

신재생에너지원의 최적용량에 관한 연구

김양일, 김광모, 이승현, 정구형, 한석만, 김발호  
홍익대학교

A study on the optimal generating capacity of renewable energy

Yang-Il Kim, Kwang-Mo Kim, Seung-Hyun Lee, Koo-Hyung Chung, Seok-Man Han, Balho H. Kim  
Hong-Ik University

**Abstract** - This paper presents a method of finding the optimal capacity of renewable energy in power system to prepare Kyoto-protocol. In order to determine the capacity of renewable energy, this paper finds a amount of CO2 emission and capacity of power reduction for each energy type. The proposed method performs economic dispatch including the existing facilities, renewable energy and Emission trading, and finds optimal capacity of renewable energy power satisfying minimum total cost. Finally, the proposed idea is demonstrated with a case study.

는 현 실정에서 에너지 안보를 확보해야하므로 신재생에너지를 이용한 발전이 필요하며 확대되어야 한다. 교토의정서에 의한 온실가스 감축뿐만 아니라 화석연료의 고갈로 인해 에너지 부문에서 신재생에너지의 이용이 늘어날 필요가 있다.

본 연구에서는 교토의정서를 대비하기 위한 신재생에너지원의 최적 용량을 구하고자 한다. 기존의 경제급전(Economic Dispatch)에 신재생에너지원과 교토의정서 이행의 신축성을 허용하기 위한 배출권거래를 포함한 새로운 경제급전을 실시한다.

2. 본 론

1. 서 론

온실 가스의 배출 증가로 기상 이변이 발생하여 이를 방지하기 위해 1992년 유엔은 기후변화협약을 체결하였다. 그러나 참여국들의 실질적인 의지가 없어 1997년 일본 교토에서 교토의정서를 채택하였다. 이는 이산화탄소(CO2), 불화탄소(PFCs), 메탄(CH4), 아산화질소(N2O), 수소화불화탄소(HFCs), 불화유황(SF6) 등의 6가지 온실가스배출량을 2008년부터 2012년까지 90년보다 평균 5.2% 줄이는 것을 목표로 하고 있다. 2005년 2월 16일부터 발효되어 현재 의무 대상국(Annex1)은 오스트레일리아, 캐나다, 미국, 일본, EU등 총 38개국이다. 유엔 기후 변화협약(UNFCCC) 당시 우리나라는 개도국으로 분류되어 당장 감축의무는 없다.

CO2는 온난화 기여도는 낮지만 전체 온실가스배출량의 80%를, 그리고 우리나라의 배출량 중에서 88.6%를 차지한다. CO2 배출은 화석연료 사용에 의해 이루어지고 있다. 2002년 IEA의 자료에 의하면 에너지 부문에서 우리나라의 CO2 배출량은 세계 배출량의 1.9%를 차지하고 이는 9번째에 해당한다. 또한 1990년과 비교하여 92.7%나 증가하였으며 2002년 현재 1인당 온실가스 배출은 9.48tCO2/인 으로 세계 27위에 해당한다.

<표.1 1990~2002년간 온실가스 증가율>

구분		1990	1995	2000	2002	증가율(90'02)
항목	단위					
온실가스 배출량	천 tC	84,738	123,445	144,252	154,724	5.1
GDP	10억(1995)	263.430	377,350	478,533	524,689	5.9
온실가스/GDP	tC/백만원	0.322	0.327	0.301	0.295	-0.7

또한 산업자원부가 발행한 '에너지수급총관'에서 의하면 1973년부터 2000년까지 우리나라의 에너지 소비는 672.1% 증가하였으며 에너지원 수입 의존도는 55.5%에서 97.2%로까지 증가하였다. 에너지의 대부분을 수입하

2.1 가정

먼저 기존의 경제급전과 마찬가지로 기존의 발전원들의 비용함수는 2차 함수로 표현한다. 그리고 신재생에너지원의 비용함수는 건설비와 운영비를 고려한 1차 함수로 나타내며 전력시스템에서 신재생에너지원의 투입이 시스템 신뢰도에 미치는 영향은 고려하지 않는다. 또한 신축성 있는 교토의정서 이행을 위한 교토 메카니즘 중 에서 배출권거래제(Emission Trading)을 고려한다.

