

환경 제약을 고려한 설비계획 방법론 개발

김양일, 정구형, 신혜경, 김발호
총익대학교

The development of expansion planning algorithm considering environmental constraints

Yang-il Kim, Koo-Hyung Chung, Hye-Kyeong Shin, Balho H. Kim
Hongik University

Abstract - Wien Automatic System Planning Package (WASP) which is used to draw out generation expansion planning applies Dynamic Programming in Korea power system planning. While this package has an advantage that computes annual capacity, it has a disadvantage that can't consider environmental constraints. With the effectuation of the Kyoto Protocol in February, 2005, it is expected that CO₂ emission has a severe effect on Korean power system. Therefore, as the most important issue, the generation expansion planning considering environmental constraints is rising in power system.

This paper develops a mathematic model including not only generation expansion planning but transmission planning and considering regional supply-demand and environmental constraints, especially CO₂ emission, and verifies propriety through the case study.

1. 서 론

온실 가스의 배출증가로 기상이변이 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 살펴보자 한다.

2. 본 론

2.1 ORIRES 모형

ORIRES 모형은 러시아의 ESI 의해 개발되었으며 동북아 지역의 전력계통 연계계획 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 적용하여 부하수요를 충족시키기 위해 신규 발전설비를 증설할 뿐만 아니라 인접 지역의 잉여 용량을 이용할 수 있다. 따라서 시간대별 부하를 처리할 수

있으며 지역별 신규 설비증설 도출이 가능하며 다른 모형에 비해 상대적으로 적은 입력자료를 이용하여 다양한 제약조건의 처리가 가능하고 계산 결과에 대한 추가적인 검증작업을 최소화 할 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	

2.1.1 ORIRES 모형의 목적함수

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

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{y=1}^{48} c_{ij} t_{iy} x_{ijy} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} K_{ij}(r_j + b_{ij}) X_{ij} \\ + \sum_{j=1}^J \sum_{j'=2}^J K_{jj'}(r_j + b_{jj'}) X_{jj'} \quad (1)$$

i : 발전설비의 전원유형

j : 연계된 전력계통의 노드 수

y : 계절

f : 발전회사

t_y : 해당 계절(y) 내 근무일 및 비근무일의 시간대

r_j : j노드의 투자 보수율

b_{ij} : j노드, i전원유형 발전설비의 연간 고정비율

t_i : 해당 계절(y) 내 근무일수 및 비근무일수

C_{ij} : j노드, i전원유형 설비의 운전비(\$/kWh)

K_{ij} : j노드, i전원유형 설비의 건설비(\$/kW)

K_{jj'} : j노드와 j'노드 간 송전선로의 건설비(\$/kW)

b_{jj'} : j노드와 j'노드 간의 송전선로의 고정비율

x_{ijt_y} : j 노드, i 전원 유형 발전 설비의 t_y 시간대의 운전 용량(kWh)
 X_{ij} : 목표연도에서의 j 노드, i 전원 유형의 신규 증설 용량(kW)
 $X_{jj'}$: j 노드와 j' 노드 간의 신규 증설 용량(kW)

2.1.2 ORIRES 모형의 제약조건

ORIRES 모형의 제약조건은 다음과 같다.

$$a_{1jy}^{quar} \cdot X_{1j} + \sum_{i=2}^I X_{ij} - \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^J x_{jj't_y} + \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^J x_{j'jt_y} (1 - \pi_{j'j}) \quad (2) \\ \geq P_{jty} + R_{jty}$$

$j = 1, \dots, J; t_y \in T_y^{\max}; y \in Y^{\max}$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt_y} - \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^J x_{jj't_y} + \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^J x_{j'jt_y} (1 - \pi_{j'j}) \quad (3) \\ \geq P_{jty} + x_{2jty}^{char}$$

$j = 1, \dots, J; t_y = 1, \dots, 48; y = 1, \dots, Y$

$$N_{ij}^0 \leq X_{ij} \leq N_{ij}^M, \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$\Pi_{jj'}^0 \leq X_{jj'} \leq \Pi_{jj'}^M, \quad j = 1, \dots, J; j' = 2, \dots, J; j' > j \quad (5)$$

$$a_{ijy}^m \cdot X_{ij} \leq x_{ijt_y} \leq a_{ijy} \cdot X_{ij}, \quad (6)$$

$j = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; t_y = 1, \dots, 48; y = 1, \dots, Y$

$$0 \leq x_{2jy}^{char} \leq a_{2jy} \cdot X_{2j}, \quad (7)$$

$j = 1, \dots, J; t_y = 1, \dots, 48; y = 1, \dots, Y$

$$-X_{jj'} \leq x_{jj't_y} \leq X_{jj'}, \quad (8)$$

$j = 1, \dots, J; j' = 1, \dots, J; j' \neq j; t_y = 1, \dots, 48$

$$\sum_{t_y=1}^{48} \tau_{t_y} x_{1jt_y} \leq h_{1jy} \cdot X_{1j}, \quad (9)$$

$j = 1, \dots, J; y = 1, \dots, Y$

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

$$\sum_{t_y=25}^{48} x_{2jt_y} - \eta_j^{PSPP} \cdot \sum_{t_y=25}^{48} x_{2jt_y}^{char} \leq 0, \quad (11)$$

