초고압 송전설비 세계적 현황 및 미래 송전기술

이동일
대한전기학회 전기물성응용부문회 회장

1. 개 황

세계 경기 침체와 일부 선진국가의 전력설비 운영 전력회사에 대한 민영화로 인해 설비에 대한 신규 투자보다는 기존 설비에 대한 수명연장을 통해 전력회사의 이익을 추구하려는 경향이 짙다. 따라서 전반적으로 송변전설비 투자도 부진한 추세이다. 하지만 이러한 설비투자 억제도 이미 수명이 다해 교체시기에 달한 설비의 증가로 인해 사고방지 관점에서 조만간 설비투자에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다.

몇 년 전까지 G20 제주도 행사시에 절정을 이뤘던 그린에너지 기조는 미국의 세일가스 출연으로 인해 미국, 일본 등이 그린에너지 정책에서 물러나면서 탄소세는 폭락하였고, 세계적으로도 신

재생에너지 정책기조가 시들어가고 있는 추세이다.

하지만 급격한 전력수요 증가로 전기가 부족한 중국은 노후 석탄발전으로 인해 대기오염이 악화되면서 매년 우리나라 발 · 송 · 배전 설비만큼의 신규 설비를 구축하고 있다. 중국의 경우에는 그린에너지 정책이 불가피한 입장이며, 전력설비 신축 추세 또한 지속 중이다. 하지만 이러한 급속성장 증가 추세도 중국경제 성장률이 줄어들면서 송변전설비 건설 증가세도 포화를 맞고 있다.

넓은 면적을 보유하고 있는 중국과 남아공, 그리고 브라질 같은 개도국들의 경우 경제발전에 따른 전력수요 증가를 맞추기 위해서는 신재생에너지 개발 정책으로는 한계가 있어 대단위 발전단지 개발을 통한 장거리 송전에 대한 대규모 투자를 진행하고 있다. 그리고 대부분의 국가가 수도권 부하밀집지역으로부터 전원단의 입지까지 거리가 매우 멀기 때문에 대용량전력수송(Bulk Transmission)을 위한 장거리 초고압 송전은 필연적이라 할 수 있다.

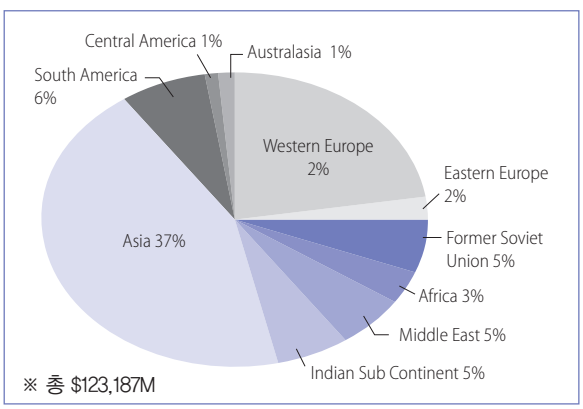
이러한 초고압 송전과 관련해 환경친화적이고 효율적인 기술개발이 진행되고 있다. 특히 이러한 기술에 대한 국제적 기준 정립을 위해 국제전기위원회(IEC, International Electrotechnical Commission)와 세계대전력망회의(CIGRE, International Council on Large Electric System)가 주축이 돼 워킹그룹과 T/F를 구성, 합리적인 기준 마련을 위한 포럼 등을 지속적으로 진행하고 있다. 또 개발 당사국들은 이러한 기술의 선점을 위해 기술개발은 물론 세계의 초고압 송전 분야 전문가를 초청해 국제 기술세미나를 개최하는 등 기술교류를 활발히 진행하고 있다.

본고에서는 국내 중전기업체, 전기건설 등의 관련 분야에 도움이 되는 주요 국가들로부터 수집된 자료를 토대로 각국 초고압 송전설비 운용현황 및 전망에 대해 짚어보고, 밀양 765kV 송전선로 민원에서 얻은 교훈을 바탕으로 향후 추구해야 할 미래 초고압 송전선로 구축 및 운영방향에 대해 고찰해 본다.

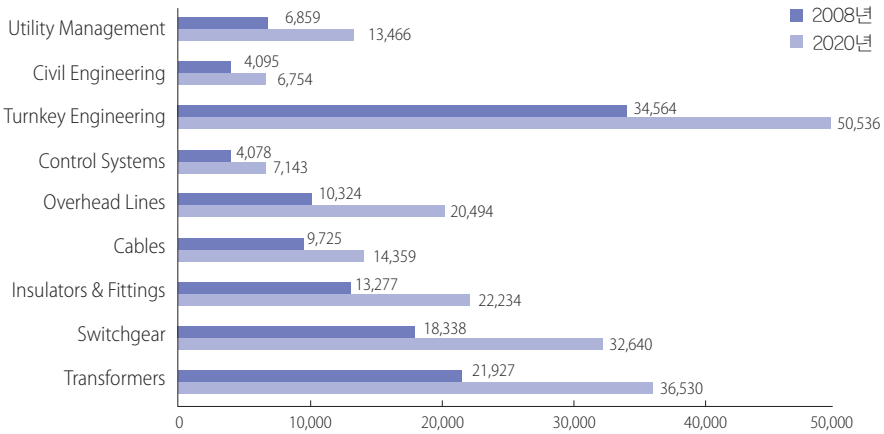
2. 국내외 송전설비 운용 현황

가. 세계 송배전기기 시장동향 및 전망

세계 송배전기기 시장 규모는 2008년 1,231억 불을 기록했으며 2020년까지 4.5% 내외의 안정적인 성장세가 유지될 전망이다. 이러한 전망은 기존 단품 중전기기가 융 · 복합 디지털 중전기기 중심으로 전환됨에 따라 새로운 수요가 창출되고 있고, 아프리카 · 중국 · 인도 등 자원부국의 전력산업 인프라 투자가 지속되고 있음은 물론, 유럽 및 미국의 중전기기 설비교체와 전력설비 네트워크 업그레이드 추진



[그림 1] 세계 송배전기기 시장 점유율 현황 및 전망



[그림 2] 세계 송배전기기 품목별 시장 전망(단위 : M$)

사업이 지속되고 있는데 따른 것이다. 전 세계적으로는 인도가 7.12%의 가장 높은 성장세를 기록할 것으로 보이며, 아프리카와 아시아 지역도 연 5.3%의 높은 성장세를 유지할 전망이다.

송 · 변 · 배전기기와 관련한 분야로는 변압기, 차단기, 지중케이블, 가공전선, 제어 시스템 등이 있으며, 이 가운데 성장세가 두드러질 것으로 예상되는 항목은 가공송전 및 설비관리 분야로, 2008년에 비해 2020년 각각 204.94억 불, 134.66억 불로 2배 정도 시장규모가 커질 전망이다. 이는 경제성장과 더불어 증가하는 전력수요에 대한 안정적인 공급과 초고압 송전망 확충 및 설비용량 증대에 따른 것으로, 송 · 배전 기술 분야 뿐 아니라 상품 · 기술 · 관리까지 통합해 패키지로 수출할 수 있는 기회가 증가함을 의미한다. 따라서 국내 전력사가 ABB, Simens, Areva 등 유수기업과 경쟁해 이와 같은 시장에 반드시 진출할 수 있도록 해야 한다.

나. 초고압 송전의 필요성과 세계적 운영현황

최근의 세계적인 초고압송전 전압 계급을 보면 우리나라를 포함한 9개국이 765kV를 채택, 주류를 이루고 있다. 9개국 중 우리나라만 국산화에 성공한 AC 765kV급 2회선을 채택하고 있고, 다른 8개국은 765kV 1회선 방식을 채용하고 있다. 중국이 AC 1,000kV와 HVDC 800kV의 상용운전에 들어갔고, 현재 HVDC 1,100kV를 연구개발 중에 있는데, 2015년 세계 최초로 상용운전을 목표로 하고 있다. 이에 대한 연구개발은 현재 80% 수준을 넘어선 상황이다. 인도도 HVDC 800kV 건설에 착수했고, AC 1,200kV급을 검토하고 있다. 특히 인도는 주 송전간선으로 우리나라에 이어 765kV 2회선 방식을 채택키로 결정한 바 있다.

한편 이러한 초고압 송전이 필요한 주요인으로 △대용량 발전단지는 발전단지 건설환경을 고려해 일반적으로 부하집중지역과 원격에 위치하고 있다는 점 △대규모의 계통부하가 한계에 이르러 설비용량을 증대를 위해 이와 연계한 선로의 확충이 필요하다는 점 △유사한 강도와 특성을 지닌 계통을 연계시 신뢰성과 경제성 향상을 필요로 하는 경우 등 크게 3가지로 구분할 수 있다.

