

Fuzzy 다목적 선형계획법을 이용한 최적 무효전력 배분계획에 관한 연구

A Study on the Optimal VAR planning Using Fuzzy Linear Programming with Multi-criteria Function

宋 吉 永* · 李 喜 永**
(Kil-Yeong Song · Hee-Yeong Lee)

Abstract - Fuzzy L. P. with Multi-criteria function is adopted in this VAR planning algorithm to accomplish the optimization of conflicting objectives, such as the amount of the VAR installed and power system loss, while keeping the bus voltage profile within an admissible range. Fuzzy L. P. with Multi-criteria function, a powerful tool dealing with the fuzziness of satisfaction levels of the constraints and the goal of objective functions, enables us to search for the solutions which may contribute in VAR planning. This advantage is not provided by traditional standardized L. P. The effectiveness of the proposed algorithm has been verified by the test on the IEEE-30 bus system.

Key Words : · VAR Planning (무효전력 배분계획) · Fuzzy Liner Programming (퍼지 선형계획법)
Milti-criteria Function (다목적 함수) · Expert System (전문가 시스템)

1. 서 론

무효전력 배분문제에 있어서 목적함수로 주로 채택하는 계통 손실과 VAR설치량은 경제성과 직결되는 중요한 요소이기 때문에 양자를 함께 고려

하는 것이 더욱 경제성면에서 유리한 해를 얻을 수 있다. 그러나 이 두가지는 상호 경합하는 특성을 지니기 때문에 어느 하나를 개선 시키면 다른 한쪽이 그만큼 희생 될 수밖에 없어 종래의 수리 계획법을 이용한 방법[1~3]에서는 이러한 복수개의 목적을 동시에 취급하여 바람직한 해를 얻기가 곤란하였다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 H.J. Zimmermann의 다목적

*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正 會 員 : 全州工專 電子計算科 助教授 · 工博

接受日字 : 1992年 4月 6日

1次修正 : 1992年 8月 1日

선형계획법[4]을 무효전력 배분계획문제에 도입하여 주어진 제약조건하에서 두개의 경합하는 목적 함수, 즉 계통손실과 무효전력 설치량을 최적화 대상으로 삼아 Fuzzy목표를 고려한 다목적 무효전력 배분계획에 관한 알고리즘을 제시 하였다. 본 알고리즘에서는 ① 부하의 불확실성을 고려한 상태에서 결정되는 부하모선 전압을 허용범위내로 유지 하도록 하되 ② 인간이 갖는 판단의 애매성을 고려하여 목적함수와 제약조건에 선형의 membership함수를 도입하여 의사결정자의 fuzzy 목표를 만족 시킬 수 있도록 하므로써 종래의 방법[1~3]에 비해 보다 유연성 있는 계획을 입안 할 수 있도록 하였다. 제시한 방법은 IEEE-30계통[5]에 적용하여 그 유효성을 증명 하였다.

2. 본 론

2.1 Fuzzy 다목적 선형계획법

k 개의 선형 목적함수 $g_i(i=1, \dots, k)$ 가 존재하는 다목적 선형계획문제는 다음식과 같이 정식화 된다[4].

$$\begin{aligned} & \text{minimize}(g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_k(\mathbf{x})) & (1) \\ & \text{subject to } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

단,

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{x}) &: \mathbf{c}_i \mathbf{x}_i (i=1, \dots, k) \\ c_i &: (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}) (i=1, \dots, k) \\ \mathbf{x} &: (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ A &: m \times n \text{의 행렬} \end{aligned}$$

상기 문제에서 제약조건에 애매성을 두어 「가능하면 b 이하가 되도록」한다는 주관적인 fuzzy제약을 두고, 각 목적함수 $g_i(\mathbf{x})$ 에 대한 의사결정자의 지망수준(달성목표)을 L_i 로 정하여 목적함수에 fuzzy목표를 부여할 수 있다. 따라서 fuzzy목표는 제약조건의 일종이 된다. fuzziness를 의미하는 기호 \approx 를 이용하면 식(1)은

$$\begin{aligned} & \text{fuzzy목표 } (g_1(\mathbf{x}) \approx L_1, g_2(\mathbf{x}) \approx L_2, \dots, \\ & \quad \quad \quad g_k(\mathbf{x}) \approx L_k) \\ & \text{fuzzy제약 } \mathbf{Ax} \approx \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq 0 & (2) \end{aligned}$$

단,

$$\approx : \text{fuzzy 부등호(「너무 초과해서는 안됨」의 뜻)}$$

으로 표현된다. 목표와 제약에 대한 membership 함수를 μ_G, μ_C 라하면 Bellman의 fuzzy결정 D 는 fuzzy목표와 fuzzy제약의 적집합 으로서 그

membership함수는

$$\mu_D(\mathbf{x}) = \min\{\mu_G(\mathbf{x}), \mu_C(\mathbf{x})\} \quad (3)$$

로 정의된다[4, 6]. 또한 결정 기준으로서 fuzzy결정집합에 소속되는 정도를 최대로 하는 \mathbf{x} 를 선택하고 이것을 $\lambda^* = \max \mu_D(\mathbf{x})$ 라 정의 하면

$$\lambda^* = \max \min\{\mu_G(\mathbf{x}), \mu_C(\mathbf{x})\} \quad (4)$$

을 만족하는 $(\lambda^*, \mathbf{x}^*)$ 를 선택하는 것이다. λ^* 는 fuzzy제약과 fuzzy목표에 대한 만족도가 된다. 보다 일반적인 형태로서 k 개의 복수목표 및 m 개의 제약조건이 존재하는 문제로 확장시킬 경우 식(3)은

$$\mu_D(\mathbf{x}) = \min\{\mu_{G1}(\mathbf{x}), \mu_{G2}(\mathbf{x}), \dots, \mu_{Gk}(\mathbf{x}), \mu_{C1}(\mathbf{x}), \mu_{C2}(\mathbf{x}), \dots, \mu_{Cm}(\mathbf{x})\} \quad (5)$$

