



# HVDC 국산화 추진 현황

**문 봉 수**  
한국전력공사 계통기획실 HVDC 팀장



**정 용 호**  
LS산전 HVDC 연구실장



## 1. 개 황

고압 직류 송전, 즉 HVDC(High Voltage Direct Current)는 발전소에서 발전된 교류 전기를 높은 전압의

직류로 변환하여 수백 ~ 수천km 떨어진 곳으로 송전 하거나, 50km이상 떨어진 섬과 육지를 해저 케이블을 통해 송전한 후에 이 고압 직류를 다시 교류로 바꾸어서 사용하는 송전 시스템이다. 기존의 AC 송전 시스템과

비교하여 송전 손실을 줄이고, 장거리 대용량의 전력 전송, 주파수가 다른 지역이나 국가 간 전력망 연계, 각 나라 별 지역별 계통 분리, 신재생에너지의 계통 연계 등 그동안 해결하기 어려웠던 문제점들이 HVDC를 통해 해결되고 있으며, 세계 각국에서 HVDC 시스템을 활발하게 적용하고 있다.

본 기고에서는 전류형 HVDC의 전 세계적인 발전 방향과 시장 흐름을 살펴보고 국내 기술개발 현황, 신재생 에너지와 전류형 HVDC 시스템의 연계, 그리고 앞으로 우리나라가 나아갈 방향에 대해서 살펴보기로 한다.

## 2. 현황

### 가. 전류형 HVDC 시장

전 세계적으로 HVDC 시장점유율은 표 1에서 보듯이 ABB 50%, SIEMENS 30%, ALSTOM 15%, 러시아와

일본 등이 5%를 차지하고 있다. 운전 중인 세계 HVDC를 살펴보면 전류형이 전체의 80%, 전압형이 20%를 차지하고 있으며, 전체 설치용량에 있어서는 전류형이 98%를 차지하고 있다.

현재 세계 HVDC시장에서는 3대 주요 HVDC 제작사가 치열한 경쟁을 벌이고 있으며, 최근에는 중국 중앙 정부의 전폭적인 지원을 받고 있는 중국 기업체들의 활동이 눈에 띄고 있다. 중국의 경우에는 거대한 HVDC 시장을 미끼로 선진국으로부터 핵심 기술을 이전받은 후 중국 내 Project 수행을 통해서 기술 자립화가 상당부분 진전되었고, 부분적으로 중국의 HVDC 제품이 해외시장 진출을 적극적으로 도모하고 있는 상황이다.

특히 중국 정부가 아프리카 지역의 자원 확보를 위해서 이 지역에 경제 원조를 하며 현물 형태로 전력 계통 인프라망을 제공하면서 HVDC 시스템까지 수출하는 형태로 세계 시장에 진출하는 전략을 채택하고 있다.

[표 1] 세계 HVDC 운전 현황

형 식	제작사	Project 수	용 량 [MW]	송전선로		비 고
				해저송전	가공송전	
전류형	ABB	53	57,486	23	17	-
	SIEMENS	25	35,095	6	2	-
	ALSTOM	21	21,254	4	-	-
	TMEIC	8	3,850	3	-	Hitachi 공동
	GE	6	2,040	1	-	SIEMENS 합병
	Russia	4	3,465	-	-	-
전압형	ABB	13	2,514	5	-	-
	SIEMENS	1	400	1	-	-
합 계	-	131	126,104	43	19	-

누적 HVDC project용량[MW]

누적 HVDC 용량 점유율[%]