초고압 송전을 운용, 설계, 신뢰성, 환경 측면에서 고려해 보면, 전압자승에 비례하는 송전용량 증가와 함께 송전손실이 감소된다. 여기에 선하지면적은 물론 철탑구조물의 수량을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 설계 측면으로 초고압 송전이 하위 전압계급의 송전에 비해 1기의 구조물은 더 커질 수밖에 없으나,

동일한 전력을 전송하는데 다수의 구조물을 설치하는 경우에 비해 증가되고 있는 부지확보의 어려움을 고려할 경우 경과지(Right of Way)가 줄어들어 유리하다. 또 전압계급이 높아질수록 상간 거리가 증가하게 되는데 이는 상간 혹은 3상 단락사고의 위험성을 줄여주는 효과도 있다. 신뢰성 측면의 경우 NERC (North American Electric Reliability Corporation)의 765kV와 345kV의 정전사고 비교분석 자료에 의하면 교류 345kV에 비해 765kV의 정전사고는 마일(mile)당 28%로 감소하고, 정전복구시간도 1/4로 줄어들며, 순간적인 정전 또한 38%로 감소된다. 환경적인 측면에서 보면 단위용량당 용지가 덜 들며, 더 적은 구조물로 인해 환경 훼손을 최소화할 수 있다.

국내에서는 교류 345kV급을 증설할 경우 전력수요에 부응하는 송전설비 구축 용지 확보가 어려운 점 등을 고려해 1992년 차기 격상 송전전압으로 교류 765kV가 결정된 바 있다. 1980년대 초부터 20여 년간의 연구 결실로 2003년 상용운전을 시작해 현재까지 안정적으로 운용되고 있다. 1차 초기 사업에서 서해안 및 동해안에서 수도권으로 이어지는 양 선로를 340km 구간에 걸쳐 건설한데 이어, 이 양 선로를 연결하는 신가평~신안성 765kV 1회선 60km 구간을 민원의 어려움을 거쳐 2010년 7월에 구축 완료했다. 이어 북경남과 신고리를 잇는 100km 구간에 전력공급의 신뢰성 향상 및 경제적 효용가치 제고를 위해 수직 2회선 방식의 2단계 765kV 송전선로를 건설하고 있는데, 밀양지역 민원으로 국가적 대혼란을 거치면서 이제 막바지 건설에 박차를 가하고 있다.

우리나라가 채택한 765kV 2회선 송전 방식은 환경친화적이면서도 신뢰성과 경제성을 갖춘 방식으로 송변전 분야에서 국내 최초로 '765kV 송전전기환경 한국방식의 예측식'이 IEC 세계기준으로 채택되는 등 해외에서 인정받고 있다. 실례로 미국 최대송전전력사인 AEP도 미국 내 'Super Highway'에 765kV 방식을 제안하면서 일부구간에 우리의 2회선 방식을 고려하고 있으며, 전력수요가 매년 9% 이상 증가하는 인도에서도 초고압 송전망 건설계획에 국내와 동일한 방식인 수직 2회선 765kV를 주간선으로 채용키로 결정해 증설을 준비 중이다. 또 남아공의 독점 전력사인 ESKOM도 우리나라가 765kV 2회선을 성공적으로 구축해 운영한 사례를 본받아 도입을 검토 중에 있다.

지난 몇 년간 전 세계적인 전력 관련 이슈였던 'Green & Smart'라는 키워드에서 최근에는 국가간, 지역간 계통연계로 피크 타임시 전력을 융통하는 전력 Swapping의 'Super Grid'가 대세이다. 그 이면에는 우리나라와 같이 독립계통(Isolated Power System)을 운용하는 경우 피크 수요를 대비해 대단위 예비 발전력을 확보하기 위해 예산을 투자하는 것 보다 경제성

[표 1] 국가별 면적 및 인구, 설비용량 자료 비교[1)]

국가	면적(㎢)	인구(명)	인구증가율(%)	경제성장률(%)	설비용량(MW)
미국	9,826,630	3억 382만	0.970	2.6	1,167,995(2014년)
캐나다	9,984,670	3,314만	0.804	2.0	125,963(2013년)
브라질	8,511,965	1억 9,191만	1.166	7.5	100,450
남아프리카공화국	1,219,912	4,379만	-0.051	3.0	44,070
중국	9,596,960	13억 3,861만	0.494	7.5	874,000(2012년)
인도	3,287,590	11억 4,800만	1.376	9.7	200,000(2012년)
일본	377,835	1억 2729만	-0.240	2.8	281,000(2012년)
한국	100,032	5,000만	0.258	3.8	82,300(2013년)

1) 면적 및 인구 2008년 기준자료, 기타 자료는 2012년

과 전력계통의 안정성을 갖는 이웃 국가들과의 'Super Grid'를 구축하는 것이 더 유리할 수 있다는 분석이 따른다. 따라서 우리나라도 동북아 전력계통 연계를 더 적극적으로 검토할 필요가 있다. 상이한 계통연계, 선로 손실감소 및 안정도 향상을 목적으로 장거리 초고압직류송전(HVDC, High Voltage, Direct Current)에 대한 투자도 세계적으로 추진되고 있다.

본고에서는 미국과 캐나다, 브라질, 남아공, 중국, 인도, 일본, 한국 등 총 8개 국가의 자료를 분석했다. 설비용량면에서는 2014년 기준으로 미국이 116만 7,995MW로 단연 앞서고 있으나, 인구 10억 명 이상 되는 중국과 인도도 매년 경제성장률이 9% 이상을 기록하며 전력분야에서도 무서운 성장세를 보이고 있다. 특히 인도는 한국과 비교할 때 면적과 인구가 단연코 앞서지만 설비용량은 2.3배 정도에 불과해 인구대비 설비용량을 단순 비교하더라도 설비용량 증설 및 선로확장이 필요하다는 점은 쉽게 예측할 수 있다.

다. 주요 국가의 초고압 송전설비 운용현황

① 미국

1990년대까지 대표적인 전력선진국이라 할 수 있는 미국에서 사상 초유의 대규모 정전이 2000년대 들어 두 번이나 발생했다. 2003년 8월에는 캐나다 온타리오 지역과 미국 동북부 NYPA(New York Power Authority)지역에서 대정전이 발생했으며,

[표 2] 미국 에너지원별 발전기 및 설비용량

에너지원	발전기(기)	설비용량
석탄	1,436	350,398MW
석유	3,757	58,400MW
천연가스	5,465	490,507MW
기타 가스	98	2,218MW
원자력	104	105,120MW
⋮	⋮	⋮
총계	17,876	1,167,995MW

2011년에는 캘리포니아 샌디에고 지역에서 대정전이 발생해 천문학적인 손실을 발생시켰다.

전력계통은 특별한 이상 징후 없이 계통이 대체적으로 안정하게 운영되고 있는 것처럼 보였으나 지역적인 에너지시장 분할로 인한 복잡한 계통 구조, 수십 년간 사용돼 온 설비 및 선로의 노후화가 서서히 진행돼 발현된 대표적인 사고 사례로, 향후 예측 불가능한 사고를 최소화하기 위해서는 전력수급 및 계통 신뢰도 향상에 대한 투자 및 노력이 계속돼야 한다는 점을 단적으로 보여준다.

이후 미국 최대 송전전력사인 AEP(American Electric Company)와 에너지성(DOE)은 지역적 에너지시장 분할과 복잡해지는 계통 구조, 풍력 · 태양광과 같은 신재생에너지원의 계통유입, 미래에 예상하지 못한 개발, 신재생에너지원 및 송전선로에 대한 다른 국가와의 협력을 통한 기술표준 수립 요구 등 다양한 조건 속에서도 초고압 송전망을 통해 강건한 계통을 구성하고 유연한 대처를 가능케 하는 'Transmission Super Highway' 개발에 큰 관심을 기울이고 있다.

하지만 전력산업 구조조정으로 민영화를 추진했던 미국의 경우 '블루칼라' 생산설비들이 거의 해외로 빠져나갔고, 사기업 전력회사들이 이윤추구 관점에서 새로운 투자보다는 기존설비에 대한 활용을 극대화하는 정책에 중점을 두면서 전력운용 사정은 좋지 않은 상황이다.

