

電力系統의 不確實性を 포함한 柔軟한
長期電源構成의 수립에 관한 研究
A Study on the Construction of the Flexible Long-Term
Generation Mix under Uncertainties of Power System

崔 在 錫* 李 順 榮* 宋 吉 永**

Jae-Seok Choi*, Soon-Young Lee*, Kil-Yeong Song**

요 약

본 연구에서는 장기전원구성의 수립에 있어서 가정한 시나리오에서 최적해를 찾는 기존의 방법을 탈피하여 건설단가나 연료단가의 변동과 같은 경제성의 변동 및 최대부하의 예측의 불확실성에 대한 외부충격등에 견딜 수 있는 유연성을 정량적으로 고려할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 그 수법으로 Fuzzy 동적계획법을 이용하여 각 대표년도별로 최적전원구성을 결정함으로써 년도별 전원 구성의 추이를 쉽게 알 수 있고 비선형 멤버쉽함수도 용이하게 고려할 수 있도록 하였다. 여기서는 경제성, 신뢰성, 부하불확실성 및 유연성에 대한 멤버쉽 함수치를 각 상태별로 계산하고 Bellman-Zadeh의 최대화 결정과정에 따라 처리함으로써 그 안을 결정하도록 하였다. 본 수법을 우리나라 KEPCO 계통에 적용하여 그 유용성을 검토하였다.

Abstract

A new approach using fuzzy dynamic programming is proposed for the flexible long-term generation mix under uncertain circumstances. A characteristic feature of the presented approach is that not only fuzziness in fuel and construction cost, load growth and reliability but also many constraints of generation mix can easily be taken into account by using fuzzy dynamic programming. The method can accommodate arbitrary shape of membership function as well as the operation of pump-generator. And so more realistic solution can be obtained. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated by the best generation mix problem of KEPCO-system which contains nuclear, coal, LNG, oil and pump-generator hydro plant in multi-years.

*경상대학교

*GYEONG-SANG NATIONAL UNIVERSITY

**고려대학교

**KOREA UNIVERSITY

I. 序 論

전원개발은 건설자금의 방대함, 발전소의 입지확보에 대한 곤란, 연료확보의 불안정, 장기부하예측의 불확실성, 환경규제의 강화등으로인해 더욱 어려워지고있는 실정이다. 그러므로 오늘날 전력계통의 개발계획을 담당하는 사람들은 적절한 안정성 확보 및 신뢰성을 유지하면서 수요에 알맞는 적절한 규모의 전원을 구성하는데 있어서 전에없이 재정상의 제약과 불확실성을 어떻게 극복할 수 있을 것인가 하는 심각한 문제에 직면하고있다. 이러한 여건변화에 대처해서 전원을 개발해나가기 위해서는 최적전원구성, 최소한의 불안요소(Risk) 및 비용저감, 부하관리 등을 적절히 감안해서 합리적으로 계통을 확장해나가기야만 한다는 어려운 과제를 풀어나가지 않으면 안된다. 그러므로 전원계획시에 경제성 및 신뢰성을 고려한 것에 불확정요인의 변동에 대한 유연성(Flexibility)도 평가되어야할 시점에 도달한 것이다.[1, 2, 3, 4]

이와 같은 불확실성의 장래 사상을 Fuzzy 기법으로 처리하므로써 불확실성을 전원구성문제에 보다 합리적으로 반영할 수있는 방법들이 개발되고 있긴하지만[5] 비용계산중 가장 중요한 연료비 산정방법이 매우 간략하여 실계통 적용상 문제가 있고, 또한 아주 최근에 유연성의 정도를 정량적으로 접근하므로써 보다 불확실한 미래에 견고하게 대처하기 위한 방법이 발표되었으나[6] 이 수법은 최적화 방법에서 정적인 동적계획법(Static Dynamic Programming)을[7] 사용하고 있으므로 전원구성의 추이를 파악할 수없고 특히 점차 그 구성비가 높아질 것으로 예상되는 원자력과 밀접한 관계를 갖고있는 양수식수력과 같은 에너지 저장설비를 고려하지 못하고있다.

이에따라 본 연구에서는 미래의 불확실성을 반영할 수있는 확률 이론 및 Fuzzy 이론을 적용시키고 유연성의 정도를 정량적으로 분석하므로써 보다 균형잡힌 전원구성을 수립하는 실계통에 적용가능한 방법을 개발하는 것을 목표로 삼고 Fuzzy 동적계획법을 이용하여 각 대표년도별로 최적전원구성안을 결정할 수 있는 방법을 제안한다. 여기서는 경제성, 신뢰성, 부하불확실성 및 유연성에 대한 멤버십 함수치를 각 상태별로 계산하고 Bellman-Zadeh의 최대화 결정과정에 따라 처리하므로써 그 안을 결정하도록 하였다. [8,9] 또한 비선형 멤버십 함수도 고려하였으며 부하의 불확실성을 고려하기 위하여 3 차원 격자를 사용하였다. 개발한 방법을 우리나라 실계통을 대상으로 한 사례 연구를 통하여 그 유용성을 살펴보았다.

II. Fuzzy 동적계획법

p개의 Fuzzy 제약(C_1, \dots, C_p)과 q개의 Fuzzy 목표(G_1, \dots, G_q)가 있어서 이들의 멤버십함수를 각각 $\mu_{C1}, \dots, \mu_{Cp}$ 및 $\mu_{G1}, \dots, \mu_{Gq}$ 라고 할 때 Fuzzy 결정집합 D 및 이의 멤버십함수를 다음과 같이 정의한다.

$$D = \left(\bigcap_{i=1}^p C_i \right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^q G_j \right) \quad (1)$$

$$\mu_D(x) = \min \left[\min_{i=1 \sim p} \mu_{C_i}, \min_{j=1 \sim q} \mu_{G_j} \right] \quad (2)$$

만일 두개의 해가 있어서 각각을 x, x' 라하고 $\mu_D(x) > \mu_D(x')$ 라면 x' 보다는 x 를 채택하는 것이 바람직하므로 $\mu_D(x)$ 는 임의의 해 x 에 대한 만족도를 의미한다고 볼 수있다. 그러므로 만족도를 최대로하는 해를 최적해로 결정하는 만족도 최적화 기준에 의한 최적해를 x^* 라하면 이는 식 (3)처럼 정의된다.

$$\mu_D(x^*) = \max \mu_D(x) \quad (3)$$

그림 1은 Fuzzy 목표와 Fuzzy 제약이 각각 2개인 경우에서 Fuzzy 최적의사결정의 개념도이다. 여기서 최적해 x^* 가 Fuzzy 목표와 Fuzzy 제약과의 상호 타협점인것을 나타내고있다.

