능률적이고 정확한 상정사고 해석을 위한 민감도 산출기법 연구

이승철 문운철 오해진 권병국
중앙대학교 전자전기공학부

A Fast sensitivity computation technique for an efficient and accurate contingency analysis

Seung-Chul Lee, woon-chul Moon, Hae-jin Oh, Byeong-Gook Kwon
School of EE. Chung-Ang University

Abstract - 상정사고 해석의 경우 수많은 상정사고를 실시간에 해석하기 위하여 전력조류계산 결과로 얻어진 Jacobian의 역행렬이 포함하고 있는 민감도 정보를 이용하는 경우가 많다. 이 경우 각종 상정사고 후의 각 모선 전압과 전압의 위상각과 같은 상태변수를 선형적으로 신속히 계산할 수 있는 장점이 있는 반면에 송전선로 고장과 같이 계통구성이 변하는 상정사고의 경우에는 계산결과 얻어지는 상태변수 값들의 오차가 커져 상정사고 해석 결과가 부정확해지는 문제점이 있다. 이때 보다 정확한 상태변수 값들을 계산하기 위해서는 탈락한 송전선로를 반영하여 Jacobian을 재구성하고 그 역행렬을 계산하여야한다.

본 논문에서는 특히 민감도를 이용한 상태변수 값의 선형 계산에서 오차가 커지는 문제점이 있는 송전선로 고장의 경우 계통의 구조 변화를 반영한 Jacobian의 역행렬을 별도로 계산하지 않고 기본 케이스 Jacobian의 역행렬을 그대로 이용하여 간단히 구하는 방법을 제시함으로서 보다 빠르고 정확한 상정사고 해석을 할 수 있는 기법에 대해 제안 하였다. 제안한 방법은 뉴잉글랜드 39 모선 계통에 적용하여 그 효과를 입증하였다.

1. 서 론

근래에 들어 송전선로의 건설은 보다 여러 환경적 및 경제적 요인들로 인하여 부지확보단계부터 많은 어려움에 직면하고 있다. 특히 전력산업이 경쟁체제로 전환됨에 따라 선로 건설을 주도적으로 계획하고 이끌어 갈 주체와 투자비 회수의 불확실성이 커지면서 송전선로의 건설이 지연되고 부족하고 낙후한 설비로 낮은 안전도 여유만을 가지고 운전되는 경우가 자주 발생하여 계통전체가 붕괴되는 대정전사고가 세계 곳곳에서 일어나고 있다. 경쟁에 참여하는 주체들 간에 송전선로가 건설될 경우 누가 얼마나 혜택을 받게 되는지 정확히 분석하기가 쉽지 않아 이들 주체들 간의 타당한 설비 건설비 부담률을 산정하기가 어렵고 또한 발전 설비의 건설과 송전선로의 건설 주체가 다를 경우 전체적으로 일관성 있는 건설계획의 조율이 이루어지기 어려운 문제점도 송전선로의 건설을 지연시키는 요인들로 작용하고 있다. 이러한 송전선로 건설 환경의 변화로 인하여 계통운영 시 보다 설비용량에 근접하고 안전도 여유가 많지 않은 운영을 하게 되는 경우도 많이 발생하고 있다. 따라서 정확한 안전도 평가를 위하여 보다 광범위한 상정사고 해석을 하여야 하고 만일의 계통사고에 보다 철저히 대비하여야 한다. 계통운영의 안전도를 점검하기 위한 상정사고 해석에 있어서 특히 문제가 되는 것이 짧은 시간 내에 가능한 한 많은 상정사고를 해석할 수 있어야 하는 점이다. 따라서 사고 후의 상태변화를 선로의 주입전력에 대한 상태변수의 민감도를 이용하여 선형적으로 신속히 계산하고 평가하는 방법들이 많이 제안되어 왔고, 이러한 방법 중 주로 쓰이는 방법이 전력조류계산이 해에 수렴시 생성되는 Jacobian의 역행렬이 포함하고 있는 민감도 정보를 이용하는 방법이다.[1-5]

민감도를 이용하여 선형적으로 상정사고 후의 계통상태를 산출하는 방법들은 계산 속도가 빨라 많은 상정사고들에 대한 해석을 신속히 해주는 장점이 있는 반면에 큰 사고의 경우 기본 경우의 상태에서 크게 벗어나게 되어 오차가 커지고 상정사고 해석결과가 부정확해져 자칫 잘못된 대책을 수립하게 될 수도 있는 문제점이 있다.

