2001년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집 (2001.11.16~17)

Fuzzy 정수계획법을 이용한 송전망의 확충계획에 관한 연구

김 홍 식* 문 승 필 이 영 진 최 형 림 최 재 석
국립경상대학교 전기공학과

A Study on the Transmission System Expansion Planning using Fuzzy Integer Programming

Hongsik Kim* Seungpil Moon Youngjin Lee Hyonglim Choi Jaeseok Choi*
Gyeongsang National University

Abstract - This study proposes a new method for the transmission system expansion planning using the fuzzy integer programming. It presents stepwise cost characteristics analysis which is a practical condition of an actual systems. A branch and bound method which includes the network flow method and the maximum flow - minimum cut set theorem has been used in order to proceed the stepwise cost characteristics analysis. Uncertainties of the permission of the construction cost and not strict reserve rate and load forecasting of expansion planning have been included and also processed using fuzzy set theory in this study. In order to proceed the latter analysis, the solving procedure is illustrated in detail by branch and bound method which includes the network flow method and maximum flow-minimum cut set theorem. Finally, case studies on 21-bus test system show that the algorithm proposed is efficiently applicable to the practical expansion planning of transmission systems in future.

1. 서 론

전력계통확충계획에서 고려해야 할 몇 가지 조건으로는

Load forecasting
System Characteristic
Reliability
Economical efficiency

등을 들 수 있으나 이들을 한꺼번에 고려해서 확충계획을 수립하기는 현실적으로 쉬운 일이 아니다. 최근, 우리나라에서 발전사업자가 6개로 한국전력에서 분리되고, 송전계통 망을 기존의 한국전력이 담당하는 등, 전력산업구조개편이 활발히 진행되고 있는 상황에서 앞으로 송전계통망의 적절한 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통망이 요구하는 임의의 신뢰도 설정기준을 만족하는 확충계획을 수립하도록 하는 프로그램의 개발이 필요하다고 생각된다. 한편, 전력계통계획은 미래에 대한 정책결정문제이므로 수많은 불확실성을 변수를 가지는데 이중 가장 큰 애매성을 갖는 변수로는 투자비용 및 신뢰도 기준 확보 그리고 부하 불확실성 등을 들 수 있다. 이에 본 연구에서는 불확실성을 수학적으로 나타낼 수 있는 Fuzzy 이론에 의거한 Fuzzy 정수계획법을 이용하여 건설비(경제성) 및 송전계통의 공급전달능력여유율(신뢰성)등을 고려한 송전계통 확충계획을 얻기 위한 새로운 방법을 제시하였다. Fuzzy 이론을 이용할 경우 계통에 대한 불확실성 자료들을 충분히 D/B구축화 할 때까지 한시적으로나마 계통 불확실성을 고려한 계획안을 얻을 수 있을 것으로 사료되어진다. 모의계통에 대한 사례연구를 통하여 본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 살펴보았다.

2. Fuzzy 정수계획법

일반적으로 송전망의 확충계획 문제는 어느 송전선로를 확충하는가를 결정하는 문제이므로 {0,1}정수계획문제이다. 송전망의 확충계획 문제를 퍼지 정수계획법으로 정식화 하기에 앞서 먼저 일반적인 정수계획문제를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$\left.\begin{array}{l} maximize\ (minimize\ )\ \mathbf{F(x)} \\ sub.to\ \ \mathbf{Ax} \le \mathbf{b} \\ \qquad \mathbf{x} = \{0,1\} \end{array}\right\} \quad (1)$$

단, $\mathbf{x}$: 결정변수벡터
$\mathbf{F}$: 목적함수 계수행렬(q×n)
$\mathbf{A}$: 제약조건 계수행렬(p×n)
$\mathbf{b}$: 제약조건 상수벡터

그러나 문제를 만족도 최대화를 지향하는 것으로 하고 식 (1)의 목적함수가 퍼지 목표값 $\mathbf{z}_0$라는 지망수준을 목표로 하며 제약조건도 퍼지 제약으로 주어지는 것으로 하면 식 (1)은 식 (2)와 같은 퍼지 정수계획문제로 된다.

