

02 수력 발전과 HVDC High Voltage Direct Current 를 이용한 송전



세종대학교 컴퓨터공학과 교수
양 효 식



세종대학교 건설환경공학과 교수,
기후변화 수자원적응 연구단장
배 덕 호

서 론

HVDC (High Voltage Direct Current) 기술은 이미 1954년에 스웨덴에서 처음 상업화에 성공할 정도로 오래된 기술이다.

그러나 기간 기술의 미비로 전송용량이 작아 사업화에 성공하지 못하였으나 지속적인 기술개발과 ABB, Alstom 등의 기업에서 관련 장비 개발과 스마트 그리드의 도입으로 인하여 세계 각국에서 확산되고 있는 추세이다.

HVDC는 주로 응용분야가 장거리 전송에 해당한다. 현재 전 세계적으로 온실 효과 등으로 인하여 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 친환경 에너지의 도입과 스마트 그리드의 도입이 한창 진행 중에 있다.

전통적으로 친환경 에너지로 많이 사용된 수력발전이 개발도상국을 중심으로 확장되고 있으며 수력 발전을 HVDC와 연계한 프로젝트가 진행 중에 있다.

본 고에서는 이러한 수력발전의 세계적인 추이와 HVDC의 추이를 살펴보고 수력발전과 HVDC가 연계되어 갖을 수 있는 시너지 효과에 대하여 살펴보고자 한다.

수력발전 현황

수력발전은 하천 등에서 물이 갖는 위치에너지를 수차를 이용하여 기계 에너지로 변환하고 이를 다시 전기 에너지로 변환하는 방식으로 물이 떨어지는 힘을 이용하여 수차를 돌려 전기를 생산하는 방식이다.

현재 세계 재생에너지 생산량의 대부분은 수력발전이 담당하고 있으며 발전 방식에 따라 수로식, 댐식, 댐수로식, 유역 변경식, 양수식으로 분류할 수 있다. 수력발전은 설비용량에 따라 대수력 (100 MW 이상), 중수력 (10~100MW 이하)로 분류되며 소수력의 기준은 국가마다 다르며 다수 국가에서 소수력은 신재생 에너지로 분류되고 있다.

수력발전은 일반적으로 지질조사 등 지원 비용이 많아 화력발전에 비하여 초기 투자가 많다는 단점이 있으나 화력에 비하여 화석연료를 사용하지 않고 태양광이나 풍력 등 다른 신재생 에너지들에 비하여 에너지 비용은 적게 드는 장점이 있다.

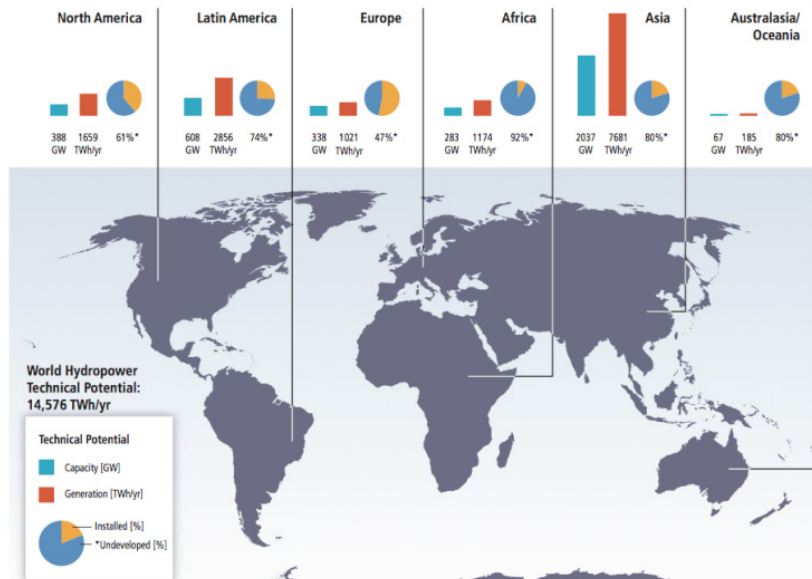
또한 설비 이용률도 태양광이나 육상 풍력에 비하여 30~60%로 높은 이용률을 보인다. 신재생 에너지 기술별 건설비 및 에너지 비용을 다음 표1에 정리하였다 [1].