특히 계통의 구성이 변하게 되는 송전선로 탈락 사고의 경우 사고전의 정상상태에서 얻어진 Jacobian과 역행렬을 이용할 경우 오차가 매우 커지게 되는 경우가 많다. 이러한 문제점을 극복하려는 노력으로 변화된 계통 구성을 반영하여 Jacobian을 재구성하거나 한번의 선형계산 대신 한 두 차례의 반복수렴계산을 하여 정확도를 올리려는 기법들도 제안되었으나 이러한 방법들은 정확도를 얼마간 개선하는 대신에 계산시간이 상당수준 증대되는 문제점들이 있다.[6-7]

본 논문에서는 송전선로의 탈락과 같이 계통의 구성이 변화되는 상정사고의 경우 원래의 민감도 행렬을 그대로 이용하지 않고 계통 구성의 변화를 정확히 반영하는 민감도 행렬을 Jacobian의 재구성과 역행렬을 구하지 않고도 신속히 구하는 방법을 제안하였고 뉴잉글랜드 39모선 계통에 적용하여 그 효과를 보였다.

2. 본 론

2.1 제안하는 상태계산기법

2.1.1 선형 상태계산식

전력계통에서 모선 i에 연결된 송전선로에 주입되는 유, 무효 전력은 다음과 같이 비선형으로 결합된 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P_i = Real(\overline{V}_i^* \sum_j \overline{Y}_{ij}\overline{V}_j) \quad i=1,\dots,N-1 \qquad (1)$$

$$Q_i = -Im(\overline{V}_i^* \sum_j \overline{Y}_{ij}\overline{V}_j) \quad i=1,\dots,N-1 \qquad (2)$$

여기에서,

P_i, Q_i : 모선 i에 연결된 송전선로로 주입되는 유효, 무효전력
$\overline{V}_i$: 모선 i의 complex 전압
$\overline{Y}_{ij}$: 모선 어드미턴스의 요소들
$\overline{N}$: 총 모선의 수

위의 식을 이용하여 모선(Bus mismatch equation)은 행렬을 이용하여 다음과 같이 압축된 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(X, U, D) = 0 \quad (3)$$

F는 전체 mismatch 벡터이고, 2N-2개의 모선 mismatch 식들로 이루어져 있다. 여기서 X는 종속적인 시스템 상태변수벡터를 나타내고, U는 독립적인 control 변수벡터를, D는 부하벡터를 각각 나타낸다.

X의 예측값, 즉 $\hat{X}$은 FD(Fast Decoupled)방법을 사용할 경우 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \triangle\delta \\ \triangle V \end{bmatrix} = -F(\hat{X}, U, D) \equiv -F_x \quad (4)$$

Jacobian matrix　state-update vector　mismatch vector

여기에서, H와 L은 Jacobian의 대각성분을 나타내는 행렬이고 정확한 해 X가 구해지면 $F_x = 0$가 된다.

상정사고가 발생했을 때, F_x의 변화량, $\triangle F_x$은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\triangle F_x = F_{x+\triangle x} = \begin{bmatrix} \triangle P_x \\ \triangle Q_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P^0_{pq} \\ Q^0_{pq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서,

$\triangle P_x$, $\triangle Q_x$: 발전량과 부하의 변화에 의해 주입되는 유효 및 무효전력의 변화량 벡터, (n-1)×1

P^0_{pq}, Q^0_{pq} : 송전선(p-q)가 탈락됨에 따라 모선 p에 주입되는 유효 및 무효 전력의 총 변화량 벡터, (N-1)×1. 이때 q는 모선 p에 연결되어 있는 탈락된 송전선로들의 집합.

따라서, 상태변수들의 update vector는 식 (4), (5)로부터 개략적으로

$$\begin{bmatrix} \triangle\delta \\ \triangle V \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} H^{-1} & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \triangle F_x \quad (6)$$

와 같이 계산된다.

일단 기본 케이스의 전력조류 값이 구해지면, 일반적으로 행렬 H와 L은 upper-triangularized 형태로 되고 Gaussian elimination 계산을 수행하는 동안 multiplying factor들을 보존함으로써, 행렬 H^{-1}과 행렬 L^{-1}을 얻을 수 있다.

따라서 상정사고 후의 상태 벡터를 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \delta^0 \\ V^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta \\ \triangle V \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때, δ^0와 V^0는 original 기본 케이스의 상태 벡터들이다.

2.1.2 송전선의 탈락을 고려한 변환 행렬

다른 여러 상정사고들과는 달리, 송전선로의 탈락은 계통의 구조를 변화시킨다. 그러므로 Jacobian의 행렬 H와 행렬 L은 보다 정확한 전압값을 계산하기 위해 재구성되어야한다. 하지만 송전선로 탈락의 경우 적은 수의 Jacobian성분만이 변화되므로, Jacobian을 재구성하여 많은 시간이 소요되는 역행렬 계산을 새로 할 필요 없이 원래의 Jacobian으로부터 다음과 같이 새로운 Jacobian의 역행렬을 구할 수 있다.

