

# 다기준 의사결정 모형을 이용한 전력수급계획 모형에 관한 연구

논 문

58-3-6

## A Study on the Power Expansion Planning Model using Multi-criteria Decision Making Rule

한 석 만\* · 김 발 호†  
(Seok-Man Han · Balho H. Kim)

**Abstract** - The power expansion planning is large and capital intensive capacity planning. In the past, the expansion planning was established with the proper supply reliability in order to minimize social cost. However, the planning can't use cost minimizing objective function in the power markets with many market participants. This paper proposed the power expansion planning model using multi-criteria decision rule. This model used multi objective function considering not only cost minimizing but also GENCO's intension. This paper compared proposed model with WASP model in order to verify the result of proposed model.

**Key Words** : Power expansion planning, Multi-criteria decision making, Optimization, Power markets, WASP

### 1. 서 론

전력수급계획은 미래의 전력수요 성장에 대처하기 위한 발전소 건설을 계획하는 것으로서, 막대한 투자비가 소요되고 건설기간도 장기간이며 또한 이러한 발전설비가 건설되면 보통 20년 이상이라는 장기간에 걸쳐 운전된다. 또한, 전력을 공급하는 발전설비는 건설비, 건설기간, 운전비, 운전특성, 운전기간, 설비용량 등 매우 다양한 특성을 가지고 있기 때문에 이들을 적절히 선정하여 건설할 것인가에 대한 결정은 매우 어렵고도 복잡한 문제이다[1].

우리나라의 현행 전력수급계획에서는 비용최소화 목적함수를 사용하고, 공급신뢰도 제약조건을 이용하는 WASP(Wien Automatic System Planning) 전산모형을 사용하고 있다. WASP 모형은 주어진 경제적, 기술적 제약조건 아래에서 최적 전력수급계획을 도출하는 모형이며, 최적화 부분에서는 R. Bellman의 동적계획법을 이용하고, 운전비 계산에서는 푸리에 급수를 적용한 Baleriaux의 확률적 시뮬레이션 방식을 이용한다[2,3].

현재 전력산업은 대내외적으로 다양한 변화에 직면하고 있다. 먼저 시장체제의 도입으로 다양한 시장참여자가 등장하였으며, 기후변화협약과 관련된 환경문제가 대두되고 있다. 이러한 환경의 변화에 따라 제도적, 기술적으로 설비계획 수립체제에 대한 변화가 요구되고 있다. 따라서 미래의 전력수급계획은 정책과 시장기능이 적절히 조화되고, 시장참

여자의 참여가 확대되어야 하며 다양한 환경요소를 반영함으로써 시장참여자에게 정확한 정보를 제공해야 할 것이다.

본 논문에서는 미래 전력수급계획에 사용가능한 수급계획용 전산모형을 개발하였다. 개발한 전산모형은 정책 및 시장기능을 반영할 수 있도록 다기준 목적함수를 사용하였으며, 환경문제를 제약조건으로 처리할 수 있도록 설계하였다.

### 2. 다기준 의사결정 이론

다기준 의사결정은 상충되는 복수의 기준이 존재하는 상황에서 최적대안을 선택하는 의사결정이다. 예를 들면, 비용과 생산시간, 성장과 분배와 같은 요소들이 그 예이다. 만약 다기준 모두를 동시에 만족시키는 해가 이상적인 해라면, 우리는 그 해를 도출할 수 없다. 요소들이 서로 상충하기 때문이다. 따라서, 이상적인 해에 가까워지도록 하기 위해서는 기준들 사이의 타협이 필요하다. 또한, 각 기준들로 측정된 서로 다른 단위가 존재하는 복합적 척도 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 Zeleny[4]는 대안과 이상향 사이의 근접정도(거리척도)를 측정하여 가장 근접한 대안을 선택하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 거리척도를 상대편차로 정의하여 복합적 척도 문제를 해결하였다.

