

정수계획법과 선형계획법을 이용한 CO2 배출량 제약과 배출권거래하의 설비계획 비교/ 분석

신혜경, 홍희정, 강동주*, 한석만, 정구형, 김발호
홍익대학교, 한국전기연구원*

Analysis of Generation Expansion Planning Considering CO2 Emission Constraints and Emission Trading under using LP(Linear Programing) and MIP(Mixed Integer Programing)

Hye-Kyeong Shin, Hee-Chung Jung, Gong-Ju Kang, Seok-Man Han, Koo-Hyung Chung, Balho H. Kim
Hong-Ik University, KERI*

Abstract - As UNFCC(United Nations Framework Convention on Climate Change) is enhanced, Korea will perform a CO2 reduction duty. The CO2 reduction duty will effect Korea power system because coal and oil thermal generations emit large CO2 form about 46% of total CO2 emission. Moreover various alternatives should be designed to comply with CO2 reduction duty. In this paper, we analysis resource planning considering CO2 emission constraints and emission trading. And we analysis resource planning under using LP(Linear Programing) and MIP(Mixed Integer Programing).

$$\sum_{i=1}^J x_{i\beta_y} - \sum_{j=1}^J x_{j\beta_y} + \sum_{j=1}^J x_{j\beta_y} (1 - \pi_{jj}) \geq P_{\beta_y} + x_{2\beta_y}^{char} \quad (3)$$

$$N_{ij}^0 \leq X_{ij} \leq N_{ij}^M \quad (4), \quad \Pi_{ij}^0 \leq X_{ij} \leq \Pi_{ij}^M \quad (5)$$

$$a_{i\beta_y}^m \cdot X_{ij} \leq x_{i\beta_y} \leq a_{i\beta_y} \cdot X_{ij} \quad (6), \quad 0 \leq x_{2\beta_y}^{char} \leq a_{2\beta_y} X_{2j} \quad (7)$$

$$-X_{ij} \leq x_{j\beta_y} \leq X_{ij} \quad (8), \quad \sum_{t_y=1}^{48} \tau_{t_y} x_{1\beta_y} \leq h_{1\beta_y} \cdot X_{1j} \quad (9)$$

$$\sum_{t_y=1}^{24} x_{2\beta_y} - \eta_j^{PSPP} \cdot \sum_{t_y=1}^{24} x_{2\beta_y}^{char} \leq 0, \quad \sum_{t_y=25}^{48} x_{2\beta_y} - \eta_j^{PSPP} \cdot \sum_{t_y=25}^{48} x_{2\beta_y}^{char} \leq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{t_y=1}^{24} x_{2\beta_y} \leq h_{2j} \cdot X_{2j}, \quad \sum_{t_y=25}^{48} x_{2\beta_y} \leq h_{2j} \cdot X_{2j} \quad (11)$$

1. 서 론

우리나라는 유엔기후협약 당시 개발도상국으로 분류되어 감축의무가 없었다. 그러나 최근 EU 국가들 사이에 개발도상국의 감축 참여문제가 제기됨에 따라, 2012년 이후 우리나라 또한 감축의무를 이행해야 할 것으로 예상되고 있다. 발전부문은 우리나라 온실가스 배출량의 대부분을 차지하고 있으므로 우리나라의 의무감축 이행은 발전설비의 건설 및 운용에 많은 영향을 미칠 것이다. 이를 대비하여 지금까지 수행된 설비계획 방법론에 관한 연구는 우리나라가 의무감축국이 되었을 경우의 전원구성비를 제시하였다. 그러나 기존의 연구는 특정 목표연도의 신규설비용량을 연속변수로 처리하여, 불연속적으로 건설되는 설비특성을 반영하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 CO2 배출총량제약이 부과되었을 경우, 정수계획법을 활용한 설비계획에 관한 연구를 수행하였다. 또한 신규용량을 연속변수로 처리한 경우의 결과와 정수로 처리한 결과를 비교·분석함으로써 의무감축 이행 시 배출권거래제의 효용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 연구방법 및 정식화

현재 우리나라는 전원개발계획 시 WASP(Wien Automatic System Planning Package) 전산모형을 이용한다. 그러나 WASP 모형은 기후변화협약 대응 시 고려해야하는 온실가스 감축에 대한 제약조건을 직접 처리할 수 없으므로 본 연구에서는 다양한 제약조건을 처리할 수 있으며 특히 환경제약을 직접적으로 반영할 수 있는 ORIRES 수리모형을 기반으로 하여 설비계획을 수행하였다.

