정확한 상정사고 분석을 위한 민감도 행렬의 신속한 Update 기법에 관한 연구

이승철 · 김경신 · 권병국
중앙대학교 전자전기공학부

A Fast Sensitivity Matrix Update Technique for Accurate Contingency Analysis State Computation Technique in Power Systems

Seung-Chul Lee · Kyoung-Shin Kim · Byong-Gook Kwon
EEE of Chung Ang Univ.

Abstract - This paper presents a fast and accurate contingency analysis in EHV systems for line outages, loss of generation of redispatching and loss-of-load or load management. Unlike other contingencies, line outage requires the modification of the Jacobian of the base case power flow and the calculation of its new inverse, which is substantially different from the original inverse. In this paper, we obtain the inverse of the new Jacobian from the original inverse without repeating the time consuming matrix inversion process. Numerical test results show the significant improvement in the accuracies compared with those obtained using the original inverse.

1. 서 론

전력계통의 보다 안정된 운용을 위해서는 주어진 계통 운전 상황에 대하여 짧은 시간 내에 가능한 한 많은 수의 상정사고에 대한 분석을 할 수 있어야 한다. 이때, 보다 많은 수의 상정사고 분석을 위해서 상정사고 후의 상태를 선형화된 모델을 사용하여 개략적으로 산정하는 것이 통상적인 방법이다.

그동안 많은 연구자들이 Newton-Raphson(NR)방법 혹은 Decoupled(DC) Power Flow 알고리즘 결과로 얻어지는 Jacobian 행렬을 사용한 방법을 제안해왔다[1-2].

이러한 방법들이 가능한 이유는 조류계산의 해점(solution point)에서 얻어지는 Jacobian의 역행렬이 해점에서 각 모선에서의 미소 유·무효전력 주입 시에 계통의 전모선 전압과 위상각이 어떻게 변하는지에 대한 민감도 정보를 가지고 있기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 역행렬을 민감도행렬(Sensitivity Matrix)이라 부른다.

지금까지는 상정사고후의 계통상태 산정을 위해서 이러한 민감도행렬을 그대로 이용하여 선형적으로 계산하거나 산정결과의 정확도가 부족한 경우에는 민감도행렬을 그대로 사용하여 수 차례 반복계산을 하여 해에 수렴하도록 하는 방법이 주로 사용되었다[3-4]. 이러한 방법들은 상정사고가 있을 경우 기본상태에서 벗어나는 새로운 상태가 사고에 따른 모선 주입전력의 변화에 선형적으로 비례하는 것으로 간주하고 간략화하여 계산하였다.

상기와 같은 방법들은 상정사고 변화 후 사고지점 주변 모선의 주입전력 변화가 적을 경우에는 실용상 지장이 없을 정도의 정확성을 나타내고 있다. 그러나 송전선 탈락과 같은 경우 계통의 구조자체가 변하므로 본래의 기본경우의 해에서 얻은 민감도행렬을 그대로 사용할 경우 오차가 크게 늘어나는 문제점이 있다. 이 경우 변화된 계통구조를 반영한 Jacobian을 다시 구성하여 역변환을 함으로서 민감도행렬을 다시 얻을 수도 있겠으나, 시간이 걸리는 Jacobian의 역행렬 계산을 반복해야 하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 특히 송전선 탈락의 경우 계통의 구조변화를 반영한 Jacobian을 새로 구성하여 민감도행렬을 다시 구하지 않고도 원래의 민감도행렬에 계산시간 증가가 거의 없이 계통의 구조변화를 직접적이고도 정확히 반영하는 방안을 제시하였다.

그 결과, 원래의 민감도 행렬을 그대로 사용한 경우에 비하여 거의 같은 시간에 보다 정확한 상정사고 후의 상태를 산정할 수 있었다.