[표 2 신재생 에너지 기술별 건설비 및 에너지 비용]

구분	특성	건설비 (\$/kW)	에너지 비용 (¢/kWh)
바이오매스	규모: 25~100MW 변환효율: 27% 설비 이용률: 70~80%	3,030~4,660	7.9~17.6
수력 (grid-based)	규모: 1~18,000+MW 설비 이용률: 30~60%	300MW 초과: < 2,000 300MW 미만: 2,000~4,000	5~10
수력 (off-grid/rural)	규모: 0.1~1,000kW	1,175~3,500	5~40
태양광 (지붕형)	변환 효율: 12~20%	2,480~3,270	22~44
태양광 (Utility-scale)	변환 효율: 15~27%	1,830~2,350	20~37
풍력 (육상)	설비이용률: 20~40%	1,410~2,475	5.2~16.5
풍력 (해상)	설비이용률: 35~45%	3,760~5,870	11.4~22.4

수력발전은 전 세계적으로 총 1,000 GW가 설치되어 글로벌 전력설비의 20% 및 발전량의 16%를 차지하고 있으며 알바니아, 콩고, 모잠비크, 네팔 등 일부 국가에서는 수력발전이 전체 전력 생산량의 대부분을 차지할 만큼 세계 에너지 시장에서 중요한 부분을 담당하고 있다. 이와 더불어 중국 등 개도국을 중심으로 대수력 중심으로 성장하고 있다 [2]. 전 세계적으로 수력발전 잠재력 대비 25% 만 개발되어 잠재력은 매우 크며 이중 아프리카가 잠재력은 제일 크며 다음으로 아시아, 호주/오세아니아, 남미 순으로 잠재력이 크다. 2009년 개발된 수력발전 현황과 잠재력에 대한 용량을 다음 그림1에 나타내었다 [3].



[그림 1] 수력발전 현황 및 잠재력

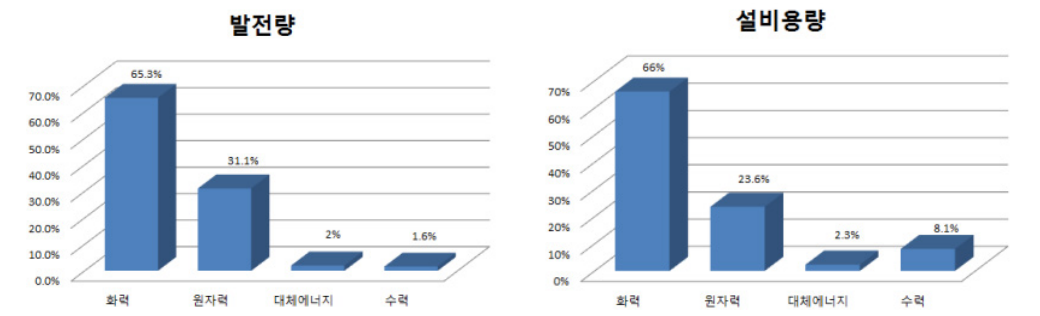
수력발전은 2012년 약 30GW의 신규 수력발전 설비가 설치되어 누적 설비 용량은 990 GW에 이르렀고 전년대비 3% 증가하였으며 이중 중국이 주도하였으며 뒤를 이어 터키, 브라질, 베트남, 러시아 캐나다가 뒤를 이었다.

수력발전량은 2012년 연간 3,700 TWh로 추정되며 총용량 역시 중국이 주도하고, 브라질, 미국, 캐나다, 러시아 순으로 많은 수력 발전소를 보유하고 있다. 이와 함께 수력발전 프로젝트의 증가로 인해 국제 협력 프로젝트의 비즈니스 모델도 증가하고 있다.

국내

2012년 기준 국내 각 발전의 발전량 및 설비 용량은 다음 그림2와 같다. 현재 국내 발전시설의 대부분은 화력과 원자력이 차지하고 있다.

그러나 화석연료의 원자재 값 인상, 신재생 에너지의 도입 등으로 화력이 차지하는 부분은 줄어들 전망이며 원자력 역시 환경 영향 등으로 국제적으로 감소가 요구되고 있다. 국내 수력발전소 중 가장 큰 곳은 충주댐으로 발전용량은 412만 kW이다.



