

HVDC에 대하여

김 세 일*

(*한전송변전처 제주-육지간전력계통연계 사업추진반장)

1. 머릿말

전기의 발견과 실생활에의 적용은 모두 직류에서 비롯되었으나 현재 대전력 계통에서는 대부분 교류 송전 방식을 사용하고 있다.

교류 송전 방식은 직류와 비교해 상대적으로 발전기 구조의 간단함과 고신뢰성, 변압기를 사용하여 원하는 전압을 용이하게 얻을 수 있는 점, 교류전류의 차단용 용이성 등에서 강점을 가지고 있기 때문이다. 반면에 교류 송전 계통내에서는 주파수가 같아야 함은 물론 동기가 유지되어야 하며 장거리 송전 계통의 경우 송전선로의 허용전류(Thermal)용량보다 송수전단간 전압 상차각 차이에 좌우되는 안정도 한계에 의해 송전가능 용량이 결정되는점, 전력수송에 따른 무효전력 공급과 소모가 따르며 이에 따른 손실과 투자비, 정전용량 증대 및 유전체 손실 증가에 따른 장거리 케이블 송전의 한계점 등이 제한적인 요소로서 작용하고 있다.

직류 송전은 차단의 문제, 고조파 원이라는 점, 변환기에서의 무효 전력 공급 문제 등의 결점을 갖고 있으나 본질적으로 큰 장애 요소인 변환기 가격의 저렴화, 즉 경제적 타당성만 입증되면 교류계통에 앞으로 확대 적용할 수 있는 여지가 많다고 본다. 본고는 직류송전의 개요 및 그 기술특성에 관해서 간단히 기술하고자 한다.

2. 직류 송전 개요

2.1 역사적 배경

직류 송전의 효시는 1889년 프랑스의 R.Thury가 송수전단에 직렬로 연결된 직류발전기와 직류전동기의 형태로서 프랑스의 Moutiers와 Lyon사이의 약 200Km를 125KV 20MW용량으로 공급한 것으로 볼 수 있으며 이 스킴은 정전류 방식으로 기존 교류 계통의 보강을 겸한점, 역시 AC-DC 협조의 최초 선례로서 약 1937년까지 운전을 계속하였다. 본격적인 직류송전은 1954년에 상업운전 개시한 스웨덴 본토와 고트랜드 섬간의 연계로 수은정류기를 사용하였다. 그 이후 고트랜드 연계선이 성공적으로 운전되자 1961년 영국과 프랑스간 도버 해협에 해저케이블을 이용한 영-불 연계가 실현되었다. 유럽지역에서의 성공적인 직류송전 결과에 따라 1970년 미국에서는 송전거리 1,400km의 태평양 연안 남북연계(Pacific Intertie)가 건설되고 1972년 캐나다에서는 공장 900Km의 Nelson River 직류송전이 운전개시되었다. 소련에서는 1962년 공장 500Km의 Volgograd-Donbass간에 직류송전이 시작되었는데 이 당시까지 변환설비는 수은 정류기를 사용하였다.

1960년 후반부터 Thyristor Valve 소자가 발달됨에 따라 각국에서는 Thyristor Valve를 적극적으로 개발하기 시작하였다. 1970년대에 앞에서 언급한 스웨덴의 고트랜드 연계선에 기존 수은정류기와 직렬로 Thyristor Valve를 연결하여 용량을 20MW에서 30MW로 증설하는 것을 시발로 최초의 본격적인 Thyristor Valve는 1972년 캐나다 Eel River Project

로 변환설비 전체를 Thyristor Valve를 사용하여 건설되었다. 현재 단일 직류송전 계통으로 가장 큰 규모는 브라질의 Itaipu Project로 용량이 6300MW에 이른다.

2.2 직류송전의 적용 및 사례

직류송전 방식을 채용하게 되는 이유는 경제적 이유와 교류송전방식으로는 피할 수 없는 기술적 문제 때문이며 적용방식별 특징은 아래와 같다.

(1) 해저케이블 계통

교류 해저케이블로 송전시 충전전류에 따른 무효전력과 케이블 Sheath전류에 의한 손실때문에 송전용량이 저하하게 되며 특히 거리가 멀어짐에 따라 무효전력 자체가 케이블의 정격용량을 초과하게 된다. 이 경우 케이블 양단에서 Shunt Reactor에 의해 무효전력을 보상해도 케이블 중간부분의 내부과전압은 피할 수 없게 된다.