2.1.1 MEFISSET 모형

MEFISSET(Model for Economic Feasibility of Interstate Electrical Ties) 모형은 ORIRES 수리모형을 기반으로 하는 전원개발 계획 모형으로서 목표연도에서의 최적 발전용량 및 연계지역 간 송전용량을 산출하는 모형으로 연계지역의 발전설비 운전비용과 신규 발전설비 투자비용 및 송전선로 투자비용 지출을 최소화하는 해를 도출한다. MEFISSET 모형의 다음과 같이 정식화 된다..

$$Min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} c_{ij} \tau_{t_y} x_{i\beta_y} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J K_{ij} (r_j + b_j) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J K_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} \quad (1)$$

s.t.

$$a_{1\beta_y}^{max} \cdot X_{1j} + \sum_{i=2}^J X_{ij} - \sum_{j=1}^J x_{j\beta_y} + \sum_{j=1}^J x_{j\beta_y} (1 - \pi_{jj}) \geq P_{\beta_y}^{max} + R_{\beta_y} \quad (2)$$

- 단, i : 전원유형 발전설비, j : 계통 내의 노드 수
- y : 계절 (spring, summer, autumn, winter)
- t_y : 근무일(1~24) 및 비근무일(25~48)의 각 시간대
- c_{ij} : i전원유형 설비의 운전비용(USD/kWh)
- K_{ij} : j 노드, i전원유형 설비의 건설비(USD/kW)
- τ_{t_y} : 해당 계절 내의 근무일 및 비근무일 수
- r_i : j 노드의 투자보수율 (%)
- b_{ij}, b_{ij} : i전원유형의 고정비용 및 선로의 고정비용 (%)
- η_j^{PSPP} : 양수 발전설비의 발전효율 (%)
- $P_{\beta_y}^{max}, R_{\beta_y}$: j노드의 t_y 시간대에서 최대부하수요 및 예비력

제약식 (2)는 설비예비력 제약을 의미하며, 제약식 (3)은 매시간 대별로 수급균형이 이루어져야 함을 의미한다. 제약식 (4), (5)는 전원유형별 신규 발전설비와 연계선로의 증설에 제한이 있음을 의미하는 제약식 이다. 제약식 (6)은 전원유형에 따른 발전출력 제약을 의미하며, 양수발전설비의 경우, 상이한 운전방식으로 인해 제약식 (7)이 추가된다. 제약식 (8)은 양방향 전력유통을 고려했을 경우, 유통전력은 송전용량보다 작아야 함을 의미한다. 제약식 (9)는 수력 발전설비에 부과되는 발전량 제약을 의미한다. 제약식 (10)과 (11)은 양수발전의 양수/방수 간 일일 균형 제약조건을 의미한다.

2.2 수정된 MEFISSET 모형

본 연구에서는 CO2 배출 총량제약만을 고려하므로 연계선로는 제외하며, CO2 배출제약식이 포함된다.

2.2.1 선형계획법을 이용하여 수정된 MEFISSET 모형

■ CO2 배출제약을 고려할 경우

$$Min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} c_{ij} \tau_{t_y} x_{i\beta_y} + \sum_{i=1}^J K_i (r + b) X_i \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} x_{ij} COE_j = EC \quad (13)$$

COE_j = 전원별 CO_2 배출계수, EC = 배출가능한 CO_2 량(tC)

■ CO_2 배출제약과 배출권거래제를 고려한 경우

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} c_i \tau_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^I K_i (r+b) X_i + EP \times ET \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} x_{ij} COE_j = EC + ET \quad (15)$$

ET : 배출권거래량(tC), EP : 배출권가격 (\$/MWh)

2.2.2 정수계획법을 이용하여 수정된 MEFISSET 모형

정수계획법 하에서는 신규설비의 단위가 용량이 정해져 있음을 가정한다. 신규설비와 관련된 제약식들이 수정되면 CO_2 배출제약식은 발전량에 관련된 제약식이므로 수정되지 않는다.

■ CO_2 배출 제약을 고려한 경우

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} c_i \tau_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J K_{ij} (r+b) ADD_{ij} \times PU_{ij} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} x_{ij} COE_j = EC \quad (17)$$

단, j : 전원별 단위가 용량의 수, K_{ij} : 전원별 단위가 용량별 건설비
 PU_{ij} : 전원별 단위가 용량, ADD_{ij} = 전원별/단위가 용량별 신규설비 대수

■ CO_2 배출제약과 배출권거래제를 고려한 경우

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} c_i \tau_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J K_{ij} (r+b) ADD_{ij} \times PU_{ij} + ET \times EP \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t_y=1}^{48} x_{ij} COE_j = EC + ET \quad (19)$$

2.3 사례연구

2.3.1 입력자료

단일모션 하에서 최대부하가 58800MW인 계통의 대하여 설비계획을 수행하였으며, 고려되는 시간은 일년이다. CO_2 배출량 제약은 계통 전체에 대해 10% 감축을 전제로 하였다. 배출권가격은 13 \$/tC 이다.

