

CO2 배출량 제약과 배출권거래제를 고려한 설비계획 방법론에 관한 연구

김양일, 이승현, 한석만, 정구형, 김발호
홍익대학교

A study on development of generation expansion planning considering CO2 emission constraints and Emission Trading

Yang-Il Kim, Seung-Hyun Lee, Seok-Man Han, Koo-Hyung Chung, Balho H. Kim
Hongik University

Abstract - WASP which is used to plan generation expansion has disadvantages that can't manage environmental factors and regional supply-demand planning. But with the effectuation of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and Kyoto Protocol, it is expected that reducing greenhouse gases affects power system in its long-term generation expansion planning. Therefore national countermeasures is needed.

This paper formulates a mathematical model considering CO2 emission constraints and Emission Trading that will be enforced. This model is based on the ORIRES which was made by ESI, Russia and manages generation expansion planning. And this mathematical model is verified by studying a case system.

1. 서 론

온실 가스의 배출증가로 기상변화가 발생하자 이를 방지하기 위해 유엔은 1992년과 1997년 각각 기후변화협약 및 교토의정서를 채택하였다. 특히 교토의정서는 참여국들의 실질적인 감축 이행을 위해 6가지의 온실가스를 1990년 대비 평균 5.2% 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 유엔 기후변화협약 당시 우리나라는 개발도상국으로 분류되어 현재 당장 감축의무는 없지만 CO2 배출량이 세계 9위이며 OECD 국가로써 서구 선진국에서 자발적인 감축에 대해 압력이 증가하고 있다.

만약 CO2를 비롯한 온실가스 감축 이행 시 전력분야에 미치는 영향을 매우 클 것으로 예상되며 특히 전원개발 계획 시 환경문제를 고려한 계획이 필요하다.

본 논문에서는 기존에 설비계획에 이용된 모형들을 살펴보고 설비계획 시 환경 문제를 고려하여 본 논문에서 제안한 전원개발 시 이를 반영할 수 있는 수리적 모형과 비교해 본 후 사례 연구를 통해 제안된 모형의 결과를 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 전원개발계획

자원개발계획이란 연구기간 동안의 예측된 미래 전력 수요를 적정신뢰도 범위 내에서 충족시키면서 주어진 목적함수를 최적화하는 발전소 형식, 건설시기, 용량, 대수 등을 결정하는 것이다. 이 때 목적함수는 연구기간 동안의 연도별 투자비 및 운전비의 현재가치를 포함한다.

2.1.1 WASP 모형

WASP 전산모형은 1974년 R. Taber Jenkins와 D. S. Joy에 의해 개발되었으며 주어진 경제적, 기술적, 제약조건 하에서 최적 전원개발계획을 도출하는 모형이다. 이 모형은 다음과 같은 역할을 하는 6가지 모형의 구성되어

있다.

<표 1> WASP 모형의 구성

| 모형 | 내용 |
|--------------------|-------------------------------------------------|
| 모하모형 모듈 | 대상기간 동안의 최대수요, 발전량 및 부하지속곡선(LDC)의 형태 정의 |
| 기존설비모형 모듈 | 기존 발전소 및 대상기간 동안 건설계획이 확정된 발전소에 관한 정보 입력 |
| 후보설비모형 모듈 | 설비계획의 후보 발전기에 대한 입력자료 형성 |
| 설비조합모형 모듈 | 대상기간 중 연도별 건설 가능한 발전소 조합 작성 후 운전비계산 모형의 입력으로 활용 |
| 운전비 및 신뢰도 평가 모형 모듈 | 연도별 각각의 후보조합에 대한 운전비 및 공급신뢰도 계산 |
| 최적화 프로그램 | 전력계통의 발전설비의 최적 건설계획 수립 |

2.1.3 WASP 모형의 특징

WASP 모형의 특징은 다음 표와 같다.

<표 2> WASP 모형의 특징

| 기능 | WASP |
|-------------|----------------|
| 신뢰도 평가 | LOLP |
| 부하처리 (LDC) | 5차 다항식의 연속 LDC |
| 최적화 기법 | DP |
| 발전소 취급 | 개별취급 |
| 해의 형태 | 정수의 발전기 대수 |
| 환경문제 분석 | 불가 |
| 재무 분석 | 불가 |
| 입지 분석 | 불가 |
| 인근계통 연계 | 불가 |
| 소기간 분석 최소단위 | 월 |
| 자동민감도 분석 | 불가 |

위의 표에 나와 있는 것처럼 WASP는 다양한 제약조건을 처리하는데 많은 문제점이 있다. 하지만 ORIRES는 다양한 제약조건 처리가 가능하며 민감도 분석 또한 가능하다.