따라서 위와 같은 기술적 문제 해결과 직류해저케이블과 변환설비 투자비가 교류해저케이블 투자비보다 싼 경우 경제적인 관점에서 직류송전을 채용한다.

(2) 대용량 장거리송전

교류 장거리 송전선로의 경우 송전용량은 도체 허용전류용량, 전압강하 및 송전안정도 한계에 의해 결정된다. 즉 거리가 멀어질수록 송전용량은 줄어든다. 이를 개선하기 위하여 직렬 커패시터에 의해 전달 리액턴스를 줄여 송전용량을 증대시킬 수는 있으나 차동기 공진현상등 발전기에 바람직하지 못한 영향을 미치는 문제점이 있을 수 있다.

직류 장거리 송전선의 경우 송전안정도 문제에 의해 영향받지 않으며 전압, 전류에 있어 실효치와 평균치가 같으므로 절연이 저감되며 전선의 단면적이 절약되므로 직류의 경우 철탍과 전선의 규모가 동일 전력 수송시 교류가공선에 비해 적어지므로 선로투자비가 적게 된다. 이 경우도 해저케이블과 같이 선로 투자비 절감이 변환설비 가격을 충당할 수 있는 장거리 대용량 송전에 적용 가능하다.

(3) 비동기 연계

전력계통의 규모가 커짐에 전력계통간을 연결할 필요성이 대두된다. 이 경우 발전설비의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 전력생산비용을 절감할 수 있으며 설비를 양전력 계통간에 공유하는 결과가

되어 양전력 계통간 전력유통이 가능하다. 교류송전선으로 계통연계시 조류제어가 어렵고 연계가 유지되기 위해서는 양 계통간 동기수가 유지되어야 한다. 특히 양 계통간 주파수가 다른 경우는 연계가 불가능하며, 이 경우 직류송전계통을 채용하면 전력조류 제어가 용이하고 필요시 조류 반전도 가능하여 안정도 향상에 기여하게 된다.

(4) 대도시 지역 전력공급

도시지역에 전력공급시 규모가 커짐에 따라 계통단락용량이 증대하고 따라서 사고시 단락전류가 증가함에 따라 차단기 차단용량이 부족하게 되며 지락사고시 타지하 매설물을 손상하게 되며 유도장애가 발생한다. 대도시 지역내의 전력공급의 경우 케이블을 많이 사용하므로 직류송전을 채용하면 케이블의 비용 절감과 계통단락용량 증대로 인한 기술적 문제점을 해결할 수 있다. 또한 도시 규모가 커짐에 따라 케이블 경과지 확보가 어려워지고 있으며, 이때 기존 케이블 선로를 직류선로로 사용하면 용량을 증대할 수 있어 유리하다.

(5) 직류송전의 주요사례

(가) 스웨덴-고트랜드 연계

세계 최초의 수은 정류기를 사용한 스웨덴 본토와 약 100Km 떨어져 있는 고트랜드섬과의 연계로서 섬안에 화력 발전소를 건설하는 것과의 경제적 우위를 갖고 설치되었으며 현재 섬의 부하증가에 따른 증설(고트랜드 II)에 따라 기존 발전소는 거의 폐지 상태로 연계에 전적으로 의존하고 있다.

(나) 영불 해협

영불 해협의 연계는 양국간의 수요-공급 특성이 서로 보상적이라는 점, 즉 일부하 곡선이 서로 달라 Peak time이 상이한 점과 발전연료의 다원화, 원자력, 석탄, 기름 및 수력 등으로 양측은 서로 값싼 것을 취할 수 있으며 계통면에서 유럽에 통합이라는 배경을 가지고 건설되었다.

현지 두개의 bipole System으로써 약 2000MW의 용량을 가지고 있다.

(다) 볼고그라드-돈바스

이것은 최초의 가공 송전선로를 채택한 Scheme이며 기존 교류 계통의 보강을 위하여 건설되었다. 총 길이가 약 470Km의 용량 720Mw이며 2차대전후 소련에 흡수된 독일 기술자들의 힘입은바 컸다고 한다.

(라) 콘터 스캔

스웨덴과 덴마크의 전력유통을 위하여 해저 구

간 87Km가공 100Km로서 최초에는 Monopole 200 Mw로서 건설되어 현재는 총 bipole 500Mw의 증설이 완료되었으며 이것은 당시 양국의 교류계통 연계시 안정도 한계를 감안하여 채택된 연계이다.

(마) Pacific Intertie

미국의 태평양 연안 남북을 잇는 이 연계는 길이 1370Km용량 1440Mw로서 직류송전 형태중 전형적인 장거리 대용량 송전의 표본으로 이 연계는 또다른 교류 계통과 병렬 운전되고 있어 교류 계통에 나타나는 전력 동요 현상의 Damping역할도 담당하고 있으며 기본적으로 남서와 북서 지방의 부하와 발전의 계절적인 차이에 의한 당위성을 갖고 있다.

(바) Kingsnorth Scheme

이 Scheme은 대도시 지역 전력 공급의 대표적인 형태이며 단락용량의 증가없이 런던 부하중심지의 교류 계통 보강을 위해 약 82Km의 지중구간을 갖고 건설되었으나 현재는 런던 중심을 공급하는 400Kv 선로의 확장으로 운휴중에 있다.

(사) Nelson River

전형적인 장거리 대용량 송전의 형태로서 1800 MW(궁극적으로 6500Mw)를 약 900Km 떨어져 있는 수력 발전소에서 부하 중심지인 위니펙까지 공급하는 형태로서 Valve냉각 시스템이 공냉식에서 수냉식으로 전환되는 계기가 되었다.

(아) Sakuma 연계

일본의 50hz 계통과 60hz 계통을 연계하는 비동기 연계로서 Sakuma 연계외에 역시 일본의 Shin-Shinano가 50hz/60hz의 연계이며 파라파리와 브라질 역시 50hz/60hz 변환의 Acaray스킴을 갖고 있다.

3. 직류 송전 기술의 개요

직류 송전에 적용되는 기술의 범위는 직, 교류를 변환하는 변환 장치와 변환시 발생하는 고조파 처리를 위한 Filter 설비, 또한 위상제어에 따른 무효 전력의 수급 문제가 기본이라고 볼 수 있다.

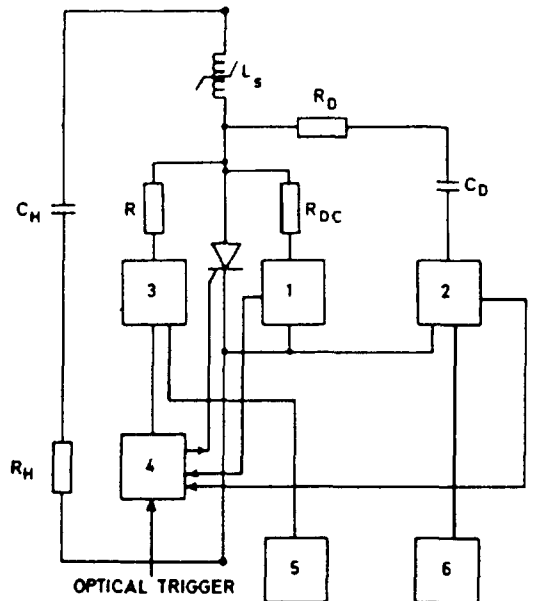
3.1 변환 장치(Thyristor Valve)

변환 장치의 핵심은 사이리스터 밸브와 이에 따른 제어 및 보호회로에 있으며 직류 송전에 사용되는 Valve로는 수은 아크밸브(Mercury Arc Valve)와

사이리스터 Valve가 있으며 사이리스터 Valve는 수은 Arc Valve에서 생기는 이상현상(Arc back)이 없고 보수도 간단하고 회로구성도 정격전압, 전류의 선택이 비교적 자유로와 현재 대부분의 HVDC 연계는 사이리스터 Valve를 채용하고 있다. 냉각 방식에 따라 공냉식, 수냉식, 유냉식이 있으며 사이리스터 개발 초기에는 공냉식을 많이 사용하였으나 냉각 효율이 좋은 수냉식이 근래에는 많이 사용되고 있으며 유냉식은 일본에서 사용실적이 있으나 별로 사용되고 있지 않다.

사이리스터 Valve는 요구되는 직류전압에 따라 사이리스터를 직렬 연결 사용하며 그림1에서 전형적인 사이리스터 회로를 보여준다.

