

애매성을 고려한 퍼지이론을 이용한 송전망확충계획에 관한 연구

트란트롱 틴, 김형철, 최재석
경상대학교

Consideration of Ambiguities on Transmission System Expansion Planning using Fuzzy Set Theory

T. Tran, H. Kim, J. Choi
Gyeongsang National University

Abstract - This paper proposes a fuzzy dual method for analyzing long-term transmission system expansion planning problem considering ambiguities of the power system using fuzzy linear programming. Transmission expansion planning problem can be formulated integer programming or linear programming with minimization total cost subject to reliability (load balance). A long-term expansion planning problem of a grid is very complex, which have uncertainties for budget, reliability criteria and construction time. Too much computation time is asked for actual system. Fuzzy set theory can be used efficiently in order to consider ambiguity of the investment budget (economics) for constructing the new transmission lines and the delivery marginal rate (reliability criteria) of the system in this paper. This paper presents formulation of fuzzy dual method as first step for developing a fuzzy Ford-Fulkerson algorithm in future and demonstrates sample study. In application study, firstly, a case study using fuzzy integer programming with branch and bound method is presented for practical system. Secondly, the other case study with crisp Ford Fulkerson is presented.

1. 서 론

전력계통 송전망 확충계획시 발전기 뿐만 아니라 송전선, 변압기, 스위치 등으로 구성되어 있는 송전망을 포함한 복합 계통이 최근 관심을 받고 있다. 송전망확충계획은 경제적, 기술적 제약조건을 충족하면서 전력시장의 성장과 발달취 기존의 송전망을 최적의 방법으로 확장 및 보강하는 것으로 정의되어 질 수 있다[1]-[2]. 그러므로 이 송전망확충계획은 신뢰도를 제약조건으로 하여 비용을 최소화하는 것이다. 분기한정법(branch and bound), 민감도분석(sensitivity analysis), Bender decomposition, 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing), 유전자 알고리즘(genetic algorithms), 타부탐색법(tabu search), 휴리스틱모델(heuristic model) 및 GRASP 등을 포함한 다양한 분석이 이 연구과제로서 연구되고 있다 [3]-[6].

본질적으로 계통 계획은 건설비용과 예산, 신뢰도 기준, 부하 예측과 계통 특성 등 많은 불확실성을 가지고 있다. 이러한 모든 불확실성을 고려하여 효율적, 실질적으로 확충계획을 하는 것은 난제라고 할 수 있다. 새로운 설비 건설시 투자 예산 및 신뢰도에 관련된 데이터베이스가 부족할 경우, 이러한 확충계획을 일반적인 통계적 방법으로 해결하기는 어렵다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기위하여 퍼지이론의 도입은 유용하고 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 전문가나 의사 결정자의 경험과 지식은 계획문제에 있어 불확실성 및 애매성을 다루는 데 매우 유용하다고 볼 수 있다. 이러한 경험은 퍼지 목적 함수 및 제약조건에 멤버쉽함수에서 반영되어 진다. 게다가 퍼지이론은 다목적 최적화문제를 다루는데 편리하다. 따라서 퍼지최적결정 정책은 의사 결정자의 만족도 정도를 최대화하는 것으로 나타낼 수 있다

[7-10].

본 연구과제에서는 분기한정법과 함께 퍼지 정수 프로그램이 제시되었다 [15-16]. 퍼지이론을 사용하여 복합계통확충계획시 퍼지쌍대법은 투자비용의 유동성 및 애매성, 예비율의 불확실성을 고려할 수 있다. 또한 본 논문은 향후 퍼지 Ford-Fulkerson 알고리즘개발을 위한 초기 단계로서 퍼지 쌍대법을 제시하고 예로서 설명하고 있다. 사례연구로서 첫째로 분기한정법(Branch and bound method)에 의한 퍼지 정수프로그램을 사용하여 실제문제에 적용하며, 다음으로 Ford-Fulkerson법을 사용하여 앞의 사례예와 비교한다.

