

이중선로의 동시사고를 고려한 상정사고해석

김지웅* 문영현 이종기
연세대학교 전기전자공학과

Double Circuit Simultaneous Fault Analysis

J.U. Kim* Y.H. Moon J.G. Lee
Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

Abstract - In this paper, we propose the analysis method of the Double Circuit Simultaneous Fault. To improve the accuracy and the promptness of the cocontingency analysis, we reformed the Peterson method and extended the Sherman-Morrison equation. We also used the table of trigono-metric factor of Jacobian matrix before the fault, to compute the inverse matrix needed in the loadflow calculation.

1. 서 론

상정사고 해석은 계통에 돌발사태가 났거나 외란이 있는 경우 계통운용상태를 예측하는 것이며, 상정사고 해석결과는 갑작스런 사고가 다른 연속적인 사고를 일으키지 않도록 하기 위해 계통의 취약한 부분을 보강하거나 돌발사고시의 계통의 부분적 과부하를 해소시킬 수 있는 대책을 마련하는 계통보호목적으로 사용된다. 일반적인 계통의 경우는 대규모 계통으로 많은 수의 상정사고가 있으며, 제한된 시간내에 모든 사고를 해석한다는 것은 불가능하므로, 결국 사고해석의 계산시간 단축에 따라 가능한 많은 상정사고를 고려할 수 있게 된다. 계산시간의 개선은 사고에 따라 변화된 Jacobian행렬의 역행렬 계산을 얼마나 효과적으로 처리하느냐에 달려있으므로 이 부분에 많은 방법을 발전시키는 연구에 많은 노력이 경주되고 있다.

본 논문에서는 이러한 상정사고 중에서 발생확률이 높은 Double Circuit Simultaneous Fault에 대한 해석방법을 제시하였다. 상정사고 해석법인 Peterson 방법을 개선하고, 확장된 Sherman-Morrison 공식을 적용하여, 조류계산시의 역행렬 계산을 고장 이전의 Jacobian행렬에 대한 삼각인수표를 사용함으로써 상정사고 해석을 신속하고 정확하게 수행할 수 있도록 하였다.

2. 이중선로의 동시사고를 고려한 상정사고 해석

2.1 이중선로의 동시사고 해석

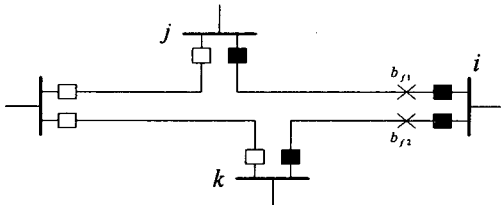


그림 1. 선로 f1과 f2의 모선도

그림 1에서 보는 바와 같이 모선 i와 j를 연결하고 있

는 선로 f1과, 모선 i와 k를 연결하고 있는 선로 f2가 개방되는 상정사고를 고려해보자. 이 경우에 선로개방에 따라 전력조류가 변화되며 고장후의 전력조류는 다음 과정에 의하여 계산될 수 있다.

선로 f1과 f2가 개방되었으므로 모선 어드미턴스행렬 [YBUS]는 9개의 요소가 변하게 되며, 이러한 YBUS의 변화로 인하여 분할조류방정식(decoupled load flow equation) $\Delta P=[H]\Delta\theta$, $\Delta Q=[L]\Delta V$ 에서 자코비안 행렬 [H]의 요소 중 9개가 변화한다.