사이리스터 보호는 궁극적으로 사이리스터를 안전하게 도통시키는데 있으며 그 제어 회로는 Pulse발생 시스템 및 사이리스터 전류시점 호 순간의 Mismatch 등으로 인하여 발생하는 과전압을



- L_s - SATURABLE REACTOR
- C_D, R_D - AC VOLTAGE GRADING AND DAMPING CIRCUIT
- R_{DC} - DC VOLTAGE GRADING RESISTOR
- C_H, R_H - HIGH FREQUENCY VOLTAGE GRADING
- 1 - THYRISTOR VOLTAGE MONITOR
- 2 - POWER SUPPLY UNIT
- 3 - BREAK OVER DIODE (BOD)
- 4 - GATING AND LOGIC UNIT
- 5 - GATING STATUS LED
- 6 - THYRISTOR STATUS LED

그림 1. 전형적인 Thyristor Valve Module

Damping하는 회로와 사이리스터를 강제 도통시키는 BOD회로 및 사이리스터의 di/dt 저감용으로 채용된 Saturable 리액터 등이 주요 구성원으로 되어 있다.

변압기의 Valve 접속 방식으로는 Valve의 역내전압, 변압기의 이용율을 고려할 때 삼상 bridge 접속을 기본으로 한 6pulse 접속과 12pulse 접속이 있으며, 6pulse 접속시는 $6n \pm 1$ ($n=1, 2, 3$) 차의 고조파가 발생하므로 Filter 설치가 많아지며 12pulse 접속시는 $12n \pm 1$ ($n=1, 2, 3$) 차의 고조파가 발생하여 6pulse에 비해 고조파 발생이 줄어들어 대부분 12pulse 방식을 채택하고 있다.

고조파를 줄이기 위한 Filter 설비는 보통 변환 장치의 무효전력 공급을 검하며 필터뱅크 개수의 결정, 뱅크당 무효 전력 용량, 필터 형식의 채용등은 계통의 에너지 손실 평가액, 공급 용량에 따른 무효 전력 균형 비율, 개폐시의 전압변동 등을 고려하여 결정하며 일반적으로 커패시터 뱅크를 추가하여 무효전력 균형을 잡아주는 예가 많으며 커패시터 뱅크 추가시 고조파의 가능한한 저감을 위하여 고차 고조파에 공진시켜 사용한다.

변압기에 입력되는 교류 전압에 역상분(Negative Sequence) 전압이 포함되어 있으면 시스템에 비정상 고조파를, 즉 직류측에 2차 고조파 전압, 다시 교류계통 측에 3차 고조파 전류를 유발함으로 입력 교류 전압의 평형에 주의하여야 한다.

3.2 변환기용 변압기

변환기용 변압기는 변환기가 일반적으로 삼상 Bridge 접속방식을 사용하기 때문에 Y 및 Δ 결선을 사용하며, 12Pulse 시스템시는 5,7차 고조파 상쇄를 위해 Valve 측에 Δ 및 Y 결선을 가져야 하며 단상 및 삼상의 구분은 예비 변압기를 포함한 경제적인 관점에서 선택된다.

일반변압기와 비교할 때 권선에 고조파를 많이 포함한 전류가 흐르기 때문에 변압기간, 혹은 상간의 리액턴스 오차를 최소한으로 줄여 비정상 고조파를 억제하여야 한다. 또한 Valve의 사고나 전류 실패시 과도한 고장 전류가 흐르므로 이것을 제한하기 위해 변환기용 변압기의 리액턴스는 일반 변압기보다 수 % 크게 한다.

실제적으로 위의 고장 전류를 제한할 수 있는 것은 선로의 서지임피던스와 변압기 리액턴스, 평활

리액터의 리액턴스이며 평활리액터의 리액턴스는 실제로 고장전류의 제한이라는 점과 DC 선로에 있어서 기본과 공진이 일어나지 않도록 결정되어진다.

다. 제어 및 보호

직류 송전의 제어는 기본적으로 순, 역변환기의 gate pulse 위상제어에 의하여 2차적으로 변환기용 변압기의 Tap 제어를 사용한다. 두 제어는 각기 개별적으로 운영되면서 상호 보강되는 특성을 갖는다.

