2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

이산화탄소 배출권이 전력수송설비의 기술개발에 미치는 영향 검토

이근준, 홍원표, 황시돌, 김현홍, 박희철*

The Effect of technology Development of Power Delivery System due to CO2 emission Right

충북과학대학, 한밭대학교, 전력연구원, 건국대학교, NESTI

Abstract - 본 논문은 우리나라 전력전송설비들의 현황에 기초하여 향후 전력수요 증가에 따른 설비확장 시 이산화탄소 배출권의 영향을 고려한 보다 효율적인 전력설비의 선택과 중장기 전력기술개발을 위한 방향을 제시하기 위한 개념적 모형을 제시하는 한편 기술의 투자비와 이득을 최적조류계산에 의해 상정하는 방법을 제시하고 간략한 계통에서 모의함으로써 새로운 전력설비 기술개발 선택의 방법론을 제시하였다.

1. 서 론

세계의 전기에너지의 흐름

세계 에너지시장은 2002년 대비 +2.6% 성장(경제성장률 : +1.7%)하였다[1]. 에너지별로는 석탄이 최대의 소비 증가율(중국의 영향 +28%)을 보이고 있으며, 다음으로 천연가스(미국 +3.9%, 아시아개도국 +7% 평균 2.8% 성장), 석유, 원자력, 수력의 순이며, 아시아권 특히 중국의 에너지소비 증가가 두드러지고 있다(표 1).

표 1 세계 에너지 수급 실적](단위 BTU 석유환산, %)

	석유	천연가스	석탄	원자력	수력	합계	전년대비
북미	1064.9	711.2	591.5	205	142.2	2715.4	101.7
중남미	214.8	88.2	17.8	4.7	122.7	448.2	99.2
구주	925.2	939.5	506.1	280.0	178.9	2829.5	99.4
중동	207.4	185.1	8.4	-	1.9	403.1	101.7
아프리카	118.6	60.7	90.6	2.9	18.5	291.0	102.2
아시아	991.6	297.3	1183.5	118.0	127.7	2,718.1	107.9
중국	245.7	27.0	663.4	5.9	55.8	997.8	119.7
일본	242.6	69.7	105.3	71.3	20.5	509.4	99.0
한국	105.0	23.6	49.1	27.0	1.2	205.9	105.1
계	3522.5	2282	2397.9	610.6	592.1	9405.0	102.6

미국 DOE/EIA에 의하면 2025에는 세계에너지 소비량은 2025년까지 2002년 대비 58% 증가하며, 지역별 전력소비량 증가는 선진국 1.7%, 동구 2.3%, 개도국 2.4%(아시아3.7%, 중국 4.3%) 종합 2.4%로서 아시아 특히 중국의 전력성장이 크게 증가할 것이다.

이산화탄소 배출권의 영향

선진국[2]에서는 화석 에너지의 고갈과 세계 전력화율 증가에 대처, 범지구적인 차원에서 지속가능한 발전을 지원하기 위한 사회기반 에너지로서 전력에 대한 새로운 역할을 실현하기 위해 이산화탄소 저감 기술개발에 주력하고 있다 (그림 1).

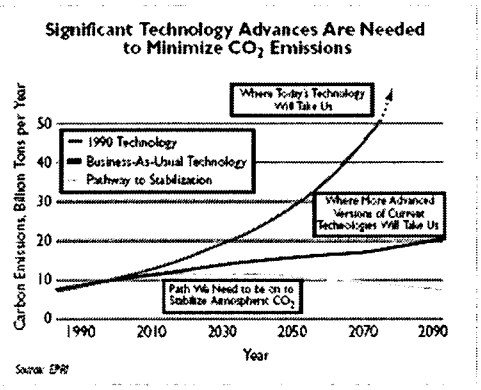

그림 1 CO_2 저감을 위한 기술개발의 필요성

그러나 이러한 연구들은 주로 신재생 에너지 부문에 집중되는 경향을 보여왔기 때문에 발전계통을 연결하는 전력망의 역할에 대한 토의는 미진하였다. 우리나라에서도 이에 대처하기 위해 산학연이 결집하여 관련 연구를 수행해 왔으나, 전기에너지 산업이 갖는 기술적 특성을 만족시키기는 미흡한 상황이며, 특히 전력전송망이 갖는 광역적이고 다양한 운전조건을 고려해야 하는 부문은 DB 구축의 초보적 단계에 머물러 있다.