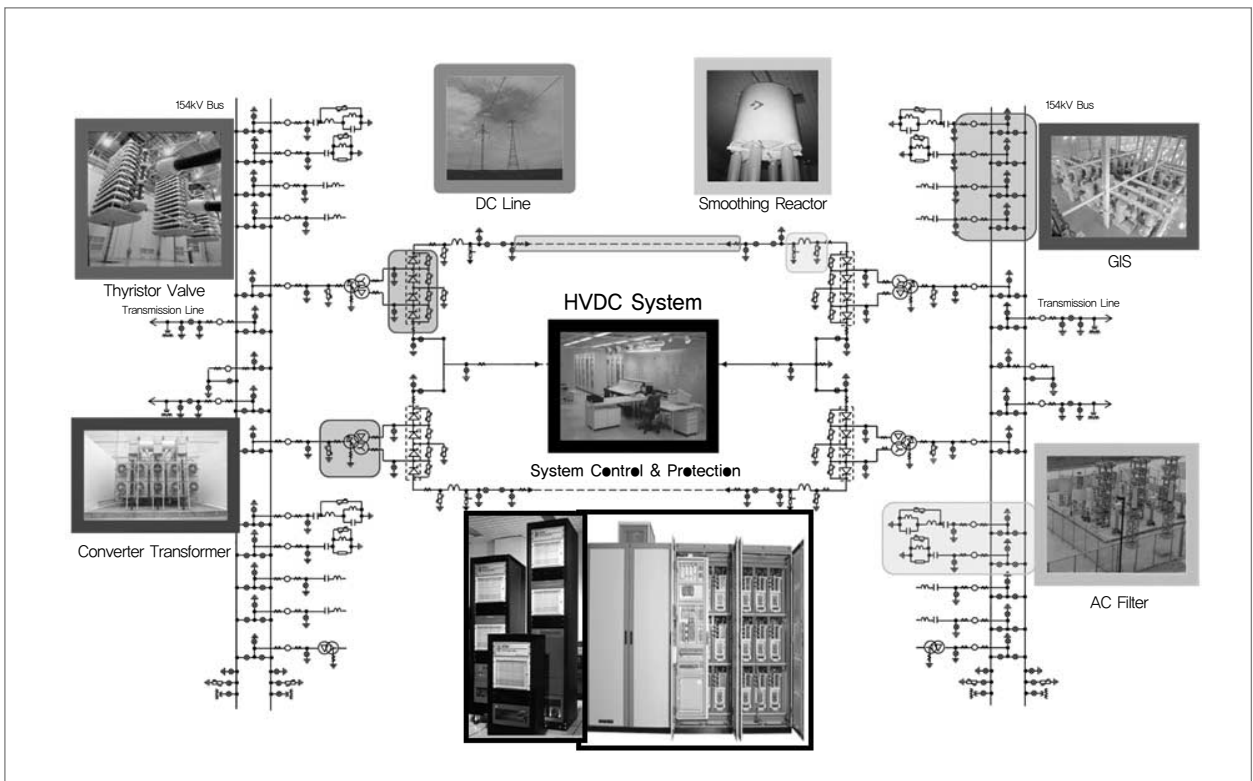
#### 나. 전류형 HVDC 시스템 국산화 기술 개발

우리나라는 1998년 ALSTOM(구 AREVA)사를 통하여 제주와 해남 사이에  $\pm 180\text{kV}$ , 300MW급 HVDC를 설치하여 현재 운영 중에 있다. 또한 올해 초 제주-진도 간  $\pm 250\text{kV}$  400MW급 HVDC시스템 건설을 시작하여 2012년 초에 준공을 목표로 진행 중에 있다. 그러나 아직까지 국내 자체 기술을 이용하여 HVDC 시스템을 설계하거나 국내 기술을 통한 기기 제작을 이용하여 건설한 경험은 전혀 없는 상태이다.

그동안 한국전력과 전력연구원의 주도적인 연구 활동을 통해서 HVDC 시스템 전반에 대한 설계, 운영, 모델링, 시뮬레이션 등 엔지니어링 기술을 보유하게 되었고, 2009년 한국전력이 미래 성장 동력 분야 중 하나로 HVDC를 선정하면서 이에 대한 기술 국산화가 가속화 되었다.