이 된다. 따라서 복수개의 목적을 감안하여 식(2)를 정리하면

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \approx \mathbf{d} \quad (6)$$

단,

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= [g_1(\mathbf{x})g_2(\mathbf{x}) \dots g_k(\mathbf{x})\mathbf{Ax}]^T \\ \mathbf{d} &= [L_1 \ L_2 \dots L_k \ \mathbf{b}]^T \end{aligned} \quad (7)$$

로 되고, 식(7)에 있어서 제 i 번째의 fuzzy제약에 대한 membership함수를 $\mu_{fi}(\mathbf{x})$, fuzzy영역의 변동폭을 δ_i 로하면 membership함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \mu_{fi}(\mathbf{x}) = 0, & f_i(\mathbf{x}) > d_i + \delta_i \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 < \mu_{fi}(\mathbf{x}) < 1, & d_i < f_i(\mathbf{x}) \leq d_i + \delta_i \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mu_{fi}(\mathbf{x}) = 1, & f_i(\mathbf{x}) \leq d_i \end{cases} \quad (10)$$

여기서 확장적인 제약이 존재하는 경우에는 $\delta_i = 0$ 으로 놓고 fuzzy제약에 포함시키면 된다. 식(4), 식(8~10)로 부터 fuzzy수리 계획법은 다음의

$$\text{maximize } \lambda \quad (11)$$

$$\text{subject to } \lambda \leq \mu_{fi}(\mathbf{x}) (i=1, 2, \dots, k+m) \quad (12)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$\mathbf{x} \geq 0$$

선형계획문제로 귀착되어 최적화 알고리즘으로 풀수 있다.

2.2 fuzzy다목적 선형계획법에 의한 무효전력

배분 문제의 정식화

본 연구에서는 부하의 불확실성을 고려하기 위하여 부하 모선의 지정치를 정규분포형태[2, 7]로 가정한다. 또한 무효전력 배분의 경제적 부하배분

(ELD)을 통해 유효전력 최적배분이 이뤄진 후에 실시한다는 가정하에, 화물조류계산[7]에 의해 구해진 각 부하 모선의 전압 크기분포를 허용폭 이내로 유지 시키면서 계통 손실, 혹은 무효전력원 최소화할 도모할 수 있는 각 부하모선에서의 무효전력 설치량을 구하는 문제로 정식화한다. 이하의 기술에 이용한 제량은 다음과 같이 정의한다.

- $g(\cdot)$: 전력 수급방정식을 나타내는 벡터함수
- x : 모선전압 V 의 크기분포[7](정규분포)
- Q_c : 신설하게 될 무효전력원 설비
- S_v : Q_c 에 대한 x 의 감도행렬
- S_L : Q_c 에 대한 유효전력 손실의 감도행렬
- min, max, o : 하한, 상한 및 초기치

제약조건

$$g(x, Q_c) = 0 \tag{13}$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \tag{14}$$

$$Q_c^{\min} \leq Q_c \leq Q_c^{\max} \tag{15}$$

최소화 하는 목적함수로는 다음 식(16), 식(17)과 같은 계통의 유효 전력 손실이나, VAR설치량을 채택한다.

목적함수

$$F_1 = f(x(Q_c)) \rightarrow \text{최소화} \tag{16}$$

$$F_2 = f(Q_c) \rightarrow \text{최소화} \tag{17}$$

전술한 식(13)을 초기 조류상태를 중심으로 선형화 시키고 감도 행렬 S_v, S_L [1, 3]를 계산하여 제약조건 식(14), 식(15) 및 목적함수 식(16), 식(17)을 다음과 같은 형태로 표시한다.

제약조건

$$\Delta x^{\min} \leq S_v \Delta Q_c \leq \Delta x^{\max} \tag{18}$$

$$\Delta Q_c^{\min} \leq Q_c \leq \Delta Q_c^{\max} \tag{19}$$

단,

$$\Delta x^{\min} : x^{\min} - x^o$$

$$\Delta x^{\max} : x^{\max} - x^o$$

$$\Delta Q_c^{\min} : Q_c^{\min} - Q_c^o$$

$$\Delta Q_c^{\max} : Q_c^{\max} - Q_c^o$$

$$\Delta x : \text{전압분포 } x \text{의 변화분 벡터}$$

$$\Delta Q_c : \text{무효전력원 } Q_c \text{의 변화분벡터}$$

목적함수

$$f_1(x(\Delta Q_c)) = S_L^T \Delta Q_c \rightarrow \text{최소화}[3] \tag{20}$$

$$f_2(\Delta Q_c) = \sum_{i=1}^m \Delta Q_{ci} \rightarrow \text{최소화} \tag{21}$$

여기서 식(18)의 Δx^o '는 화물분포로 주어지며 이 화물제약 조건식은 다음 형태로 간략하게 표시할 수 있다.

$$S_v' \Delta Q_c \leq b' \tag{22}$$

단,

$$b' = [\Delta x^{\min} \quad -\Delta x^{\max}]^T$$

$$S_v' = [S_v \quad -S_v]^T$$

한편 부하모선의 지정치를 정규분포로 가정하였으므로 식(22)는 제약조건 식의 우측이 정규분포항을 갖는다. 이와같이 제약조건식에 화물분포항이 존재하는 식(22)에 Chance constraint method [9]를 도입하면

$$\sum S_v'_{ij} \Delta Q_{cj} \leq E(b'_i) + ka_i \sqrt{\text{var}(b'_i)} \tag{23}$$