특히 최근 셰일가스 개발로 인해 가스 가격이 30% 폭락, 가스발전이 활성화 되면서 발전원들의 경제성 비교에서도 최고 저렴한 발전원으로 가스, 다음으로 석탄, 그 뒤를 이어 원자력이 자리 잡게 됐다. 여기에 일본의 후쿠시마원전 대참사까지 겹쳐 그린에너지 일환으로 재 도약기를 맞았던 미국의 원자력산업은 경제성과 안정성면에서 밀려 퇴조되고 있다. 경제적이고 환경친화적인 셰일가스의 등장으로 타 경쟁 신재생에너지 개발도 경쟁력을 잃어가고 있고, 우리나라에 유행처럼 번졌던 스마트그리드는 비즈니스 모

[표 3] AEP 주별 전압별 송전선로 현황

State(km)	765kV	500kV	345kV	230kV	161kV	138kV	115kV	88kV	69kV	46kV	40kV	34.5kV	23kV	Total
Arkansas	0	0	40	0	233	168	42	0	461	0	0	0	0	944
Indiana	599	0	1,380	0	0	1,426	0	0	414	0	0	591	0	4,410
Kentuchky	258	0	8	0	46	335	0	0	544	55	0	3	0	1,249
Louisiana	0	0	105	0	0	260	0	0	230	0	0	0	0	595
Michigan	16	0	234	0	0	242	0	0	296	0	0	148	0	936
Ohio	509	0	1,799	0	0	3,350	0	0	2,650	0	59	365	225	8,957
Oklahoma	0	0	625	34	8	2,202	10	0	812	0	0	0	0	3,691
Tennessee	0	0	0	91	0	154	0	0	3	0	0	27	0	275
Texas	0	0	1,330	0	0	4,696	14	0	5,082	0	0	0	0	11,122
W.Virginia	385	17	323	0	0	1,630	0	23	458	741	0	89	0	3,666
Virginia	349	96	69	15	0	1,735	0	0	731	48	0	141	0	3,184
Total	2,116	113	5,913	140	287	16,198	66	23	11,681	844	59	1,364	225	39,029

델 한계성 실감으로 주목을 받지 못하고 있다.

미국의 경우 지역별 계통운영자가 상이하기 때문에 지역내 혹은 지역간 초고압 송전선로 건설로 유동적인 전력공급이 가능하도록 AEP를 비롯한 계통운영자가 다수의 프로젝트를 진행하고 있다. AEP는 미국 내 500만 수용가에 전력을 공급하고 있으며 3만5,000MW의 발전설비용량과 3만9,000ckm의 송전선로 및 21만5,000ckm의 배전선로를 보유하고 있다.

그리고 2007년 AEP와 AWEA(American Wind Energy Association)는 대규모 풍력단지와 연계한 초고압 송전선로 건설에 대한 장기적인 목표로 미국 765kV 'Transmission Super Highway' 구축에 대한 개념도를 구체화해 향후 발전량의 20%를 풍력에너지로 대체 공급한다는 계획을 세우고 있다. 이 풍력발전 용량은 무려 35만MW에 달하는 것으로 765kV 송전선로 건설이 완료된다면 3만571ckm의 선로가 증축되게 된다. 여기에 투자되는 비용은 69조원 가량 될 것으로 예상하고 있다.

미국 내 설비용량은 경제적인 이유로 수요가 상당량 감소하는 경우에도 계통 안정화를 위해 설비용량은 계속적으로 증가됐으며, 2008년 선로와 설비에서 발생하는 에너지 손실이 무려 21만2,950GWh에 달해 손실을 줄이기 위해 주간선의 송전전압을 격상시키거나 기존에 사용되던 주간선을 확장해 건설하는 방법을 채택하고 있다. AEP는 2012년까지 오하이오, 미시간, 오클라호마 3개주에 6,400억 원을 투자

[표 4] 미국내 초고압 송전선로 주요 프로젝트 현황 투자비의 경우 환율[2)]

지역 및 계통운영자	송전전압	선로길이	프로젝트 기간(년)	투자비(억 원)
SPP(Prairie Wind)	345kV	121km	2013~2014	1,860~2,589
SPP(Tallgrass)	345kV	274km	2013~2014	3,878
ERCOT	345kV	·	·	12,658
PJM	765kV	442km	2015	16,110
PJM/MISO	765kV	386km	2015~2017	11,507

2) 1$당 1,151원(2010년 12월말 기준)으로 환산된 금액

해 주간선을 구축하고, 애리조나, 로스앤젤레스, 웨스트버지니아, 버지니아, 인디애나, 켄터키 6개 주에 대한 주간선 구축 검토 및 정부의 승인이 2011년 이뤄져 2012년 착공됐다.

SPP의 345kV 274km 건설 계획의 경우 프로젝트 제안 단계에서는 송전전압이 345kV로 결정됐으나 현재 765kV로 격상하는 것에 대한 안정성 및 경제성 검토를 분석 중이며, SPP와 PJM은 지역간 융통전력을 위한 초고압 송전선로 확충을 고려하고 있다. PJM/MISO 관할 지역에서는 중장기 765kV 386.16km 건설과 병행해 향후 목표로 ATC, ETA, Exelon, MidAmerican Energy 등의 전력회사와 협의한 초고압 송전선로와 동부와 서부의 대규모 풍력단지, 그리고 본토 중북부지역 Nevada 사막지역의 태양광발전 등 대규모 신재생에너지 발전설비와의 연계에 관한 연구를 계획하였다. 하지만 저렴하고 환경친화적인 셰일가스의 등장으로 이러한 계획이 재검토되고 있으며, 미국의 광대한 계통을 연결 운전하고 있는 Back-Back 시스템의 확대는 물론 대규모 500kV급 이상의 HVDC 송전선로에 대한 건설 계획이 검토되고 있다.

그리고 캐나다와 계통연계를 위한 미국 내의 주요 프로젝트 현황을 보면 미국 Northern California에서 캐나다 Pacific Northwest에 이르는 송전선로를 PG&E(Pacific Gas and Electric Company)가 맡아 추진하고 있으며, 이는 신재생에너지의 활용성을 높이고 계통 신뢰도를 향상시킴은 물론 다른 전력시장 참여자들도 추가로 신설되는 송전설비를 이용해 경제적 · 기술적 혜택을 볼 것으로 판단된다. 이 장기 프로젝트는 2006년 적합성 분석으로 송전선로 건설에 따른 정책과 규제들에 대한 승인과정을 거쳤으며 현재는 설계와 부지매입이 이뤄지고 있지만, 실제 착공은 계획보다 지연되고 있다. 2006년부터 2015년에 걸친 이 프로젝트의 내용은 [표 5]에서 확인할 수 있다.

② 캐나다

캐나다는 세계에서 가장 많은 수력발전을 이용해 전기를 생산하는 국가 가운데 하나이다. 전체 설비용량의 63.2%인 6만9,125MW를 수력발전을 이용해 부하에 공급하고 있으며, 풍부한 석유, 천연가스, 석탄 자원을 이용한 발전으로 전기를 미국에 수출하고 있다. 인구는 3,000만 명 정도이지만 설비용량은 한국의 1.6배 정도인 12만4,240MW이며, 900만㎢가 넘는 넓은 면적으로 인해 총 면적의 극히 적은 부분인 부하집중지역에 전력을 공급하기 위해 초고압 장거리 송전선로 건설이 필수적이다. 캐나다에는 Hydro Quebec, Hydro One, BC Hydro 등 20여개의

[표 5] 미국 – 캐나다간 송전설비관련 프로젝트 현황

회사	프로젝트명	착공일자	송전전압	송전용량
PacifiCorp	Walla to McNary	2010년	AC 230kV	400 MW
BPA	West of McNary Generation Integration Project	2010~2012년	AC 500kV	1,500MW
Idaho Power	Idaho to Northwest (Hemingway Boardman)	2012년	AC 500kV	1,500MW
PGE	Southern Crossing	2013년	AC 500kV	2,000MW
BPA	I-5 Corridor Reinforcement Project	2013년	AC 500kV	1,500MW
PacifiCorp	Idaho to Capt. Jack (part of Gateway West)	2014년	AC 500kV	1,500MW
PG&E 등 5개사	Canada – Northwest – California (CNC)	2015년	AC 500kV, ±500kV HVDC	3,000MW
Avista	Canada – Northwest – California – Avista Interconnection – Spokane Area Upgrades	2015년	AC 500kV, 기설선로 230kV 승압	500MW
TransCanada	Northern Lights	2014년	±500kV HVDC	2,000MW

[표 6] 캐나다 전력사별 송전선로 보유 현황 및 발전용량

회사	수용가	송전선로(km)	설비용량(MW)	발전량(GWh)	수익($M)
Hydro Quebec	3,960,332	33,244	36,810	208,524	12,055.0
Ontario Power Generation	·	·	21,729	92,500	5,640.0
Hydro One	1,333,920	28,924	·	·	4,744.0
BC Hydro	1,830,985	18,603	11,345	43,755	3,822.0
TransAlta	·	·	8,775	45,736	2,770.0
Toronto Hydro	690,000	·	·	·	2,461.7
ATCO	233,100	·	2,732	·	2,443.1
Bruce Power	·	·	6,300	34,600	2,380.0
EPCOR	334,000	203	·	·	2,008.0
ENMAX	659,000	281	·	·	1,852.4
NB Power	335,513	6,801	3,297	14,418	1,712.0
Manitoba Hydro	532,359	11,700	5,511	33,974	1,599.0
Sask Power	467,329	12,404	3,840	19,864	1,459.0
Fortis Inc.	1,016,000	·	560	·	1,390.0
Nova Scotia Power	486,000	5,000	2,293	12,092	1,188.1
Capital Power Corporation	·	·	3,654	7,015	1,008.0
Hydro Ottawa	296,000	·	14	150	754.5
Newfoundland and Labrador Hydro	36,000	3,781	1,656	5,216	446.0
Saskatoon Light & Power	58,600	·	·	·	120.8
Churchill Falls	·	1,039	5,428	30,361	87.2
Total	12,269,138	121,980	113,944	548,205	49,940.8

발 · 송전 회사가 있으며 캐나다 내 최대 전력사인 Hydro Quebec은 1965년 당시 세계에서 가장 높은 송전전압인 교류 735kV를 채택한 바 있다.