또한, Mitten[5]은 동적계획법의 목적함수가 실가치함수(real valued return function)가 아니더라도 세가지 조건을 만족시킨다면 동적계획법의 틀 안에서 문제를 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 선호도관계를 이용하기 때문에, 다양한 목적함수를 가진 다단계 의사결정 문제에 적용이 가능하다.

† 교신저자, 정회원 : 홍익대 전기정보제어공학과 부교수·공박  
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr

\* 정 회원 : 홍익대학 전기정보제어공학과 박사과정  
접수일자 : 2008년 12월 1일  
최종완료 : 2009년 2월 14일

### 2.1 타협안과 거리척도

이루어야 할 목표가 여러 가지인 경우, 타협이라는 것은 개인의 의사결정에 있어서 중요한 도구이다. 일반적으로 생산품목의 조합을 결정하는데 있어서 비용과 생산시간을 선택할 경우에 두 가지는 경합하는 요소라고 볼 수 있다. 생산시간을 줄이려면 비용이 많아질 경우에만 가능하다. 여기서 각각의 대안은 시간과 비용으로 설명된다. 대표적으로 각각의 대안은 수치로 표현된 벡터로 나타난다. 의사결정이라는 것은 이러한 벡터로부터 자동적으로 되는 것이 아니라, 타협(compromise)이라는 형태에 의해서만 가능하다. 타협은 이상적인 해결책에 가능한 한 가까이 접근하거나 경합하기 위한 노력이라고 정의한다.

이상적인 지점인 어느 한 지점  $x^*$ 에서 다양한 지점  $x^k$ 까지의 거리를 측정하는 일반화된 수식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d_k = \left( \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i^k)^p \right)^{1/p} \quad (1)$$

여기서,

- $d_k$  : k번째 대안과 이상점 사이의 거리
- $x_i$  : 대안의 i번째 속성

$p$ 는 1에서  $\infty$  사이의 값을 갖는다.  $p$ 가 커지면 커질수록, 전체를 구성하는 편차 가운데 가장 큰 것에 주어지는 중요도가 커진다. 보통  $p=2$ 의 값을 선정한다(일반적으로 두 점을 연결하는 직선의 거리).

거리를, 단순히 지리적 개념만이 아닌, 사람의 선호도에 대한 대리척도로 사용한다고 해보자. 이럴 경우, 거리라는 것은 개인적인 좌표, 차원, 그리고 속성과 관련해서 유사성 및 근접성의 척도로 사용될 수 있다. 그러나 식 (1)은 복잡한 척도 문제가 발생한다. 가령, 어떤 이상점이 사과 5개, 오렌지 3개라고 하자. 어떤 대안이 사과 3개, 오렌지 1개라면, 사과와 오렌지라는 다른 척도를 사용했음에도 불구하고 동일한 거리가 측정된다. 이러한 복합적 척도 문제를 해결하기 위해서 Zeleny는 상대적인 편차를 측정하는 식 (2)를 제안하였다.

$$d_k = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i^* - x_i^k}{x_i^*} \right)^p \right]^{1/p} \quad (2)$$

식 (2)는 각 대안들이 이상점 대비 어느 정도의 편차를 가지고 있는지를 측정하는 식이다. 이를 통하여 측정된 척도와 관계없이 거리(타협의 정도)를 측정할 수 있다.

### 2.2 Preference Order 동적계획법

일반적인 동적계획법은 state의 조합, 의사결정, 그리고 선택된 의사결정에 따라 하나의 state에서 다른 state로 이

동하도록 하는 천이함수, 의사결정의 효용을 측정하기 위한 실가치함수로 정의된다. Mitten은 실가치함수를 선호도 관계로 대체하는 Preference Order 동적계획법을 제안하였다. Preference Order 동적계획법은 다음의 완화된 조건하에서는 최적의 의사결정절차를 도출한다고 알려져 있다.

- A1. 선호도 관계는 재귀적(reflexive)이고, 이행적이며(transitive) 완전하다(complete).
- A2. 최적의 부분정책이 각각의 state에서 존재한다.
- A3. 단조성(Monotonicity)의 가정을 만족한다.