2009년 11월 한국전력은 LS산전, LS전선, 대한전선과 공동으로 HVDC 국산화 기술개발 협동연구를 공식적으로 시작하였다.  $\pm 80\text{kV}$  60MW급 Pilot HVDC 시스템 건설(제주도)을 통해서 HVDC 핵심기술에 대한 국산화를 착수하였고, 2012년 3월에는 HVDC Pilot 시스템에 대한 실증 운전을 목표로 진행 중에 있다. 그 다음 단계로는  $\pm 250\text{kV}$  및  $\pm 500\text{kV}$ 급 기술을 단계별로 확보해 나간다는 전략을 수립하여 각 기술 분야에 대한 한국전력과 민간 기업의 역할을 정하여 기술 국산화를 진행하고 있다.

그림 1은 전형적인 HVDC 시스템 구성도를 보여 주고 있으며, 이 구성에서 HVDC 관련 핵심 기술은 ▲시스템 설계 기술 ▲HVDC Control & Protection 기술 ▲HVDC Thyristor Valve 기술 ▲Converter Transformer 기술 등이 있다.



[그림 1] HVDC 시스템 구성도

[표 2] HVDC 시스템 설계 확보 기술

HVDC 시스템 설계 검토			
검토 항목	목적	필요 데이터	시스템 설계 기술 확보
기본설계	시스템 정격 선정	조류계산 데이터	기본설계 보고서
송전용량	DC 송전용량 결정	조류계산 데이터	60MW송전용량 결정
DC 송전전압	DC 송전전압 선정	선로 및 변환소 자료	DC +/-80kV 결정
시스템 단선도	주요 기기/배치도 작성	기기 수량, 연결도	HVDC단선도
주회로 파라메타	HVDC 회로도 작성	운전조건,	메인회로 설계도
밸브정격 설계	밸브의 전기적 용량선정	AC스위칭 서지데이터, 사이리스터 특성데이터	밸브제작 사양 보고서
제어시스템 설계	기능설계서 개발	다이나믹 성능 설계서 요구사항	제어시스템 제작 사양 보고서
변환용 변압기	변압기 기능설계서	AC계통 전압특성	용량산정, 탭수 산정
AC 필터 설계	고조파특성, 무효전력 만족	고조파 스펙트럼	AC고조파 필터 설계
DC고조파 분석	공진분석	DC선로/기기 데이터	DC 공진해석보고서
절연설계	변환소, 기기 절연설계	계통 과도전압 데이터	주요 기기 절연레벨, 피뢰기설계보고서
AC/DC기기 정격 설계	기기정격 산정	서지해석 데이터, 기기 특성데이터	AC/DC기기 정격산정
안정도 및 과도 해석을 위한 컴퓨터 모델 개발	HVDC연계 과도 및 상세 운전 특성	조류데이터, 제어블럭도, 보호시스템 데이터	PSS/E, PSCAD 데이터

■ HVDC 시스템 설계 기술

HVDC시스템 설계 기술은 크게 두 단계로 구분된다. 첫 번째는 개념 설계 단계로써 시스템 성능에 대한 요구 사항 결정, 시스템의 정격 선정, DC 송전용량/전압 결정, DC연계점 위치, 상세 단선도 작성 등을 포함한다.

