

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

宋吉永*

南宮在鎔*

崔在錫**

* : 고려대학교

** : 경상대학교

A Study on the Construction of the Flexible Long-Term Generation Mix under Uncertainties of Power System

Kil-yeong Song*

Jae-Young Namgung*

Jae-Seok Choi**

* : KOREA UNIVERSITY

** : GYEONG-SANG NATIONAL UNIVERSITY

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.

1. 序論

전력계통에서 전원개발계획문제란 최소의 비용으로 장래의 전력수요를 안정하게 만족하기위해서는 어떠한 설비를 언제 어디에 얼마나 건설하면 좋은가를 결정하는 것이며 이는 미래에대한 의사결정문제이므로 필연적으로 문제내에 미래에대한 불확실성의 요소를 포함하게된다. 더욱 장기부하예측의 불확실성이나, 연료확보의 불안정외에도 오늘날은 환경규제의 강화등과 같은 불확실성의 요소도 생겨나게 되었으며 이를 담당하는 사람들은 적절한 안정성확보 및 신뢰성을 유지하면서 수요에 알맞는 적절한 규모의 전원을 구성하는데 있어서 전에없이 재정상의 제약과 불확실성을 어떻게 극복할 수 있을 것인가 하는 심각한 문제에 직면하고있다. 그러므로 이제 전원개발계획에서는 경제성과 신뢰성의 예도 불확실성의 요소의 변동에대한 유연성도 평가되어야할 시점에 도달하였다.[1~4]

이에따라 본 연구에서는 Fuzzy 동적계획법을 이용하여 각 대표년도별로 최적전원구성안을 결정할 수 있는 방법을 제안한다. 여기서는 경제성, 신뢰성, 부하불확실성및 유연성에대한 멤버십 함수치를 각 상태별로 계산하고 Bellman-Zadeh의 최대화 결정과정예따라 처리하므로써 그안을 결정하도록 했다. 또한 비선형 멤버십함수도 고려하였으며 부하의 불확실성을 고려하기위하여 3차원 격자를 사용하였다. 개발한 방법을 우리나라 실제계통을 대상으로한 사례연구를 통하여 그 유용성을 살펴보았다.

2 Fuzzy 동적계획법[5,6]

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 Fuzzy결정집합 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 x를 채택하는 것이 바람직하므로 $\mu_D(x)$ 는 임의의 해 x에대한 만족도를 의미한다고 볼 수있다. 그러므로 만족도를 최대로하는 해를 최적해로 결정하는 만족도 최적화 기준에의한 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 나타내고 있다.

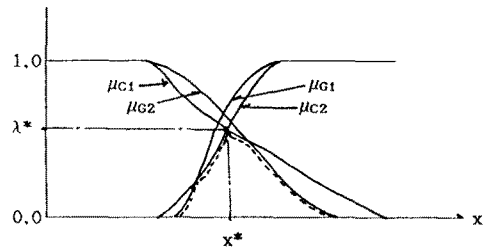


그림 1 Fuzzy 최적의사결정개념

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

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

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

$$\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_2, \dots, x_{N-1}, x_1} [\min(\mu_D(x_1), \mu_{F2}(x_2), \dots, \mu_{FN-1}(x_{N-1}), \mu_{FN}(x_N))] \quad (5)$$

단, $s_{n+1} = f(s_n, x_n) \quad n=1, 2, \dots, N-1$

f : 상태전이함수

x : 결정변수

s : 상태변수

$F = G + C$

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.

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

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

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

3. Fuzzy 동적계획법에 의한 최적전력구성문제의 해석

3.1 問題의 設定[7]

(1) 전원은 단위(Unit)별이 아니고 종별로 나누어서 각각 1기로 취급하기로한다.

(2) 전력부하는 미리 상정된 값으로한다.

(3) 고정비로는 건설비, 가변비로는 연료비만으로써 이들을 각각 헨가화한 합을 총비용으로 삼는다.

(4) 원자력은 부하추종능력이 없는 것으로하고 양수식 수력은 수급대용발전(첨두부하시) 및 잉여대용발전(기저부하시)으로 운전되는 것으로 한다.

(5) 각 전원별 전력량은 월별 대표일예대한 부하곡선에 대하여 기존의 발전시뮬레이션용[7] 실시하여 구하도록한다.