만일 버스 p와 q에 연결된 송전선이 탈락했다면, 행렬 H의 네 가지 행렬성분, h_{pp}, h_{pq}, h_{qp}, h_{qq}가 바뀌어져야 한다. 여기에서 h_{ij}는 행렬 H의 i행 j열의 요소이다.

$$\hat{H} = H + \triangle H \quad (8)$$

여기에서,

$\hat{H}$: 송전선로 탈락으로 인한 계통구성의 변화를 반영한 행렬 H

$\triangle H$: pp, pq, qp, qq 위치에만 각각 0이 아닌 성분들을 갖는 (N-1)×(N-1) 행렬

$\triangle H$ 행렬에서 네 개의 0이 아닌 성분은 H 행렬로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\triangle h_{pp} = -\triangle h_{pq} = h_{pq} \equiv \alpha \quad (9)$$

$$\triangle h_{qq} = -\triangle h_{qp} = h_{qp} \equiv \beta \quad (10)$$

여기에서,

h_{ij} : H 행렬의 ij번째 성분

$\triangle h_{ij}$: $\triangle H$ 행렬의 ij번째 성분

식 (8)에서

$$\hat{H} = H(I + H^{-1}\triangle H) \equiv H(I + M) \quad (11)$$

식 (8)의 양변의 역행렬을 구하면, 다음과 같다.

$$\hat{H}^{-1} = (I + M)^{-1}H^{-1} \equiv TH^{-1} \quad (12)$$

여기에서 T는 H^{-1}행렬을 $\hat{H}^{-1}$행렬로 변환하는 변환 행렬로서 M은 p열과 q열, 오직 두 개의 0이 아닌 열을 갖는 행렬이다. 이는 식 (9), (10) 으로부터 구할 수 있다. 그리고 H^{-1}행렬은 다음과 같은 성분으로 이루어져 있다.

$$m_{ip} = \bar{h}_{ip}\alpha - \bar{h}_{iq}\beta \qquad i = l, \ldots, N-1$$
$$m_{iq} = -m_{ip} \quad (13)$$

여기에서,

m_{ij} : M행렬의 ij번째 성분

$\bar{h}_{ij}$: H^{-1}행렬의 ij번째 성분

행렬 $(I + M)$의 구조가 단순하기 때문에, 식 (12)의 T행렬은 p, q열을 제외하고는 단위행렬과 같다. 이 때 p, q열의 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$t_{ip} = \frac{-m_{ip}}{\gamma} \qquad \text{for } i \neq p \quad (14)$$

$$t_{iq} = -t_{ip}$$

$$t_{pp} = \frac{1+m_{qq}}{\gamma}$$

$$t_{qq} = \frac{1+m_{pp}}{\gamma}$$

여기에서,

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

$\hat{L}^{-1}$행렬은 계산할 필요가 없는 전압조정모선 j에 해당하는 t_{ij}성분을 제외하고 위와 같은 방법으로 구할 수 있다. 여러 송전선로들의 탈락을 고려할 경우 각 송전선로에 해당하는 변환행렬 T를 H^{-1}행렬 앞에 연속적으로 곱하면 된다.

2. 2 사례연구 결과

제안된 방법을 뉴잉글랜드 39 모선계통에 적용하였다. 상정사고들에 따라 발생하는 새로운 상태들은 정확도의 비교를 위하여 제안하는 민감도 행렬과 기본 케이스 민감도 행렬을 같이 사용하여 계산하였다. 그 결과는 또한 Fast Decoupled(FD) 방법을 사용하여 얻어진 정확한 값과 비교하였다. (Table 1)

기본 운영 상태는 가능한 한 중부하 상황으로 설정하였다

번호	상정사고	정전될 전력조류(p.u.)	
		p_{ij}	q_{ij}
1	TL(1-2) trip	1.187	0.394
2	TL(8-9) trip	0.712	0.863
3	TL(3-18) trip	2.032	0.617
4	TL(2-25) trip	1.488	0.582
5	TL(8-9) trip	0.712	0.863
6	TL(16-24) trip	0.746	0.339

