

CO2 배출제약 조건과 배출권 거래제를 고려한 OPF

김양일, 한석만, 정구형, 박경한, 김발호
홍익대학교

OPF considering CO2 emission constraints and the emission trading mechanism

Yang-Il Kim, Seok-Man Han, Koo-Hyung Chung, Kyung-Han Park, Balho H. Kim
Hong-Ik University

Abstract - Consumption of fossil fuel has been increasing steadily, and it has seriously affected environment. Due to this situation, UN established UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), and since Feb. 2005, Kyoto Protocol has come into effect for UNFCC obligation.

In Korean power system, coal and oil thermal generation emitting large CO2 form about 46% of total generation. Moreover since electricity demand has been increasing continuously, various alternatives should be designed to comply with Kyoto Protocol.

In this paper, we analyze changes of each GENCO's generation pattern and resource planning under CO2 emission constraints. For this analysis, we incorporate CO2 emission constraints and the emission trading mechanism into the conventional OPF model.

1. 서 론

1992년 유엔은 온실 가스 배출 증가로 인한 환경 오염 및 기후 변화를 방지하기 위해 기후변화협약을 체결하였다. 그 후 참여국들의 실질적인 참여를 위해 1997년 일본 교토에서 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하였다. 교토의정서는 CO2, PFCs, CH4, N2O, HFCs, SF6 이상 6가지 온실가스 배출량을 줄이는 것을 목표로 2005년 2월 16일부터 발효 중이다. 우리나라는 유엔기후변화협약 당시 개발도상국으로 분류되어 현재 감축 의무 대상국은 아니다. 하지만 최근 EU 국가들 사이에 선발 개도국들에 대한 감축 참여 문제가 제기되고 있는 상황에서 이에 대한 대비가 필요하다.

교토의정서에는 온실가스 감축을 효과적이고 경제적으로 이행하기 위해 교토메카니즘(Kyoto Mechanism)이라고 불리는 공동이행제도(JI), 청정개발체제(CDM), 배출권거래제도(ET)와 같은 유연성체제를 도입하였다. 배출권 거래제도는 온실가스 감축의무 보유국이 의무감축량을 초과하여 달성한 경우 이 초과분을 다른 부속서 국가와 거래할 수 있도록 허용하며 이와 반대로 의무를 달성하지 못한 국가는 부족분을 다른 부속서 국가로부터 구입할 수 있는 제도이다. 즉 온실가스 감축량도 시장의 상품처럼 서로 사고 팔 수 있도록 허용한다. 이 제도는 각 국가가 배출량을 최대한으로 줄여 배출권 판매수익을 거두거나, 배출량을 줄이는데 비용이 많이 드는 국가가 상대적으로 저렴한 배출권을 구입하여 감축비용을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 우리나라가 교토의정서에 따라 온실가스 감축 의무 대상국이 되었을 때 CO2 배출량 제약과 배출권거래제도가 급전계획에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 이 두 조건을 고려한 OPF를 통하여 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구방법 및 정식화

최적조류계산(Optimal Power Flow)은 기술적, 물리적, 환경적 제약조건 하에서의 경제급전을 의미한다. 본 장에서는 일반적인 OPF를 이용하여 CO2 배출제약조건을 고려할 경우와 그리고 CO2 배출제약조건 및 배출권거래제를 고려할 경우의 OPF의 정식화 과정을 살펴보도록 하겠다.

2.1.1 일반적인 OPF

일반적인 OPF는 유효전력생산비용을 목적함수로 하고 제약조건은 등식 제약과 부등식 제약으로 구성되며 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} : & f(x) \text{ ----- (1)} \\ \text{s.t. } & g(x) = 0 \text{ ----- (2)} \\ & h(x) \leq 0 \text{ ----- (3)} \end{aligned}$$

등식제약조건은 조류계산식에 의해 주어지며 부등식제약조건은 선로 최대 송전 용량, 발전기 출력한계, 상정사고 제약과 같은 운전조건이 포함된다.

2.1.2 CO2 배출량 제약을 고려한 OPF

CO2 배출량을 고려한 OPF는 일반적인 OPF의 부등식제약조건에 CO2 배출제약조건이 포함된다. 그리고 이때 CO2 배출량 제약은 시스템 전체 CO2 배출량에 대한 제약, 모선별 CO2 배출량에 대한 제약, 전원별 CO2 배출량에 대한 제약으로 나눌 수 있으며 이들 각 제약조건은 차후 국가 전체

CO2 배출량 제약, 지역별 CO2 배출량 제약, 산업별 CO2 배출량 제약으로 확대시킬 수 있다.