3.2 문제의 정식화

(1) 목적함수

(1.1) 경제성 평가함수

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

$$\min z_1 = \sum_{n=0}^N \sum_{i=1}^{NG} \left[\left[\frac{1+e_{gi}}{1+r} \right]^{n-1} d_{in} a_i \Delta G_{in} + \left[\frac{1+e_{fi}}{1+r} \right]^{n-1} f_{in} y_{in} \right] \quad (8)$$

$$= F(\Delta G_{in}, y_{in})$$

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

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

i : 전원종류첨자

n : 연구대상연도첨자

r : 할인율 (Discount Rate) [p.u]

e_{gi} : i 전원의 건설재료의 피상물가상승률 [p.u]

e_{fi} : i 전원의 연료의 피상물가상승률 [p.u]

a_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]

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

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

단, z_{01} : 의사결정자의 경제성예대한 지망수준[원]

(1.2) 유연성 평가함수[9]

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

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

단, F_0 : 기준안에대한 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 유연성예대한 지망수준[%]

(1.3) 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.

$$\max z_3 = \sum_{i=1}^{NG} G_{in} - L_{pn} \times 100 / L_{pn} \quad n=1 \sim N \quad (12)$$

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

$$z_3 \geq z_{03n} \quad (13)$$

단, z_{03n} : n 년도에서의 의사결정자의 공급신뢰도예대한 지망수준[%]

(2) 제약조건

(2.1) 전력수급제약조건

각 년도에서 전건설비용량이 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

(2.2) 최대부하 Fuzzy 제약조건

부하예측은 예측자가 갖는 경험, 기후나 수요측의 경제활동의 경향등의 정보에따라 주관적으로 판단되는 것으로 그 불확정성이 존재한다고 생각된다. 부하예측의 불확정성예대하여는 확률론수법을 사용한 부하예측수법이 제안되고있으나 예측자의 경험, 에너지 수요의 변화등이 적절히 반영이 안되기 때문에 확률론적방법을 사용하여 얻어진 결과가 실

제에 꼭 적절하다고는 말할 수 없다고 판단된다. 오히려 확률론방법에 의한 결과를 토대로하여 예측자의 의사결정에 의한 부하예측의 모호함을 취급하는 것이 더욱 바람직하다고 생각되어 부하예측을 Fuzzy 집합으로 취급하기로 하고 식 (14)의 최대부하 L_{pn} 에 대하여 식 (15)와 같이 Fuzzy 제약조건을 두기로 한다. 이렇게 하므로서 예측 숙련자가 갖는 우수한 예측능력을 충실히 반영할 수 있다.

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

(2.3) 기설 및 신설전원의 상호관계제약조건

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

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

(2.4) 전원설비용량의 상한한 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 멤버십함수의 설정

본 연구에서는 Fuzzy 동적계획법을 이용하므로 각 Fuzzy 함수에 대한 멤버십함수로서 비선형함수도 허용한다. 각 Fuzzy 함수에 대한 그 멤버십함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$\mu_C(x(t-1), u(t)) = e^{-W_C \Delta C(x(t-1), u(t))} \quad (18)$$

$$\mu_F(x(t-1), u(t)) = e^{-W_F \Delta F(x(t-1), u(t))} \quad (19)$$

$$\mu_R(\cdot) = \begin{cases} 1 & : \text{RES}(t) \geq \text{REQ}(t) \\ e^{W_R \Delta R(x(t-1), u(t))} & : \text{RES}(t) < \text{REQ}(t) \end{cases} \quad (20)$$