[그림 2] 국내 발전 연료별 발전량 및 설비용량

아시아

수력발전은 중국에서 화력발전에 이은 제2의 전력생산 에너지원으로 전체 발전 용량 7.13억 kW의 20.4%인 1.45억 kW를 차지하며 전체 발전량 32,559억 kWh의 15%인 4,867억 kWh를 차지하고 있다. 이와 더불어 수력발전 용량 및 생산량, 증가율이 세계 1위를 차지하고 있을 만큼 수력이 차지하는 비중이 높다.

여기서 그치지 않고 현재 공사 중인 1,500만 kW급 이상의 수력 발전소는 13개에 이르며 2015년까지 완공 예정에 있다. 중국의 수자원은 서부 지역인 시장, 쓰촨, 윈난 등지의 수자원이 풍부하며 특히 히말라야 산맥을 접하고 있는 시장 등의 지역은 지역적 특성으로 인해 대규모 수력 발전소 건설이 용이하며 남서부 지역도 몬순기후의 영향으로 강수량이 풍부하다.

다음 그림3에 중국 수자원 분포 현황을 나타내었다. 중국의 수자원 개발정도는 27%에 불과하여 일본 84%, 미국 82%, 독일 73%, 캐나다 65% 수준에 비하여 낮은 편으로 수력발전 개발 잠재력이 매우 높다.



[그림 3] 중국 수자원 분포 현황: 국가사회경제통계 전자지도

한편 중국의 서부지역은 풍부한 수자원으로 전력사용에 여유가 있는데 반해, 경제가 발달하고 전력수요가 많은 동부지역은 전력부족 현상을 보이고 있어 HVDC를 이용한 송전 프로젝트가 진행 중에 있다.

중국의 수력발전은 신재생 에너지의 증가와 함께 지속적인 성장을 보일 것으로 보이며 지속적인 경제 성장과 맞물려 지속적인 투자가 예상된다. 또한 수력발전 기술에 있어서도 지속적인 성장으로 전력사정이 좋지 않은 아프리카, 중남미 등지로의 진출이 늘어날 전망이다 [4].

[표 2 중국의 수력발전 해외진출 현황]

국 가	지원방법	금 액	내 용	연 도
모잠비크	원조	23억 달러	수력발전용 댐	2006
가봉	투자, 원조	83백만 달러	수력발전용 댐	2008
수단	투자, 대출, 원조	42억 달러	수력발전 설비, 정유 등	2002~2007
이디오피아	투자, 대출, 원조	20억 달러	수력발전 설비, 통신 등	2002~2007
미얀마	투자, 대출	31억 달러	수력발전 설비	-

인도는 1898년과 1902년에 아시아에서 최초로 수력발전소를 건립하였으며 현재 수력발전의 비율은 높은 편이다. 인도의 수력 잠재력은 150 GW로 추정되나 2010년 수력발전 설치용량은 40 GW로 2020년까지 62 GW로 증설할 계획에 있으며 전체 전력생산의 16.36%를 담당하고 있다 [5]. 베트남의 수력 발전 용량은 2011년 8.3 GW로 2020년까지 15.4 GW로 증가할 것으로 보인다.

장기적으로는 아시아에서 370 GW가 증가하며 중국 193 GW, 인도 76 GW가 신규 설치되는 등 아시아 설치용량의 73%를 차지하며 성장을 주도할 것으로 보인다.

유럽

유럽은 전통적으로 스웨덴 등의 국가에서부터 오래전부터 수력발전이 발전해 왔다. 터키는 전력 부족과 전력재난을 해소하기 위하여 2012년에만 2GW를 추가하여 현재 총 설비용량이 21GW에 달하고 있다.

그러나 유럽 대부분의 국가는 스마트 그리드 도입에 따라 풍력, 태양광 등 신재생 에너지의 도입과 함께 기존 발전소의 현대화를 중심으로 발전할 것으로 보인다.

아메리카

아마존 강을 끼고 있는 브라질은 전통적인 수력 중심 국가로 발전용량의 78%가 수력이며 성장성도 높아 2012년에만 1.86 GW의 수력발전을 추가하여 2012년 말 총 84GW에 달하고 있다.