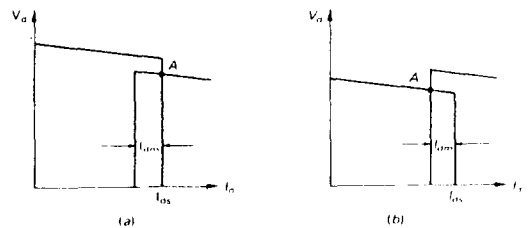
제어 방식으로 정전류, 정여유각, 정전압, 정전력 및 주파수 제어등이 사용되며 그 기본이 되는 것이 정전류 제어와 정여유각에 의한 정전압 제어이다.

일반적으로 제어는 크게 두가지, 즉 순변환기에서 정전류 제어를 하고 역변환기에서 정전압 제어를 하는 방식과 그 역의 방식 두가지로 구분되어진다.

앞의 방식은 순변환기에서 설정치 Ids의 정전류 제어를 역변환기에서 순변환기보다 약간 작은 전류 설정치와 아울러 여유각 r 의 정여유각제어를 함으로서 이루어진다. 이에 양변환기의 전압전류 특성은 그림2와 같고 이때 교점 A는 이런 제어 특성을 가진 직류 송전 계통의 동작점이 된다.

역의 방식은 순변환기에서 정전압을 유지하며 역변환기에서 전류제어를 하는 방식으로 이것은 전류 실패에 관해서 순변환기에서 전류제어를 하는 방식보다 훨씬 안정적이나 반면에 무효 전력의 공급량이 많아지는 등 효율성이라는 측면에서 약점을 가지게 된다.

사이리스터 제어의 근본인 점호방식은 각 상별 점호 및 등간격 점호방식의 두 종류가 있는데 각 상별 점호방식은 각 사이리스터마다 점호 순간을 개별적으로 결정하는 것으로서 장점으로 비대칭 전압이나 왜형파의 경우에도 최대의 직류전압을 유지할 수 있



(a) Under Rectifier Current Control
(b) Under Inverter Current Control

그림 2. 변환기의 Steady State Characteristics

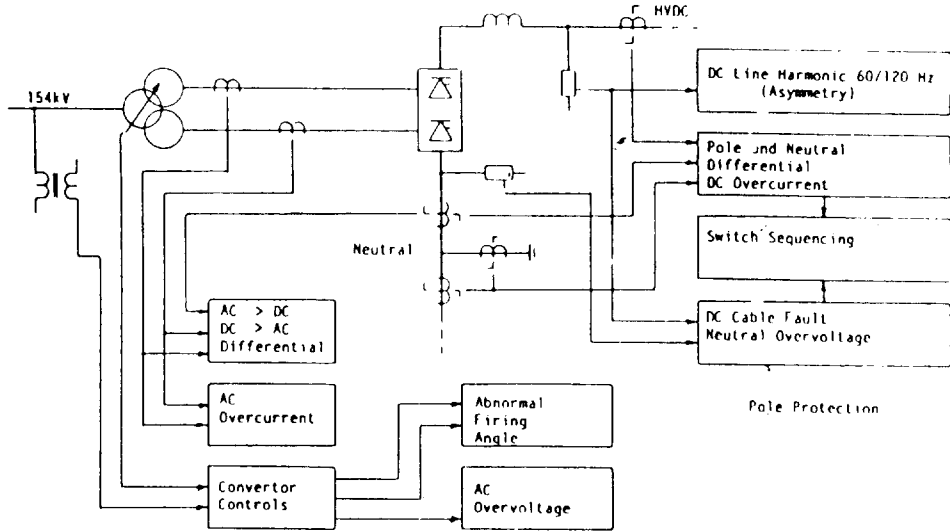


그림 3. Converter Protection Scheme

는 점이나 상대적으로 고조파 확대의 문제점을 갖고 있어 최근에는 거의 점호순간이 같은 간격으로 주어 지는 등간격 점호방식을 선호하는 추세로 되고 있다.

직류 송전 계통에 일어나는 고장의 종류는 크게 양측 변환소 교류 모선에서 일어나는 고장과, DC선로의 지락, 변환기에서의 전류실패 세가지 정도로 나눌 수 있으며 직류 송전의 보호는 이와 관련하여 제어 시스템과 연결되어 시스템 전체를 운영한다고 보여진다. 보호계통은 일반적으로 크게 2계열화 되어 있으며 원칙적으로 고장시 시스템의 트립, 국부적으로 사이리스터의 안전한 개폐에 주안점이 있다고 볼 수 있다.

