우리나라에서 HVDC 시스템의 기술 동향

이형한 / 전력계통연구실장
김인섭 / 계통계획실장
정길조 / 차세대전력기술그룹장
유명호 / 계통계획팀장
김찬기 / HVDC팀장
*한전전력연구원

서 론

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. 이중에서 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 우리나라에서도 제주-해남 사이에 설치 연계되어 높은 경제성을 보이고 있다. 그리고 2011년에는 추가로 건설될 예정이다.

본 론 : 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 변압기, 그리고 송전선로의 리액턴스(송전선로의 길이)에 제한을 받으며 또한 경부하시에 충전전류 때문에 과전압을 유발하여 리액턴스 보상기를 필요로 한다. 반면에 직류송전은 AC 전력을 DC 전력으로 변환한 후에 DC 전력을 전송하는 방식이므로 정상상태에서 인덕턴스나 콘덴서 영향이 없어 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 설계되어 과부하상태에 대해서는 제한조건이 엄격해진다. 직류 송전과 AC 송전을 비교하기 위한 개별적인 패러미터는 다음과 같다.

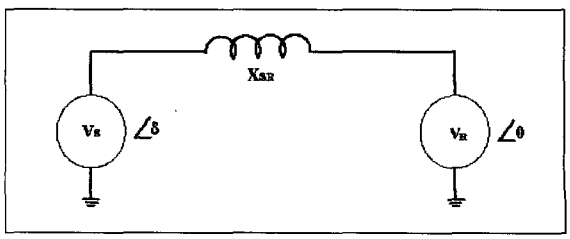


그림 1 AC 계통의 전력전송 등가회로

① 전송 능력 비교

다음 식은 AC 송전과 직류송전의 전송능력을 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.

$$\text{직류 송전의 절연비율} = \frac{K \cdot K_1}{K_2}$$

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

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

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

② 대지 궤환 능력

직류 송전은 대지(Earth)를 하나의 도체로 이용할 수 있으므로 AC 전송에 비하여 경제적이다. 따라서 ROW (Right Of Way : 선로 경과지)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.

또한, 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 위상차를 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 첨두 부하 송 · 수전

○ 고려사항

- 운전 방식
- 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.

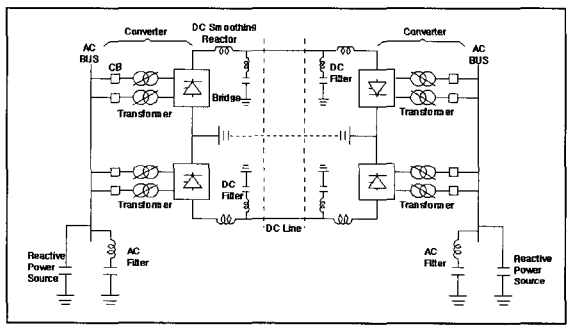


그림 2 양극 HVDC 시스템의 주요 구성요소의 구성도

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 송전선로의 단락 시에 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. 정상 상태 운전 조건하에서, 실제 송전전력의 약 50%가 무효 전력으로 소비된다. 과도상태 운전 조건하에서는 무효전력의 소비가 더 높을 수가 있다.

5) 전 극

대개의 직류 연결은 최소한의 짧은 시간 동안 대지가 중성점 도체로 사용된다. 대지와의 연결점은 전류밀도와 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.

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 계통강도의 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 3.6p.u인 경우에 ESCR은 3p.u 정도가 된다. 표 1에 일반적으로 계통의 강도를 결정하는 기준을 나타내었다.

표 1 단락용량(SCR)

