

**특집 : 전력산업에서의 전력전자기술**

# HVDC 기술 동향

## -HVDC SYSTEM의 기술 동향과 세계적인 추세-

안정식\*, 이석진\*\*, 신진철\*\*, 김찬기\*  
 (한전 \*전력연구원, 한전 \*\*송변전처)

### 1. 서 론

1951년에 소비에트 연방(소련)에서 30[MW] 시험적인 HVDC가 완성된 후에 1954년에 스웨덴에서 20[MW] 직류 송전방식이 상업적으로 처음 운전되었다. 1954년 이후 매년 평균적으로 2000[MW]씩 HVDC 시스템이 상업운전에 들어가 1995년 현재 전 세계적으로 50개 이상의 HVDC System이 완공되어 총 46,000[MW]의 송전능력을 확보하게 되었다. HVDC 시스템의 비약적인 증가는 교류를 직류로 변화 시키고 직류를 교류로 변화 시키는 전력전자 기술과 대용량 반도체 소자의 개발에 힘입은 바 크기 때문이다.

HVDC 시스템은 HVDC가 가지고 있는 특유의 장점에 세계 각국에서 경쟁적으로 개발/연계하고 있는 것으로 세계 각국에서는 국가간의 전력망을 연결하거나 전력사용의 시차를 이용하여 계통을 연계하거나, 1, 2차 변환기의 증설 없이 최종단의 변압기의 용량만을 키워 DC계통을 연계하여 부하량을 늘리고 전체 계통에는 영향 없이 전력 계통을 연결하는 DC전송에 관해서 많은 연구가 진행되고 있다.

HVDC송전의 장점은 다음과 같다.

- 장거리 전력전송에 있어서는 AC 전송에 비하여 가격이 저렴하다.
- AC 계통에 영향을 주지 않으며 대용량의 전력전송이 가능하다.
- 주파수가 다른 계통과도 연계가 가능하다(일본에서 50 Hz와 60 Hz 계통의 연계).
- 전력의 예비율을 낮출 수 있기 때문에 기존에 설치된 발전 용량을 줄인다.
- 계절적인 영향을 받는 수력과 화력발전소의 최적 설치를

용이하게 한다.

- 개별적인 시스템의 일/월/년 부하 싸이클이 다르기 때문에 상호 연계시스템망의 최대 부하 값이 줄어든다.
- 발전계획을 보다 크고 경제적으로 할 수 있다.

이상에서 논한 DC 송전의 장점 이외에도 HVDC 시스템은 전력을 송전하는데 있어 신속한 제어가 가능하기 때문에, HVDC 시스템을 AC 계통의 보조 전원형태로 사용할 수 있다.

### 2. HVDC 시스템의 일반적인 설명

#### 2.1 HVDC 시스템의 구성

HVDC 시스템의 구성요소는 그림 \*8에 보여주는 바와 같고, 그림 1은 Bi-Pole 기준이며, HVDC 시스템의 각 구성요소의 설명은 다음과 같다.

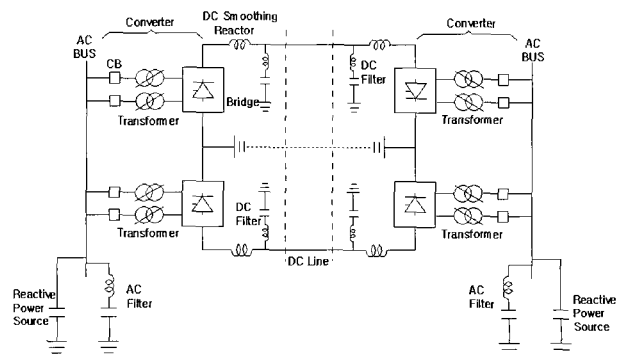


그림 1. 양극 HVDC 시스템의 주요 구성요소의 구성도

### 2.1.1 컨버터

렉티파이어는 교류를 직류로 그리고, 인버터는 직류를 교류로 변환시키는 역할을 하고 컨버터의 앞단에는 탭 절환기(Tap Changer)가 있는 변압기로 구성되어 있다. 컨버터를 구성하고 있는 밸브 브리지로 밸브 브리지는 6 펄스 혹은 12 펄스 밸브로 구성된다. 컨버터 변압기는 밸브 브리지에 전압 원 소스로 연결되는 것으로 비 접지 3상 전원으로 구성된다.