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

- 단, $\mu_C(\cdot)$: 경제성 Fuzzy 집합의 멤버십함수
- $\mu_F(\cdot)$: 유연성 Fuzzy 집합의 멤버십함수
- $\mu_R(\cdot)$: 공급신뢰도 Fuzzy 집합의 멤버십함수
- $\mu_L(\cdot)$: 예측부하 Fuzzy 집합의 멤버십함수
- $\Delta C(\cdot) = |F(x(t)) - \text{Casp}(t)| / \text{Casp}(t)$
- $\Delta F(\cdot) = |F(x(t)) - \text{Copt}(t)| / \text{Copt}(t)$
- $\Delta R(\cdot) = (\text{RES}(x(t)) - \text{REQ}(t)) / \text{REQ}(t)$
- $\Delta L(\cdot) = (L_p(x(t)) - L_{p\text{forecasted}}(t)) / L_{p\text{forecasted}}(t)$
- $\text{Casp}(t)$: t시간대에서의 비용지망수준
- $\text{Copt}(t)$: t시간대에서의 기준안의 최소비용
- $\text{REQ}(t)$: t시간대에서의 공급신뢰도 지망수준
- $L_{p\text{forecasted}}(t)$: t시간대에서의 예측부하 수준
- $\sigma_{p, u(t)} = \sigma(t) / L_{p\text{forecasted}}(t)$
- $\sigma(t)$: $L_{p\text{forecasted}}(t)$ 의 표준편차
- W_C : 경제성 멤버십함수의 가중치 계수
- W_F : 유연성 멤버십함수의 가중치 계수
- W_R : 공급신뢰도 멤버십함수의 가중치 계수
- W_L : 최대예측부하 멤버십함수의 가중치 계수

3.4 Fuzzy 동적계획법에 의한 해석방법[10]

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

$$D = C \cap F \cap R \cap L \quad (22)$$

- 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 같이 된다.

$$\mu_D(x(t)) = \max [\min \{ \mu_C(x(t-1), u(t)), \mu_F(x(t-1), u(t)), \mu_R(x(t-1), u(t)), \mu_L(x(t-1), u(t)) \} \mu_D(x(t-1))] \quad (23)$$

단, $x(t) = x(t-1) + u(t)$

$$\mu_D(x(0)) = 1.0$$

$\mu_D(\cdot)$: 결정함수 Fuzzy 집합의 멤버십함수

전원구성문제를 Fuzzy 동적계획법으로 해석하는 모습을 나타내면 그림 2와 같다.

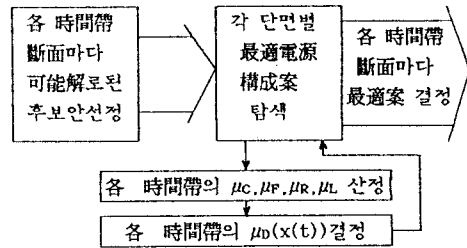


그림 2 Fuzzy 動的計劃法에 의한 電源構成問題의 解析過程

한편 동적계획법의 점화식인 식 (23)에 따라 최적결정변수를 구하기 위해서는 적절히 이산화 시킨 단계 및 상태로 이루어진 격자모양을 이용할 수 있는데 여기서는 부하의 불확실성에 대한 평가도 고려하므로 그림 3과 같은 3차원격자를 사용한다.

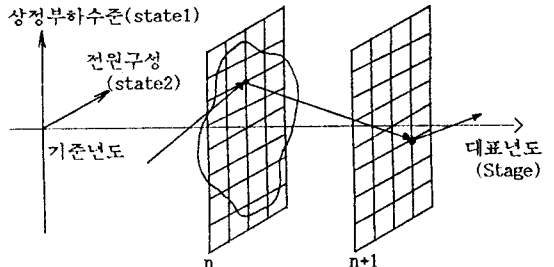


그림 3 Fuzzy 動的計劃法에 의한 격자에서 電源構成問題의 解의 탐색過程

4. 사례연구

Fuzzy 동적계획법에 의한 電源構成問題를 해석하기 위하여 표 1 및 표 2와 같은 조건아래 1991년을 초기년도 및 기준년도로 하고 5년간격으로 2006년까지 최적전원구성비를 결정하는 우리나라 KEPCO 계통에 가까운 모델계통에 적용하여 보았다.

(1) 입력자료[11][12]

각 대표년도의 최대부하, 최소부하 및 수력설비량은 표 1과 같으며 전원특성자료는 표 2와 같고, 각종 경제성 자료는 표 3과 같다.

