

뉴턴 최적전력조류계산의 해 특성에 관한 연구

김준현                      황갑주                      이재규  
한양대학교                  울산대학교                  한양대학교

( A Study on the Solution Characteristics of  
Optimal Power Flow Calculation Using Newton Method )

Joon-Hyun Kim              Kab-Ju Hwang              Jae-Gyu Lee  
Hanyang Univ.              Ulsan Univ.              Hanyang Univ.

Abstract

Newton-OPF proposed by W.F Tinny and his fellows in 1984 is most useful and powerful algorithm in optimal power flow calculation. But, several problems prevent its application to practical uses.

The problems are determination of active sets, initial values of variables, soft and hard weights, and discrete variables such as transformer taps.

In this paper, convergence characteristics of Newton OPF is analyzed with effects of these factors using wide - used 5-bus sample system.

Wide - use of results in this paper is appreciated.

1. 序 論

電力系統分野의 해석이나 제어산법은 기본적으로 전력조류계산으로부터 시작된다. 조류계산은 주어진 電力系統의 접속상태와 각 母線에 주입되는 전력으로부터 상태변수인 전압을 결정하고, 이 전압을 이용하여 각 선로에 흐르는 전력조류를 계산하나 최적전력조류계산(Optimal Power Flow Calculation;OPF)은 계통의 운전조건 하에서 제어변수를 조정하여 적합한 계통운전상태를 결정함과 동시에 목적함수를 최적화하는 것이다.

일찍이 뉴턴 潮流計算法을 제안한 바 있는 Tinney 등은 EPRI의 지원을 받아 실제중에 보편적으로 적용할 수 있는 새로운 산법을 제안하고 " The Newton's OPF " 라고 명명하였다.<sup>[1,2]</sup> 이 算法의 착상은 조류계산에서 큰 잇점을 지닌 뉴턴법을 다변수 비선형 함수의 최적해를 구하는데 도입하자는 것이었다. 즉, 해 과정에서 2차 미분으로 근사화한 라그랑제 함수의 모든 미지수를 스퍼스 행렬기법에 의해 동시에 풀어 내자는 것이었다. 이러한 시도는 그동안 OPF 산법의 공통적인 문제점으로 지적되어 온 계산시간과 기억량을 획기적으로 개선하였다.

뉴턴 OPF는 실제중 적용시 종래의 산법에 비해 이론적으로 우수한 것이 밝혀 졌지만 최적상태에서 고정시켜야 할 부등제약 변수를 식별해야 하는 난점이 내재되어 있고 아직도 규명되어야 할 문제점이 많이 있다.

본 논문은 뉴턴 OPF의 해 특성에 있어서 대표적이면서도 실용화에 장애가 되고 있는 아래의 6가지 해 특성을 규명함으로써 앞으로 뉴턴 최적전력조류의 연구 방향설정에 기초가 되리라 기대한다.

1 뉴턴 OPF는 이론적으로 초기치의 영향을 크게 받지 않는 수렴특성을 가지고 있으나, 이 초기치가 부

등제약변수의 식별에 영향을 주게되므로, 초기값의 설정이 해 수렴특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2 초기값은 일반적으로 해 가능 영역에 있는 값으로 시작한다. 수정량 ( ΔZ )이 크면 갱신 되는 값은 상,하한을 위반하게 되므로 올바른 Active 세트를 식별하는데 장애가 된다. 따라서 연성가중치를 사용하여 수정량을 작게 하므로써 해 수렴 특성의 영향을 규명하고자 한다.

3 부등제약을 만족하기 위하여 널리 쓰이는 방법으로는 라그랑제 함수에 2차형 페널티 함수를 부과하는 목시적인 기법을 쓴다. 이때 주입되는 페널티의 가중치가 부등제약 변수를 식별하는데 영향을 주게 되므로 뉴턴 OPF에 인위적으로 선정되는 가중치의 영향을 규명한다.

4 미 반복시 바인딩 세트의 조합이 달라지므로 인덱스 기법<sup>[3]</sup>에 의한 수렴특성을 규명한다.

5 변압기 탭과 같이 이산화된 해 결과를 필요로 할 때 해 특성을 검토하였다.

6 부하모형<sup>[4]</sup>을 도입했을때의 해 특성과 수렴특성을 규명한다.