2. 분기한정법을 이용한 퍼지 정수 프로그래밍

2.1 등가 보통 정수 프로그래밍 (The Equivalent Crisp Integer Programming problem)

기존의 확장계획의 목적함수는 식 (1)에서 새로운 송전선 투자를 위해 총 건설비 C^T 를 최소화하는 것이다 [16-17].

$$\min imize C^T = \sum_{(x,y) \in \rho} \left[\sum_{i=1}^{m(x,y)} C_{(x,y)}^{(i)} U_{(x,y)}^{(i)} \right] \quad (1)$$

단,

ρ : 모든 분기(송전선)

$m(x,y)$: 노드 x 와 y 를 연결하는 새로운 후보 분기의 수

$C_{(x,y)}^{(i)}$: 버스 x 와 y 를 연결하는 첫 번째로부터 i 번째까지 새로운 송전선 건설비의 합

$$C_{(x,y)}^{(i)} = \sum_{j=1}^i \Delta C_{(x,y)}^{(j)}$$

$\Delta C_{(x,y)}^{(j)}$: 노드 x 와 y 를 연결하는 j 번째 송전선 건설비

$U_{(x,y)}^{(i)}$: 송전선을 고려하는 결정변수 (첫 번째로부터 i 번째까지 새로운 송전선이 건설되면 1, 그렇지 않으면 0).

2.2 등가 퍼지 정수 프로그래밍과 제안된 분기한정법 (The Equivalent Fuzzy Integer Programming Problem and the Proposed Branch and Bound-Based Method)

의사결정자가 "보통" 결정을 할때 퍼지함수에서 가장 높은 멤버쉽을 선택하여야한다. 이러한 결정방법은 일반적으로 1970년 벨만과 자데(Bellman and Zadeh)의 연구 논문에서 정의되었다[7-8]. 여기서는 퍼지 건설비/예산과 예비율 제약조건하에 의사결정자의 만족도를 최대화하는 것이다. 건설비와 예비율에 관련된 불확실성과 애매성을 반영하는 멤버쉽함수들이 사용되어 진다.

$$\begin{aligned}
 & \max \text{imize } \lambda \\
 & \text{s.t. } \lambda \leq \mu_C \{P_{(x,y)}\} \\
 & \quad \lambda \leq \mu_R \{P_{(x,y)}\} \\
 & \quad \lambda \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

단,

$\mu_C(\cdot)$: 건설비 집합의 멤버쉽 함수.

$\mu_R(\cdot)$: 예비율 집합의 멤버쉽 함수

분기한정알고리즘은 많은 제약조건이 있을때 정수프로그램이 복잡한 최적화 문제의 경우에 장점을 가지고 있다. 망조류법 (network flow theory)과 최대조류-최소컷셀렘(maximum flow-minimum cut set theorem)이 최대 만족치를 갖기위한 최적의 해를 구하기 위하여 제안되어진다.

2.3 멤버쉽 함수

본 연구과제에서는 멤버쉽함수의 임계값은 기존의 계획 문제에 보통 멤버쉽 함수를 시뮬레이션 하여 결정되어진다. 여기서 사용된 멤버쉽 함수는 지수함수이다. 퍼지 건설비의 멤버쉽 함수는 다음과 같다.

$$\mu_C \{P_{(x,y)}\} = \begin{cases} 1 & \Delta C(\cdot) \leq 0 \\ e^{-W_C \cdot \Delta C \{P_{(x,y)}\}} & \Delta C(\cdot) > 0 \end{cases} \tag{3}$$

단,

$$\Delta C(\cdot) = \{C(P_{(x,y)}) - Z_C^*\} / Z_C^*$$

$C(P_{(x,y)})$: $P_{(x,y)}$ 의 건설비 [M\$]

Z_C^* : 건설비의 예산 기대치

W_C : 건설비의 예산 멤버쉽 함수에 관련된 가중치 (확신 등급)

퍼지 예비율의 멤버쉽함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu_R \{P_{(x,y)}\} = \begin{cases} 1 & \Delta R(\cdot) \geq 0 \\ e^{W_R \cdot \Delta R \{P_{(x,y)}\}} & \Delta R(\cdot) < 0 \end{cases} \tag{4}$$

where,

$$\Delta R(\cdot) = \{DMR(P_{(x,y)}) - Z_R^*\} / Z_R^*$$

$DMR(P_{(x,y)})$: $P_{(x,y)}$ 의 예비율 [p.u]

Z_R^* : 예비율 기대치

W_R : 예비율의 예산 멤버쉽 함수에 관련된 가중치 (의무허용등급).

3. 퍼지 원천과 쌍대 문제

3.1 퍼지 원천 문제 (Fuzzy Primal Problem)

A. The fuzzy primal problem

앞절에서 설명했듯이, 의사결정자가 보통 결정을 할때 퍼지함수에서 가장 높은 멤버쉽을 선택하여야한다. 이것을 "의사결정 최대화"라 하고 식 (5)에서 설명되어진다.

$$x^* = \left\{ x \mid \mu_{x^*} = \text{Max}_x \text{Min}_\mu \{ \mu_{\bar{G}}, \mu_{\bar{B}} \} \right\} \tag{5}$$

만약 목적함수 및 제약조건의 선형함수일 경우는 멤버쉽함수는 다음과 같다.

$$\mu_{\bar{G}}(C^T x) = 1 - (z_0 - C^T x) / d_0 \tag{6}$$

$$\mu_{\bar{B}}(a_i x) = 1 - (a_i - b_i) / d_i \tag{7}$$

그러므로 의사결정에 있어서 멤버쉽함수는 다음 식 (8)에서 정의되어진다.

$$\mu_{\bar{B}}(x) = \left(1 - \frac{z_0 - C^T x}{d_0} \right) \wedge \left(1 - \frac{a_{ix} - b_i}{d_i} \right) \wedge \Lambda \wedge \left(1 - \frac{a_{mx} - b_m}{d_m} \right) \tag{8}$$

식(8)은 식(9)에서처럼 기존의 보통선형프로그래밍 형태로 정식화하면

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{Maximize } \tilde{z} = \alpha^T x \\
 & \text{Sub. to } D\bar{x} \leq \beta \\
 & \quad \bar{x} \geq 0
 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Where,

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ M \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ M \\ x_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ M \\ x_n \\ x_{n+1} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} C^T & 1 \\ a_1 & 1 \\ a_2 & 0 \\ M & M \\ a_m & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ M \\ c_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} -Z_0 \\ b_1 \\ M \\ b_m \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ M \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2n} \\ M & M & M & M \\ a_{m1} & a_{m2} & \Lambda & a_{mn} \end{bmatrix}$$

3.2 퍼지 쌍대 문제

퍼지 식 (9)의 퍼지 원천문제에 관한 퍼지 쌍대문제는 식(10)로 정식화 할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{Minimize } & \tilde{g} = \beta^T y \\ \text{Sub.to } & D^T y \geq \alpha \\ & y \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

단,

D^T 는 D 의 전치행렬

β^T 는 β 의 전치행렬

y 는 집합 X 의 가변 요소 거울영상 집합

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \\ y_{m+1} \end{bmatrix}$$

4. 사례연구

계통 확장계획을 위한 애매성을 고려한 사례연구로서는 63 버스를 가진 방사선 형태의 실험계통이 조사되었다. 조사된 계통의 부하는 7147 MW로 부터 8433 MW로 증가되었고 발전 용량은 7647 MW로부터 9135 MW로 증가되었다. 새로운 부하량과 발전용량은 표 1과 2에서 보여주고 있다.

표 1 현상태의 부하와 예상 부하
Table 1 Load Demand at Status and Focasted load

Load Bus	Original Load [MW]	New Load [MW]	Increasing Load [MW]
Bus 25	350	550	200
Bus 32	101	201	100
Bus 44	105	305	200
Bus 46	125	525	400
Bus 61	270	656	386
Other Buses	6196	6196	0
Total	7147	8433	1286

표 2 현 발전량과 증가된 발전량
Table 2 Generation Capacity Installed, Capacity Expansion

Generation Bus	Original generation [MW]	New Generation [MW]	Increasing Capacity [MW]
Bus 3	325	625	300
Bus 12	157	607	450
Bus 14	627	771	144
Bus 16	275	419	144
Bus 17	215	665	450
Other Buses	6050	6050	0
Total	7649	9135	1488

4.1 보통정수프로그래밍과 퍼지정수프로그래밍 (Usingcrispandfuzzyintegerprogramming)

표3은 건설비 최소화 하는 보통정수프로그래밍을 이용한 방법과 의사결정자의 만족도를 최소화하는 퍼지정수프로그래밍과 비교평가한 것을 보여주고 있다. 그림 1의 점선은 새로운 송전선과 추가된 변압기를 나타낸다.