단,

E : 평균치

ka_i : 정규분포의 백분위수 값

var : 분산

와 같은 결정론적 제약식으로 등가변환 된다. 여기서 식(19)와 식(23)의 제약조건 하에서 단일목적함수 식(20), 식(21)을 최소화하는 문제로 정식화된 무효전력 배분계획 문제를 이번에는 fuzzy협조에 의한 다목적 문제로 최적화하기 위하여 우선 계통손실과 무효전력 설치량에 대한 목적함수를 다음과 같이 표현한다.

fuzzy목표

$$f \Delta Q_c \approx d' \tag{24}$$

단,

$$f = [S_L^T \quad U^T]$$

$$d' = [d'_1 \quad d'_2]^T \tag{25}$$

$$U = [11 \dots 1]^T (m \text{행 벡터})$$

여기서 d'_1, d'_2 는 계통손실과 무효전력 설치량의 목표치를 의미한다.

제약조건 식(19), 식(23)에 fuzzy성을 부여하면

fuzzy제약

$$S \Delta Q_c \approx b \tag{26}$$

$$S = [S_v' \quad U^T - U^T]$$

$$b = [b' \Delta Q_c^{\max} \Delta Q_c^{\min}]^T$$

$$b'_i = E(b'_i) + Ka_i \sqrt{\text{var}(b'_i)}$$

으로 표현 된다. fuzzy목표 식(24)도 제약식의 하나 이므로 결국 식(24)와 식(26)은 다음과 같이 하나의 제약식으로 묶어서 표현 할 수 있다.

$$F(\Delta Q_c) = f' \Delta Q_c \approx d \tag{27}$$

단,

$$f' = [f \quad S]^T$$

$$d = [d' \quad b]^T$$

2.3 선형 Membership함수의 도입

Fuzzy협조에 의한 다목적 문제의 최적해 결정 방법에 있어서 계통손실과 무효전력 설치량의 각 목적함수와 제약 조건에 대한 membership함수로는 취급이 가장 용이하고 실용적인 그림1과 같은 선형의 membership함수[4, 6]를 선택하여 만족도를 정량화 시킬 수 있다.

이러한 선형 membership함수는 식(27)의 부등호 방향에 의해서 다음과 같이 다소 달라진다.

$$(1) \text{ 늘일 경우 } \mu_{Fi}(\Delta Q_c) = \frac{F_i(\Delta Q_c) - (d_i - \delta_i)}{\delta_i} \quad (28)$$

$$(2) \text{ 줄일 경우 } \mu_{Fi}(\Delta Q_c) = \frac{(d_i + \delta_i) - F_i(\Delta Q_c)}{\delta_i} \quad (29)$$

이 선형 membership함수 $\mu_{Fi}(x)$ 를 식(12)에 대입하면

$$(1) \text{ 늘일 경우 } \lambda \leq \frac{F_i(\Delta Q_c) - (d_i - \delta_i)}{\delta_i} \quad (30)$$

$$\lambda \delta_i \leq F_i(\Delta Q_c) - (d_i - \delta_i) \quad (31)$$

로 되며, 이를 벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$F(\Delta Q_c) - \lambda \delta \geq d - \delta \quad (32)$$

$$(2) \text{ 줄일 경우에는 } \lambda \leq \frac{(d_i + \delta_i) - F_i(\Delta Q_c)}{\delta_i} \quad (33)$$

동일한 방식으로

$$F(\Delta Q_c) + \lambda \delta \leq d - \delta \quad (34)$$

으로 표현된다. 결국 식(27)은 fuzzy결정에 의해서 다음과 같은 선형계획문제의 형태로 정식화된다. [4]

$$\text{maximize } \lambda \quad (35)$$

$$\text{subject to } f' \Delta Q_c + \lambda \delta \leq d + \delta \quad (36)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

본 연구에서는 다음과 같은 순서에 따라 이문제의 최적해를 결정하였다.

단계 1

확률선형 계획기법(S.L.P) [8, 9]에 의한 알고리

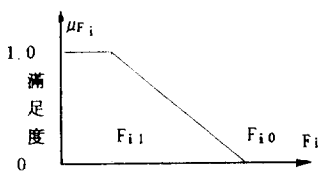


그림 1 선형 membership함수
Fig. 1 Linear membership function

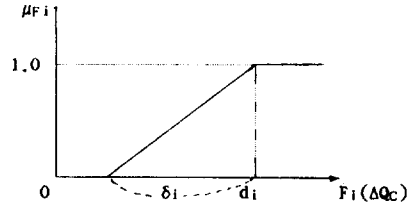


그림 2 계통손실 및 무효전력 설치량에 관한 선형 Membership함수

Fig. 2 Linear membership function of power loss and VAR installed

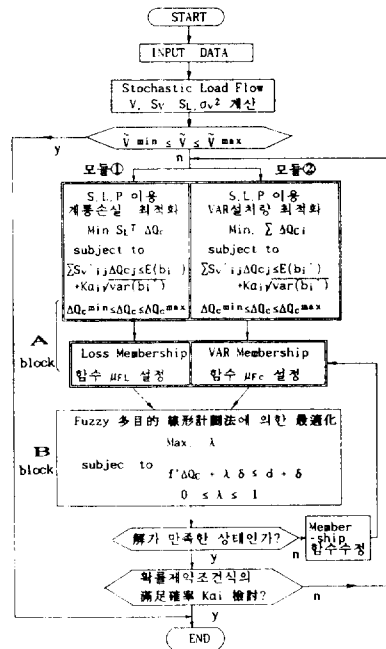


그림 3 Fuzzy협조에 의한 VAR배분 계획 알고리즘의 흐름도

Fig. 3 Flow chart of VAR allocation algorithm with fuzzy coordination

즘을 이용하여 계통 손실에 관한 목적함수 $f_1(\cdot)$ 과 무효전력원 설치량에 관한 목적함수 $f_2(\cdot)$ 를 별개로 하는 단일목적 최적화 문제를 구성하고 이로부터 실행가능한 가장 바람직한 상태를 구한다.

