대한전기학회 1984년도 하계학술회의 논문집 1984년 7월 20일

전력계통의 기준운전전압 결정 앨고리즘에 관한 연구

A STUDY FOR DETERMINATION ALGORITHM OF REFERENCE VOLTAGE IN THE OPERATING CONDITION OF POWER SYSTEM

송 길 영 고 려 대 학 교

김 규 정* 고 려 대 학 교

1. 서 론

본 연구에서 다루고자 하는 기준운전전압이란 합리적인 계통운용을 이루어 나가기 위하여 도입하고자 하는 최적운용상태의 하나로서, 전압-무효전력 제어에 있어서의 이른바 운전목표상태라고도 볼 수 있는 것이다.

본 연구에서는, 이의 결정을 위하여 계산기의 기억용량, 계산속도, 수렴성의 측면에서 유효한 새로운 앨고리즘을 개발하여 보고하는 바이다.

2. 본 론

(1) 기본방정식

기준운전전압 결정을 위하여 다루고자 하는 최적화 문제를 일반적인 식으로 나타내어 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(u,x) \\ \text{s.t.} \quad & g(u,x)=0 \qquad (1) \\ & h(u,x)\geq 0 \end{aligned}$$

단, $f(u,x)$: 계통손실에 관한 식 (목적함수)

$g(u,x)$: 계통의 전력방정식

$h(u,x)$: 계통의 운전한계치

u :무효전력 제어변수

x :무효전력 상태변수

(2) 변수 및 부등호 제약조건의 분류

	제 어 변 수	상 태 변 수
조 류 계산 문제	제어요소: 발전기 모선의 전압 고정요소: 조상설비	발전기 모선의 무효전력, 부하모선의전압

	제 어 변 수	상 태 변 수
최적화 문제	모든 모선의 전압	모든 모선의 무효전력
부등호 제약조건	단순 구속조건	함수구속조건
구속조건의 처리방법	한계치 고정	패널티함수 적용

(3) 초기치 결정

식 (1)을 풀기 위하여 먼저 등호제약조건을 만족하는 해를 초기치로 삼는다.

$g(u,x)=0$ 를 직각좌표법으로 표현하여 Δx, Δu에 대해 테일러 전개시키면, 3차항 이상은 존재하지 않으므로

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta|V|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ J_5 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \\ L_5 & L_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \qquad (2)$$

로 된다.

이를 아래와 같이 두 부분으로 분할하면

$$\begin{aligned} [\Delta P'] &= [\, J_2 \,][\Delta f] \\ \begin{bmatrix} \Delta Q' \\ \Delta|V|^{2\prime} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} J_3 \\ J_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad (3)$$

로 된다.

단,

$$[\Delta P'] = [\Delta P] - [\, J_1 \,][\Delta e] - [L_1 L_2][\Delta e \Delta f]^t$$

$$[\Delta Q'] = [\Delta Q] - [\, J_4 \,][\Delta f] - [L_3 L_4][\Delta e \Delta f]^t - [\, d \,][\Delta e]$$

$$[\Delta|V|^{2\prime}] = [\Delta|V|^2] - [\, J_6 \,][\Delta f] - [L_5 L_6][\Delta e \Delta f]^t$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \\ L_5 & L_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Delta e S_1 + \Delta f S_3) & (\Delta e S_2 + \Delta f S_4) \\ (\Delta e S_5 + \Delta f S_7) & (\Delta e S_6 + \Delta f S_8) \\ (\Delta e S_9 + \Delta f S_{11}) & (\Delta e S_{10} + \Delta f S_{12}) \end{bmatrix}$$

$[d] = [J_3] - [J_2]$

이 방법에서 ΔP와 ΔQ, ΔV는 먼저 주어진 Δe, Δf, G, B 값으로 계산되고, 새로운 Δe와 Δf는 식 (3)을 [L][D][U]분할법에 의해 반복 계산된다.

