

## 고전압 직류(HVDC) 송전기술의 동향

김 정 부/실장  
추 진 부/계통안정화그룹장  
정 길 조/송변전기술그룹장  
양 병 모/송변전기술그룹

한전전력연구원 전력계통연구실

### 1. 머리말

세계 각국에서는 국가간에 전력 계통망을 연결하여 전력의 시차, 원거리 전력 공급, 전력 수수의 원활화 및 공급의 안정화를 기하고 있다. 전력 계통의 연계는 기존의 AC 계통을 그대로 연계하여 사용하는 방법과 AC/DC(교류/직류) 변환장치를 이용하여 전력을 직류로 변환하여 공급하는 방법이 있다. 이 중에서 AC 계통을 그대로 연계하는 방법은 이미 오랫동안 연구되어온 방법이며 앞으로도 전력 공급의 핵심적인 역할을 담당할 것으로 생각된다. 반면에 직류전송은 20~30년 전부터 상용화되기 시작하여 설비량이 계속적으로 늘어나는 방식으로서 AC 전송방식이 가질 수 없는 여러 가지 장점 때문에 최근 많은 주목을 받고 있으며 우리 나라에서도 제주-해남 사이에 연계되어 높은 경제성을 보이고 있다.

본 내용이 직류 송전에 대한 이해를 높이고 기술의 저변확대에 많은 도움이 되기를 바란다.

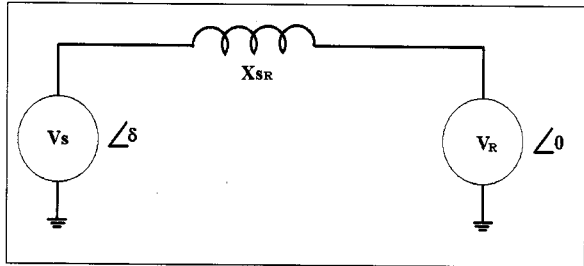
### 2. 일반적인 HVDC(High Voltage Direct Current) 기술

#### 가. AC 송전과 DC 송전의 비교

AC 계통에서 전력을 전달하는 경우에는 전력 송전량은 아래와 같이 표현된다(그림 1 참조).

$$P_e = \frac{V_s V_R}{X_{SR}} \sin \delta$$

위 식은 AC 송전 계통에서는 송전선 사이의 상차각과 전압 그리고 인덕턴스가 AC 송전의 주된 패러미터가 됨을 보여준다. AC 송전은 발전기 내부의 리액턴스와 변압



〈그림 1〉 AC 계통의 전력전송 등가회로

기, 그리고 송전선로의 리액턴스(송전선로의 길이)에 제한을 받으며 또한 경부하시에 충전전류를 전송할 수 있도록 설계되어야 하기 때문에 과전압을 유발하거나 리액턴스 보상기를 필요로 한다. 반면에 직류송전은 AC 전력을 DC 전력으로 변환한 후에 DC 전력을 전송하는 방식이므로 정상상태에서 인덕턴스나 콘덴서의 영향을 받지 않아 교류송전에서 필요로 하는 여러 가지 설비가 불필요하다. 이렇게 직류송전은 AC 계통과 분리되어 있고 전력을 자유롭게 조정할 수 있기 때문에 안정도에는 문제가 없다. 다만 컨버터나 인버터가 동작할 때 무효전력이 발생되며 반도체 소자를 이용하기 때문에 시스템이 열에 약하고 또 일시적인 과전류에 견디도록 설계되었기 때문에 과부하상태에 대해서는 제한조건이 엄격해진다. 직류 송전과 AC 송전을 비교하기 위한 개별적인 패러미터는 다음과 같다.

① 전송 능력 비교

다음 식은 AC 송전과 직류송전을 비교하는 수식이다. 직류송전은 일정한 DC 값을 가지고 있는 반면에 AC 송전은 정현파 전압을 가지고 있다. 따라서 절연 레벨이나 가격을 고려할 때 직류송전이 유리함을 알 수 있다.

$$k = \frac{\text{DC withstand voltage}}{(\text{rms}) \text{ AC withstand voltage}}$$

$$k_1 = \frac{\text{AC insulation level}}{\text{Rated AC voltage}(E_p)}$$

$$k_2 = \frac{\text{DC insulation level}}{\text{Rated DC voltage}(V_d)}$$

$$\text{직류 송전의 절연비율} = \frac{k \cdot k_1}{k_2}$$

② 대지 귀환 능력

직류 송전은 대지(Earth)를 하나의 도체로 이용할 수 있으므로 AC 전송에 비하여 경제적이다. 따라서 ROW (Right Of Way : 철탑 경유지)를 필요로 하는 지역에서 유리하다.

③ 확장 시스템 개발

직류 송전은 AC 송전과 다르게 부하용량에 따라 1차 변압기, 2차 변압기, 3차 변압기를 고려할 필요가 없이 임의의 계통에 연계할 수 있어 대도시나 섬지역에 설치하면 유리하다.

④ 환경 영향

- 청각 잡음 : AC 계통에서는 소음 장애가 문제가 되나 직류송전에서는 큰 문제를 유발하지 않는다. 왜냐하면 정전계 이온발생은 습한 날씨와 건조한 날씨에 발생하는 표면의 불연속성을 줄이기 때문이다.
- 라디오와 텔레비전 장애 : 직류 계통에서는 정상상태에서 교류 전력을 사용하지 않기 때문에 영향이 없다.
- 이온 발생 : 직류송전에서는 이온이 발생하기 때문에 이것에 대해 충분히 고려해야 한다.