2. Fast State Computation Technique

2.1 선형화 방정식(Linearized equation)

정상상태 전력방정식은 다음식처럼 비선형방정식으로 표현되어진다.

$$P_i = \mathrm{Real}(\overline{V_i^*} \sum_j \overline{Y_{ij}} \cdot \overline{V_j}) \qquad i=1,\cdots N-1 \tag{1}$$

$$Q_i = -\mathrm{Im}(\overline{V_i^*} \sum_j \overline{Y_{ij}} \cdot \overline{V_j}) \qquad i=1,\cdots N-1 \tag{2}$$

P_i& Q_i : 모선 i에 주입되는 유·무효전력

$\overline{V_i}$: 모선 i의 전압

$\overline{Y_{ij}}$: 모선 어드미턴스

$\overline{N}$: 총 모선수

식(1)과 식(2)는 NR법으로 풀 수 있으며, 여기서 우항을 좌항으로 옮겨 모선 mismatch 방정식을 만들 수 있다. 행렬 기호법을 이용하여 mismatch 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$F(X, U, D) = 0 \tag{3}$$

F는 $2N$-2개의 모선 mismatch 방정식을 요소로 하는

mismatch 벡터이고, X는 종속상태벡터, U는 제어벡터, D는 수요(demand)벡터이다.

DC법의 선형화된 state-update-equation은 Jacobian에서 비대각행렬요소를 무시함으로써 얻어낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -F(X, U, D) \cong -F_x \tag{4}$$

Jacobian matrix, state-update vector, mismatch vector

H, L : Jacobian의 대각행렬요소

상정사고 발생시, F_x의 변화분를 ΔF_x로 하면 ΔF_x는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_x = F_{x+\Delta x} = \begin{bmatrix} \Delta P_x \\ \Delta Q_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P^0_{pq} \\ Q^0_{pq} \end{bmatrix} \tag{5}$$

ΔP_x : 발전량과 부하변화에 의한 각모선의 주입 유효전력의 변화분

ΔQ_x : 발전량과 부하변화에 의한 각모선의 주입 무효전력의 변화분

P^0_{pq} : 선로(p-q)고장에 의한 모선 p와 q의 주입 유효전력의 변화분

Q^0_{pq} : 선로(p-q)고장에 의한 모선 p와 q의 주입 무효전력의 변화분

식(4)와 (5)를 이용하여 다음과 같이 state-update vectors를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} H^{-1} & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \Delta F_x \tag{6}$$

Multiplying factor를 저장해둠으로써 가우스 소거법으로 H^{-1}, L^{-1} 을 explicit하게 구할 수 있다. 최종적으로 state vector를 다음처럼 구할 수 있다

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \delta^0 \\ V^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{7}$$

2.2 Transformation matrix for line outages

다른 종류의 고장들과는 달리 선로 고장은 계통 구조의 변화를 유발한다. 그에 따라 사고 후의 정확한 모선 전압값들을 구하기 위해서는 H와 L이 수정되어져야 한다. 이때, 원래의 Jacobian에서 각각의 교란에 대해 적은수의 성분만 바뀌기 때문에 새로운 Jacobian의 역행렬을 구하지 않고 본래의 Jacobian에 이를 반영하는 방법을 모색한다.

만약 모선 p와 q를 연결하는 선로에 고장이 발생하면, H의 ij 번째 요소인 h_{ij}성분 중 네 가지 성분 h_{pp}, h_{pq} h_{qp}그리고 h_{qq}가 변화하게 된다.

$$\tilde{H} = H + \Delta H \tag{8}$$

$\tilde{H}$: 고장선로에 의한 계통변화를 반영하기 위한 수정된 H

ΔH: pp, pq, qp, qq의 영이 아닌 요소를 가지고 있는 (N-1)×(N-1) 행렬

ΔH에서 네 개의 영이 아닌 요소는 다음 식과 같이 H에서 구할 수 있다.