최적의사결정의 조건식인 식(3)을 변수로 풀어서 다시 표현하면 식 (4)와 같다.

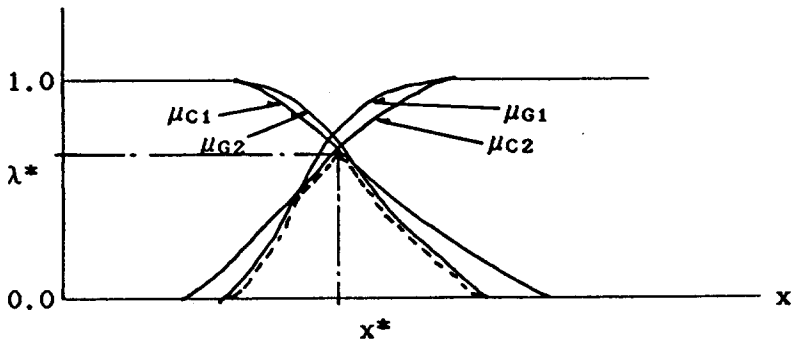


그림 1. Fuzzy 최적의사결정개념.
Fig 1. Making optimal decision on fuzzy sets.

$$\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_1, \dots, x_N} \mu_D(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (4)$$

이것을 동적계획법으로 풀기위해 Bellman의 최적성의 원리를 적용하면 식(5)와 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} \mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) &= \max_{x_1, \dots, x_N} [\max_{x_1} \{ \min(\mu_D(x_1), \mu_{F_2}(x_2), \dots, \\ &\quad \dots, \mu_{F_{N-1}}(x_{N-1}), \mu_{F_N}(x_N)) \}] \\ &= \max_{x_1, \dots, x_N} [\min\{\mu_D(x_1^*), \mu_{F_2}(x_2), \dots, \mu_{F_{N-1}}(x_{N-1}), \mu_{F_N}(x_N)\}] \end{aligned} \quad (5)$$

단, x: 결정변수
F = G + C

이는 식 (6)과 같이 표현될 수 있으며 여기서 식 (7.1) 및 식 (7.2)와 같은 점화식을 얻을 수 있고 이는 일반적인 동적계획법으로 처리가 가능하다.

$$\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_n, \dots, x_N} [\min\{\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n-1}^*), \mu_{F_n}(x_n), \dots, \mu_{F_N}(x_N)\}] \quad (6)$$

$$\mu_D(x_1^*, \dots, x_n^*) = \max_{x_n} [\min\{\mu_D(x_1^*, \dots, x_{n-1}^*), \mu_{F_n}(x_n)\}] \quad (7.1)$$

$$\mu_D(s_n) = \max_{x_n} [\min\{\mu_D(s_{n-1}), \mu_F(x_n)\}] \quad (7.2)$$

단, $s_n = f(s_{n-1}, x_{n-1})$ $n = 1, 2, \dots, N$
s: 상태변수
f: 상태전이함수

III. Fuzzy 동적계획법에 의한 최적전원구성문제의 해석

3.1 問題의 設定 [10]

- (1) 전원은 단위(Unit)별이 아니고 종별로 나누어서 각각 1기로 취급하기로 한다.
- (2) 전력부하는 미리 상정된 값으로 한다.

- (3) 고정비로는 건설비를, 가변비로는 연료비만으라고 이들을 각각 현가화한 합을 총비용으로 삼는다.
- (4) 원자력은 부하추종능력이 없는 것으로하고 양수식 수력은 수급대응발전(침투부하시) 및 잉여대응발전(기저부하시)으로 운전되는 것으로 한다.
- (5) 각 전원별 전력량은 월별 대표일에대한 부하곡선에대하여 기존의 발전시물레이션을[10] 실시하여 구하도록 한다.

3.2 문제의 정식화

3.2.1 목적함수

(1) 경제성 평가함수

최적전원구성문제에서의 목적함수는 건설비와 연료비의 현가화된 비용들의 합인 총비용을 최소화하는 것이므로 식(8)과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} \min z_1 &= \sum_{n=0}^N \sum_{i=1}^{NG} \left[\left[\frac{1+e_{gi}}{1+r} \right]^n d_{in} \alpha_i \Delta G_{in} + \left[\frac{1+e_{fi}}{1+r} \right]^n f_{in} y_{in} \right] \\ &= F(\Delta G_{in}, y_{in}) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\text{단, } y_{in} = \sum_{m=1}^{12} \left[\int_{g_{i-1}}^{g_i} L_{nm}(x) dx \right] \quad [\text{MWh}]$$

$$g_i = \sum_{j=1}^i G_j \quad [\text{MW}]$$

i: 전원종류첨가

n: 연구대상연도첨자

r: 할인율(Discount Rate) [p.u]

e_{gi} : i 전원의 건설재료의 피상물가상승율 [p.u]

e_{fi} : i 전원의 연료의 피상물가상승율 [p.u]

α_i : i 전원의 연경비율 [p.u]

ΔG_{in} : n 년도에서의 i 전원의 건설량 [MW]

y_{in} : n 년도에서의 i 전원의 발전전력량 [MWh]

d_{in} : n 년도에서의 i 전원의 건설단가 [원/MW]

f_{in} : n 년도에서의 i 전원의 연료단가 [원/MWh]

L_{nm} : n 년도 m 월의 대표일부하지속곡선

식 (8)을 Fuzzy 목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$F(\Delta G_{in}, y_{in}) \leq z_{01} \tag{9}$$

단, z_{01} : 의사결정자의 경제성에대한 지망수준[원]

(2) 유연성 평가함수

앞서의 경제성평가와 함께 본 연구에서는 전원구성의 유연성에 대하여도 정량적으로 평가하여 목적함수로 고려하기위해 식 (10)과 같은 기준안의 총비용에대하여 상정안의 총비용이 어느 정도로 변화하느냐를 나타내는 변동비용의 변화율을 유연성 평가지표로 삼기로 한다.