나. HVDC 시스템의 이용

1) DVDC 시스템의 장점

가에서 논한 AC 송전과 DC 송전의 비교를 통하여 DC 송전의 장점을 열거해 보면 다음과 같다.

- ① 장거리 전력전송에 있어서는 AC 전송에 비하여 가격이 저렴하다.

- ② AC 계통에 영향을 주지 않으며 대용량의 전력 전송이 가능하다.
- ③ 주파수가 다른 계통과도 연계가 가능하다.
- ④ 개별적인 시스템의 일/월/년 부하 사이클이 다르기 때문에 상호 연계시스템망의 최대 부하값이 줄어든다.
- ⑤ 상호 연계는 전력의 예비율을 낮출 수 있기 때문에 기존에 설치된 발전용량을 줄인다.
- ⑥ DC 계통은 주고 싶은 전력의 양과 받고 싶은 전력의 양을 조절할 수 있다.

DC 송전의 이러한 장점 이외에도 HVDC 시스템은 전력을 송전하는데 있어 즉각적인 제어가 가능하기 때문에, HVDC 시스템을 AC 계통의 보조제어기 형태로 사용할 경우에는 다음과 같은 장점이 있다.

- ① 교류계통의 저주파 진동의 억제
- ② 과도 안정도의 개선
- ③ 계통외란의 분리
- ④ 고립된 소규모 계통의 주파수 제어
- ⑤ 무효전력 조정 및 Dynamic Voltage Support

## 2) HVDC 시스템의 설치 가능지역

우리 나라에서 HVDC 시스템이 설치 가능한 후보지는 다음과 같다.

### 가) 남한-북한 계통 연계 BTB(Back to Back) HVDC

- 목적
  - 북한의 부족하고 낙후된 전력 사정을 감안하여 남한의 전력을 북한에 공급하고자 함.
- 고려사항
  - 남·북한 사이의 주파수 변동의 차와 위상 차를 고려해볼 때 AC 연계보다 유리
  - 남·북한 계통 연계 BTB의 고장시 남·북한 계통에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 용량 설정

- 최소 용량의 BTB 기본으로 고장을 고려한 Redundancy Multi-BTB 설계

### 나) 대구-옥천 계통 연계 BTB HVDC

- 목적
  - 우리 나라의 대규모 계통에 존재하는 저차 고조파의 영향을 줄이고 전력계통의 고장 전류를 줄이기 위함.
- 고려사항
  - 국부적으로 발전기에 PSS(Power System Stabilizer)를 설치하거나 FACTS(Flexible AC Transmission System)를 설치하여 얻는 효과를 경제성과 연계하여 검토하여야 함.

### 다) 본토-제주 계통 연계 PTP(Point to Point) HVDC

- 목적
  - 제주지역의 부하 증대에 따른 추가적인 전력량의 필요성을 절감
  - 현지에 발전기를 설치한 경우에 운영·유지비가 육지에 비해 너무 고가이므로 누적되는 적자를 해소
- 고려사항
  - 고장이나 용량을 고려하여 최적의 HVDC 수전단 위치 선정
  - 전압형 HVDC형과 사이리스터 HVDC형 사이의 타당성 검토
  - HVDC 시스템의 운전방식과 기존의 HVDC 사이의 연계 검토

### 라) 한국-일본 계통 연계 PTP

- 목적
  - 한국과 일본 사이의 Peak 전력 사용이 시간에 따라 다르므로 계통의 침투 부하 송·수전
- 고려사항
  - 운전 방식

## 기술동향

- 발전소 인근에 HVDC Site를 건설할 경우에 발전기 터빈의 피로 현상 고려

마) 시베리아-한국-일본 계통 연계 PTP

○ 목적

- 시베리아의 싼 가격의 전력을 중국과 북한을 거쳐 남한에 전력 공급

○ 고려사항

- 정치 및 주변 환경 고려

### 다. HVDC 시스템의 구성요소

HVDC 시스템은 다음의 부분들로 구성되어 있으며 일반적인 HVDC의 주요 부분들은 그림 2와 같다.

#### 1) 컨버터

교류/직류와 직류/교류 변환을 수행하는 역할을 하며 밸브 브리지와 탭 전환기가 있는 변압기로 구성되어 있다. 밸브 브리지는 6 펄스 혹은 12 펄스의 배열로 전압의

밸브와 연결되어 있다.

#### 2) 평활 리액터

평활 리액터 역할은 다음과 같다.

- 직류 선로의 전압과 전류의 고조파를 줄인다.

- 인버터의 정류(整流, Commutation) 고장(Failure)을 막는다.

- 경부하시 정류의 비연속성을 막는다.