일반적으로 국가간 전력 수송시 에너지안보 측면에서 5% 미만으로 수출입하는 것이 타당하지만, 인접 국가인 미국과는 캐나다 전력설비용량의 8.7%에 해당하는 1만850MW의 전력을 수입하고 8,060MW의 전력을 수출할 수 있는 송전선로를 구축해 경제성을 확보하고 있다. 캐나다에서는 넓은 국토 면적과 발전 · 부하 지역간 차이로 인해 지역간 혹은 국가간 전력거래에 대한 장거리 송전선로 건설에 대한 요구사항으로 735kV 초고압 송전선로가 차지하는 위치가 매우 중요하다고 할 수 있다.

캐나다는 1991년 1,200km에 달하는 ±450kV MTDC(Multi Terminal Direct Current) 방식의 직류송전을 설치해 운영하고 있으며 차기 격상전압으로 검토 중인 교류 1,100kV 및 ±600kV 직류송전과 병행한 절연협조 및 코로나현상, 활선작업 등에 대한 실증연구를 진행했다. 또 세계 최초로 도입한 735kV에 대한 자부심을 갖고 전 세계 초고압 송전의 중심에 계속 위치할 수 있도록 교류 2,000kV와 ±1,200kV 직류송전 방식에 대한 실험장비를 구비, 초고압 송전시 발생할 수 있는 단락사고에 대한 분석 · 제어 · 보호에 대한 문제점 등에 대한 연구를 진행하고 있다. 이를 통해 교류송전방식으로 복잡하게 연계된 계통내에 직류송전선로를 도입할 경우 안정도를 향상시키고 자원의 최적분배를 가능하게 만드는 방안을 찾는데 노력하고 있다. 또한, 최근 초고압 송전분야 관련

이슈 가운데 하나인 전기환경 분석은 가축을 활용해 WHO(World Health Organization), ICNIRP (International Commission of Nonionizing Radiation Protection)의 기준에 부합하는지, 초고압 송전설비가 어떤 전자계적인 영향을 미칠 수 있는지에 대한 분석을 꾸준히 해오고 있다.

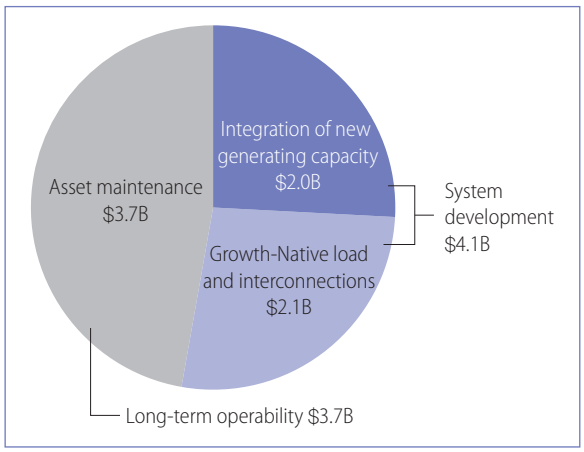
[표 7] Hydro Quebec 송전전압별 설비 및 선로길이 현황

송전전압	변전소 및 변환소(개소)	선로길이
735kV	38	11,422km
±450kV DC	2	1,218km
315kV	63	5,127km
230kV	52	3,120km
161kV	41	2,013km
120kV	216	6,738km
69kV or less	103	3,606km
Total	515	33,244km

Hydro Quebec이 추진 중이거나 계획하고 있는 프로젝트는 기존 설비에 대한 보수, 재건축 등의 Asset Maintenance를 비롯해 크게 세 분류로 구분될 수 있다. 5년간 총 투자 비용은 78억 불에 달한다. 이 중

[표 8] Hydro Quebec 송전선로 관련 주요 프로젝트(2009–2013)

프로젝트 명	투자규모
Construction of 1,250–MW interconnection with Ontario	$251M
Construction of 1,200–MW interconnection with New England	$406M
Connection of large industrial customers	$141M
Construction of Charlesbourg substation (230/25 kV)	$79M
Construction of Anne–Hebert substation (315/25 kV)	$75M
Construction of Bout–de–l'Ile substation (735/315 kV)	$70M
Construction of Saint–Janvier substation (315/25 kV)	$66M
Construction of Mont–Tremblant substation (120/25 kV)	$36M



[그림 3] Hydro Quebec 송전설비 투자계획

지역 또는 국가간 선로 구축에 관한 내용으로는 Outaouais 변전소~Ontario간 1,250MW 송전이 가능한 230kV 송전선로 신설, Chenier~Utaouais간 315kV급 송전선로 신설, 미국 New England 지역과의 1,200MW급 선로 계통연계, 기존에 설치돼 있던 Bout de Ile 315kV 변전소를 735kV 송전전압으로 격상시키는 사업 등 총 21억 불에 달하는 프로젝트가 진행 중이다.

③ 브라질

브라질은 서반구에서 미국과 캐나다에 이은 3번째 전력생산국으로 1984년부터 Itaipu에 ±600kV HVDC 쌍극 2회선을 운영하고 있다. 초고압 직류송전선로의 송전용량은 6.3GW, 송전거리는 806km로 송전용량 및 선로길이 면에서 단연 세계 최대 규모를 차지한다.

[표 9] FURNAS 송전선로 현황

송전전압	선로길이
230kV	4,349km
345kV	6,070km
500kV	4,549km
±600kV HVDC	1,612km
750kV	2,698km
Total	19,278km

총 전력설비용량은 10만405MW로 한국의 1.35배 가량 되지만 넓은 국토면적으로 인해 230kV~750kV의 초고압 송전선로 길이는 한국의 6.5배가량이다. 원별 분포로는 수력(73.2%), 천연가스(5.9%), 원자력(2.8%), 바이오메스(4.0%), 석탄(1.6%), 석유(3.1%) 순으로 주로 산간지역의 수력 자원을 이용한 발전을 하고 있으며, 다른 나라와 달리 바이오메스의 구성이 꽤 높은 비중을 차지하고 있다. 원자력은 2기를 운영 중으로 현재 1기가 추가 건설 중에 있으며 현재 5.5GW에서 2030년까지 20.5GW로 용량을 4배가량 증가시킬 계획을 갖고 있다.

정부 전력감독기관인 ELECTROBRAS 산하 4개의 전력회사 FURNAS, CHESF, ELETRONORTE, ELETROSUL은 지역별로 구분하여 계통을 운영하고 있다. 그 중 FURNAS의 발전설비용량은 브라질 전체 설비용량 가운데 10%로 중부지역의 발 · 송 · 배전 분야를 담당하고 있으며, 2008년 기준 총 1만9,278km의 선로를 건설해 운영 중에 있다. FURNAS를 제외한 다른 전력사의 송전선로 현황에 대한 구체적인 자료 확보는 어려우나 지역 내에서는 345kV를 확충하는 방안을, 장거리 또는 지역간 전력공급에 있어서는 주로 500kV 방식의 초고압 송전선로 건설에 주력하고 있음을 확인할 수 있다.

브라질은 수력 및 직류송전분야를 제외하고 전반적으로 한국보다 기술적으로 낙후돼 있으나 세계 최대 규모인 ±600kV를 수십 년 간 운영하면서 상이한 주파수 계통 연계 경험을 보유하고 있으며, 아마존지역 대단위 수력발전 개발로 생산전력을 전송할 수 있는 초고압 직류송전 600kV HVDC 2,500km 2회선을 추가 건설하는 등 송전설비 건설을 적극 추진 중이다. 최근 경제발전이 약간 주춤해 전력개발도 지연되고 있으나, 한국의 입장에서는 미래 최대 시장의 하나로 초고압 직류송전에 대한 연구 및 안정적인 운영에 대한 기술협조를 위해 관심을 두고 지켜봐야 하는 국가 가운데 하나이다.