2.2 ORIRES 모형

본 논문의 설비계획에 이용할 ORIRES 모형은 러시아의 ESI의해 개발되었으며 동북아 지역의 전력계통 연계 계획 수립과 관련된 연구에 많이 이용되었다. 가장 큰 특징은 특정 목표연도에서의 최적 설비수준을 도출하는 정적 선형계획모형으로 계통 내 모든 모선의 계절별 근무일 및 비근무일의 24시간에 대한 부하를 적용하며 부하수요를 충족시키기 위해 신규 발전설비를 증설할 뿐만 아니라 인접 지역의 잉여 용량을 이용할 수 있다. 따라서 시간대별 부하를 처리할 수 있으며 지역별 신규 설비 증설 도출이 가능하며 다른 모형에 비해 상대적으로 적은 입력자료를 이용하며 다양한 제약조건 처리가 가능하고 계산 결과에 대한 추가적인 검증작업을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 증설되는 신규설비를 연도별로 도출할 수 없는 단점이 있다.

그리고 ORIRES 모형의 입력자료와 출력은 다음과 같다.

<표. 3> ORIRES 모형의 입력과 출력

| 입력자료 | 출력 |
|-----------------|-----------------------------|
| 1. 노드별 전력수요 | 1. 최종 목표연도 총 발전량 및 송전용량 |
| 2. 계절별, 시간대별 부하 | 2. 최종 목표연도에 증설된 발전 및 송전설비용량 |
| 3. 노드별 주중/주말 일수 | |
| 4. 기존의 발전설비용량 | |
| 5. 최대 발전설비용량 | |
| 6. 고정비 | |
| 7. 운전비 | |
| 8. 계절별 설비특정 자료 | |
| 9. 연계선로 자료 | |

2.2.1 ORIRES 모형의 목적함수

ORIRES 모형의 목적함수는 특정 목표연도에서 연계 지역 전체의 발전설비 운전비용과 신규 발전설비의 투자비용 및 송전선로 투자비용의 총 합이며 식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t_y=1}^{48} c_{ij} \tau_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I K_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{j'=2 \\ j > j'}}^J K_{jj'} (r_j + b_{jj'}) X_{jj'} \quad (1)$$

- i : 발전설비의 전원유형
- j : 연계된 전력계통의 노드 수
- y : 계절
- f : 발전회사
- t_y : 해당 계절(y) 내 근무일 및 비근무일의 시간대
- r_j : j 노드의 투자 보수율
- b_{ij} : j 노드, i 전원유형 발전설비의 연간 고정비용
- τ_i : 해당 계절(y) 내 근무일수 및 비근무일수
- C_{ij} : j 노드, i 전원유형 설비의 운전비(\$/kWh)
- K_{ij} : j 노드, i 전원유형 설비의 건설비(\$/kW)
- $K_{jj'}$: j 노드와 j' 노드 간 송전선로의 건설비(\$/kW)
- $b_{jj'}$: j 노드와 j' 노드 간의 송전선로의 고정비용
- x_{ijt_y} : j 노드, i 전원유형 발전설비의 t_y 시간대의 운영 용량(kWh)

X_{ij} : 목표연도에서의 j 노드, i 전원 유형의 신규 증설 용량(kW)

$X_{jj'}$: j 노드와 j' 노드 간의 신규 증설용량(kW)

2.3 설비계획 모형

본 논문에서 제시한 설비계획 모형은 기본적으로 ORIRES 모형을 바탕으로 CO2 배출량 제약조건과 배출권 제약조건을 포함한다. 단, 배출권 제약조건은 배출권을 구입함으로써 구입한 양만큼의 CO2를 추가로 배출할 수 있으며 배출권을 구입하는 비용은 목적함수에 포함된다.

2.3.1 설비계획 모형의 목적함수

목적함수는 ORIRES 모형의 목적함수인 특정 목표연도에서 연계지역 전체의 발전설비 운전비용 및 신규발전설비의 투자비용과 송전선로 투자비용의 총 합에 배출권 거래비용이 포함되며 다음과 같이 정식화된다.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t_y=1}^{48} c_{ij} \tau_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I K_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{j'=2 \\ j > j'}}^J K_{jj'} (r_j + b_{jj'}) X_{jj'} + ET \times EC \quad (2)$$

단, ET 는 배출권 거래량이며 EC 는 배출권의 가격이다. 여기서 ET 는 배출권 거래 제약조건에 따라 시스템 전체 배출권 거래량인 ET_{system} 과 모선별 배출권 거래량인 ET_j , 전원별 배출권 거래량인 ET_i 로 구분할 수 있다.

2.3.2 설비계획 모형의 제약조건

ORIRES 모형의 제약조건 이외에 CO2 배출량 제약조건이 포함된다. 단, 배출권 거래를 통해 구입한 배출권만큼 CO2의 추가적인 배출이 가능하기 때문에 제약조건은 다음과 정식화된다.

$$\sum_i \sum_j \sum_y \sum_{t_y} x_{ijt_y} \times E_i \leq EP_{system} + ET_{system} \quad (3)$$