선호도 관계는 임의로 주어진 state  $x$ 에 도달하는  $\beta$ 라는 부분정책(subpolicy)이 state  $x$ 에 도달하는 부분정책  $\alpha$ 보다 선호된다면, 동일한 의사결정  $\delta$ 를 두 가지 정책에 추가한다고 해도 부분정책  $\beta$ 가  $\alpha$ 보다 선호된다는 것이다.

$$\text{if } (\alpha \leq_x \beta), \text{ then } (\alpha + \delta \leq_x \beta + \delta). \quad (3)$$

따라서, 최종 stage에서는 최적의 정책들이 추적되어서, 추적된 부분정책들을 되짚어 따라가면 최적의 의사결정절차를 도출할 수 있다.

### 3. 다기준 의사결정 모형을 이용한 수급계획 모형

본 논문에서는 이상의 기법을 적용하여 모형을 설계하였다. 제안하는 모형에서는 비용최소화 목적함수를 정부주도형 수급계획의 속성으로, 투자자산반영 최대화 목적함수를 시장주도형 수급계획의 속성으로 정의하였다. 또한, 선호도 우선 동적계획법을 적용하기 위한 선호도는 각 속성으로 이루어진 거리척도를 사용하여 복합적 척도 문제를 해결하였다.

#### 3.1 수학적 정식화

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^T P_i(F_i^{Gov}(x_t), F_i^{Mar}(y_t)) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } LOLP_t(x_t) \leq C_t, \quad \forall t \quad (5)$$

$$CO_2Emission_t(x_t) \leq C_t^{CO_2}, \quad \forall t \quad (6)$$

$$x_t = x_{t-1} + u_t, \quad \forall t \quad (7)$$

$$u_t \geq 0, \quad \forall t \quad (8)$$

$$y_t \subset x_t, \quad u_t \subset x_t$$

여기서,

$t$  : 연도

$T$  : 계획기간

$x_t$  : t년도의 발전설비

$y_t$  : t년도까지 건설되는 신규설비

$P_i(\cdot)$  : t년도의 선호도 계산함수

$F_t^{Gov}(\cdot)$  : 정부주도형 속성(비용)

$F_t^{Mar}(\cdot)$  : 시장주도형 속성(투자의사, 신규설비의 발전량)

$LOLP_t$  : t년도의 공급신뢰도

- $C_t$  : t년도의 공급신뢰도 기준
- $CO_2Emission_t$  : t년도의 이산화탄소 배출량
- $C_t^{CO_2}$  : t년도의 이산화탄소 배출계약
- $u_t$  : t년도의 발전설비 투입용량

식 (4)는 계획기간의 총 선호도를 최대화하는 목적함수이다. 이 목적함수에는 정책기능을 반영한 비용최소화 목적함수와 시장기능을 반영한 투자회사 최대화 목적함수가 포함되어 있다. 식 (5)는 공급신뢰도 기준을, 식 (6)은 온실가스 배출계약을 의미한다. 식 (7)는 설비의 증설과정을 나타내는 식이며, 식 (8)는 신규발전설비의 용량이 항상 0보다 크다는 것을 의미한다.

비용최소화 목적함수는 식 (9)와 같이 건설비용을 계산하는 부분과 운전비용을 계산하는 부분으로 이루어져 있다.

$$F_t^{Gov} = J_t(u_t) + G_t(x_t) \tag{9}$$

- $J_t$  : t년도의 건설비 함수
- $G_t$  : t년도의 운전비 함수

투자회사 최대화는 발전사업자들의 경우 이익을 극대화하기 위해 신규 설비의 발전량을 최대화시킬 것이라는 가정하에 식 (10)과 같이 정식화 하였다.