$j = 1, \dots, J; y = 1, \dots, Y$

$$\sum_{t_y=1}^{24} x_{2jt_y} \leq h_{2j} \cdot X_{2j}, \quad (12)$$

$$\sum_{t_y=25}^{48} x_{2jt_y} \leq h_{2j} \cdot X_{2j}, \quad (13)$$

$j = 1, \dots, J; y = 1, \dots, Y$

T_y^{\max}	: 연간 최대부하의 발생 시점
Y^{\max}	: 최대 부하 발생 계절
P_{jty}	: j 노드의 t_y 시간대의 부하량
R_{jty}	: j 노드의 t_y 시간대의 예비력
$\pi_{jj'}$: j 와 j' 간 송전 손실
x_{ijt_y}	: t_y 시간대 j 노드의 i 전원의 발전량
X_{ij}	: 목표연도에서의 j 노드, i 전원의 발전 설비 용량
a_{1jy}^{quar}	: y 계절, j 노드의 이용 가능한 수력 발전 설비 용량 지수

x_{2jty}^{char}	: t_y 시간대 j 노드의 양수 발전의 설비 용량
$x_{jj't_y}$: 최대 부하 발생 시간대의 j 와 j' 간 유통 전력량
N_{ij}^0	: 기준연도의 j 노드에 건설된 i 전원 발전 설비 용량
N_{ij}^M	: 목표연도의 발전 설비 용량 상한
$\Pi_{jj'}^0$: 기준연도의 j 와 j' 간 건설된 연계선로 용량
$\Pi_{jj'}^M$: 목표연도의 연계선로 용량 상한
a_{ijy}^m	: y 계절, j 노드, i 전원의 발전 설비 이용 가능 계수
h_{1jy}	: y 계절, j 노드의 수력 발전 설비 용량의 최대 이용 가능 시간
x_{2jty}^{char}	: t_y 시간대 j 노드의 양수 발전의 설비 용량
n_j^{PSPP}	: j 노드에 위치한 양수 발전 설비의 발전 효율
h_{2j}	: j 노드 양수 발전 설비의 최대 이용 가능 시간

(2)식은 안정적인 계통 운영을 수행하기 위해서는 연중 최대 부하가 발생하는 시점에서의 총 공급 용량이 예비력을 포함한 최대 부하 수요량보다 커야 한다는 제약 조건을 정식화한 것으로, 각 노드 별로 수력 발전 설비 용량에 화력 발전 설비 용량을 합한 다음 최대 부하 시 다른 노드로 송출되는 유통 전력량을 차감하고 다른 노드로부터 유입되는 송전 손실이 감안된 유통 전력량을 합한 총 공급 전력량이 최대 부하 수요에 필요 예비력을 합한 값보다 커야 한다는 것을 의미한다. 이는 각 노드 별로 설정된다.

전력 계통은 매 순간 수급 균형이 이루어져야 하는 특성을 갖는다. 식 (3)은 이러한 수급 균형 제약 조건을 나타내는 것으로서, 각 노드 별, 계절 별, 시간 대별 발전량에 해당 노드에서 다른 노드로 송출되는 유통 전력량을 차감하고, 다른 노드에서 유입되는 유통 전력량을 합한 값이 해당 노드의 계절 별 시간 대별 부하에 양수 발전을 위해 필요한 설비 용량을 합한 값과 같거나 커야 한다는 것을 의미하며 각 노드 별, 계절 별, 시간 대별로 주어진다.

식 (4), (5)는 해당 노드의 특성을 감안하여 전원 유형 별 신규 발전 설비와 연계 선로의 증설에 제한을 가하는 제약 조건을 의미한다.

또한, ORIRES 모형에서는 식 (6)과 같이 각 노드 별 전원 유형에 따른 발전 출력은 설비의 유지 보수 등 다양한 요인을 감안하여 계절 별로 제한을 가할 수 있도록 하고 있다. 여기서 a_{ijy}^m 은 y 계절, j 노드, i 전원 유형 발전 설비의 이용 가능한 최대 운전 용량이 설비 용량에서 차지하는 비율을 나타낸다.

양수 발전 설비의 경우, 다른 유형의 전원과의 운전 방식 상 차이를 감안하여 식 (7)과 같은 별도의 제약 조건이 추가적으로 부과된다.

매 시간 별 노드 간 유통 전력량은 건설된 연계 선로 용량보다 작아야 하지만 양방향의 전력 용통을 고려하여 다음 식(8)과 같은 제약 조건이 주어진다.

수력 발전 설비에 대해서는 다른 유형의 전원과는 달리 실제 발전량에 제약을 부과한다. 즉, 연간 총 발전량이 건설된 수력 발전 설비 용량에 대한 최대 공급 가능 발전량을 초과하지 않도록 식(9)과 같은 제약을 가하는 것이다.