CO2 배출을 줄이는 방법으로 CO2배출이 많은 발전을 줄이고, CO2 배출이 적은 발전을 늘리는 방안이 있으나 장기적으로 볼 때 신재생에너지원 용량의 확장이 필요하기 때문에 여기에서는 CO2 삭감량을 결정을 하고 그 삭감량에 준하는 발전용량을 줄이는 방법을 이용한다. 여기에서 삭감된 발전용량과 증가하는 부하량을 신재생에너지원과 배출권 거래를 통한 발전용량이 담당한다. 배출권을 통한 발전량이란 배출권을 구입하였으므로 구입한 양만큼 CO2를 배출할 수 있기 때문에 그 CO2배출만큼의 발전용량을 의미한다.

2.2 정식화

신재생에너지원의 최적 용량을 결정하기 위한 경제급전은 다음과 같다.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n [c_i + b_i(P_{i,t} + \Delta P_{i,t}) + a_i(P_{i,t} + \Delta P_{i,t})^2] + \text{Con}(P_{R,t}) + M(P_{R,t}) + C(e) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_{R,t} + \Delta P_{i,t} = P_{i,t} + \Delta L_t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{R,t} \leq P_{R,t} \quad (3)$$

$$\sum_i P_{i,t} + \Delta P_{i,t} + P_{R,t} = L_t \quad (4)$$

여기서,  $P_{i,t}$ : t년도 전원 i의 발전용량  
 $\Delta P_{i,t}$ : t년도 배출권 거래를 통한 전원 i의 추가 발전용량  
 $P_{R,i,t}$ : t년도 신재생에너지원의 발전용량  
 $PC_{i,t}$ : t년도 전원 i의 삭감량  
 $L_t$ : t년도 총 부하량  
 $\Delta L_{i,t}$ : t년도 부하증가량  
 $Con(P_R)$ : 신재생에너지원 건설비  
 $M(P_{R,i})$ : t년도 신재생에너지원 유지비  
 $C(e_i)$ : t년도 배출권 구입비용

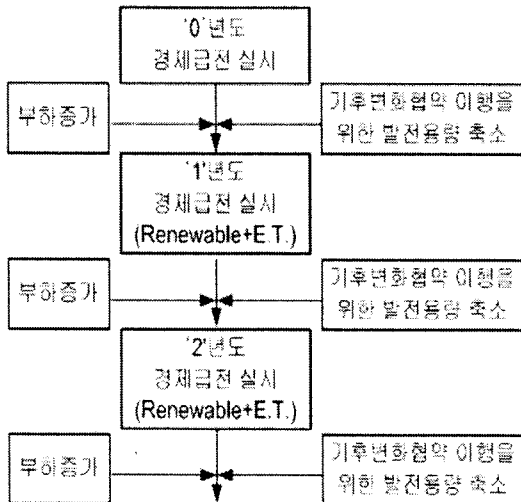
### 2.2.1 목적함수

식(1)은 t년도의 발전비용을 최소화하는 비선형 목적함수이다. 목적함수는 원자력, 석탄화력과 같은 현재 이용하고 있는 발전원의 발전비용함수와 신재생에너지원의 건설비와 유지비, 그리고 배출권을 구입하는 비용으로 구성된다. 단, 신재생에너지원의 건설비용은 첫째에만 적용되고 그 다음 연도부터는 건설비용은 제외되고 유지비만이 포함된다.

### 2.2.2 제약조건

식(2)는 CO2 배출을 줄이기 위해 삭감된 발전량과 부하 증가량을 신재생에너지원과 배출권 구입을 통한 추가 발전용량이 발전을 담당한다는 제약조건이고, 식(3)은 신재생에너지원의 확대를 위한 제약조건이다. 교도의정서를 이행하는 것이 당면 과제이지만 화석연료의 고갈과 환경문제를 고려할 때 신재생에너지원의 확대가 필요하다. 따라서 식(2)와 식(3)은 이 문제를 반영하는 제약조건이다. 식(4)는 전력 수급 균형을 맞추기 위한 제약조건이다.