$$F_{t,j}^{Mar} = H_j^t(y_j^t) \tag{10}$$

- $H_j^t$  : t년도의 j형식 발전기의 발전량,  
 $j \in \{LNG, Oil, Coal, Nuclear\}$

따라서 선호도는 정부주도형 속성인 비용과 시장주도형 속성인 발전량의 함수로 정의할 수 있으며, 각 년도의 속성은 식 (11)과 같은 거리척도로 측정할 수 있다.

$$P_t = \left[ \sum_i w_i \cdot \{d_i(F_t^i)\}^2 \right]^{1/2} \tag{11}$$

- $w_i$  : 속성i의 가중치,  $i \in \{Gov, Mar\}$

또한 상대적인 편차  $d_i$ 는 식 (12)와 같이 현재의 함수 값이 가장 좋은 값과 가장 나쁜 값 사이에서 어떤 위치에 있는지를 결정한다. 즉, 대안  $f$ 중에 속성  $i$ 가 가장 좋은 속성값을 가지고 있다면,  $d_i = 1$ 이 되고, 가장 나쁜 속성값을 가지고 있다면,  $d_i = 0$ 이 된다.

$$d_i = \frac{f_i - worst_i}{best_i - worst_i} \tag{12}$$

또한, 각 목적함수에 대한 가중치를 통해 해당 속성을 얼마나 반영할지를 결정할 수 있다. 가령  $\omega = (1,0)$ 이면 비용최대화 목적함수만 사용하기 때문에 WASP의 결과와 비교할 수 있다.

### 3.2 수급계획 모형의 구성

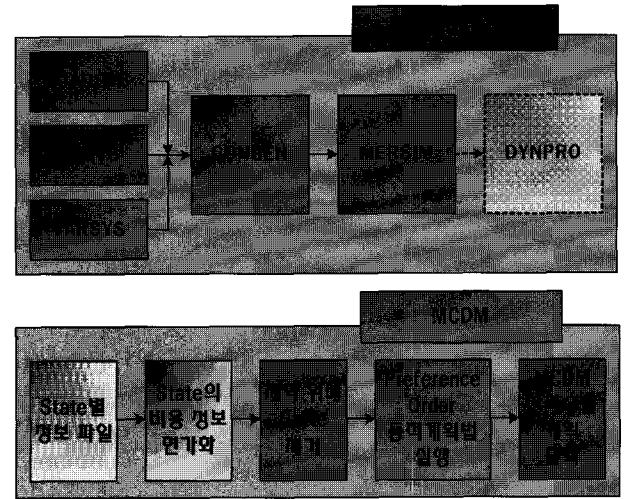


그림 1 전력수급계획 모형의 구성  
Fig. 1 Power expansion planning model

본 모형은 WASP의 MERSIM 모듈의 결과파일을 이용한다. MERSIM 모듈은 CONGEN 모듈에서 생성된 state에 대해서 확률적 운전비 시뮬레이션을 수행하는 모듈이다. 이 모듈에서 생성된 state의 각종 정보 중 원하는 정보를 추출하여 MCDM에서 사용하게 된다. MCDM에서는 각 state에 대해 제약조건 위배를 판단하고 선호도 우선 동적계획법을 실행하여 최적해를 도출한다. 표 1은 WASP 모형과 개발전산모형의 주요 내용을 비교한 것이다.

표 1 WASP 모형과 개발전산모형의 비교

Table 1 Comparison between WASP and MCDM model

	WASP	개발전산모형
목적함수	비용최소화	다기준목적함수 (비용, 투자회사)
최적화 해법	동적계획법	Preference Order 동적계획법
신뢰도 기준	LOLP (공급지장확률)	LOLP (공급지장확률)
목적함수 변경여부	불가능	가능

### 4. 사례 연구

개발전산모형의 검증을 위해 WASP 모형의 결과와 비교하였으며, 비교를 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 계획기간은 15년이며, 할인율은 7.5%/년 이다.
- 신규설비는 전원별(LNG, 중유, 석탄, 원자력)로 건설된다고 가정하였다(부록참조).
- 개발전산모형의 속성가중치 중 비용속성인  $\omega_{Gov} = 1$ 로 설정하였으며, 나머지 속성은 모두 0이다.
- CONGEN의 최소건설대수 데이터와 Tunnel은 다음과 같다.