이중 Itaipu발전소는 2012년 산출량 기록을 경신하는 등 정부차원에서 수력발전에 많은 노력을 기울이고 있다.

중남미에서는 97 GW가 증설되며 브라질이 46 GW를 증설하는 등 중남미 설치용량의 47%를 차지할 것으로 보인다. 반면에 북미는 유럽과 같이 기존 발전소의 현대화를 중심으로 발전할 것으로 보인다. 이외에 아프리카 등은 수력발전 잠재력의 5%만 사용하는 등 발전 가능성이 높으며 콩고, 에디오피아, 카메룬 등이 잠재력이 높다.

지금까지 살펴본 바와 같이 수력발전은 저개발국 빈곤퇴치, 온실가스 감축 노력, 에너지 안보 등으로 환경문제가 야기됨에도 불구하고 지속적으로 확대될 전망이다. 특히 중국, 인도 등 개발도상국을 중심으로 신설 투자가 증가하고 있으며 북미, 유럽 등 선진국은 신설보다는 기존 시스템의 업그레이드 수요가 증가하고 있다.

개발도상국의 수력발전 도입과 더불어 수력발전으로 생산된 전력을 수송가까지 연계하기 위한 HVDC 도입도 이와 더불어 증가하고 있는 추세이다.



HVDC (High Voltage Direct Current)

전기는 생산을 하는 발전 (Generation) 시스템과 만들어진 전기를 수송가 측 까지 전달하는 송전 (Transmission), 변전 (Transformation), 배전 (Distribution) 단계를 거쳐 수송가까지 전달된다. 발전소에서 생산된 교류전력은 기존에는 주로 AC (Alternate Current) 형태로 전기를 전달하였다. HVDC 시스템은 발전소의 교류 전력을 직류로 변환시켜서 송전한 후 수송가 근처에서 교류로 재 변환하여 전력을 공급하는 방식이다.

현재까지 주 에너지원이었던 화력은 화석연료를 수송가 근처까지 운반할 수 있었기 때문에 장거리 송전이 필요 없었지만 수력, 풍력, 태양력 등 신재생 에너지는 일반적으로 수송가로 멀리 떨어진 지역에서 발전이 이루어진다. 이러한 에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는 장거리를 저비용으로 효율적으로 전송하여야 한다. 송전 용량을 늘리기 위한 가장 손쉬운 방법은 전압을 높여서 전송하는 방법이다. 그러나 장거리 송전을 위해서는 전압을 높이는 방법만으로는 효율적으로 전송할 수 없다. 그러나 교류 전원을 직류로 변환하여 전송하면 많은 장점이 있다. HVDC의 발전은 계속되어 HVDC를 이용하여 현재 수천 MW의 전력을 2000 km이상 단일 송전선로를 이용하여 송전할 수 있게 되었다. 현재 HVDC는 ABB, SIEMENS, ALSTORM 등 다국적 기업들이 전 세계 시장의 90%를 담당하고 있다. HVDC 시장은 향후 2020년 730억 달러 (77 조 원), 2030년 1,430억 달러 (152 조원) 규모로 성장할 것으로 예상되고 있다. 이는 장거리 송전 증가 (중국, 인도, 남미 등), 해상 풍력 증가 (유럽), 국가 간 계통 연계 증가 (유럽), 계통 안정화 및 스마트 그리드의 도입 등 전 세계적인 추세와 맞물려 지속적인 성장이 예상되는 분야이다.

HVDC 사용의 장/단점

HVDC 시스템은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. [6]

- 장거리 전력전송에 있어서 AC 전송에 비하여 감쇠가 적어 가격이 저렴하다.
- AC 계통에 영향을 주지 않으며 대용량의 전력전송이 가능하다.
- 주파수가 다른 계통 (50 Hz, 60 Hz)과도 연계가 가능하다.
- 절연이 용이하며 유도 장애가 적어 송전탑의 크기와 높이도 줄일 수 있다.
- 전력의 예비율을 낮출 수 있기 때문에 기존에 설치된 발전용량을 줄인다.
- 계절적인 영향을 받는 수력과 화력발전소의 최적설치를 용이하게 한다.
- 개별적인 시스템의 일/월/년 부하 사이클이 다르기 때문에 상호 연계시스템망의 최대 부하값이 줄어든다.
- 발전계획을 보다 크고 경제적으로 할 수 있다.