이 지표는 Regret 백분율 값이므로 이것이 클수록 유연성은 떨어진다고 보아야할 것이다.

$$\min z_2 = \frac{|F(G) - F_0|}{F_0} \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

단, F_0 : 기준안에 대한 총비용[원]

식 (10)을 Fuzzy 목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$z_2 \leq z_{02} \quad (11)$$

단, z_{02} : 의사결정자의 유연성에 대한 지망수준[%]

(3) 공급신뢰도 평가함수

전원개발계획문제에서 적절한 공급신뢰도의 확보는 필수 불가결하다. 본 연구에서는 각 년도별로 어느 일정수준의 공급예비력을 확보하는 것으로 하고 공급예비력을 최대화하는 것으로 생각하면 이의 평가함수는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\max z_{3n} = \left(\sum_{i=1}^{NG} G_{in} - L_{pn} \right) \times 100 / L_{pn} \quad n=1 \sim N \quad (12)$$

단, L_{pn} : n년도의 최대부하[Mw]

식 (10)을 Fuzzy 목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$z_{3n} \geq z_{03} \quad (13)$$

단, z_{03n} : n년도에서의 의사결정자의 공급신뢰도에 대한 지망수준[%]

3.2.2 제약조건

(1) 전력수급제약조건

각 년도에서 전원설비용량이 최대부하에 공급예비력을 가한 전력 필요량을 만족해야 하며 이를 정식화하면 식 (14)와 같다.

$$\sum_{i=1}^{NG} G_{in} \geq L_{pn}(1 + R_n) \quad n=0 \sim N \quad (14)$$

단, R_n : n 년도의 공급예비율

(2) 최대부하 Fuzzy 제약조건

부하예측은 예측자가 갖는 경험, 기후나 수요측의 경제활동의 경향등의 정보에 따라 주관적으로 판단되는 것으로 그 불확정성이 존재한다고 생각된다. 부하예측의 불확정성에 대하여는 확률론수법을 사용한 부하예측수법이 제안되고 있으나 예측자의 경험, 에너지 수요의 변화등이 적절히 반영이 안되기 때문에 확률론적방법을 사용하여 얻어진 결과가 실제에 꼭 적절하다고는 말할 수없다고 판단된다. 오히려 확률론방법에 의한 결과를 토대로하여 예측자의 의사결정에 의한 부하예측의 모호함을 취급하는 것이 더욱 바람직하다고 생각되어 부하예측을 Fuzzy 집합으로 취급하기로하고 식 (14)의 최대부하 L_{pn} 에 대하여 식 (15)와 같이 Fuzzy 제약조건을 두기로한다. 이렇게 하므로서 예측 숙련자가 갖는 우수한 예측능력을 충실히 반영할 수있다.

$$L_{pn} \cong L_{pfn} \quad (15)$$

단, L_{pfn} : n 년도의 최대예측부하[Mw]

(3) 기설 및 신설전원의 상호관계계약조건

n 년도에서의 기설용량과 신설용량의 합이 n+1 년도에서의 기설용량이되므로 이를 정식화하면 식(16)과 같이 된다.

$$G_{in+1} = G_{in} + \Delta G_{in} \quad i = i \sim NG, n = 1 \sim N \quad (16)$$

(4) 전원설비용량의 상하한 제약조건

각 전원설비용량은 각년도별로 식 (17)과같이 상하한치를 미리 설정하여 놓는 것으로 한다.

$$G_{inmin} \leq G_{in} \leq G_{inmax} \quad (17)$$

3.3 멤버쉽함수의 설정

본 연구에서는 Fuzzy 동적계획법을 이용하므로 각 Fuzzy 함수에 대한 멤버쉽함수로서 비선형함수도 허용한다. 각 Fuzzy 함수에 대한 그 멤버쉽함수를 다음과 같이 설정하였다.

(1) 경제성 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

지망 수준 비용 이하이면 1.0 으로하고 그 이상이면 지수함수적으로 감소하는 것으로할때 그 멤버쉽함수는 식 (18)과 같이된다.

$$\mu_C(x(t-1), u(t)) = \begin{cases} 1 & : \Delta C(\cdot) \leq 0 \\ e^{-W_C \Delta C(x(t-1), u(t))} & : \Delta C(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (18)$$

단, $\mu_C(\cdot)$: 경제성 fuzzy 집합의 멤버쉽함수

$\Delta F(\cdot) = |F(x(t)) - Copt(t)| / Copt(t)$

$Casp(t)$: t 시간대에서의 비용지망수준

W_C : 경제성 멤버쉽함수의 가중치 계수

(2) 유연성 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

기준안에대한 최소비용 이하이면 1.0 으로하고 그 이상이면 지수 함수적으로 감소하는 것으로할때 그 멤버쉽함수는 식 (19)와 같이된다.

$$\mu_F(x(t-1), u(t)) = \begin{cases} 1 & : \Delta F(\cdot) \leq 0 \\ e^{-W_F \Delta F(x(t-1), u(t))} & : \Delta F(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (19)$$

단, μ_F : 유연성 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

$\Delta F(\cdot) = |F(x(t)) - Copt(t)| / Copt(t)$

$Copt(t)$: t 시간대에서의 기준안의 최소비용

W_F : 유연성 멤버쉽함수의 가중치 계수

(3) 공급신뢰도 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

공급신뢰도 지망수준 이상이면 1.0 으로하고 그 이하이면 지수함수적으로 감소하는 것으로할때 그 멤버쉽함수

는 식 (20)과 같이된다.

$$\mu_R(\cdot) = \begin{cases} 1 & : \text{RES}(t) \geq \text{REQ}(t) \\ e^{WR \Delta R(x(t), u(t))} & : \text{RES}(t) < \text{REQ}(t) \end{cases} \quad (19)$$

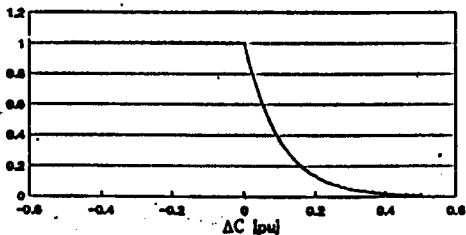
단, μ_R : 공급신뢰도 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta R(\cdot) = (\text{RES}(x(t)) - \text{REQ}(t)) / \text{REQ}(t)$
 $\text{REQ}(t)$: t시간대에서의 공급신뢰도 지망수준
 W_R : 공급신뢰도 멤버쉽함수의 가중치 계수