$$\Delta hpp = -\Delta hpq = hpq \cong \alpha \tag{9}$$

$$\Delta hqq = -\Delta hqp = hqp \cong \beta \tag{10}$$

h_{ij}= H의 ij번째 요소, Δh_{ij}= ΔH의 ij번째 요소

$$\tilde{H} = H(I + H^{-1}\Delta H) \cong H(I + M) \tag{11}$$

식(11)을 이용하여 식(8)을 역변환을 하면,

$$\tilde{H}^{-1} = (I + M)^{-1}H^{-1} \cong TH^{-1} \tag{12}$$

위 식에서, T는 H^{-1}를 $\tilde{H}^{-1}$로 만드는 변환행렬로 볼 수 있다. 두 개(p와 q)의 영이 아닌 열(column)요소만을 갖고 있는 행렬 M은 식(9), 식(11)과 H^{-1}를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_{ip} = \bar{h}_{ip}\alpha - \bar{h}_{iq}\beta \quad i = l, \cdot\cdot\cdot, N-1$$

$$m_{iq} = -m_{ip} \tag{13}$$

m_{ij}= 행렬 M의 i, j번째 요소 , $\bar{h}_{ij}$ = 행렬 H^{-1}의 i, j번째 요

또, $(I + M)$행렬은 간단한 구조를 갖기 때문에, 두 개(p와 q)의 영이 아닌 열(column)요소를 제외하고는 단위행렬과 동일한 구조를 갖는 행렬 T는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$t_{ip} = \frac{-m_{ip}}{\Gamma}, \quad t_{iq} = -t_{ip}, \quad i \neq p$$

$$t_{pp} = \frac{1 + m_{qq}}{\Gamma}, \quad t_{qq} = \frac{1 + m_{pp}}{\Gamma} \tag{14}$$

$$\Gamma = m_{pp} + m_{qq} + 1$$

$\tilde{L}^{-1}$행렬도 계산할 필요가 없는 전압조정 모선(voltage control bus)의 t_{ij}를 제외하고는 같은 방식으로 구할 수 있다.

여러 개의 선로고장이 발생한 경우, 변환 행렬 T는 각각의 선로 고장에 대하여 따로 구할 수 있으며, 순차적으로 H^{-1}의 앞에 곱하면 된다.

3. 사 례 연 구

제시한 알고리즘 및 프로그램에 대한 효용성을 입증하기 위해 여러 개의 상정사고를 가정하여 New England 39 Bus System에 적용하였으며, 고장 전 민감도 행렬을 그대로 사용하는 방법(base case)과 본 논문에서 제시한 방법을 비교하였다.

Decoupled(DC)조류 계산방법을 이용하여 얻어진 정확한 결과와 위의 두 가지 방법으로 구해진 결과를 비교하여, 각각의 최대편차와 평균편차를 표.1에 나타냈다. base case의 동작상태는 비교적 과부하 상황으로 가정했으며, 두 방법의 차이를 좀 더 잘 평가하기 위해서 다음과 같이 가정하였다.

i. 유효전력발전량과 발전기모선의 전압은 설정값(scheduled -values)으로 고정되어있다.

ii. 부하는 설정값으로 고정되어있으며, 부하모선의 전압은 제어하지 않는다.

iii. 모든 변압기 탭은 고정되어있다.

대부분의 경우, base case의 민감도행렬을 그대로 사용한 결과의 정확도는 매우 낮게 얻어지나, 본 논문에서 제시한 방법에 의해 얻어진 결과는 평균적으로 타당한 정확도를 보여준다.

제시한 방법에 의한 오차는 고장요소 주위 선로의 x/R 비율이 작을 때 커진다(TL(2-25)의 x/R 비율 : 1.23).

이러한 현상이 발생하는 주된 이유는 어드미턴스의 각(admittance angle)이 커지고, 결과적으로 Jacobian의 비대각행렬의 중요성이 커지기 때문이다.

만일, 결과의 정확도를 더 개선해야한다면, 비대각요소의 영향을 반영하여 계산할 수도 있을 것이다[5].

다른 방법으로는 한, 두 번 정도의 반복계산으로 Jacobian행렬을 갱신할 수 있다. 결과의 정확도를 개선하기 위한 어떠한 조작도 항상 정확한 민감도 행렬을 기반으로 해야만 한다.