표 3 보통정수프로그래밍과 퍼지정수프로그래밍의 결과
Table 3 Results Of The Crisp With Total Cost Minimization And Fuzzy Cases With The Maximization Of The Satisfaction Level Of Decision Maker

Cases	Solution	Total Cost (MS)	Comp. Time*
Crisp	TF ₄₂₋₄₆ ¹ , TF ₅₉₋₁₉ ¹ , T ₄₋₃₅ ¹ , T ₄₋₃₅ ² , T ₄₋₃₅ ³ , T ₃₅₋₃₀ ¹ , T ₂₄₋₂₀ ¹ , T ₂₄₋₅₉ ¹ , T ₅₇₋₂₃ ¹ , T ₉₋₂₃ ¹ , T ₁₂₋₂₁ ¹ , T ₁₅₋₁₉ ¹	1290	4Hours
Case FI	TF ₄₂₋₄₆ ¹ , TF ₃₋₉ ¹ , T ₄₋₃₅ ¹ , T ₄₋₃₅ ² , T ₄₋₃₅ ³ , T ₃₅₋₃₀ ¹ , T ₂₄₋₂₀ ¹ , T ₂₄₋₅₉ ¹ , T ₅₇₋₂₃ ¹ , T ₉₋₂₃ ¹ , T ₁₂₋₂₁ ¹	1330	4Hours

(* : Pentium 4 and 2.6GHz)

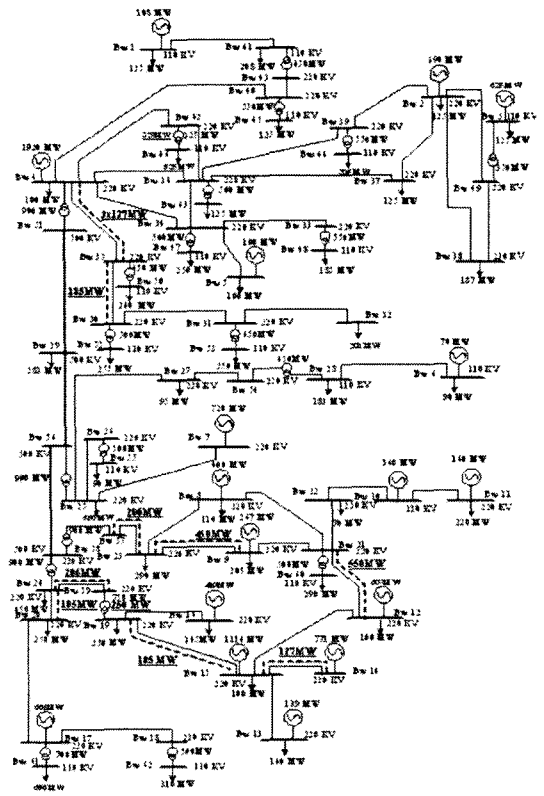


그림 1 퍼지 사례의 송전망확장계획의 구성

Fig.1. The configuration of the transmission system expansion planning of the fuzzy case

4.2 보통정수프로그래밍과 퍼지정수프로그래밍
(Using primal-dual method (Ford-Fulkerson algorithm))

다음으로 원천 쌍대 선형 프로그래밍을 이용한 포드-퍼켈슨 알고리즘(Ford-Fulkerson algorithm)을 보여준다 [11,12]. 그림 2는 포드-퍼켈슨 알고리즘(Ford-Fulkerson algorithm)의 흐름도를 나타내며 고속의 계산시간을 보여주고 있다.

