

배출권거래와 공급신뢰도(LOLP)를 고려한 설비계획 방법론에 관한 연구

신혜경, 정구형, 홍희정, 한석만, 강동주\*, 김발호  
홍익대학교, , 전기연구원\*

Study on The Generation Expansion Planning Considering Emission Trading and LOLP

Shin Hye-Kyeong, Chung Gu-Hyung, Hong Hee-Jung, Han Seoc-Man, Kang Dong-Ju\*, Kim Bal-Ho  
Hong-ik University, Korea Electrotechnology Research Institute\*

**Abstract** - Post 2012 기후변화협약 체제의 도래 및 강화되는 기후변화협약으로 인해 우리나라의 온실가스의 무감축이 확실하게 예견되고 있는 현 시점에서 우리나라의 온실가스 감축이행을 위한 대응책의 필요성이 증가하고 있다. 특히 발전부문은 우리나라의 온실가스 배출의 약 30%를 차지하고 있으며, 경제성장에 따라 온실가스 배출량이 빠른 속도로 증가하고 있으므로 Post 2012 기후변화협약 체제의 대응책이 보다 필요하다. 본 연구에서는 향후 발전부문에 온실가스 감축의무가 부담될 것을 고려하여 온실가스 배출량 제약 및 배출권거래제를 고려한 설비계획을 도출하고자 한다. 현재 우리나라의 전원개발계획에서 사용되고 있는 전산모형(WASP, POWERSYM 등)은 온실가스 배출량 제약 및 배출권거래제를 고려하지 못하므로 MEFISSET 모형을 이용하여 이를 고려하고자 한다. 그러나 MEFISSET 모형은 설비예비력 제약조건을 통해 공급신뢰도를 만족하고 있다. 이러한 설비계획 결과는 공급신뢰도 기준을 만족시키기 위해 과도한 설비계획 결과를 도출한다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 Visual C++를 통해 구현한 LOLP 프로그램을 통해 공급신뢰도 기준을 만족시키기 위한 적정 설비예비력을 추정하고자 한다.

1. 서 론

Post 2012 기후변화협약 체제의 도래에 따라 우리나라의 온실가스 의무감축 이행이 확실하게 예견되고 있는 현 시점에서 우리나라의 온실가스 배출의 약 30% 이상을 차지하고 있는 발전부문의 대응책의 필요성이 증가하고 있다. 즉 향후, 온실가스 감축이행을 고려한 전원개발계획의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 우리나라의 전원개발계획에서 사용되는 전산모형(WASP, POWERSYM 등)은 온실가스 감축과 이를 이행하기 위해 효과적인 수단인 배출권거래제를 고려하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 러시아 ESI에서 제시한 ORIRES 수리모형을 활용하여 에너지경제연구원과 홍익대학교에 의해 프로그램으로 구현된 MEFISSET 모형을 이용하여 온실가스 배출 제약 및 배출권거래제를 고려한 설비계획 결과를 도출한다. 그러나 정적 선형계획법으로 구현된 MEFISSET 모형은 설비예비력을 이용하여 공급신뢰도를 유지하므로 과도한 설비계획 결과가 도출된다. 이와 같은 과도한 설비계획 결과는 예측된 미래의 전력수요에 대하여 소정의 공급신뢰도를 가장 경제적인 공급력 확보라는 전원개발계획의 목적에 위배되므로 본 연구에서는 Visual C++로 구현한 공급신뢰도(LOLP)프로그램을 통해 적정 설비예비력을 유도한다.

2. 본 론

2.1 MEFISSET 모형을 이용한 설비계획

MEFISSET 모형은 특정 목표연도에서의 최적 설비수분을 도출하는 정적 선형계획 모형으로서 계절 및 시간대별 부하를 이용한다. 또한 MEFISSET 모형은 시간대별 부하 처리 및 다양한 제약조건 처리가 가능하고 입력자료 작성이 상대적으로 간편하다는 장점을 갖는다. 그러나 정적 선형계획 모형으로서 전원개발계획의 연구대상 기간 동안의 연도별 설비계획 도출 및 설비예비율을 활용하여 공급신뢰도를 만족시키므로 공급신뢰도 기준을 이행하기 위한 최적 설비계획 결과를 도출하기 어렵다는 단점을 갖는다.