### 2.3 개요도



<그림 1. 경제급전 순서도>

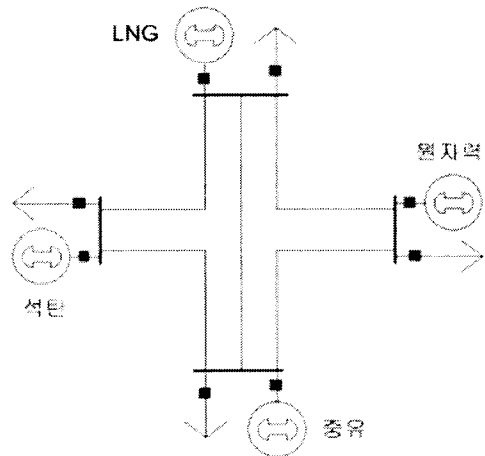
위 <그림 1>처럼 먼저 기준년도 경제급전을 실시하여 CO2 배출량을 구한 후 CO2 감축을 위해 발전용량이 얼마나 축소 되어야 하는지를 구한다. 이 발전량 축소량과 부하증가량을 신재생에너지원과 배출권 거래를 통한 추

가 발전용량이 담당하는 것을 포함한 '1'년도 경제급전을 실시한다. 그리고 그 다음해에도 이와 마찬가지로 경제급전을 실시하여 최적의 신재생에너지원 발전용량을 구한다.

### 2.4 사례연구

본 연구는 GAMS 최적화 프로그램을 이용하여 경제급전을 실시하였다. 그리고 신재생에너지원은 풍력발전과 태양광발전만 고려하였으며 전력분야의 탄소배출계수는 1996년의 총 발전량 205,494,000MWh와 전력분야 CO2배출량 27,110,540tC를 감안하여 산출한 0.1319tC/MWh를 이용하였다. 이는 한전에서 전력을 공급한 경우이고 자가발전을 하는 경우에는 발전 투입연료별 탄소배출계수를 적용한다.

#### 2.4.1 사례 계통과 각 데이터



<그림 1. 경제급전 순서도>

위와 같은 4모선 전력시스템을 이용하였다. 선로용량은 최대이며 발전기의 출력 제약은 없다. 부하 데이터는 <표 2>와 같이 주어지며 계산의 간략화를 위해 각 연도의 4시간의 데이터만을 이용하였다.

<표 2> 부하데이터

분류	부하량 (MW)	분류	부하량 (MW)	분류	부하량 (MW)
0Y	1h	1Y	1950	2Y	2000
	2h		2200		2250
	3h		2100		2300
	4h		1900		1950
	T		6850 (MWh)		8150 (MWh)
3Y	1h	4Y	2100	5Y	2150
	2h		2400		2400
	3h		2550		2600
	4h		2050		2200
	T		8850 (MWh)		9100 (MWh)

<표 3>는 현재 우리나라에서의 태양광발전과 풍력발전의 건설비와 운영비를 나타내며 환율은 S1=1000원을 적용하였다.

<표 3>태양광과 풍력발전의 비용 데이터

발전기	건설비	유지비
태양광	10000(\$/kW)	5(\$/kW)
풍력	5000(\$/kW)	2.5(\$/kW)

2.4.2 배출권 거래비용

배출권을 구입하는 것은 구입한 만큼의 탄소를 더 배출할 수 있다는 것을 의미한다. 즉 탄소를 더 배출한다는 것은 기존의 발전원을 이용할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 상대적으로 큰 비용을 필요로 하는 신재생에너지원을 확대하는 것에 대한 부담을 줄여준다. 신재생에너지원의 비용보다 적은 범위 내에서 배출권을 구입하여 기존 전원을 이용한 발전을 행한다. 이때의 배출권 비용은 다음과 같다.

$$(\$44/tC) \times 0.1319(tC/MWh) \times \sum_{i=1}^n \Delta P_{i,t} \times 20(h) \quad (5)$$

단, 여기서 \$44/tC는 Nord Pool에서 거래되는 배출권 가격이다.

2.4.3 온실가스 감축량 계산

<표 4>는 온실가스 의무 감축이 시행되지 않을 때의 경제급전과 매년 배출되는 온실가스의 양을 보여준다. 단 이 때 원자력발전은 온실가스를 배출하지 않으며 전력분야의 온실가스 배출계수는 0.1319tC/MWh를 적용하였다.