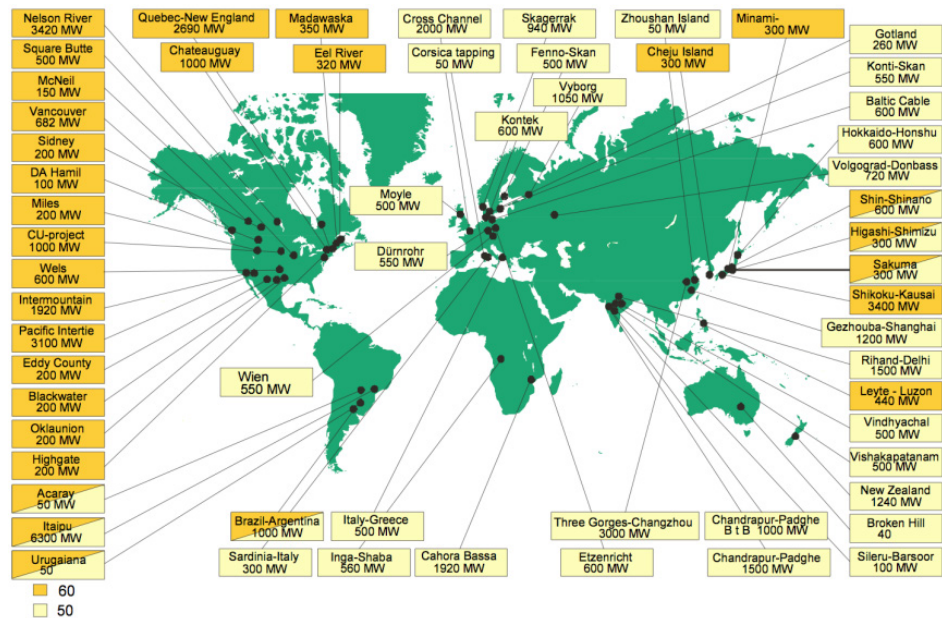
AC 송전에 비하여 AC를 DC로 변환하기 위한 초기비용은 크지만 AC 송전에 비하여 송전 탑 당 전송 전력이 고압으로 올라갈수록 높아져 송전거리가 늘어남에 따라 AC 송전에 비하여 낮은 가격으로 송전이 가능하다. 따라서 초기 변환설비 비용의 증가로 break-even point이상의 거리가 확보되어야 경제성이 있으며 일반적으로 가공선로의 경우 700 km가 넘어갈 때 해중 선로의 경우 40 km가 넘어가면 HVDC가 AC 송전에 비하여 적은 비용으로 송전이 가능하다. 이외에 승압 및 감압이 어려우며 정합이 어렵다는 단점이 있다.

각 국의 HVDC 운용 현황

1990년 이후 전 세계적으로 각국에서 HVDC 도입이 활발히 진행되고 있으며 약 24개국에서 130 개 이상의 프로젝트가 진행 중에 있다 [7]

현재 진행 중인 프로젝트를 다음 그림4에 도식화 하였다. 현재까지는 주로 유럽을 중심으로 도입 되어왔으나 중국 등 개발도상국을 중심으로 많은 프로젝트가 진행 중에 있다 [8]

현재까지 대부분의 HVDC 시스템이 600 kV 전압을 사용하여 왔으나 최근 800 kV 이상의 전 송전압을 갖는 HVDC를 UHVDC (Ultra High Voltage Transmission DC) 도입이 진행 중에 있다. 이와 더불어 송전 손실을 줄이고 송전 용량을 늘리기 위해 1,000 kV 이상의 UHVDC 시스템의 개발도 활발히 진행 중에 있다.