표 2 CONGEN 데이터

Table 2 CONGEN data

년도	최소건설대수				Tunnel			
	LNG	Oil	Coal	Nucl	LNG	Oil	Coal	Nucl
2008	2	1	1	1	3	3	3	2
2009	2	1	1	1	3	3	3	2
2010	3	1	1	1	3	3	3	2
2011	3	2	2	2	3	3	3	2
2012	4	2	2	2	3	3	3	2
2013	4	2	2	2	3	3	3	2
2014	5	3	3	3	3	3	3	2
2015	5	3	3	3	3	3	3	2
2016	6	3	3	3	3	3	3	2
2017	6	4	4	4	3	3	3	2
2018	7	4	4	4	3	3	3	2
2019	7	4	4	4	3	3	3	2
2020	8	5	5	5	3	3	3	2
2021	8	5	5	5	3	3	3	2
2022	9	5	5	5	3	3	3	2

다음 표 3과 표 4는 두 모형의 최종 해와 누적비용결과를 나타낸 것이다.

표 3 WASP와 MCDM의 최종 해

Table 3 Final solutions of WASP and MCDM model

년도	WASP				MCDM			
	LNG	Oil	Coal	Nucl	LNG	Oil	Coal	Nucl
2008	2	4	4	3	2	4	4	3
2009								
2010	1				1			
2011		1	1	1		1	1	1
2012	1				1			
2013								
2014	1	1	1	1	1	1	1	1
2015								
2016	1				1			
2017		1	1			1	1	
2018	1				1			
2019								
2020	1		1		1		1	
2021								
2022	1				1			

표 4 WASP와 MCDM의 연도별 누적비용

Table 4 Yearly cumulative costs of WASP and MCDM model

년도	WASP	MCDM
2008	24412506	24412500
2009	35603000	35602984
2010	46430240	46430212
2011	58150604	58150568
2012	67125344	67125296
2013	75759760	75759704
2014	85254208	85254136
2015	92311952	92311872
2016	99104336	99104248
2017	105694072	105693984
2018	111563800	111563704
2019	116967560	116967464
2020	122174368	122174264
2021	126891280	126891168
2022	131339184	131339072

비용속성 만 1일 경우, WASP의 결과와 MCDM의 결과가 일치함을 표 3과 표 4를 통해 알 수 있다. 비용에서 약간의 오차가 발생하는 것은 부동소수점 연산을 반복 수행하면서 생기는 오차로 판단된다.

상기의 데이터는 모두 동일하게 설정하고, 속성을 달리 하였을 경우의 결과는 다음과 같다.

(Case1)  $\omega_{Gov} = 0, \omega_{Mar}^L = 1, \omega_{Mar}^O = 0, \omega_{Mar}^C = 0, \omega_{Mar}^N = 0$

년도	MCDM				누적비용
	LNG	Oil	Coal	Nucl	
2008	5	1	1	1	19586396
2009					32834650
2010	1	1			46092228
2011			1	1	59080868
2012	1				69698648
2013		1			79953312
2014	1		1	1	90141696
2015					98177936
2016	1				105897920
2017		1	1	1	113639400
2018	1				120086176
2019					126042736
2020	1	1	1	1	131894608
2021					136888016
2022	1				141605184
합계	12	5	5	5	최종 선택도 : 14

(Case2)  $\omega_{Gov} = 0, \omega_{Mar}^L = 0, \omega_{Mar}^O = 1, \omega_{Mar}^C = 0, \omega_{Mar}^N = 0$

년도	MCDM				누적비용
	LNG	Oil	Coal	Nucl	
2008	2	4	1	1	19761668
2009					32393758
2010	1		1		45076568
2011		1		1	57446868
2012	1				67553616
2013	1				77368336
2014		1	1	1	87336888
2015					95039456
2016	1				102437992
2017		1	1	1	109929784
2018	1				116131544
2019					121855008
2020	1	1	1	1	127529576
2021					132346800
2022	1				136890592
합계	9	8	5	5	최종 선택도 : 14

하나의 설비에만 속성값을 반영하면 최종년의 최대설비 대수로 결과가 나옴을 알 수 있다. 예상한 바대로 MCDM이 동작한다는 의미이다.