### 2.1.2 평활 리액터

평활 리액터는 싸이리스터를 사용하는 HVDC 시스템의 출력 단에 직렬로 연결되는 것으로 HVDC 시스템을 전류 원으로 만들고 HVDC 시스템의 전류를 평활하는 동시에 전류의 급격한 변화를 막음으로써 HVDC 시스템의 안정적인 운전에 도움을 준다. 평활 리액터가 하는 역할은 다음과 같다.

- 직류 선로의 전압과 전류의 고조파를 줄인다.
- 인버터의 전류(轉流, commutation) 고장(failure)을 막는다.
- 경부하시 전류의 비연속성을 막는다.
- 직류 송전의 단락 회로 동안 정류기의 전류의 파고치를 제한한다.

### 2.1.3 고조파 필터

컨버터는 직류측과 교류측 양쪽에서 전류 고조파와 전압 고조파를 발생시킨다. 이러한 고조파들은 캐패시터와 인근의 발전기를 과열시키고 통신 시스템의 혼신을 일으킨다. 따라서 필터는 직류 측과 교류 측 양쪽에 사용되어 진다. 참고적으로 교류측에는 전류 필터가 사용되어 지고, 직류측에는 전압필터가 사용된다.

### 2.1.4 무효 전력 공급원

싸이리스터를 이용하는 HVDC 컨버터들은 점호각(렉티파이어 단 :  $\alpha$ , 인버터단 :  $\gamma$ ) 제어를 하기 때문에 필수적으로 무효 전력을 흡수한다. 일반적으로 정상 상태 운전 조건하에서, HVDC 시스템은 송전 전력의 약 50 % 정도가 무효전력으로 소비되어 진다. 과도 상태 운전 조건하에서는 무효 전력의 소비가 더 높을 수가 있기 때문에 동기조상기나 SVC 또는 STACOM이 필요하다. 강한 교류 시스템(Strong AC system : SCR이 높은 시스템)에서는 캐패시터만이 존재해도 문제가 없으나 약한 계통에서는 과도 안정도와 과도 전압 안정도를 향상시키기 위해서 전압 조정기(위에서 말한 SVC, 동기 조상기 또는 STACOM)이 필요하다. 일반적으로 경제성 때문에 AC 필터의 캐패시터를 정상상태에서 무효전력을 보상하는 장치로 겸용하는 것이 일반적이다.

### 2.1.5 전극

HVDC는 (+)극과 (-)극을 필요로 하는데, (-)극은 대지를 이용해도 되고, 별도의 도체를 이용해도 된다. 대지를 이용하는 방법은 경제적인 관점에서 매우 유익하나, 부식이나, 통신 장애와 같은 별도의 환경문제를 유발하기 때문에 현재는 별도의 도체를 이용하는 경우도 많다.

### 2.1.6 직류 선로

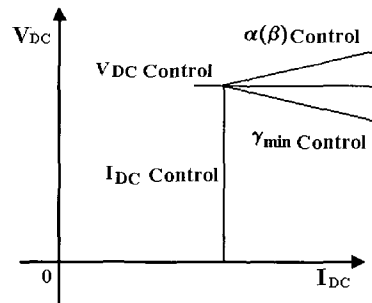
직류 선로는 교류 선로와 같이 가공 선로이거나 케이블이며, 교류 송전과 매우 유사하다.