따라서 본 논문에서는 우리나라 전력전송설비의 현황과 미래전망에 기초하여 이산화탄소세가 전력기술 개발에 주는 영향을 분석, 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 전력산업에 대한 이산화탄소 영향 모형

개방 체제 하에서 전력산업의 모형은 다음과 같다.

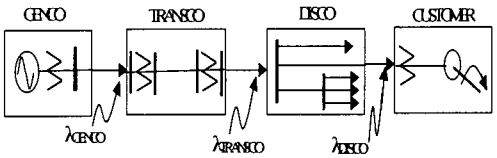

그림 2 전력산업 CO2 관리 모형[3]

여기서 λ_i 는 각 사업단의 효율이며, 본 논문의 관심사는 TRANCO(송전회사)의 효율인 $\lambda_{transco}$ 를 향상시킬 수 있는 기술과 이에 의한 이산화탄소 배출량의 감소에

있다.

CO2 배출비용의 산정

송전산업에서 CO2의 배출 비용은 종합비용적인 측면에서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{CO2_{tot}} = W_{loss} + W_{const} + W_{ROW} + W_{TLcong} \quad (1)$$

W_{loss} : 선로손실의 CO2 배출비용

W_{const} : 송전선로 건설의 CO2 배출비용

W_{ROW} : 송전경과지의 CO2 배출비용

W_{TLcong} : 송전선로 congestion 비용

본 논문에서는 W_{const} 와 W_{ROW} 의 영향을 무시하고 선로손실과 혼잡비용의 영향만 고려하기로 한다.

2.2 선로손실에 영향을 주는 전력기술요인

송전선로의 손실에 영향을 미치는 기술요인으로는 도체의 저항, 인턱턴스, 커패시턴스를 결정하는 하드웨어 기술과 전력용반도체기술 및 전력계통계획 및 운용기술이 있으며, 이를 세분하면 다음과 같다.

표 2 CO2에 영향을 주는 송전계통 기술 요인

변수	기술명	단위	비교
X_1	도체 전도율 기술	원/PU	전도율1%상승연구비
X_2	도체 리액턴스기술	원/PU	리액턴스1%감소연구비
X_3	초전도 기술	원/PU	선로 초전도화 연구비
X_4	고효율변압기 기술	원/PU	효율 1%상승 연구비
X_5	전력변환응용기술	원/PU	효율 1% 상승 연구비
X_6	승압 기술	원/PU	효율 1%상승 연구비
X_7	최적조류운용기술	원/PU	손실 1% 감소 연구비
X_8	송전망 운용기술	원/PU	보수손실감소 연구비
X_9	송전신뢰도 기술	원/PU	신뢰도 향상 연구비

송전계통 기술들이 CO2 배출비용에 미치는 영향은 각 기술의 적용량(예를 들면 선로의 선종과 길이), 계통의 구성, 발전력 및 부하의 배분상태, 송전망의 제약(열용량, 안정운전한계, 유지보수상태, 기상조건 등)에 따라 차이가 있으며, 이들 영향 계수를 고려하면 CO2 배출송전계통 연구개발비는 다음 식으로 계산된다.

$$Y_{tot} = [W_1 \ W_2 \ \ldots . W_n][X_1 \ X_2 \ldots X_n]^T \quad (2)$$

단 $[W_1 \ W_2 \ \ldots . W_n]$ 는 각 기술의 가중치

2.3 계통의 조건에 따른 가중치의 영향

선로손실은 계통 조건에 따라 변화하므로 W_{loss} 의 값은 계통에서 얻게 되며 이는 다음의 최적조류계산 문제로 모형화할 수 있다.

$$\min \quad \sum_{i=0}^{m} [a_i + (b_i + w_i)P_i + cP_i^2] \quad (3)$$

$$\text{subject to} \quad f(X, U) = 0$$
$$X_{\min} \le X \le X_{\max}$$
$$U_{\min} \le U \le U_{\max}$$

단 a_i, b_i, c_i : 발전력 비용상수

P_i : 발전력 배분값

w_i : I 발전기의 CO2 발생단가[원/MW]

U : 상태변수, X : 제어변수

송전계통기술이 CO2 배출비용저감에 주는 감도는 각 기술변수에 대한 손실의 편미분값으로 주어질 수 있다. 각 기술에 대한 CO2 손실저감 비용의 감도가 얻어지면 기술개발에 의한 송전계통 CO2 저감비용은

$$\sum_{i=1}^{9} \frac{\partial W_{loss}}{\partial X_i} \Delta X_i \quad (4)$$

로 되며, $\frac{\partial W_{loss}}{\partial X_i}$ 의 값에 내용연수의 시간값을 곱한 결과가 $[W_1 \ W_2 \ \ldots . W_n]$ 의 값보다 크면 기술개발 이득이 발생하는 것으로 볼 수 있다.