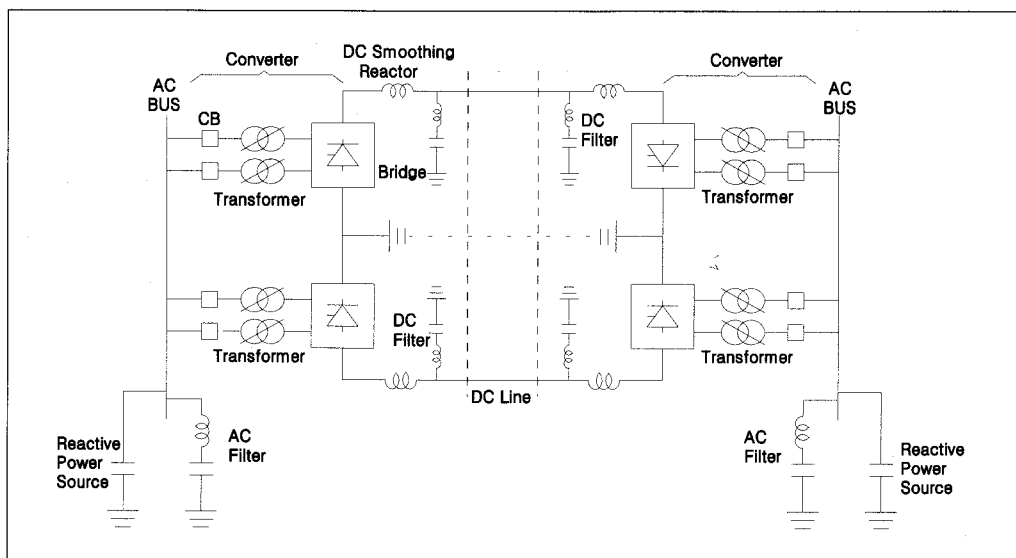
- 직류 송전의 단락 회로 동안 정류기의 전류 파고치를 제한한다.

#### 3) 고조파 필터

컨버터는 직류측과 교류측 양쪽의 전압과 전류의 고조파를 발생시킨다. 이러한 고조파들은 캐패시터와 가까운 발전기를 이상 과열시키고 통신 시스템의 혼신을 일으킨다. 따라서 필터는 직류측과 교류측 양쪽에 사용된다.

#### 4) 무효 전력 공급원

DC 컨버터들이 본질적으로 무효 전력을 흡수한다. 정



〈그림 2〉 양극 HVDC 시스템의 주요 구성요소의 구성도

상 상태 운전 조건하에서, 실제 송전전력의 약 50%가 무효 전력으로 소비된다. 과도상태 운전 조건하에서는 무효 전력의 소비가 더 높을 수가 있다.

5) 전극

대개의 직류 연결은 최소한의 짧은 시간 동안 대지가 중성점 도체로 사용된다. 대지와 연결점은 전류 밀도와 표면 전압의 변화를 최소화할 수 있는 넓은 표면의 도체가 요구된다. 이러한 도체를 전극이라고 부른다.

6) 직류 선로

주로 가공 선로이거나 케이블이다. 수많은 컨덕터와 필요 공간을 제외하고는 교류 송전과 매우 유사하다.

7) 교류 차단기

명백한 변압기 고장이거나 HVDC 시스템이 고장일 경우, 차단기는 교류 차단기가 사용된다. 왜냐 하면 직류 차단기는 전류 용량이 큰데 비하여 교류 차단기는 전류의 영점에서 차단하기 때문이다.

3. HVDC를 설치하기 위한 사전 검토

HVDC 시스템을 설계하기에 앞서 고려해야 할 점은 다음과 같다.

가. 수전단과 송전단의 SCR(Short Circuit Ratio) 확인

SCR은 계통의 단락용량을 결정하는 중요한 요소이다. SCR의 크기에 따라 HVDC 시스템의 AC 강도가 결정되고 HVDC 시스템의 안정적인 운전 여부를 결정한 때에도 송/수전단의 SCR을 확인하는 것이 HVDC 시스템의 설계에 기반이 된다.

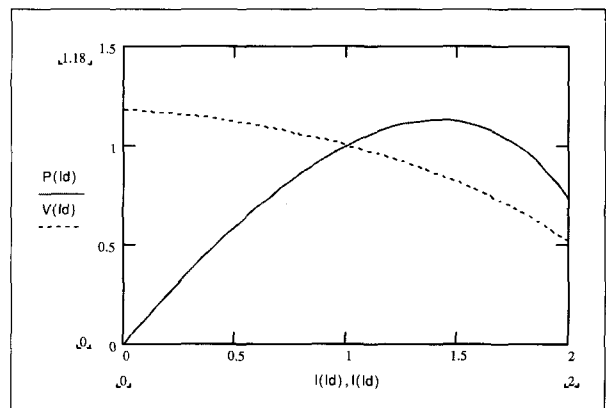
요즈음에는 무효전력 보상용 콘덴서를 SCR에 포함한 ESCR(Effective Short Circuit Ratio)를 새로운 계

〈표 1〉 단락용량(SCR)

ESCR	Definition
$\geq 2.5$	High
1.5 ~ 2.5	Low
$\leq 1.5$	Very Low

통강도의 척도로 사용하는데, HVDC 시스템에 필요한 콘덴서는 HVDC 시스템에서 소비하는 DC 전력의 60%인 무효전력에 해당되기 때문에 SCR에서 0.6p.u를 뺀 값이 ESCR이 된다. 즉, SCR이 3p.u인 경우에 ESCR은 3p.u 정도가 된다. 표 1에 일반적으로 계통의 강도를 결정하는 기준을 나타내었다.