$$\begin{aligned} h_{ii} &= h_{ii} - V_i V_j \{ g_{f1} \sin \theta_{ij} - (b_{f1} + 0.5 b_{cf1}) \cos \theta_{ij} \} \\ &\quad - V_i V_k \{ g_{f2} \sin \theta_{ik} - (b_{f2} + 0.5 b_{cf2}) \cos \theta_{ik} \} \\ h_{ij} &= h_{ij} + V_i V_j \{ g_{f1} \sin \theta_{ij} - b_{f1} \cos \theta_{ij} \} \\ h_{ji} &= h_{ji} + V_j V_i \{ g_{f1} \sin \theta_{ji} - b_{f1} \cos \theta_{ji} \} \\ h_{jj} &= h_{jj} - V_j V_i \{ g_{f1} \sin \theta_{ji} - (b_{f1} + 0.5 b_{cf1}) \cos \theta_{ji} \} \\ h_{kk} &= h_{kk} - V_k V_i \{ g_{f2} \sin \theta_{ik} - (b_{f2} + 0.5 b_{cf2}) \cos \theta_{ik} \} \\ h_{ik} &= h_{ik} + V_i V_k \{ g_{f2} \sin \theta_{ik} - b_{f2} \cos \theta_{ik} \} \\ h_{ki} &= h_{ki} + V_k V_i \{ g_{f2} \sin \theta_{ki} - b_{f2} \cos \theta_{ki} \} \\ h_{jk} &= h_{jk} = 0 \\ h_{kj} &= h_{kj} = 0 \\ h_{lm} &= h_{lm} \quad \text{if } l \notin i, j, k \text{ or } m \notin i, j, k \end{aligned} \quad (1)$$

단, g_{f1} , g_{f2} - 선로 f1과 f2의 컨덕턴스.

b_{f1} , b_{f2} - 각 선로의 서셉턴스.

b_{cf1} 과 b_{cf2} - 각 선로의 충전어드미턴스에 해당는 서셉턴스.

이상에 의하여 변화된 자코비안 행렬은 $[H']=[h'_{ij}]$ 로 주어진다. [L]도 유사하게 구할 수 있으나 상정사고 해석에 있어서는 무효전력 분산제어 때문에 사고시의 모선 무효전력 변화를 파악하기 곤란하고 통상 모선전압 절대치는 큰 변화가 없으므로 식 $\Delta Q=[L]\Delta V$ 는 고려하지 않는 것이 일반적 경향이다.

고장에 의한 자코비안 행렬의 변화분을 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta H = H' - H \quad (2)$$

그러면 고려되고 있는 단순 선로사고에 대한 ΔH 는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \Delta h_{ii} & \cdots & \Delta h_{ij} & \cdots & \Delta h_{ik} & \cdots \\ \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & \Delta h_{ji} & \cdots & \Delta h_{jj} & \cdots & \Delta h_{jk} & \cdots \\ \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & \Delta h_{ki} & \cdots & \Delta h_{kj} & \cdots & \Delta h_{kk} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{ii} &= h_{ii}' - h_{ii} \\ &= -V_i V_j \{ g_{f1} \sin \theta_{ij} - (b_{f1} + 0.5 b_{cf1}) \cos \theta_{ij} \} \\ &\quad - V_i V_k \{ g_{f2} \sin \theta_{ik} - (b_{f2} + 0.5 b_{cf2}) \cos \theta_{ik} \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{ij} &= h_{ij} - h_{ij} = V_i V_j (g_{f_i} \sin \theta_{ij} - b_{f_i} \cos \theta_{ij}) \\ \Delta h_{ij} &= h_{ji} - h_{ji} = V_j V_i (g_{f_j} \sin \theta_{ji} - b_{f_j} \cos \theta_{ji}) \\ \Delta h_{ij} &= h_{ij} - h_{ji} \\ &= -V_j V_i (g_{f_j} \sin \theta_{ji} - (b_{f_i} + 0.5 b_{cf_i}) \cos \theta_{ji}) \\ \Delta h_{kk} &= h_{kk} - h_{kk} \\ &= -V_k V_i (g_{f_i} \sin \theta_{ki} - (b_{f_i} + 0.5 b_{cf_i}) \cos \theta_{ki}) \\ \Delta h_{ik} &= h_{ik} - h_{ik} = V_i V_k (g_{f_i} \sin \theta_{ik} - b_{f_i} \cos \theta_{ik}) \\ \Delta h_{ik} &= h_{ki} - h_{ki} = V_k V_i (g_{f_i} \sin \theta_{ki} - b_{f_i} \cos \theta_{ki}) \\ \Delta h_{jk} &= h_{jk} - h_{jk} = 0 \\ \Delta h_{kj} &= h_{kj} - h_{kj} = 0 \end{aligned}$$

