

퍼지 선형계획법을 적용한 전력계통의 최적운용에 관한 연구

(Optimum Operation of Power System Using Fuzzy Linear Programming)

朴盛大* · 鄭在吉** · 趙揚行***

(Sung-Dae Park · Jai-Kil Jung · Yang-Heang Cho)

요 약

본 논문은 전력계통 운용에 관한 합리적인 유효전력 및 무효전력 제어방법을 제시한 논문으로 무효전력 제어에 퍼지 선형계획법을 적용하여 목적함수의 값을 최소화하고 전체 계산시간을 단축시키고 운용의 융통성을 주기 위하여 시도한 논문으로 본 논문의 특징은 다음과 같다.

1) 유효전력 제어는 선로손실을 고려한 전력수급 평형식으로서 B정수를 이용하지 않고 전력 조류 방정식의 자코비 행렬의 스파스한 성질을 이용하여 간단히 계산하고 Lagrange함수법을 이용함으로써 계산시간을 단축시키고 기억용량을 대폭 경감시킬 수 있으며 반복계산을 하지않고 직접 발전기의 최적부하 배분량을 결정할 수 있다.

2) 무효전력 제어시에도 목적함수로서는 총 선로손실을 취하지 않고 발전소의 총 연료비를 취하여 ϵ 를 최소화함으로써 보다 합리적인 경제성을 도모하였다. 또 이때 필요한 제어변수에 대한 발전기 출력 모션전압의 감도행렬의 계산은 조류 방정식의 자코비 행렬의 스파스한 성질을 충분히 이용하여 계산을 단축시킬 수 있도록 하였다.

3) 특히 무효전력 제어시에는 많은 함수형 부등식 제약조건을 즉 모션전압의 상하한 제약조건을 일정한 값으로 고정하지 않고 어떤 허용 변동폭을 주어 조건을 완화하는 퍼지 선형계획법을 적용함으로써 확정적인 제약을 갖는 일반 선형계획법을 적용할 때보다 유리한 점이 확인되었다.

Abstract

A method of optimal active and reactive power control for economic operation in electrical power system is presented in this paper.

The major features and techniques of this paper are as follows: 1) The method presented for obtaining the equivalent active power balance equation applying the sparse Jacobian matrix of power flow equation instead of

*正會員 : 명지실업전문대학 전기과 교수 · 工博

**正會員 : 중앙대학교 전기공학과 교수 · 工博

***正會員 : 중앙대학교 전기공학과 박사과정

接受日字 : 1993年 8月 18日

using B constant as active power Balance equation considering transmission loss, and for determining directly optimal active power allocation without repeating calculations. 2) More reasonable and economic profit by minimizing total fuel cost of thermal power plants instead of using transmission loss as objective function of reactive Power control can be achieved.

3) Particularly in reactive power control, computing time can be considerably reduced by using Fuzzy Linear Programming instead of using conventional Linear Programming.

1. 서 론

전력계통의 합리적 운용방법의 일환으로 전력계통의 총발전비용을 최소화 하는 등증분비용법칙에 의한 경제부하 배분 방법^{1),2)} 1958년 L.K. Kirchmayor에 의해 연구 발표되었다. 이의 개선 방법으로 전압-무효전력 제어를 포함한 최적 경제운용제어 방법에 관하여 많은 연구 논문이 발표되었다. 그 대표적인 것이 1968년 Dommel 및 Tinney³⁾의 “최적조류계산(Optimal Power Flow Solution)” 방법이다. 또한 Fletcher-Reeves의 공액경사법(Conjugate Gradient Method)의 적용으로 목적함수의 감소방향 및 적정 스텝폭 결정에 많은 개선점을 가져 왔다.

최근에는 상기 방법중에서 장점들을 택하여 유효전력 및 무효전력 제어의 분할법^{4),6)} 제어변수와 종속변수간의 관계식인 감도행렬의 계산으로서 전력조류방정식의 자코비 행렬(Jacobian Matrix)의 사용^{4),6)} 자코비 행렬요소중 0요소가 많은 스파스(sparse)한 행렬의 성질을 활용하기 위하여 최적모선번호부여 삼각인수분해법을 적용하고^{3),6)} 전압-무효전력 제어시에도 목적함수로서 총연료비를 취하여 이를 최소화하는 방법을 사용하고 있다. 즉 유효전력 제어시에는 발전소의 총연료비를 목적함수로 취하고 Lagrange함수법을 이용하여 전력수급평형조건을 만족하는 발전기 출력의 최적치를 구하고 무효전력 제어시에도 총연료비를 무효전력 제어변수의 1차함수로 선형화하여 목적함수로 취하고 모선전압도 제어변수의 1차함수로 변형한 후 일반 선형 계획(LP: Linear Programming)법을 적용하여 부등식 제약조건을 만족하는 목적함수의 최적치 및 이때의 제어변수의 값을 구하고 있다.^{4),6)} 그러나 전압-무효전력 제어시에 확정적인 제약을 갖는 종래의