표 1 각 대표년도에서의 최대, 최소부하와 수력설비

대표년도	최대부하 [Mw]	최소부하 [Mw]	수력 [Mw]
1991	19100	8750	1293
1996	28100	12950	1548
2001	37900	17150	1872
2006	48100	21238	2223

표 2 電源特性資料

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

전원	초기설비 용량 [Mw]	건설 단가 [만원/Kw]	건설비 실질상승률 [%]	연료비 단가 [원/Kw]	연료비 실질상승률 [%]	연 한계 경비율 [%]	한계 이용률 [%]
Nucl	7674	124.6	2	3.8	0	19	80
Coal	3752	78.7	2	14.8	1	17	60
LNG	2565	43.3	2	27.2	3	17	70
Oil	4854	65.0	2	80.0	4	17	70
P-G	1000	45.0	2	00.0	0	13	30

(2) 적용결과 및 검토

표 4는 기존의 방법에 의한 최적전원구성문제의 결과와 가장치인 $w_c=15, w_f=10, w_r=200, w_l=5.0$ 으로 하고 이번엔 개발한 방법에서의 계산 결과와 비교한 것이다. 여기서 석탄화력에 대하여 건설비가 상대적으로 비싼 원자력의 건설이 뒤로 미루어지고 있음을 알 수 있다. 이 경우 만족도인 $\lambda^*=0.875$ 였고 유연성의 정도도 $z_2^*=0.875$ 였다.

표 4 최적전원구성문제의 결과

	1991	1996	2001	2006
Nuclear	7674	11802 8430	13644 14781	14430 20202
Coal	3752	7351 10723	16327 15190	25974 20202
LNG	2565	5834 5834	6595 6595	9870 9870
Oil	4854	5700 5700	4730 4730	1674 1674
Hyd	1293	1517 1517	1820 1820	2193 2193
P-G	1060	1517 1517	2365 2365	3578 3578

(하단에있는 숫자가 본 연구에서 제안하는 방법의 결과임)

한편, 그림 4는 최대부하에 대한 감도해석을 한 결과인데 외적요인인 부하의 변화가 클수록 제안하는 방법에서의 얻어진 구성안이 경제성에서 보다 유연하게 대처하고 있음을 알 수 있으며 또한 외적 충격이 클수록 만족도와 유연성의 정도는 급격히 감소 하고 있음을 알 수 있다.

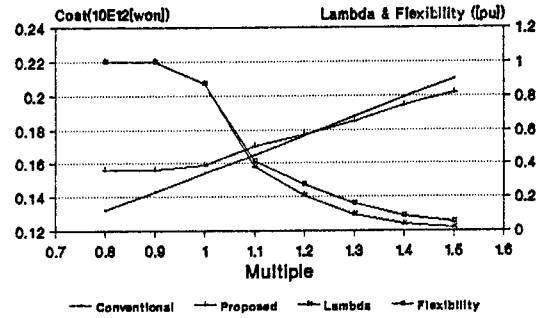


그림 4 最大負荷에 대한 感度解析

5. 結論

본 연구에서는 기존의 동적계획법에 의한 최적전원구성 수립을 위한 방법을 더욱 확장하여 퍼지 목표함수로서 허가화한 총비용함수, 예측부하 및 발전계통의 신뢰도 산정함수 외에도 유연성의 평가함수도 포함시킨 퍼지 多目的函數를 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 있으리라 기대된다. 본 방법을 우리나라 실제계에 적용하여 본 결과 불확실성이 큰 상정안에 대하여는 유연성을 지닌 구성안이 경제성은 갖지만 만족도가 급격히 떨어짐을 알 수 있었으며 부하 불확실성에 대하여는 타 불확실성 요소보다 상대적으로 유연성의 변화가 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 실제 용에 대한 각 불확실성 요소의 가치치 산정방법과 부하예측의 σ, σ_c 산정은 앞으로의 연구과제라 생각된다.

참고 문헌

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 - Quantitative Analysis for Flexible System Planning -", CIGRE SC-37, Florence, Oct. 17-20, 1989.
5. Walter J.M. Kickert, "Fuzzy Theories on Decision-Making", Martinus-Nijhoff Boston, 1978.
6. H.J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Kluwer-Nijhoff Boston, 1986, pp.220-234.
7. 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.
8. 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.
9. 田邊隆也, 等, "電源의 固定費·可變費의 不確實性を考慮した 電源 로バスト틱스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.
10. 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.
11. 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.
12. 宋吉永, 崔在錫, 南宮在錫, "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.