상정사고 해석은 위에서 구한 ΔH 를 사용하여 전압위상각 수정분, 즉 $\Delta \theta$ 를 다음식에 의하여 계산한다.

$$\Delta \theta = [H]^{-1} \Delta P = [H + \Delta H]^{-1} \Delta P \quad (4)$$

위의 계산에서는 수정된 자코비안 행렬 $[H]$ 의 역행렬 계산이 요구되며 여기에 많은 계산시간이 소요된다. 이 계산시간의 단축을 위해 여러가지 방법이 제시되어 있다.

2.2 기존 방법의 고찰

2.2.1 Peterson방법(3)

Peterson등은 $g_f \sin \theta_{ij} \ll b_f \cos \theta_{ij}$ 인 점을 고려하여 $[\Delta H]$ 가 근사적으로 대칭이라고 가정함으로써 ΔH 를 다음과 같이 분해(decomposition)하였다.

$$\Delta H = \underline{m}_{ij} [\Delta h] \underline{m}_{ij}^T \quad (5)$$

단, $\underline{m}_{ij} = [0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0 \ -1 \ 0 \cdots 0]^T$: n-차원 벡터

$$\Delta h = V_i V_j b_{f_i} \cos \theta_{ij} \quad (1)$$

n : 슬랙모선을 제외한 전 모선수

그러나 선로의 R/X비가 크고 중부하인 경우 $g_f \sin \theta_{ij}$ 의 영향을 무시하면 계산오차가 상당히 커질 우려가 있다.

2.2.2 수정된 Sherman-Morrison공식에 의한 방법(5)

Peterson방법의 문제점을 보완하기 위하여 ΔH 를 정확하게 분해할 수 있는 방법이 참고문헌(8)에서 제시된 바 있다. 여기서는 $[H]$ 의 역행렬 계산을 원래 자코비안 행렬 H 에 대한 삼각인수표를 사용하여 간단히 처리할 수 있는 알고리즘을 사용하고 있다.

이 방법에서는 ΔH 의 정확한 분해(decomposition)를 하기 위해 행렬 M_{ij} 와 ΔH 를 다음과 같이 정의한다.

$$M_{ij} = [e_i, e_j] \quad (6)$$

$$e_k = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T : n\text{-차원 벡터} \quad (7)$$

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta h_{ii} & \Delta h_{ij} \\ \Delta h_{ji} & \Delta h_{jj} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서 행렬 ΔH 는 선로충전 어드미턴스분에 해당하는 b_{cf} 를 무시하면 singular가 되기 때문에 잘 알려진 역행렬공식(일명 Sherman-Morrison공식)을 직접 사용할 수 없으며 이 공식을 변형한 형태를 사용하여 $[H]$ 의 역행렬을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} [H]^{-1} &= [H + \Delta H]^{-1} = [H + M_{ij} \Delta H M_{ij}^T]^{-1} \\ &= H^{-1} - (H^{-1} M_{ij}) [I + \Delta H M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1} \\ &\quad \cdot \Delta H M_{ij}^T H^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 각 항에 대한 차원수(dimensionality)를 고려해보면 $[H]^{-1}$ 는 $(n \times n)$ 행렬로서 이에 등가적 형태를 갖는 자코비안 행렬 H 에 대한 삼각인수표를 사용할 수 있으며, $H^{-1} M_{ij}$ 의 계산은 다음과 같이 변형하여 삼각인수표를 사용, 간단히 계산할 수 있다.

