

전력계통의 상정사고 해석 및 대책 Contingency Analysis and Measurement of the Power System

정 재 길 (중 앙 대)
박 규 흥* (내림공전)

1. 서 론

상정사고 해석이란 정상상태로 운전되고 있는 전력계통에서 발생 가능한 각종 사고를 상정하여 이들 사고가 계통에 발생하였을 경우 계통의 운전상태를 예측하는 것이다.

상정사고를 해석하는 목적은 해석 결과로부터 계통운전 상대의 이상유무 즉 계통각부의 과부하 상태나 취약부분을 검출하여 다른 연속사고를 초래하지 않도록 사전에 대책을 수립하고자 하는 예방제어(Preventive Control)에 있다.

이와 같이 상정사고를 해석하는 목적이 예방제어에 있는 만큼 빠른 시간 내에 계산처리함이 요망됨으로 해석 정도를 높이면서 가능한 계산시간을 단축시킬 수 있는 알고리즘의 개발이 중요한 과제이다.

현재까지 발표된 상정사고 해석 방법으로는 Zbus 행렬법, 직류조류계산법, 고속분할 조류계산법 등을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있으나 그 해가 정확하지 못하다는 결점이 있다. 또 해의 정확성을 기하기 위하여 Newton Raphson 조류법을 사용하여 그 자코비 행렬을 수정하는 방법이 있으나 수정된 자코비 행렬의 역행렬을 계산하는 속도 면에서 문제

점이 있으며 고속분할 조류계산법을 적용하고 그 자코비 행렬을 수정, 이의 역행렬을 구하는 방법에 있어서는 Peterson 등의 공식에 의한 역행렬 기법을 사용하여 계산속도는 향상되었으나 해의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 상정사고 해석시 무효전력의 변화를 고려하였으며 정상운전시의 조류계산 방법으로는 P-Q분할법을 사용하여 자코비 행렬의 Sparse한 성질을 이용한 최적모션번호 부여법 및 3각화 인수 분해법을 사용하고 상정사고 해석방법으로는 사고에 따른 분할법의 자코비 행렬의 역행렬을 구하는데 있어 Sherman-Morrison 공식에 의한 역행렬 기법을 사용하여 해의 정확도를 높임과 동시에 계산속도를 향상시키고 기억용량을 축소하도록 하였다. 이는 선로사고의 경우 자코비 행렬은 사고선로 양단 모선에 대응되는 요소만이 변한다는 성질을 이용하였기 때문이다.

또한 수많은 상정사고를 제한된 시간 내에 일일이 해석하는 것은 비능률적이고 큰 의의가 없으므로 짧은 시간 내에 효과적으로 해석하기 위해서는 계통에 미치는 영향이 큰 상정사고의 순서를 미리

결정하여 선택적으로 해석함이 바람직하다. 우선순위 선택 방법으로는 상정사고에 대한 평가지수 (Performance Index)를 설정하고 이 값이 큰 순서에 따라 순위를 부여하여 상정사고를 자동 선택토록 하였다.

상정사고 해석 결과에 대한 대책으로는 우선 정상시의 운전상태가 최적상태로 되도록 조정후 상정사고에 따른 변압기나 선로의 과부하 해소는 발전전력의 재배분을 통하여 행하여 정상운전 상태로 부터의 발전전력의 변화량이 최소가 되도록 하는 방법을 취하였으며 그 방법으로는 모선전력 변화에 대한 선로조류의 감도행렬법과 각종 운전 허용치를 만족할 수 있도록 하기 위하여 선형계획법을 사용하였다.

2. 본 론

(1) 상정사고 해석

모선 i, j 간의 선로 f 가 개방될 경우 사고 선로의 콘덕턴스 및 서셉턴스 g_f, b_f 는 0이 되며 이 선로가 접속된 양모선 i, j 의 모선 어드미턴스 행렬의 4 요소는 다음과 같이 변한다.

$$\begin{aligned}
 Y_{ii}' &= Y_{ii} + \Delta Y_{ii} = (G_{ii} - g_f) + j(B_{ii} - b_f - 0.5 b_{cf}) \\
 Y_{ij}' &= Y_{ij} + \Delta Y_{ij} = (G_{ij} + g_f) + j(B_{ij} + b_f) = Y_{ji}' \\
 Y_{jj}' &= Y_{jj} + \Delta Y_{jj} = (G_{jj} - g_f) + j(B_{jj} - b_f - 0.5 b_{cf})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Prime(')은 변화된 요소를 나타내며 위와 같이 변화한 모선어드미턴스 성분에 의하여 H 및 L 행렬의 4 요소도 변한다.

