

전압안전도해석을 위한 상정사고스크리닝에
관한 연구

송길영
고려대학교

김영한
한국전력공사

최상규^o
고려대학교*

A Study of Contingency Screening Method
for Voltage Security Analysis.

Kil-Yeong Song
Korea University

Yeong-Han Kim
Korea Electric Power Corporation

Sang-Geu Choi
Korea University

Abstract

This paper describes a fast security analysis technique for voltage security assessment.

The new method identifies the location of buses with potential voltage problems and thereby defines a voltage-sensitive subnetwork for contingency screening.

The efficiency of this method is derived from the use of a voltage subnetwork to drastically reduce the number of bus voltages to be solved; and subsequently from the use of compensation techniques and sparse-vectors methods for screening.

Results demonstrating the effectiveness of the method on the IEEE-14 bus model system are presented.

1. 서론

전압문제가 심각한 전력계통에서는 선로나 발전기에 사고가 발생하였을 경우, 전압붕괴현상을 일으킬 위험성이 있는 지를 해석할 필요가 있기 때문에 상정사고 선택도 전압안전도를 기준하여 선택하게 된다.⁽¹⁾

특히 최근에 발생한 동경전력의 대정전사고등 세계적인 대정전사고가 전압붕괴로 비롯되는 경우가 많게됨에 따라 상정사고선택에 있어서도 전압안전도를 고려할 필요성이 더욱 높아지고 있으며 이 분야에 대한 많은 연구가 계속되고 있다.^(2, 4, 5)

전압안전도 평가를 위해 종래에 사용되어온 상정사고 스크리닝(Contingency Screening)은 보통 고속분할조류 계산의 1회 반복계산으로 이루어지는데 이것의 계산시 전압-

무효전력스크리닝 시간은 전체시간의 70% 가량 소요된다.⁽³⁾ 본 연구에서는 이와같은 전압-무효전력 스크리닝에 소요되는 계산부담을 줄이기 위해 먼저, 전압감도모선(Voltage Sensitive buses)을 결정한 후 Mid-Compensation 법과 sparse vector법을 사용하여 이들 모선전압에 대해서만 전압-무효전력스크리닝을 하는 새로운 고속 상정사고 스크리닝 알고리즘을 개발하였다. 이와같이 개발된 새로운 상정사고 스크리닝 알고리즘을 IEEE-14 모선 모델계통과 KEPCO-130 모선 실계통에 적용하여 그 우수성을 입증하였다.

2. 상정사고 스크리닝

선로사고에 대한 상정사고스크리닝은 다음식으로 주어지는 고속분할 조류방정식의 1회 반복계산으로 이루어진다.

$$\left[\frac{\Delta P}{|V|} \right] = [B_1 + B_2] [\Delta \theta] \quad (2.1)$$

$$\left[\frac{\Delta Q}{|V|} \right] = [B_2 + B_2] [\Delta V] \quad (2.2)$$

여기서, B_1, B_2 : 서셉턴스로 구성되는 행렬

B_1, B_2 : 상정사고 후의 행렬
 B_1, B_2 의 변화량

한편, 다음과 같은 식(2.3), (2.4), (2.5)를 각각 정의하면,

$$\Delta \hat{B} = \begin{bmatrix} \Delta B_{ii} & \Delta B_{ij} \\ \Delta B_{ji} & \Delta B_{jj} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$M_{1ij}^t = \begin{bmatrix} 0, \dots, 0 & 1 & 0, \dots, 0 \\ 0, \dots, 1 & 0 & 0, \dots, 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$M_{2ij}^t = \begin{bmatrix} 0, \dots, 0 & 1 & 0, \dots, 0 \\ 0, \dots, 1 & 0 & 0, \dots, 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

여기서, M_{1ij}^t, M_{2ij}^t : $2 \times (NB-1)$ 행렬

M_{2ij}^t : 2 x NLE 행렬
 NB : 모 선 수
 NLE : 부하 모선수

앞의 식(2.1)와 식(2.2)에서 $\Delta B_1, \Delta B_2$ 는 다음과 같은 식(2.6)과 식(2.7)로 쓸 수 있다.