$$\left.\begin{array}{l} \mathbf{F(x)} \lesssim \mathbf{z}_0 \ (\text{퍼지목표}:q) \\ \mathbf{Ax} \lesssim \mathbf{b} \ (\text{퍼지제약}:p) \\ \mathbf{x} = 0,1 \ (0,1\text{제약}:n) \end{array}\right\} \quad (2)$$

이 문제의 최적해 $\mathbf{x}^*$는 만족도를 최대로 하는 해를 최적해로 결정하는 만족도 최대화 기준에 따르는 퍼지최적의사결정법에 의하면 식 (3)의 해로 구해진다.

$$\begin{aligned} &\max_{x\ge 0}[\min\{\min_{i=1,\dots,q} \mu_i(\mathbf{F(x)}) \min_{i=1,\dots,q} \mu_i(\mathbf{Ax})\}] \\ &= \max_{x\ge 0}[\min_{i=1,\dots,p+q} \mu_i(\mathbf{B(x)})] \end{aligned} \quad (3)$$

단, max와 min는 *maximum* 과 *minimum*을 나타내는 약자임
$\mu_i(\cdot)$: i번째 퍼지부등식에 대한 멤버쉽함수

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{F(x)} \\ \mathbf{Ax} \end{bmatrix}$$

또한, 이 문제에 대하여 만족도를 나타내는 매개변수 λ를 도입하면 식 (3)은 식(4)와 같은 수리계획문제로 등가화된다.

$$\left.\begin{array}{ll} maximize & \lambda \\ sub.to & \lambda \le \mu_i(\mathbf{B(x)}) \\ & \mathbf{x} = \{0,1\} \\ & \lambda \ge 0 \end{array}\right\} \quad (4)$$

이 문제는 수리계획법에 의한 최적화 알고리즘에 의해 해결될 수 있다. 여기서 i번째 퍼지 부등식의 허용폭을 $d^{(i)}$로 하고 그 멤버쉽함수 $\mu_i(\mathbf{B(x)})$를 식 (5)와 같이 선형식으로 표현되는 것으로 하면 식 (4)는 식 (6)처럼 정식화된다.

$$\mu_i(\mathbf{Bx}) = \left\{\begin{array}{ll} 1 & (\mathbf{B(x)})_i \le b_i' \\ 1-\{(\mathbf{B(x)})_i \le b_i'\}/d^{(i)} & b_i' < (\mathbf{B(x)})_i \le b_i' + d^{(i)} \\ 0 & b_i' + d^{(i)} < (\mathbf{B(x)})_i \end{array}\right\} \quad (5)$$

$$\left.\begin{array}{ll} maximize & \lambda \\ sub.to & \lambda \le 1-\{(\mathrm{B(x)})_i - b_i'\}/d^{(i)} \\ & \mathbf{x} = \{0,1\} \\ & \lambda \ge 0 \end{array}\right\} \quad (6)$$

식(6)은 통상적인 정수계획법 문제 형태이므로 Implicity Enumeration 법이나 Cutting법 또는 Branch and Bound법과 같은 기존의 응용프로그램에 의해 처리될 수 있다.

3. 송전계통 확충문제

3.1 네트워크 모델링

실제 전력계통을 그대로 사용하면 용량을 갖고있는 발전소, 변전소, 부하점등이 절점으로 표시되어서 공급지장상황을 검토하기에 어려운점이 많다. 그러나 발전소, 변전소, 부하점을 그와 등가의 용량을 갖는 지로로 표시하고, 발전소의 총집합점을 유입점(Source)s, 부하의 총집합점을 유출점(Sink)t, 그리고 각 지로들을 서로 연결해서 구성되는 네트워크 표현을 사용하면 쉽게 공급지장상황을 알 수 있다. 또한, 전력계통의 공급지장상황을 몇 가지 종류별로 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 전력계통의 유형별 공급지장 상황

Fm=L≤G	공급지장없음
Fm=L〈G	발전력부족
Fm〈L≤G	송전용량부족
Fm〈L〈G	발전력 및 송전용량부족

단, Fm:네트워크의 최대유량
G: 총 발전력
L: 총부하전력

3.2 확충계획의 정식화

전력계통이 공급지장을 일으키지 않기 위해서는 최대유량-최대절단정리에 의해 다음식이 모든 $X \subseteq N$에 대해서 만족해야 한다.

$$P_c(X,\overline{X}) \ge L \qquad (s \in X, t \in \overline{X}) \quad (7)$$

여기서, $P_c(X,\overline{X})$는 유입점(Source)s와 유출점(Sink)t를 분리하는 지로의 집합인 $(X,\overline{X})$의 컷셋유량이며, N은 절점전부의 집합이고 X는 N의 부분집합, $\overline{X}=N-X$이다.
이러한, 컷셋의 성질을 기초로 해서 이 문제를 정식화하면 다음과 같은 정수계획법(IP)의 문제로 될 것이다.

(1) 목적함수(건설비의 최소화)

$$Min\, C^T = \sum_{(x,y)\in B} \left[\sum_{i=1}^{m(x,y)} C^i_{(x,y)} U^i_{(x,y)}\right] \quad (8)$$

건설비에 대한 의사결정자의 퍼지 지망수준을 z_c^*라고 하면 식(9)와 같이 퍼지목표로 정식화된다.

$$C^T \lesssim z_c^* \quad (9)$$

(2) 제약조건

$$\sum_{(x,y)\in(x_k,\bar{x}_k)} \left[P^{(0)}_{(x,y)} + \sum_{i=1}^{m(x,y)} P^{(i)}_{(x,y)} U^i_{(x,y)}\right] \ge L \quad (10)$$

그리고 또한, 송전계통의 공급전달능력에 대한 퍼지 제약함수를 식(11)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\sum (P_{(x,y)} - L) \times 100/L \gtrsim z_R^* \quad (11)$$

여기서 사용한 변수 및 기호는 다음과 같다.

$$C^{(i)}_{(x,y)} = \sum_{j=1}^{i} \Delta C^{(j)}_{(x,y)} \quad (12)$$

$$P^{(i)}_{(x,y)} = \sum_{j=1}^{i} \Delta P^{(j)}_{(x,y)} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{m(x,y)} U^i_{(x,y)} = 1 \quad (14)$$

$$U^i_{(x,y)} = \left[\begin{array}{ll} 1, & P_{(x,y)} = P^{(0)}_{(x,y)} + P^{(i)}_{(x,y)} \\ 0, & P_{(x,y)} \ne P^{(0)}_{(x,y)} + P^{(i)}_{(x,y)} \end{array}\right. \quad (15)$$

$$P_{(x,y)} = P^{(0)}_{(x,y)} + \sum_{i=1}^{m(x,y)} P^{(i)}_{(x,y)} U^{(i)}_{(x,y)} \quad (16)$$

단, L: 총부하량
$\Delta C^{(j)}_{(x,y)}$:지로 (x, y)의 j번째 병렬요소의 설비비
$\Delta P^{(j)}_{(x,y)}$:지로 (x, y)의 j번째 병렬요소의 용량
k : 컷셋 번호(=1, 2, 3 ···,n)
B : 전지로의 집합
$m(x,y)$:(x, y)의 신증설 요소의 수

3.3 일반적인 정수계획법으로의 등가화

식(8)에서부터 식(11)까지 퍼지 문제로 정식화된 송전계통망 확충 문제를 해석하기 위하여 식(4)와 같은 등가화된 정수계획법을 이용하면 식(17)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\left.\begin{aligned} & maximize \quad \lambda \\ & sub.\,to \quad C^T + d_1\lambda \le z_c^* + d_1 \\ & \Sigma(P_{(x,y)} - L)\times 100 + d_2\lambda \ge z_R^* + d_2 \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

단, d_i: i번째 퍼지부등식의 멤버쉽함수의 허용폭

본 연구에서는 식(17)을 제약조건이 많을수록 유리하다고 알려져 있는 Branch and Bound법을 이용하여 처리하였다.

4. 멤버쉽함수

건설비에 대한 퍼지집합의 멤버쉽함수는 식(18)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu_c\{P_{(x,y)}\} = \begin{cases} 1 & :\Delta C(\cdot) \le 0 \\ e^{-Wc\ \Delta C\{P_{(x,y)}\}} & :\Delta C(\cdot)\rangle 0 \end{cases} \qquad (18)$$

단, $\mu_c(\cdot)$:건설비에 대한 퍼지집합의 멤버쉽함수

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

$Casp$:건설비에 대한 지망수준

W_C : 경제성 멤버쉽함수의 가중치 계수

$C(P_{(x,y)})$: $P_{(x,y)}$의 건설비

공급전달능력여유율에 대한 퍼지집합의 멤버쉽함수는 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_r\{P_{(x,y)}\} = \begin{cases} 1 & :\Delta R(\cdot) \ge 0 \\ e^{Wr\ \Delta R\{P_{(x,y)}\}} & :\Delta R(\cdot) < 0 \end{cases} \qquad (19)$$

단, $\mu_r(\cdot)$: 공급전달여유율 퍼지 집합의 멤버쉽함수

$\Delta R(\cdot) = \{RES(P_{(x,y)} - Rasp(t)\}/Rasp(t)$

$Rasp$: 송전계통의 공급전달여유율 지망수준

W_r: 공급전달여유율 멤버쉽함수의 가중치 계수

$RES(P_{(x,y)})$: $P_{(x,y)}$의 여유율

5. 사례연구

본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 살펴보기 위해 그림 1과 같은 21모선 모의계통에 적용하여 보았다. 이 계통의 용량 및 비용입력자료는 표 2에 나타낸 것과 같다. 여기서 신증설하는 송전선 및 변압기의 경우 회선수를 최고 4개까지 고려하도록 해놓았다. 표 2의 입력자료에서 GN, TF, TL, LD는 각각 발전기, 변압기, 송전선로 및 부하를 나타낸다. 표 3은 의사결정자의 만족도 최대화를 가지는 경우의 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 Z_c 와 Z_r은 각각 건설비와 송전계통의 공급전달여유율의 지망수준을 나타내고 있으며, W_c와 W_r은 건설비와 공급전달능력여유율의 지수함수형인 멤버쉽함수에 대한 가중치를 의미한다.

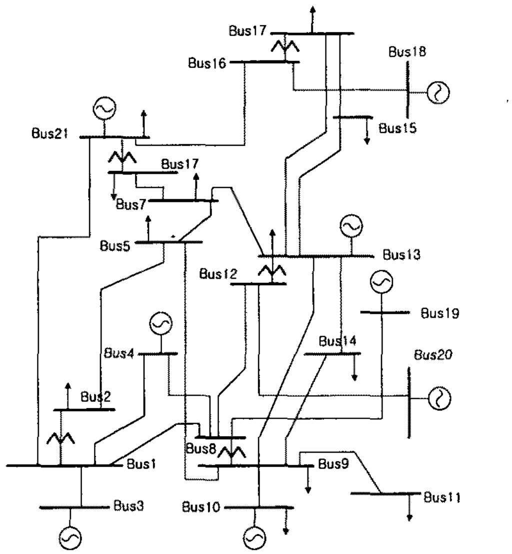

그림 1. 모의계통(21모선)

표 2. 용량 및 비용 입력자료

NL	SB	EB	ID	P(0)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	C(0)	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)
1	1	4	GN	850.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2	1	22	GN	900.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3	1	5	GN	850.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4	1	11	GN	900.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
5	1	21	GN	1200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
6	1	19	GN	850.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
7	1	14	GN	760.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
8	1	20	GN	950.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
9	7	22	TF	1020.	510.	510.	0.	0.	0.	132.	132.	0.	0.
10	17	18	TF	1020.	510.	510.	0.	0.	0.	124.	124.	0.	0.
11	13	14	TF	1020.	510.	510.	0.	0.	0.	123.	130.	0.	0.
12	9	10	TF	800.	800.	0.	0.	0.	0.	155.	0.	0.	0.
13	2	3	TF	800.	800.	0.	0.	0.	0.	151.	0.	0.	0.
14	2	2	TL	500.	500.	500.	0.	0.	0.	29.	29.	0.	0.
15	3	6	TL	220.	220.	0.	0.	0.	0.	54.	0.	0.	0.
16	2	5	TL	300.	300.	0.	0.	0.	0.	73.	0.	0.	0.
17	2	9	TL	400.	400.	0.	0.	0.	0.	70.	0.	0.	0.
18	2	4	TL	1000.	250.	250.	250.	250.	0.	20.	20.	20.	20.
:							:					:	
:							:					:	
35	16	18	TL	220.	220.	0.	0.	0.	0.	80.	0.	0.	0.
36	14	15	TL	220.	220.	0.	0.	0.	0.	80.	0.	0.	0.
37	22	23	LD	785.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
38	7	23	LD	750.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
39	3	23	LD	850.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
40	10	23	LD	595.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
41	11	23	LD	17.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
42	12	23	LD	550.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
43	15	23	LD	190.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
44	14	23	LD	710.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
45	16	23	LD	450.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
46	18	23	LD	870.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
47	8	23	LD	290.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
48	6	23	LD	70.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

표 3. 의사결정자의 만족도 최대화를 가지는 경우의 결과

Case	Zc	Wc	Zr	Wr	Solution	Total branches	Trans. Cost [M$]
<Case F1> 투자비 제약조건이 엄격한경우	300	20	15%	5	$T_{1\text{-}21}^1$, $T_{1\text{-}4}^1$, $T_{13\text{-}15}^1$, $T_{8\text{-}19}^1$ $T_{9\text{-}11}^1$	201	294
<Case F2> 신뢰도 제약조건이 엄격한경우	370	5	17%	20	$T_{1\text{-}21}^1$, $T_{1\text{-}21}^2$, $T_{1\text{-}4}^1$, $T_{13\text{-}15}^1$, $T_{8\text{-}19}^1$, $T_{9\text{-}11}^1$	1018	383
Case F1과 Case F2의 절충안일 경우	315	15	15%	15	$T_{1\text{-}21}^1$, $T_{1\text{-}4}^1$, $T_{13\text{-}15}^1$, $T_{8\text{-}19}^1$ $T_{9\text{-}11}^1$	316	294

여기서, Case F1은 송전계통의 공급전달능력여유율인 15%의 신뢰도 기준보다 확보된 투자비인 예산 300[M$]를 엄격히 지켜야 하는 경우이며, Case F2는 투자비예산은 370[M$]로 충분히 확보되어 있으나 대신 송전계통의 신뢰도 기준인 공급전달능력여유율의 17%를 엄격히 지켜야 되는 계획안을 수립하고 싶은 경우이다. 끝으로 Case F3는 Case F1과 Case F2의 절충안으로 확보된 투자비 예산 315[M$]와 요구하는 신뢰도 기준 15%를 지켜야하는 계획안을 얻기를 원하는 경우이다. Fuzzy 정수계획법에 의하여 얻어진 각 경우별 최적해의 투자비와 신뢰도 수준을 보이면 표 4와 같다. 예상되는 바와 같이 Case F1은 엄격한 투자비 때문에 294[M$]로 제한되고 있으며 설비투자가 적으므로 공급전달능력여유율도 14.738%로 제한되고 있음을 알 수 있다. 그러나 Case F2는 넉넉한 투자비 예산확보로 엄격히 요구하는 신뢰도 기준 17%를 상회하는 17.186%를 가질수 있는 계획안이 얻어졌으며 이때 투자비는 383[M$]임을 알 수 있다. 투자비와 신뢰도 기준 모두를 만족하고 싶은 Case F3의 경우에는 Case F1과 Case F2의 투자비들의 중간수준으로 Case F1과 같은 신뢰도 수준을 갖는 안이 최적안으로 얻어졌다. 이를 통해 Fuzzy 이론을 이용할 경우 사정상 계통에 대한 불확실성 자료들의 D/B구축이 충분히 되지 못한 경우에서도 D/B구축이 이루어 질 때까지 한시적으로나마 계통의 불확실성 및 의사결정자의 만족도까지 살펴볼 수 있는 계획안을 얻을 수 있음을 알 수 있으며 차후 앞으로 이의 실계통적용에 대한 연구가 기대된다.

표 4 복합전력계통의 투자비와 공급전달능력여유율 및 만족도 수준

Cases	HLI [%]	HLII [%]	Sat. Level
Case F1	18.492	14.738	0.916
Case F2	18.492	17.186	0.839
Case F3	18.492	14.738	0.770

참고로, Case F1 경우의 전력계통 송전망 확충계획에 따른 결과를 나타내면 그림 2와 같다. 그림에서 점선(---)으로 표시된 송전선로 확충해야할 송전선로를 의미한다.

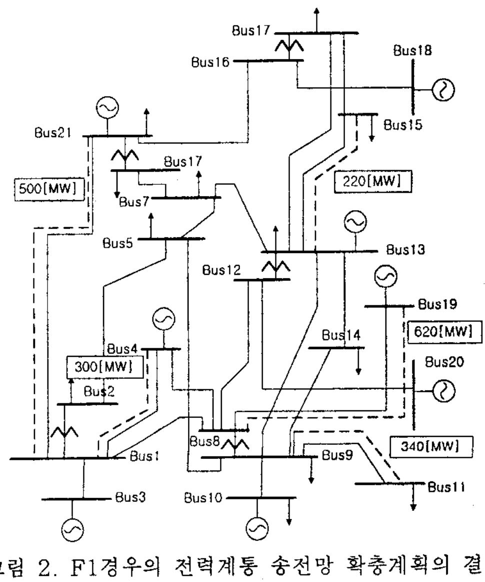

그림 2. F1경우의 전력계통 송전망 확충계획의 결과

3. 결 론

전력계통계획은 미래에 대한 정책결정문제이므로 수많은 불확실성의 변수를 갖는다. 이중 가장 큰 애매성을 갖는 변수로는 투자비용 및 신뢰도 기준확보 그리고 부하 불확실성 등이다. 본 연구에서는 투자비와 신뢰도 기준의 불확실성을 고려한 송전계통 확충계획을 얻기위해 Fuzzy 정수계획법을 이용하여 건설비(경제성) 및 송전계통의 공급전달능력여유율(신뢰성)등을 고려한 송전계통 확충계획을 얻기 위한 새로운 방법을 모의계통에 적용하여 그 유용성을 살펴보았다. Fuzzy 이론을 이용할 경우 계통에 대한 자료들이 충분히 D/B구축이 되지 못한 경우에서도 D/B구축이 이루어 질 때까지 한시적으로나마 계통의 불확실성 및 의사결정자의 만족도까지 살펴볼 수 있는 계획안을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안하는 송전망의 확충계획에 관한 방법을 이용하여 전력산업구조개편이 활발히 진행되고 있는 상황에서 계통망의 확충계획 및 운용을 위하여 송전계통 망의 요구하는 신뢰도 설정기준을 만족하는 확충계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료되어지며 차후 본 연구를 바탕으로 하여 실계통적용에 대한 연구가 기대되어진다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호: 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임

[참 고 문 헌]

[1]Wang, J.R. McDonald, *Modern Power System Planning*, McGraw-Hill Book Company, 1994.
[2] H.J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications* Kluwer Academic, Boston, 1986.
[3] Masatoshi Sakawa, *Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization* Plenum Press, New York, 1993.
[4] 송길영, 최재석, "분기한정법에 의한 전력계통의 최소비용 확충계획에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 33~1~2호, pp9~16, 1984.
[5] 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.
[6]Jaeseok Choi, Hongsik Kim, Seungpil Moon and Junzo Watada, "A Study on the Composite Power Systems Expansion Planning using Fuzzy Set Theory" ISIS 2001 Conference, pp171-175, Daejeon, Aug. 24-25, 2001.
[7] 대한전기학회 전력계통연구회,"송전망 계획의 방법론", 대한전기학회 1988년도 춘계학술대회 전문강좌논문집, 1988년 4월.