$$H^{-1} M_{ij} = H^{-1} [e_i, e_j] = [H^{-1} e_i, H^{-1} e_j] \quad (10)$$

또한 이 결과를 사용하여 $\Delta H M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}$ 를 계산하면 결과는 (2×2) 행렬이 되므로 $[I + \Delta H M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1}$ 의 계산은 차원이 적으므로 일반적 방법에 의해서도 간단히 처리될 수 있고, 이 결과를 사고발생시의 조류계산에 사용한다. 그러나 이 방법은 θ 의 1회 수정을 위하여 자코비안 행렬의 전·후진 소거과정을 3회 실시해야 하므로 정확도는 높으나 계산속도가 Peterson방법에 비해 뒤진다.

2.3 이중선로의 동시사고를 고려한 상정사고 해석 기법

본 논문에서는 전술한 2가지 방법을 이용하여 이중선로의 동시사고를 고려한 상정사고 해석을 신속하게 할 수 있도록 연구하였다. 여기서는 계통의 부하상태를 고려하여 선로충전 서셉턴스 b_{cf_i} 와 b_{cf_j} 가 매우 작기 때문에 이것을 무시하여도 중부하시의 유효조류계산에는 별 지장이 없음을 이용한다. 또 Peterson방법에서와 같이 $g_f \sin \theta_{ij} \ll b_f \cos \theta_{ij}$ 임을 고려하여 $g_f \sin \theta_{ij}$ 항을 무시하여 계산한다. 그러면 자코비안 행렬의 변화 요소의 변화분은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta h_{ii} &= V_i V_j b_{f_i} \cos \theta_{ij} + V_i V_k b_{f_j} \cos \theta_{ik} \\ \Delta h_{ij} &= -V_j V_i b_{f_i} \cos \theta_{ij} \\ \Delta h_{ji} &= -V_j V_i b_{f_i} \cos \theta_{ij} \\ \Delta h_{jj} &= V_i V_j b_{f_i} \cos \theta_{ij} \\ \Delta h_{kk} &= V_k V_i b_{f_j} \cos \theta_{ki} \\ \Delta h_{ik} &= -V_i V_k b_{f_j} \cos \theta_{ik} \\ \Delta h_{ki} &= -V_k V_i b_{f_j} \cos \theta_{ki} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{jk} &= 0 \\ \Delta h_{kj} &= 0 \end{aligned}$$

그러면 위의 변화분 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \Delta h_{ii} &= -(\Delta h_{ij} + \Delta h_{ik}) \\ \Delta h_{ij} &= \Delta h_{ji} \\ \Delta h_{ik} &= \Delta h_{ki} \\ \Delta h_{jk} &= 0 \\ \Delta h_{kj} &= 0 \\ \Delta h_{jj} &= -\Delta h_{ij} \\ \Delta h_{kk} &= -\Delta h_{ik} \end{aligned} \quad (12)$$

이러한 관계를 이용하면 자코비안 행렬의 변화분 ΔH 는 다음과 같이 분해된다.

$$\Delta H = M \hat{H} M^T \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \hat{H} &= \begin{bmatrix} \Delta h_{ij} & 0 \\ 0 & \Delta h_{ik} \end{bmatrix} \\ M^T &= \begin{bmatrix} 0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0 \ -1 \ 0 \cdots 0 \ 0 \ 0 \cdots 0 \\ 0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0 \ 0 \ 0 \cdots 0 \ 0 \ -1 \ 0 \cdots 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그러면 사고에 따른 위상각 변화분 $\Delta \theta$ 는 다음과 같이 Sherman-Morrison공식을 사용함으로써 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= [H + \Delta H]^{-1} \Delta P \\ &= H^{-1} \Delta P - (H^{-1} M) [\hat{H}^{-1} + M^T H^{-1} M]^{-1} \\ &\quad \cdot M^T H^{-1} \Delta P \end{aligned} \quad (14)$$

식(9)에서 알 수 있는 것은 위상각은 1회 수정을 위해서 행렬 $[H]$ 의 삼각인수표에 의한 전·후진 소거과정이 $H^{-1}\Delta P$ 계산 및 $H^{-1}M$ 계산에 2회 필요하다는 점이며, 이것은 Peterson방법에서 필요로 하는 계산횟수와 동일하다.