(4) 확대 목적함수

초기치의 결과 중 한계치를 벗어난 상태변수가 있으면, 여기에 페널티함수를 적용시켜서 다음과 같이 확대 목적함수 $\hat{f}(u,x)$를 만든다.

$$\hat{f}(u,x)=f(u,x)+\mu_g*g(u,x)^2+\mu_h*h(u,x)^2$$

$$=\sum_i P_i+\sum_j \mu_v(\Delta V_j)^2+\sum_{i\neq 1}\mu_p(\Delta P_i)^2+\sum_j \mu_q(\Delta Q_j)^2 \qquad (4)$$

단, ΔV: 부하모선 한계치를 벗어난 전압편차

ΔP: 각 모선 지정값과의 유효전력 편차

ΔQ: 부하모선 지정값과의 무효전력편차

μ: 페널티 상수

$i \in$ 모든 모선

$j \in$ 부하 모선

(5) 확대 목적함수의 최적화

확대 목적함수 $\hat{f}(u,x)$를 $\Delta u, \Delta x$에 대하여 테일러 전개시킨 후, 고차항을 무시한 2차식의 형태를 $q(u,x)$라 하면

$$q(u,x) = \hat{f}(u,x) + \nabla\hat{f}(u,x)*(\Delta u\Delta x)^t + 1/2*(\Delta u\Delta x)*H(u,x)*(\Delta u\Delta x)^t \qquad (5)$$

로 되고, 이에 최소화 필요조건 $\nabla q(u,x)=0$를 적용시켜 보면 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\hat{f}}{\partial e}\\[2ex]\dfrac{\partial\hat{f}}{\partial f}\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2\hat{f}}{\partial e\,\partial e} & \dfrac{\partial^2\hat{f}}{\partial e\,\partial f}\\[2ex]\dfrac{\partial^2\hat{f}}{\partial f\,\partial e} & \dfrac{\partial^2\hat{f}}{\partial f\,\partial f}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta e\\[2ex]\Delta f\end{bmatrix} \qquad (6)$$

식 (6)에서 Hessian의 모든 요소는, 조류계산의 결과에서 주어지는 값으로 결정되기 때문에 결국 상수가 되어, Δe, Δf를 Gauss 소거법에 의해 풂으로써 최적인 전압분포를 결정하게 된다.

(6) 흐름도

본 앨고리즘에 관한 흐름도는 그림 2-1과 같이 구성되어 있다.

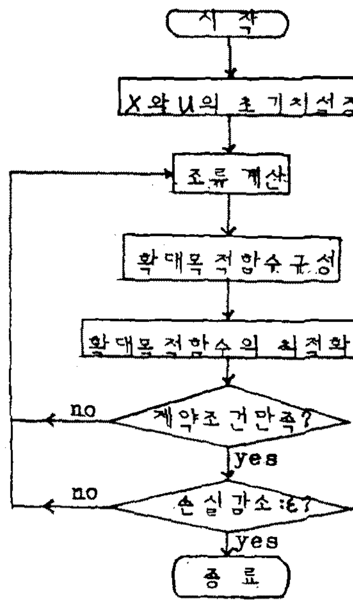
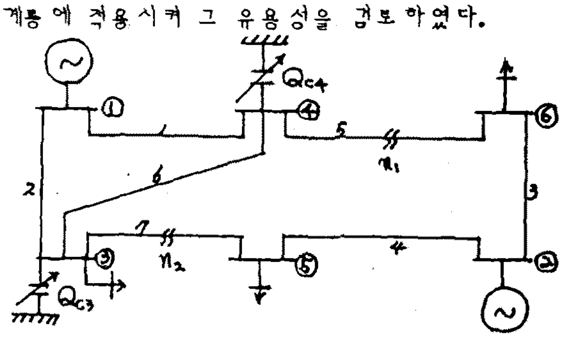


그림 2-1 본 앨고리즘의 흐름도

3. 적용예

이상의 내용을 그림 3-1의 Ward-Hale 6모선 계통에 적용시켜 그 유용성을 검토하였다.



①~⑥ : 모선번호 n_1, n_2: 부하시 전압조정기

1~7 : 선로번호 Q_{c3}, Q_{c4}: 정지형 조상설비

그림 3-1 Ward-Hale 계통

일예로서, 모델계통에서의 운전한계치는 다음과 같이 놓고, 전장의 방법에 따라 최적해를 구해 보았다.