2.1.1 MEFISSET 모형의 목적함수

특정목표 연도에서의 발전설비 운전비용과 신규 발전설비 투자비용의 합을 최소화시키는 최적 설비계획을 도출하는 MEFISSET 모형의 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t_y=1}^{48} C_i \tau_{i,t_y} x_{i,t_y} + \sum_{i=1}^I K_i (r + b_i) \text{ADD}_i \text{PU}_i$$

단,  $i$ 는 발전설비의 전원유형을 나타내며,  $y$ 는 계절을 나타내며 나타내는 지수이며,  $t_y$ 는 해당 계절 내 근무일(1~24) 및 비근무일(25~48)의 각 시간대를 나타낸다.  $\tau_{i,t_y}$ 는 해당 계절 내 근무일수와 비근무일수를 나타낸다.  $c_i$ 는  $i$ 전원유형 설비의 운전(평균 연료)비용(원/kWh)을 나타낸다.  $K_i$ 는  $i$ 전원유형 설비 증설 시 소요되는 단위용량 당 투자비(원/kW),  $\text{PU}_i$ 는  $i$ 전원유형 설비의 단위용량(kW),  $r$ 은 투자보수율(rate of return),  $b_i$ 는  $i$ 전원유형 발전설비의 연간 고정비용을 의미한다. 또한  $x_{i,t_y}$ ,  $\text{ADD}_i$ 는 결정변수로서 각각  $i$ 전원유형 발전설비의  $t_y$  시간대 운전용량(kWh) 및 목표연도에서의  $i$ 전원유형 발전설비의 신규 증설용량(kW)을 의미한다.

2.1.2 MEFISSET 모형의 제약조건

안정적인 계통운행을 수행하기 위해서는 연중 최대부하가 발생하는 시점에서의 총 공급용량이 예비력을 포함한 최대 부하수요량보다 커야한다. 다음은 이러한 제약조건을 정식화한 것으로 총 발전설비용량의 합이 최대 부하수요에 필요예비력을 합한 값보다 커야함을 의미한다. 여기서 Peak는 최대 부하수요를 의미하고 RES는 계통의 필요예비력을 의미한다.

$$\sum_{i=1}^I \text{ADD}_i \text{PU}_i \geq \text{Peak} + \text{RES}$$

전력계통은 매 순간 수급균형이 이루어져야 하는 특성을 갖는다. 다음 식은 수급균형 제약조건을 나타내는 것

으로서 계절별 시간대별 부하에 양수발전을 위해 필요한 설비용량을 합한 값과 같거나 커야한다. 이러한 제약조건은 다음과 같이 정식화 되고, 여기서  $P_{i_t}$ 는 계절별 시간대별 부하 수요를 의미하고,  $x_{2i_t}^{char}$ 는  $t_y$  시간대에서 양수발전을 위해 필요한 설비용량을 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^I x_{i_t} \geq P_{i_t} + x_{2i_t}^{char}$$

MEFISSET 모형에서는 전원유형에 따른 발전량은 설비의 유지·보수 등 다양한 요인을 감안하여 계절별로 제한을 가할 수 있도록 하고 있다. 여기서  $a_{iy}^m$ 는  $y$  계절,  $i$ 전원유형 발전설비의 이용 가능한 최대 운전용량이 설비용량에서 차지하는 비율을 나타낸다.  $X_i$ 는  $i$ 전원유형의 총 설비용량을 의미한다.

$$a_{iy}^m X_i \leq x_{i_t} \leq a_i X_i$$

반면에 양수발전설비의 경우 다른 발전설비 유형과의 운전방식 상 차이를 감안하여 다음과 같은 별도의 제약조건이 추가적으로 부과된다.

$$0 \leq x_{2i_t}^{char} \leq a_{2y} X_2$$

뿐만 아니라 양수발전설비는 양수-방수과정에서 에너지 손실이 발생한다. 이러한 양수발전설비의 운전상의 특징은 다음과 같은 제약조건으로 정식화 된다. 단,  $\eta^{PSP}$ 는 양수발전설비의 발전효율을 의미한다.