제시된 방법에 의한 이중선로의 동시사고를 고려한 상정 사고 해석

모선 i, j사이에 연결된 선로와 모선 i, k사이에 연결된 선로에서 동시에 개방사고가 발생하였을 때 제시된 방법에 의한 상정사고 해석과 사고후의 가상적인 조류분포 계산에 대하여 살펴보자.

사고후의 상태계산은 유효모선전력의 불평형분 ΔP 가 사고에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P = [0 \cdots 0 - F_{ij} - F_{ik} \ 0 \cdots 0 - F_{ji} \ 0 \cdots 0 - F_{ki} \ 0 \cdots 0]^T$$

(i) (i) (k)

(15)

F_{ij} : 모선 i에서 모선 j로 흐르는 고장전 선로의 조류

그러면 사고후의 운전상태는 반복적으로 θ 를 수정함으로써 구할 수 있으며, 다음과 같이 $\Delta\theta$ 를 계산할 수 있다.

$$\Delta\theta = [H + \Delta H]^{-1} \Delta P$$

$$= H^{-1} \Delta P - (H^{-1} M) [\Delta H^{-1} + M^T H^{-1} M]^{-1} \cdot M^T H^{-1} \Delta P$$

(16)

식(16)을 계산하는 과정에서 $H^{-1}\Delta P$ 및 $H^{-1}M$ 는 H 의 삼각인수표를 사용함으로써 간단히 계산될 수 있으며 $[\Delta H^{-1} + M^T H^{-1} M]^{-1}$ 도 (2×2) 행렬로서 간단히 계산되므로 식(16)에 의해 $\Delta\theta$ 는 조속한 계산이 가능하다. 다음은 이 $\Delta\theta$ 에 의해 $\theta = \theta^0 + \Delta\theta$ 로 위상각을 수정한다.

이상에서 구해진 계통운전상태 (V^0, θ)에 의해 각 선로에 흐르는 전력을 계산할 수 있다.

2.4 사례 연구 및 시뮬레이션

상정사고 선로 (선로 어드미턴스) : from bus ~ to bus	인접할 모선	형상시 모선의 angle	상정사고시의 모선의 angle	
			표류계산에 의한 정확한 수치	본 논문에서 제시한 방법에 의한 수치(오차)
3~4 3~18	2	-0.122535	-0.096725	-0.1172 (0.0205)
	3	-0.172226	-0.140407	-0.1911 (0.0507)
	4	-0.186099	-0.193446	-0.1938 (0.0004)
	5	-0.165375	-0.168353	-0.1864 (0.0180)
	17	-0.153348	-0.135428	-0.1840 (0.0486)
	18	-0.168011	-0.147518	-0.1810 (0.0335)
4~5 4~14	3	-0.172226	-0.361307	-0.3019 (0.0594)
	4	-0.186099	-0.471233	-0.4648 (0.0064)
	5	-0.165375	-0.166513	-0.1683 (0.0018)
	6	-0.153119	-0.156423	-0.1614 (0.0050)
	13	-0.123980	-0.134795	-0.1458 (0.0110)
	14	-0.153122	-0.168538	-0.1633 (0.0082)
	15	-0.160428	-0.240923	-0.1859 (0.0550)
6~7 6~11	5	-0.165375	-0.172111	-0.1795 (0.0074)
	6	-0.153119	-0.157320	-0.1366 (0.0207)
	7	-0.191580	-0.261823	-0.2537 (0.0081)
	8	-0.200414	-0.250670	-0.2448 (0.0059)
	10	-0.111507	0.000855	-0.0262 (0.0268)
	11	-0.125702	-0.000632	-0.0286 (0.0280)
	12	-0.125977	-0.013938	-0.0506 (0.0367)
17~18 17~27	3	-0.172226	-0.214975	-0.2120 (0.0030)
	16	-0.135941	-0.060043	-0.1060 (0.0460)
	17	-0.153348	-0.060090	-0.1176 (0.0575)
	18	-0.168011	-0.234946	-0.1418 (0.0931)
	26	-0.120714	-0.167149	-0.2384 (0.0713)
	27	-0.155827	-0.204173	-0.2419 (0.0377)
	28	-0.0534253	-0.105843	-0.1248 (0.0190)
19~33 19~20	16	-0.135941	-0.134395	-0.0735 (0.0609)
	19	-0.0552344	-0.119685	-0.1262 (0.0125)
	20	-0.0798686	0.227354	0.2664 (0.0390)
	33	0.0358216	-0.937348	-0.9359 (0.0586)