일반 선형계획법을 사용할 경우에는 함수형 부등식 제약 조건수가 많고 이의 선형화로 인한 해의 오차때문에 반복계산이 필요하여 계산시간이 길어지고 또한 실행 가능해를 구할 수 없는 경우가 있다. 따라서 본 논문에서는 유효전력제어는 선로손실을 고려한 전력수급평형식으로 손실 방정식의 B정수를 사용하지 않고 전력조류방정식의 자코비 행렬로부터 그 스파스한 성질을 이용하여 간단히 구하고 Lagrange 함수법을 이용하여 직접 발전기의 최적 배분량을 결정하는 방법을 사용함으로써 계산시간을 단축시킬 수 있도록 하였으며 무효전력제어는 목적함수로서 무효전력 제어변수로 표현한 발전소의 총연료비를 취하고 선형계획법을 사용하여 종래의 일반 선형계획법이 아니고 퍼지 선형계획(Fuzzy Linear Programming)법을 사용함으로써 계산시간을 단축시키고 일반 선형계획법에서는 실행가능해를 구할 수 없는 경우에도 부등식 제약조건에 허용 변동폭을 부여함으로써 실행해를 구할 수 있을 뿐 아니라 제약조건의 제한치 근처에서 운용하는 것을 피하고 어느 정도 조작의 여유를 갖게 함으로서 우발적인 비상시에 대비할 수 있도록 할 수 있다.^{5),7),9),10)}

2. 퍼지 선형계획법과 전력계통에의 적용

2.1 퍼지 최적결정 및 퍼지 선형계획의 해법

2.1.1 퍼지 최적결정

1976년 H.J.Zimmermann은 선형계획 문제에 퍼지 집합론의 개념을 도입했다.^{5),11)} 즉, 퍼지 목표와 퍼지 제약이 있는 선형계획 문제에 대하여 의사 결정자가 주관적으로 결정하는 멤버십 함수가 선형함수라는 가정하에 Bellman과 Zadeh의 퍼지결정에 대한 최대화 결정을 채용하면 일반

선형문제로서 해를 구할 수 있음을 제시했다.

목표에 대한 멤버십 함수 μ_G 및 제약에 대한 멤버십 함수 μ_C 의 예를 표시하면 그림 1(a)와 같다.

퍼지 결정에 대해서 퍼지 제약과 퍼지 목표는 동시에 만족되지 않으면 안된다. Bellman은 퍼지 결정 D를 퍼지 목표와 제약의 적(積) 집합으로 생각해서 이 멤버십 함수를

$$\mu_D(x) = \min\{\mu_G(x), \mu_C(x)\} \quad (2.1)$$

로 정의하였다.(그림 1(b))

식 (2.1)에서 $\mu_D(x)$ 를 정의했지만 실제 문제에서는 최대 결정집합을 구할 필요가 있다. 또 결정 기준으로써 퍼지 결정 집합에 속하는 정도를 최대로 하도록 x 를 선정한다.

여기서 $\lambda = \mu_D(x)$ 로 정의했을 때

$$\lambda = \max_{x \in C_a} \mu_D(x) = \max \min\{\mu_G(x), \mu_C(x)\} \quad (2.2)$$

를 만족하는 (λ^*, x^*) 을 선택하는 것이다.(그림 1(b))

2.1.2 퍼지 선형계획법의 해법

μ_D 가 최대가 되기 위해서는 퍼지제약 μ_C 의 α -level 집합 C_α 를 다음과 같이

$C_\alpha = \{x \in X \mid \mu_C(x) \geq \alpha\}$ 라 가정하면서 퍼지 선형계획문제는

$\alpha^* = \sup_{x \in C_\alpha} \mu_D(x)$ 를 구하는 문제로 된다.

α 가 구해지면 통상의 제약집합 C_α 하에서 μ_G 를

최대로 하면 퍼지선형 계획문제는 그 해를 다음 알고리즘에 의해 얻을 수 있다.⁹⁾

[알고리즘]

- (1) $k=1$ 일때 V_a 을 설정한다.
- (2) $\mu_k = \sup_{x \in C_{a_k}} \mu_G(x)$ 를 계산한다.
- (3) $\epsilon_k = \alpha_k - \mu_k$ 를 계산한다. 만약, $|\epsilon_k| > \epsilon$ 이면 스텝 (4)로 가고 $|\epsilon_k| \leq \epsilon$ 이면 스텝(5)로 간다.
- (4) $\alpha_{k+1} = \alpha_k - \gamma_k \cdot \epsilon_k$ 로 하여 $k=k+1$ 로써 스텝 (2)로 간다. 여기서 $0 \leq \alpha_{k+1} \leq 1$ 로 되도록 γ_k 를 설정한다.
- (5) $\alpha^* = \alpha_k$ 로 놓고 $\sup_{x \in C_{\alpha^*}} \mu_G(x) = \mu_G(x)$ 가 되는 x^* 를 구하고 계산을 끝낸다.

2.2 전력계통에의 적용

최적 조류 계산에 있어서 모션 전압의 상, 하한치는 계통의 안전 운전상 대개 일정범위로 유지하지만 계통계획의 경우 유효, 무효 전력의 상, 하한에 관해서는 장래의 수요상정 및 설비의 설치장소에 대한 지리적 요건 등 여러 요인으로 확정값을 요하지 않는다. 이런 이유로 생각하는 제약조건의 값은 계획자의 주관에 포함된 모호한 것이 된다. 또는 문제가 실행 가능해를 포함하지 않는 경우도 있다. 따라서 제약을 완전한 퍼지 제약으로 취급한다.