고장감지도 시스템의 특성상 교류 및 직류측 전류의 비교를 통해서 혹은 전압강하율 및 전압 강하 수준이 직류측이 상대적으로 빠르고, 많이 일정하게 강하되는 점등을 이용하여 적용하고 있으며, 그림3은 일반적인 사이리스터 보호스카를 나타낸다.

4. 직류송전의 우리나라 계통 적용

4.1 제주도와 육지계통 연결의 필요성

현재 제주도의 전력산업은 지역 특수성에 의하여

소규모(10MW이하)의 고립된 전력계통을 유지하고 있으므로 연료비 부담(100% 유류 발전)이 높고 소규모 전력생산에 따른 고정비 부담도 높아 그 발전원가가 전국에 비해 약 2배 이상 높으며 최근의 제주도 전력수요의 급성장 및 유가부담으로 인하여 적자폭의 증대가 예상되고 있다.

이에 대한 대책으로 제주-육지간 직류송전계통을 건설하여 육지와 전력을 상호 융통함으로써 제주도의 전력수요 증가에 대처하고 발전원가를 절감할 필요가 있게 되었다.

4.2 주요 시설 계획

(1) 정격전압 및 용량

전압 : $\pm 180KV$, 용량 : $150MW \times 2$

직류송전계통의 전압 결정의 중요 요소는 변환기의 투자비, 해저케이블 투자비 및 손실이 검토대상이 되며 일반적으로 동일 용량 송전시 변환기기는 전압이 높을수록 가격이 비싸지며 해저케이블은 반대로 전압이 높을수록(경제적 절연한계 이내에서) 싸진다. 즉 전압별 변환기기 및 해저케이블 투자경비, 손실경비를 고려하여 위의 전압이 선정되었으며 용량은 현 제주도 부하상태와 증가추세, 고장시 공급지장 및 단위용량 증가에 따른 추가경비를 고려하여 결정하였다.

(2) 주기기 시설계획

- (가) 변환장치 : 제주 및 해남 2개소
Valve 형식 : Thyristor Valve 수냉각 방식
제어방식 : 12 Pulse 광점호 방식
- (나) 변환기용 변압기
3상 3권전식 5대(각 변환소 2대, 예비 1대 포함)
- (다) 해저케이블
공장 : 96Km 2회선
종류 : Solid Type-Massimpregnated Paper Insulated Cable
외피보호 : 철선 및 강대 개장
- (라) 육상케이블
변환소 : 양육부간 5Km 2회선
종류 : 해저케이블과 같으나 철선 및 강대 개장 불요
- (마) 제어용 통신설비
전력용 케이블과 함께 광통신 케이블 설치
변환소 제어 통신용으로 사용하며 잔여회선은 일반 통신소요에 대응

5. 결 론

직류 송전의 여러가지 장점이 일찍부터 인정되었고 해외에서는 이에 따른 연구와 개발이 이루어져 현재 실제 운전되고 있는 시스템은 50여개소가 넘는데 그동안의 운전실적으로 이 시스템의 기술적, 경제적 타당성을 충분히 입증했다고 볼 수 있다.

직류 송전에 있어서 당면문제는 변환설비의 가격이 아직도 고가라는 점인데 사실 HVDC기기의 가격은 계속적으로 하락하여 왔으며, 지금은 20년전에 비해 60% 수준이라고 볼 수 있다. 앞으로도 꾸준한 가격저하로 직류송전의 경제적 타당성을 좀더 높여리라고 본다. 또한 직류 차단기의 개발, GTO 사이리스터의 대전력 계통 채용 등이 좀 더 많은 전력 계통에 직류 송전의 입지를 마련하리라고 본다.

우리나라는 제주-육지간 전력 계통 연계에 최초로 적용된 사업이 현재 진행중이며, 유럽대륙이 전력 계통에 관한 한 나라인 점을 감안해보면 우리도 차체에 인근국가간 전력 연계 필요성이 생겼을때 이에 대처해 나갈 수 있도록 해야 할 것이다. 또한 직류 송전 기술은 초전도 저장 장치, 연료전지 사용시 기본 기술로서 이 분야에 대한 기술 축적도 병행하여 이루어져야 할 것이다.



김세일(金世一)

1941년 3월 3일생. 1966년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1966년 한전 입사. 현재 한전 송변전처 제주-육지간 전력계통 연계사업추진반장.