ESCR	Definition
≥2.5	High
1.5 ~ 2.5	Low
≤1.5	Very Low

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

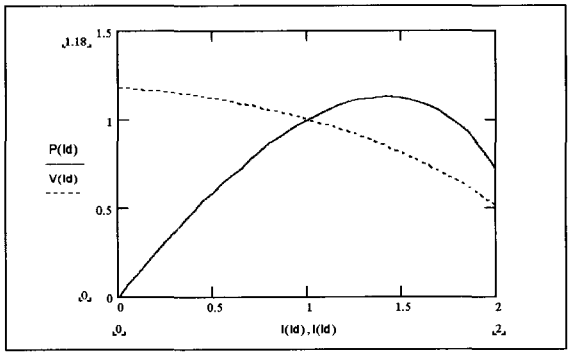


그림 3 HVDC 시스템의 최대 송전전력과 AC 전압

나. SCR과 동기화력을 고려한 HVDC 시스템의 용량 결정

서로 다른 위상을 가진 전력 계통의 연계나 서로 다른 주파수를 가진 전력계통의 연계, 계통 내에 존재하

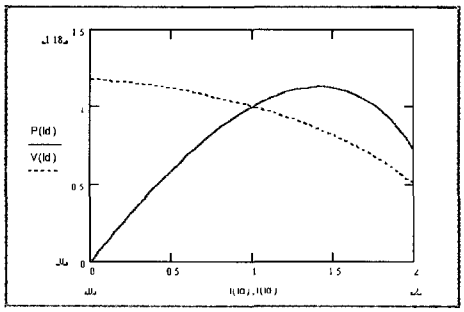
는 Subharmonic을 저감하기 위한 전력계통 연결 그리고 계통의 고장용량을 억제하기 위한 전력계통 연계 등은 대량의 에너지를 고정적으로 제어하는 PTP와 달리 순시 피크전력 제어를 위한 경우가 많기 때문에 용량의 결정은 PSS/E(Power System Simulator/Engineering)와 같은 프로그램 등을 이용하여 계통을 면밀히 검토한 후 결정해야 한다. HVDC 시스템의 목적 중에서 기저전력을 공급하는 것을 제외하고 2개의 계통을 연계하는 경우와 계통의 저차 고조파를 제거하기 위한 방법으로 크게 나눌 수 있는데 각각의 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. 이때의rm P_{sys}를 동기화력이라 부를 수 있다.

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

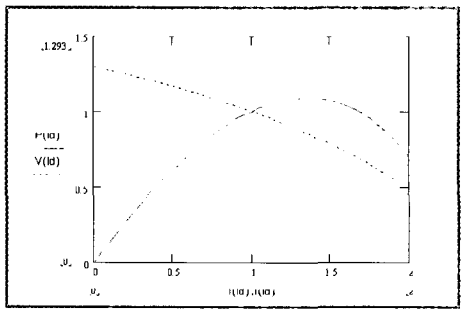
계통을 연계하기 위한 HVDC 시스템의 용량을 결정하려는 경우에는 2개 계통 사이의 상차각이 0(零)이 되기 위해 필요한 전력량을 HVDC 시스템의 용량으로 산정할 수 있다. 만약에 2개의 계통이 다른 주파수와 다른 전압, 그리고 다른 전력각을 가지고 운전된다 하더라도 위 수식과 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, AC 계통의 주파수는 유효전력에 관계되고 AC 계통의 전압은 무효 전력에 관계된다. 그리고 전력각은 부하량에 관계되기 때문에 상이한 2개의 계통 전력각이 일치되도록 하는데 필요한 전력량이 HVDC 시스템의 송전 용량이 된다. 또한 첨두부하를 교환하는 HVDC 시스템은 첨두부하만큼의 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

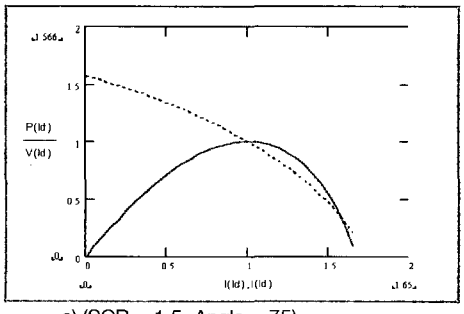
HVDC 시스템의 DC 전압은 HVDC 시스템을 설계하는데 있어서 경제성과 관련된 아주 중요한 요소이다. HVDC 시스템의 DC 전압은 AC 계통의 전압과 마찬가지로 높으면 높을수록 효율이나 전송 능력이 높아지나



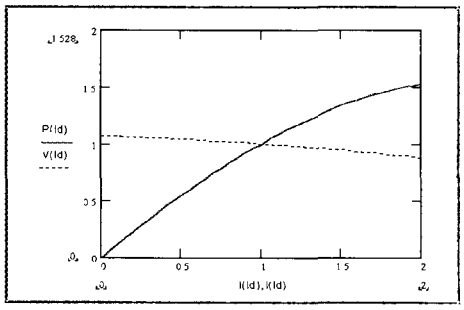
a) (SCR = 2.5, Angle = 75)



b) (SCR = 2.5, Angle = 90)



c) (SCR = 1.5, Angle = 75)



d) (SCR = 5, Angle = 75)