(4) 최대예측부하 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

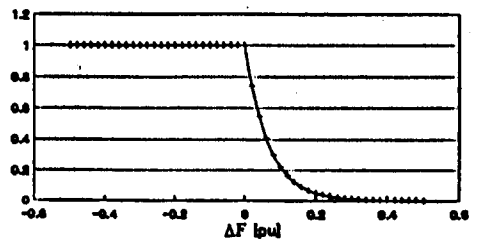
최대예측부하 지망수준이면 1.0 으로하고 이를 기준으로 부하가 벗어나면 벗어나는 정도의 표준편차를 고려하여 비선형적으로 감소하는 것으로할때 그 멤버쉽함수는 식 (21)과 같이된다.

$$\mu_L(\cdot) = \begin{cases} \frac{1}{1 + W_L(\Delta L(\cdot) / 2\sigma_{p,u}(t))^2} & \Delta L \geq 0 \\ \frac{1}{1 + W_L(\Delta L(\cdot) / 2\sigma_{p,u}(t))^2} & \Delta L < 0 \end{cases} \quad (21)$$

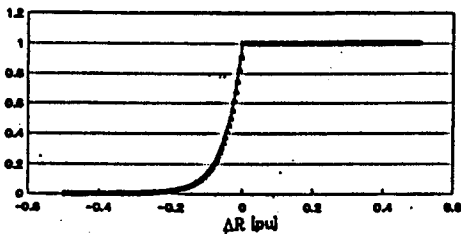
단, μ_L : 예측부하 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta L(\cdot) = (Lp(x(t)) - Lpforecasted(t)) / Lpforecasted(t)$
 $Lpforecasted(t)$: t시간대에서의 최대예측부하 지망수준
 $\sigma_{p,u}(t) = \sigma(t) / Lpforecasted(t)$
 $\sigma(t)$: $Lpforecasted(t)$ 의 표준편차
 W_L : 최대예측부하 멤버쉽함수의 가중치 계수



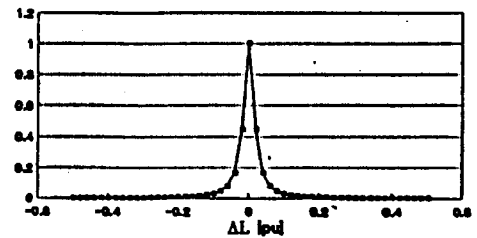
(a) 경제성 멤버쉽함수



(b) 유연성 멤버쉽함수



(c) 공급신뢰도 멤버쉽함수



(d) 최대예측부하 멤버쉽함수

그림 2. 경제성, 유연성, 공급신뢰도 및 최대예측부하의 멤버쉽함수의 모양.

Fig 2. Membership functions of fuzzy sets of economics, flexibility, reliability and forecasted peak load.

그림 2 는 경제성, 유연성, 공급신뢰도, 최대예측부하의 멤버쉽함수의모양을 나타낸 것이다.

3.4 Fuzzy 동적계획법에의한 해석방법[10]

본 연구의 Fuzzy 결정집합 D는 식 (1)에따라 식 (22)와 같이 된다.

$$D = C \cap F \cap R \cap L \tag{22}$$

- 단, C : 경제성 Fuzzy 집합
- F : 유연성 Fuzzy 집합
- R : 공급신뢰도 Fuzzy 집합
- L : 예측부하 Fuzzy 집합

그러므로 앞서의 Fuzzy 동적계획법의 점화식에 적용하면 식 (23)과 같이된다.

$$\begin{aligned} \mu_D(x(t)) = & \max [\min\{\mu_C(x(t-1), u(t)), \mu_F(x(t-1), u(t)) \\ & u_{\min}(t) \leq u(t) \leq u_{\max}(t) \\ & \mu_R(x(t-1), u(t)), \mu_L(x(t-1), u(t)) \mu_D(x(t-1))\}] \end{aligned} \tag{23}$$

- 단, $x(t) = t(t-1) + u(t)$
- $\mu_D(x(0)) = 1.0$
- $\mu_D(\cdot)$: 결정함수 Fuzzy 집합의 멤버쉽함수

전원구성문제를 Fuzzy 동적계획법으로 해석하는 모습을 나타내면 그림 3과 같다.

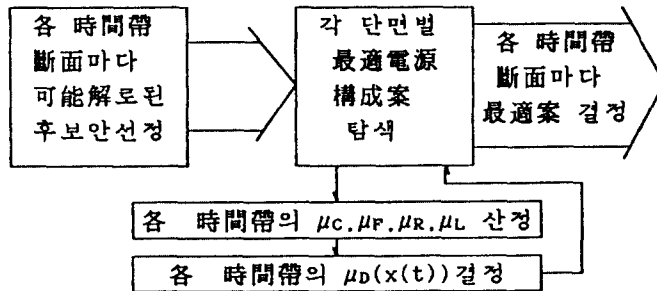


그림 3. Fuzzy 動的計劃法에 의한 電源構成問題의 解析過程.

Fig 3. Procedure for analysis of generation mix problem on fuzzy dynamic programming.

한편 동적계획법의 점화식인 식 (23)에따라 최적결정변수를 구하기위해서는 적절히 이산화 시킨 단계및 상태로 이루어진 격자모양을 이용할 수있는데 여기서는 부하의 불확실성에대한 평가도 고려하므로 그림 4와 같은 3차원격자를 사용한다.

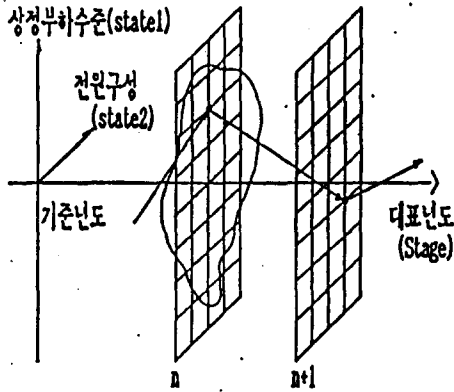


그림 4. 3차원격자에서 電源構成問題에 解의 탐색過程.

Fig 4. Procedure for searching solution of generation mix on 3-D lattice.

IV. 사례연구

1996년을 초기년도 및 기준년도로 하고 5년간격으로 2016년까지 향후 20년간의 최적전원구성비를 결정하는 우리나라 KEPCO 계통에 적용하여 본 적용결과 및 검토는 다음과 같다.