### 2.1.7 교류 차단기

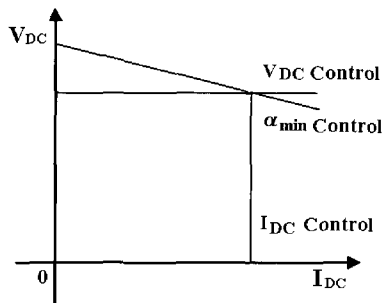
HVDC가 고장을 일으키는 경우에 부하의 차단과 시스템의 분리는 교류 차단기를 이용한다. 그리고 HVDC에서는 컨버터의 제어 동작과 교류 차단기의 상호 협조에 의해서 시스템의 Trip이나 정지가 행해진다.

## 2.2 HVDC 시스템의 제어기

HVDC 시스템에서 송전 단 측 제어기로 구성될 수 있는 제어기는 그림 2에 보는 바와 같이 전류제어기, 전압제어기 그리고 제어기로 구성되어질 수 있다. 또한 수신 단 측에 부착할



(a) 인버터 측 제어 곡선



(b) 렉티파이어 측 제어 곡선

그림 2. HVDC 제어기 특성

수 있는 제어기로는 전압 제어기, 전류 제어기, 제어기 그리고  $\beta$ 제어기를 둘 수 있다. 여기서, 주의할 점은 HVDC 시스템의 수전단 측과 송전단 측은 서로 상반된 제어를 가져야 하며, 송전단 측과 수전단 측을 동시에 전압 제어를 행하거나, 송전단 측과 수전단 측을 동시에 전류 제어를 행하면 양단 사이에 동작 교점이 생기지 않아 제어가 불가능해 질 수 있다. 따라서 HVDC 시스템을 제어하려는 경우에는 그림 3-3에서 보여주는 컨버터 제어곡선과 인버터 제어곡선을 중첩하여 교점이 만들어지게 제어하는 것이 HVDC 제어의 기본이다.

### 3. HVDC 시스템의 종류

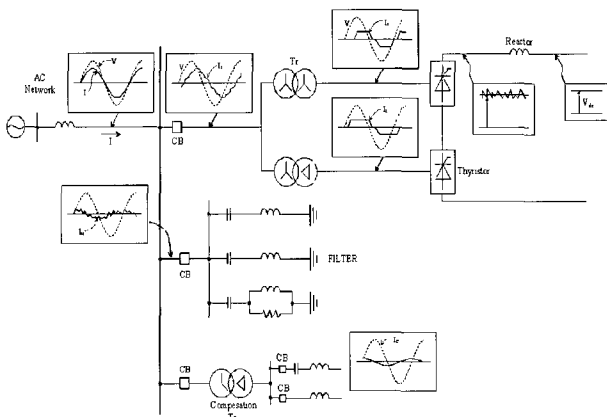


그림 3. 전류형 HVDC시스템의 동작 특성

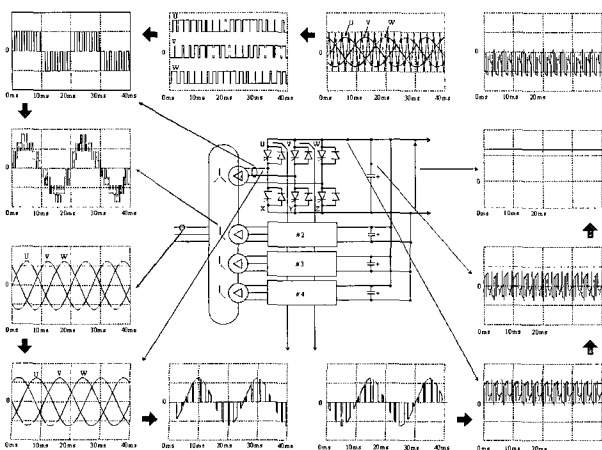


그림 4. 전압형 HVDC 시스템의 동작 특성

현재 HVDC 시스템은 기존의 싸이리스터를 이용한 전류형 HVDC시스템과 IGBT나 GTO를 이용한 전압형 HVDC로 구분할 수 있는데, 150MW이상에서는 전류형 HVDC가 그리고 150MW이하에서는 전압형 HVDC가 경쟁력을 갖고 있는 것으로 보고 되고 있다.