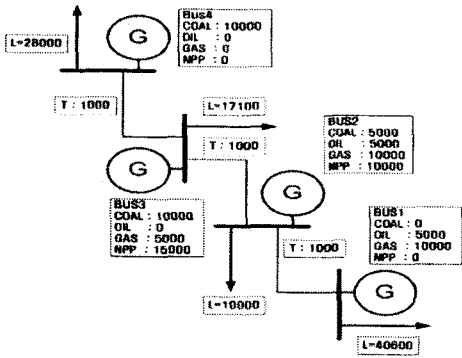
$$\sum_i \sum_y \sum_{t_y} x_{ijt_y} \times EF_i \leq EP_j + ET_j \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_y \sum_{t_y} x_{ijt_y} \times EF_i \leq EP_i + ET_i \quad (5)$$

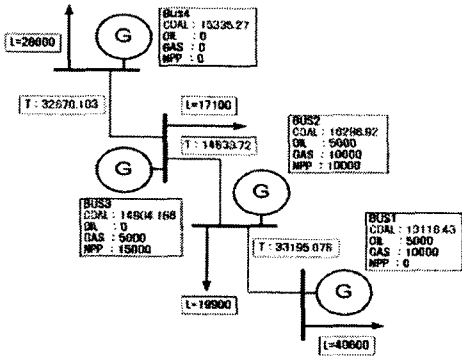
위의 각 제약 조건은 시스템 전체의 CO2 배출량 제약 및 배출권 거래제를 고려한 경우(3), 모선별 CO2 배출량 제약과 배출권 거래제를 고려한 경우(4), 전원별 CO2 배출량 제약과 배출권 거래제를 고려한 경우(5)를 나타낸다. 이는 각 국가 총량 규제 및 지역별 규제 등으로 확장할 수 있다.

2.4 사례 연구

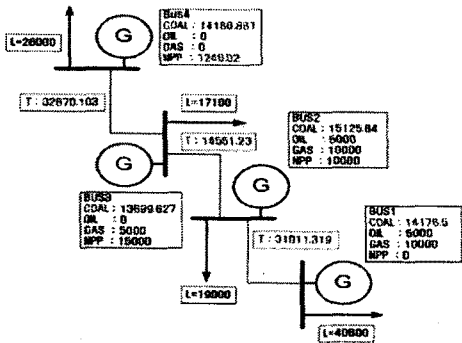
다음과 같은 사례 계통에 ORIRES 모형을 이용한 설비 계획 방법론을 적용하였다. 단, 수력과 양수발전은 본 사례 계통에서 제외하였으며 시스템 전체의 CO2 배출량 제약과 배출권 거래제를 적용하였다. L(MW)은 목표연도의 연중 최대 부하이며, G(MW)는 현재 보유한 발전설비용량, T(MW)는 현재 보유한 송전설비용량을 각각 나타낸다.



<그림.1 사례 계통>



<그림.2 ORIRES를 이용한 설비계획>



<그림.3 CO2 배출량 제약과 배출권 거래제를 고려한 설비계획>

여기서, 배출권 거래 가격은 \$10/tC로 가정하였으며 위 계통에서 거래된 배출권 총량은 7,900,679tC이다.

3. 결 론

향후 배출권 시장의 도입은 그 근본 취지에 맞게 온실가스 감축 의무 이행 시 유연성을 제공할 것으로 예상된다. 온실가스 감축 의무는 전원 구성에 큰 영향을 미치며 온실가스 배출이 적은 원자력 발전과 LNG 발전의 용량 확대를 가져온다. 하지만 원자력 발전의 경우 환경단체 및 발전소 지역 주민의 반발과 보상금 문제와 비싼 건설비 문제가 있으며 LNG 발전의 경우 SMP의 상승을 가져오게 한다. 따라서 배출권 거래를 통해 비교적 단가가 싼 석탄화력 발전의 용량을 어느 정도 유지할 수 있으며 이는 시스템 전체의 비용을 낮추게 하는 효과를 가져온다.

ORIRES 모형을 이용한 설비계획 방법론은 연도별 발전량을 산출할 수 없는 단점이 있지만 여러 가지 제약조건을 처리하기가 용이하고 향후 중장기 전력수급계획 작성 시 지역별 수급 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 산업자원부, “기후변화협약정보(한국어판)”, 2000.10
- [3] 한국남부발전(주) 발전처, “전력산업 구조개편에 따른 전력부문 기후변화협약 대응 방안 수립”, 2001.7
- [4] 임재규, “기후변화협약 제 3차 대한민국 국가보고서 작성을 위한 기반구축 연구(제1차년도)”, 에너지경제연구원, 2004, 12
- [5] 김양일, “신재생에너지원의 최적용량에 관한 연구”, 2005년 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, pp 186-188, 2005
- [6] 김발호, “최적조류계산의 이론과 응용”, 홍익대학교, 2001
- [7] Wood Wollenberg, “Power generation, operation, and control”, Wiley Interscience, 1996
- [8] 정구형, “동북아 전력계통 연계에 따른 경제성 분석”, 2006년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 766-768
- [9] 정구형, “동북아 전력계통 연계를 인하여 환경성 분석 및 국내 전원구성에의 영향 평가”, 2006년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p p 769-771
- [10] 산업자원부, “동북아 전력계통 연계를 위한 기반구축 연구(1)”, 2005.11

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자의 일부는 “2단계 BK21 사업”의 지원비를 받았다.