2.4 우리나라 전력설비/기술의 현황과 CO2비용

표 3 및 4는 우리나라 송전계통기술의 국제적인 비교값 및 CO2 비용을 추정한 값이다.

표 3 전력기술 분야별 수준 [최선진국 대비]

분야별기술수준				분야별기술수준			
전력계통	전력계통/운용	전력설비연계/제어	60-90	전기이용	전기응용장치	초전도전력응용	40-70
		계통안정화	90			방전/고전압응용	-
		FACTS/HVDC	20-70				
	송전변전배전	전력수급	90	기초및기반	전력기초기술	금속/재료	-
		가공송전	30-70			전기/제어	-
		지중송전	30-50				
		시험평가	50			기계기술	-
		절연설계,신뢰도	50-80				
		재해예방/안전	70-90				

표 4 이산화탄소 지출비용

연도	발전량 [GWh]	전기요금 (억원/GWh)	총전력판매금액 (억원)	전력전송손실목표	이산화탄소비용 (억원)
2006	373,315	0.77	287,453	0.046	13,223
2007	385,447	0.77	296,794	0.046	13,653
2008	394,147	0.83	327,142	0.046	15,049
2009	403,354	0.83	334,784	0.046	15,400
2010	411,766	0.83	341,766	0.046	15,721
2011	418,974	0.83	347,748	0.046	15,996
2012	425,442	0.83	353,117	0.046	16,243
2013	431,423	0.83	358,081	0.046	16,472
2014	436,915	0.83	362,639	0.046	16,681
2015	447,029	0.83	371,034	0.046	17,068
계					155,506

우리나라에서 전력 발생시 이산화탄소 배출량을 488 [g/kWh]로 추정되며(에너지관리공단) 우리나라 화력발전량의 비중은 58.4%(2006) ~ 48.8%(2015)로 평균 53% 정도로 추정되고 있다. 이산화탄소세가 전기요금에 주는 영향을 미국의 경우 0.8-1.6 [cent/kWh] (석탄 발전 경우)정도이며, 탄소세가 전기요금에 부가되는 평균값 12원/kWh 의 53%를 전력요금에 반영하면

6.36원/kWh 로서 6원/kWh 정도의 이산화탄소에 따른 전기요금 상승 요인이 발생하므로 약 10%정도를 반영하는 것이 타당하다고 추정할 수 있다.

2.5. 모델계통에 대한 검토

2.5.1 모형계통

기술개발의 영향을 고찰해보기 위해 다음과 같은 간단한 2기 모형계통을 사용하였다.

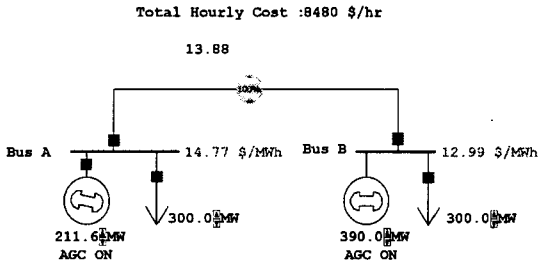

그림 3 CO2 비용 검토를 위한 모형계통

표 5 모형계통 상수

	상수
발전기 A	a=239.4, b=7.0, c=0.002 Pg = 200MW Pmax=600MW, Pmin=150MW Qmax=99, Qmin = -99 이산화탄소비용 w_i = 1.0
발전기 B	a=414, b=7.94, c=0.001, Pg=300MW Pmax=700MW, Pmin = 100MW 이산화탄소비용 w_i = 0
선로	Z = 0.02 + j 0.2, Rating = 90MVA 20km

표 6 기술변수 가중치

	조건	개발비용(W_i)
도체전도율 기술	내용연수 20년=175200 hours 부하는 연평균 동일	5M$/1%
도체리액턴스기술	상동	5M$/1%
초전도기술	상동, Z=0+j0.04	25M$/km

2.5.2 모의결과

최적조류계산 시뮬레이션을 통하여 CO2 부담금과 송전계통기술이 미치는 이익을 모의해본 결과는 표8과 같다.