제약을 넘는 허용범위의 퍼지영역, 목표치, 또는 멤버십 함수의 형식은 계획자가 경험에 의하여 주관적으로 결정한다. 이상으로부터 최적제어를 퍼지 최적제어 문제로써 다음 식과 같이 정식화 한다.

$$\text{Minimize } G = G(x) \quad (2.3)$$

$$\text{Subject to } \underline{F}_s \leq F(x) \leq \overline{F}_s \quad (2.4)$$

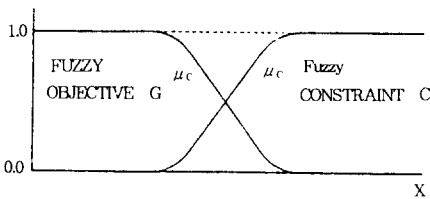
식 (2.3)은 화력발전소의 총연료비와 같은 최적화 하고자 하는 목적함수를 나타낸다. 식(2.4)는 다음과 같은 범위내에서 제어된다.

$$P_{\min} \leq P(x) \leq P_{\max} \quad (2.5)$$

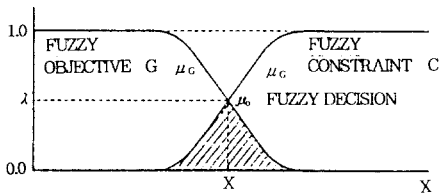
$$Q_{\min} \leq V(x) \leq Q_{\max}$$

$$V_{\min} \leq V(x) \leq V_{\max}$$

본 논문에서는 유효전력제어와 무효전력 제어를 나누어 유효전력 최적화제어후 무효전력을 사



(a) 퍼지 목적, 제약과 멤버십 함수



(b) 퍼지 결정 및 멤버십 함수

그림 1. $\mu_G(x)$, $\mu_C(x)$ 및 $\mu_D(x)$ 의 멤버십 함수

Fig. 1. $\mu_G(x)$, $\mu_C(x)$, $\mu_D(x)$ and its Membership Function.

용하는 방법을 사용하였으며 유효전력 제어는 Lagrange 미정계수법을, 무효전력 제어는 퍼지 선형계획법을 적용하였다.

또한 본 논문에서 유효전력 및 무효전력 제어 시 제어변수와 중속변수간에 관계 즉 감도행렬로서 이용되는 전력조류 방정식의 전 자코비 행렬 (Full Jacobian Matrix)은 다음 식(2. 6)과 같이 표시되며 이를 유효전력 제어시와 무효전력 제어 시에 각각 분할하여 이용한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} + [T] \cdot [\Delta N] \quad (2.6)$$

3. 유효전력 제어

3.1 유효전력 제어의 정식화

유효전력 제어는 계통전압을 일정하게 유지한 상태에서 전력수급 평형조건, 발전기출력의 상한한 제약조건하에서 목적함수인 발전기의 총연료비(F_p)를 최소화하는 발전기출력의 배분을 결정하는 문제로서 일반적으로 다음식과 같이 정식화된다.

$$F_p = \sum_{k \in N_{gs}} f_{jk}(P_{gk}) = \sum_{k \in N_{gs}} (a_k + b_k P_{gk} + C_k P_{gk}^2) \quad (3.1)$$

$$g(P_{gk}) = 0 \quad (3.2)$$

$$P_{gk_{min}} \leq P_{gk} \leq P_{gk_{max}} \quad (3.3)$$

즉, 식(3.2), 식(3.3)의 등식 및 부등식 제약조건에서 식(3.1)의 목적함수를 최소로 하는 문제이다.

식(3.1)의 목적함수는 다음과 같이 발전기출력의 증분량으로 변형시킬 수 있다.

$$\Delta F_p = \sum_{k \in N_{gs}} f_{jk}(\Delta P_k) = \sum_{k \in N_{gs}} (Z_k \Delta P_k + C_k \Delta P_k^2) \quad (3.4)$$

3.2 제어 알고리즘

유효전력 제어는 계통전압을 일정하게 유지한 상태에서 발전기출력을 제어하는 것이므로 식(2. 16)에서 $\Delta V_g = \Delta V_c = \Delta V_l = \Delta V_s = 0$, $\Delta \delta_s = 0$, $\Delta P_c = \Delta P_l = \Delta Q_l = 0$, $\Delta n = 0$ 의 조건이 성립하며 그 자코비 행렬로부터 발전기출력의 증분만으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_c \\ \Delta P_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{gg} & H_{gc} & H_{gl} \\ H_{cg} & H_{cc} & H_{cl} \\ H_{lg} & H_{lc} & H_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_g \\ \Delta \delta_c \\ \Delta \delta_l \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\Delta P_s = [H_{sg} \ H_{sc} \ H_{sl}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_g \\ \Delta \delta_c \\ \Delta \delta_l \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

식 (3.5), (3.6)으로부터

$$\Delta P_s = [H_{sg} \ H_{sc} \ H_{sl}] \cdot \begin{bmatrix} H_{gg} & H_{gc} & H_{gl} \\ H_{cg} & H_{cc} & H_{cl} \\ H_{lg} & H_{lc} & H_{ll} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서 $[\Delta P_g \ 0 \ 0]$ 의 계수벡터를 $[\alpha_k \ \alpha_c \ \alpha_l]$ 이라 놓으면

$$\begin{bmatrix} H_{gg} & H_{gc} & H_{gl} \\ H_{cg} & H_{cc} & H_{cl} \\ H_{lg} & H_{lc} & H_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_g \\ \alpha_c \\ \alpha_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{sg} \\ H_{sc} \\ H_{sl} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$[\alpha_g]^T$, $[\alpha_c]^T$, $[\alpha_l]^T$ 는 식(3.8)의 $[H]$ 행렬이 스푸스한 행렬이므로 삼각 인수분해(Triangular factorization)법에 의하여 간단히 구할 수 있으며 $[\alpha]$ 벡터는 식 (2.7)의 $[H_n]$ 행렬의 고유벡터에 해당된다. 따라서 유효전력 제어는 부등식 제약조건을 고려하지 않을 경우에는 다음 식 (3.9)의 등식 제약조건하에서 식 (3.10)의 목적함수를 최소화하는 문제로 귀착된다.