4.1 입력자료 [12, 13]

각 대표년도의 최대부하, 최소부하 및 수력설비량은 표 1과 같으며 전원특성자료는 표 2와 같고, 각종 경제성 자료는 표 3과 같다. 또한 연간부하패턴은 그림 5와 같은 1991년도의 월별 대표일부하 지속곡선을 그대로 이용하여 하되 그림 6과 같이 기준년도에서 먼 미래년도 일수록 그 최대부하의 불확실성의 정도를 크게 반영하게끔 하였다.

표 1. 각 대표년도에서의 최대, 최소부하와 수력설비.

Table 1. Maximum load, minimum load, hydro plant at standard years.

| 대표년도 | 최대부하 [Mw] | 최소부하 [Mw] | 수력 [Mw] |
|------|-----------|-----------|---------|
| 1996 | 28100 | 12950 | 1517 |
| 2001 | 37900 | 17150 | 1820 |
| 2006 | 48100 | 21238 | 2193 |
| 2011 | 61000 | 26934 | 2196 |
| 2016 | 76200 | 33645 | 2469 |

표 2. 電源特性資料.

Table 2. Generator characteristics.

| | | |
|------------------|-----------------|------|
| Pump-Generator | efficiency | 0.7 |
| Pumped-Generator | capacity factor | 0.20 |
| Hydro | capacity factor | 0.25 |
| LNG | capacity factor | 0.55 |
| Nuclear | F.O.R | 0.05 |
| Thermal | F.O.R | 0.02 |
| Hydro | F.O.R | 0.00 |

표 3. 초기설비용량 및 각종 經濟性 資料

Table 3. Generation capacities at initial year and economical data.

| 전원 | 초기설비 용량 [Mw] | 건설 단가 [만원/Kw] | 건설비 실질상승률 [%] | 연료 단가 [원/Kw] | 연료비 실질상승률 [%] | 연 경비율 [%] | 한계 이용율 [%] |
|------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|-----------|------------|
| Nucl | 11696 | 124.6 | 2 | 3.8 | 0 | 19 | 80 |
| Coal | 7843 | 78.7 | 2 | 14.8 | 1 | 17 | 60 |
| LNG | 5951 | 43.3 | 2 | 27.2 | 3 | 17 | 70 |
| Oil | 5813 | 65.0 | 2 | 80.0 | 4 | 17 | 70 |
| P-G | 1548 | 45.0 | 2 | 00.0 | 0 | 13 | 30 |

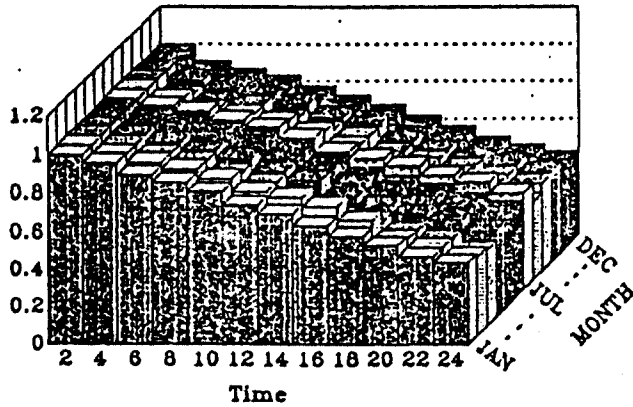


그림 5. 月別 代表日負荷持續曲線.
Fig 5. Standard daily load duration curves.

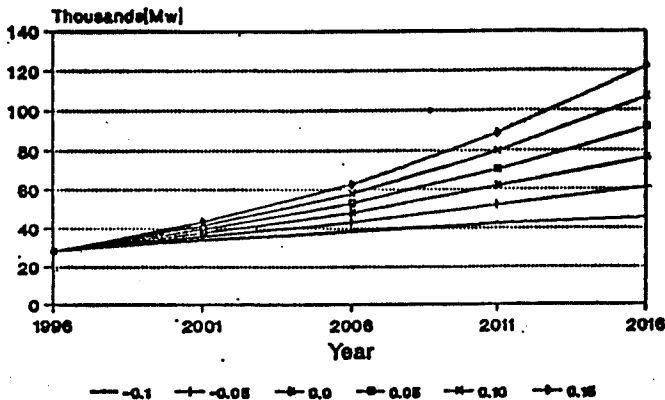


그림 6. 年度別 不確實性の 정도.
Fig 6. Uncertainty level at standard years.

4.2 적용결과 및 검토

4.2.1 전원구성에대한 검토

(1) 유연성을 고려하지않은 경우의 전원구성

먼저 유연성을 고려하지않은 경우로 하여 얻어진 전원구성의 수립의 결과는 그림 7과 같았다. 여기서 원자력의 구성비는 각 년도별로 40%- 30%정도이나 기준년도에 가까울수록 높고 멀수록 낮아짐을 알 수있다. 역으로 석탄화력의 경우는 기준년도에서 멀수록 구성비가 크게 나타났다.

(2) 유연성을 고려한 경우의 전원구성

유연성을 고려한 경우로 하여 얻어진 전원구성의 수립의 결과는 그림 8과 같았다. 여기서도 유연성을 고려하지 않은 경우처럼 원자력의 구성비는 각 년도별로 40%- 30%정도이나 유연성을 고려하지않은 경우와 비교하여볼때 건설비가 비싼 원자력의 건설이 다소 줄어들고 대신 연료비가 상대적으로 비싼 석탄화력의 건설이 보다 늘어나고 있음을 알 수있다. 이는 유연성을 고려하여 전원구성을 수립하므로서 비용면에서 융통성을 갖기 때문인 것으로

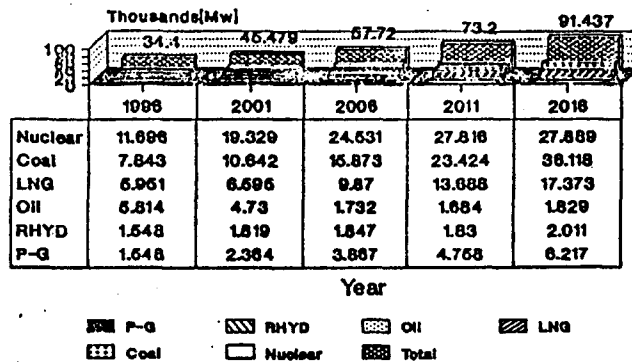
판단된다.

