

전압안정성을 고려한 전력계통의 상정사고 선택 알고리즘

박규홍^{*}, 조양행^{**}, 정인학^{***}
 대림대학^{*}, 영동대학^{**}, 인천기능대학^{***}

Contingency Ranking Algorithm Using Voltage Stability

Kyu-Hong Park^{*}, Yang-Haeng Cho^{**}, Jeon-Hark Jung^{***}
 DaeLim College^{*}, YeungDong College^{**}, InCheon P. T. College^{***}

Abstract - This paper presents a algorithm for contingency ranking using the real power ratio. The fundamental cause of voltage collapse is considered due to excessive power transfer through the line. To obtain contingency ranking, maximum real power transferred to the load is obtained when load impedance Z_r equal to line impedance Z_s . This algorithm is verified by simulation on a 6-bus test system.

1. 서 론

전력 수요의 증가로 인하여 5,000만[kW]의 전원 설비를 보유한 우리나라의 경우 전원의 원격화, 대용량화함에 따라서 송전 설비도 장거리화, 고전압화, 대용량화의 양상으로 되고 있다.

이와 같이 계통이 거대해지면서 송전전력이 증가하게 되고, 따라서 수전단 전압의 이상 저하내지는 무효전력 부족에 기인하는 전압안정성 문제가 대두되고 있다.

즉, 전압안정성 문제는 송전선로의 임피던스에 의한 전압저하에 기인되므로 계통 전압에 따라서 전송할 수 있는 전력에는 한계가 있다. 그러므로 송전전력의 한계에 가까워지거나 초과하면 전압강하가 급속하게 진전되고 이로 인하여 넓은 지역에 정전이 발생할 수 있다.

이에 대한 상정사고 해석을 효과적으로 행하기 위해서는 계통에 큰 영향을 미칠 수 있는 가혹한 경우만을 우선적으로 선택하여 해석할 필요가 있다.

상정사고 선택을 위하여 일반적으로 고속분할법, 직류조류법, P-Q분할법등이 있으며, 대개 선로용량대비 계통조류를 계산하여 이의 비율로부터 상정사고 선택을 할 수 있다.

이 경우 선로 용량 결정시 고려할 사항은 안전전류, 전압강하, 안정도의 여유 및 고유부하법 등으로 이들에 대한 종합적인 검토후 선로 용량을 나타낼 수 있다. 그러나 선로 용량은 사용전선의 종류라든가 거리 등 여러 가지 조건이 얽혀있어서 이것을 정격화한다는 것은 쉬운일이 아니다. 본 논문에서는 선로임피던스와 부하임피던스가 같을 경우 최대 전력을 송전할 수 있다는 조건으로부터 최대 송전 전력을 구하여 이를 선로용량으로 간주하였다.^(1,2)

따라서 본 논문에서는 계통 상황에 따라서 결정되는 선로 용량과, 일부 모선의 부하 증가로 인하여 특정 선로의 조류가 증가하여 모선 전압이 크게 떨어지게 되므로 선로 조류와 선로 용량과의 비로부터 상정사고 선택 순위를 결정 할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

2. 상정사고 선택

2.1 송전용량 계산

송전용량은 송전선로를 통하여 보낼 수 있는 최대 송전 전력을 뜻하지만 이를 정식화하는 것은 간단하지 않

다. 일반적으로 단거리 송전 선로에서의 선로용량은 주로 전선의 허용온도를 고려한 안전 전류 또는 그 선로의 전압 강하율을 고려하여 결정한다. 일반적인 송전선로의 최대전압 강하율은 10%로 제한하고 있으나 양질의 전력공급을 고려할 경우에는 5% 정도로 제한함이 좋다. 장거리 선로인 경우에는 전력조류가 고유부하인 SIL(Surge Impedance Loading)을 초과하면 무효전력 손실 및 전압강하가 증가하여 송전용량의 제약을 받게 되며, 부하변화 또는 계통고장 등의 왜란에 대하여 발전기 전압이 일정한 상차각을 유지하면서 동기운전을 유지하는 안정도는 운전전력이 최대송전전력에 비하여 20~30% 정도의 여유를 유지하도록 운전하여야 한다. 이와 같이 송전용량 결정에는 안전전류, 전압강하, 고유부하 계산 및 안정도 여유를 고려하여야 한다. 그러나 본 논문에서는 선로 전력을 나타내는 일반적인 식에서 선로임피던스와 부하임피던스가 같은 조건으로부터 최대 송전 전력을 구하여 이를 선로 용량으로 하였다. 송전선로의 등가회로로 나타내면 그림1과 같다.