상정사고번호	분석방법	절대오차 (base : 100 MVA)							
		$\lvert\Delta V\rvert$ (p.u.)		$\lvert\Delta\delta\rvert$ (rad.)		$\lvert\Delta P_{ij}\rvert$ (p.u.)		$\lvert\Delta Q_{ij}\rvert$ (p.u.)	
		max.	avg.	max.	avg.	max.	avg.	max.	avg.
1	A	0.0048	0.0011	0.0030	0.0011	0.206	0.016	0.269	0.030
	B	0.0125	0.0019	0.0914	0.0747	0.592	0.146	0.282	0.039
2	A	0.0066	0.0007	0.0051	0.0012	0.064	0.014	0.096	0.022
	B	0.0395	0.0035	0.0690	0.0552	0.618	0.124	0.483	0.066
3	A	0.0036	0.0010	0.0027	0.0009	0.093	0.015	0.594	0.049
	B	0.0176	0.0039	0.0595	0.0207	0.846	0.234	0.560	0.113
4	A	0.0024	0.0009	0.0021	0.0009	0.058	0.006	0.124	0.023
	B	0.0073	0.0012	0.1035	0.0243	1.250	0.190	0.324	0.038
5	A	0.0066	0.0011	0.0051	0.0015	0.064	0.018	0.151	0.036
6	B	0.0396	0.0042	0.1074	0.0597	0.698	0.219	0.485	0.101

A : 제안하는 민감도 행렬에 기반한 방법
B : 기본 케이스 민감도 행렬을 그대로 이용한 방법

대부분의 경우에 대해 기본 케이스의 민감도 행렬을 그대로 이용해 얻어진 결과값들은 정확도가 떨어지는데 반해 본 논문에서 제안된 방법을 이용해 얻어진 결과값들은 평균적으로 볼 때, 비교적 정확한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 사고가 발생한 송전선 주위의 다른 송전선들의 x/R비율이 작을 때, 제안된 방법으로도 오차값들이 커지는 것을 볼 수 있다. (TL(2-25)의 x/R 비율 : 1.23) 이는 주로, 큰 값의 nodal 어드미턴스 위상각과 그것으로 인해 Jacobian에서의 비 대각 행렬들의 중요성이 더 증대되기 때문이다. 일반적으로 작은 값의 위상각 범위에서는 cosine 함수 값이 비선형적이므로, 유효전력조류값과 비교했을 때, 무효전력조류값의 정확도가 떨어지는 것을 볼 수 있다.

N-모선 시스템에서, 양 끝단이 부하 모선에 연결되어 있는 송전선이 고장 났을 경우 요구되는 계산량은 대략 $4N^2$번의 부동수 곱과 나누기가 필요하나 H^{-1}와 L^{-1}을 새로 구하기 위해 Gaussian elimination과 Back Substitution을 이용하여 계산하면, 요구되는 계산량은 대략 $N^3/3$번의 곱하기와 나누기가 필요하며 따라서 N이 클 경우 제안하는 방법의 효율성은 크게 증대된다.

3. 결 론

본 논문에서는 상정사고 해석 시 계통모선의 전압과 전압의 위상각을 신속히 계산할 수 있는 기법을 소개하였다. 정확한 민감도 행렬을 신속히 계산하고 이용하는 또 다른 이점은 전력계통의 상태 조절 수단과 조절량의 크기를 보다 정확히 선택할 수 있다는 점이다. 본 논문에서 제안하는 방법은 전력계통의 운전뿐만 아니라 계획에도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] K. R. C. Mamandur and G. J. Berg, "A fast accurate method for outage studies in power systems", Paper A 76 207-1, Presented at the IEEE PES Winter Meeting and Tesla Symp., New york, NY, Jan. 1976.
[2] 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.
[3] K. T. Khu, M. G. Laugy and D. W. Bowen, "A fast linearization method to evaluate the effects of circuit contingencies upon system load-bus voltages", IEEE Trans. PAS, Vol 101, pp. 3927, 1982.
[4] H. D. Chiang, C. S. Wang, and A. J. Flueck, "Look-ahead voltage and load margin contingency selection functions for large-scale power systems", IEEE Trans. Power Syst., Vol 12, pp. 173-180, Feb. 1997.
[5] G. C. Ejebe, H. P. van Meeteren, and B. F. Wollenberg, "Fast contingency screening and evaluation for voltage security analysis", IEEE Trans. Power Syst., Vol 3, pp. 1582-1590, Nov. 1988.
[6] N. M. Peterson, W. F. Tinney and D. W. Bree, "Iterative linear AC flow solution for fast approximate outage studies", IEEE Trans. PAS, Vol. 91, pp. 2048, 1972.
[7] M. M. Sallam, M. A. Fahim and M. M. 띠-Shahat", Modified injected power method for contingency analysis", Proceedings of the Sixth Annual Pittsburgh Conference for Modeling and Simulation, pp. 1393, 1985.