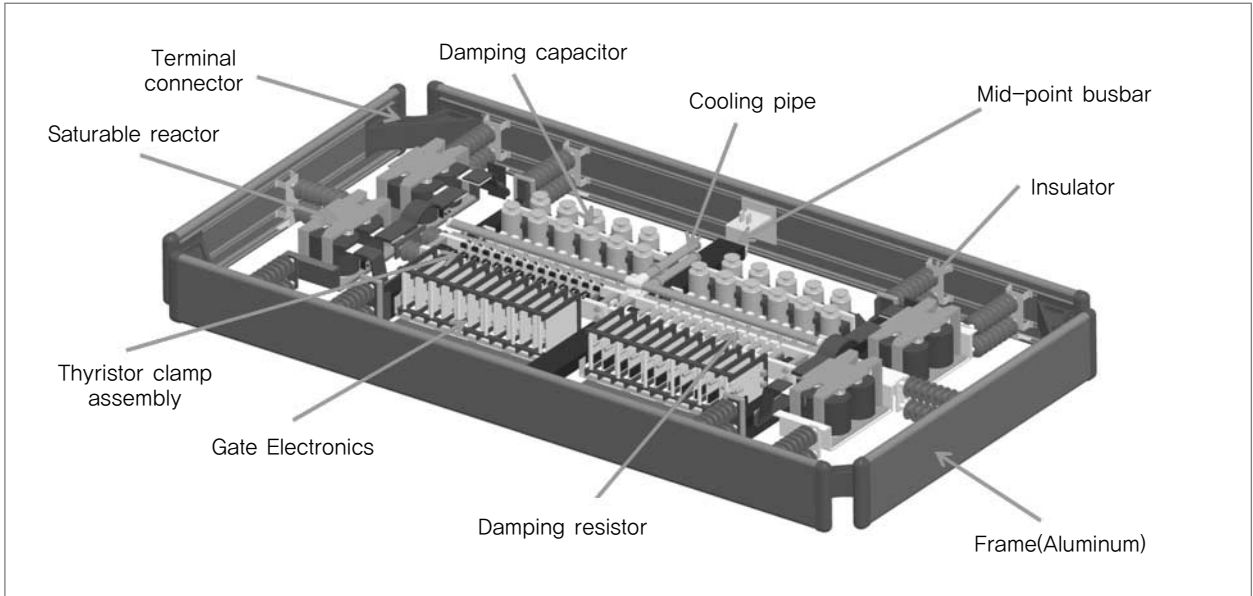
두 번째는 상세 설계 단계로써 개념 설계에서 제시된 송전용량 전송을 위해 필요한 무효전력 보상장치 설계, AC필터 설계, 제어 시스템 제작사양 설계, Valve(교류를 직류로 바꾸는 전력용 반도체 스위치) 제작사양 설계, 기기 간 절연 협조, AC/DC Yard기기 규격 설계 등을 포함한다. 현재 진행 중인 ±80kV 60MW급 HVDC 실증단지를 구축하는 프로젝트의 주요 시스템 설계 기술 결과는 표 2와 같다. 이번의 Pilot HVDC 시스템 설계를 통해서 기반 기술은 모두 확보하였고, 향후 1GW급

이상의 HVDC 시스템 설계를 통해 자체 기술수준을 더욱 향상시킬 예정이다.

■ Thyristor Valve

사이리스터 밸브는 HVDC 시스템의 핵심 기술 중 하나이며, 교류를 직류로 변환시키는 전력변환기의 역할을 하고 있다. 현재 ±80kV/60MW HVDC 실증 적용을 위해 LS산전에서 자체적으로 국산화 개발을 진행하고 있다.

국산화를 위해 개발된 HVDC 사이리스터 밸브는 그림 2와 같이 Thyristor, 스너버 회로, 게이트 유닛, di/dt 리액터, 냉각 파이프, 외부 프레임으로 구성되어 있다. 그림 2의 밸브 모듈은 80kV/400A급 시스템에 적용 가능하고, ±250kV/200MW HVDC 시스템까지



[그림 2] HVDC Thyristor Valve 모듈 구성도

[표 3] Thyristor Valve 절연시험 설비 개요

	종류	AC 내압기	DC 내압기	Impulse 내압기
		사양	600kV	1500kV
절연 시험 설비	주요 구성품	① 고압시험용 변압기 ② 고속 차단 장치 ③ 용량성 분압기 ④ PD측정용 LV & HV필터 ⑤ PD측정시스템	① 사이리스터 제어기 ② 변압기 ③ DC발생기 ④ 내장형 저항성 분압기 ⑤ 부분 방전용 고압 필터	① 제어 및 측정시스템 ② 제어 및 충전장치 ③ 임펄스 발생기 ④ 용량성 분압기 ⑤ 저항성 분압기
	외형			

적용이 가능하다. 향후  $\pm 250\text{kV}/1000\text{MW}$ ,  $\pm 500\text{kV}/2000\text{MW}$ 까지 적용 가능한 Valve를 단계별로 국산화할 예정이다.