$$\sum_{k \in N_{gs}} \alpha_k \cdot \Delta P_k = 0 \quad [\text{단 } \alpha_s = \alpha_n = -1] \quad (3.9)$$

$$\Delta F(\Delta P) = \sum_{k \in N_{gs}} (Z_k \cdot \Delta P_k + C_k \cdot \Delta P_k^2) \quad (3.10)$$

여기서 Lagrange 미정계수법을 적용하여 평가함수를 도입하고 이것을 $\Delta P_{gk}(=\Delta P_k)$ 에 관하여 편미분하여 영으로 놓으면 목적함수의 최소조건이 얻어진다.

$$L(\Delta P_g) = \sum_{k \in N_{gs}} (Z_k \cdot \Delta P_k + C_k \cdot \Delta P_k^2) - \lambda \sum_{k \in N_{gs}} \alpha_k \Delta P_k \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta P_k} = Z_k + 2C_k \Delta P_k - \lambda \cdot \alpha_k = 0 \quad (3.12)$$

$$\Delta P_k = \frac{1}{2C_k} (\lambda \cdot \alpha_k - Z_k) \quad [\text{단, } Z_k = b_k + 2C_k \cdot P_{gk}] \quad (3.13)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{k \in N_{gs}} \alpha_k \cdot Z_k}{C_k} / \sum_{k \in N_{gs}} \frac{\alpha_k^2}{C_k} \quad (3.14)$$

따라서 식 (3.13) 및 (3.14)에서 $\Delta P_k = \Delta P_{gk}$ 를 구할 수 있으며 발전기출력의 최소치는 식(3.15)와 같이 된다.

$$P_{gk} = P_{gk0} + \Delta P_k \quad (3.15)$$

이 경우에 발전기 출력의 최적치가 그 상한 또는 하한을 벗어날 경우에는 상한을 벗어난 출력의 편차의 합과 하한을 벗어난 출력의 편차의 합의 절대치를 비교하여 큰쪽 출력만을 그 상한 또는 하한으로 고정시키고 양자가 같을 경우에는 이들 출력을 모두 그 상한으로 고정시킨다. 그리고 고정되지 않은 나머지 발전기의 출력만으로서 식(3.16)에 의하여 해를 수정한 후 다시 식(3.13)에서 ΔP_k 를 구한다. 이 ΔP_k 를 각 발전기출력에 가하여 그 출력을 수정 배분하면 등식, 부등식 제약조건을 모두 만족하고 총연료비를 최소로 하는 출력의 최적치를 구할 수 있다.

$$\lambda = \left(\sum_{k \in N_{gde}} \frac{\alpha_k \cdot Z_k}{C_k} - 2 \sum_{k \in N_{gt}} \alpha_m \cdot \Delta P_m \right) / \sum_{k \in N_{gde}} \frac{\alpha_k^2}{C_k} \quad (3.16)$$

① N_{gt} 는 발전기 출력을 고정시킨 모선번호, N_{gk} 는 출력을 고정시킨 모선을 제외한 모선 번호를 표시한다.

다음 발전기출력의 최적치가 구하여지면 이 발전기출력의 증감으로 인한 무효전력의 변화량을 구할 필요가 있다. 식 (2.6)과 (3.6)에서 부터 식 (3.17)이 유도된다.

$$\textcircled{2} [\Delta Q_{gcs}] = [J_{gcs}] \cdot [H_{gcl}]^{-1} \cdot [\Delta P_{gcl}] \quad (3.17)$$

따라서 유효전력 제어치 발전기 유효출력의 최적치를 위한 $[\Delta P_g]$ 의 변화로 인한 무효전력의 소요 변화량을 각 무효전력 제어모선에 부가하여 소요 무효전력을 수정한다.

- (1) 식 (3.8)의 우변항 $H_{sk} = \frac{\partial P_s}{\partial P_k}$ 를 구한다.
- (2) [H]행렬을 형성한다.
- (3) [H]행렬을 삼각화 인수분해 한다.
- (4) ΔP_g 에 관한 ΔP_s 의 감도행렬 $[\alpha]$ 를 구한다.
- (5) 증분연료비 λ 를 계산한다.
- (6) 증분발전기 출력 ΔP_g 를 계산한다.
- (7) 증분 모선무효전력을 구한다.

4. 퍼지 선형계획법을 적용한 무효전력 제어

4.1 무효전력 제어의 정식화

무효전력 제어는 모선전압의 상차각을 일정하게 유지한 상태에서 무효전력 제어 설비용량의 상하한 및 계통전압의 허용 상하한 제약조건하에서 목적함수인 총선로손실 또는 총발전비용을 최소로 하는 무효전력원 투입량과 변압기의 탭 정치를 결정하는 문제로서 총발전비용 (F_q)을 목적함수로 취할 경우에는 일반적으로 다음식과 같이 정식화 된다.

$$F_q = \sum_{k \in N_{gcs}} f_q(Q_{gk}, n_k) \quad (4.1)$$

$$Q_{gk_{min}} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk_{max}} \quad (4.2)$$

$$V_{k_{min}} \leq V_k \leq V_{k_{max}} \quad (4.3)$$

이 경우에도 목적함수는 제어변수의 증분량으로 변형시킬 수 있다.

$$F_q = \sum_{k \in N_{gcs}} f_q(\Delta Q_{gk}, \Delta n_k) \quad (4.4)$$

이때 무효 전력 투입량과 각 모선 전압의 상, 하한은 퍼지 제약으로 표시하면 다음식과 같다.

$$Q_{gk_{min}} - Q_k \leq \Delta Q_{gk} \leq Q_{gk_{max}} - Q_k \quad (\text{단 } K \in N_{gcs}) \quad (4.5)$$

$$V_{k_{min}} - V_k \leq \Delta V_k \leq V_{k_{max}} - V_k \quad (\text{단 } K \in N_{gcs})$$