CO2 배출량 제약조건을 고려한 OPF의 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F = & \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} f_{im} \text{ ----- (4)} \\ & \forall m \in M_i: \end{aligned}$$

$$f_{im} = \alpha_{im} + \beta_{im} \cdot PG_{im} + \gamma_{im} \cdot PG_{im}^2$$

$$\text{s.t. } \sum_{m \in M_i} PG_{im} + \sum_{j \in I} PF_{ij} = PI_i, \quad \forall i \in I \text{ ----- (5)}$$

$$\sum_{m \in M_i} QG_{im} + \sum_{j \in I} QF_{ij} = QI_i, \quad \forall i \in I \text{ ----- (6)}$$

$$\begin{aligned} PF_{ij} = & V_i V_j \{-G_i \cos(\delta_i - \delta_j) + B_i \sin(\delta_i - \delta_j)\} + (V_i)^2 G_i, \quad \forall i \text{ --- (7)} \\ QF_{ij} = & -V_i V_j \{G_i \sin(\delta_i - \delta_j) + B_i \cos(\delta_i - \delta_j)\} \\ & + (V_i)^2 (B_i - B_i/2), \quad \forall i \text{ ----- (8)} \end{aligned}$$

$$PF_{ij} \leq TP_{ij}, \quad \forall i \text{ ----- (9)}$$

$$QF_{ij} \leq TQ_{ij}, \quad \forall i \text{ ----- (10)}$$

$$PG_{im}^{\min} \leq PG_{im} \leq PG_{im}^{\max}, \quad \forall m \in M_i \text{ ----- (11)}$$

$$QG_{im}^{\min} \leq QG_{im} \leq QG_{im}^{\max}, \quad \forall m \in M_i \text{ ----- (12)}$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad \forall i \in I \text{ ----- (13)}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} PG_{im} \times COEM_i \leq EC \text{ ----- (14)}$$

- 단, I : 모선의 집합
- CR : 송전 선로의 회랑(Corridor)의 집합
- L_c : 회랑 c 의 송전 선로의 집합
- M_i : 모선 i 에 있는 발전기 집합
- ij : 모선 개수
- c : 회랑(Corridor)의 개수
- l : 송전선
- m : 발전설비 개수
- PL_i : 모선 i 의 유효전력 부하
- QL_i : 모선 i 의 무효전력 부하
- $c(i,j)$: 모선 i 와 j 를 연결하는 회랑의 상태
- G_i : 선로 l 의 컨덕턴스
- B_i : 선로 l 의 서셉턴스
- B_{cap} : 선로 l 의 분포 커패시턴스
- K_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 볼트-암페어 발전 용량
- KP_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 유효 전력 발전 용량
- KQ_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 무효 전력 발전 용량
- T_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 볼트-암페어 송전 선로 용량
- TP_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 유효 전력 송전 선로 용량
- TQ_{lm} : 모선 i 의 설비 m 의 무효 전력 송전 선로 용량
- $COEM$: 전원별 CO2 배출계수(tC/MWh)
- EC : 배출 가능한 CO2량(tC)

2.1.3 CO2 배출량 제약과 배출권거래제를 고려한 OPF

배출권거래제는 CO2 배출량을 줄이는데 드는 비용을 줄이는 역할을 한다. 단, 배출권의 가격이 경제성이 있을 경우이다. 만약 배출권의 가격이 경제성이 있다면 발전사업자는 배출권을 구입하여 CO2를 줄이는데 유연성을 갖는다. 즉, 배출권을 구입하여 CO2 배출량은 적으나 상대적으로 연료비가 비싼 가스발전보다는 연료비가 싼 석탄화력발전을 이용할 수 있다. 따라서 배출권은 하나의 전원으로 역할을 한다.

따라서 (4)식은 다음과 같이 바뀌며 이 식이 CO2 배출량제약과 배출권거래제를 고려한 OPF의 목적함수가 된다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} f_{im} + ET \times P_{ET} \text{ ----- (15)}$$

$$\forall m \in M_i:$$

$$f_{im} = \alpha_{im} + \beta_{im} \cdot PG_{im} + \gamma_{im} \cdot PG_{im}^2$$

단, ET : 배출권 거래량
 P_{ET} : 배출권 가격

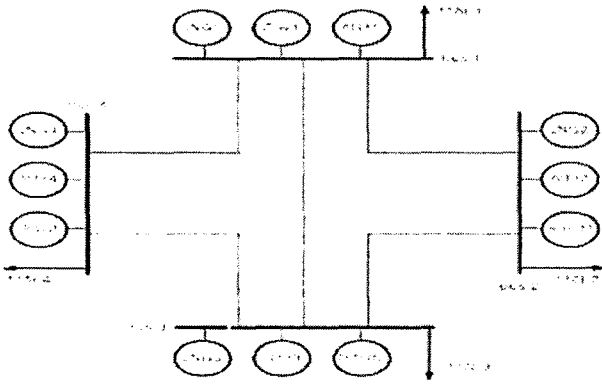
그리고 배출권을 구입한 양만큼 배출 가능한 CO2량은 늘어난다. 따라서 (14)식은 다음과 같이 바뀐다.

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} PG_{im} \times COEM_i \leq EC + ET \quad \text{----- (16)}$$

이 문제에서 출력은 각 발전기의 유효전력 발전량, 무효전력 발전량, 각 선로의 유효전력 그리고 무효전력 조류, 각 모선의 위상각 및 전압 크기, 총 비용, 그리고 배출권 거래량이다. 여기서 배출권거래량(ET)은 CO2 배출계약조건에 따라 달라진다. 즉, 시스템 전체 CO2 배출계약조건인 경우엔 시스템 전체 배출권거래량이 출력이며, 모선별(지역별) 배출계약조건일 경우는 모선별(지역별) 배출권거래량이 그리고 전원별(산업별) 배출계약조건일 경우에는 전원별(산업별) 배출권거래량이 출력이다.