HVDC 밸브를 개발한 후에는 실제 시스템에 적용하기 이전에 Type Test라는 과정을 통해서 개발품에 대한

절연 및 성능시험을 반드시 거쳐야 한다. 절연시험(Dielectric Tests)은 개발된 밸브가 실제 상황의 고전압에 노출 되었을 때의 특성을 검증하기 위한 시험이며, 동작시험(Operational Tests)은 밸브의 전압 및 전류 스트레스, 턴온과 턴오프 시 성능을 검증하기 위한 시험이다. LS산전은 국내 최초로 DC800kV 급 HVDC에

사용될 Thyristor Valve를 시험하기 위한 HVDC 전용 공장을 준공하였으며 표 3은 LS산전 HVDC공장에 설치한 절연시험 설비 내역을 보여 주고 있다.

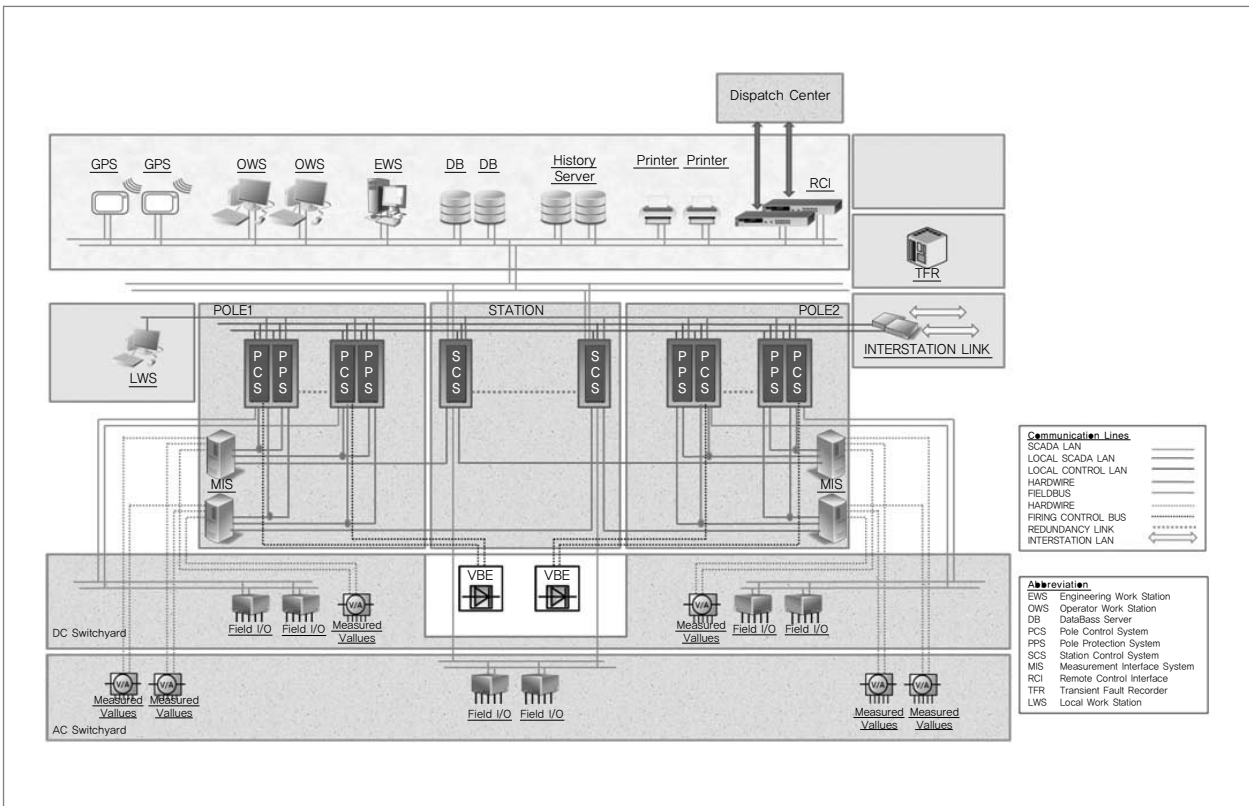
■ Control and Protection System(C&P)

HVDC 변환소의 제어 시스템은 그림 3과 같이 SCADA Level, Controller Level, Field Level의 3개 계층으로 구성된다.