$$\Delta B_1 = M_{1ij} \Delta \hat{B} M_{1ij}^t \quad (2.6)$$

$$\Delta B_2 = M_{2ij} \Delta \hat{B} M_{2ij}^t \quad (2.7)$$

지금, Sherman-Morrison 역행렬 공식에 의해 식(2.1)와 식(2.2)에서 $\Delta \theta$ 와 ΔV 는 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$\Delta \theta = B_1^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} - B_1^{-1} M_{1ij} \{ I + \Delta \hat{B} M_{1ij}^t B_1^{-1} M_{1ij} \}^{-1} \Delta \hat{B} M_{1ij}^t B_1^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (2.8)$$

$$\Delta V = B_2^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} - B_2^{-1} M_{2ij} \{ I + \Delta \hat{B} M_{2ij}^t B_2^{-1} M_{2ij} \}^{-1} \Delta \hat{B} M_{2ij}^t B_2^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (2.9)$$

본 연구에서는 식(2.8), (2.9)의 계산시 행렬 B_1, B_2 의 대칭성을 효율적으로 이용하기 위해 LDL^t 분할법과 함께 Mid-Compensation 법을 사용하였다. 이들로 처리한 결과식은 다음식(2.10)과 식(2.11)로 된다.

$$\Delta \theta = (L_1^t)^{-1} \{ I - D_1^{-1} L_1^t M_{1ij} C_1 M_{1ij}^t (L_1^t)^{-1} \} D_1^{-1} L_1^t \frac{\Delta P}{|V|} \quad (2.10)$$

여기서,

$$C_1 = (I + \Delta \hat{B} Z_1) \Delta \hat{B}$$

$$Z_1 = (L_1^t M_{1ij})^t \cdot D_1^{-1} L_1^t M_{1ij}$$

$$\Delta V = (L_2^t)^{-1} \{ I - D_2^{-1} L_2^t M_{2ij} C_2 M_{2ij}^t (L_2^t)^{-1} \} D_2^{-1} L_2^t \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (2.11)$$

여기서,

$$C_2 = (I + \Delta \hat{B} Z_2) \Delta \hat{B}$$

$$Z_2 = (L_2^t M_{2ij})^t \cdot D_2^{-1} L_2^t M_{2ij}$$

지금, 식(2.10)을 살펴보면 $M_{1ij} = (e_{1i} \ e_{1j})$ 와 ΔP 는 sparse vector 성질을 가지고 있으므로 여기에 sparse vector 법을 적용하면, $\Delta \theta$ 의 고속계산이 가능하다.

그런데 식(2.11)에서 ΔQ 는 sparse vector 성질을 가지고 있지 않기 때문에 1회 반복계산시, ΔV 의 계산 시간이 전체의 70%를 차지하게 된다.

본 연구는 이러한 전압-무효전력스크리닝의 소요시간경감을 위해, 상정사고시 이것에 영향을 받는 모선, 즉 전압감도 모선(Voltage sensitivity buses)을 결정한 후 전압-무효전력스크리닝과정에서 이들 모선전압만을 구하도록 하는 고속 전압-무효전력스크리닝을 개발하였다.

3. 전압감도모선의 결정

전압감도모선의 결정은 다음과 같은 사실에 그 기초를 두고 있다.

- (1) 선로사고와 같은 상정사고가 발생하면 그 선로를 흐르던 전력은 다른 선로로 흐르게 된다.
- (2) 선로사고에 의한 모선전압의 변화는 사고선로의 무효전력의 손실과 나머지 선로의 무효전력 소비변화에 그 원인이 있다.

이상의 사실로부터 전압감도모선을 결정하는 첫번째 선택기준은 다음식으로 주어지는

$$q_{loss,ij} = I^2 X_{ij} = \frac{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)}{V_i^2} X_{ij} \quad (3.1)$$

여기서,

X_{ij} : 선로 i-j의 리액턴스

P_{ij}, Q_{ij} : 선로 i-j의 유효, 무효조류
 무효전력손실에 대한 유효전력 조류변화의 영향을 고려하므로써 구할 수 있다. 이를 위해 먼저 다음과 같은 근사성을 가정할 수 있다.

$$V_i = 1$$

$$P_{ij} = b_{ij} \theta_{ij}$$

$$P_{ij} \gg Q_{ij}$$

위의 가정과 식(3.1)로부터 유효선로 조류 P_{ij} 의 변화에 대한 선로무효전력손실의 증분변화는 다음식(3.2)로 된다.