사례로는 널리 인용되는 5모선 계통을 사용하였는데 이 계통은 다양한 제어가 들어있고 해 특성의 제반영향을 동시에 파악할 수 있으며 수렴이 어려운 5모선의 사례를 규명함으로써 실 계통에 쉽게 접근할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

2. 최적전력조류

2.1 문제의 설정

발전비용 최소화를 나타내는 목적함수, 전력편차 방정식을 나타내는 등식제약조건, 그리고 운전한계를 나타내는 부등식제약조건을 갖는 일반적인 비선형 최적화문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } F ( U , X ) \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{Subject to } G ( U , X ) = 0 \quad \text{----- (2)}$$

$$H ( U , X ) \leq 0 \quad \text{----- (3)}$$

최적전력조류문제에서 다루어지는 변수는 매우 다양하며 대표적인 제어변수와 종속변수를 들면 다음과 같다.

- 제어변수 ( U ) : 발전기 유효전력 PG<sub>i</sub>
- 발전기 무효전력 QG<sub>i</sub>
- 위상변압기 탭 Φ<sub>ij</sub>
- 변압기 탭 t<sub>ij</sub>

- 종속변수 ( X ) : 각 모선전압의 크기 V<sub>i</sub>
- 각 모선전압의 위상각 θ<sub>i</sub>

다음의 두 벡터를 정의하여 최적전력조류문제의 변

수를 일괄적으로 나타낸다.

$$Y \hat{=} [ U, X ]$$

$$Z \hat{=} [ Y, \lambda ] \quad ( \lambda \hat{=} [ \lambda_{p_i}, \lambda_{q_i} ] )$$

OPF 최적화 문제에서 목적함수는 일반적으로 발전비용 최소화나 손실 최소화를 택하나 여기서는 총 발전비용 최소화를 목적함수로 한다.

식 (1)에서 목적함수인 총 발전비용은 각 발전기 출력의 2차 함수로 나타낸 각 발전 비용의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F(Y) = \sum_i (C_i + B_i * P_{Gi}(Y) + A_i * P_{Gi}^2(Y))$$

$F(Y)$  : 총 발전비  
 $i$  : 발전기 모선  
 $P_{Gi}(Y)$  :  $i$  모선의 발전량

$A_i, B_i, C_i$  : 발전비용함수의 계수

송전손실을 최소화 할 경우는 슬랙 발전기의 유효전력 출력만을 제어변수로 둔다면 송전손실을 최소화 하는 해를 얻을 수 있다.

식 (2)에서 등식제약조건은 다음의 경우이다.

i. 발전기 모선의 유효전력은 제어변수이므로 발전기 모선의 전력조류 방정식은 등식제약조건이 된다.

$$P_{Gi} = P_i(Y) + (P_{Gi} - P_{Di})$$

$$= \sum_{j=1} P_{ij} + (P_{Gi} - P_{Di})$$

ii. 발전기 모선의 무효전력은  $Y$ 의 함수  $Q_G(Y)$ 로 두므로  $Q_G(Y)$ 가 상.하한을 위반하였을 때만 등식제약조건이 된다.

iii. 각 부하모선에서 전력조류방정식이 만족되어야 한다.

$$\Delta P_{Li} = P_i(Y) + P_{Di}$$

$$= \sum_{j=1} P_{ij} + P_{Di}$$

$$\Delta Q_{Li} = Q_i(Y) + Q_{Di} - B_{Si}$$

$$= \sum_{j=1} Q_{ij} + Q_{Di} - B_{Si}$$

$$P_{ij} = [(V_i/t_{ij})^2 - (V_i/t_{ij})V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij})]g_{ij}$$

$$+ [(V_i/t_{ij})V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij})]b_{ij}$$

$$Q_{ij} = [(V_i/t_{ij})^2 - (V_i/t_{ij})V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij})]b_{ij}$$

$$- [(V_i/t_{ij})V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij})]g_{ij} - V_i B_{Cij}$$

$B_{Cij}$  = 선로 (i, j)의 병렬 서셉턴스

$B_{Si}$  = 모선 i의 병렬 서셉턴스

식 (3)에서 부등식 제약조건은 실제계의 운전한계가 충족되어야 하는 조건들이다.

$$P_{Gi} < P_{Gi} < \overline{P_{Gi}}$$

$$\underline{\Phi}_{ij} < \Phi_{ij} < \overline{\Phi}_{ij}$$

$$\underline{t}_{ij} < t_{ij} < \overline{t}_{ij}$$

$$\underline{V}_i < V_i < \overline{V}_i$$

$$\underline{Q}_{Gi} < Q_{Gi}(Y) < \overline{Q}_{Gi}$$

여기서 선로조류도 부등식 제약조건에 포함할 수 있다.