표 7 기술적용시 OPF 모의결과 요약

CASE	총시간당 Cost [$/hr]	증분비 [$/MWh]	송전손실 [MW]	총증가비용 (CO2-x) [M$]	송전용량 증대 [MW]
① No CO2	8480	14.77	1.6	0	0
② CO2 비용	8834	13.88	1.6	4,465	0
③ CO2, X1	8825	13.87	1.6	4,352	5
③-1CO2, X1	8832	13.88	1.5	4,440	0
④ CO2, X2	8834	13.88	1.6	4,465	0
⑤ CO2, X3	8721	13.17	0.0	3,040	60

X_1, X_2, X_3 : 표 2 계통기술 참조

모의결과 CO2 비용으로 4.2%의 비용증가가 발생하였다(#②). 도전율향상기술을 적용하여 10% 저항이 감소한 경우(#③-1) 손실감소이득은 0.1MW로서 CO2 감소 25[M$]의 이득을 가져오나, 송전용량 5% 증가를 감안할 경우 (#③) 107M$의 이득을 가져옴으로써 이산화탄소 감소이득이 송전선로 혼잡해소 이득보다 상대적으로 적음을 볼 수 있으며, #③의 경우 113M$ 이득을 가져옴으로써 개발비용50M$를 초과하는 이득이 발생한다.

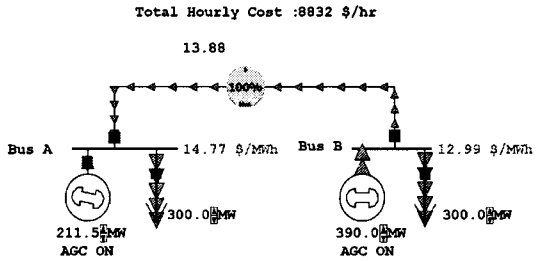

그림 4 case3-1 도전율향상에 의한 송전손실감소시

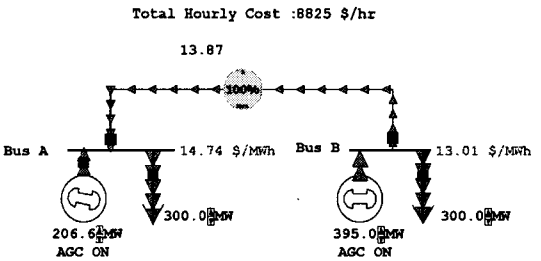

그림 5 case3 도전율향상과 송전용량 증대효과 고려시

#④의 경우는 열용량상의 이득은 없는 것으로 가정하였으나, 안정도 제약계통인 경우 효과발생이 예상되며 ,#③에서는 초전도케이블 적용 시 송전제약해소 및 손실감소 이득이 투자비 대비 약 3배의 이득을 가져오는 것으로 나타났다.

3. 결 론

이산화탄소 배출권 부가에 의한 전력계통운영상의 추가비용 부담과 이에 유효한 송전기술 비용산정 방법론을 개발하고 2기 계통에 대한 OPF 시뮬레이션을 통하여 타당성을 평가해 보았다. 그 결과 다음 결과를 얻었다.

1. 이산화탄소 배출권이 전력수송설비기술의 발전에 주는 영향을 정량적으로 접근할 수 있는 방법 개발이 가능하였다.

2. 이산화탄소 배출권이 전력수송설비에 주는 영향은 송전 손실에 기여하는 이산화탄소 발생 발전력의 배분에 의해 결정되나, 송전용량이 제약된 계통에서 전력손실감소로 CO2 비용을 저감하는 것보다 송전용량증대로 발전력의 CO2 비용저감을 기하는 것이 더 효과가 크다.

4. 초전도, FACTS, 직류송전과 같은 고비용을 수반하면서 송전용량 증대효과가 큰 송전기술의 적용에는 보다 면밀히 검토할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

[1] "인프라 구축지원 기술기반조성사업의 중장기 목표 수립을 위한기획조사연구" 최종보고서 충북과학대, 산업자원부 2005. 3.

[2] "EPRI Electric technology road map" 2003 EPRI

[3] Geun-Joon LEE, G.T.Heydt, "An Interactive-Dynamic Mechanism Conceptualizing the Cost and benefit of Electric Power Quality", Electric Power Components and Systems, 31:879-890, 2003

[4] "제2차 전력수급계획" 산업자원부 2004. 12