단계 2

1단계에서 구해진 2개의 단일목적함수에 대한 최적해를 기초로해서 의사결정자의 만족도를 반영시킬 수 있는 Membership함수를 결정한다. (그림 2)의 선형 Membership 함수를 이용한다.

$$\mu_{F_i} = \begin{cases} 1 & (0 \leq F_i \leq F_{i1}) \\ \frac{F_i - F_{i0}}{F_{i1} - F_{i0}} & (F_{i1} \leq F_i \leq F_{i0}) \\ 0 & (F_{i0} \leq F_i) \end{cases} \quad (37)$$

그림 2에서 F_{i1} 은 의사 결정자가 완전히 만족하는 계통손실 혹은 무효전력 설치량에 관한 목적함수 값인데 이들은 단계 1에서 계산된다. F_{i0} 는 의사 결정자의 주관에 따라 지정한 수용 가능한 목적함수의 최저치이다.

단계 3

단계 2에서 결정한 각 Membership 함수를 Fuzzy 결정함수로 통합한 다음 이것을 Fuzzy 다목적 선형계획법에 의해서 협조해를 구한다.

단계 4

단계 3에서 얻어진 해가 만족한 상태인가 판정

한다. 얻어진 해가 만족하면 종료하고, 그렇지 않으면 Membership 함수를 수정하여 단계 3의 과정으로 실행을 옮긴다. 제시한 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같이 크게 A block과 B block으로 구성되며, A block에서 모듈①과 모듈②는 별개의 단일목적 최적화문제의 해를 구하는 독립모듈로서 순차적으로 계산된다.

2.4 적용사례 및 결과검토

본 논문에서 제시한 알고리즘을 계통 연구에서 널리 사용하고 있는 그림 4와 같은 IEEE-30모선 계통에 적용하였다.

사례연구 1

먼저 전압의 확률 제약조건을 만족하는 만족확률을 $K\alpha$ 레벨의 설정치에 대응하여 각각의 경우에

표 1 제시한 알고리즘의 시행 결과

Table 1 Result of simulation of proposed algorithm (평균치 P.U)

| 사 례 | CASE1 | | CASE2 | | CASE3 | | CASE4 | |
|------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|--------|
| | 전 압 | VAR량 | 전 압 | VAR량 | 전 압 | VAR량 | 전 압 | VAR량 |
| 1 | 1.070 | .0500 | .969 | 0.0 | 1.063 | .0500 | 1.061 | .0500 |
| 2 | 1.076 | .0500 | .984 | 0.0 | 1.060 | .0500 | 1.057 | .0500 |
| 3 | 1.033 | .0 | 1.019 | 0.0 | 1.017 | 0.0 | 1.027 | 0.0 |
| 4 | 1.029 | .0500 | 1.012 | 0.0 | 1.022 | 0.0 | 1.021 | 0.0 |
| 5 | 1.072 | .0496 | 0.961 | 0.0 | 1.057 | .0500 | 1.054 | .0500 |
| 6 | 1.025 | .0500 | 1.007 | 0.0 | 1.019 | 0.0 | 1.018 | 0.0 |
| 7 | 1.010 | .0500 | 0.996 | 0.0 | 1.003 | 0.0 | 1.003 | 0.0 |
| 8 | 1.085 | .0291 | 1.006 | .0478 | 1.075 | .0209 | 1.073 | .0209 |
| 9 | 1.044 | .0500 | 1.006 | 0.0 | 1.027 | 0.0 | 1.024 | 0.0 |
| 10 | 1.050 | .0500 | 0.987 | 0.0 | 1.023 | 0.0 | 1.018 | 0.0 |
| 11 | 1.026 | .0500 | 1.001 | 0.0 | 1.019 | 0.0 | 1.018 | 0.0 |
| 12 | 1.051 | .0500 | 1.011 | 0.0 | 1.031 | 0.0 | 1.027 | 0.0 |
| 13 | 1.078 | .0291 | 0.984 | 0.0 | 1.074 | .0500 | 1.071 | .0500 |
| 14 | 1.049 | .0500 | 0.991 | 0.0 | 1.019 | 0.0 | 1.013 | 0.0 |
| 15 | 1.047 | .0500 | 0.984 | 0.0 | 1.019 | 0.0 | 1.012 | 0.0 |
| 16 | 1.049 | .0500 | 0.992 | 0.0 | 1.018 | 0.0 | 1.014 | 0.0 |
| 17 | 1.046 | .0500 | 0.992 | 0.0 | 1.018 | 0.0 | 1.014 | 0.0 |
| 18 | 1.048 | .0500 | 0.969 | 0.0 | 1.019 | .0428 | 1.004 | -.0229 |
| 19 | 1.046 | .0500 | 0.964 | 0.0 | 1.018 | .0500 | 1.006 | .0500 |
| 20 | 1.049 | .0500 | 0.969 | 0.0 | 1.021 | .0500 | 1.011 | .0500 |
| 21 | 1.043 | .0500 | 0.972 | 0.0 | 1.014 | .0500 | 1.010 | .0500 |
| 22 | 1.045 | .0500 | 0.973 | 0.0 | 1.016 | 0.0 | 1.011 | 0.0 |
| 23 | 1.048 | .0500 | 0.970 | 0.0 | 1.021 | .0500 | 1.015 | .0500 |
| 24 | 1.046 | .0500 | 0.962 | 0.0 | 1.020 | .0500 | 1.016 | .0500 |
| LOSS | 0.144017 | | 0.148669 | | 0.145811 | | 0.146018 | |