### 2.2 라그랑제 함수

등식제약 조건만을 고려한 등식제약 최소화(Constrained Minimization)문제는 라그랑제 승수를 이용하여 비제약 최소화(Unconstrained Minimization) 문제도 변형한 라그랑제 함수를 구성하여 풀수 있다.

$$L(Y, \lambda) = F(Y) - \sum_{i=1}^n \lambda_{p_i} \Delta P_i - \sum_{i=1}^n \lambda_{q_i} \Delta Q_i \quad (4)$$

식 (4)는 목적함수와 등식제약조건만을 포함하여 라그랑제 함수를 이용하여 비제약 최소화 문제를 나타낸

다. 최적전력조류문제는 실제계의 운전한계를 나타내는 부등식제약조건이 있으므로 이 부등식 제약식을 2차 페널티 기법으로 처리한다.

확장된 라그랑제 함수 (Augmented Lagrangian Function)은 식 (4)의 라그랑제 함수와 페널티 함수의 합으로 나타낸다.

$$L^*(Z) = L(Z) + P(Z) \quad (5)$$

$L^*(Z)$  : 확장된 라그랑제 함수

부등식제약조건(변수)을 갖는 목적함수(L)는 페널티를 적용하여 (5)식과 같은 비제약 최소화 문제로 변형하여 풀수 있다. 2차 페널티 기법은 어떤 한계값을 벗어난 변수에 페널티 함수를 사용하여 해 가능 영역에서 최적해를 구하기 위하여 사용하였으며 2차 페널티 함수는 식 (6)과 같다.

$$P_{Vi} = \frac{S_i (Y_i - \overline{Y}_i)^2}{2} \quad (6)$$

$\overline{Y}_i$  : 상한과 하한값을 가지는 부등식 제약변수

$S_i$  : 페널티 가중계수

### 2.3 뉴턴법에 의한 수치해법

비제약 최소화 문제인 라그랑제 함수  $L(Z)$ 이 최적 조건(최소조건)이 되기 위한 필요조건은  $L'(Z) = 0$  이다. 여기서 반복해 과정에서 최적해 ( $Z^*$ )는

$$Z^* = Z + \Delta Z \quad (7)$$

로 나타내어  $L'(Z^*)$ 를 Taylor 급수 전개하면 식 (8)과 같다.

$$L'(Z + \Delta Z) = L'(Z) + L''(Z)\Delta Z \approx 0 \quad (8)$$

즉,

$$\begin{bmatrix} H(Y, \lambda) & -J^T(Y) \\ -J(Y) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(Y) \\ g(\lambda) \end{bmatrix}$$

위의 식을 간결한 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$W \cdot \Delta Z = -g \quad (9)$$

여기서  $W$  행렬은  $Y$ 와  $\lambda$ 에 대한 라그랑제 함수의 2차 편미분

$g$  는  $Y$  와  $\lambda$  에 대한 라그랑제 함수의 1차 편미분

$H(Y, \lambda)$  : 라그랑제 함수의 헤시안 행렬

$J(Y)$  : 전력조류계산의 자코비안 행렬

$g(Y)$  :  $L(Z)$  의  $Y$  대한 Gradient 벡터

$g(\lambda)$  :  $L(Z)$  의  $\lambda$  대한 Gradient 벡터

### 2.4 최적해 판정

식 (7)의 해가 최적임을 검증하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

1. 모든 모선에서  $\Delta P$  와  $\Delta Q$  가 허용오차 범위를 만족해야 한다.
2. 모든 부등식제약조건이 만족되어야 한다.
3. GRADIENT 벡터 = 0 가 만족되어야 한다.
4. 해 가능 영역에 있는 헤시안 행렬의 값 (Determinant)이 유한한 양의 값을 가져야 한다.