양수 발전의 경우에는 양수(charge)/방수(discharge) 간 일일 균형 제약 조건인 식(10)과 식(11)이 설정된다.

n_j^{PSPP} 는 양수-방수 과정에서 발생하는 에너지 손실을 의미하는 것으로 j 노드에 위치한 양수 발전 설비의 발전

효율을 나타낸다.

양수 발전설비에 대해서는 이용 가능한 저수량에 대해서도 제약을 가할 수 있다. 이는 식(12), (13)으로 나타낼 수 있다. h_{2j} 는 양수 발전설비의 저수량을 정의하는 것으로, j 노드 양수 발전설비의 최대 이용가능 시간을 나타낸다.

2.2 ORIRES 모형을 이용한 설비계획 정식화

ORIRES 모형을 이용한 설비계획의 목적함수는 원래 ORIRES 모형의 목적함수와 동일하다. 하지만 제약조건에 환경 제약조건이 추가되어 이는 각 전원의 CO₂ 배출 계수를 고려하여 정식화된다.

이 때 CO₂ 배출량 제약은 시스템 전체에 대한 제약과 모선별 제약으로 주어지며 이는 각 국가 전체에 대한 배출 제약과 지역별 제약으로 확대할 수 있으며 정식화는 다음과 같다.

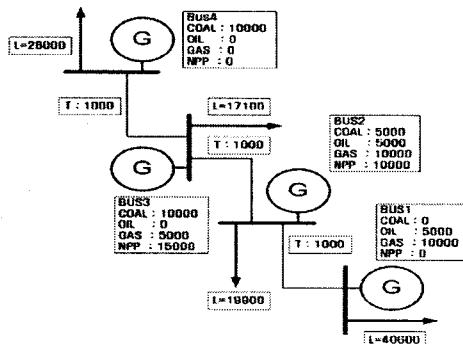
$$\sum_i \sum_j \sum_y \sum_{t_y} x_{ijt_y} \times EF_i \leq EP_{system} \quad (14)$$

$$\sum_i \sum_y \sum_{t_y} x_{ijt_y} \times EF_i \leq EP_j \quad (15)$$

여기서, EF_i 는 전원별 CO₂ 배출 계수이며 EP_{system} , EP_j 는 각각 시스템 전체와 각 모선에서 배출 가능한 CO₂ 용량이다.

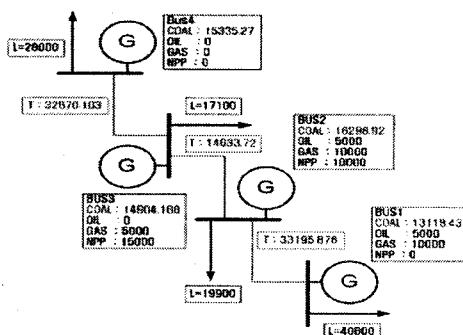
2.3 사례 연구

위에서 정식화한 수리적 모형을 다음과 같은 사례 계통에 적용해 보았다.

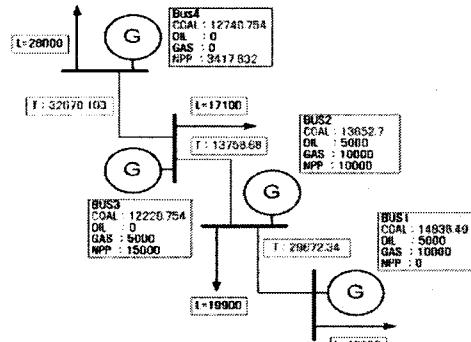


<그림 1. 사례 계통>

여기서, L은 목표 연도의 연중 최대 부하이며, G는 현재 발전설비용량이고, T는 현재 송전설비용량으로 단위는 MW이다. 다음 결과는 CO₂ 배출량 제약이 시스템 전체 배출에 대한 제약이 주어졌을 경우이며, 수력발전과 양수발전은 제외하였다.



<그림 2. ORIRES 모형을 이용한 설비계획>



<그림 3. CO₂ 배출량 제약을 고려한 설비계획>

3. 결 론

사례 연구를 통해 살펴보면 환경 제약은 전원개발계획 시 전원 구성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그리고 변화된 전원구성의 변화는 송전설비계획에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

ORIRES 모형을 이용한 설비계획 알고리즘은 지역성을 반영할 수 있는 장점을 갖기 때문에 각 지역별 수급계획 작성 및 송전설비계획에도 이용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 연도별 발전용량 산출이 불가능하기 때문에 이를 고려할 수 있는 설비계획 알고리즘 개발이 필요하다.

[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 기후변화협약대응 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 전력기술부문회 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 연계로 인하나 환경성 분석 및 국내 전원구성에의 영향 평가”, 2006년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 769-771
- [10] 산업자원부, “동북아 전력계통 연계를 위한 기반구축 연구(1)”, 2005.11

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 “2단계 BK21 사업”의 지원비를 받았음.