$$\Delta q_{loss,ij} = 2b_{ij} \theta_{ij} \Delta \theta_{ij} \quad (3.2)$$

이 식(3.2)는 증분무효손실기준식으로 정의 할 수 있다. 따라서, 전압감도모선은 다음식(3.3)에서

$$S_{V1} = \{ i, j : |\Delta q_{loss,ij}| > \epsilon_q \} \quad (3.3)$$

여기서, ϵ_q : 증분무효전력손실한계치. 전압안전도의 경계한계치를 기준으로 하여정한 증분무효전력한계치 ϵ_q 를 능가하는 선로에 연결된 모든 모선이라고 생각할 수 있다 이와는 별도로, 전압감도모선을 결정하는 다른 기준을 또한 생각해 볼 수 있다. 이것은 다음식(3.4)와 같은 증분 유효선로 조류기준식으로 정의할 수 있다.

$$\Delta P_{ij} = b_{ij} \Delta \theta_{ij} \quad (3.4)$$

이때에도 앞서와 마찬가지로 전압감도 모선은 다음식(3.5)에서 증분유효선로조류한계치 ϵ_p 를 능가하는 모든 모선으로 선정된다.

$$S_{V2} = \{ i, j : |\Delta P_{ij}| > \epsilon_p \} \quad (3.5)$$

여기서, ϵ_p : 증분 유효선로조류한계치

위의 두 기준식을 사용해서 계통에 적용해 본 결과 S_{V2} 가 S_{V1} 보다 상정사고 후의 전압크기가 경계한계치를 능가하는 모선들만으로 거의 대부분 구성된다는 것을 보여 주었다

이런 이유로 본 연구에서는 식(3.5)를 사용하였다.

4. 고속 전압-무효전력 스크리닝

상정사고 스크리닝을 위해 수행되는 고속분할 조류계산의 1회 반복계산에서 처음에 계산되는 상정사고 후의 위상각은 대개 다음에 계산되는 무효전력변화량(reactive power)의 모든 요소를 비영요소로 만들게 된다. 하지만, 고속 분할조류계산의 1회반복계산만을 할때는 단지, 전압-무효 전력스크리닝에서 전압감도모션만이 중요한 의미를 갖게된다. 따라서, 전압-무효전력스크리닝을 위해서,

- (i) 전압감도모션에 대한 무효전력변화량 $\Delta Q/V$ 만을 계산하면 되고
- (ii) V 계산에서도 전압감도모션에 대한 전압크기만을 계산하면 된다.

이상의 두가지 사실에 의해 전압-무효전력스크리닝은 sparse vector 법의 고속전진대입법(Fast Forward Substitution)과 고속후진대입법(Fast backward Substitution)에 의해 고속으로 계산 할 수 있다.

이상에서 개발된 고속상정사고 스크리닝 알고리즘의 흐름도는 그림 4.1과 같다.

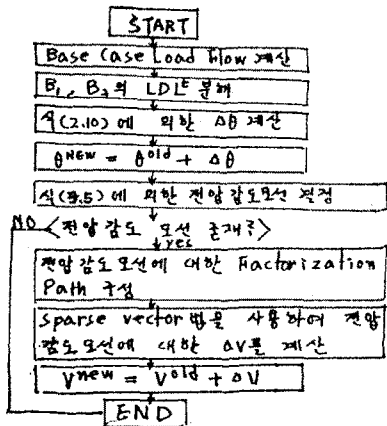


그림 4.1 전압안전도해석을 위한 고속상정사고 스크리닝 흐름도

5. 모델계통에의 적용

본 연구에서 개발된 전압안전도 평가를 위한 고속상정 사고 스크리닝기법의 유용성을 검증하기 위해 IEEE-14 모션 모델계통과 KEPCO-130 모션 모델계통에 대해 3가지 Case 의 상정사고에 대한 종래의 방법(IP-1Q)와

본 연구에서 제안하는 방법(IP-1FQ)의 계산결과를 표 5.1에 보인다.

이 표를 살펴보면 전압크기의 경계한계치를 넘는 모든 모션이 전압감도모션으로 선택되었음을 알 수 있다.