④ 남아프리카공화국

최근의 송전망 관련 이슈는 'Highway', 'Backbone'으로 축약할 수 있는데, 남아공 또한 이러한 트렌드에 동참해 초고압 송전선로 건설을 위한 10년 간의 세부 계획을 수립해 추진하고 있다. 송전선로 건설에 대규모의 자본이 투입되는 만큼 추가 송전선로 건설이 필수적인 지역에 안정적이고 효과적이면서 경제성 있는 투자를 위해 집중하고 있다.

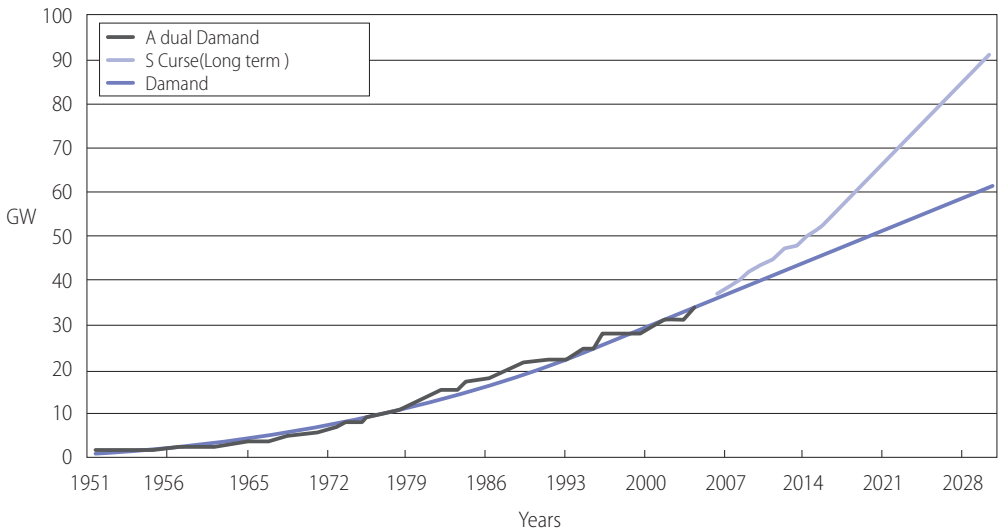
[표 10] 남아프리카공화국 전압별 송전선로길이

송전전압	선로길이
275kV	7,550km
400kV	16,200km
765kV	1,150km

남아공은 아프리카에서 두 번째 석유 수입국으로 중동지역의 석유를 상당량 수입하고 있으며, 석탄의 경우 세계 8번째로 매장량이 풍부해 소비 및 수출의 비중이 높은 편이다. 남아공은 Eskom이란 국영전력사가 거의 독점해 전력시장을 운영하고 있으며 태양광 발전과 같은 신재생에너지, 초고압 송전과 배전망을 동시에 연구 및 관리하고 있고, 송전선로 또한 이 회사에 의해 투자 및 운영되고 있다.

남아공은 냉방부하 사용, 용수 및 추수로 인해 최대부하는 일반적으로 7~8월에 나타나는 특징을 갖는다. 남아공을 27개의 CLN(Customer Load Network)로 구분해 경제성장과 정부의 규제정책 등에 따른 수요를 예측한 결과, 2007년 3만4,807MW인 전력설비용량이 2030년에는 약 3배 정도인 9만3,776MW로 증가할 것으로 전망됐다.

발전소는 전체의 약 50%가 석탄 자원이 풍부하게 매장돼 있는 Mpumalanga 지역에 집중돼 있으며 나머지 발전은 상당량 Limpopo, KwaZulu-Natal, Western Cape에서 석탄을 이용해 이뤄진다. 자원별 분류로는 84%가 화력을 주로 사용하고, 원자력은



[그림 4] 남아프리카공화국 향후 20년간 전력설비용량 전망

4.5%, 수력 및 디젤 기타 자원은 11% 정도의 비중을 차지하고 있으며 Western Cape에는 특별히 원자력과 수력을 이용한 발전을 하고 있다. 남아공에서는 주간선을 400kV로 채용해 대략 1만6,200km의 선로를 운용하고 있다.

정부기관과 Eskom은 급증하는 수요를 감당하기 위해 교류 400kV 송전선로와 연계된 발전기를 신설 및 증축하고 Ingula, Kusile 지역 변전소 건설 등 수개의 장기 프로젝트를 진행하고 있다. 그리고 전력시장 내에 독립발전사업자(IPP, Independent Power Provider)의 참여가 가능하기 때문에 독립발전사업자 Mmamabula는 인접 국가인 보츠와나에 2,400MW, 4,200MW급 발전소를 건설해 생산되는 전력의 75%를 자국인 남아공에 공급할 계획을 세우고 있다. 이것 또한 교류 400kV 송전선로를 통해 연계될 계획이며 Thuyspunt 지역에 원자력 1기가 건설되면 Johannesburg 부하집중 지역에 전력을 공급하기 위해 765kV 장거리 송전선로를 건설할 예정이다. 남아공은 현재까지는 주간선으로 운영 중인 400kV의 송전전압을 고수하고 있으나 향후 전력수요 증가 및 발전기 추가 건설에 따라 주간선을 765kV로 격상하는 것을 송전선로 건설 향후 10년 계획에 포함시켜 건설을 추진 중에 있으며, 이미 국내 중전기기 업체가 10년간 발전단 변압기 장기공급 계약 및 송전선로 건설 사업에 참여하고 있다.

⑤ 중국

지난 수십 년 간 중국 전력산업은 급격한 개발의 물결을 맞고 있다. 1945년부터 2006년까지 중국의 전력생산능력은 1.85GW에서 797GW로 무려 430배 증가했다. 1996년 연간 발전능력과 새로운 전력설비 총 설치 규모가 세계 2위 수준이다. 당해 새로이 설치된 전력량이 100GW로 연간 세계 전력증가율의 19%에 이르고 현재 220kV 이상 송전선로의 총 길이는 282만km 이상이다. 전력산업의 규모가 매우 방대한 반면에, 아직도 1인당 기존 설비규모 또는 전력소비량은 전 세계 평균의 1/6~1/10에 지나지 않는다. 따라서 이는 향후 엄청난 전력산업의 개발지표로 예상돼 중국 정부와 전력회사는 안정적이고 충분한 전력공급을 지속적이고 꾸준한 경제성장을 위한 전제조건으로 여기고 있다.

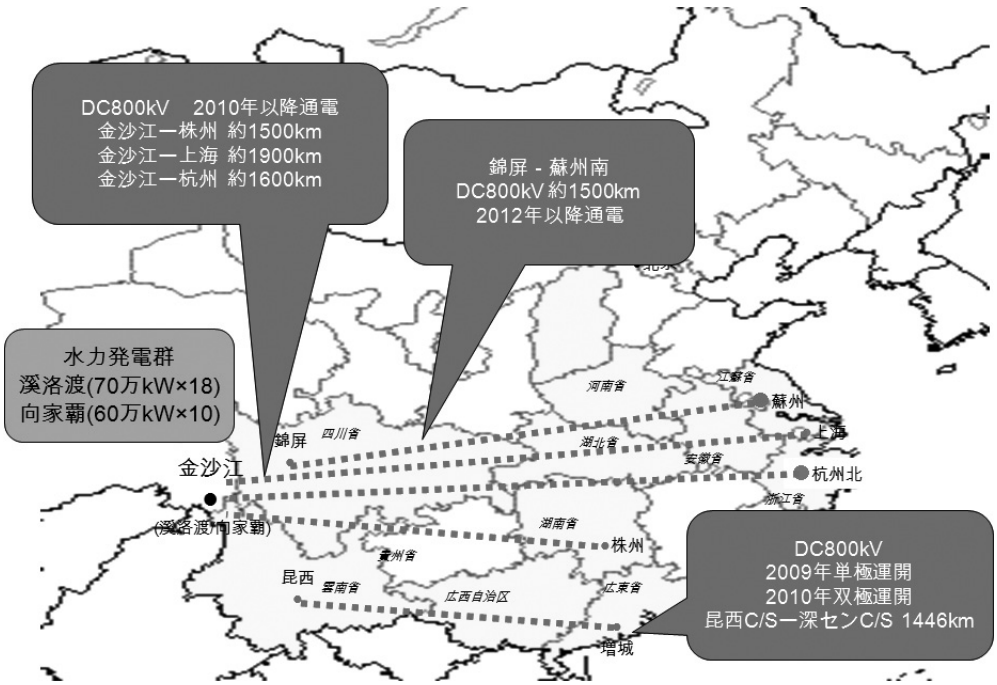
2020년 연간 중국의 GDP가 4,604조 원에 이르는

등 매년 급성장할 것으로 예상되고 있으며 이에 비례해 전력수요와 설비용량 또한 각각 4,600TWh와 1,000GW에 이를 것으로 보고 있다. 매년 30GW[3]씩 증가해 앞으로 15년간 중국의 전력계통망은 현재의 2배가 될 전망이다.