그림 4 MAP 방법을 이용한 HVDC 최대 전력 곡선

변압기나 케이블과 같은 주변기기의 절연레벨과 가격이 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 전류 용량은 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. DC 용량 400 MW 이하에서는 일반적으로 DC 전압이 결정되지 않는다. 이는 사이리스터 밸브의 직렬 개수와 송전선로를 포함하는 HVDC 시스템의 절연 레벨에 따른 경제성과 HVDC 시스템에서 소비되는 손실량에 따른 경제성이 명확히 비교되지 않기 때문으로 제작사나 전력회사의 독자적인 결정에 따른다.

BTB HVDC시스템에서는 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 PTP HVDC시스템에 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 첨두 부하를 교환하는 역할을 하기 때문에 1500 MW를 넘는 대용량 BTB HVDC 시스템은 없다.

라. HVDC 시스템의 안정도 판별 적용

그림 4 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.

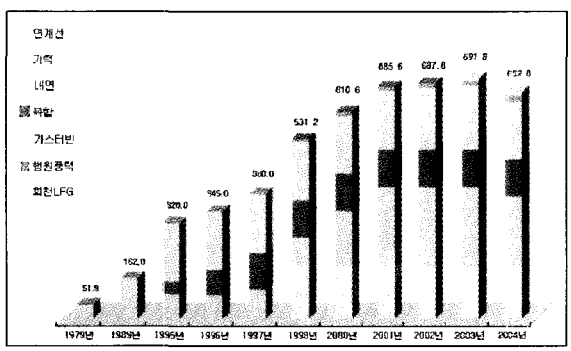
c)는 정상적인 CIGRE 모델의 AC 계통 테브난 임피던스를 2.5에서 1.5로 줄인 경우로서 DC 최대 전송전력이 1.2로 줄어드는 것을 보여주며 d)는 AC 계통 테브난 임피던스를 5로 증가시킨 경우의 예로서 DC 전력 전송의 중단 시에도 AC 계통의 전압 변동이 작은 것을 보여주고 있다.

제주 HVDC 추가 연계 현황

가. 제주의 전력현황

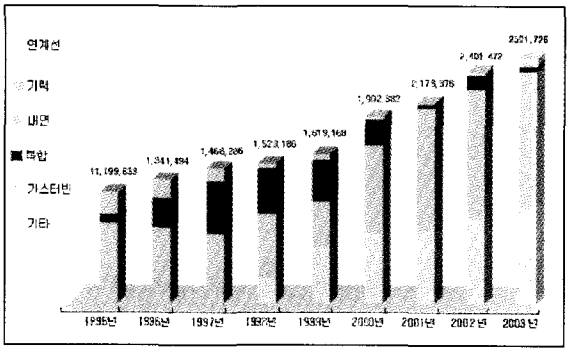
제주도의 전력은 소규모화력발전소와 HVDC 해저케이블을 통해 육지로부터 공급되고 있다. 제주도내에 설치된 제주도의 각종 화력발전설비는 2003년 12월 현재 최대 단위기 용량이 75MW인 소규모 전원설비이며, 사용 연료 또한 중유 혹은 경유로서 육지에 비하여 상

표 2 제주지역 발전소별 발전 설비현황



〈출처 : 전력거래소 2004년〉

표 3 제주도 년도별 발전량



〈출처 : 전력거래소 2004년〉

대적으로 고가의 에너지를 사용하고 있다. 한편 제주지역의 자연환경을 보존하고 회사의 경영효율을 높이면서 제주지역의 전력 수용가에게 양질의 전력을 제공하기 위해서 건설된 제주-해남 초고압 직류 송전설비(HVDC, High Voltage Direct Current : 1998년 상업운전 시작)는 현재 제주 계통 부하의 50%를 담당하고 있으며, 주파수 운전을 수행함에 따라 대용량 발전기의 Trip시에도 계통 고장파급을 현저히 줄이면서 육지보다 더 양호한 양질의 전력을 제주에 공급하고 있다.