그런데 위의 4의 검증은 계통의 규모가 클 경우 변수의 수가 상당히 많으므로  $W(Z)$ 의 차원이 크게 되므로 이러한 직접적인 검증은 상당한 시간이요구된다. 따라서 라그랑제 승수( $\lambda$ )의 부호를 이용하는 간접적인 검증은 이용한다. 또한 이 라그랑제 부호 테스트는 부등식 제약조건을 가지는 변수가 상.하한을 위반하였을 때 Active 세트에 추가 (Enforce) 할 것인지 혹은 방출 (Release) 할 것인지의 지표로도 사용될 수 있

다. 즉,

- i) 상,하한에 묶이지 않은 모든 변수들의 Gradient의 값이 허용치를 만족할것
  - ii) Active 제약세트에 있는 변수의 라그랑제 승수는 아래의 부호테스트를 만족할것
- $$\lambda_i < 0 \quad \text{IF } Y_i = Y_i \text{ (상한)}$$
- $$\lambda_i > 0 \quad \text{IF } Y_i = Y_i \text{ (하한)}$$

이상을 흐름도로 나타내면 그림 2-1과 같다.

3 해 특성에 관한 연구

다양한 제약이 들어있고 해 특성을 전체적으로 파악할 수 있는 5모선계통은 그림 <3-1>과 같다.

3.1 초기 값

뉴턴 최적전력조류는 적당한 초기값을 줄 경우 유일한 해가 존재한다. 최적전력조류의 결과를 이용하여 전력계통 운전기준으로 할때 초기값에 따라 서로 다른 해가 존재하면 계통 운전기준으로 할 수 없기 때문에 유일하지 않으면 안된다. 뉴턴 OPF는 이론적으로 초기치의 영향을 받지 않는 수렴특성을 가지고 있으나, 이 초기치가 부등식 제약 변수의 식별에 영향을 주므로 초기치 설정에 대한 영향을 규명할 필요가 있다. 부등식 제약조건을 갖는 변수중에서  $V_i$ 의 경우 해 가능영역에서 어느정도 벗어난 값을 가져도 해가 존재하나[표 2-3], 위상변압기 탭 그리고 변압기 탭의 경우 수렴하지 않는 경우도 있었다. 표 4는 위상변압기 탭 값을 5로 준 경우이고, 표 6은 변압기 탭을 1.1로 준 경우의 수렴과정을 나타낸다. 해 특성에 있어서 초기값에 따라 해 수렴특성은 조금씩 차이가 났지만 가장 민감한 것은 위상변압기 탭, 변압기 탭이다.

그 이유는 선조류특성을 살펴보면 쉽게 파악할 수 있다. 사례검토 결과 위상변압기 탭과 변압기의 초기값을 각각 0.0 과 1.0에서 시작하는 것이 해 수렴특성에 좋다. 그 수렴과정은 표 1에 나타내었고 다른 초기값을 갖는 경우[표 2 - 5]와 비교함으로써 초기값 설정이 해 수렴특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 연성 가중치

초기값은 해 가능 영역에 있는 값을 가지므로 첫 번째 반복과정에서 두 번째 반복과정로 넘어갈때 수정량  $\Delta Z$  가 크면 부등식 제약조건을 갖는 변수들은 하한 혹은 상한을 위반하게 되며 심할 경우 발산할 우려가 크다.

그러면 자연히 올바른 Active 세트를 찾기위하여 반복횟수가 증가하게 되어 수렴 특성이 나빠진다. 그러므로 가능한 첫 번째  $\Delta Z$ 의 수정량을 작게 하는 것이 바람직하다. 이것은 첫 Iteration 에서 W 행렬의 주대각선 요소 (부등식 제약조건을 갖는 변수)에 연성 가중치를 더함으로써  $\Delta Z$ 의 변화량을 작게 하여 안정된 수렴특성을 기대할 수 있다.

사례 검토 결과 연성 가중치를 사용하지 않는 경우 올바른 Active 세트를 찾는 데 필요한 반복과정 때문에 수렴특성이 나빠짐을 알 수 있다. 이 연성가중치의 값은 커도 되지만  $10^5$  이상이면 수렴에는 별다른 영향을 미치지 못하였다. 그 이유는 연성 가중치는 첫 Iteration 에서  $\Delta Z$ 의 수정량을 작게하여 부등식 제약조건을 가지는 변수의 값이 지나치게 상,하한을 위반하지 않도록 하기 위하여 사용되었기 때문이다. 그리고 이 연성 가중치는 첫 Iteration 에서만 W 행렬의 주대각선 요소에 더해져서 다음 Iteration 부터는 그 영향을 미치지 않는 특징을 가지고 있다.