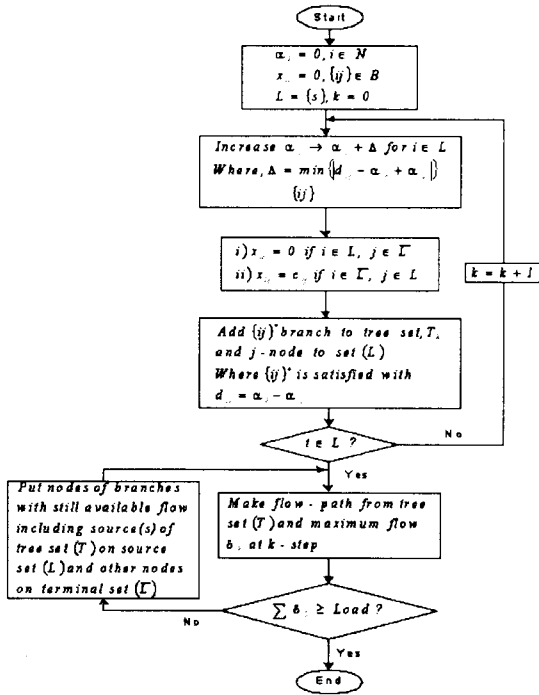


그림 2 포드-퍼켈슨 알고리즘 흐름도
Fig.2 Flow chart of Ford-Fulkerson Algorithm

표4은 건설비 최소화 하는 포드-퍼켈슨법을 이용한 방법을 보여주고 있다. 그림 3의 점선은 새로운 송전선과 추가된 변압기를 나타낸다. 포드-퍼켈슨법의 결과는 퍼지정수 프로그래밍과 유사한 결과를 보여주고 있다.

표4 총비용을 최소화하는 정수프로그래밍법의 결과
Table 4 Results Of The Crisp With Total Cost Minimization

Cases	Solution	Total Cost (M\$)	Comp. Time*
Crisp	TF ₄₂₋₄₆ ¹ , TF ₃₋₄₉ ¹ , TF ₅₇₋₅₈ ¹ , T ₄₋₃₅ ¹ T ₄₋₃₅ ² , T ₄₋₃₅ ³ , T ₃₅₋₃₀ ¹ , T ₂₄₋₂₀ ¹ , T ₂₄₋₅₉ ¹ , T ₅₇₋₂₃ ¹ , T ₉₋₂₃ ¹ , T ₉₋₂₃ ² , T ₉₋₂₃ ³ , T ₁₂₋₂₁ ¹	1148.2	5min

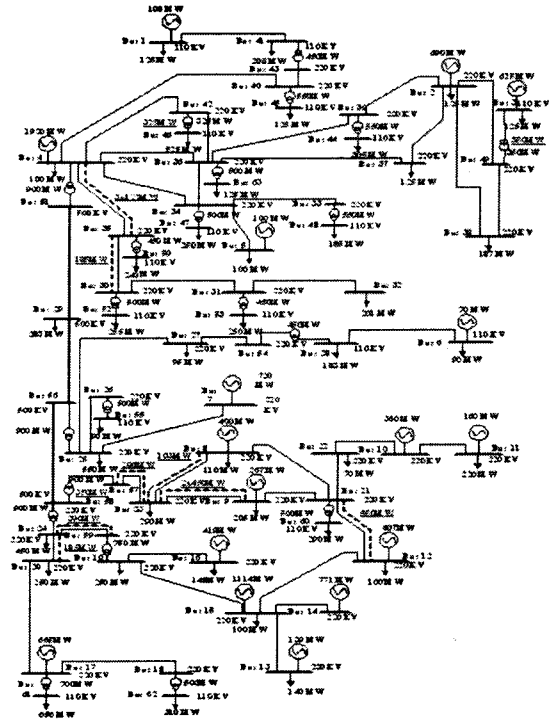


그림 3 포드-퍼켈슨법의 송전망확충계획의 구성
Fig. 3. The configuration of the transmission system expansion planning of the crisp Ford-Fulkerson