다음에, 표 5.2, 표 5.3은 각 모델계통에 대해 상정사고 스크리닝을 위한 고속분할 조류계산의 각 주요단계별 계산 시간을 보여주고 있다. 이표에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안하는 고속상정사고 스크리닝기법을 사용하면 종래의 스크리닝 방법에 비해 전체계산시간면에서 약 50% 단축시킬 수 있음을 알 수 있었다.

표 5.1 IEEE-14 모션 모델계통에 대한 상정사고 스크리닝 결과의 비교

순번	Case 1		Case 2		Case 3	
	IP-1Q	IP-1FQ	IP-1Q	IP-1FQ	IP-1Q	IP-1FQ
1	0.97345		0.94890	0.94890	0.92802	0.92802
2	0.97386		0.94129	0.94129	0.94097	0.94097
3	0.98324		1.05012	1.05012	0.93678	0.93678
4	0.93518	0.93518	0.95013		0.96360	
5	0.96712		0.96780		0.96009	
6	0.93796	0.93796	0.95928		0.95484	
7	0.94597	0.94597	0.96780		0.96009	
8	1.02905	1.02905	1.03706		1.03641	
9	0.93912	0.93912	0.96132	0.96132	0.95277	0.95277
10	0.98279	0.98279	0.96233	0.96233	0.94840	0.94840
11	0.96429	0.96429	0.94561	0.94561	0.97050	0.97050
12	1.00000		1.00000		1.00000	
13	1.00000		1.00000		1.00000	
14	1.00000		1.00000		1.00000	

Case 1 : 3번 선로 상정사고.

Case 2 : 15번 선로 선상정사고.

Case 3 : 20번 선로 상정사고

* : 각 Case 에 대한 전압감도 모션.

표 5.2 단일선로 상정사고에 대한 스크리닝시간의 비교

	IP-1Q	IP-1FQ
P-θ 스크리닝 시간	1	1
전압감도 모션 결정시간	—	0.2984
Q-V 스크리닝 시간	1	0.192
전체 스크리닝 시간	1	0.491

(IEEE-14 모션 모델 계통)

표 5.3 단일선로 상정사고에 대한 스크리닝시간의 비교

	IP-1Q	IP-1FQ
P-θ 스크리닝 시간	1	1
전압감도 모션 결정시간	—	0.3014
Q-V 스크리닝 시간	1	0.1806
전체 스크리닝 시간	1	0.475

(KEPCO-130 모션 계통)

6. 결 론

본 연구에서는 전압안전도해석을 위한 새로운 고속상정 사고 스크리닝알고리즘을 개발하였다. 이것을 몇가지 모델계통에 적용해 본 결과,

(1) 종래의 상정사고스크리닝 방법과 비교하여 같은 수준

의 신뢰성을 유지하면서 전체계산시간을 약 50% 단축시킬 수 있었다.

- (2) 계통의 규모가 커질수록 계산시간면에서 본 연구에서 제안하는 방법이 종래의 방법에 비해 그 효율성이 향상됨을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서는 단일선로상정사고에 대해서 상정사고 스크리닝을 수행하였지만 다중 상정사고에 대해서도 본 방법을 적용할 경우 유사한 수준의 효율성이 입증될 것으로 사료된다.

References

- (1) 송길영; "전력계통의 해석 및 운용" 동일 출판사, 1984.
- (2) G.C.Ejebe and B.F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-98 PP.97-109, January/February 1979.
- (3) J.Zaborsky, K.W. whang, K.Prasad, "Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relaxation", ibid, Vol. PAS-99, PP.28-36, January/February 1980.
- (4) M.G.Lauby, T.A. Mikolinnas and N.D. Reppen, "Contingency Selection of Branch Outages Causing Voltage Problems", ibid, Vol. PAS-102, PP.3899-3904, December 1983.
- (5) K. Nara, K.Tanaka, H.Kodoma, R.R.Shoults, M.S.chen, P.Van olinda and D.Bertagnolli, "On-Line contingency Selection PP.847-856, April 1985.
- (6) W.F. Tinney, V, ibid, Vol. PAS-14, PP. 295-301, February 1985.
- (7) O.Alsac, B.Stoff and W.F. Tinney, "Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions", ibid, Vol. PAS-102, PP.1050-1060, May 1983.