중국은 전력수요 증가를 고려한 발전 단기 개발은 국토 이용이 가능하고 환경적인 보호를 전제로 다음과 같은 개발전략을 수립하고 있다. 수력발전 최우선 고려, 석탄발전단지 중심 건설, 원자력발전단지 건설 가속화, 그리고 마지막으로 신재생에너지 개발 노력 등이 개발전략의 핵심이다. 2020년까지 석탄 600GW, 수력 240GW, 원자력 40GW, 가스화력 60GW, 양수발전 20GW, 신재생에너지 40GW의 발전량을 추가적으로 구성할 계획이다.

장기적인 전략으로 2004년 말 기존 교류송전에 있어서는 500kV를 1,000kV로 대체하고, 직류송전의 경우는 500kV를 800kV로 채택한 UHV 송전시스템을 개발한다는 계획으로, 이미 서북전력은 한국과 기술교류를 통해 765kV 송전선로를 건설해 운영 중에 있다. 결국 주간선으로 중국 전체를 AC 1,000kV, DC 800kV, 500kV로 연계하는 방식으로 원활하게 전력을 공급한다는 계획을 세우고 있다.

중국의 경우 초고압 송전전력기술 개발과 적용은 선택이 아닌 국가 경제발전 및 경쟁력 확보를 위한 필수적인 사항이다. 또 전력산업이 직면한 거대한 기술개발의 기회이기도 해 향후 10~15년간 강력한 초고압 송전망이 중국내에 구성될 것으로 전망된다. 단기적인 송전선로 프로젝트로 2007~2008년 1회선 교류 1,000kV 송전선로 658km, 2009~2010년 2회선 교류 1,000kV 송전선로 700km를 건설했으며, 2009년부터 2012년까지 8,000km의 800kV 초고압 직류송전선로를 건설했다. 즉 전력수요 급증에 따른



[그림 5] 중국 초고압 직류송전선로 건설계획

3) 30GW는 2007년 7월 중국 전력설비용량인 65GW의 절반 가량임

초고압송전기술 개발과 선로 건설 등 산재한 도전에 맞서기 위해 국가 전력망회사인 CEPRI를 주축으로 2,500여명의 인력이 2개의 고전압 연구소에서 초고압 송전분야 국산화 연구개발을 주도하고 있다.

⑥ 인도

IMF(International Monetary Fund)는 2010년 인도의 경제성장률을 9.7%로 전망했다. 2010년 설비용량은 16만3,700MW였으며, 최대수요는 매년 8~9%씩 증가해 현재는 11만9,400MW에 달해 4년 이내에 설비용량 부족현상이 발생될 것으로 예상된다. 발전원은 상당부분 수입되는 석유와 천연가스에 의존하고 있으며 수력발전의 비중이 22.6%가량 되지만 산악지형이 워낙 험하고 높아 송전선로 건설이 쉽지 않은 실정이다.

총 5개의 그리드로 구분해 계통을 운영하고 있으며 지역간 전력거래량이 크게 증가될 것으로 전망되고 있어 현재 5개 지역으로 구분돼 있는 지역간 초고압 송전선로 건설을 통한 계통 안정도 향상 및 원활한 전력수급을 계획하고 있다. 발전원별 분포로 화력(64.6%), 수력(22.6%), 원자력(2.8%), 기타(10%)로 총 7기의 원자력 발전기가 운영 중이며, 10%의 전력은 인근 국가인 부탄에서 수입해오고 있다.

인도의 경우 넓은 국토면적을 갖고 있으나 송전선로 건설을 위한 용적지 확보에 어려움을 겪고 있어 다도체 및 다중회선 방식을 채용하는 등 송전선로 용적지를 최소화하기 위한 노력을 지속하고 있다. 인도

[표 11] 인도 송전선로 및 설비현황

송전전압	선로길이	변전소 및 변환소 (개소)
AC 765kV(1회선)	2,921ckm	1
AC 400kV 이하	59,001ckm	101
±500kV HVDC(Bipole)	5,947ckm	10
±400kV HVDC 이하	10,370ckm	19
Total	78,239ckm	131

정부는 현재까지는 주간선으로 송전전압 400kV가 주로 사용돼 왔으나 전력수요 증가에 따라 한국과 동일한 방식인 765kV 수직 2회선을 주간선으로 채택해 향후 약 10년간 건설할 계획임을 공표했으며, 교류 1,200kV 기술 개발, ±800kV HVDC 건설도 활발히 진행 중에 있다. 또한 한국이 ±500kV HVDC를 고창 PT센터에서 국산화 개발을 위한 실증시험을 하고 있어, 인도의 6,000km ±500kV HVDC 선로 운전경험은 HVDC 국산화 연구에 도움이 될 것으로 전망된다.

⑦ 일본

일본은 10개의 전력회사가 지역별로 전기를 생산해 수용가에 공급하는 형태를 취하고 있다. 핵무기 비보유국으로는 유일하게 원자력 산업재처리시설과 상업농축시설을 구비하고 있는 일본은 미국의 104기, 프랑스 58기에 이어 세계에서 3번째로 많은 55기의 원자력 발전기를 운영하고 있다. 일본은 그리 높지 않은 2% 정도의 경제성장이 지속될 것으로 예상된다. 인구의 감소, 에너지절약 문화의 심화, 발전효율 향상, 고효율 기기의 보급 등으로 인해 전력생산량은 2019년까지 1,090.5TWh로 매년 0.8% 소폭 증가될 것으로 보인다.

그리고 화력자원의 고갈, CO_2 배출 감소, 신재생에너지원 개발 등의 이유로 2019년까지 원자력을 이용한 전력생산량의 비중을 전체 대비 41%로 늘릴 계획을 갖고 있다. 이는 2010년 기준으로 12기(설비용량 16.31GW)의 원자력발전소가 추가 신설돼 운영된다는 것으로 2019년에는 총 67기의 원자력발전소가 운용될 계획이다.

일본은 1990년대 이미 1,100kV 교류 가공송전선로를 전국적으로 설치했으나 전력수요 증가가 더뎌 현재는 550kV의 전압으로 운전하고 있다. 결국 향후 수요가 증가하는 경우에는 송전전압을 격상시켜줌으로써 공급용량을 늘릴 수 있는 여건을 갖추고 있다.

따라서 영토 면적, GDP 등을 고려할 때 새로 가설되는 선로의 길이도 2017년까지 가공 576km, 지중 61km로 그리 많은 편은 아니다.

[표 12] 동경전력 송전선로 현황(2009년)

송전전압(kV)	가공선로(ckm)	지중선로(ckm)
550	4,326	79
275	2,555	1,082
154	6,136	747
66	14,960	6,333
5.5이하	566	3,519
Total	28,543	11,760

일본은 60Hz, 50Hz 계통이 구분돼 있기 때문에 상이 주파수 연계를 위해, 전력사간 계통 연계에 있어 안정적인 전력수급과 경제성 확보가 가능한 HVDC를 채용하고 있다. 현재 홋카이도~도호쿠, 간사이~시코쿠 지역이 HVDC로 연계돼 있으며 동경의 계통주파수는 50Hz, 추부시는 60Hz로 이 지역간 송전선로도 일부 HVDC를 채용하고 있다. 호쿠리쿠와 추부 계통간 설치된 BTB HVDC는 두 지역과 간사이 지역의 불필요한 환상 조류를 막기 위해 설치됐으며, 호쿠리쿠와 추부간 전력 조류를 제어할 수 있다. 또 교류 연결이 끊어지거나 호쿠리쿠의 양수 발전이 탈락하게 되는 비상 상황에서는 주파수 제어모드로 동작해 주파수를 일정하게 유지시키는 역할을 한다.

10개의 전력회사 가운데 가장 큰 전력회사인 동경전력은 후쿠시마 등 3개의 원자력발전소를 운영하고 있으며, 수력 160기, 화력 25기 등을 보유하고 있다. 2009년 일본 전체의 전력수요는 241.5GW였으며, 동경전력의 최대 전력수요는 2001년 7월 64.3GW를 기록했다. 이 수치는 2010년 국내 최대 전력수요인 67GW에 버금가는 것이며 일본 내에서는 1/3정도의 전력수요를 동경전력이 담당하고 있다. 전력공급 서비스지역의 면적은 3만9,494㎢이며, 동경을 중심으로 반경 40km 이내 지역에 전력수요의 70%가 집중돼 있다.