[그림 4] 세계에서 진행 중인 HVDC 프로젝트

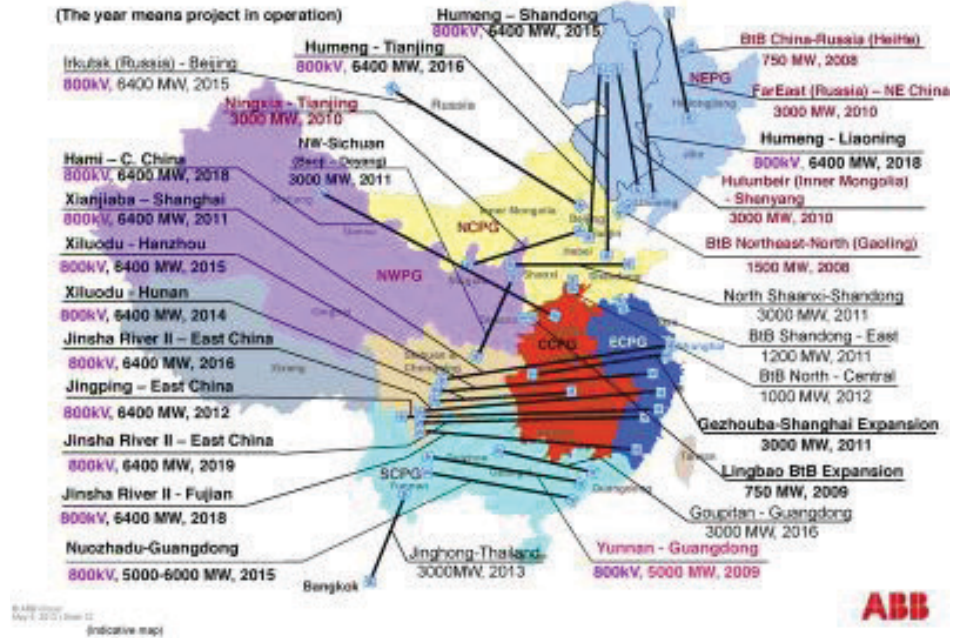
아시아 지역의 경우 중국은 수력발전과 HVDC에서 가장 발전하고 있는 나라로 중국에서는 매년 스웨덴의 전체 발전량에 맞먹는 용량의 발전소가 건설되고 있으며 대부분 수력발전을 사용하고 있다. 이러한 수력발전에서 발전된 전기는 주로 HVDC를 이용한 직류 송전방식을 채택하고 있다.

중국 내 대부분의 수력 에너지원은 강이 많이 위치한 서쪽 지역에 위치하고 있으나 대부분의 수용가는 공업이 발달하고 인구가 많이 있는 반대편인 동쪽 및 남쪽에 위치하고 있어 수력발전소에서 수용가 까지 약 1,500 km에서 2,000 km의 거리의 송전이 필요하다.

이러한 장거리 전력 송전을 위해 중국은 800 kV급 HVDC 시스템을 계획하고 있으며 다음 그림5는 2020년까지 계획되어있는 HVDC 송전선로 프로젝트를 나타내고 있다 [9].



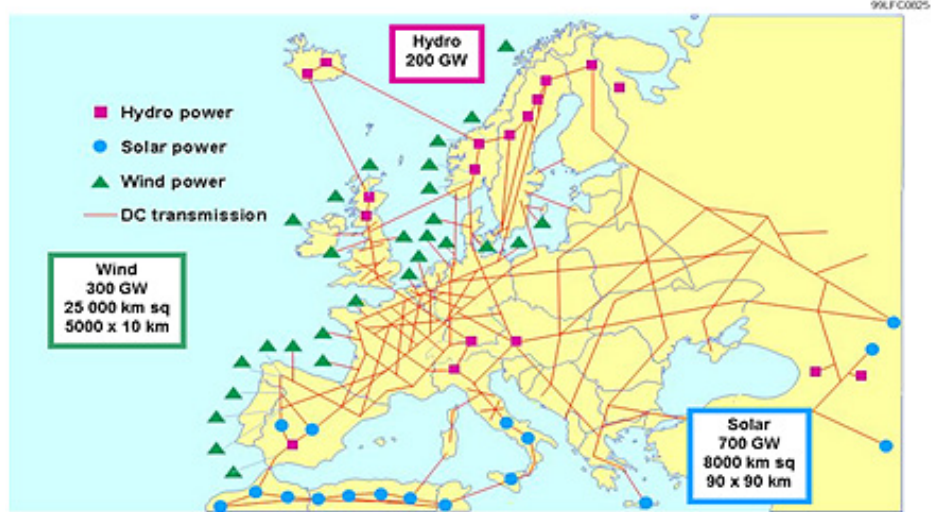
Planned Future HVDC Projects by 2020 in China