$$\sum_{i_t=1}^{21} x_{2i_t} - \eta^{PSP} \sum_{i_t=1}^{21} x_{2i_t}^{char} \leq 0, \quad \sum_{i_t=25}^{48} x_{2i_t} - \eta^{PSP} \sum_{i_t=25}^{48} x_{2i_t}^{char} \leq 0$$

수력발전설비에 대해서는 다른 발전설비 유형과 달리 실제 발전량에 제약을 부과한다. 즉, 연간 총 발전량이 선선된 수력발전설비용량에 대한 최대 공급가능 발전량을 초과하지 않도록 제약을 가하는 것이다. 여기서  $h_{iy}$ 는  $y$  계절의 수력발전설비용량의 최대 이용가능 시간을 나타낸다.

$$\sum_{i_t=1}^{21} \tau_{i_t} x_{1i_t} \leq h_{1y} X_1, \quad \sum_{i_t=25}^{48} \tau_{i_t} x_{1i_t} \leq h_{1y} X_1$$

환경규제를 반영할 수 있는 온실가스 배출량 제약조건만 존재할 경우 다음과 같은 제약조건이 부과된다. 여기서  $EF_i$ 는  $i$ 전원발전유형의 탄소배출계수(ton/MWh)이며,  $PER$ 는 허용된 온실가스 배출량이다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{i_t=1}^{48} x_{i_t} \tau_{i_t} EF_i \leq PER$$

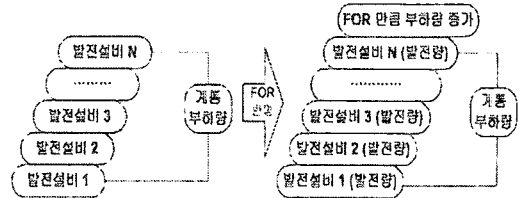
이러한 온실가스 배출량 제약조건은 배출권거래 하에서 다음과 같은 제약조건으로 변화되며, 목적함수에는 배출권 구입비용이 추가된다. 배출권거래 하에서 환경규제를 의미하는 제약조건과 목적함수는 각각 다음과 같다. 여기서  $ET$ 는 배출권 구입량(ton),  $EP$ 는 배출권 가격(원/ton)을 의미한다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{i_t=1}^{48} x_{i_t} \tau_{i_t} EF_i \leq PER + ET$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{i_t=1}^{48} C_i \tau_{i_t} x_{i_t} + \sum_{i=1}^I K_i (r + b_i) \text{ADD}_i \text{PU}_i + ET \times EP$$

## 2.2 적정 설비에비력 추정을 위한 공급신뢰도(LOLP, P) 도출

공급신뢰도란 미래의 증가하는 전력수요에 대해 안정적으로 전력을 공급하는 것을 의미한다. 즉 적절한 전압과 주파수의 전력을 계속 공급할 수 있는 정도를 의미한다. 공급신뢰도를 측정할 때 전력의 양적 공급에 있어서 확실성과 질적 공급의 확실성을 대상으로 한다. 이와 같이 다양한 의미의 공급신뢰도가 존재하지만 본 연구에선 LOLP (Load of Loss Probability)를 분석함으로써 계통의 공급신뢰도를 분석하고자 한다. LOLP란 전력공급을 하기 위한 발전설비를 부하곡선 상에 가상적으로 투입함으로써 계산되며 이러한 방법을 확률적 시뮬레이션이라 한다. 확률적 시뮬레이션에 의해 계통신뢰도(LOLP)를 도출하기 위해, 발전설비의 확률적 사고(FOR, Forced Outage Rate)를 반영한다. 즉 발전설비의 확률적 고장정지율을 고려하여 등가부하지속곡선을 작성하여 계통신뢰도를 산정하는 방법을 의미한다. 기본 개념도는 다음과 같다.