그림 3은 전류형 HVDC 시스템의 동작 파형을 보여 주고 있으며 그림 4는 전압형 HVDC 시스템의 동작 파형을 보여 주고 있다. 그림 3에서는 필터의 필요성과 무효전력의 필요성이 보이고, 그림 4에서는 PWM제어시에 전압/전류 파형을 보여 주고 있다.

### 4. HVDC 시스템의 세계적인 추세

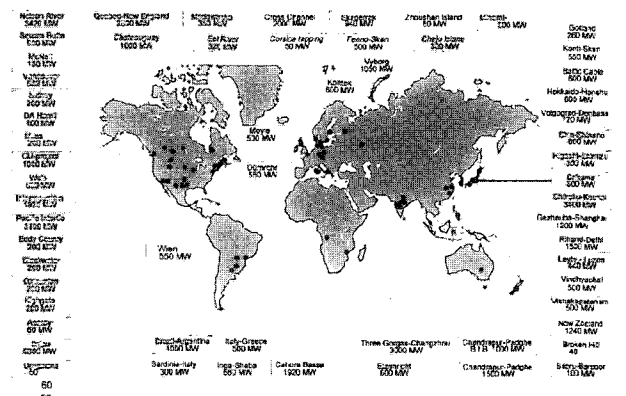


그림 5. 세계 HVDC 현황

그림 5는 현재 전 세계적인 HVDC 운전 현황을 보여 주고 있다. 그림 5로 부터 알 수 있는 흥미로운 사실은 HVDC가 주로 구미 선진국에 분포해있다는 점으로, 전력전자기술이 충분히 뒷받침 된 상태에서 기존의 교류계통의 용량을 극대화시키는 방법으로 HVDC를 이용한다는 것을 알 수 있다.

#### 4.1 우리나라의 HVDC

우리나라에서 HVDC시스템의 운전은 1998년 제주-해남 HVDC가 상용 운전 되고 시작되었으며, 현재 고려되고 있는 HVDC 연계는 그림 6와 같고 각각의 지점에 대한 설명은 다음과 같다.

- 1) 제주 - 해남 HVDC #1 (PTP)  
: PTP(Point to Point)
- 2) 제주 - 해남 HVDC #2 (PTP)  
: PTP(Point to Point)
- 3) 남/북한 HVDC (BTB)  
: BTB(Back to Back)

- 4) 한국 - 일본 HVDC (PTP)  
: PTP(Point to Point)
- 5) 신옥천-서대구 HVDC(BTB)  
: BTB(Back to Back)
- 6) 동북아 연계 HVDC (PTP & Multi)  
: Multi Terminal

- \* BTB (Back To Back) : HVDC 선로(가공이나 케이블)가 없는 시스템으로 계통 연계에 주로 사용.
- \* PTP (Point To Point) : 선로가 존재하는 시스템으로 주로 전력 전송에 사용.
- \* Multi : 2대 이상의 레กติ파이어와 2개 이상의 인버터가 존재하는 HVDC시스템.