H 및 L행렬의 변화분 $\Delta H, \Delta L$ 의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta H &= H' - H \text{로 정의하면} \\
 \Delta h_{ii} &= -V_i V_j (g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij}) \\
 \Delta h_{ij} &= V_i V_j (g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij}) \\
 \Delta h_{ji} &= V_j V_i (g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji}) \\
 \Delta h_{jj} &= -V_j V_i (g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$\Delta L = L' - L$ 로 정의하면 ΔL 의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta l_{ii} &= 2(b_f + 0.5 b_{cf}) V_i^2 + V_i V_j (g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij}) \\
 \Delta l_{ij} &= V_i V_j (g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij}) \\
 \Delta l_{ji} &= V_j V_i (g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji}) \\
 \Delta l_{jj} &= 2(b_f + 0.5 b_{cf}) V_j^2 + V_j V_i (g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

사고 후 변화된 자코비 행렬은 식(4)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 H' &= H + \Delta H = H + M_{ij} \hat{\Delta H} M_{ij}^T \\
 L' &= L + \Delta L = L + M_{ij} \hat{\Delta L} M_{ij}^T
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

단, M_{ij} 는 $n \times 2$ (n : 모선수) 접속행렬로서 사고선로 f 가 접속된 양단 모선 i, j 에 대응되는 $(i, 1)$ 과 $(j, 2)$ 요소만 1이고 그 이외의 요소는 0이며 $\hat{\Delta H}$ 및 $\hat{\Delta L}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{\Delta H} = \begin{bmatrix} \Delta h_{ii} & \Delta h_{ij} \\ \Delta h_{ji} & \Delta h_{jj} \end{bmatrix} \quad \hat{\Delta L} = \begin{bmatrix} \Delta l_{ii} & \Delta l_{ij} \\ \Delta l_{ji} & \Delta l_{jj} \end{bmatrix}
 \tag{5}$$

상정사고시 모선전압의 위상각 및 절대치를 수정하기 위한 수정식은 식 (6)과 같으며 식 (4), (5) 및

S-M 공식을 이용하면 식 (6)은 식 (7)과 같이 표
시된다.

$$\begin{aligned} [\Delta\theta] &= [H']^{-1} [\Delta P] \\ \left[\frac{\Delta V}{V} \right] &= [L']^{-1} [\Delta Q] \\ \dots\dots\dots(6) \\ [\Delta\theta] &= H^{-1} \Delta P - H^{-1} M_{ij} [I + \Delta H M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1} \\ &\quad \Delta H M_{ij}^T H^{-1} \Delta P \\ \left[\frac{\Delta V}{V} \right] &= L^{-1} \Delta Q - L^{-1} M_{ij} [I + \Delta L M_{ij}^T L^{-1} M_{ij}]^{-1} \\ &\quad \Delta L M_{ij}^T L^{-1} \Delta Q \\ \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

식 (7)에서 계산된 모선전압의 위상각 및 전압편차
를 이용하여 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} [\theta]' &= [\theta] + [\Delta\theta] \\ [V]' &= [V] + [\Delta V] \end{aligned}$$

(2) 상정사고 선택

짧은 시간 내에 효과적으로 사고 해석을 하기 위
해서는 계통에 영향을 많이 미치는 선로만을 선택
적으로 해석하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 상정사고시 운전조건의 정격치 또
는 지정치로 벗어나는 정도를 크기로 정하는 방법
을 이용하였다.

상정사고의 중요도를 나타내는 평가지수 (Perfor
mance Index)는 상대적인 가혹도 (Severity)를
평가할 수 있는 계수로서 다음과 같이 표시된다.

$$PI = \sum_i W_i \left(\frac{P_i}{P_L} \right)^2 \dots\dots\dots(8)$$

단, W_i : 선로 ℓ 의 중요도를 나타내는 가중계수
(Weighting factor)

P_i : 선로 ℓ 의 피상전력

P_L : 선로 ℓ 의 정격용량

α : 과부하 선로의 개수

(3) 상정사고 대책

전력계통을 운용함에 있어서 무엇보다 중요한 것
은 계통의 안전을 유지하는 것으로서 사고시에도 계
통 안전을 계속 유지되도록 하기 위해서는 상정사
고 대책이 필요하다.