3.3 강성 가중치

부등식 제약조건을 가지는 변수들이 하한 혹은 상한을 위반하였을 때 그 상,하한값에 묶이위하여 강성 가중치가 도입된다. 강성가중치가 어느정도 작으면 위반된 변수들이 상,하한에 정확히 묶이지 않으므로 해를

구할 수 없다. 그러므로 강성가중치가 크면 클수록 위반된 변수들은 상,하한에 정확히 묶이게 되지만 너무 크면 올바른 Active 세트를 식별하는데 어려움과 수치 계산상 문제가 발생할 수 있기 때문에  $10^8 - 10^{13}$  이 적당하다.

그림3-3 에서 1-3 반복시 발전비용이 감소하지 않고 증가하는 이유는 모든 변수들이 최적해 판정조건을 만족하지 못하므로 인해서 생기는 결과이다. 반복횟수가 4회 이상을 넘어서면 부드럽게 최적해에 근접함을 알 수 있으며 이것은 올바른 Active 세트가 정해졌다는 의미가 내포되어 있다. 따라서 올바른 Active 세트가 정해지면 3,4 회의 반복후 최적해에 도달함을 알 수 있으므로 최적전력조류에 있어서 올바른 Active 세트를 찾는 방법이 해 수렴 특성에 가장 중요함을 알 수 있다.

3.4 바인딩 세트

강성 가중치를 사용하여 부등식 제약조건을 위반한 변수들은 상,하한에 묶는다. 이때 때 반복시 바인딩 세트의 조합이 달라지므로 이를 식별하는 것은 쉽지 않다. 그 식별 방법중의 하나로 인덱스 기법<sup>[3]</sup>을 들 수 있다. 이 인덱스 기법은 반복과정이며 크게 두 단계로 나누어진다.

- 1) 현재의 바인딩 세트에 위반된 변수 혹은 방정식의 새로운 요소 추가.
- 2) 현재의 바인딩 세트에서 더 이상 묶여들 필요가 없는 바인딩된 변수 혹은 방정식을 방출

추가, 방출 지수가 1.0인 경우 위반된 변수 중 가장 크게 위반된 변수 하나와 라그랑제 승수중 가장 큰 값을 가지는 하나만 적용되므로 해 수렴 특성은 매우 느림을 알 수 있다.

추가, 방출 지수가 0.7 보다 크면 바인딩 세트를 찾기 위한 반복과정 이 증가하게 되며 이는 방출 지수가 크므로써 올바르게 묶이지 못한 바인딩 세트가 상,하한에 묶여 있어 바인딩 세트로 부터 해제 (Release) 되지 않으므로 생기는 결과[표 7]이다. 이러한 결과는 방출 지수를 0.8로 하고 추가 지수를 0.2 로 해보면 올바르게 묶

인 바인딩 세트가 해제되지 않아 해가 수렴하지 않는 것을 알 수 있으므로 일반적으로 추가 지수가 방출 지수 보다 큰 값(0.3 - 0.5)으로 하는 것[표 6]이 해 수렴특성에 좋음이 밝혀졌다. 그리고 추가 지수가 작을수록 위반된 변수들에 대해 상,하한에 묶이는 변수의 값이 적으므로 수렴 특성이 늦어지며 추가 지수와 방출 지수의 값이 0.0인 경우 위반된 변수 전부와 라그랑제 승수의 부호 테스트를 만족한 모든 변수를 추가, 방출하므로 올바른 바인딩 세트의 조합을 찾는 데 어려움이 있으며 계통이 작은 경우는 별 문제가 없으나 계통이 커짐에 따라 수렴하지 않는 경우가 있을 것으로 생각된다.

3.5 이산화의 영향

최적전력조류문제의 제어변수는 연속제어변수 (발전기 유효전력과 무효전력)와 이산제어변수 (변압기 탭과 Switchable Capacitor and Reactor) 가 있다. 현재의 최적전력조류는 모든 변수를 연속제어변수로 취급하여 이론적으로 최적해를 구하였지만 실제계통에는 이산제어변수가 존재하므로 이산화의 영향을 고찰해 볼 필요가 있다. 그 검토 단계로서

- i) 현재의 최적전력조류를 이용하여 모든 변수를 연속제어변수로 취급하여 최적전력조류계산의 최적해를 구한다.
- ii) 이산제어변수의 값을 가장 근처의 이산화 값으로 고정한다.
- iii) 고정된 이산제어변수와 나머지 연속제어

변수로 다시 최적해를 구한다.