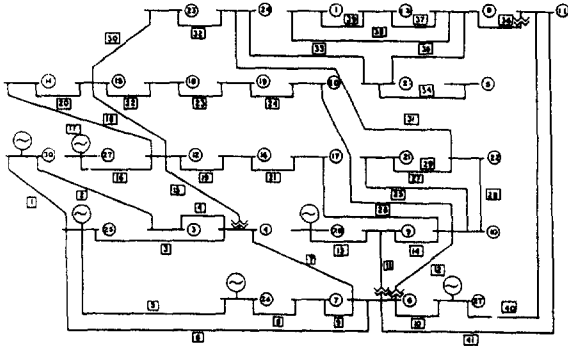


그림 4 IEEE-30 모선 계통
Fig. 4 IEEE-30 Bus system

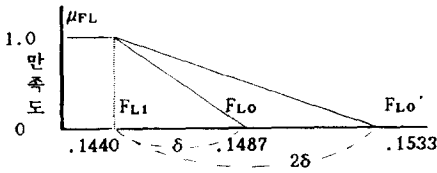


그림 5 Case4의 멤버쉽함수 μ_{FL}
Fig. 5 Membership function μ_{FL} of Case4

표 2 실행 결과에 대한 만족도
Table 2 Satisfaction index for simulation result

| CASE NO | Fuzzy협조여부 최소화 대상 | 계통손실 (P.U) | VAR량 (P.U) | 만족도 레벨 | |
|---------|--------------------------|------------|------------|--------|--------|
| | | | | 계통손실 | VAR량 |
| CASE1 | Non-Fuzzy 단일목적 (Loss) | 0.14402 | 1.0996 | 1.0 | 0.0 |
| CASE2 | Non-Fuzzy 단일목적 (VAR) | 0.14867 | 0.4780 | 0.0 | 1.0 |
| CASE3 | Fuzzy 협조 복수목적 | 0.14581 | 0.5137 | 0.6143 | 0.9425 |
| CASE4 | Fuzzy 협조 복수목적 | 0.14602 | 0.4938 | 0.5698 | 0.9745 |

대해서 시뮬레이션 하였다.

표1은 기준부하상태의 1.25배 부하에서 계통 신뢰도의 향상을 목표로 하여 모선전압에 관한 확률 제약조건 만족 확률레벨을 99.7(%)로 비교적 높게 설정해서 각각 계통손실, 무효전력원 설치량을 목적함수로 취하여 시뮬레이션한 경우와(case1, case2), 상호 결합하는 두 목적 함수를 퍼지 협조시킨 다목적함수 상태로 시뮬레이션한 결과(case3,

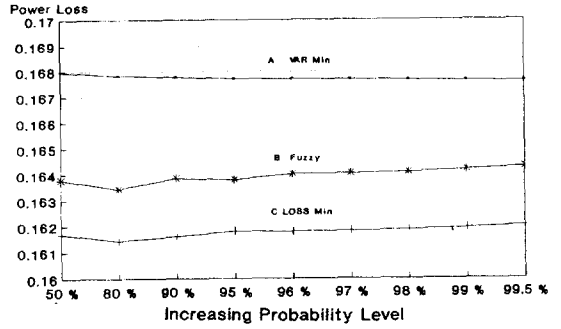


그림 6 확률 제약조건 만족확률에 대한 목적함수별 계통손실 비교
Fig. 6 Comparison of results for various object functions by varying probability level of stochastic constraints

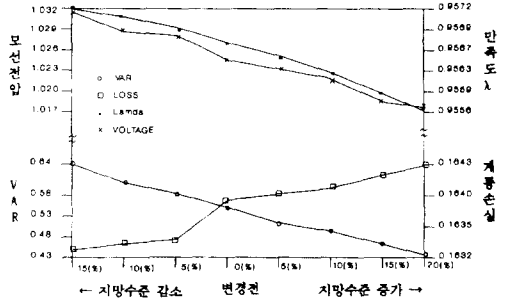


그림 7 목적함수의 지망수준 변화에 대한 계산례
Fig. 7 A example of calculation by varying aspiration level of object function

case4)를 보인것이다.

표1의 결과를 요약한 표2에 따르면, 가령 case3은 계통손실에 대한 만족도가 0.6143, 무효전력원 설치량에 대한 만족도는 0.9425값으로서 퍼지 협조를 시키지 않은 case1, case2에 비해 비교적 두 목적 함수가 타협되어진 해로 되고 있음을 알 수 있다. 다음 case4는 계통의 손실 보다도 무효전력원 설치량 최소화를 더욱 우선시킨 계획을 입안하기 위한 예로서, 계통 손실에 관한 최적 만족도 수준 F_{Lo} 를 case3의 경우보다 두배로 낮추어 $F_{Lo'}$ 로 변경시켜 그림 5와 같이 멤버쉽 함수의 구배를 완만하게 조정한 경우인데, 계산 결과 무효전력원 설치량의 만족도가 더욱 높아진 해를 얻을 수 있었다. 이처럼 계통 계획시 계통입안자의 경험을 토대로하여 Membership함수를 변경 한다면 각 목적간의 만족도를 객관화 하여 복수 목적간의 우선