상정사고 대책이란 상정사고 해석 결과 어느 선
로나 기기에 과부하가 나타나면 이 과부하를 허용
치 이하로 억제되도록 각 발전소의 유효 및 무효전
력을 조정하거나 적당량의 부하를 차단함을 뜻한다.

일반적으로 상정사고 대책을 수립함에 있어서 가
능한 한 부하차단량을 최소로 하면서 등식 또는 부
등식 제약조건하에서 발전 비용이 최소로 되도록 유
효전력을 재배분하든지 또는 최적운전상태에 대한 유
효전력의 편차가 최소로 되도록 재배분하고 계통의
전모선 전압이 규정치를 유지하도록 각 모선의 무
효전력을 재배분 하는 방법이 있으나 본 논문에서는
계산시간을 단축하기 위하여 후자의 방법을 적용하
였다.

(3.1) 감도계수 선정

모선 p, q 간의 선로 K의 조류 S_k 는 식(9)와 같
이 유효분 및 무효분으로 나누어 나타낼 수 있다.

$$S_k = (F_k^2 + G_k^2)^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

단, F_k, G_k : 선로 k에 흐르는 유효 및 무효전
력조류

모선 i의 전력을 $\Delta P_i, \Delta Q_i$ 만큼씩 변화할
때 선로조류변화분 ΔS_k 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta S_k &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial S_k}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial S_k}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial S_k}{\partial F_k} \cdot \frac{\partial F_k}{\partial P_i} + \frac{\partial S_k}{\partial G_k} \cdot \frac{\partial G_k}{\partial P_i} \right) \Delta P_i \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial S_k}{\partial G_k} \cdot \frac{\partial G_k}{\partial Q_i} + \frac{\partial S_k}{\partial F_k} \cdot \frac{\partial F_k}{\partial Q_i} \right) \Delta Q_i \right] \quad (10) \end{aligned}$$

위 식으로부터 모선 i 의 주입전력 변화로 인한 선로 k 의 유효 및 무효전력 변화에 대한 감도계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{pk,i} = \left(\frac{\partial S_k}{\partial F_k} \cdot \frac{\partial F_k}{\partial P_i} + \frac{\partial S_k}{\partial G_k} \cdot \frac{\partial G_k}{\partial P_i} \right)$$

$$\alpha_{Qk,i} = \left(\frac{\partial S_k}{\partial G_k} \cdot \frac{\partial G_k}{\partial Q_i} + \frac{\partial S_k}{\partial F_k} \cdot \frac{\partial F_k}{\partial Q_i} \right)$$

..... (11)

모선 주입전력에 대한 선로 k 의 유효전력 및 무효전력 F_k, G_k 의 편미분을 계산해서 위 식에 대입 정리하면 다음과 같은 감도계수가 얻어진다.

$$\alpha_{pk,i} = \frac{V_p V_q}{S_k} (A_1 F_k + B_1 G_k) (c_{pi} - c_{qi})$$

$$\alpha_{Qk,i} = \frac{V_p V_q}{S_k} \{ (A_2 F_k + B_2 G_k) d_{pi} + (A_3 F_k + B_3 G_k) d_{qi} \}$$

..... (12)

- 단, $A_1 = g_k \sin \theta_{pq} - b_k \cos \theta_{pq}$
 $A_2 = 2g_f \frac{V_p}{V_q} (g_k \cos \theta_{pq} + b_k \sin \theta_{pq})$
 $A_3 = -(g_k \cos \theta_{pq} + b_k \sin \theta_{pq})$
 $B_1 = -(b_k \sin \theta_{pq} + g_k \cos \theta_{pq})$
 $B_2 = -2b_k \frac{V_p}{V_q} + (b_k \cos \theta_{pq} - g_k \sin \theta_{pq}) - \frac{V_p}{V_q} b_{cf}$
 $B_3 = b_k \cos \theta_{pq} - g_k \sin \theta_{pq}$
 $c_{pi}, c_{qi} : H^{-1}$ 의 요소
 $d_{pi}, d_{qi} : L^{-1}$ 의 요소