HVDC가 포함된 AC 계통의 조류계산을 해보면 HVDC 시스템의 최대 송전용량은 그림 3과 같이 된다. 이 그림에서 보는 바와 같이 DC 전류가 변함에 따라 HVDC 시스템의 최대 송전전력 곡선이 그려지는데 이때 점선은 DC 전류가 변함에 따라 무효전력 소비에 따른 AC 계통 전압의 전압강하 특성을 나타내는 것으로서 HVDC DC 전류가 갑자기 0(零)으로 떨어질 때 AC 전원측에 발생하는 과전압의 크기를 보여 준다. HVDC 시스템이 갑자기 탈락되더라도 계통에 영향이 작아야 하기 때문에 “AC 계통에서 발생하는 과전압이 전력 회사



〈그림 3〉 HVDC 시스템의 최대 송전전력과 AC 전압

의 계통 운영 규정 값 이내가 되도록 HVDC 시스템의 용량을 선정”한다. 이것이 SCR을 검토하는 또 하나의 이유이다.

#### 나. SCR과 동기화력을 고려한 HVDC 시스템의 용량 결정

서로 다른 위상을 가진 전력 계통의 연계나 서로 다른 주파수를 가진 전력계통의 연계, 계통 내에 존재하는 Subharmonic을 저감하기 위한 전력계통 연결 그리고 계통의 고장용량을 억제하기 위한 전력계통 연계 등은 대량의 에너지를 고정적으로 제어하는 PTP와 달리 순시 피크전력 제어를 위한 경우가 많기 때문에 용량의 결정은 PSS/E(Power System Simulator/Engineering)와 같은 프로그램 등을 이용하여 계통을 면밀히 검토한 후 결정해야 한다. HVDC 시스템의 목적 중에서 기저전력을 공급하는 것을 제외하고 2개의 계통을 연계하는 경우와 계통의 저차 고조파를 제거하기 위한 방법으로 크게 나눌 수 있는데 각각의 경우에 용량 계산은 다음과 같다. 아래 수식은 같은 전압과 같은 주파수로 운전되는 2개의 계통을 연계한 것으로 2개의 AC 계통이 같은 전력각을 가지며 운전하기 위한 필요 전력을 보여 주고 있다. 이때의  $P_{sys}$ 를 동기화력이라 부를 수 있다.

$$P_{sys} = \frac{V_S V_R}{X_{SR}} \sin(\delta_A - \delta_B)$$

계통을 연계하기 위한 HVDC 시스템의 용량을 결정하려는 경우에는 2개 계통 사이의 상차각이 0(零)이 되기 위해 필요한 전력량을 HVDC 시스템의 용량으로 산정할 수 있다. 만약에 2개의 계통이 다른 주파수와 다른 전압, 그리고 다른 전력각을 가지고 운전된다 하더라도 위 수식과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, AC 계통의 주파수는 유효전력에 관계되고 AC 계통의 전압은 무효전력에 관계된다. 그리고 전력각은 부하량에 관계되기 때문

에 상이한 2개의 계통 전력각이 일치되도록 하는데 필요한 전력량이 HVDC 시스템의 송전 용량이 된다. 또한 침투부하를 교환하는 HVDC 시스템은 침투부하만큼의 전력량이 HVDC 시스템의 송전 용량이 된다. “HVDC 시스템의 송전전력 결정은 계통을 연계하는데 필요한 동기화력과 앞에서 논한 SCR의 강도를 고려하여 결정”하여야 한다.

#### 다. HVDC 시스템의 DC 전압 결정

HVDC 시스템의 DC 전압은 HVDC 시스템을 설계하는데 있어서 경제성과 관련된 아주 중요한 요소이다. HVDC 시스템의 DC 전압은 AC 계통의 전압과 마찬가지로 높으면 높을수록 효율이나 전송 능력이 높아지거나 변압기나 케이블과 같은 주변기기의 절연레벨과 가격이 따라 증가하기 때문에 무작정 높일 수가 없다. HVDC 시스템의 DC 전압을 높이는데 있어서 걸림돌이 되는 제약 요소 중 사이리스터 문제를 고려하면 다음과 같다.

현재까지 개발된 사이리스터의 정상상태 최대 전류용량은 3,000A이다. 사이리스터는 반도체 소자로 만들어졌기 때문에 사이리스터의 전류 정격이 6,000A라 하더라도 열이나 순시 피크 전압/전류에 약하기 때문에 자기 정격의 1/3 규격으로 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 동일한 용량에서 낮은 DC 전압과 높은 DC 전류로 HVDC를 운전하는 경우에는 HVDC의 밸브가 기본적으로 직렬로 연결되어 있는 상태에서 새로이 병렬 밸브를 추가해야 한다. 이는 병렬 밸브 사이의 순환 전류뿐만 아니라 전류 불평형을 유발할 수 있기 때문에 기술적으로 대단히 어려운 것이다. 따라서 HVDC 시스템의 밸브는 2 병렬 이상은 사용하지 않는다. 표 2는 일반적으로 송전용량과 여기에 적당한 DC 전압을 나타내었다. DC 용량 400 MW 이하에서는 일반적으로 DC 전압이 결정되지 않는

〈표 2〉 일반적으로 많이 사용하는 HVDC DC용량과 DC전압

용량(MW)	AC 전압(kV)	DC 전압(kV)(PTP)	DC 전압(kV)(BTB)
200	115	-	2 x 60
400	115~230	-	2 x 80
500	230~345	±250	2 x 100
1000	345~500	±400~500	2 x 150
1500	345~500	±500	-
2000	500	±500~600	-
2500	500	±500~600	-
3000	500	±600	-

다. 이는 사이리스터 밸브의 직렬 개수와 송전선로를 포함하는 HVDC 시스템의 절연 레벨에 따른 경제성과 HVDC 시스템에서 소비되는 손실량에 따른 경제성이 명확히 비교되지 않기 때문에 제작사나 전력회사의 독자적인 결정에 따른다.