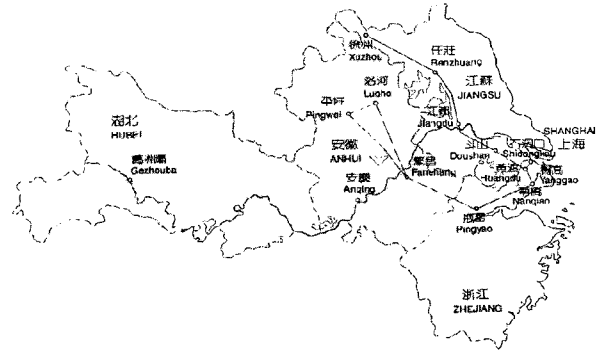


그림 8. 중국의 HVDC 연계

한편, 그림 9는 이스라엘과 요르단 사이에 HVDC를 이용한 전력 연계 도를 보여 주고 있으며 이러한 전력 연계는 범 아프리카를 연계하고, 중동과 유럽을 하나의 전력망으로 연계하는 방안 까지 연구되고 있다.

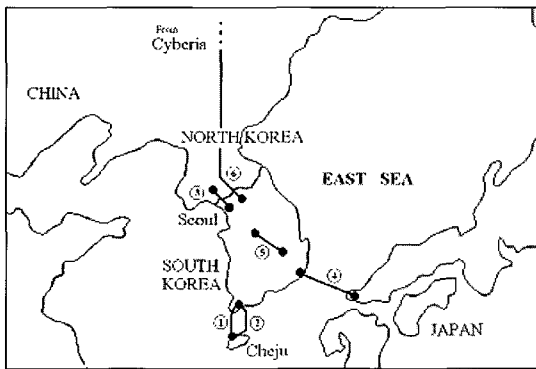
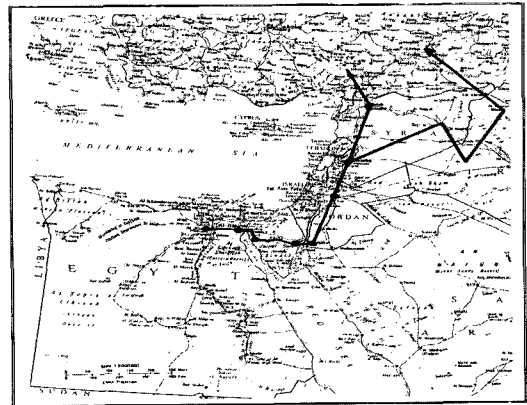


그림 6. 한국의 HVDC 연계(안)

그림 7은 현재 미국과 캐나다에서 운전되고 있는 HVDC계통도를 보여 주고 있다. 또한 그림 8은 중국에서 검토되고 있는 HVDC 연계 도를 보여주고 있다.



Egypt/Jordan Link and 3 Countries Interconnections

그림 9. 이스라엘 - 요르단 HVDC 연계

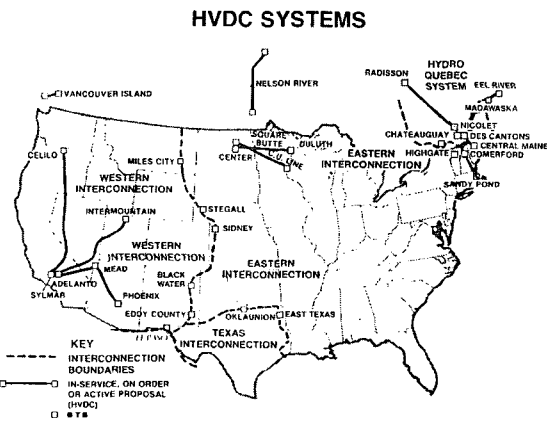
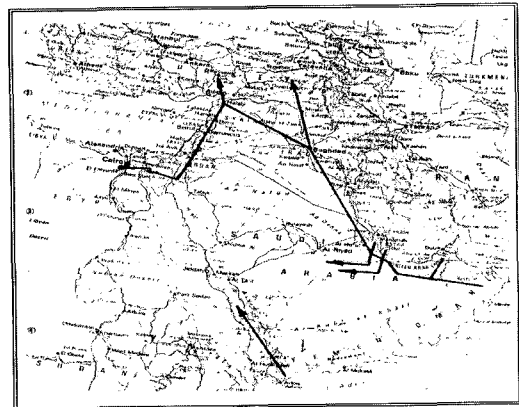


