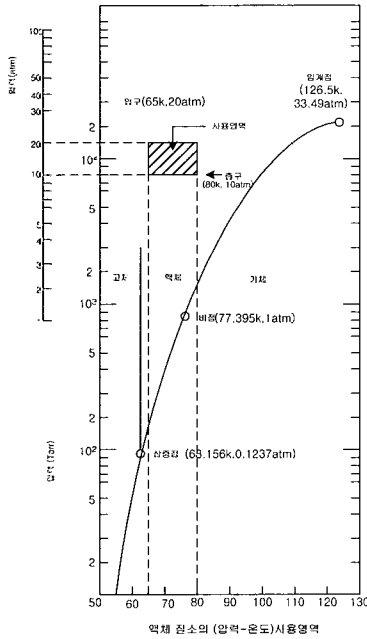
그림 4. 전압별 고온 초전도 케이블 외경
Fig. 4. Diameter of HTS power cable according to voltage ratings

(3) 케이블 냉각시스템의 검토

냉각 시스템을 중심으로 하는 고온 초전도 케이블 시스템의 전체 구조를 다음 그림 5(a)에 도시하였다. 냉동기내의 액체 질소는 냉매 공급 접속관을 통해 온도 65K, 압력 20 기압으로 케이블 코어부의 냉매 왕복관에 주입된다[6]. 이때 냉매는 초전도 도체에서 발생한 손실 및 유전체 손실의 반을 흡수하여 2대의 냉동기의 중간에 설치된 냉매 공급 접속부(FJ)에 도달한다. 여기서 냉매는 다시 귀로관을 통해 자체 절반 필드용 초전도체의 손실, 유전체 손실의 나머지 절반 및 외부로부터의 침입열을 흡수하여 냉동기로 되돌아온다. 출구에서는 온도 80K, 압력 10 기압을 확보하여 그림 5(b)에 도시한 바와 같이 케이블 냉각 시 액체 질소가 기화되지 않고 액체 상태로 순환하여 안정한 냉각을 할 수 있도록 한다. 또한 냉각소의 간격은 OF 케이블의 급유 조정소를 활용하여 5km로 한다. 냉각소의 간격을 이와 같이 짧게 하면 압력 손실의 억제 관점에서도 유리하다.



(a) 고온 초전도 케이블 냉각 시스템의 구성도



(b) 액체 질소의 압력-온도 사용영역 범위

그림 5. 고온 초전도 케이블 시스템 구성도
Fig. 5. System configuration of HTS power cable

(4) 1GVA HTS 초전도 케이블의 설계 레

전력케이블은 고온초전도의 응용 중에서 가장 유망한 항목중의 하나이다. 직류를 사용하는 장거리 초전도 케이블 개발은 예외로 하더라도 과밀 도시내에 교류를 이용하여 기존에 사용되고 있는 관로를 통해 전력을 전송할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 액체 질소를 이용한 고온 초전도 케이블이 고려되고 있다. 국내에 1GVA의 전력을 효율적으로 전송하는 방법으로는 3상 일괄형 형태의 케이블로서 154kV(단상 전류는 3.75kA)로 케이블 외경 150mm가 최적의 해인 것으로 판단된다. 이와 같은 형태의 케이블은 비스무스계(Bi) 2223은 시스템도체(테이프 상)를 고려하여 액체 질소 온도의 임계 전류 밀도를 $10^6 A/cm^2$ 로서 설계를 행하며 설계 레를 다음 표 2에 도시하였다.

3. 결 론

다음은 본 논문의 결과와 특징을 요약하여 설명하였다.

- (1) 관로형 소형 고온 초전도 케이블의 대도시 계통 적용을 위한 모델 계통 구성에 대하여 검토하였다.
- (2) 지중 케이블 종류별, 포설방식 별로 표준사용 관내경에 대하여 조사하였으며 그 조사 결과를 근거로

HTS 케이블을 기존 관로에 수납하기 위한 케이블 최대 외경을 산출하였다.

표 2. 1GVA 고온 초전도 케이블의 설계 레
Table 2. Example for design of HTS power cable(1GVA)

케이블	형태	3상 일괄형
정 격	정격 용량 정격 전압 정격 전류	1GVA 154kV 3.75kA
자 계	임계 전류 밀도 통전도체상 자계	$10^6 A/cm^2$
초전도선	사양	$0.24mm^t \times 3.8mm^w$
절연층	방식	저온절연방식
크 기	FORMA 내경 통전도체상 외경 월드 도체 내경 케이블 코어 외경 내측 단열관 내경 내측 단열관 외경 외측 단열관 내경 케이블 최대 외경	22mm 30mm 42mm 46mm 112mm 120mm 143mm 150mm
손 실	도체 손실 유전체 손실 외부 열침입열	1~3W/m 0.01W/m 1.01W/m
액체 질소 냉각	냉각 거리	왕복 5km

(3) 우리나라 전력시스템의 전력수요 증가율을 고려하여 30년 후의 대도시 지역에 적용 가능한 HTS 케이블의 송전용량을 검토하였다.

(4) 냉각관점과 절연관점을 고려하여 고온 초전도 케이블의 전압계급별 케이블 최대 외경을 산출하여 국내 기존 관로에 포설 가능한 전압계급을 검토하였다.

(5) 냉각 시스템을 중심으로 하는 HTS 케이블 전체 시스템의 구성을 검토하였다.

(6) 검토된 전압계급과 송전용량을 기준으로 고온 초전도 케이블의 설계 예를 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 최상봉외. "소형 고온 초전도 전력케이블의 기대효과와 경제성 평가", 한국초전도·저온공학회 3권 2호, 2001년 11월. pp. 10-14
- [2] Tsukushi Hara et al. "Engineering Evaluation of High-Tc Superconducting Cables by Bean Model and its Assessment of Application to Urban Power System", TIEE, Japan, Vol 110-B, No 1., 1990 pp. 58-66
- [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] Sang Bong Choi et al, "Long-term Load Forecasting in Metropolitan Area considering Economic Indicator", Trans. KIEE, Vol 49B, NO. 8, 2000.
- [6] Takeyoshi Kato et al, "Evaluation of total Transmission Loss and Refrigerating Energy to operate Superconducting Cables in a Future Metropolitan Electric Power System", T. IEE Japan, Vol.114-B, No. 12, 1994.



정성환(鄭聖煥)

1964년 03월 10일생, 1987년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 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, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 Facts & Power Quality Group 선임연구원



문영환(文英煥)

1956년 05월 13일생, 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년 Univ. of Texas Arlington 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 시스템제어 그룹장

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(成壽哲)

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