(3,2) 발전력 재배분

상정사고 해석 결과에 대한 대책으로는 우선 정상시의 운전상태가 최적 운전 상태로 되도록 조정 후 상정사고에 따른 변압기나 선로의 과부하 해소는 발전전력의 재배분을 통하여 행하되 정상운전 상태로부터의 발전 전력의 변화량이 최소가 되도록 하는 방법을 취하였으며 그 방법으로는 모선전력변

화에 대한 선로 조류의 감도행렬법과 각종 운전허용치를 만족할 수 있도록 하기 위하여 선형 계획법을 사용하였다.

발전전력 재배분에 대한 알고리즘을 정식화 하면 다음과 같다.

목적함수 $Z = \sum_{i=1}^n K(\Delta P_i^+ + \Delta P_i^-) \dots \dots \dots (13)$

선로제약조건 $\sum_{i=1}^n \alpha_{pk,i} (\Delta P_i^+ - \Delta P_i^-) \leq f_i^{max} - f_i^0$
 $\sum_{i=1}^n \alpha_{pk,i} (\Delta P_i^+ - \Delta P_i^-) \geq -f_i^{max} - f_i^0$
 (14)

수급평형조건 $\sum_{i=1}^n (\Delta P_i^+ - \Delta P_i^-) = 0 \dots \dots \dots (15)$

발전출력제약조건 $0 \leq \Delta P_i^+ \leq P_i^{max} - P_i^0$
 $0 \leq \Delta P_i^- \leq P_i^0 - P_i^{max}$
 (16)

(3,3) 프로그램 순서

지금까지 언급한 상정사고에 대한 프로그램 순서는 그림 1과 같다.

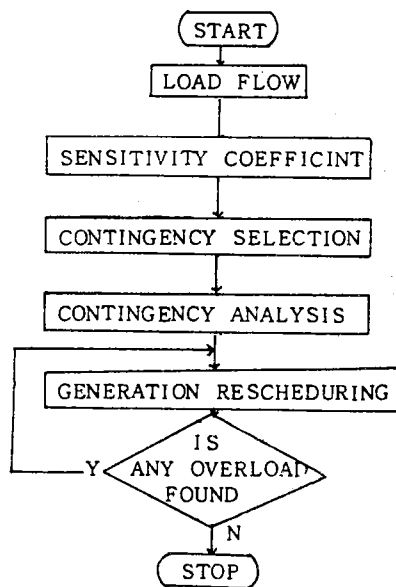


그림 1. FLOW CHART

3. 결 론

(1) 전력조류 계산은 모선 어드미턴스 및 자코비 행렬의 소(Sparse)한 성질을 이용, 분할조류계산법을 사용하여 계산시간 및 기억용량을 크게 줄일 수 있었다.

(2) 본 논문에서는 유효전력에 대한 영향은 물론 전압-무효전력에 대해서도 고려하였으므로 해의 정도가 향상되었다.

(3) 상정사고 선택은 허용편차를 모선전력 최대지정치의 20[%] 정도 주어도 우선 순위에 변함이 없을 것으로 생각되며 그 반복 계산 회수는 1~2회에 수렴된다.

(4) 상정사고 해석 결과에 따른 선로의 과부하 해소는 모선전력에 대한 선로 조류의 감도행렬, 선로 및 모선전력의 제약 조건을 만족시키기 위한 LP법으로서 사고전 최적운전상태의 모선전력의 변화분을 최소화하는 방법을 사용함으로써 가능한 한 계산시간을 단축하였다.

by a Z-matrix Method", IEEE, PAS-88, 1969, pp.409-412.

5. B.Stott, O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE, PAS-93, No.3, 1974, pp.859-867.

참 고 문 헌

1. A. J. Wood, "Power Generation, Operation and Control" John Wiley, 1984. pp.355-374.
2. 文永鉉, "상정 사고선택의 자동화 및 신속한 상정 사고 해석", 연세대, 1985.
3. G. Irisarri, "Automatic Contingency Selection for On-line Security Analysis-Real time tests", IEEE, PAS-98, 1979, pp.1552-1559.
4. H. E. Brown, "Contingency Evaluated