(Case3)  $\omega_{Gov} = 0.4$ ,  $\omega_{Mar}^L = 0.12$ ,  $\omega_{Mar}^O = 0.18$ ,  $\omega_{Mar}^C = 0.16$ ,  
 $\omega_{Mar}^N = 0.12$

년도	MCDM				누적비용
	LNG	Oil	Coal	Nucl	
2008	3	4	4	3	24842084
2009					36031424
2010					46510904
2011		1	1	1	58231264
2012	3				67796496
2013					76415288
2014		1	1	1	85689872
2015					92743568
2016					99377200
2017				1	106058568
2018	1				111907856
2019					117293728
2020	1				122425280
2021		2			127248960
2022	1		2		131694560
합계	9	8	8	6	최종 선택도: 6.8003

Case3는 속성값이 다를 경우 설비의 구성을 보여준다. 비용만 고려했을 때 보다는 비용이 증가했음을 알 수 있다. 또한 속성값이 높은 설비는 타 설비보다 상한에 가깝다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 다기준 의사결정 모형을 이용한 설비계획 모형을 개발하였다. 기존의 비용최소화 목적함수뿐만 아니라 시장의 기능을 반영한 목적함수를 사용함으로써 향후 전력시장이 활성화되더라도, 전력수급계획에 정책적 기능을 상당부분 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 WASP 결과와의 비교를 통해 MCDM 모형의 신뢰성도 확보하였다고 판단된다.

향후 연구과제로는 속성값에 따른 설비구성의 영향을 정밀하게 파악해야 할 것이며, 본 논문에서 제안한 설비대수를 이용한 시장기능 뿐만 아니라 다양한 속성을 찾아내는 연구도 진행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 한국전력공사 경영연구소(과제번호: R-200702-210, 과제명: 전력시장모의시스템 구축) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

[1] 김영창, "발전설비투자이론", IECC에너지시리즈-3, 2006

[2] 한국전력공사, "WASP-II 전산모형 운용 안내서", 1993  
 [3] IAEA, "WASP-IV User's Manual", 2001  
 [4] Milan Zeleny, "Multiple Criteria Decision Making," McGraw-Hill Book Company, 1982  
 [5] L. G. Mitten, "Preference Order Dynamic Programming," Management Science, Vol. 21, No. 1, pp.43-46, 1974  
 [6] 김영창, 환경문제를 고려한 다목적 전원개발계획에 관한 연구, 한국과학기술원, 1993  
 [7] Least Cost Electric Utility Planning, H. G. Stoll, John Wiley & Sons, 1989  
 [8] Electric Energy Generation Economics, Reliability, and Rates, J. Vardi & B. Avi-Itzhak, The MIT Press, 1981

#### Appendix. New Plant Data

구분	LNG	Oil	Coal	Nuclear
용량(MW)	700	800	1000	1400
최소출력열소비율 (kcal/KWh)	1959	2036	2137	2433
평균중분열소비율 (kcal/KWh)	1521	1918	1861	2139
연료단가(10원/백만kcal)	3535	953	953	138
운전유지비(천원/KW월)	2.66	2.52	2.28	6.77
건설비용(천원/KW)	665	1064	962	1731
경제수명(년)	30	30	30	40

### 저 자 소 개



#### 한 석 만 (韓錫萬)

1976년 12월 5일생. 2002년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-338-1621, Fax : 02-320-1119

E-mail : hseokman@gmail.com



#### 김 발 호 (金發鎬)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박사). 1999년~현재 홍익대학교 전기정보제어공학과 부교수

Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1119

E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr