FUZZY정도를 고려한 전압-무효전력제어에 관한 연구

송 길영 * 조 준우 * 이 희영 **
* : 고려 대학교 ** : 전주공업전문대학

A Study on the Voltage - Reactive Power Control Considering Fuzziness

K. Y. SONG * J. W. CHO * H. Y. LEE **
* : KOREA UNIVERSITY ** : JEONJU TECHNICAL COLLEGE

A B S T R A C T

This paper presents a voltage - reactive power control algorithm considering fuzziness. In this paper, a coordination technique based on fuzzy set theory is applied for system loss - voltage compromises. Here , we introduce membership functions to measure the adaptability of real power loss of transmission line and the deviation of load bus voltage from the constraints. Then the optimization of problem is solved by a linear programming technique considering the fuzzy set theory. The objective is a degree of satisfaction about the fuzzy decision - making function. The effectiveness of this algorithm has been verified by testing on sample systems.

1. 서 론

전력계통에 있어서 전압-무효전력제어의 목적은 무효전력원을 적절히 재배분하여 허용범위 내로 부하모선전압을 유지하고 계통손실을 감소시켜 최적의 계통운용을 실현하는 데 있다. 이와같은 문제에 대해 최근 FUZZY이론중의 하나인 FUZZY수리계획법을 이용한 전압-무효전력제어 방법등이 발표되고 있다. 본 논문에서는 전압-무효전력제어의 최적화문제에 FUZZY 선형계획법을 적용하고 있는데, FUZZY 이론의 MEMBERSHIP함수를 이용하여 전압은 허용폭이내로 유지하고 송전손실을 최소로 하는데 있어서 운용자의 경험과 의사를 반영하는 최적화 수법을 제안한다. 여기서는 또한 확정적인 제약을 이용하여 실행가능해를 구할 수 없는 경우, 종래의 방법으로는 제약조건의 수치를 수정하여 시행착오적으로 반복계산을 해야 한다는 단점이 있는데, 제안된 방법에서는 그러한 제약조건 대신 FUZZY제약을 설정할 수 있기 때문에 제약을 뛰어넘는 해를 구할 수 있다. 그리고 이것은 가능한 한 제약에 대한 이탈량이 작게 되는 최적화를 실행할수 있기 때문에 유용성을 보장할 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법을 WARD-HALE 6-모선 계통과 IEEE 14-모선 계통에 적용하여 그 유용성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

전압-무효전력제어 문제를 선형계획법을 써서 다음과 같이 정식화 한다.

$$\text{Minimize} \quad \Delta P_L(U) = C^T \Delta U \tag{1}$$
$$\text{Subject to} \quad J(U,X) = 0 \tag{2}$$
$$\Delta X^{min} \le A\Delta U \le \Delta X^{max} \tag{3}$$
$$\Delta U^{min} \le \Delta U \le \Delta U^{max} \tag{4}$$

여기서 C^T는 손실감도계수, A는 계통특성정수, U는 제어변수벡터(변압기 탭,발전기 단자전압,병렬콘덴서)이며, X는 상태변수벡터(부하모선전압)이다. 본 논문에서는 (1)식의 목적함수로 계통손실을 택하였으며, (2)식은 전력조류 방정식, (3)식과 (4)식은 제어 및 상태변수의 제약조건이다.

2.2 목적함수

(1)식의 유효전력손실 ΔP_L을 행렬형식으로 나타내면

$$\Delta P_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial T_{ij}} & \frac{\partial P_L}{\partial V_m} & \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{ij} \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \tag{5}$$

m+x : 병렬콘덴서 설치모선

손실감도계수 C^T는 전압-무효전력 제어설비를 단위량 조작할 경우 전력계통의 유효전력손실에 미치는 영향을 나타내는 것으로서 아래와 같은 Newton-Rapson법의 Jacobi행렬로부터 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ J^t \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} \tag{6}$$

2.3 제약조건

제어 및 상태변수에 대한 상하한치는 (7)식과 같다.

$$\begin{aligned} V_i^{min} &\le V_i \le V_i^{max} \\ T^{min} &\le T \le T^{max} \\ Q_g^{min} &\le Q_g \le Q_g^{max} \\ Q_c^{min} &\le Q_c \le Q_c^{max} \end{aligned} \tag{7}$$

(7)식을 증분형태로 하면 (8)식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_i^{min} &\le \Delta V_i \le \Delta V_i^{max} \\ \Delta T^{min} &\le \Delta T \le \Delta T^{max} \\ \Delta Q_g^{min} &\le \Delta Q_g \le \Delta Q_g^{max} \\ \Delta Q_c^{min} &\le \Delta Q_c \le \Delta Q_c^{max} \end{aligned} \tag{8}$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta V_i^{max} &= V_i^{max} - V_i \quad , \quad \Delta V_i^{min} = V_i^{min} - V_i \\ \Delta T^{max} &= T^{max} - T \quad , \quad \Delta T^{min} = T^{min} - T \\ \Delta Q_g^{max} &= Q_g^{max} - Q_g \quad , \quad \Delta Q_g^{min} = Q_g^{min} - Q_g \\ \Delta Q_c^{max} &= Q_c^{max} - Q_c \quad , \quad \Delta Q_c^{min} = Q_c^{min} - Q_c \end{aligned} \tag{9}$$

2.4 계통특성정수

계통특성정수는 전압-무효전력 제어설비의 조작에 의한 계통내의 전압-무효전력의 변화를 정량적으로 표시해 주는 것으로서 Newton-Raphson법을 이용한 조류계산의 수정방정식에 L.R.C Tap에 관한 전력방정식을 포함시켜 구할수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta T \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{10}$$

(10)식의 jacobi행렬에 역행렬을 취한 후 분할·조작하여 제어변수항을 우변으로, 상태변수항을 좌변으로 정리하면 계통특성정수를 얻을 수 있다.

2.5 FUZZY LP 에 의한 최적화 과정

FUZZY 선형계획법은 통상의 선형계획문제의 목적함수와 제약조건식에 FUZZYINESS를 도입한 경우에 대한 FUZZY 최적화 법이다. FUZZY 선형계획법은 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C^T X \gtrsim Z_0 \qquad (11)$$

$$AX \lesssim B \qquad (12)$$

(11)식은 목적함수의 값을 대략 Z_0이상으로 하고 싶다는 것을 의미하는 FUZZY 부등식이고 (12)식은 AX를 대략 B이하로 억제하고 싶다는 FUZZY 부등식을 의미한다.
(1)~(4)식에 나타낸, 전압-무효전력제어 문제에 제안하는 방법인 FUZZY선형계획법을 도입하면 제약과 목적에 대한 만족도 λ를 최대화하는 문제로 변형된다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} \quad \lambda \\ &\text{Subject to} \quad J(U,X) = 0 \\ &\qquad C^T \Delta U \le Z_0 + \delta_0 \\ &\qquad \Delta X^{min} - \Delta\delta \le A\Delta U \le \Delta X^{max} + \Delta\delta \\ &\qquad \Delta U^{min} \le \Delta U \le \Delta U^{max} \\ &\qquad 0 \le \lambda \le 1 \end{aligned} \qquad (13)$$

λ : 만족도
$\Delta\delta$: 부하모선전압에 대한 허용변동폭 벡터
Z_0 : 계통손실에 대한 지망수준 (Aspiration Level)
δ_0 : 계통손실에 대한 허용변동폭

2.6 MEMBERSHIP함수

본 논문에서 제안하는 FUZZY 선형계획법에서 계통손실과 부하모선전압의 제약에 대한 MEMBERSHIP함수를 그림 1,그림 2, 그림 3 과 같이 설정한다.
이 함수는 각 목적이 목표하는 바에 대한 운용자의 만족도를 정량화한 식이다. 여기서 목적함수가 나타내는 값은 이 3가지 MEMBERSHIP함수를 협조시켜 구한 해를 운용자가 만족하는 정도이다. d_i는 완전하게 제약을 만족시키는 점으로서 목적함수와 제약식의 값을 대략 d_i로 하고 싶다는 일종의 지망수준이고 완전하게 제약을 만족시키지 못하는 점은 $d_i \pm \delta_i$ 이고 δ_i가 허용변동폭이 된다. 예를 들어 그림 1의 경우에

$$\begin{aligned} &f_i(X) \ge d_i + \delta_i \quad , \ \mu_{fi(x)} = 0 \\ &d_i < f_i(X) < d_i + \delta_i \quad , \ 1 > \mu_{fi(x)} > 0 \\ &f_i(X) \le d_i \quad , \ \mu_{fi(x)} = 1 \end{aligned} \qquad (14)$$

MEMBERSHIP함수에는 1차(선형)함수외에도 정접쌍곡선형함수가 있는데, 그림 4 에서 보는 것처럼 $\mu_{fi(x)} \le 1/2$ 에서 아래로 볼록 $\mu_{fi(x)} \ge 1/2$ 에서 위로 볼록이다. 이것은 「 다소 제약을 넘는 것은 허용되지만 너무나 크게 넘지 않는 것이 좋다 」 라는 의미가 된다. 이들 MEMBERSHIP함수들은 원래의 제약의 부등호의 방향에 따라 다소 식이 달라진다.

선형형 MEMBERSHIP함수

① $\gtrsim$ 일때

$$\mu_{fi(x)} = \frac{f_i(X) - (d_i - \delta_i)}{\delta_i} \qquad (15)$$

② $\lesssim$ 일때

$$\mu_{fi(x)} = \frac{(d_i + \delta_i) - f_i(X)}{\delta_i} \qquad (16)$$

정접쌍곡선형 MEMBERSHIP함수

① $\gtrsim$ 일때 (17)

$$\mu_{fi(x)} = \frac{1}{2}\tanh\left[\left[f_i(X) - \left[d_i - \frac{\delta_i}{2} \right] \right] \right] \alpha_i + \frac{1}{2}$$

② $\lesssim$ 일때 (18)

$$\mu_{fi(x)} = \frac{1}{2}\tanh\left[\left[\left[d_i + \frac{\delta_i}{2} \right] - f_i(X) \right] \right] \alpha_i + \frac{1}{2}$$

여기서 $\tanh^{-1}(2\lambda-1) = \omega$, $\alpha_i = 6/\delta_i$

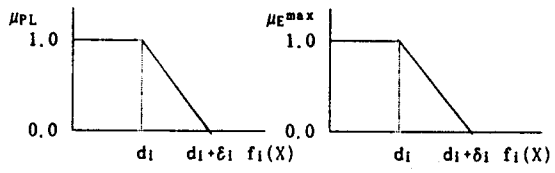

그림 1 ΔP_L과 부하모선전압의 상한에 대한 MEMBERSHIP함수

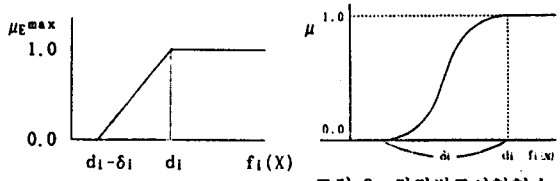

그림 3 정접쌍곡선형함수

그림 2 부하모선전압의 하한에 대한 MEMBERSHIP함수

2.7 MEMBERSHIP함수의 수정

계통운용자의 경험과 의지를 토대로 하여 MEMBERSHIP함수를 변경해주면 여러개의 목적 가운데 원하는 목적에 중점을 두는 최적해가 구해질 것이다.
예를 들어 부하모선전압의 제약에 대한 MEMBERSHIP함수의 허용변동폭을 넓히고 계통손실에 대한 MEMBERSHIP함수를 엄격히 하면 부하모선전압에 대한 제약보다는 계통손실에 더 중점을 둔 최적해가 얻어짐이 예상된다.

3. 계산 알고리즘

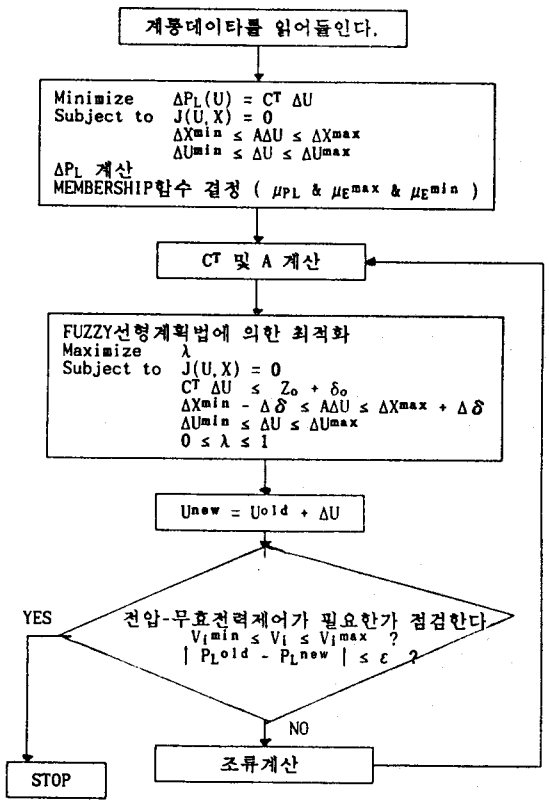

그림 4 FLOW CHART

4. 적용예 및 결과분석

본 연구에서 제시한 FUZZY정도를 고려한 전압-무효전력제어 방법의 효용성을 입증하기 위하여 여러가지 경우에 대하여 사례연구가 수행되었으며 그중에서 대표적인 사례의 결과를 제시한다. 그림 5 는 사례연구 대상계통인 WARD-HALE 6-모선 계통과 IEEE 14-모선 계통의 단선도이다.
실행과정과 결과를 간략히 설명하면 다음과 같다.

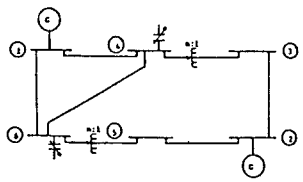

그림 5 WARD-HALE 6-모선 계통의 단선도

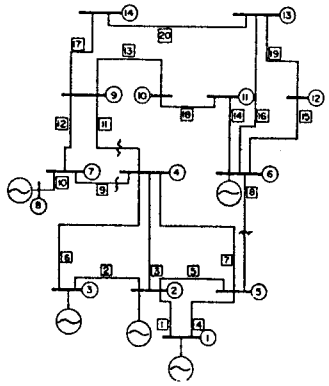

그림 6 IEEE 14-모선 계통의 단선도

4.1 WARD-HALE 6-모선 계통에 대한 결과

BASE CASE LOAD FLOW 를 실시해 보면 $V_4 = 0.9227$, $V_5 = 0.9135$, $V_6 = 0.9110$ 의 전압문제가 계통에 발생하고, 계통 손실은 10.493 MW 이다. 제안하는 방법이 이러한 상태를 개선하기 위해 적용된다. 부하모선전압의 제약은 $0.95 \le V_i \le 1.05$ 로 두었다. FUZZINESS를 도입하지 않은 전압-무효전력제어에서의 ΔP_{Loss} 값에 따라 손실의 지망수준을 설정하고, 손실의 허용변동폭은 지망수준의 배로 잡는다.[5]
부하모선전압의 허용변동폭은 0.01~0.02 로 변화시켰다.
단, 앞으로 언급하는 기존의 방법이란 FUZZY이론을 적용하지 않은 방법을 말한다. 본 논문에서는 FUZZY이론을 적용하지 않은 방법으로 전압-무효전력제어를 실시한 다음, 이 결과와, FUZZY이론을 적용해서 MEMBERSHIP함수를 다양하게 변화시켜 가며 제어를 실시한 결과를 비교하였다.
CASE 1 과 CASE 2 는 선형형 MEMBERSHIP함수를 사용했고,
CASE 3 는 정접쌍곡선형 MEMBERSHIP함수를 사용했다.
또한 각각의 경우에 대해 운용조건을 바꿔 가며 전압-무효전력제어를 실시하였다.

CASE 1 - 1, 2, 3, 계통손실에 대한 지망수준을 상승시켜 (5,10,15,20,25 %, 26%이상 상승시켰을 때는 발산했다.) 계통손실에 대한 MEMBERSHIP함수를 엄격하게 하고 부하모선전압에 대해서는 상한치와 하한치에 대해서 0.02만큼씩 더 여유를 두어 (허용변동폭) 부하모선전압제약을 완화했다. (δ_E=0.02)

CASE 2 - 1, 2, 부하모선전압에 대한 허용변동폭을 CASE 1 보다 좁혀 부하모선전압제약을 엄격하게 하고 (δ_E=0.01, 0.012) 계통손실에 대한 지망수준을 낮춰 계통손실의 MEMBERSHIP함수를 완화시켰다.(-10,-20,-30,-40%) -10 ~ -30%는 -40%로 잡은 것보다 손실은 감소되나 전압에 대한 효과에 있어서는 -40%보다 많이 떨어졌다.

CASE 3, 정접쌍곡선형 MEMBERSHIP함수를 사용하고, 계통손실에 대한 지망수준을 상승시켰다.
(5%, 6%이상 상승시키면 발산했다)

표 1. WARD_HALE 계통의 BASE CASE 時와 V·Q 제어후의 각 모선전압과 계통손실 (MW)

모선번호	제어前	기존의 방법	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 3
1	1.05	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
2	1.10	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
3	0.9936	1.0500	1.0505	1.053	1.0380	1.0031	1.0331
4	0.9227	0.9900	0.9950	0.9930	1.0001	1.0060	0.9940
5	0.9135	1.0393	1.0224	1.0270	1.0041	1.0160	1.0405
6	0.9110	0.9671	0.9770	0.9740	0.9860	0.9850	0.9700
P_L	10.493	8.6889	8.6443	8.6551	8.7034	8.7508	8.6752
Z_0	·	·	+25 %	+20 %	-40 %	-40 %	+ 5%
δ_E	·	·	0.02	0.02	0.012	0.01	0.02

Z_0 : 손실에 대한 지망수준 변화 δ_E : 부하모선 전압의 허용변동폭

각각의 반복계산에서 수렴 tolerance는 0.05 MW 이다.
CASE 1-1 과 CASE 1-2 는 전압의 허용변동폭은 고정시키고, 손실의 지망수준을 달리 해 가며 비교한 것 이고, CASE 2-1 과 CASE 2-2 는 손실의 지망수준을 고정시키고, 전압의 허용변동폭을 변화시켜 가며 비교한 것이다. CASE 1, CASE 2 와 CASE 3 는 MEMBERSHIP함수의 종류를 달리 해서 비교해 보았다.

4.2 IEEE 14-모선 계통에 대한 결과

부하모선전압 허용을 $0.97 \le V_i \le 1.05$ 로 잡고 계통손실을 줄이는 전압-무효전력제어를 실시했다. 계통손실의 지망수준을 ΔP_{Loss} 의 5%만큼 상승시키고 손실의 허용변동폭은 지망수준의 배로 잡았다. 부하모선전압의 상한치와 하한치에 대해서 0.005~0.015의 허용변동폭을 두었는데, 허용변동폭을 변화시킴에 따라 여러가지 다른 해를 구할 수 있었고, 계통손실의 지망수준에 대해서는, 5% 이상을 상승시켰을 때 실행가능해를 구할 수 없었다. 표 2. 에는 나타내지 못 했지만 CASE 2-1 에서 δ_E 를 0.015 로 두었을때 계통손실은 13.309 MW로 되어 δ_E=0.008로 했을 때보다 더 줄어드는 효과가 있었다.
사례연구를 MEMBERSHIP함수를 달리해서 실시했는 데 CASE 1 에서는 선형형 MEMBERSHIP함수를 사용했고, CASE 2 에서는 정접쌍곡선형 MEMBERSHIP함수를 사용했다. 또 각각의 CASE 에 대해서 MEMBERSHIP함수를 변화시켜 운용조건을 바꿔 보았다. CASE 1-1 과 CASE 2-1 에서는 부하모선전압의 허용변동폭을 넓혔고, CASE 1-2 과 CASE 2-2에서는 부하모선전압의 허용변동폭을 좁혀 보았는 데 MEMBERSHIP함수의 형태에 따라 여러 다른 해를 구할 수 있었다.

표 2. IEEE 14-모선계통의 BASE CASE時와 V.Q 제어후의 각 모선전압과 계통손실 (MW)

모선번호	제어前	기존의 방법	CASEE 1-1	CASE 1-2	CASE 2-1	CASE 2-2
1	1.05	1.0840	1.0840	1.0980	1.0920	1.0840
2	1.02	1.050	1.050	1.0490	1.050	1.050
3	1.01	1.0340	1.0340	1.0283	1.0420	1.0450
4	0.9817	1.0088	1.0099	1.0128	1.0180	1.0120
5	0.9825	1.0149	1.0168	1.0161	1.0250	1.0184
6	1.01	1.0440	1.0440	1.0390	1.0490	1.0440
7	0.9950	1.0498	1.0503	1.0342	1.0522	1.0515
8	1.01	1.0440	1.0440	1.0460	1.05	1.0440
9	0.9785	1.0363	1.0369	1.0211	1.038	1.0380
10	0.9760	1.0330	1.0330	1.0191	1.0350	1.0342
11	0.9890	1.0348	1.0351	1.0253	1.0390	1.0356
12	0.9929	1.0301	1.0302	1.0244	1.0350	1.0300

13	0.9860	1.0264	1.0265	1.0198	1.0310	1.0266
14	0.9620	1.0196	1.020	1.0079	1.0226	1.0210
P_L	14.686	13.5771	13.5160	13.65840	13.46356	13.6722
Z_0	·	·	+ 5 %	+ 5 %	+ 5 %	+ 5 %
δ_E	·	·	0.008	0.005	0.008	0.005

Z_0 : 손실에 대한 지망수준 변화 δ_E : 부하모선 전압의허용변동폭

각각의 반복계산에서 수렴 tolerance는 0.05 MW 이다.
IEEE 14-모선 계통의 결과도 표 2. 에서 나타나는 것처럼 WARD_HALE 계통의 결과와 비슷한 형태를 보여준다.
총괄적으로 설명하면, 손실에 대한 지망수준을 상승시키면, 전압은 허용폭에서 약간 벗어나지만 손실이 줄어드는 효과를 얻을 수 있었고, 계통손실에 대한 지망수준을 낮춰 잡고, 전압의 제약을 엄히 하면 전압은 규정치의 가운데로 들어와 부하모선전압이 상하한의 중간에 위치하게 되는 결과를 얻게 되어 전압의 질이 좋아졌다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.
1. 전력계통의 송전손실을 최소화하는 기존의 전압-무효전력제어에서는 모선전압이 제약식의 상한으로 가는 경향이 있었는데, 본 논문에서 FUZZY정도를 고려했을 때에는 모선전압이 상하한의 중간에 위치하게 되어 전압의 질이 향상되는 효과를 얻을 수 있었다.
2. 계통운용자의 경험과 의지에 의해 MEMBERSHIP함수를 변경함으로써 전력계통운전상태의 변화에 대해 유연한 제어를 가능하게 하였다.
3. 계통운용자의 만족도를 여러가지 형태의 MEMBERSHIP함수로 수치화함으로써 애매한 평가의 의사결정을 할 수있었다.
4. 차후 ,계통운용자의 경험을 DATA BASE화하여 이를 본 연구와 연결시켜보다 다양한 운전상태에 대해 유연한 전압-무효전력제어를 할 수 있도록 본 연구를 확대.발전시킬 예정이다.

참고 문헌

[1] 송 길영 : "전력계통의 해석및 운용" 등일출판사 1989
[2] 송 길영 ,이 희영 : "손실감도계수를 이용한 전압-무효전력 순시제어에 관한 연구","고려대학교 생산기술 연구소 논문집" 통권 제 18호 1983. 6
[3] 本多中二 , 大里有生 : "FUZZY工學 入門" 海文堂 1989
[4] H.J. Zimmermann : "FUZZY Set Theory and Its Applications" 1985
[5] 寺澤誠則 , 岩本伸一 :"FUZZY數理計劃法을 利用한 最適潮流計算法" 電學論 , 108卷 5號 , pp 197 - 204
[6] 田畑富郎 , 安全惠一郎 , 横山隆一 , 新村隆英 "電壓·無效電力 運用에 對한 FUZZY 協助法의 適用" PE-90-140 , pp 61 - 70
[7] K.R.C. Mamandur & R.D. Chenoweth "Optimal Control of Reactie Power flow for Improvement in Voltage profiles and for Real Power Loss Minimization" IEEE Trans.Vol. PAS-100, No. 7 pp 3185-3194 , July , 1981
[8] M.A. PAI : "Computer Techniques in Power System Analysis" 1979
[9] G.W. Stagg & A. El-Abiad : "Computer Method in Power System Analysis", McGraw-Hill Book Company , 1968