SCADA Level에서는 운영자가 시스템을 감시 및 운영에 사용하는 OWS(Operator Workstation) · EWS (Engineering Works Station)는 운영자가 필요로 하는 HMI 화면 작성, 제어, 보호 알고리즘을 작성하여 네트워크를 통하여 제어기에 적용한다. DB Server는 제어기에서 취득된 값과 이벤트 정보를 수집 및 저장하며, 방대한 양의 데이터를 효율적이고 장기적으로 관리하기

위해서 History Server가 사용된다.

제어기 Level에는 Station 제어기(SCS: Station Control System), Pole 제어(PCS: Pole Control System) 및 보호(PPS: Pole Protection System) 기능을 담당하는 제어기와 제어기에서 사용하기 위한 AC 및 DC 영역의 값을 실시간으로 취득하는 측정기기(MIS: Measurement Interface System)가 있으며, 시스템의 신뢰성을 높이기 위하여 모두 이중화로 구성된다. LWS(Local Workstation)는 제어기 Level에서 SCADA와 별개의 운용을 필드 Level은 HVDC 변환을 위한 Valve와 변압기, AC/DC 필터 및 AC/DC 스위치로 구성된다. HVDC 시스템의 제어기는 그림 3과 같이 계층 구조로 구성되며 SCS(Station Control System), PCS(Pole Control System), PPS(Pole Protection System) 세 종류가 있다. SCS은 변환소 AC 영역의 무효 전력



[그림 3] HVDC Control & Protection 구성도

공급과 특정 고조파 상쇄 기능을 담당한다. PCS는 DC 전력 제어 기능을 수행하고, PPS는 DC 영역에 위치한 장비들의 보호 기능을 담당한다. COL(Change Over Logic)은 각 제어기의 진단 정보를 수집하여 이중화로 구성된 제어기의 Active/Standby를 결정하며 시스템 안정성을 높이기 위하여 이중화로 구성된다.

이중화된 제어기는 동시 Run 및 동시 출력 방식을 채택하며, I/O 출력 보드는 Active 제어기에서 내려온 신호만 필드 장비에 최종 출력한다. 이번의 HVDC Pilot 시스템 개발을 통해서 국산화가 진행 중이며, 2012년까지 국내에서 자체 개발한 C&P에 대한 성능 검증을 마칠 계획이다.

#### ■ HVDC 변환용 변압기(Converter Transformer)

HVDC 변환용 변압기는 교류, 직류 및 고조파 성분이 혼재하기 때문에 AC 변압기와 다른 구조 및 지속 설계 등이 요구된다. 특히 과도구간에 발생하는 기생 커패시턴스 양단에 2배의 과도 전압이 걸리기 때문에 절연 설계에 대한 특별한 Know-how가 요구된다.

LS산전은 배전급 변압기부터 초고압 변압기 분야까지 설계, 제조 능력을 확보하고 있으며  $\pm 80\text{kV}/60\text{MW}$



[그림 4] HVDC Converter Transformer

HVDC용 변환용 변압기(Converter Transformer)를 설계, 제작, 개발 시험을 완료 하였고, 그 결과 그림 4와 같이 HVDC용 변압기를 지난 10월에 생산하였다.

이 기술을 바탕으로 단계별로 DC 250kV, DC 500kV 급에 사용될 Converter Transformer도 국산화해 나갈 예정이다.