위와 같은 단계를 거쳐 최적해를 구한 결과[표 8] 모든 변수들의 값들이 조금씩 변하고 총 발전 비용이 조금 증가 하였을뿐 그 변화량이 최적해에서 크게 벗어난 것은 없다. 따라서 모든 변수를 연속제어변수로 취급하여 최적전력조류의 최적해를 구한 후 이산제어변수를 가장 가까운 이산화 값으로 계통을 운전하여도 목적함수 최소화에 큰 영향을 미치지 않는음을 알 수 있었다.

3.6 부하모델의 영향

현재까지 최적전력조류 계산은 부하가 일정하다는 가정하에서 최적해를 구하였지만 실제계의 부하는 일반적으로 전압과 주파수의 함수이다. 따라서 보다 실질적인 최적해를 구하기 위하여서는 부하가 일정한 모델보다 전압변화의 영향을 고려한 부하모델이 필요하다.

여기서는 단순한 지수형 부하 모델을 채택하기로 하고 다음 식으로 나타내었다.

$$PD_i = PD_{0i} V_i^{\alpha_i}$$

$$QD_i = QD_{0i} V_i^{\beta_i}$$

여기서  $\alpha_i$  와  $\beta_i$  는 부하의 성질에 따라 결정되는 값이다.

표 13의 경우 부하 모델을 적용하였을 때 해의 수렴이 조금 빠르지만 일반적으로 부하 모델을 고려할 경우 해 수렴 특성이 늦어지는 것으로 나타났다.[표 12], 표 10에서 부하모델을 적용하였을 때의 전압값은 부하모델을 적용하지 않았을 경우보다 하한으로 그 값을 가지는 경향이 있다. 그 이유는 목적함수를 최소화하기 위하여 전압값을 낮춤으로써 부하를 감소시키려는 결과이다.

목적함수에 전압 제어 범위를 제한할 수 있는 제약식을 추가하여 최적화함으로써 위에서 제기된 문제점을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최적전력조류계산의 실용화에 장애가 되는 해 특성을 규명 하였다.

1. 뉴턴 OPF는 초기치가 부동제약변수의 식별에 영향을 주므로 위상변압기 탭과 변압기 탭의 경우 초기값에 민감하므로 각각 0.0과 1.0에서 시작하는 것이 해 수렴에 좋았다.

2. 초기값은 해 가능 영역의 값을 가지므로 첫 번째 Iteration 에서 두 번째 Iteration 으로 넘어갈때 수렴량 ( $\Delta Z$ )를 작게 함으로서 올바른 Active 세트 쉽게 찾아 해 수렴특성을 증진 시켰다. 따라서 연성 가중치의 필요성과 해 특성에 미치는 영향 그리고 연성 가중치의 크기 범위를 규명하였다.

3. 위반된 변수를 류기 위하여 강성 가중치를 사용할 때 큰 값일 수록 좋지만 수치 계산상의 문제가 발생할 수 있으므로 그 값의 크기가 제한되어야 한다.

4. 매 반복시 Active 세트의 조합은 인덱스 기법으로 처리하였다. 이때 추가 지수와 방출 지수의 상호관계를 규명함으로써 해 수렴특성을 높일 수 있었다.

5. 실제계에는 이산 제어변수가 존재하므로 모든 변수를 연속 제어변수로 취급하여 구한 최적해를 이산화 변수에 대하여 이산화 시킬 경우 비용이 조금 증가하고 변수들의 값이 조금씩 변화하였을뿐 큰 영향은 없었다. 따라서 연속제어변수로 최적해를 구한 후 이산제어변수를 가장 근처의 값으로 고정하여 계통을 운전하여도 원래 문제의 목적을 성취할 수 있다.

6. 부하모델을 적용하였을 때 해 특성과 수렴특성을 규명하였다. 부하모델 고려시 전압값이 하한 값을 가지

는 경향이 있으므로 목적함수에 전압제어 범위를 제한하는 제약식을 추가하여 최적화하면 위의 문제점을 개선할 수 있는 결과를 얻을 수 있으리라 기대한다.

위의 6가지 해 특성을 규명함으로써 최적전력조류 계산의 연구방향 설정에 크게 기여 하리라 생각한다.