4.2 선형계획법에 의한 무효전력 제어

식 (2.7)에서

$$[\Delta P] = [N][\Delta V] + [T_p][\Delta N] \quad (4.6)$$

$$[\Delta Q] = [L][\Delta V] + [T_q][\Delta N] \quad (4.7)$$

이때 식 (4.6)에서 우변 제2항은 그 효과가 적으므로 무시하고 식 (4.7)을 식 (4.6)에 대입하면 식 (4.8)과 같이 표시된다.

$$[\Delta P] = [N][L]^{-1} \{ [\Delta Q] - [T_q][\Delta N] \} \quad (4.8)$$

식 (4.8)에서 $[N][N]^{-1} = [B]$ 라 놓으면 [B]행렬의 요소값은 [L]행렬의 삼각화 분해된 값을 이용하면 식 (4.9)로 부터 간단히 구할 수 있으며 식 (4.8)은 식 (4.10)과 같이 된다.

$$[L]^T [B]^T = [N]^T \quad (4.9)$$

$$[\Delta P] = [B][[\Delta Q] - [T_q][\Delta N]] \quad (4.10)$$

식 (3.4)에서 c는 b에 비하여 매우 작으므로 우변의 제2항은 무시하고 발전기의 총연료비를 발전기출력의 1차함수로 표시할 수 있다. 따라서

무효전력 제어식 (4.11)을 이용하여 목적함수를 무효전력 제어변수의 1차식으로 표시하면 식 (4.13)과 같이 된다.

$$F_q(\Delta Q, \Delta N) = [Z]^T \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_s \end{bmatrix} = [Z_g \ Z_s] \cdot \begin{bmatrix} B_{gg} & B_{gc} & B_{gs} & B_{gt} \\ B_{gc} & B_{cc} & B_{cs} & B_{ct} \\ B_{gs} & B_{sc} & B_{ss} & B_{st} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q_g \\ \Delta Q_c \\ \Delta Q_s \\ \Delta N \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

여기서 $B_{gt} = -(B_{gg}T_{gq} + B_{gc}T_{cq} + B_{gs}T_{sq} + B_{gt}T_{qt})$
 $B_{st} = -(B_{gc}T_{cq} + B_{cc}T_{cq} + B_{cs}T_{sq} + B_{st}T_{qt})$

또한 무효전력 제어식에는 전력계통의 각 모선 전압이 그 상하한 부등식제약조건을 만족하여야 한다. 따라서 선형계획법을 적용하기 위하여는 모선전압의 증분을 무효전력 제어변수의 1차함수로 표시하여야 한다. 식 (4.7)에서 $[\Delta V]$ 를 구하면 식 (4.12)와 같이 된다.

$$[\Delta V] = [L]^{-1}[\Delta Q - [T_q][\Delta N]] \quad (4.12)$$

여기서 $[L]^{-1} = [U_E]$ 로 놓으면 $[U_E]$ 행렬은 $[L]$ 행렬의 삼각화 분해된 값을 이용하여 식 (4.13)

으로부터 용이하게 구할 수 있으며 식 (4.12)를 변형하여 구체적으로 표시하면 식 (4.14)와 같다.

$$[L][U] = [I] \quad (4.13)$$

$$[\Delta V] = [U_E][\Delta Q - [T_q][\Delta N]] = [U_E][\Delta Q] - [U_E][T_q][\Delta N] = [U][\Delta Q] \quad (4.14)$$

일반 선형계획 문제의 표준형은 식 (4.15) 및 식 (4.16)과 같이 표시된다.

$$\text{목적함수 } Z = [C]^T[X] \quad (4.15)$$

$$\text{제약조건 } [A][X] \leq [b] \quad (4.16)$$

따라서 무효전력 제어식 (4.15) 및 식 (4.16)에 대응되는 목적함수, 부등식 제약조건을 계수 및 제어변수를 표시하면 식 (4.17) 및 식 (4.18)과 같다.

$$F_q(\Delta Q, \Delta N) = \begin{bmatrix} B_{gg} \cdot Z_g + B_{gc} \cdot Z_s \\ B_{gc} \cdot Z_g + B_{cc} \cdot Z_s \\ B_{gs} \cdot Z_g + B_{cs} \cdot Z_s \\ B_{gt} \cdot Z_g + B_{st} \cdot Z_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta Q_g \\ \Delta Q_c \\ \Delta Q_s \\ \Delta N \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} [U] & \Delta Q_g \\ -[U] & \Delta Q_c \\ [I] & \Delta Q_s \\ -[I] & \Delta N \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta V \\ \Delta Q \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$[\Delta V]$, $[\Delta V]$, $[\Delta Q]$, $[\Delta Q]$ 는 각각 모선전압 및

무효전력 증분 벡터의 상한치 및 하한치를 표시한다.

무효전력 제어의 경우에는 이들 부등식 제약조건은 제어변수의 수보다 훨씬 더 많다. 이와 같이 제어변수 및 그의 함수형 부등식 제약조건이 많은 목적함수의 최적치를 구하는 경우에 있어서는 경사법이나 페널티함수를 사용하는 비선형계획법 보다는 선형계획법(LP법: linear programming method)을 반복 사용하는 편이 수속면에서 보다 효과적이다.