그림 7. 미국의 HVDC 연계



Arab-Masfraq Interconnection

그림 10. 사우디아-터키 HVDC 연계

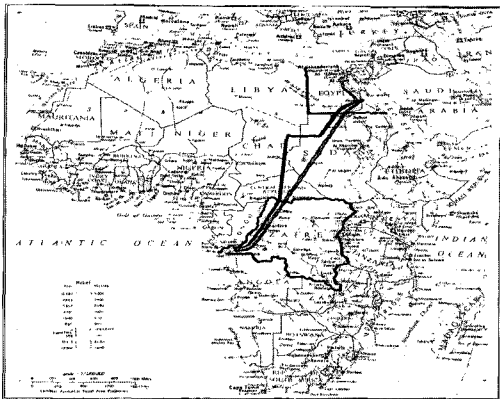


그림 11 이집트-자이레 HVDC 연계

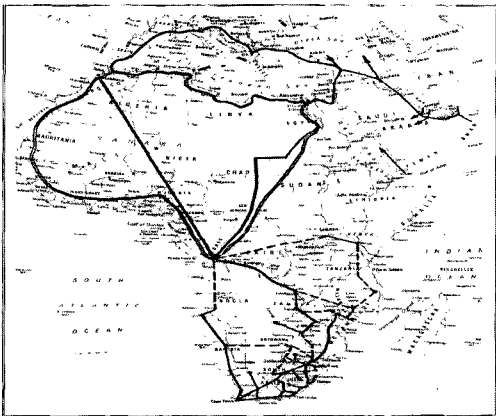


그림 12 아프리카-유럽 HVDC 연계

### 5. 후 기

짧은 지면에 HVDC기술을 소개한다는 것이 어렵다는 느낌을 가졌다. 그리고, 상투적으로 여기 저기 나와 있는 기술을 짜깁기할까 하는 생각도 했다. 그러나 이 지면을 통하여 단 몇 개만이라도 독자들에게 인상적으로 전해줄 수 있는 것을 기고하는 것이 중요할 것이라는 생각을 가졌다. 전압 형 HVDC와 전류 형 HVDC 그림(그림 3과 4)은 HVDC의 동작 특성을 한눈에 볼 수 있는 좋은 자료이고, 전 세계적으로 추진되고 있는 HVDC Project에 관한 지도는 쉽게 구할 수 있는 자료는 아니다 라는 것을 밝혀둔다.

### 참 고 문 헌

[1] Kunder, Power System Stability and Control, 1993.

[2] HVDC 기술 보고서(1), 전력 연구원, 1999  
 [3] J L Haddock, F G Goodrich, Se Il Kim, "Design Aspects of Korean Mainland to Cheju Island HVDC Transmission", Power Technology International (Annual, Sterling Publication Ltd, London), 1993  
 [4] B R Andersen, M H Baker, "HVDC Converter Station Design, with particular reference to the 2000 MW HVDC Link Between Great Britain and France", GEC Review, London, 1987.  
 [5] L Haddock, C A Brough, "The Application of Transputers to HVDC and SVC Control", CIGRE SC14 International Colloquium, New Zealand, Sept 1993.

### 《 제 자 소 개 》



#### 안정식(安正植)

1948년 11월 04일 생. 1971년 한전 입사.  
 현재 전력연구원 전력계통연구실장.



#### 이석진(李錫珍)

1957년 8월 04일 생. 1978년 한전 입사. 현재 한전 계통계획실 부처장.



#### 신진철(申珍澈)

1961년 11월 4일 생. 1985년 조선대 전기공학과 졸업. 1985년 한전 입사. 현재 송변전처 변전운영팀 과장. HVDC와 전력 수급 담당.



#### 김찬기(金燦起)

1968년 12월 17일생. 1996년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 전력연구원 입사. 현재 전력연구원 선임연구원. HVDC 담당.