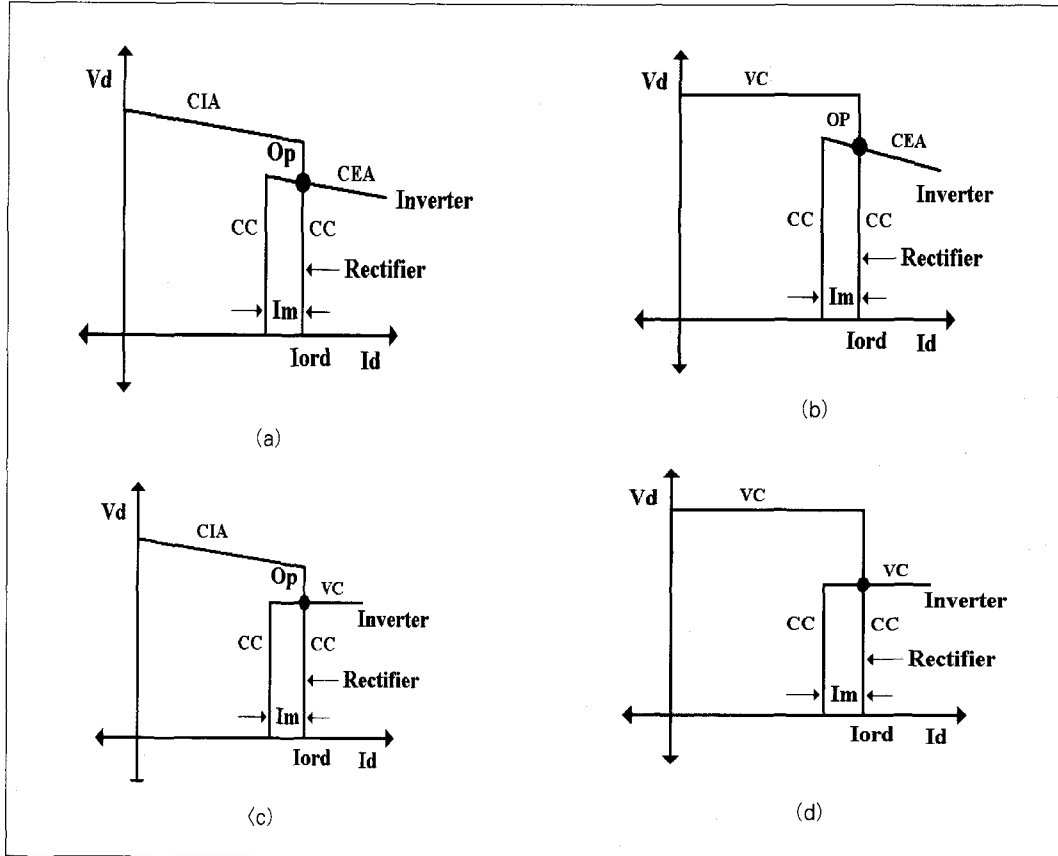
표 2에서 특이한 점은 BTB에서는 대지 귀환(Earth Return)이라는 개념이 존재하지 않으므로 따라서 Negative Voltage 개념이 존재하지 않고, 송전선로가 없기 때문에 송전선에서 소비되는 저항손실을 고려할 필요가 없으므로 DC 전압이 PTP에 비하여 작아도 된다. 여기서, DC 전압이 작아도 된다는 것은 HVDC 시스템 밸브의 사이리스터 직렬 연결 개수와 주변장치의 절연레벨이 줄어든다는 것을 말하며 동일한 용량에서 송전선로의 가격을 빼고도 PTP HVDC에 비해 BTB HVDC의 제작비가 작아지는 이유가 여기에 있다(보고서에 의하면 PTP에 비하여 BTB의 제작비용은 20% 절감되는 것으로 보고되고 있다). 또한 위에서 언급한 것 같이 BTB의 목적은 Bulk 에너지의 전송이 아니라 계통이 흔들릴 때 흔들리는 만큼의 전력을 가감하는 작용이나 AC 계통 사이의 침투 부하를 교환하는 역할을 하기 때문에 1500 MW를 넘는 대용량 BTB HVDC 시스템은 없다.