나 제주 HVDC 현황

연계설비는 직교류 변환설비나 직류해저 케이블로 구성된다. 직교류 변환장치는 Thyristor Valve와 변환용 변압기를 거쳐 교류계통과 연결되도록 되어 있다. 해저케이블은 지절연의 Solid 케이블을 사용하였으나 케이블 보호를 위한 계장이 되어 있다. 또한 어업 활동에 따른 외부손상으로부터 보호하기 위해 해저에 매설하고 콘크리트매트, DUCT 등으로 보호되어 있다.중성선 방식은 대지귀로(Ground Return)방식을 사용하여 손실이 최소화 되도록 되어 있다.

가. 설비 용량 및 전압 :

300MW(150×2Pole), ±180kV DC

나. 주요 설비의 제원

(1) 변환용 변압기(Converter Transformer)
① 정격전압 : 154/79.2/79.2kV
② 정격용량 : 188.2/94.1/94.1MVA
(2) 싸이리스터 밸브(Thyristor Valve)
① 정격전압 : 154/79.2/79.2kV(Y-Y-Δ)
② 점호방식 : 광점호 12Pulse
(3) 스무싱 리액터(Smoothing Reactor) : 60mH
(4) 냉각방식 : 수냉식
(5) 광전송설비 : 90Mbps(#1) 및 2.5Gbps(#2)
(6) 전극소

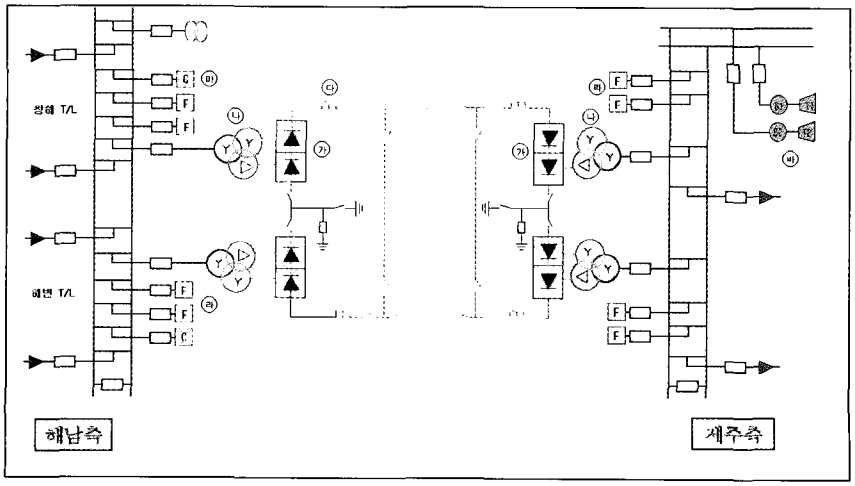


그림 5 제주-해남HVDC단선도

① 정격전류 : 850A
② 과부하정격 : 1530A
(7) 직류 케이블
① 설치 길이 : 101km x 2회선
(해저 96km, 육지 5km)
② 케이블 종류 : Cu MI
(Mass Impregnated Paper Insulated Cable)
③ 도체단면적 : 800mm²
④ 케이블 허용전류 : 840A
(8) 광통신 케이블
① 선로설비 : 광통신(101Km x 2), 12Core
② 전송설비 : 90Mbps급(#1), 2.5Gbps

다. 제주 HVDC 추가연계 경제성 검토

제주도 지역 발전 전원설비의 적정 예비율은 17%이상으로 상정할 경우, 2010년부터 2015에 제주에서 필요로 하는 발전설비 용량은 250MW정도로 사료된다. 따라서, 2010까지는 발전설비나 HVDC 300MW급이 제주에 건설되어야 하기 때문에 2011년에 제주에 HVDC #2의 건설이 추진되고 있다.

표 4 제주 발전기 비용

구 분	제주화력 #1	제주화력 #2,3	제주 G/T	제주 내연	남제주 화력	남제주 내연	한림 복합
연료비 [원/kwh]	80.65	58.31	136.48	101.99	76.15	51.85	106.77
운전유지비 [억원 · 년]	59.6	103	32.8	21.5	50.2	67.1	51.6
투자비회수 [억원 · 년]	11.6	97.8	13.2	-	84.0	30.7	125.6

표 5 신규 발전기 및 HVDC 비용

구 분	신규화력 LNG(150MW)	신규화력 기력(150MW)	기존HVDC	신규HVDC
연료비 [원/kwh]	61	59.4	50.73	50.73
운전유지비 [억원 · 년]	65	156.7	64.3	84.9
투자비회수 [억원 · 년]	77.8	148.2	285.8	377.4