4.3 퍼지 선형계획법에 의한 무효전력 제어

식 (4.18)의 제약조건에 $[\delta]$ 만큼의 퍼지영역을 설정하던 퍼지 선형계획법을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\text{목적함수 } Z = [C]^T[X] \quad (4.19)$$

$$\text{제약조건 } [A][X] \leq [b] \quad (4.20)$$

$$[X] \geq [0]$$

본 논문에서 무효전력 제어에 퍼지 선형계획법의 모델로 모선전압의 제약조건 즉 $[b] + [\delta]$ 내에서 총발전 비용을 최소로 하는 문제로 전력계통에서 모선전압에 대한 퍼지영역 설정의 개념도는 그림 2와 같다.

위 그림에서 부하모선 전압에 대한 멤버십 함수를 퍼지영역 하한은 $V_{kmin} + \delta = 0.95$ 정도이고 상한은 $V_{kmax} - \delta = 1.05$ 정도로 하는 멤버십 함수로 본다.

식 (4.16)의 제약조건은 $b = [b_1, \dots, b_m]^T$ 에서 $[b] + [\delta]$ 까지 단조증가(감소)시킬 때 증가되는 정도는 제약조건에 선형형 멤버십 함수가 된다. 이를 다음과 같이 정의한다.

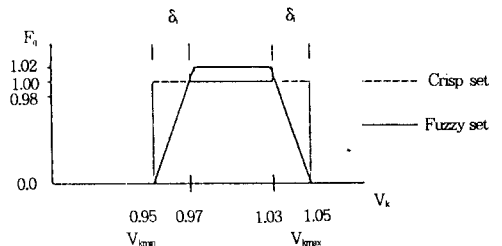


그림 2. 전압제약에 대한 멤버십 함수
 Fig. 2. Membership Function for Voltage Constraints.

$$\mu_G(\delta_i), \delta_i \geq 0 \quad i=1, \dots, m \quad (4.21)$$

이때 퍼지 목표는 식 (4.22)와 같이 된다.

$$\mu_G(x) = c \cdot x / v \quad (4.22)$$

여기서

$$v = \max_{x \in K} c \cdot x \quad (4.23)$$

$$K = \{x \mid a \cdot x \leq b, x \geq 0\}$$

$$\text{단 } b = (b_1 + \delta_1, \dots, b_m + \delta_m)^T$$

$$\delta_i = \max\{\delta_i \mid \delta_i \in \sup \mu_G\}, i=1, \dots, m$$

4.4 무효전력 제어에 관한 계산 흐름도

본 방식의 무효전력 제어는 발전소의 총연료비를 무효전력 제어변수(무효전력투입량 및 탭의 정정치)의 1차 함수로 선형화 하여 이를 목적함수로 취하고 제어변수의 상하한 조건, 모선전압의 상하한 조건하에서 목적함수인 총연료비를 최소화하는 제어이다. 무효전력 제어에 관한 계산 과정의 순서를 표시하면 다음과 같다.

- (1) 식 (4.10)의 무효전력 제어변수에 대한 발전기 출력의 감도행렬 [B]를 구한다.
- (2) 식 (4.17)의 목적함수의 계수 [Z][B]를 구한다.
- (3) 식 (4.13)을 이용하여 무효전력 제어변수에 대한 모선전압의 감도행렬 [U]를 구한다.
- (4) 식 (4.18)을 이용하여 제약조건식을 구성한다.
- (5) 퍼지 선형계획법을 계산하며 퍼지선형계획의 계산방법은 다음과 같다.

① 식(4.7)에서 제약조건 $[b] = [b_1, \dots, b_m]^T$ 에 제약조건을 나타내는 퍼지 영역 $[\delta_i]$ 를 설정하여 제약한도를 $[b] = [b_1 + \delta_1, \dots, b_m + \delta_m]^T$ 로 한다.

② 식 (4.16)에서 μ_G 를 계산한다.

③ 초기 설정 $\alpha_1 (=0/8)$ 값에서 $\mu_G(x)$ 값을 뺀 ϵ_1 을 구한다. 만일 ϵ_1 이 ϵ 보다 적으면 계산을 끝내고 이때의 x 를 구한다. (2.1.2절의 퍼지 선형계획법의 해법(알고리즘) 참조)

(6) 무효전력 변수의 최적해가 구하여 지면 발전기 출력의 증분량을 구하고 이 증분량을 각 발전기 출력에 재배분하여 각 발전기의 부하배분량을 결정한다.

5. 모델 전력계통에의 적용에

5.1 모델 전력계통

본 논문에서 제시한 알고리즘 및 방법에 대한 효용성을 입증하기 위하여 모델계통으로 그림 3 및 그림 4와 같은 IEEE 6 모선 및 30모선 모델계통을 선정하여 적용하였다.

또한 각 모델 계통의 연료비 특성은 각각 표 5.1의 (a), (b)와 같다.

5.2 계산 결과 및 고찰

5.2.1 사례연구

본 연구에서는 6 모선계통에 대하여 전부하(full load)상태 및 1/2부하(half load)의 2가지 사례와 30 모선계통에서는 표 5.2(a)와 같은 연료비 계수를 선정하여 사례연구를 하였으며 각 모선전압 제약에 대한 퍼지영역은 모선 정격전압이

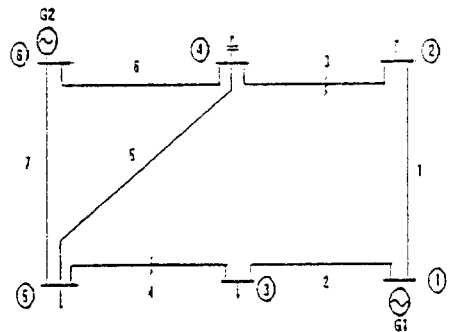


그림 3. IEEE 6 모선 모델 계통도
Fig. 3. IEEE 6 Bus Model System.