동경전력에서 운영하고 있는 교류 가공선로 길이는 총 2만8,543ckm이며, 지중선로는 1만1,760ckm이다. 저압레벨에서는 상당량 지중화가 돼 있으나 1993년 도입된 550kV 이상 초고압의 경우 기술적, 경제적인 이유로 인해 아직 지중화가 미비한 실정이다. 일본의 경우 초고압 송전이 갖는 의미는 장거리 송전에 따른 경제성 확보 보다는 기존에 설치된 송전선로에 추가적으로 초고압 송전선로를 건설해 계통의 강건성을 증대시키고 효율을 향상시키는데 있다. 동경전력은 1993년 전력수요 둔화로 500kV로 운전중이지만 남~북을 잇는 190km의 1,100kV 송전선로와 동서를 잇는 240km의 1,100kV 등 총 430km의 초고압 2개 회선 송전선로를 설치했으며, 이러한 초고압 송전선로 구성으로 인해 관할 지역내와 다른 전력회사에서 관리하는 지역의 전력수급 안정성 및 신뢰성을 확보할 수 있었다.

⑧ 한국

한국은 1980년대 이후 급격한 경제성장에 따라 연 10%대의 급격한 전력수요 증가를 보였으며, 1인당 전력소비량 또한 매년 큰 폭으로 증가했다. 주요한 전력 수요 증가지대가 경인지역에 집중돼 있으나 이 지역은 인구 밀집지역으로 환경과 입지적인 관점에서 새로운 발전원을 개발하기 어려웠다. 이에 따라 대용량 발전단이 있는 중부권이나 영동권으로부터 수요지인 경인 지역으로의 대규모 전력전송로가 필요하게 됐다.

[표 13] 한국 전력설비용량 및 수요 현황

구 분	1961년	1981년	2001년	2009년
설비용량(MW)	367	9,835	50,859	73,470
최대수요(MW)	306	6,144	43,125	66,797
부하상수(%)	66.2	74.7	75.5	74.1
선로손실(%)	29.4	6.7	4.5	4.0

[그림 6] 한국 765kV 송전선로도

이에 따라 1979년부터 765kV로의 전압격상을 준비했으며, 1983년부터 765kV 연구개발을 시작, 1997년 10월 1차로 765kV 송전선로에 345kV를 가압했으며, 2002년 4월 26일에 역사적인 765kV 송전을 개시했다. 한국의 765kV 송전선로는 외국의 수평배열 1회선보다 2배의 전력 수송 능력을 가진 수직배열 2회선 방식으로 세계에서 최초로 시도됐으며, 2009년 기준 전력설비용량이 7만3,407MW로 매년 5~6%의 증가세를 보이고 있다. 특히 2003년 상용운전을 시작한 수직 2회선 765kV 방식이 전 세계적으로 인정을 받아 국내 송전분야에서는 최초로 IEC 기술표준이 채택됐으며, 동일한 방식의 송전선로가 미국 및 인도에서 주간선으로 채용됐다.

정전시간은 1인당 매년 12분대로 미국이 57분대임을 비교해 볼 때 매우 짧은데 이는 상정조건을 고려한 안정적인 전력공급과 한전의 전력품질 및 신뢰도 향상 기술개발의 성과로 판단된다. 총 선로길이는 3만256ckm, 변전소 및 변환소는 247GVA 용량으로 715개소, 배전선로 길이는 42만258ckm를 운영하고 있다. 2003년 주간선으로 765kV를 채용한 이래 당진과 신서산 구간 등 458km의 765kV 송전선로를 운영하고 있으며 신안성~신충북~북경남을 잇는 765kV 송전선로 건설을 계획하고 있다. 그리고 현재 건설 중인 초고압 송전선로 건설 프로젝트로 북경남과 신고리를 잇는 100km 구간에 765kV 2회선 선로가 있다.

국내 주요 송전관련 기술개발 가운데 하나인 HVDC의 국산화개발 연구가 한창 진행 중인데, 2014년 북당진~고덕간 36km의 500kV 지중 Cable HVDC 사업이 추진된 것은 밀양 765kV 송전선로 건

[표 14] 한국 765kV 송전선로 운영 및 향후 계획 현황

선 로	길 이[km]	전 선	Bundle	준공년도	기타
당진 T/P~신서산	38.506	ACSR/AW 480SQ	6B	1999	
신서산~신안성	111.0887	ACSR 480SQ	6B	1999	
신가평~신태백	154.8	ACSR 480SQ	6B	2000	신울진-신태백(46.571km)
신안성~신가평	59.397	ACSR 480SQ	6B	2010	
신고리~북경남	87.6	ACSR 480SQ	6B	2014	
당진~신중부	검토 중	ACSR 480SQ	6B	2017	
강원~북경기	130	ACSR 480SQ	6B	2019	
강원~신울진	130	ACSR 480SQ	6B	2019	

설사업이 민원문제로 수년째 건설에 애로를 겪었기 때문이다. 즉 가공송전 방식이 지중 HVDC로 대체된 것이다. 하지만 지중 HVDC Cable 시공으로 가공송전 HVDC 방식에 비해 10배 이상인 수천억 원에 이르는 비용증가와 가공방식에 대비 1/3 정도의 송전용량 한계를 초래하게 된다. 무엇보다 가장 우려되는 것은 지중송전선로는 가공방식에 비해 수명도 짧을 뿐더러 사고시 상대적으로 가공방식에 비해 정전의 영향이 치명적이라는 단점을 안고 있다는 점이다. 따라서 민원의 회피라는 논리로 인해 이러한 단점을 안고 건설을 시도 할 수밖에 없는 국내적 현실의 개선을 위한 국가적 노력이 필요하다.

HVDC의 적용으로 우리나라의 고립된 계통의 큰 고장전류로 인해 발생하는 단락용량증가를 억제해 계통의 안정을 도모할 수 있다는 장점을 취하는 면도 있다. 송전선로 용적지가 매우 부족한 상태이기 때문에 교류와 직류를 병가해 사용하는 방식, 인체 및 사물에 미칠 수 있는 전기환경적 요소를 분석하고 최소화하는 기술, 초전도 송전선로를 이용한 기술, 변환소 국산화 기술 등 다양한 연구가 진행 중에 있다.

3. 스마트그리드 시대의 HVDC와 친환경 송전기술

가. 신기술 도입을 통한 송전용량의 극대화 기술

① 신소재 전선을 사용한 송전용량 증대기술

최근 소재기술이 발달되면서 섭씨 90도에서 120도 이상에서도 성능이 변하지 않는 증용량도체(High Temperature Conductor)가 많이 개발됐다. 그중에서도 국내환경에 적용 가능한 후보도체를 선발한 한전 전력연구원에서는 [표 15]와 같은 한국 지형과 기후, 그리고 송전운영조건에 적합한지를 시험하는 연구를 고창전력시험센터 대전류시험장을 이용해 수행하고 있다.

이러한 연구결과를 통해 기존 ACSR도체보다 송전능력이 1.5~2배 되는 신소재 증용량 도체를 개발한다면 기존 송전선로의 열적용량을 이러한 전류허용 용량만큼 증가시킬 수가 있어 기존 송전선로를 이용한 용량증대를 통해 송전선로의 추가 건설을 최소화 할 수 있게 된다. 또한, 신규 송전선로에 적용시는 추가 신규 송전건설도 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

② 기존 송전선로 이용 극대화 기술 (Up-Rating/Up-Grading Technology)

증가되고 있는 민원으로 신규 송전선로 건설이 어려워지고 있는 상황에서 기존 송전선로의 설비를 개선해 용량을 증대하는 것이 세계적인 추세이다. 이를 위한 주요 세부 기술로는 △Up-Rating 기술(기존 전선을 용량이 큰 것으로 바꾸거나 소도체 간격을 넓혀 %임피던스를 줄여 송전 용량을 증대시키는 기술) △Up-Grading 기술(기존 운전전압을 상위 송전전압으로 승압시켜 용량을 증대하는 기술) △AC-〉 DC 변환 기술(기존 AC선로를 최소한의 설비 교체로 HVDC로 변환해 용량증대 및 조류조절 역할을 증대시키는 기술) △송전선로 조류조정 기술(송전선로의 조류 흐름을 원하는 방향으로 원활히 하는 기술) 등이 있다.

③ 지중송전방식의 용량한계를 극복하는 GIL 송전선로 방식

지중 Cable 시공과 관련, 지중계통용량의 보완책으로 GIL(Gas Insulated Line)을 345kV는 물론 765kV급 AC, 500kV급 HVDC도 개발함으로써 가공선로를 건설하다가 민원이나 기타 이유로 도저히 가공건설이 어려운 구간에 터널을 뚫어 GIL을 설치해 송전하는 방식이다.