여기서 등가부하지속곡선(ELDC)이란, 임의의 발전설비의 고장으로 인하여 그 발전량만큼을 제외하는 대신, 그 양만큼 부하가 늘어난 것으로 가정하여, 발전설비의 고장정지가 없을 때와 동등한 상황을 만들기 위해, 고장정지율 만큼 등가적으로 부하를 증가시킨 부하곡선을 의미한다. 예를 들어  $L_0$ 의 부하를 갖는 계통과, 용량이  $G_i$ , 고장정지율이  $P_i$ 인 발전설비가 존재할 경우,  $G_i$ 가 고장정지 시 부하는  $L_0 + G_i * P_i$ 가 되고, 정상운전 시 계통의 부하는  $L_0$ 이 된다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$ELDC(x) = (1 - P_i)L_0(x) + P_iL_0(x - G_i)$$

부하지속곡선을 Visual C를 이용하여 구현하기 위해 5차식의 부하지속곡선을 가정하였다. 현재의 전원개발계획 전산모형에서 사용하는 부하지속곡선은 4분기별 5차식의 부하지속곡선으로 표현되지만 본 연구에서는 계산상의 편의를 위해 특정 연도의 시간대별 발전량 실적치를 바탕으로 최소자승법을 사용하여 부하지속곡선의 계수를 도출하였다. 최소자승법을 통해 도출된 부하지속곡선에 고장정지율을 갖는 발전설비의 투입을 고려하여 등가부하지속곡선을 도출하였다.

## 2.3 사례연구

### 2.3.1 주요 입력자료

입력자료는 크게 두 가지로서 부하특성자료와 발전설비특성자료로 나눌 수 있다. 부하특성자료에는 목표연도의 계절별 시간대별 부하량이 포함되며, 미래예측 자료인 목표연도의 계절별 시간대별 부하량을 도출하기 위해 목표연도의 부하패턴은 특정연도(2006년)의 시간대별 부하패턴과 동일함을 가정하였다. 뿐만 아니라 1년을 4계절로 구분하고 각 계절의 주중과 주말 대표일의 시간대

별 부하를 MEFISSET 모형 및 LOLP 도출 프로그램의 입력자료로써 사용하였다. 발전설비특성자료에는 전일 유형별 기존 발전설비용량, 단위용량당 투자비, 고정비용, 운전(평균연료)비, 가동률 및 고장정지율 등이 포함된다. 양수발전설비의 경우, 효율 및 일일 최대 이용가능 시간 등이 발전설비 자료로 활용된다. 수력발전설비의 경우 계절별 최대 운전시간이 포함된다. 사례연구계통의 공급신뢰도 기준은 LOLP = 1(일/년)이다.

### 2.3.2 사례연구 결과

#### 1) MEFISSET 모형을 이용한 설비계획 결과

##### 가. 온실가스 배출량 제약 및 배출권거래제가 없는 경우 설비계획 결과

(단위 : MW)

	현 설비용량	신규증설용량	총 설비용량
수력	1,500	0	1,500
LNG	15,500	5,000	20,500
OIL	4,500	0	4,500
COAL	18,500	14,000	32,500
NUKE	18,000	0	18,000
양수	3,900	600	4,500

총 비용은 1.01169E+13이며, 설비예비율이 25%이고, 이과 같은 경우 공급신뢰도는 0.24(일/년)이다.

##### 나. 온실가스 배출량 제약만 존재할 경우 설비계획 결과

온실가스 배출량 제약은 온실가스 배출량 제약 및 배출권거래제가 없을 경우의 설비계획 결과로부터 도출된 온실가스 배출량의 20%감축을 가정한다.

(단위 : MW)

	현 설비용량	신규증설용량	총 설비용량
수력	1,500	0	1,500
LNG	15,500	4,500	20,000
OIL	4,500	0	4,500
COAL	18,500	7,500	26,000
NUKE	18,000	7,000	25,000
양수	3,900	600	4,500

총 비용은 1.02635E+13이며, 온실가스 감축이행을 위해 보다 많은 비용이 소요됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라 설비예비율 25%를 보장하는 사례연구계통의 공급신뢰도는 0.28(일/년)으로써 공급신뢰도 기준보다 상당히 낮은 수치이다.