표 1 사례 적용 결과

고장 선로	고장 전 전력조류 [p.u.]		방법	오차 (basemva=100MVA)							
				$\|\Delta V\|$ [p.u.]		$\|\Delta\delta\|$ [rad]		$\|\Delta P_{ij}\|$ [p.u.]		$\|\Delta Q_{ij}\|$ [p.u.]	
	P_{ij}	Q_{ij}		최대	평균	최대	평균	최대	평균	최대	평균
1-2	1.187	1.394	A	0.0048	0.0011	0.0030	0.0011	0.2060	0.0160	0.2690	0.0300
			B	0.0125	0.0019	0.0914	0.0747	0.5920	0.1460	0.2820	0.0390
8-9	0.712	0.863	A	0.0066	0.0007	0.0051	0.0012	0.0640	0.0140	0.0960	0.0220
			B	0.0395	0.0035	0.0690	0.0552	0.6180	0.1240	0.4830	0.0660
3-12	2.032	0.617	A	0.0036	0.0010	0.0027	0.0009	0.0930	0.0150	0.5940	0.0490
			B	0.0176	0.0039	0.0595	0.0207	0.8460	0.2340	0.5600	0.1130
2-25	1.488	0.582	A	0.0024	0.0009	0.0021	0.0009	0.0580	0.0060	0.1240	0.0230
			B	0.0073	0.0012	0.1035	0.0243	1.2500	0.1900	0.3240	0.0380
8-9	0.712	0.863	A	0.0066	0.0011	0.0051	0.0015	0.0640	0.0180	0.1510	0.0360
16-24	0.746	0.339	B	0.0396	0.0042	0.1074	0.0597	0.6980	0.2190	0.4850	0.1010

A : 본 논문에서 제시한 민감도행렬을 이용한 방법

B : 원래의 민감도행렬을 그대로 이용한 방법(base case)

N-모선계통에서 양단에 부하모선을 가지고 있는 1개의 선로 고장 시 요구되는 계산 수는 대략 $4N^2$(곱셈/나눗셈)개이다.

가우스 소거법(Gaussian elimination)과 역대체법(back substitution)을 사용하여 두 개의 Jacobian 역행렬인 H^{-1}, L^{-1}행렬을 구하는 계산 수는 약 $N^2/3$(곱셈/나눗셈)개이다.

대개, 총 모선수 N은 수 백 이상이기 때문에 본 논문에서 제시한 방법에 소요되는 시간은 거의 무시할 수 있을 정도이다.

4. 결 론

본 논문에서는 상정사고에 의한 계통전압과 전력조류의 변화를 빠르고 보다 정확하게 추정할 수 있는 방법을 제시하였고, Base case 민감도 행렬을 그대로 사용한 경우와의 비교를 통하여 본 논문에서 제시한 방법의 효용성을 입증하였다.

계통의 구조변화를 반영한 민감도 행렬의 계산에 있어 부가적인 정보가 필요 없고 반복계산을 하지 않기 때문에 추가로 요구되는 시간은 거의 무시 할 수 있었다.

본 논문의 결과는 앞으로 포괄적인 상정사고 분석에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

[참 고 문 헌]

[1] B. Stott and O. Alsac, "Fast decoupled load flow", IEEE Trans. PAS, Vol. 93, pp. 859, 1974

[2] N.M. Peterson, W.F. Tinney and D.W. Bee, "Iterative linear AC power flow solution for fast approximate outage studies", IEEE Trans. PAS, Vol. 91, pp. 2048, 1972

[3] M.M. Begovic and A.G.Phadke, "Control of voltage stability using sensitivity analysis" IEEE Trans. PS, Vol.7 pp.114-123 Feb. 1992

[4] R.R Shoults, W.J.Jr. Bierck, "Buffer system selection of a steady-state external equivalent model for real-time power flow using an automated sensitivity analysis procedure" IEEE Trans. Vol.3 pp.1104-1111 Aug. 1988

[5] K.R.C. Mamandur and G.J. Berg, "Efficient simulation of line and transformer outages in power systems", IEEE Trans. PAS, Vol. 101, pp. 3733, 1982

[6] M.M. Sallam, M.A Fahim and M.M. El-Shahat, "Modified injected power method for contingency analysis", Proceeding of the Sixth Annual Pittsburgh Conference for Modeling and Simulation, pp. 1393, 1985

[7] Medanic and B. Avramovic, "Solution of load flow problems in power systems by E-coupling method", IEEE Proc. Vol. 122, No. 3, pp. 801-805, Aug. 1975