5. 결 론

본 연구과제에서는 장기 송전망 계획을 위한 퍼지쌍대선형법을 제시했다. 여기서는 퍼지선형 프로그래밍을 이용하여 전력계통의 애매성을 고려하였다. 송전망 확충 계획 문제는 계통신뢰도(부하 밸런스)라는 제약조건하에 총비용을 최소화하는 정수프로그래밍이나 선형 프로그래밍으로 정식화할 수 있다. 이러한 문제는 건설비용과 예산, 신뢰도 표준, 부하 예측과 계통 특성 등 많은 불확실성을 가지고 있다. 게다가 실제계통에서는 너무 많은 계산시간이 소요된다. 퍼지이론은 새로운 송전망건설에 관한 투자예산(경제성)과 계통의 예비율(신뢰성)의 애매성을 효과적으로 고려할 수 있다. 첫 단계로서 본 논문은 퍼지 쌍대법을 제시하고 있다. 다음단계로 고속 퍼지 포드-퍼켈슨법이 개발중이다. 본 연구과제에서는 사례연구로서 분기한정법을 이용한 퍼지선형프로그래밍이 실제계통에서 적용되었다. 또한 보통 포드-퍼켈슨법이 적용되었는데 실제계통에서 퍼지 정수 프로그래밍과 비슷한 결과를 보여주었다. 퍼지 포드-퍼켈슨법의 개발은 향후 과제에 남아있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에 의한 기초전력연구원의(과제번호:R0405)지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [1] Wang, J.R. McDonald, *Modern Power System Planning*, McGraw-Hill Book Company, 1994.
- [2] M. Ilic et al., *Power systems restructuring: Engineering and Economics*, Kluwer Academic Pub., 1998.
- [3] Kilyoung Song, Jaeseok Choi; "A Study on Minimum Cost Expansion Planning of Power System by Branch and Bound Method", *KIEE*, Vol. 33, No. 1, pp. 9-16, Jan. 1984(Korean written).
- [4] Javier Contreras and Felix Wu; "A Kernel-Oriented Algorithm for Transmission Expansion Planning", *IEEE, Trans. on PS*, Vol.15, No.4, pp.1434-1440, Feb. 1983.
- [5] Risheng Fang and David J. Hill, " A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets" *IEEE, Trans. on PS*, vol.18, no.1, pp.374-380, Feb. 2003.
- [6] Latorre-Bayona, G.; Perez-Arriaga, I.J , "CHOPIN, a heuristic model for long term transmission expansion planning", *IEEE Transactions on* ,Volume: 9 ,4 ,1994 Pages:1886 1894
- [7] H.J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications* Kluwer Academic, Boston, 1986.
- [8] Masatoshi Sakawa, *Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization* Plenum Press, New York, 1993.
- [9] B.E. Gillett, *Introduction to Operations Research: A Computer-Oriented Algorithmic Approach*, McGraw-Hill, 1976.
- [10] James P. Ignizio and S. C. Daniels, "Fuzzy Multi-criteria Integer Programming Via Fuzzy Generalized Networks" *Fuzzy Sets and System*, Vol.10, pp.261-270. 1975.
- [11] L.R. Ford and D.R. Fulkerson, *Flow in Network*, Princeton University Press, 93-172, 1974.
- [12] Kazuhiro Takahashi, *Power Systems Engineering*, Corona Pub. Co., 1977 (written by Japanese).
- [13] R. Bellman, L.A. Zadeh, *Decision Making in Fuzzy Environment*, *Mgt.Sc.17*,pp. B 141-164, 1970.
- [14] Jaeseok Choi, Hongsik Kim, Seungpil Moom and Junzo Watada; "A Study on the Transmission System Expansion Planning using Fuzzy Branch and Bound Method", *ICAIET02*, June 17-18, 2002, Kota Kinabalu, Malaysia, pp.636-640.
- [15] Trungtin Tran, Sungrok Kang, Jaeseok Choi , Roy Billinton and A. A. El-keib,"A Study on Transmission System ExpansionPlanning on the Side of Highest Satisfaction Level of Decision Maker", *IFAC03*, Sep. 16-18, 2003, Seoul, Korea.
- [16] Kazuhiro Takahashi, *Power Systems Engineering*, Corona Pub. Co., 1977 (written by Japanese).
- [17] T.OKADA and Y.KAWAI, "Expansion planning of Power Systems with Stepwise Cost Characteristics" *JIEEJ*, Vol.90, No.8, pp.166-174, Aug.1970. (written by Japanese)