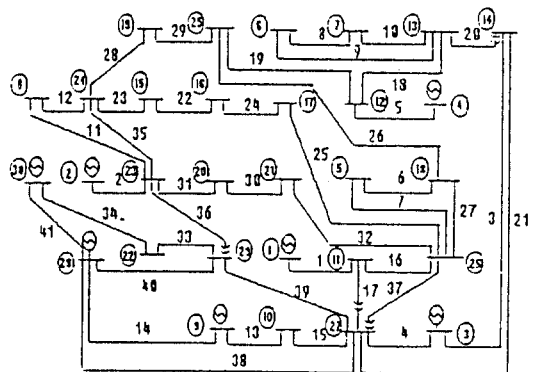


그림 4. IEEE 30 모선 모델 계통도
Fig. 4. IEEE 30 Bus Model System.

3%[P.U] 변동범위 이내라면 정상운전이라 볼 수 있고 3-5% [P.U]사이라면 계통운용에서 허용할 수 있다라는⁹⁾ 면에서 각각 0-5% 정도의 퍼지 영역폭을 설정하여 계산하였다.

5.2.2 6모선계통 및 30모선계통 계산결과 및 고찰

6모선계통 및 30모선계통의 무효전력제어에 퍼지선형계획법을 적용한 경우 계산 결과는 각각 표 5.2 및 5.3과 같다.

6모선 계통에서 본 방법을 적용한 결과는 표

표 5.1 연료비 특성

Table 5.1 Characteristics of Fuel Cost.

(a) IEEE 6모선 계통

Unit 1(모선번호 1)			Unit 2(모선번호 6)		
a	b	c	a	b	c
0.0	1.0	0.001	0.0	1.0	0.002

(b) IEEE 30모선 계통

모선번호	a	b	c
1	0.0	3.00	0.0250
2	0.0	3.00	0.0250
3	0.0	3.25	0.0083
9	0.0	1.00	0.0625
28	0.0	1.75	0.0175
30	0.0	2.00	0.0037

표 5.2 6 모선계통에 대한 적용결과

Table 5.2 Summary of Result on the 6 bus System

제어 및 함수형 변수	상하한치		전부하		1/2부하	
	하한	상한	초기 운전상태	최종 결과치	초기 운전상태	최종 결과치
Pg1(MW)	20	100	90.0	47.12	20.00	27.77
Pg6(MW)	20	100	64.34	97.30	50.28	42.67
Qg1(MVAR)	-20	100	28.00	26.48	14.71	17.51
Qg6(MVAR)	-20	100	55.96	31.68	12.54	9.09
Qg4(MVAR)	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0
Qg5(MVAR)	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	0.0
n1	0.9	1.1	1.0	1.062	0.909	0.999
n2	0.9	1.1	1.0	1.011	0.976	0.996
V1(P.U)	1.0	1.15	1.1000	1.1452	1.0	0.0681
V2(P.U)	0.9	1.0	0.8848	1.0061	0.8699	0.9491
V3(P.U)	0.9	1.0	0.8592	0.9548	0.9165	0.9503
V4(P.U)	0.9	1.0	0.9171	0.9624	0.9596	0.9547
V5(P.U)	0.9	1.0	0.9033	0.9539	0.9460	0.9505
V6(P.U)	1.0	1.10	1.0500	1.0509	1.0	0.9897
발전비용(R/H)			170.71	165.63	75.74	74.91
선로손실(MW)			19.34	9.45	2.8	3.04
발전비용 저감율(%)			2.97		1.33	

5.2에서와 같이 모든 경우에 초기운전상태에서는 부하모선 전압이 그 하한을 벗어나고 있으나 유효-무효전력 제어 반복계산후에는 모든 제약조건을 만족하고 있으며 또한 전부하 및 1/2부하의 경우 총연료비는 초기 운전 상태에 비하여 각각 2.97(%)와 1.09(%)까지 저감되었다. 각 경우에 연료비 저감효과가 다른 것은 초기 발전기 출력은 선로 손실을 무시하고 “등증분비 연료비 법칙”에 따라 결정된 것이나 이와 같이 결정된 초기운전

표 5.3 30 모선계통에 대한 적용결과

Table 5.3 Summary of Result on the 30 Bus System

제어 및 함수형 변수	상 하한치		초기 운전상태	최종 결과치
	하한	상한		
Pg1 (MW)	10	30	20.00	11.58
pg2 (MW)	12	40	20.00	13.39
pg3 (MW)	10	35	20.00	26.60
Pg9 (MW)	15	50	50.00	19.70
Pg28 (MW)	20	80	80.00	33.40
Pg30 (MW)	50	200	99.57	190.40
Qg1 (MVAR)	-10	50	16.80	50.00
Qg2 (MVAR)	-15	60	21.14	60.00
Qg3 (MVAR)	-15	60	-33.70	28.60
Qg9 (MVAR)	-15	80	17.83	41.80
Qg28(MVAR)	-20	100	28.65	41.40
Qg30(MVAR)	-20	200	40.97	60.10
Qc5 (MVAR)	0.0	5.0	0.0	7.0
Qc7 (MVAR)	0.0	5.0	0.0	7.0
Qc15(MVAR)	0.0	5.0	0.0	7.0
Qc17(MVAR)	0.0	5.0	0.0	5.4
Qc19(MVAR)	0.0	5.0	0.0	1.6
Qc21(MVAR)	0.0	5.0	0.0	0.0
Qc23(MVAR)	0.0	5.0	0.0	0.0
Qc24(MVAR)	0.0	5.0	0.0	0.0
Qc25(MVAR)	0.0	5.0	0.0	0.0
Qc26(MVAR)	0.0	5.0	0.0	0.0
n1	0.9	1.1	1.0	1.0
n2	0.9	1.1	1.0	1.054
n3	0.9	1.1	1.0	1.079
n4	0.9	1.1	1.0	1.016
V1 (P.U)	0.95	1.1	1.05	1.075
V2 (P.U)	0.95	1.1	1.05	1.078
V3 (P.U)	0.95	1.1	1.01	0.997
V9 (P.U)	0.95	1.1	1.05	0.992
V28(P.U)	0.95	1.1	1.08	1.001
V30(P.U)	0.95	1.1	1.10	0.997
발전비용 (R/H)			902.94	813.94
선로손실(MW)			6.18	11.72
발전비용 저감율(%)			9.85	

상태의 양부에 의한 것이다.