5. 참고 문헌

1. H. W. Dommel and W. F. Tinney, " Optimal Flow Solution ". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS - 87, pp.1866 - 1876, October 1986.
2. D.I.Sun, B.Ashley, B.Brewer, A.hughes, W.F.Tinney, " Optimal Power Flow Solution by Newton Approach ", IEEE Trans Vol. PAS - 103, NO. 10, pp.2864 - 2880, Oct. 1984
3. D.I.Sun, T.Hu, G.Lin, C.Lin, C.Chen, " Experiences with Implementing Optimal Power Flow for Reactive Scheduling in the Taiwan Power System ", IEEE/PES Summer Meeting Paper 87SM505-1, July 1987
4. R.Y.Kwok, "Optimal Power Flow in Power Systems Research Center, The University of Texas at Arlington, Dec. 1987
5. W.F. Tinney, J.M. Bright, K.D. Demaree, B.A. Hughes, " Some Deficiencies in Optimal Power Flow ", IEEE Trans Vol. PAS - 103, NO. 2, pp.676 - 683, May 1988
6. W.F. Tinney, V.Brandwajn, S.M.Chan, " Sparse Vector Methods ", IEEE Trans Vol. PAS - 104, NO. 2, pp.295 - 391, Feb.1987

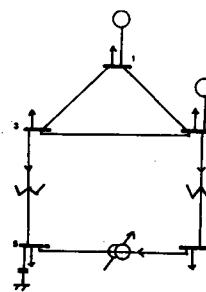


그림 3-1 5 모선 계통 계통

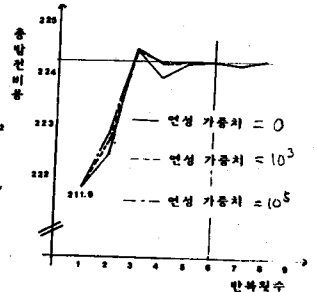


그림 3-2 연성 가중치의 수렴특성

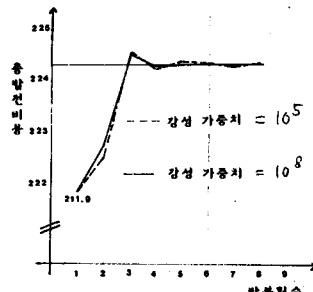


그림 3-3 강성 가중치의 수렴특성

변수 이름	조 기 값				
	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
PG1	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
PG2	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
PG3	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00
PG4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10
PG5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05
PG6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG7	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG9	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG11	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG13	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG15	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG17	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PG19	1.03	0.70	3.03	1.03	1.03
PG20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

--- 표 1 ---

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	총 발전 비용 $\Delta P$	최대 전력편차 $\Delta Q$
1	1	0	.21190000E+03	.50000000E+00
2	2	1	.22280361E+03	.73454298E-02
3	4	3	.22456490E+03	.11456336E-01
4	1	2	.22437306E+03	.22593357E-01
5	1	2	.22437821E+03	.13020495E-03
6	1	2	.22439341E+03	.26320631E-04

--- 표 2 ( $V_G = 0.7$ ) ---

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	총 발전 비용 $\Delta P$	최대 전력편차 $\Delta Q$
1	1	0	.21190000E+03	.50000000E+00
2	10	4	.22280361E+03	.15546291E-01
3	4	3	.22456490E+03	.24257720E+00
4	3	2	.19189433E+03	.40657223E+00
5	2	2	.22297394E+03	.54154764E-02
6	1	2	.22430030E+03	.10974791E+00
7	1	2	.22407171E+03	.22092665E-02
8	1	2	.22439329E+03	.51613079E-06

--- 표 3 ( $V_G = 3.03$ ) ---

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	총 발전 비용 $\Delta P$	최대 전력편차 $\Delta Q$
1	1	0	.21190000E+03	.50000000E+00
2	6	3	.22280361E+03	.24819879E-02
3	4	4	.22306911E+03	.24257720E+00
4	6	3	.20818048E+03	.10554513E+01
5	1	2	.22013822E+03	.15468330E+00
6	1	2	.22419038E+03	.17407527E-01
7	1	2	.22419038E+03	.62470010E-03
8	1	2	.22439329E+03	.59912101E-06

--- 표 4 ( $K_G = 5.0$ ) ---

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	총 발전 비용 $\Delta P$	최대 전력편차 $\Delta Q$
1	1	0	.21190000E+03	.50000000E+00
2	2	3	.21631765E+03	.14364506E+01
3	5	4	.22466524E+03	.15076182E-01
4	9	4	.22521932E+03	.18037099E-01
5	1	2	.22013822E+03	.50881765E+00
6	1	2	.22747818E+03	.27471322E-01
7	6	3	.21409673E+03	.37324376E-01
8	1	3	.21897681E+03	.21894200E+00
9	1	2	.22364494E+03	.10994285E-01
10	1	2	.22415698E+03	.18852297E-02
10	1	2	.22439329E+03	.19420640E-04