표1. 제시된 방법과 Loadflow에 의해 구한 위상각 결과 비교

본 논문에서 제시한 방법의 정확성을 입증하기 위해 여러 상정사고를 가정하여 New England 39 Bus System에 적용시켰다. 상정사고시 가장 영향을 많이 받는 인접한 선로와 관련된 모선의 위상각을 구하였고, 이를 Newton-Raphson법을 이용하여 구한 위상각과 비교하여 그 오차를 구하였다. 결과는 표1에서 보는바와 같다.

3. 결 론

본 논문에서는 이중선로의 동시사고를 고려한 상정 사고 해석기법을 제시하였다. 여기에 제시된 방법은 일반적인 Loadflow 해석기법인 Newton-Raphson법의 단점 중 하나인 Jacobian행렬의 역행렬을 직접 구할 때 많은 시간이 걸리는 단점을 해소하기 위해 Peterson방법과 Sherman-Morrison방법을 조합하여 빠른 시간안에 위상각 변화분을 구해냄으로써 신속한 조류계산이 가능함을 보여준다.

그러나, 어느 정도의 일정한 위상각의 오차분은 고려해 보아야 할 사항으로, 이는 각 선로 상정사고시마다 선로충전 어드미턴스를 점검하여 선로충전 어드미턴스의 영향이 큰 경우하시와 선로충전 어드미턴스의 영향이 비교적 적은 경우하시의 경우를 구체적으로 분류하지 않은 때문이라 할 수 있다. 이러한 부분을 보완하기 위해서는 각 경우에 대한 알고리즘의 수정을 통해, 경우에 맞는 조류 변화를 정확히 반영시키는 방법을 선택적으로 사용하면 매우 효과적인 상정사고 해석법이 될 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] G.W. Stagg, et. al., "Techniques for the Real-time Monitoring of Power System Operations", IEEE Trans. on PAS, Vol. 89, No. 4, pp.545~555, April 1970.

[2] B. Stott, "Decoupled Newton Load Flow", IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, pp.1955~1959, September/October 1972.

[3] N.M. Peterson, W.F. Tinney, D.W. Bree, "Iterative Linear AC Power Flow Solution for Fast Approximate Outage Studies", IEEE Trans. on PAS, Vol. 95, pp.2048~2056, 1974.

[4] M.K. Enns, J.J. Quada, B.Sackett, "Fast Linear Contingency Analysis", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 4, pp.783~791, April 1982.

[5] R. Podmore, J.M. Undril, "Modified Load Flow Iterative Algorithm to Handle Series Capacitive Branches", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 4, No. 4, pp.1355~1362, October 1989.

[6] K.F. Schafer, J.F. Verstege, "Adaptive Procedure for Masking Effect Compensation in Contingency Selection Algorithms", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 5, No. 2, pp.539~546, May 1990.

[7] 문영현외, "단락용량증가 억제를 위한 계통운전방식 연구", 한전기술연구원, 1991, 1

[8] 문영현외, "중부하시의 정밀 상정사고 해석에 관한 연구", Trans. KIEE, Vol. 41, No. 10, OCT. 1992.