## 라. HVDC 시스템의 제어기 형태 결정

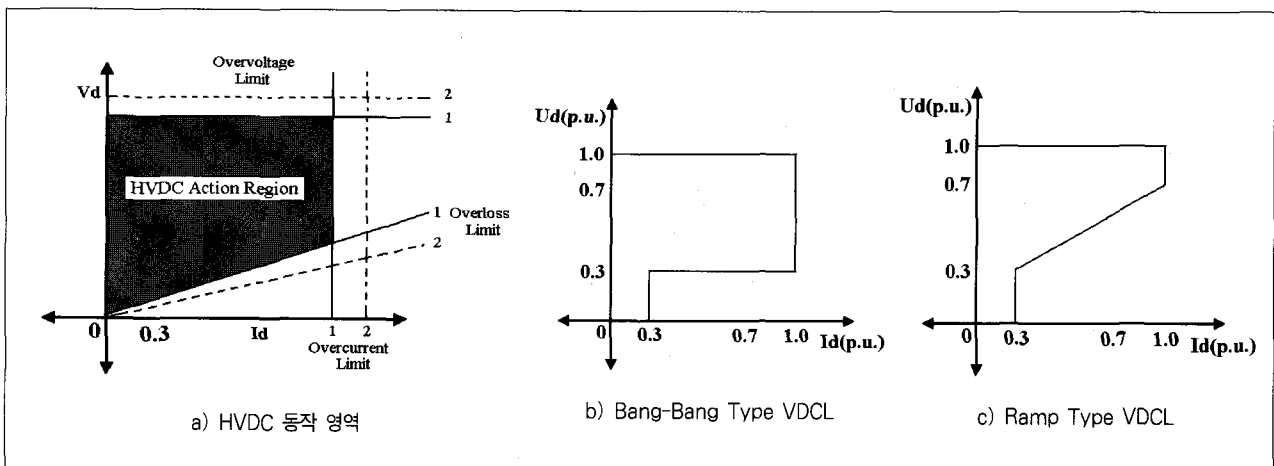
HVDC 시스템에서는 컨버터 측에서 만들 수 있는 제어기의 종류는  $\alpha_{\min}$  제어기, 전류제어기, 전압제어기이며, 인버터 단에서는  $\gamma_{\min}$  제어기, 전류제어기, 전압제어기가 있을 수 있는데 양쪽에 전류제어기는 필수적으로 존재해야 하기 때문에 전류제어기를 제외한 나머지 제어기의 선택이 중요한 요소가 될 수 있다.

대규모 계통을 상대적으로 소용량인 HVDC 시스템으로 연계하는 BTB에서는 전류 제어기 이외의 제어기는 선택시 경제성과 효율만 고려하면 된다. 예를 들어 인버터 단이 가질 수 있는 제어기 중  $\gamma_{\min}$  제어기, 전류제어기, 전압제어기 중에서 전압제어기는 안정도가 가장 좋은 반면 시스템의 정격이 커진다는 단점을 가지고 있기 때문에 안정도를 우선할 것인지 아니면 효율을 우선할 것인지는 제작사와 전력회사의 선택에 달려 있다. 그리고 전력을 보내는 정류단보다는 전력을 받는 인버터(Inverter) 단이 안정도 문제에 취약하기 때문에 정상상태에서 전류 제어권은 정류단에 있는 것이 일반적이다. 그림 4는 BTB에서 가질 수 있는 전압/전류 제어특성을 나타내고 있다. 이 그림에서  $\gamma_{\min}$  제어기와  $\alpha_{\min}$  제어기는 시스템의 효율을 고려한 것이고 전압제어기는 시스템의 안정도를 고려한 결과이다. 그림 4에서 보여주는 전압/전류 특성곡선은 그림 5와 같이 여러 가지 요소에 의하여 제한을 받는다. 우선 사이리스터와 HVDC Arrester가 견딜 수 있는 전압과 전류는 제한기에 의해 제한을 받는다. 그리고 동일한 용량의 전력을 송전하려는 경우에는 고전압 저전류 형태가 이상적이며 저전압 고전류 형태의 전력 전송은 케이블이나 송전선로의 손실을 유발할 수 있기 때문에 바람직하지 않다.