표 3 확률 제약조건에 대한 만족확률 변화에 대한 목적함수별 계산결과

Table 3 Results of calculation for various object functions by varying probability level of stochastic constraints

| CASE | 제약조건 만족확률 | VAR설치량 최소화 | | 계통 손실 최소화 | | 퍼지 다목적 협조해 | |
|------|--------------|------------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| | | 계통손실 | VAR설치량 | 계통손실 | VAR설치량 | 계통손실 | VAR설치량 |
| 1 | 50(%) | .167961 | .0873 | .161691 | .8105 | .163778 | .3941 |
| 2 | 80(%) | .167825 | .0804 | .161445 | .9430 | .163444 | .4714 |
| 3 | 90(%) | .167758 | .0818 | .161608 | .9984 | .163852 | .5044 |
| 4 | 95(%) | .167710 | .0830 | .161799 | 1.0064 | .163790 | .5294 |
| 5 | 96(%) | .167694 | .0835 | .161796 | 1.0440 | .164016 | .5573 |
| 6 | 97(%) | .167679 | .0839 | .161817 | 1.0538 | .164044 | .5693 |
| 7 | 98(%) | .167660 | .0844 | .161850 | 1.0667 | .164084 | .5852 |
| 8 | 99(%) | .167626 | .0853 | .161920 | 1.0870 | .164172 | .6102 |
| 9 | 99.5(%) | .167600 | .0862 | .162017 | 1.1013 | .164275 | .6286 |

순위까지 고려한 보다 융통성있는 계획을 수립할 수 있음을 알 수 있다.

사례연구 2

다음에는 단일 목적함수를 대상으로 하는 확률론적 선형계획법[8, 9]에 의한 방법과 본연구에서 제시한 퍼지협조에 의한 방법을 이용하여 확률 제약조건식의 만족확률 $K\alpha_i$ 를 여러 가지로 바꾸어서 계산한 결과를 표3에 보인다.

그림 6은 표3을 토대로 목적함수 대성별 각 CASE의 계통손실을 나타낸 것으로서 그래프 C는 계통손실만을 최소화시킨 경우이고, 그래프 A는 무효전력원 설치량만을 최소화시킨 경우이다. 이에 대하여 퍼지 협조에 의한 그래프 B는 두가지 목표를 충분히 반영한 타협해로 되고 있음을 보이고 있다. 한편 표3의 CASE 5에서 퍼지협조의 경우 두 목적함수 중에서 한쪽 목적함수 지망수준에 변화를 준 경우의 계산결과를 그림 7에 보인다. 그림에서 보면 계통손실 지망수준의 폭을 넓혀주면 계통손실은 점차 증대되고 무효전력원 설치량 값은 점차 작아지는 반면, 역으로 계통손실 지망수준의 폭을 좁힐수록 무효전력원 설치량은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 밖에 계통손실 목적함수의 멤버십 함수 허용폭을 조정할 경우의 예에서는 계통손실 목적함수에 대한 멤버십 함수의 허용폭이 증가됨에 따라 계통손실값은 증대되고 무효전력원 설치량은 감소되어 지망수준을 조정할 경우와 유사한 경향을 얻을 수 있었다. 결과적으로 본연구에서 제시한 복수의 목적함수를 대상으로 하는 퍼지협조에 의한 방법은 애매성을 갖는 계획 조건하에서 의사 결정자의 주관적 의지를 보

표 4 경제적 평가지표의 비용계수

Table 4 Cost coefficients for economic evaluation index

| *C ₁ | *C ₂ | **C ₃ | ***Tmax |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------|
| 15 | 15 | .05294 | 5100hours |

단위 : 10³천원

* **KEPCO자료('91 경영통제) 기준

*** 14hours/인 사용가정(KEPCO자료인용)

다 충실하게 임의 대상(목적함수, 제약조건)에 반영시키므로서 종래의 방법에 비해 더욱 유연한 해를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

2.5 전문가 시스템에 의한 결과분석

본 연구에서는 퍼지 협조에 의한 알고리즘을 이용해서 여러가지 해를 구하고 이를 자료로 하는 데이터 베이스를 구축한 후 계획 입안자가 우선시 하는 해를 선택 할 수 있는 전문가시스템(Expert System)을 개발하고 이를 이용하여 계획입안을 더욱 효율적으로 할 수 있도록 하였다[10]. 해 탐색의 기준으로서 상대적 및 절대적 평가를 위한 식(38)과 식(39)의 지표를 제시하고 계통손실, VAR설치량, 모선전압의 질, 그리고 이 세가지를 종합하여 가장 우수한 해를 탐색하기 위한 순위지수의 생성과정에 이를 이용하였다. 상대적 평가지표로는 식(38)과 같은 Norm지표[3]

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{1/2} \tag{38}$$

단,

x_i : 각 CASE의 Scala요소(n : case수)

를 이용하며 절대적 평가지표 또는 무효전력원의 신설경비와 계통손실의 연간 환산비용의 합을 나타내는 식(39)와 같은 경제적 지표를 이용하기로 한다.