30모선 계통에서는 표 5.3에서와 같이 유효-무효전력 제어 반복계산후에는 모든 제약조건을 만족하고 있으며 또한 총연료비는 초기 운전 상태에 비하여 9.85(%)로 절감되었다.

30모선의 시뮬레이션 결과에서 제안한 퍼지 선형계획법은 종래의 선형계획법보다 계산시간이 각각 39' 49"와 36' 48"이었다.

또한 퍼지영역을 크게 선택하여 시뮬레이션해본 결과 계통의 모든 조건이 향상되는 것이 아니라는 것을 알 수 있었으며 일반 선형계획법에서 해를 구할 수 없는 경우에도 퍼지 선형계획법을 적용함으로써 해를 구할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문은 전력계통운용에 관한 합리적인 유효 및 무효전력 제어방법을 제시한 논문으로 본 논문의 주요 특징은 다음과 같다.

(1) 유효전력-무효전력 제어 분할법, 최적모선부여 삼각화 인수분해법을 적용하고 전력조류방정식의 자코비 행렬의 스파스한 성질을 이용함으로써 계산시간의 단축 및 계산기 기억용량을 최대한으로 경감하였다.

(2) 무효전력 제어시에도 목적함수로서 총 선로손실을 취하지 않고 발전소의 총연료비를 취함으로써 보다 합리적인 경제성을 도모하였다.

(3) 특히 무효전력 제어시에는 매우 많은 함수형 부등식 제약조건 즉 모선전압의 상하한 제약조건을 일정한 값으로 고정하지 않고 어떤 허용폭을 주어 조건을 완화하는 퍼지 선형계획법을 적용함으로써 확정적인 제약을 갖는 일반 선형계획법을 적용할 때보다 다음과 같은 유리한 점이 있음을 확인하였다.

① 확정적 제약을 갖는 일반 선형계획법에서는 목적함수 및 부등식 제약인 모선전압의 선형화로 인한 오차를 줄이기 위하여 반복계산을 필요로 하나 퍼지 선형계획법에서는 반복 계산회수를 줄이고 계산시간을 단축시킬 수 있다.

② 일반 선형계획법에서는 해의 실행 불가능한 경우에도 제어변수 및 제약조건을 제한치에 허용

변동폭을 주는 퍼지 선형계획법을 적용함으로써 실행해를 얻을 수 있다.

③ 확정적인 제약조건하에서 단일 목적함수를 최적화시킬 경우 제어변수 및 제약조건은 그 제한치 근처에 있게 되는 경향이 있으나 퍼지 선형계획법을 적용하면 운용자의 의지에 따라 제한치 근처에서 운용하는 것을 피하고 제어기 조작의 여유를 갖도록 함으로써 우발적인 비상시에도 무효전력을 제어하여 사고에 대비할 수 있도록 하였다.

(4) 유효전력 제어와 무효전력 제어를 반복 계산하여 최적해를 구하지 않고 유효전력 제어는 단 1회만 실시하여 선로손실을 고려한 각 발전기의 최적부하 배분량을 결정한 후 퍼지 선형계획법에 의한 무효전력 제어의 반복에 의하여 최적 무효전력 제어변수의 값을 구함으로써 반복회수 및 계산시간을 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) L.K.Kirchmayer, Economic operation of power system, John Wiley, 1958.
- 2) 정재길, "전력계통의 경제적운용에 관한 연구", 중앙대 기술과학연구소보, 제3집, pp.1~13, 1976. 12.
- 3) H.W. Dommel and W.F. Tinney, "Optimal power Flow Solution", IEEE Trans, VOL PAS 87, pp. 1866~1876, 1968. 10.
- 4) 박영문, 이광연, "A New Algorithm for optimal Real and Reactive Power Dispatch", 대한전기화학논문지 Vol. 32, No.4, pp.37~154, 1983. 4.
- 5) Kevin Tomsovic, A Fuzzy Linear programming Approach to the Reactive power/voltage control problem, IEEE trans. Vol. 7, No.1, 1992.2.
- 6) 정재길, 박영문, 전력계통의 합리적 운용제어에 관한 연구, 대한전기학회 논문지, Vol.33, No.10, pp.410~422, 1984.10.
- 7) 佐藤, 生田 電氣供給설비設備擴充問題에 Fuzzy LP 計劃法 導入, 일본전기학회 전력기술자료 PE-82-3(57)
- 8) H.J.Zimmerman, Description and Optimzation of Fuzzy System, Inter.J.Gen, Systems, pp.209~215.
- 9) 田中, 野, 田, 퍼지 수리 계획법, 일본계측 자동제어 학회 논문집, Vo.19, No.5, pp.609~613, 昭和62.
- 10) 寺, 岩本, '퍼지 수리계획법을 이용한 최적조류계산', PE-87-613, pp.609~613, 昭和 47.
- 11) H.J.Zimmerman, Fuzzy Set Theory and its Applications, Kluwer Academic Publishers