[그림 5] 중국에서 진행 중인 HVDC 프로젝트

인도에서도 중국과 마찬가지로 풍부한 수력자원을 이용하여 발전용량을 늘리고 있다. 수력자원은 대부분 인도의 동남쪽에 위치하고 있고 수용가는 약 2,000km 이상 떨어진 곳에 주로 모여 있다. 이에 따라 수력발전소와 수용가를 연결하는 800 kV의 전송전압을 갖는 HVDC 시스템을 건설하고 있으며 2020년까지 지속적으로 건설할 계획을 갖고 있다.

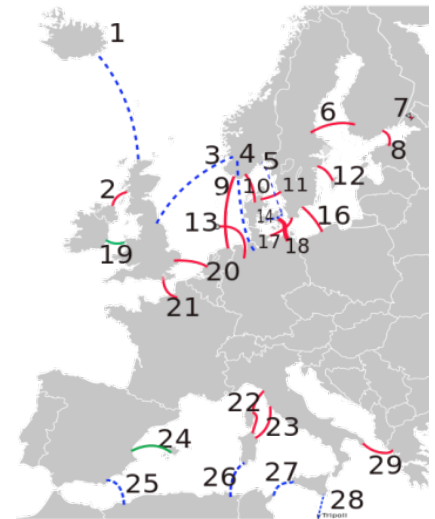
유럽은 앞에서 살펴본 바와 같이 신재생 에너지원의 경우 수용가로부터 멀리 떨어진 지역에서 발전이 이루어지기 때문에 장거리 전송이 필요하고 이때 HVDC가 유리하게 작용한다. 다음 그림6은 유럽의 신재생 에너지원을 연결한 HVDC망을 나타내고 있다 [10]. 그림과 같이 풍력은 주로 해안가에 위치하고 있으며 스웨덴의 경우 오래전부터 수력을 이용하여 발전하여 왔다.



[그림 6] HVDC를 이용한 신재생 에너지의 연계

또한 다음 그림7과 같이 유럽연합의 각 국가 간 전력거래에도 HVDC를 사용하고 있다. 유럽연합의 경우 각 국가 간에 인접한 국가들이 많아 각 국가 간의 전력거래가 이루어지고 있다. 현재 운영 중인 선로와 점선으로 연결된 HVDC 송전선로는 향후 계획된 송전선로이다.

남 아메리카의 경우 브라질의 Itaipu 수력발전은 세계에서 가장 규모가 큰 HVDC 전송 시스템을 갖고 있다. 용량은 6300 MW이며 전송전압은 600 kV이고 다음 그림8에서 보는바와 같이 전송 거리는 2500 km에 이른다. HVDC를 도입한 가장 큰 이유는 50 HZ의 발전 시스템에서 생산된 전력을 60 Hz를 사용하는 수용가에 맞추고 장거리 전송에 HVDC가 유리하여 도입하게 되었다.



[그림 7] HVDC를 이용한 유럽 각 국가간 연계



[그림 8] 브라질의 Itaipu HVDC 프로젝트

아프리카의 Grand Inga Project는 콩고의 수력자원에서부터 전력을 생산하여 북쪽의 이집트 카이로, 남쪽의 남아공 요하네스버그까지 500 kV HVDC 전송선을 이용하여 전력을 공급하고 있으며 800 kV 이상을 이용한 2,000 km 이상의 HVDC 송전선의 연결에 대한 요구가 증대되고 있다.

한편, 우리나라에서는 1998년 국내 최초로 해남-제주 간 1차 HVDC 시스템이 상업 운전된 이후 2011년 12월 진도-전주가 200MW급 HVDC 시스템이 건설되어 운영 중에 있다(표3). 그러나 아직 육상 HVDC 선로는 건설되지 않았고 기존의 시스템도 AREVA사의 기술로 건설되었으며 국내 자체기술로 HVDC 시스템을 설계하여 건설한 경험이 없다.