$0.95 \le |E_1| \le 1.10$

$0.90 \le |E_2| \le 1.20$

$0.95 \le |E_i| \le 1.05 \qquad i = 3, \cdots, 6$

$0.00 \le Q_{c3} \le 0.30$

$-0.20 \le Q_{c4} \le 0.05$

그림 3-2는 이때의 최적해 수렴과정을 나타내고 있다.

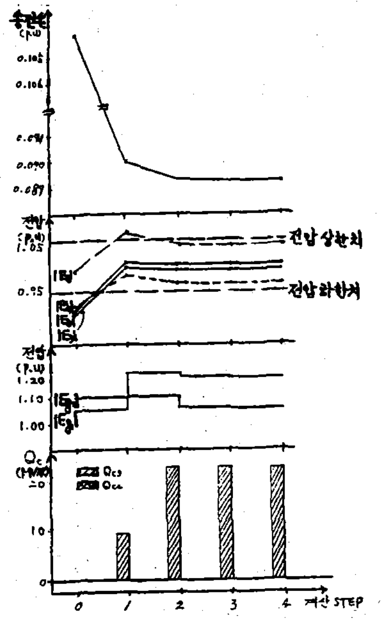


그림 3-2 최적해 수렴과정

그림 3-2에서 알 수 있듯이 허용전압범위로부터 벗어나 있던 모선 3,4,5 의 전압은 2회의 반복 계산으로 거의 최적점 가까이 수렴시키고 있으며, 이때의 손실감소율은 15.6% 에 달하고 있다.

다음으로, IEEE -14 모선 계통에 적용시켜 본 결과를 그림 3-3에 나타내었다.

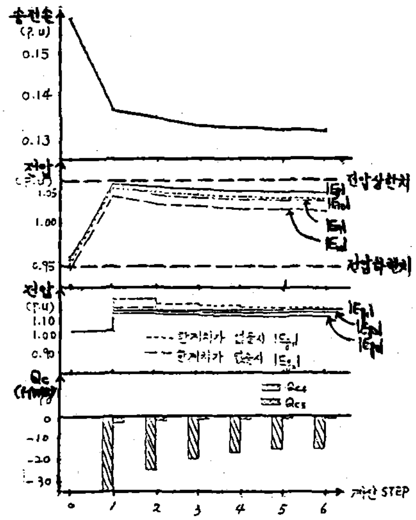


그림 3-3 최적해 수렴과정

그림 3-3에서도 6모선 모델계통과 마찬가지로 2회의 반복 계산으로 전압과 손실감소를 거의 최적점 가까이 수렴시키고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 개발된 알고리즘을 몇가지 모델계통에 적용해본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 알고리즘을 사용해서, 주어진 계통운용조건에서 손실을 최소화 할 수 있는 최적전압 분포를 결정할 수 있다.

2) 본 알고리즘에서는, 완전한 테일러전개로 인한 단 1회의 Jacobian 행렬 계산, Jacobian 행렬 재분할에 의한 계수행렬의 축소, 소행렬 Hessian(sparse Hessian matrix)에 대한 Gauss 소거법의 적용등으로 인하여 기억용량과 계산시간을 단축시킬 수 있었다.

3) 본 알고리즘에서의 축소된 계수행렬은 대각요소가 크게되어 수렴성이 보장되었으며, Hessian 행렬을 간단하게 구성할 수 있어 대규모 계통에도 적용할 수 있게 하였다.

참 고 문 헌

(1) 송 길 영 : 전력계통공학, 동명사, 1977

(2) R.Nadira:Optimal reactive power flows, Scientific System report, 1983

(3) L.Roy, N.D.Rao:A new algorithm for real-time optimal dispatch of active and reactive power generation retaining nonlinearity, IEEE, 1983

(4) M. Bazarra:Nonlinear programming, John Willy & Sons, 1979

(5) A.M.Sasson:Optimal load flow solution using the Hessian matrix, IEEE, 1972

(6) H.W.Dommel, W.Tinney:Optimal power flow solution, IEEE, 1968