따라서 그림 5 a)와 같이 Overloss Limit에 제한을 받게 되어 HVDC 시스템의 실제적인 동작 영역은 그림



〈그림 4〉 BTB에서 가질 수 있는 전압/전류 특성 곡선



〈그림 5〉 HVDC 시스템의 수정된 전압/전류 특성 곡선

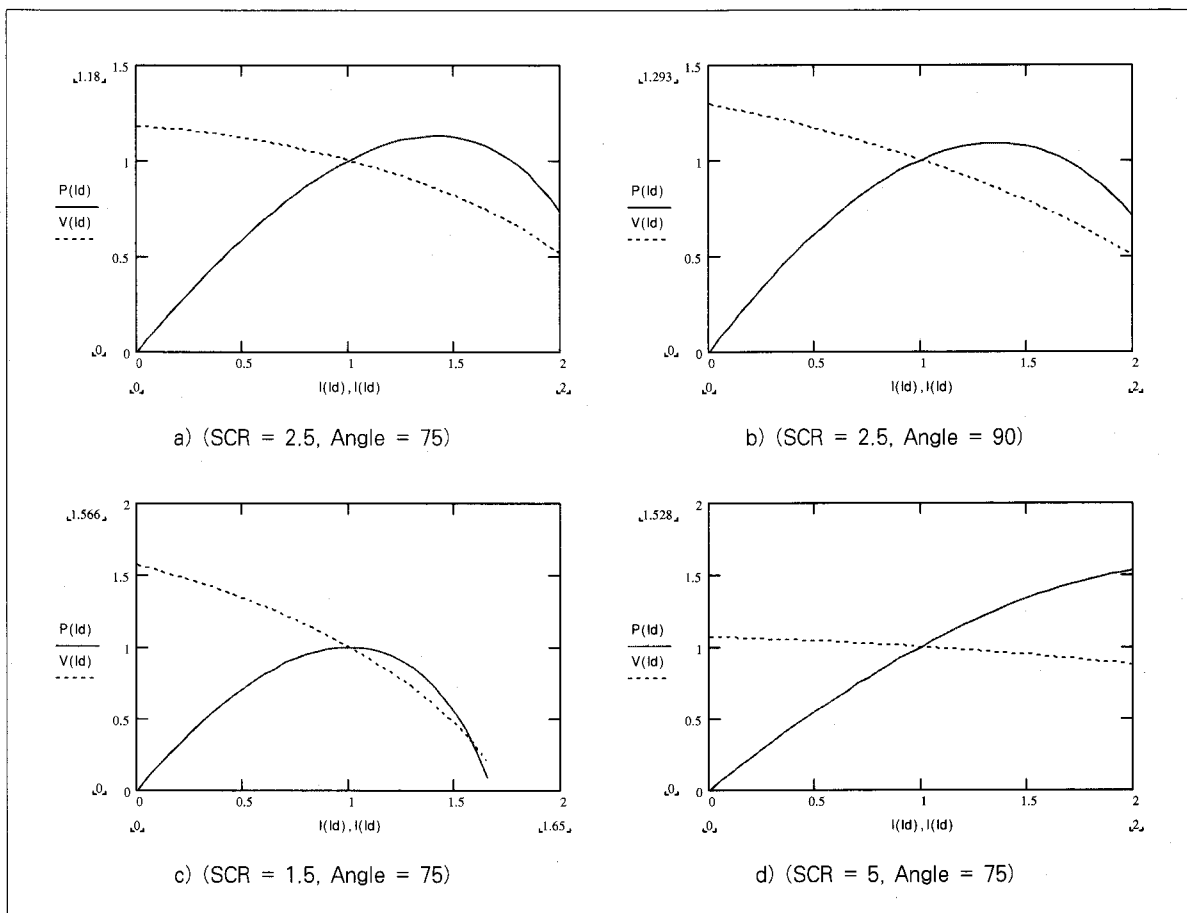


5 a)의 검은색 부분이 된다. 그림 5의 b)와 c)는 Overloss Limit를 고려한 HVDC 시스템의 전압/전류 특성 곡선으로 그림 5 b)와 같은 Bang-Bang 타입과 그림 5 c)와 같은 Ramp 형태가 있다. 각각의 특성을 고려하면 Bang-Bang 타입은 AC 계통의 고장시에 빠른 속응성을 가지고 있는 반면 많은 고조파를 발생시키며 AC 계통을 더욱 불안하게 하는 단점을 가지고 있기에 SCR이 큰 경우나 BTB HVDC에서 많이 사용되고 있다. 반면에 그림 5 c)는 AC 계통이 고장이 생긴 경우에 속응성은 그림 5 b)의 경우보다 떨어지나 고조파의 함유율과

과전압과 과전류의 발생이 작아 많은 PTP HVDC 시스템의 주된 VDCL로 채용되고 있다. 그림 5 c)의 전류 제한값(0.3)은 HVDC 시스템의 전류가 0.3p.u 이하가 되는 경우에는 전류의 불연속 현상이 발생하기 때문에 이를 막기 위해 채택된 제한값이며, Ramp 함수의 기울기는 AC 계통의 시정수와 HVDC 터미널에 연결된 발전기의 응답 특성을 고려하여 결정된다.

### 마. HVDC 시스템의 안정도 판별 적용

제어기 형태에 따른 HVDC 시스템의 안정도를 판별



〈그림 6〉 MAP 방법을 이용한 HVDC 최대 전력 곡선

하기 위해서 HVDC 연구에 범용적으로 사용되고 있는 CIGRE 모델을 이용하였다. MAP 방법을 이용한 HVDC 시스템의 안정도와 제어기 형태에 따른 HVDC 시스템의 안정도는 MATH/CAD 프로그램으로 수행하였다.

그림 6 a)는 정상적인 CIGRE 모델의 패러미터를 MAP 방법으로 시뮬레이션한 것이며 b)는 AC 테브난 임피던스의 각도를 75°에서 90°로 변화시킨 경우이다. AC 테브난 임피던스의 각도를 90°로 변화시킨 경우는 AC 계통의 임피던스 성분이 리액티브 성분만 존재한다는 것을 의미하며 최대 송전전력은 큰 차이를 보이지 않으나 DC 전력의 갑작스런 전송 중단시에 AC 계통의 전압은 1.18p.u.에서 1.293p.u.로 증가하는 것을 보여준다.

c)는 정상적인 CIGRE 모델의 AC 계통 테브난 임피던스를 2.5에서 1.5로 줄인 경우로서 DC 최대 전송전력이 1.2로 줄어드는 것을 보여주며 d)는 AC 계통 테브난 임피던스를 5로 증가시킨 경우의 예로서 DC 전력 전송의 중단시에도 AC 계통의 전압 변동이 작은 것을 보여주고 있다.