(3) 견고한 경우의 전원구성

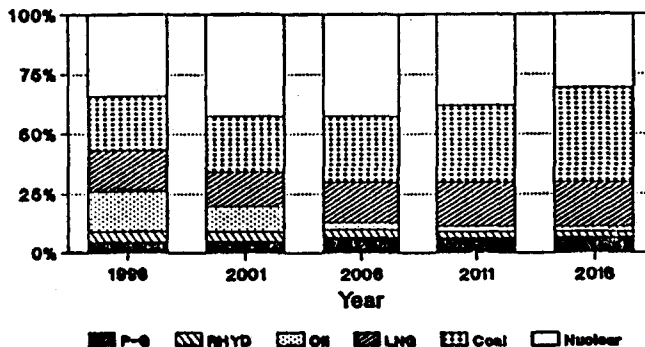
그림 9는 자금이 충분하다고 가정하여 얻은 전원구성수립의 결과로서 견고한 경우라고 할 수있다. 여기서도 유연성을 고려하지않은 경우나 유연성을 고려한 경우처럼 원자력의 구성비는 각 년도별로 40%- 30%정도이지만 앞서의 두 경우와 비교하여 불배 연료비가 원자력에 비해서 비싼 석탄화력의 건설이 초창기에 보다 많이 이루어 지고 있음을 알 수있는데 이는 제한된 양수식수력의 설비용량으로 원자력의 건설은 더 이상 이루어 지지않고 대신자금이 충분하다고 가정하였기 때문에 석탄화력이 우세하게 나타난 때문이라 여겨진다.

(4) 각 경우별 비용비교

한편, 표 4는 각 경우별 및 각 대표년도별로 비용을 비교하여 본 것이다. 여기서, 각 경우들의 총비용을 살펴보면 역시 예상되는 바와 같이 유연성을 고려하지않은 경우보다(총비용 108.9조원) 유연성을 고려한 경우(총비용 109.1조원)가 총비용이 더 많이 소요되며 나아가 강인한 계통의 경우는 총비용이 111.65조원으로 가장 크게 나타났다.

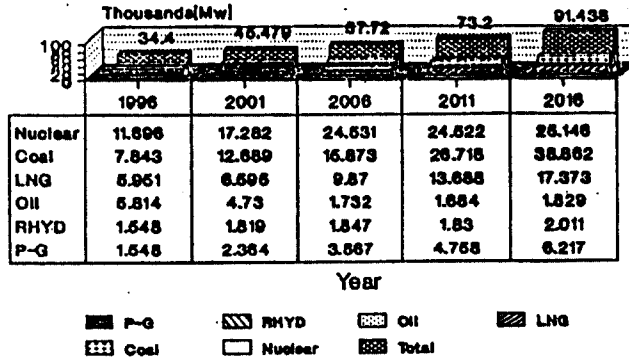


(a) 전원설비용량

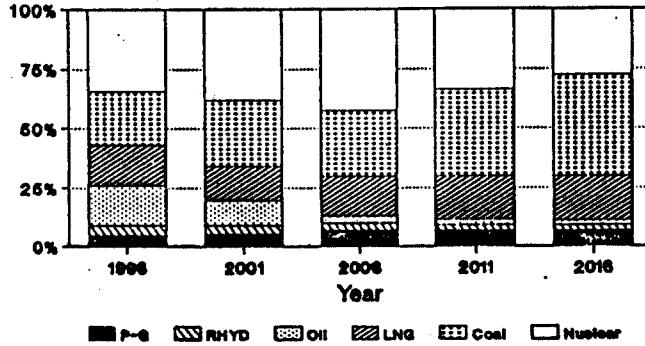


(b) 전원구성비

그림 7. 유연성을 고려하지 않는 경우의 전원구성.
Fig 7. Generation mix with not flexibility.



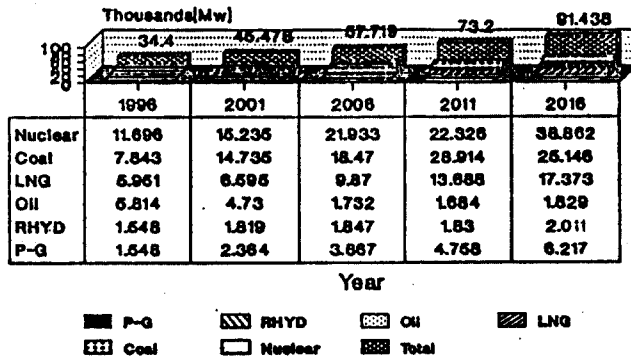
(a) 전원설비용량



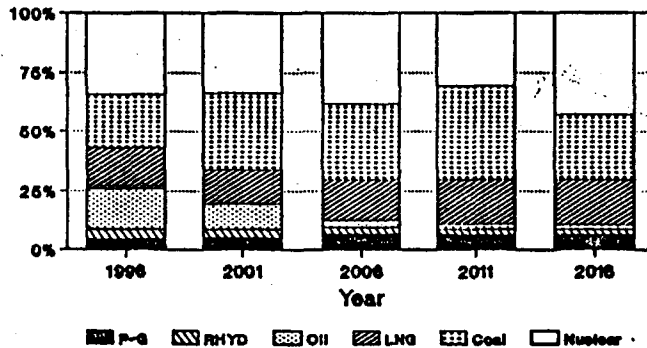
(b) 전원구성비

그림 8. 유연성을 고려한 경우의 전원구성.

Fig 8. Generation mix with flexibility.



(a) 전원설비용량



(b) 전원구성비

그림 9. 견고한 전원구성수립의 경우.

Fig 9. Generation mix with toughness.

표 4. 초기설비용량 및 각종 經濟性 資料

Table 4. Comparison of cost

[10¹² Won/5Years]

| | St. | Fixed Cost | Var. Cost | Total | Cum. |
|--------------|-----|------------|-----------|--------|--------|
| Not Flexible | 2 | 15.3 | 21.4 | 36.7 | 36.7 |
| | 3 | 10.4 | 18.1 | 28.5 | 65.2 |
| | 4 | 6.43 | 16.4 | 22.8 | 88.0 |
| | 5 | 5.42 | 15.5 | 20.9 | 108.9 |
| | Sum | 37.55 | 71.4 | 108.9 | |
| Flexible | 2 | 14.5 | 21.6 | 36.1 | 36.1 |
| | 3 | 11.0 | 18.4 | 29.3 | 65.4 |
| | 4 | 5.77 | 16.6 | 22.4 | 87.8 |
| | 5 | 5.49 | 15.9 | 21.3 | 109.1 |
| | Sum | 36.76 | 72.5 | 109.1 | |
| Robust | 2 | 13.6 | 21.9 | 35.5 | 35.5 |
| | 3 | 10.8 | 18.9 | 29.7 | 65.1 |
| | 4 | 5.85 | 17.0 | 22.8 | 87.94 |
| | 5 | 8.36 | 15.4 | 23.7 | 111.65 |
| | Sum | 38.61 | 73.2 | 111.65 | |

4.2.2 감도해석

(1) 최대부하에 대한 감도해석

불확실성을 갖는 요소들 중에서도 가장 심각하다고 판단되는 최대부하에 대하여 유연성을 고려하지 않은 경우, 유연성을 고려한 경우 및 강인한 경우에서 감도해석을 한 결과가 그림 10 이다.