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^{n_i} C_1 Q_{cci} + \sum_{i=1}^{n_i} C_2 Q_{cri} + C_3 \cdot P_{\text{Loss}} \cdot T_{\text{max}} \quad (39)$$

단,

- n_i : 무효전력원 설치 모션수
- C_1 : 진상 VAR(콘덴서)의 단위 용량당 비용 (원/MVar)
- C_2 : 지상 VAR(리액터)의 단위 용량당 비용 (원/MVar)
- Q_{cci}, Q_{cri} : 각 case에서 i 모선의 콘덴서 및 리액터 설치량(MVar)
- C_3 : 전력 단가(원/10³Kwh)
- T_{max} : 연간 무효전력원의 사용시간(Hour/Year)

여기에서 비용계수 C_1, C_2, C_3 및 연간 무효전력원의 사용시간 T_{max} 는 표4에 보인 한전자료를 사용하였다.

퍼지 협조해 중에는 목적함수에 대한 지망수준과 제약 허용폭이 변동함에 따라서 각각의 조건에

상응하는 유사한 수 많은 해집합을 얻을 수 있다. 여기에서는 표5의 시뮬레이션 조건에서 보인바와 같이 계통손실이나 VAR설치량의 검토에 중점을 두어 시뮬레이션한 결과를 적용대상으로 삼았다. 각 사례별 시뮬레이션 조건은 표6에 보인 바와 같이 확률 제약조건 만족확률 Ka_i 가 50(%)에서 99.9(%)사이의 다양한 값을 취할 경우 표5에서 제시한 6가지 고려조건을 적용하였으며, 그 결과 표6과 같은 60개의 서로 다른 사례에 관한 데이터 베이스 입력자료를 생성하였다.

표7과 표8은 각각 Norm지표에 의한 상대적 평가와 경제적 지표에 의한 절대적 평가결과에 대한 출력결과를 순위지수가 높은 10가지 사례에 대해서만 보인 것인데 여기서는 각각 CASE 38, CASE 8의 해가 가장 바람직한 해로 탐색되었음을 알 수 있다. 또한 경제적 지표에 의한 절대적 평가의 경우에는 종합적 차원의 우선순위가 VAR의 설치량 면에서 검토한 우선순위와 동일함을 알 수 있는데 이것은 VAR설치 비용계수가 계통손실 비용계수에 비해 상대적으로 월등히 높기 때문이다. 그러나 계통손실의 환산 비용이 고찰대상기간의 함수인 점을 감안하면 고찰대상기간이 길어짐에 따라서 종합적 차원의 우선순위에 미치는 VAR의 설치비용의 영향은 감소되리라 생각된다. 한편 Norm지표에 의한 상대적 평가의 결과에서 순위

표 5 시뮬레이션 조건
Table 5 Simulation condition

| | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|--|--|
| 제약만족 확률 Ka_i | 50(%), 80(%), 90(%), 95(%), 96(%), 97(%), 98(%), 99(%), 99.5(%), 99.9(%) | | | | | |
| 각 Ka_i 별 고려 조건 | ① 계통손실 단일목적 최소화 해 ② VAR설치량 단일목적 최소화 해 ③ FUZZY다목적 협조해 ④ VAR설치량 지망수준을 10(%)증가시킨 FUZZY협조해 ⑤ 계통손실 지망수준을 10(%)증가시킨 FUZZY협조해 ⑥ FUZZY제약조건 허용폭을 10(%)증가한 FUZZY협조해 | | | | | |

표 6 사례별 시뮬레이션조건
Table 6 Simulation condition for various CASES

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|---|---|---|---|-------|---|---|----|----|----|-----|---------|----|----|----|----|----|
| 제약만족 확률 Ka_i | 50(%) | | | | | | 80(%) | | | | | | ... | 99.9(%) | | | | | |
| 고려조건 항목번호 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ... | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ |
| CASE | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | ... | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |

표 7 Norm지표에 의한 상대적 평가의 결과

Table 7 Results of relative evaluation by norm index

| 순 위 | 계통손실 | | VAR설치량 | | 모선전압 | | 중 합 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | CASE | 지표*1 | CASE | 지표*2 | CASE | 지표*3 | CASE | 지표*4 |
| 1 | CASE7 | .12697 | CASE8 | .01665 | CASE55 | .09828 | CASE38 | .10927 |
| 2 | CASE13 | .12709 | CASE14 | .01694 | CASE49 | .09969 | CASE56 | .10928 |
| 3 | CASE1 | .12716 | CASE20 | .01719 | CASE43 | .10059 | CASE50 | .10943 |
| 4 | CASE25 | .12724 | CASE26 | .01729 | CASE37 | .10189 | CASE44 | .10952 |
| 5 | CASE19 | .12724 | CASE32 | .01738 | CASE31 | .10276 | CASE32 | .10969 |
| 6 | CASE31 | .12726 | CASE38 | .01748 | CASE25 | .10344 | CASE26 | .10983 |
| 7 | CASE37 | .12728 | CASE44 | .01767 | CASE19 | .10455 | CASE20 | .10984 |
| 8 | CASE43 | .12734 | CASE50 | .01785 | CASE13 | .10637 | CASE14 | .10996 |
| 9 | CASE49 | .12742 | CASE2 | .01808 | CASE7 | .11024 | CASE8 | .11013 |
| 10 | CASE55 | .12761 | CASE56 | .01823 | CASE58 | .11386 | CASE2 | .11120 |