<표 3> 국내 HVDC 보급 현황

구분	제 1 연계선	제 2 연계선
구간	해남-제주	진도-제주
전송 전압	±180 kV	±250 kV
용량	300 MW	400 MW
완공	1997년	2012년
전체 전송량	82만 5,090 MWh	33만 5,896 MWh



[그림 9] 해남-제주 간 HVDC 송전선로 개념도

국내의 HVDC 개발 기술은 아직 미흡하지만 한국전력은 LS 산전, LS 전선, 대한전선과 함께 2011년 제주도에 HVDC 국산화를 위한 80kV 60 MW급 실증단지를 착공하였다. 변환소 2개소와 송전선로는 DC 5.3 km에 달하며 2012년 12월 시운전을 실시하였다.

국내의 경우 HVDC에 관한 원천기술이 미약한 편이며, 세계 수력시장 내에 경쟁력 제고를 위해서는 기술개발을 위한 정부차원의 지원 및 투자가 필요하다. 향후 통일된 대한민국을 고려할 때 우리나라는 일본과 아시아 대륙을 연결하는 발판에 있으며 HVDC 기술을 이용하여 중국과 러시아, 일본을 잇는 중요한 위치에 있다. 향후 스마트 그리드 도입에 따라 HVDC 기술에 대한 수요가 많을 것으로 전망된다.

결론

지금까지 살펴본바와 같이 지속적인 성장을 보이는 수력발전 기술과 HVDC 기술은 상호보완적인 관계를 갖고 있다.

앞에서 살펴본 중국, 브라질, 인도의 예에서처럼 수용가에서 멀리 떨어진 물 자원을 이용한 수력발전은 생산된 전력을 효율적으로 전송하기 위하여 HVDC를 이용한 송전이 불가피하며 작은 송전탑 등 보다 최적화된 송전을 할 수 있다.

특히 히말라야에서 생산된 수력을 이용한 중국과 인도 북동부, 아마존의 풍부한 수력을 이용한 남아메리카, 풍부한 수력 자원을 갖고 있음에도 개발이 늦은 아프리카를 중심으로 수력자원의 개발과 더불어 HVDC를 이용한 장거리 송전에 많은 요구가 증대되고 있다. 현재까지는 주로 600 kV의 전송 전압을 사용하여 왔으나 국제적으로 800 kV의 전송전압을 갖는 HVDC가 운용 중에 있으며 보다 높은 전력을 전송하기 위하여 1,100 kV를 이용한 HVDC 프로젝트가 중국에서 진행 중에 있다 [11, 12].

현재 HVDC 관련 장비들의 LS 산전, 효성 등에서 국산화가 이루어지고 있으며 국내에서도 해저 HVDC 송전선로의 운영 경험과 육상 HVDC 관련 국가 프로젝트의 진행으로 세계시장 진출에 의지를 보이고 있으나 [13] 국제적인 요구에는 미치지 못해 더 많은 연구 및 지원이 필요한 실정이다.



참고문헌

- ① 녹색에너지 전략연구소, “2013 재생에너지 현황 보고서 - REN21”, 2013
- ② 해외경제연구소 산업투자 조사실, “수력발전 시장 현황 및 전망”, 2013
- ③ 한국 수출입 은행-해외경제연구소 국별 조사실, “중국의 수력발전 현황과 향후 전망”, 2013
- ④ World Atlas & Industry Guide, International Journal of Hydropower and Dams, Wallington, Surrey, UK, 2010
- ⑤ 정상외교 경제활용 포털, “인도 신정부 재생에너지산업 적극 육성”
- ⑥ 전기의 세계, “HVDC 전력연계 및 현황”, 2009
- ⑦ List of HVDC Projects, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects
- ⑧ R. Rudervall, J. P., Charpentier, R. Sharma, “High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper”, 2000
- ⑨ HVDC in China, <http://www.energypolicy.asia/reports/hvdc-in-china/>
- ⑩ Transmission in Europe, <http://elways.se/transmission-of-electric-power/?lang=en>
- ⑪ Brian Gemmel, John Loughran, “HVDC가 수력발전 잠재력에 대한 관건 제공”, 2002
- ⑫ J. Graham, A. Kumar, G. Biledt, “HVDC Power Transmission for Remote Hydroelectric Plants”, 2005.
- ⑬ 한국전력신문, “LS산전, HVDC 기술 국산화 토대 쌓았다”, 2013