	겨울	봄	여름	가을
근무일수	64	63	60	62
비근무일수	28	28	30	28

【표1】 근무일수 및 비근무일수

	LNG	Oil	Coal	NPP(원자력)
MW	20000	4400	25000	20000

【표2】 전원별 최대 설비용량

	LNG	Oil	Coal	NPP(원자력)
MW	14700	2800	11800	10900

【표3】 전원별 기존 설비용량

	LNG	Oil	Coal	NPP(원자력)
tC/MWh	0.188	0.246	0.357	0.006

【표4】 전원별 배출계수

	LNG	Oil	Coal	NPP(원자력)
\$/MWh	408.33	366	100	67

【표5】 전원별 연료비

	LNG	Oil	Coal	NPP(원자력)
천\$/MW	3166.7	5,416.7	6,53.5	10,682.2

【표6】 전원별 건설비

	LNG		Oil		Coal		NPP(원자력)	
MW	450	733	0	500	500	800	1000	1400
천\$/MW	3468	3612	0	5358	7098	6090	1050	8718

【표7】 전원별 단위가 용량 및 건설비

2.3.2 결과

	선형계획법		정수계획법	
제약이 없을 경우	LNG	5250 (MW)	LNG	450(MW) 10 (대) 733(MW) 1 (대)
	Oil	1400 (MW)	Oil	500(MW) 2 (대)
	Coal	13200 (MW)	Coal	500(MW) 0 (대) 800(MW) 16 (대)
	NPP	7320 (MW)	NPP	1000(MW) 0 (대) 1400(MW) 6 (대)
	총비용	7.694 × 10 ¹⁰ (\$)	총비용	7.3 × 10 ¹⁰ (\$)
CO2 제약이 있는 경우	LNG	5250 (MW)	LNG	450(MW) 10 (대) 733(MW) 1 (대)
	Oil	1600 (MW)	Oil	500(MW) 3 (대)
	Coal	11420 (MW)	Coal	500(MW) 1 (대) 800(MW) 15 (대)
	NPP	9100 (MW)	NPP	1000(MW) 0 (대) 1400(MW) 6 (대)
	총비용	7.96385 × 10 ¹⁰ (\$)	총비용	8.44946 × 10 ¹⁰ (\$)
CO2제약과 배출권거래제가 있는 경우	LNG	5250 (MW)	LNG	450(MW) 10 (대) 733(MW) 1 (대)
	Oil	1320 (MW)	Oil	500(MW) 2 (대)
	Coal	13200 (MW)	Coal	500(MW) 0 (대) 800(MW) 16 (대)
	NPP	7600 (MW)	NPP	1000(MW) 0 (대) 1400(MW) 6 (대)
	총비용	7.70226 × 10 ¹⁰ (\$)	총비용	7.31 × 10 ¹⁰ (\$)

위 결과를 통해, 선형계획법과 정수계획법을 사용하여 설비계획을 한 경우의 전원구성은 유사함을 알 수 있다. 그러나 정수계획법을 이용한 경우, 실제의 설비건설에 적용할 수 있으며, CO_2 배출 감축의무를 이행 시 배출권을 이용하여 보다 비용효과적인 전원개발계획을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

CO_2 배출제약은 계통 전체에 비용증가를 가져온다. 그러나 정수계획법을 이용함으로써, 실제 설비계획에 적용할 수 있으며, 배출권거래제를 통해 비용효과적인 설비계획이 수행되었다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부에서 시행하는 BK21(2차)사업(과제명: 신 에너지원 개발 및 전력시스템 연계 기술 연구팀)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 김광인외 6인, "전력경제(전력설비 투자이론)" KPX, 2003
- [2] 산업자원부, "기후협약정보(한국어판)", 2000.10
- [3] 정구형, "동북아 전력계통 연계에 따른 경제성 분석" Trans. KIEE, vol.55A, No.2 FEB 2006, pp76-84
- [4] 정구형, "동북아 전력계통 연계로 인한 환경성 분석 및 국내 전원구성예의 영향 평가", 2005 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp769-771
- [5] 김양일, "CO2 배출제약 조건과 배출권 거래제를 고려한 OPF" 2006 대한전기학회 하계학술대회 논문집