2.2 사례연구

다음에 오는 4모선 계통에서 일반적인 OPF와 CO2 배출계약조건 그리고 배출권거래제를 고려한 OPF를 각 각 수행하여 이 두 조건이 급전계획에 어떠한 영향을 미치는지 알아보도록 하겠다.



<그림 1> 4모선 사례 시스템

2.2.1 CO2 배출계약과 배출권 가격

CO2 배출량 제약은 시스템 전체에 대해 시간대별로 첫 번째 시간대의 배출량의 5%를 삭감한 양을 배출 가능한 CO2 용량으로 설정하였다. 그리고 CO2 배출계수는 다음 표와 같으며 발전중 전원별 CO2 배출계수만을 고려하였다. 그리고 배출권거래 가격은 경제성이 있다고 가정을 하였다.

<표 1> 전원별 CO2배출계수(tC/MWh)

구분	가스	석유	석탄	원자력
발전중	0.157	0.215	0.278	0
타과정	0.031	0.031	0.079	0.0057

타과정 : 제작, 건설, 폐기시

2.2.2 부하와 선로용량

시간대별 부하데이터와 선로용량은 다음표와 같다.

<표 2> 시간대별 부하량 (MW)

구분	0 period	1 period	2 period
Bus1	1600	2100	2200
Bus2	700	800	900
Bus3	900	1200	1250
Bus4	800	900	950
총	4000	5000	5300

<표 3> 송전선로 용량 (MW)

구분	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4
Bus1		500	500	500
Bus2	500		500	500
Bus3	500	500		500
Bus4	500	500	500	

2.2.3 결과

<표 4> 각 시간대별 발전기 출력 및 배출권 거래량

		0p	1p	2p
G1	OPF	85.7	131.9	146.2
	OPF+CO2		211.3	335.5
	OPF+CO2+ET		171.5	184.6
G2	OPF	118.7	174.4	191.6
	OPF+CO2		201.8	265.8
	OPF+CO2+ET		182.4	198.2
G3	OPF	548.8	700	700
	OPF+CO2		573.4	491.3
	OPF+CO2+ET		606.2	650.7
G4	OPF	86.2	108.9	119.8
	OPF+CO2		90.8	213.3
	OPF+CO2+ET		96.3	108.6
G5	OPF	569.5	646.5	683.5
	OPF+CO2		182.2	94
	OPF+CO2+ET		369.8	411.4
G6	OPF	590.6	668.2	705.3
	OPF+CO2		1132.3	1200
	OPF+CO2+ET		931.4	973.5
G7	OPF	86.9	128	141.5
	OPF+CO2		185.9	309.9
	OPF+CO2+ET		156.1	168.1
G8	OPF	558.2	697.7	743.4
	OPF+CO2		491.7	408
	OPF+CO2+ET		558.8	602.8
G9	OPF	595.5	737.1	783.7
	OPF+CO2		1000	1000
	OPF+CO2+ET		1000	1000
G10	OPF	86.8	130.6	144.5
	OPF+CO2		200.9	325
	OPF+CO2+ET		165.3	178.4
G11	OPF	553.9	703.4	750.6
	OPF+CO2		540.2	457.2
	OPF+CO2+ET		587.4	631.7
G12	OPF	119.7	173	189.8
	OPF+CO2		189.4	200
	OPF+CO2+ET		175	190.8
배출권 거래량			70.02	177.48

위의 표를 보면 CO2 배출계약이 있을 경우 CO2 배출이 많은 석탄의 발전량이 가장 크게 감소를 하며 상대적으로 CO2 배출이 적은 가스발전이나 원자력발전의 출력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 배출권 거래가 있을 경우엔 배출권을 구입하여 연료비가 상대적으로 비싼 가스발전의 출력이 감소하고 연료비가 싼 석탄의 발전량이 대체적으로 증가를 한다. 총 비용을 비교하면 OPF+CO2>OPF+CO2+ET>OPF 순이며 배출권 거래는 CO2배출량을 줄일 때 비용효과적인 것을 알 수 있다.

3. 결 론

CO2 배출량 감소는 시스템 전체에 비용증가를 가져온다. 하지만 CO2 배출량 감축은 의무적이기 때문에 비용효과적인 방안과 CO2 배출량이 적은 발전원의 증가가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00290)

[참고 문헌]

- [1] 김양일, "신재생에너지원의 최적용량에 관한 연구", 2005년 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp 186-188, 2005
- [2] 김발호, "최적조류계산의 이론과 응용", 홍익대학교, 2001
- [3] Wood Wollenberg, "Power generation, operation, and control", Wiley Interscience, 1996
- [4] 산업자원부, 에너지경제연구원 "氣候變化協約 對應을 위한 中長期 定策 및 戰略에 관한 研究", 2004.6
- [5] 산업자원부, "기후변화협약정보(한국어판)", 2000.10