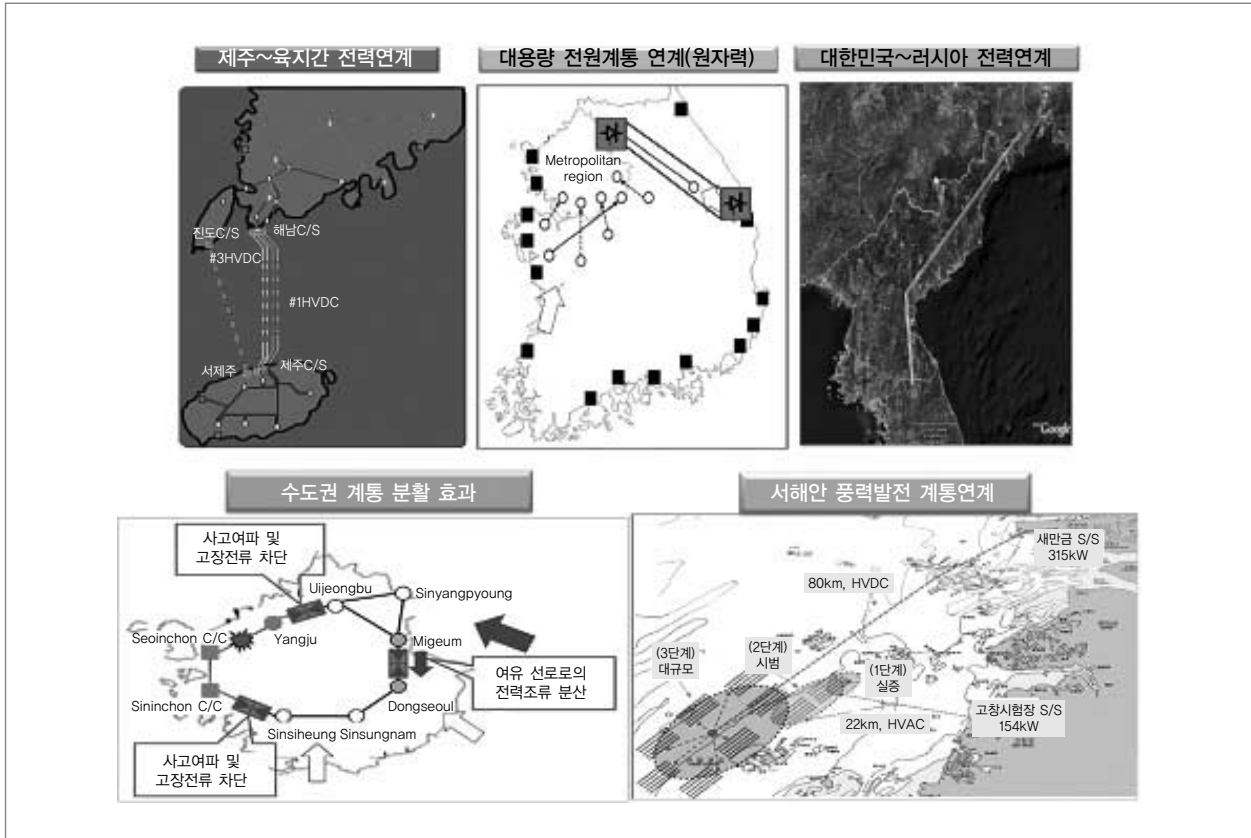
### 3. 전망

#### 가. 신재생에너지 연계 대안으로서의 HVDC

녹색성장을 위한 신재생에너지원의 보급 확대는 송전과 배전시스템의 안정성 확보를 필요로 하며, 최근 논의되고 있는 스마트그리드의 필요 이유도 풍력발전을 비롯한 신재생에너지원의 가변적인 발전출력 문제를 전력망 차원에서 해결해 신재생 에너지원의 전력시스템 연계를 원활하게 하는 것이다. HVDC를 통한 연계는 대규모 신재생에너지원의 유연한 전력시스템 연계를 위한 현실적인 대안으로도 활용되고 있다.