##### 다. 온실가스 배출량 제약과 배출권거래가 존재할 경우 설비계획 결과

(단위 : MW)

	현 설비용량	신규증설용량	총 설비용량
수력	1,500	0	1,500
LNG	15,500	5,000	20,500
OIL	4,500	0	4,500
COAL	18,500	14,000	32,500
NUKE	18,000	0	18,000
양수	3,900	600	4,500

여기서 배출권가격은 10000(원/ton)이며, 총비용은 1.02451E+13이다. 온실가스 배출량 제약만 존재할 경우보다 적은 비용으로 온실가스 배출제약을 이행하는 것을 알 수 있다. 이 경우, 공급신뢰도는 0.24(일/년)으로

써 공급신뢰도 기준보다 매우 작은 수치이다. 즉 사례계통의 공급신뢰도를 만족하기 위해 과도한 설비가 증설되었음을 알 수 있다. 따라서 배출권 거래제도 하에서 적정 공급신뢰도를 도출하기 위해 설비예비율을 조정한다. 현재 설비예비율은 25%였으나 22%, 19%, 16%, 13%, 12% 일 경우의 공급신뢰도를 도출해 보면 다음과 같다.

설비예비율 (%)	22	19	16	13	12
공급신뢰도 (일/년)	0.47	0.651	0.729	0.891	0.947

이러한 결과를 통해 사례계통의 적정 설비예비율은 12%임을 알 수 있었다. 설비예비율 감소에 따라 LNG 발전설비의 증설이 감소한 후, 석탄발전설비의 증설이 감소되었다. 이는 비록 LNG 발전설비가 건설비가 저렴할 지라도 비싼 연료비로 인해 비용절감의 효과가 적지만 석탄발전설비의 경우 건설비는 LNG발전설비보다 비싸지만 연료비가 저렴하여 총 비용에 있어서 비용절감 효과가 뛰어나기 때문이다.

### 3. 결 론

현재 우리나라의 전원개발계획에서 사용되는 전산모형들은 배출권 거래를 고려하지 못한다는 단점을 지니고 있다. 따라서 우리나라의 온실가스 감축이행을 위해 배출권거래 도입 시, 전원개발계획을 도출하기 위해 한국 에너지경제연구원과 홍익대학교에서 프로그램으로 구현된 MEFISSET 모형을 활용하였다. MEFISSET 모형은 정적 선형계획모형으로서 공급신뢰도 기준을 만족시키기 위해 설비예비율을 적용한다. 그러나 설비예비율을 통한 전원개발계획을 도출할 경우, 과도한 설비증설이 발생할 수 있어 이를 보완하기 위해 Visual C를 활용하여 공급신뢰도(LOLP)도출을 위한 프로그램을 구현하였다. 구현된 공급신뢰도 프로그램을 활용하여 사례계통의 적정 설비예비율을 도출하였다. 그러나 본 연구는 공급신뢰도(LOLP)와 배출권거래제를 동시에 고려하지 못한다는 단점을 갖고 있다. 따라서 향후, 배출권거래와 공급신뢰도를 동시에 고려할 수 있는 방법이 모색되어야 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김광인의 6인, "전력경제(전력설비 투자이론)", KPX, 2003
- [2] 산업자원부, "기후변화협약정보(한국어판)", 2000.10
- [3] 한국전기연구원, "동북아 전력계통 연계를 위한 기반구축 연구(1)", 산업자원부, 2005.11
- [4] 김영창, "환경문제를 고려한 다목적 전원개발계획에 관한 연구", 한국과학기술원 경영학과, 1993
- [5] 한국남부발전(주) 발전처, "전력산업 구조개편에 따른 전력 부문 기후변화협약대응 방안 수립", 2001.7
- [6] 김발호, "배출권거래제가 전력시장에 미치는 영향과 발전회사 활용전략 연구", 에너지관리공단, 2003
- [7] 정구형, "동북아 전력계통 연계로 인한 환경성 분석 및 국내 전원구성의 영향 평가", 2005 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.769-771
- [8] 정구형, "동북아 전력계통 연계를 통한 유통전력 도입 시 가격상승 수준에 대한 분석", 2005 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.772-774