## 4. HVDC 시스템 신뢰성

### 가. 신뢰성의 개념

신뢰도(Reliability)란 대상물이 “초기시간부터 임의의 시간 t까지 고장나지 않고 제대로 동작할 확률”을 나타내는 것으로 수학적·확률적 표현이며 일반 기술자가 받아들이기에는 현실적 감각과 쉽게 어울리지 않는다. 또한 수천 개 또는 그 이상의 부품들로 이루어진 시스템의 신뢰도 자체를 평가하는 것은 불가능하기도 하지만 또한 별 의미 없는 방법이다. 그러므로 공학적으로 이해하기 쉽고, 설계제작의 결과가 “목적에 맞게 충분히 사용될 수 있

도록”하는 관점에서 MTTF(Mean Time To Failure), MTBT(Mean Time Between Failure), MTTR(Mean Time To Repair) 등의 값이 많이 통용되고 있다.

HVDC 시스템은 그 구성이 복잡하고, 사용되는 부품 등의 숫자가 엄청나므로 전체 신뢰도를 향상시키는 방법은 정밀한 신뢰도 평가보다는 보편적으로 알려져 있는 Subsystem 연결도로부터 신뢰도가 대부분에 비해 낮은 부분의 신뢰도를 향상시킴으로써 전체 시스템의 신뢰도를 향상시키는 방법을 써야 한다.

실제의 시스템 설계시 각 부분별 상대 신뢰도를 정확히 알 수는 없지만 컨버터 및 제어부를 다중화시키는 것이 신뢰도 향상의 지름길임은 그간의 운전 경험 등을 통해서도 알 수 있다.

### 나. HVDC 시스템의 신뢰성 검토

시스템의 신뢰성은 한 개의 요소만이 있는 것보다 소용량의 부품을 여러 개로 나누어 설계하고 운전하는 것이 유리하다. 그러면 HVDC 시스템에서 위에서 논한 MTTF 개념을 도입한 신뢰성 운전방법이나 신뢰성 설계방법에 대하여 알아보기로 하자.

#### 1) HVDC 시스템의 Bipole 운전 개념

HVDC 시스템의 Bipole은 대지를 하나의 도체로 가정하여 Positive 전압과 Negative 전압을 이용하여 최대 송전을 한다. 이때 이러한 Bipole의 역할은 경제적인 송전을 할 수 있다는 경제적인 이점이 있으나, MTTF 관점으로 한 Pole의 용량을 최대 용량으로 설계한 후에 한 Pole당 50%의 정격을 가지고 운전하면 신뢰성이 2배가 된다. 즉, 한 Pole이 고장 나더라도 다른 Pole이 정격 용량을 담당할 수 있으므로 정전 없이 운전될 수 있다는 것이다.

## ① 이중 필터 개념

Bipole로 구성하면 제어기와 밸브 그리고 보호 등 하나의 HVDC 시스템이 2중화된 것으로 분석되어 시스템의 신뢰성이 증가한다는 것을 보여 주는데 반해 필터도 같은 개념으로 1개의 정격용량 필터보다는 2개의 필터로 분할하면 신뢰성이 높아질 수 있다.

## ② 사이리스터의 Redundancy 개념

HVDC 시스템의 밸브는 수십 개의 사이리스타가 직렬로 연결되어 있기 때문에 하나의 사이리스타가 고장이 나면 연쇄적으로 사이리스타가 고장날 수 있는 여지가 있기 때문에 다른 부분에 비해 높은 여유율을 가져야 한다.

## ③ 점호의 Refiring 개념

현대의 제어 시스템은 하드웨어 뿐만 아니라 소프트웨어도 2중화 또는 3중화의 제어알고리즘을 사용한다. 따라서 점호의 2중화 개념은 시스템의 효율을 높이는데 많은 도움을 주고 있다.

## 5. 맺음말

HVDC 시스템은 많은 지역에서 전력계통연계에 중요한 역할을 하기 때문에 HVDC 시스템의 신뢰도와 HVDC 시스템의 안정도는 매우 중요하다. 개발중인 차세대 HVDC 시스템들 중에는 게이트 턴 오프 사이리스터(GTO)를 이용하여 무효전력 문제를 해결하려고 노력하고 있으나 기술적으로는 많은 문제점을 가지고 있다. 앞으로 HVDC 시스템은 이 분야에서 더욱더 진보된 기술과 경험으로 전력계통에서 차지하는 비율이 높아질 것이다.

HVDC 시스템은 계통에 필수적인 시스템이거나 AC 계통을 대신할 수 있는 시스템은 아니다. 그러나 AC 계통으로 해결하기 곤란하거나 가격적인 면에서 우위를 가지고 있기 때문에 앞으로 HVDC 시스템이거나 FACTS와 같은 DC개념의 전력 전송이나 운영 개념이 우리 나라 계통에 많이 도입될 것으로 여겨진다. ■

## 참고 문헌

- (1) PSCAD/EMTDC Administration Manual, Manitoba HVDC Research Center, 1994
- (2) Kunder, Power System Stability and Control, 1993.
- (3) HVDC 기술 보고서[1], 전력연구원, 1999
- (4) Se Il kim, Suk Jin Lee, J L Haddock, M H Baker, 'System Design Characteristics for 300 MW Submarine Link to Cheju', CIGRE Regional meeting, Australia, October 1993.
- (5) 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
- (6) 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.
- (7) L Haddock, C A Brough, "The Application of Transputers to HVDC and SVC Control", CIGRE SC14 International Colloquium, New Zealand, Sept 1993.
- (8) R P Burgess, L D Ainsworth, H L Thanawala, et al, "Voltage/Var Control at McNeil Back-to-Back HVDC Converter Station", CIGRE Report 14-104, Paris, 1990.