기준점에서는 유연성을 고려하지 않은 경우가 가장 총비용이 작지만 교차점인 년 증가율 0.25[pu](즉 기준점의 1.25배)되는 점부터는 최대부하가 높아짐에 따라 유연성을 고려한 경우가 오히려 총비용이 작음을 알 수 있었다. 그러나 최대부하의 연간 증가율이 1.25[pu](즉 기준점의 2.25배) 이상이 되면 강인한 계통이 더욱 경제적인을 나타내고 있었다. 하지만 강인한 계통으로하면 기준점에서 불리하고 결국 외부충격인 최대부하의 불확실성에

도 유연하게 대처하는 것은 유연성을 고려한 경우임이 증명된다. 더욱이 최대부하의 연간 증가율이 2.0[pu](즉 기준점의 3.0배)인 경우에 유연성을 고려하지 못한 경우와 유연성을 고려한 경우와의 비용차이는 급격히 벌어진 반면에 유연성을 고려한 경우와 강인한 경우와의 차이는 상대적으로 벌어짐이 작음을 알 수 있었다.

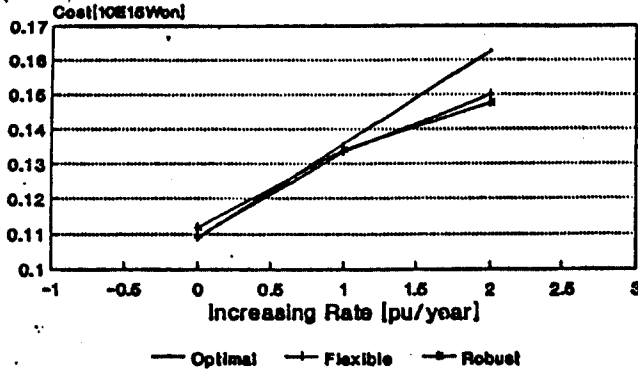


그림 10. 최대부하에 대한 감도해석.
Fig 10. Sensitivity analysis for peak load.

(2) 건설단가에대한 감도해석

그림 11은 유연성을 고려하지 못한 방법과 유연성을 고려한 방법으로 전원개발계획의 경제성 평가에서 상호간에 경쟁이되고있는 원자력과 석탄화력의 건설단가에대하여 감도해석을 한 결과이다. 여기서 건설단가가 기준점의 2배 정도되는 점에서 전자가 후자보다 총비용이 작아지는 교차가 이루어지고 있음을 알 수있다. 이는 건설단가의 변동이라는 불확실성을 갖는 외부충격에 대하여 기준점의 건설단가의 약 2 배 정도되는 교차점에서부터 유연성을 고려한 전원구성이 보다 경제성을 갖는다고 볼 수있으며 또한 앞서의 1.25배 정도에서 교차점이 이루어진 최대부하의 변동이라는 외부충격보다는 영향을 덜 받고있다고 볼 수있다.

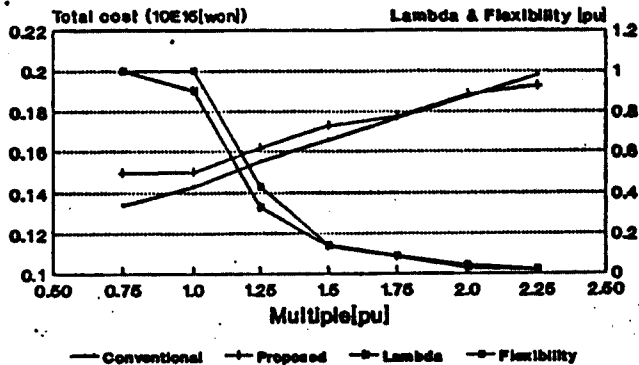


그림 11. 건설단가에 대한 감도해석.
Fig 11. Sensitivity analysis for construction unit cost.

(3) 연료단가에 대한 감도해석

끝으로 그림 12는 원자력과 석탄화력의 연료단가에 대하여 감도해석을 한 결과이다. 역시 유연성을 고려하지 못한 기존의 방법과 유연성을 고려한 본 연구에서 제안하는 방법을 비교하였다. 두 경우 모두 연료단가의 증가에 대하여 총비용이 증가하고 있으나 연료단가가 1.65배 정도되는 점에서 유연성을 고려하지 못한 경우보다 유연성을 고려한 경우의 총비용이 작아지는 교차점이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이는 앞서 기준점의 건설단가의 약 2배 정도되는 점에서 교차점을 갖은 건설단가의 변동이라는 외부충격에 비하면 외부충격의 정도가 크고 또한 앞서의 1.25배 정도에서 교차점이 이루어진 최대부하의 변동이라는 외부충격보다는 충격정도가 작다고 생각된다.

표 5는 최대부하의 변동, 건설단가의 변동 및 연료단가의 변동 이라는 3가지 외부충격에 대하여 그 충격의 정도를 상대평가하여 본 것이다.

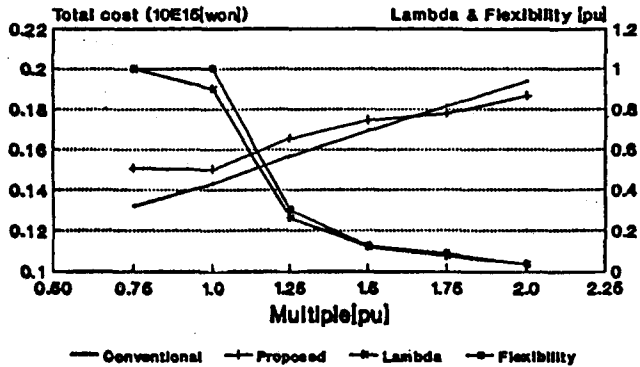


그림 12. 연료단가에 대한 감도해석.