표 8 경제적 지표에 의한 절대적 평가의 결과

Table 8 Results of absolute evaluation by economic index

| 순 위 | 계통손실 | | VAR설치량 | | 중 합 | |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|----------|
| | CASE | 지표*1 | CASE | 지표*2 | CASE | 지표*3 |
| 1 | CASE7 | 43.5899 | CASE8 | 133.40 | CASE8 | 178.7118 |
| 2 | CASE13 | 43.6332 | CASE14 | 133.70 | CASE14 | 178.9935 |
| 3 | CASE1 | 43.6557 | CASE20 | 134.05 | CASE20 | 179.3306 |
| 4 | CASE25 | 43.6839 | CASE26 | 134.40 | CASE26 | 179.6764 |
| 5 | CASE19 | 43.6847 | CASE32 | 134.45 | CASE32 | 179.7222 |
| 6 | CASE31 | 43.6896 | CASE38 | 134.50 | CASE38 | 179.7671 |
| 7 | CASE37 | 43.6983 | CASE44 | 134.75 | CASE44 | 180.3510 |
| 8 | CASE43 | 43.7175 | CASE50 | 135.10 | CASE50 | 180.3510 |
| 9 | CASE49 | 43.7435 | CASE56 | 135.75 | CASE56 | 180.9854 |
| 10 | CASE55 | 43.8107 | CASE2 | 149.60 | CASE12 | 194.9486 |

단위 : 10³천원

번호가 10번째 이내에 포함된 모든 사례(CASE번호 38, 56, 50, 44, 32, 26, 20, 14, 8, 2)가 경제적 지표에 의한 절대적 평가순위 10번째 이내에 모두 포함되어 있는데, 이로부터 양 방법의 평가기준은 다르지만 대체로 개략적인 순위결정 경향이 크게 상이하지 않는 것으로 나타나고 있다. 따라서 실제적으로 의사 결정자가 원하는 우선해를 탐색하기 위하여 양 지표를 함께 사용한다면 더욱 유용한 해를 선택할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같

다.

(1) 퍼지협조에 의한 무효전력원 배분에 관한 엘고리즘은 계통 계획문제에서 중시되는 경제성과 신뢰도면에서 생각해 볼때 전압에 대한 확률제약 조건식의 만족 확률수준에 대응하는 유연한 계획을 입안 할 수 있음을 확인하였다.

(2) 단일 목적함수만을 최적화 대상으로 삼는 종래 방법과는 달리 퍼지 다목적 선형계획법을 도입함으로써 계통의 전압값을 허용범위로 유지하면서 Pareto성을 갖는 복수개의 목적함수, 즉 서로 상충되는 VAR설치량과 계통 손실로 구성된 다목적함수(Multi-criterion)를 동시에 만족시킬 수 있

도록 하였다.

(3) 목적함수의 지망수준과 제약조건에 대해서 선형의 Membership함수를 도입하여 다양한 계통 계획조건과 판단의 애매성에 기인하여 명확한 목표설정이 어려운 경우에도 의사 결정자의 주관적 의지를 반영할 수 있는 융통성 있는 계획 입안이 가능 하도록 하였다.

(4) 시뮬레이션 결과를 종합하고 이에 대한 분석을 효과적으로 하기 위하여 전문가 시스템 (Expert System)을 이용하였다. 즉 모선전압에 관한 확률 제약조건외 만족확률 $k\alpha$, 레벨에 따른 단계별 계산사례, 그리고 그 각각의 단계에서 여러가지 고려 대상 요소와 여러 형태의 의사 결정자 의지 개입의 수준에 따라서 존재하게 되는 여러가지 계산 사례에 대응한 해집합을 자료로 갖는 데이터 베이스를 생성하여 계통 입안자가 원하는 특정 선택기준에 부합하는 우선해를 신속하게 탐색 하도록 하였다. 금후의 과제로서는 퍼지성을 갖는 Membership함수의 결정부분까지 전문가 시스템을 도입하면 전체적인 알고리즘의 효율성이 크게 증대되리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] K.R.C. Mamander, et al., "Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvement in Voltage Profiles and Real Power Loss Minimization," PAS-100, 3185(1981).
 [2] H. mori, Y. Tamura, "Var Allocation Using

Stochastic Load Flow," IFAC Symposium on PSCC, Beijing, China, pp. 51~56, Aug., 1986.

[3] A. Venkatarama, et al., "Optimal Reactive Power Allocation," IEEE Trans, PAS, Vol. PWRS-2, No. 1, pp. 138~144, February, 1987.
 [4] さかわきさとし, "ファジイ理論の基礎と應用", 森北出版株式會社, 1989.
 [5] M.A. Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis," Tata McGRAW-Hill Publishing Company, 1979.
 [6] Yoshinori, et al., "Optimal Power Flow Solution Using Fuzzy Mathematical Programming," Trans. IEE of Japan, Vol. 108-B, No. 5, Sep., 1988.
 [7] J.F. Dopazo, O.A. Klitin, A.M. Sasson "Stochastic Load Flwos," IEEE Trans on Power App. and System., Vol. PAS-94, No. 2, March/April, 1975.
 [8] 송길영, 이희영, "확률선형 계획법에 의한 최적 Var배분계획에 관한연구," 대한전기학회 추계종합 학술대회 논문집, 1989, pp. 191~193.
 [9] V.V. Kolvin, "Stochastic Programming," D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1977.
 [10] Junzo Kawakami, Shingeru Tamura, "An Expert System For Voltage-VAR Scheduling," Proc. 9th PSCC Portugal, Aug., 1987.



송길영(宋吉永)

1934년 5월 15일생. 1953년 서울대 공대 기계공학과 중퇴. 1958년 일본 무사시대 공대 전기공학과 졸업. 1961년 일본 와세다대 대학원 졸업(석사). 1967년 동 대학원 졸업(공학박). 1970~74년 과학기술처 중앙전자 계산소장. 1974~76년 한양대 공대 전기공학과 교수. 현재 고려대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원.



이희영(李喜永)

1954년 10월 4일생. 1982년 송전대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1983년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 전주공업전문대 전자계산과 조교수.