--- 표 5 ( $K_{G1}, K_{G2} = 1.1$ ) ---

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	총 발전 비용 $\Delta P$	최대 전력편차 $\Delta Q$
1	1	0	.21190000E+03	.50000000E+00
2	1	3	.19522485E+03	.19522967E+00
3	4	3	.22256936E+03	.47643379E-02
4	1	2	.22383579E+03	.24140561E-01
5	10	2	.22453573E+03	.16203921E-03
6	7	2	.22434530E+03	.30240887E+00
7	1	2	.22359094E+03	.13969063E+00
8	1	2	.22408409E+03	.14608119E-02
9	1	2	.22439313E+03	.13424924E-05
9	1	2	.22439313E+03	.12710931E-04

표 6 주가 지수 = 0.8    반출 지수 = 0.3

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	위반된 방정식의 총 수	변수화 방정식의 총 수	부 /주 가	부 /주 가	바인딩 세트의 총 수
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0

표 13  $\alpha_G = 1.1$      $\beta_G = 1.1$

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	발 전 비 준	BUS	ALPHA	BETA
1	1	0	.21190000E+03	1	0.0	0.0
2	1	3	.22312782E+03	2	0.0	0.0
3	1	2	.22256936E+03	3	0.0	0.0
4	1	2	.22198708E+03	4	0.0	0.0
5	1	2	.22205767E+03	5	1.1	1.1

표 7 주가 지수 = 0.8    반출 지수 = 0.7

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	위반된 방정식의 총 수	변수화 방정식의 총 수	부 /주 가	부 /주 가	바인딩 세트의 총 수
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0

표 8 이상 제어변수의 이산화 영역

VARIABLE NAME	OPTIMAL SOLUTION	DISCRETE STEP (1.0)	DISCRETE STEP(0.95)
PG1	.76946	.76949	.76942
PG2	.88882	.88889	.89025
PG3	.00588	.00604	.58050
PG4	.99849	1.0000	.95000
PG5	.98720	1.0000	.95000
PG6	.00000	.00000	.00000
PG7	1.05000	1.05000	1.01095
PG8	-.01689	-.0170	-.01818
PG9	1.04750	1.0483	1.00894
PG10	-.03960	-.03978	-.04215
PG11	1.03670	1.10376	.99655
PG12	-.03121	-.03155	-.03269
PG13	1.05000	1.05004	1.05000
PG14	-.04510	-.04580	-.04701
PG15	1.04698	1.03482	1.04645

표 9 부하모형 설정 결과

GENERATION	LOAD	SHUNT
MW	MVAR	MVAR
1	1.05000	1.0000
2	1.04750	1.0000
3	1.03670	1.0000
4	1.05000	1.0000
5	1.04698	1.0000

표 10 부하모형 설정 결과

GENERATION	LOAD	SHUNT
MW	MVAR	MVAR
1	1.05000	1.0000
2	1.04750	1.0000
3	1.03670	1.0000
4	1.05000	1.0000
5	1.04698	1.0000

표 11  $K_G = 0$      $\beta_G = 0$

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	발 전 비 준	BUS	ALPHA	BETA
1	1	0	.21190000E+03	1	0.0	0.0
2	2	1	.22280361E+03	2	0.0	0.0
3	4	3	.22456490E+03	3	0.0	0.0
4	1	2	.22437306E+03	4	0.0	0.0
5	1	2	.22437821E+03	5	0.0	0.0
6	1	2	.22439341E+03	5	0.0	0.0

표 12  $\alpha_G = 1.1$      $\beta_G = 1.1$

주(MAIN) 반복횟수	부(TRIAL) 반복횟수	바인딩 세트의 총 수	발 전 비 준	BUS	ALPHA	BETA
1	1	0	.21190000E+03	1	0.0	0.0
2	6	5	.22060756E+03	2	0.0	0.0
3	5	5	.22280361E+03	3	0.0	0.0
4	5	3	.20610943E+03	4	1.1	1.1
5	7	4	.21785173E+03	5	0.0	0.0
6	1	3	.21871733E+03	5	0.0	0.0
7	1	3	.21899578E+03	5	0.0	0.0