Fig 12. Sensitivity analysis for fuel unit cost.

표 5. 3가지 외부충격에 대한 상대적 충격강도순위.

Table 5. Intensity order for impacts.

| 외부충격의 종류 | 교차점 | 강도 순위 |
|----------|-------|-------|
| 최대부하의 변동 | 1.25배 | 1 |
| 연료단가의 변동 | 1.65배 | 2 |
| 건설단가의 변동 | 2.0 배 | 3 |

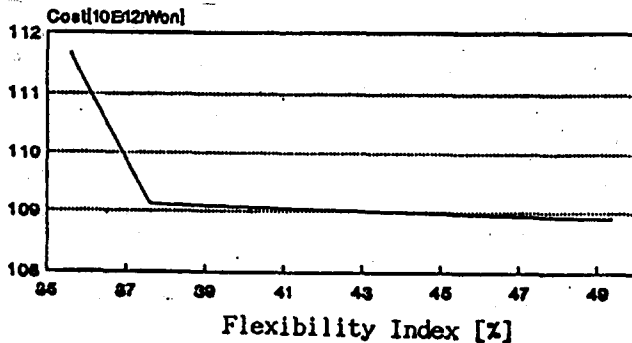


그림 13. 유연성과 경제성의 관계

Fig 13. Flexibility vs. economics.

4.2.3 비용과 유연성의 관계

한편 그림 13은 총비용과 유연성의 관계를 살펴본 것인데 이들 사이에는 유연성의 지표값이 작을수록 총비용은 커지고(즉, 유연성이 클수록 경제성이 나빠지고) 유연성의 지표값이 클수록 총비용이 작아지는(즉, 유연성이 작을수록 경제성이 좋아지는) 소위 Trade Off 관계가 있음을 알 수 있었다.

V. 結 論

본 연구에서는 퍼지 목표함수로서 현가화한 총비용함수, 예측부하 및 발전계통의 신뢰도 산정함수외에도 유연성의 평가함수도 포함시킨 퍼지 다목적함수를 갖는 방법을 개발하였다. 그러므로 유연성의 정도를 정량적으로 분석할 수 있었으며 이를 이용하여 미래의 불확실한 상황에 더욱 유연하게 대처할 수 있는 전원구성을 수립하므로써 보다 현실적인 장기전원구성을 수립할 수 있음을 보였다. 더욱 전원구성문제를 Fuzzy 동적계획법으로 정식화하여 처리하므로써 년도별 전원구성의 추이를 쉽게 파악할 수 있는 다년도 전원구성을 수립할 수 있도록 하였으며 나아가 비선형 멤버쉽 함수도 용이하게 고려할 수 있었다.

본 방법을 우리나라 KEPCO 계통에 가까운 모델계통에 적용하여 다음과 같은 몇가지 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 또한 유연성을 갖는 전원구성으로 할 경우 1996년부터 2016년까지 총비용이 110조에 이를 것으로 추정되며 이중 건설비는 37조에 이르는 것으로 산정되었다.

(2) 최대부하의 변동, 건설단가의 변동 및 연료단가의 변동 이라는 3가지 외부충격에 대하여 그 충격의 정도를 상대평가하여 본 결과 최대부하의 변동에 대한 충격강도가 제일 크고, 그 다음이 연료단가의 변동에 대한 충격강도였으며, 마지막으로 건설단가의 변동에 대한 충격강도 순으로 나타남을 알 수 있었다.

(3) 나아가 전원구성의 경제성과 유연성이 Trade Off 관계가 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

1. N. de Franco, "Special Report for Group 37(Power System Planning and Development)," CIGRE SC-37 WG. 01 Special Report, Paris, Aug., 1986.
2. K. Takahashi et al., "Power Systems Flexibility,-Principles and Means, Available Methods at the Planning Stage-," CIGRE SC-37, Brussels, Feb. 5, 1988.
3. Y. Nonaka, et al., "An Approach to Evaluation of the Flexibility of Generation Mix," CIGRE SC-37, WG. 01, 1988.
4. Fumio Arakawa, et al., "Energy Security Assessment --- Quantitive Anlysis for Flexible System Planning---," CIGRE SC-37, Florence, Oct. 17-20,1989.
5. 佐藤晴夫, 等, "ファシイ 線形計画法による 長期電源構成計劃," 日本電氣學會論文誌 B, 112卷 2號, 平成4年, pp. 147-153.
6. 田邊隆也, 等, "電源의 固定費 可變費의 不確實性さを 考慮した 電源 로ハストシックス決定手法," 日本電氣學會論文誌 B, 112卷 4號, 平成 4年, pp. 331-338.
7. Borison A. B., R. A. Morris, "An Efficient Approach to the Optimal Static Generation Mix Problem," IEEE Trans. on PAS, vol. 103, no. 3, pp. 576-580, Mar. 1984.
8. Walter J. M. Kickert, Fuzzy Theories on Decision-Making, Martinus-Nijhohh Boston, 1978.
9. H. J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer-Nijhohh Boston, 1986, pp. 220-234.
10. 宋 吉永, 崔 在錫, "最適電源構成을 위한 簡略 시뮬레이션 技法의 開發," 大韓電氣學會論文誌, 제37권 6호.

pp. 339-349, 1988. 6.

11. Yuan-Yih Hsu, etc. : "Fuzzy Dynamic Programming : An Application to Unit Commitment," IEEE Trans. on PS, Vol. 6, No. 3, pp. 1231-1237, Aug. 1991.
12. 韓國電力公社 研究報告書, 長期電力需給計劃案, 電源計劃處 報告書, No. 100, 1990.
13. 宋 吉永, 崔 在錫, 南宮 在鎔, "Fuzzy 線形計劃法을 이용한 長期電源構成의 수립," 大韓電氣學會論文誌, 제41권 11호. pp. 1235-1245, 1992. 11.
14. 전력사업 장기전망 조사 전문위원회 "電力需給 및 관련기술 현황과 전망" 大韓電氣學會, 기술조사보고, 제5호, Vol. 1, 1992. 11.
15. 宋 吉永, 崔 在錫, 南宮 在鎔, "電力系統의 不確實性을 포함한 柔軟한 長期電源構成의 수립에 관한 研究," 1993년도 夏季學術研究發表會論文誌, 1993년 7월, pp. 159-162.