#### 나. 남북한 계통 연결 시 최적 대안

지난 2005년 대북송전 논란이 사회적 이슈로 부상한 적이 있다. 어떻게 전력을 지원할 것이냐가 가장 큰 논란거리였는데, 그 대안이 바로 HVDC 방식이었다. 이는 북한의 전력계통의 경우 시스템 주파수가 일부 지역이 60Hz로 남한과 같아 AC로 연결하는 방식도 가능한 방법으로 보였다. 하지만 북한의 전기 품질이 매우 불안해서 남북한 직접적인 AC 연결은 차후에 발생할 전력 불안정의 문제점을 사전에 차단하는 DC 전송이 최적 대안이었던 것이다. 특히 전력계통이 극심하게 불안한 북한에서의 전력계통 문제 발생 시 남한으로 파급될 수 있어 이에 대한 대비책이 반드시 필요하다. 따라서 일정한 전력을 공급할 수 있는 변환소를 설치,



[그림 5] HVDC 시스템 활용 전망

HVDC 방식으로 평양 또는 일정지역까지 전송하는 방안이 최적 대안으로 떠오르고 있다.

협력하는 것이 이 문제를 풀 수 있는 유력한 수단인 하나로 인식되고 있다.

**다. 동북아 계통 연계 시 최적의 효과**

전력수요는 세계적으로 증가하고 있다. 이러한 수요에 맞춰 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 저렴한 가격에 의한 1차 에너지원의 안정적인 확보, 설비 예비력 및 운전 예비력을 확보할 수 있는 신규발전설비 건설, 적절한 수송과 배전 능력을 확보하기 위한 송·배전설비의 건설 등이 적기에 이뤄져야 한다. 이러한 과정에서 수반되는 대기오염물질 배출을 최소화시킬 수 있는 방안을 강구해야 한다.

이 문제는 매우 해결하기 어려운 숙제이다. 그런데 국가 간 계통연계에 의해 전력을 융통함으로써 상호

러시아 ESI 및 미국 Nautilus Institute 발표 자료에 따르면 동북아시아의 국가 간 계통연계 시나리오에 대한 경제성과 환경 측면의 효용성에 대한 고찰 결과, 동북아시아 지역에서 ‘극동러시아~북한~남한’을 연결하는 연계계통이 이뤄질 경우 총 연간 23억 달러의 경제적 이득이 발생할 것으로 예상하고 있다. 문제는 이를 연계할 기술인데, 동북아시아 지역의 국가 간 계통연계를 고려하는 경우에 러시아와 중국의 계통 주파수(50Hz)가 우리의 계통 주파수(60Hz)와 다르고, 거리도 상당히 멀기 때문에 HVDC 송전 방식이 최적의 대안으로 떠오르고 있다.



여러 형태의 HVDC 시스템 활용 방안은 그림 5에 잘 나타나 있다.

#### 4. 결론

전 세계 뿐만 아니라 지금까지 우리나라를 둘러싸고 있는 러시아, 중국 및 일본에 비하여 우리나라는 상대적으로 DC 송전 분야의 기술수준이 매우 취약한 상태이다. 따라서 현 상황에서 신재생 에너지 연계 사업이나 동북아 국가 간 HVDC 연계사업 등을 추진하게 되면 우리의 입장은 치명적으로 약화될 수밖에 없는 실정이다.

이러한 상태가 지속될 경우, 세계적으로 시장이 빠른 속도로 신장되고 있는 HVDC 송전 관련 기술을 개발할

수 있는 기회를 상실하게 될 것이 우려된다. 앞서 잠시 언급한 바와 같이 2009년 11월 30일 한국전력, LS산전, LS전선, 대한전선이 공동으로 HVDC 국산화 기술개발 협동연구를 위한 양해각서(MOU)를 체결하고 HVDC 핵심기술 개발과 사업화에 공동으로 협력하기로 하였다.

이를 바탕으로 2012년 초까지 제주도내  $\pm 80\text{kV}/60\text{MW}$ 급 HVDC 실증단지를 구축하는 프로젝트를 착수 하였고, 변환 및 송전설비의 국산기자재 개발을 위한 협동연구를 진행하여 HVDC 기반 기술을 확보하고, 독자적인 직류송전기술을 확보할 계획이다.

현재 진행 중인 실증단지 프로젝트는 국내의 신규 HVDC 사업과 세계 HVDC 시장으로 진출할 수 있는 교두보가 될 전망이다. KEA