<표 4>

구분	LNG (MW)	석탄 (MW)	중유 (MW)	원자력 (MW)	탄소배출량 (tC)
0Y	101.1	613.96	281.87	803.16	425.23
1Y	137.83	738.96	373.36	949.85	605.28
2Y	147.03	770.2	396.24	986.53	634.52
3Y	156.24	801.46	419.11	1023.19	663.76
4Y	170.05	848.33	453.42	1078.2	684.64
5Y	174.65	863.96	464.85	1096.54	705.52

의무감축이 '0Y'년도 대비 5% 감축이라면 '1Y~5Y'의 5년간 배출할 수 있는 양은

$$3765.8(MWh) \times 0.1319(tC/MWh) \times 5(Ys) - 3765.8(MWh) \times 0.1319 \times 0.05 \quad (6)$$

식(6)에서 2458.71tC이다. 따라서 5년간 감축할 양은 835tC가 된다.

2.4.4 발전용량 감축량 계산

5년간 감축할 배출가스의 양이 835tC이므로 이를 바탕으로 발전용량 감축량을 계산하면

$$835tC \times \frac{1}{0.1319(tC/MWh)} \times \frac{1}{20(hs)} \quad (7)$$

식(7)에서 316.53MW이다. 따라서 이 감축량을 5년간 균등하게 감축시켜 간다면 매년 63.3MW를 감축하면 된다.

2.4.5 결과

<표 5>사례시스템 결과

구분	0Y	1Y	2Y	3Y	4Y	5Y
총부하	1800	2200	2300	2400	2550	2600
부하증가량+삭감발전용량		63.3	163.3	163.3	213.3	113.3
LNG	101.1	124.89	126.513	135.166	144.299	156.238
LNG (배출권)		10.23	13.002	13.556	15.930	13.197
석탄	613.96	729.069	728.419	760.474	794.142	843.432
석탄 (배출권)		0	16.274	15.468	20.861	2.820
중유	281.87	344.495	325.185	347.806	359.164	411.263
중유 (배출권)		21.627	52.374	52.626	69.859	40.633
원자력	803.16	938.246	956.582	993.254	1039.095	1075.767
태양광		0	0	0	0	0
풍력		31.65	81.65	81.65	106.65	56.65

<표 4>와 <표 5>를 비교하면 기존의 전원들의 발전용량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 그 감소된 발전용량과 부하증가량은 신재생에너지원과 배출권 거래를 통한 추가 발전용량에 의해 발전된다. 태양광은 현재 시스템 설치비용과 유지비가 풍력에 2배가 되므로 결과값이 0이 나왔다.

3. 결 론

본 연구에서는 단기적으로는 기후변화협약 이행과 장기적으로 신재생에너지원의 확대에 대한 대응책으로 필요한 신재생에너지원의 최적용량을 구하는 방법에 대해 제안하였다.

본 논문의 경우에는 기존의 발전용량을 조절하는 방법으로는 CO2 배출을 줄일 수 없다고 가정하였다. 따라서 전력시스템 내의 전반적인 설비계획에 대한 연구가 필요하다. 또한 우리나라의 기후 특성상 풍력발전 보다는 태양광발전이 더 유리하다. 따라서 태양광발전의 기술개발을 통해 태양광발전의 경제성을 향상시킬 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부(에너지관리공단) 2003정책과제 지원사업에 의해 수행된 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, 에너지경제연구원, 氣候變化協約 對應을 위한 中長期 政策 및 戰略에 관한 研究 2004.6
- [2] 산업자원부 자원정책실, 自然 에너지 주요통계, 2004.3
- [3] 임재규, 강운영 기후변화협약의 국내 산업구조 및 국제 경쟁력 파급효과, 에너지경제연구원 기본보고서 2000-3, 2000
- [4] 산업자원부, 에너지관리공단, 알기 쉬운 기후변화협약, 2000.10
- [5] 산업자원부, 기후변화협약정보(한국어판), 2000.10
- [6] 산업자원부, 제 2차 전력수급기본계획, 2004
- [7] Wood Wollenberg, Power generation, operation, and control, Wiley Interscience, 1996
- [8] 김발호, 최적조류계산의 이론과 응용, 홍익대학교, 2001