[표 15] 국내 적용이 검토되는 신 증용량 가공전선 특성표

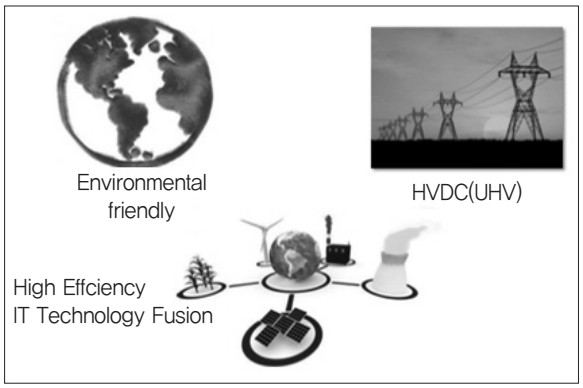
Conductors	Features	Concerns	Manufacturer		Price to ACSR
ACCC	– light, anti-corrosive, low temp. coeff. – low loss(↓2.5%) – global installation upto 20,000km	– stability at high temp. – low modulus – special auessaries	Taihan		4 times
HVCRC	– no application	"	LS cables		"
ACCR	– stability at high temp. – high modulus – lowest loss	– highest price	–		9
ACFR	– light, anty-corrosive, low temp, coeff	– less application	–		–
SiC reinforced	– durable to high temp. – excellent mechan. prop.	– no application – much higher price	–		–
Gap-type	– much installation(~28,000km)	– special const. method – high loss – stability of grease	LS cables		2(+α)
ACSS	– inexpensive – low loss(↓2.5%)	– poor sag prop.	–		1.3
ACMR	– developed domestically – compatible with existion system – low loss(↓2.5%)	– lack of application – check for accessaries	Metallink		2

나. HVDC 계통연계의 슈퍼그리드 동북아 전력계통 연계

세계적인 기술 트랜드가 그동안 그린에너지 시대의 상징인 스마트그리드에서 HVDC 기술의 발달로 주변 지역 또는 주변국가간의 전력계통연계(슈퍼그리드)로 전환되고 있다. 슈퍼그리드는 피크 수요 부족으로 예비력 확보를 위해 10~15%의 예비발전력을 유지하는 대신에 주변지역 또는 국가간 HVDC로 연계함으로써 서로 경도가 다른 지역간의 피크타임 차이를 이용한 전력융통, 위도 차이에 따른 계절별 피스 수요 차이에 따른 전력융통 등으로 경제성을 얻고자 하는 것이다. 동북아 지역의 경우 우리나라 주변국가인 일본, 중국과의 경도 차이, 러시아와의 위도 계절 차이에 따른 이점이 있어 HVDC 계통연계로 경제성을 추구 할 수 있다.

다. 친환경 미래지향적 송전기술 방향

우리보다 선진국인 국가들이 미래 방향으로 추구하고 있는 송전선 건설방향은 환경친화적인 설계도입을 위해 HVDC 기술을 선호하고, 고효율 IT기술을 접목해 새로운 송전선 설계 개념을 [그림 7]과 같이 정착시켜 나가고 있다는데 있다. 따라서 지금까지 우리나라가 시행해 왔던, 경제성에만 초점을 둬 값싸게 철탑을 고물 구매처럼 무게 단위로 구매하던 방식에서 벗어나 주변환경과 조화를 이루고 경과지 주민들이 지나가는 송전선로를 볼 때 시각적으로 거슬리지 않게 환경친화적이고 예술적 디자인을 가미한 송전선로를 구축하도록 진일보해야 한다(그림 8~9 참조).



[그림 7] 최근의 송전선로 건설의 기술 추이

4. 전 망

밀양 765kV 송전선로 건설이 민원문제로 5년여 지연되면서 많은 경제적 손실과 국가적 혼란을 가져왔다. 이러한 결과를 초래한 배경에는 여러 상황이 간접적으로 영향을 끼친 면도 있지만, 냉정히 고찰해 보면 우리나라가 급속한 경제개발로 전력수요가 세계 어느 나라보다도 빠르게 성장했다는데서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉 급증하는 전기 수요에 대응키 위한 송전선로 건설을 시간에 쫓기면서 하드웨어적 사항에만 치중하다 보니 소프트웨어적 사항에는 소홀히 했다는 것이다.

우리나라가 겪고 있는 이러한 밀양 송전선로 민원 같은 산고는 양상은 약간 다르지만 우리보다 앞서갔던 선진국들은 이미 겪은 사안이다. OECD 국가 반열에서 국민소득 2만6,000불의 세계 30위 정도로 부를 누리고 있는 입장에서, 이제는 송전분야를 다루는 모든 분야의 관계자가 향후 이러한 실패를 되풀이하지 않기 위해서는 선진국 사례를 참고하고 우리의 현황을 냉정히 분석해야 할 것이다. 이를 통해 국민소득에

[그림 8] 벨기에 전력청의 환경친화 송전철탑

[그림 9] 국내에서 검토한 환경친화 154kv 철탑모형

걸 맞는 환경친화적 개념으로 미래 송전선로를 설계 · 건설 그리고 운영함으로써 다시는 국가적 손실과 사회적 문제를 만드는 우를 범하지 않도록 최선을 다해야 할 것이다.

[참고문헌]

1. 《2010 전기산업 경기 전망》, 한국전기산업진흥회, 2010
2. World Economic Outlook, IMF(International Monetary Fund), Oct. 2010
3. Country Energy Profile. Retrieved Dec. 27, 2010, from IEA(U.S. Energy Information Administration) Web site : http://www.eia.doe.gov
4. Merits of 765kV and Insights into Its Application, ETA(Electric Transmission America), 2009
5. 2010 Fact Book, AEP(American Electric Power), 2010
6. 이동일, 《해외 출장 결과보고 – 미국 765kV 프로젝트 해외사업 개발 기술협의》, 한전 전력연구원, 2007
7. Northern California to Pacific Northwest/Canada Transmission Line, Steve Metague, PG&E, 2008
8. NERC 2008 TADS Workbook, Dec. 27. 2010, from NERC(North America Electric Reliability Corporation) Web site : http://www.nerc.com/filez/tadstf.html
9. Hubert Mercure et al., "Hydro-Quebec's Contribution to Advanced Transmission Line Technology : Milestones, Field Experience, Research and Testing", Proc. IEC/CIGRE Symposium on International Standards for Ultra High Voltage, Beijing, July 18, 2007
10. Features of Our Transmission System. Retrieved Dec. 27, 2010, from Hydro Quebec Web site : http://www.hydroquebec.com/en
11. 이동일 등, 《초고압 직류 가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술개발(최종보고서)》, 한국전력공사, 2010
12. Jorge Amon Filho et al., "800kV AC and 600kV DC Brazilian Transmission Systems – Experience and Future Trends", Proc. IEC/CIGRE Symposium on International Standards for Ultra High Voltage, Beijing, July 18, 2007
13. 이동일, 《Brazil HVDC 기술자료》, 한전 전력연구원, 2010
14. 이동일, 《해외 출장 결과보고 – Brazil HVDC 기술자료조사 및 KEPCO/FURNAS 전력사 협력》, 한전 전력연구원, 2010
15. Transmission Ten Year Plan, ESKOM, 2009
16. 이동일 외, 《UHV 의미와 중국의 개발현황》, 한전력연구원, 2007
17. R. P. Sasmal, "Planning and Design Consideration for First 800kV DC Transmission Project of India", Proc. IEC/CIGRE Symposium on International Standards for Ultra High Voltage, Beijing, July 18, 2007
18. "Transmission System in India – Future Plan", Proc. International Colloquium on Best Practices in Design & Maintenance Techniques for EHV Lines, India, Oct. 10, 2010, Power Grid, India
19. 이동일, 《국외 출장 결과보고 – 2010 인도 765kV 기술교류회 참석》, 한전 전력연구원, 2010
20. Eiichi ZaIMA, Toshiyuki Saito, "Best Practices in Design & Maintenance Techniques for EHV Lines 'Design'", Proc. International Colloquium on Best Practices in Design & Maintenance Techniques for EHV Lines, India, Oct. 10, 2010, Power Grid, India
21. Ota Tomoko, 平成20年度 電力供給計畫の概要, Electric, July, 2008
22. Electric Review Japan, FEPC(The Federal of Electric Power Companies of Japan), Jan. 2011
23. Akio Nakamura, "1100kV AC Transmission Project in Japan", Proc. IEC/CIGRE Symposium on International Standards for Ultra High Voltage, Beijing, July 18, 2007
24. 《해외건설 수주 478억불 달성》, 국토해양부 보도자료, 2009.12.14
25. 백동구, 〈전기공사업의 해외시장 진출 필요성과 추진방향 검토〉, 《전기설비》, 12. 2010
26. 이동일, "주요국가 초고압 송전설비 운용현황 및 전망" 《전기설비》, 5. 2011