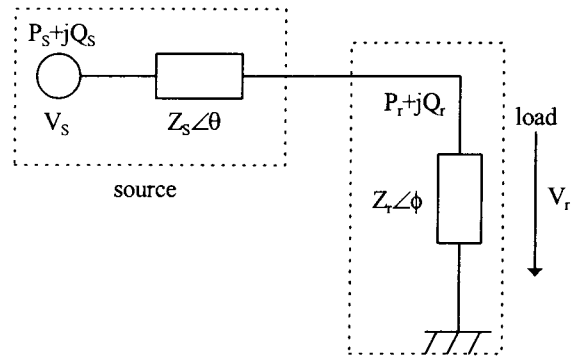


그림 1 송전선로의 등가회로

그림 1과 같은 등가회로에 흐르는 전류 I 와 전압강하 V_r 는 다음과 같다.^{(1),(2)}

$$I = \frac{V_s}{\sqrt{(Z_s \cos \theta + Z_r \cos \phi)^2 + (Z_s \sin \theta + Z_r \sin \phi)^2}}$$

$$= \frac{V_s}{Z_s \sqrt{1 + (Z_r/Z_s)^2 + 2(Z_r/Z_s) \cos(\theta - \phi)}} \quad (1)$$

$$V_r = Z_r \cdot I$$

$$= \frac{Z_r}{Z_s} \frac{V_s}{\sqrt{1 + (Z_r/Z_s)^2 + 2(Z_r/Z_s) \cos(\theta - \phi)}} \quad (2)$$

그러므로 수전단의 유효전력 P_r 은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = V_r I \cos \theta$$

$$= \frac{V_s^2 / Z_s}{1 + (Z_r / Z_s)^2 + 2(Z_r / Z_s) \cos(\theta - \phi)} \frac{Z_r}{Z_s} \cos \phi \quad (3)$$

윗 식에서 송전단 전압 V_s , 선로 임피던스각 θ 와 부하 임피던스각 ϕ 가 일정한 것으로 가정하고, Z_r / Z_s 의 변화에 따른 수신단 유효전력 P_r 의 변화를 나타내면 다음과 같다

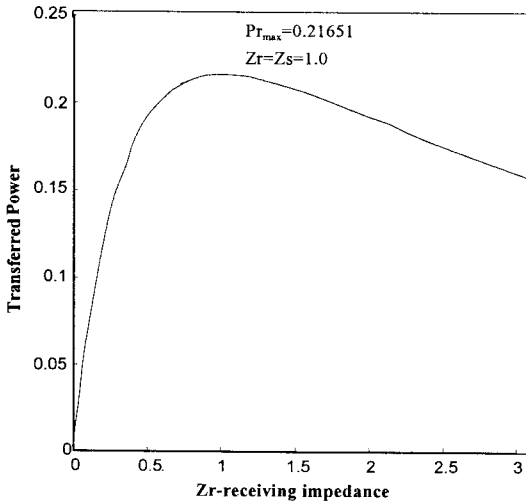


그림 2 P_r 과 Z_r / Z_s 의 변화비

즉, 식(3)에서 $\partial P_r / \partial Z_r = 0$ 로부터 $Z_r = Z_s$ 이면 최대 송전 전력 $P_{r,max}$ 을 얻을 수 있으므로 그림 2와 같이 $Z_r / Z_s = 1$ 인 경우 최대 송전전력 $P_{r,max}$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{r,max} = \frac{V_s^2}{Z_s} \frac{\cos \phi}{2 + 2 \cos^2(\theta - \phi)} \quad (4)$$

즉 최대 송전 전력은 송전단 전압 V_s^2 에 비례하며, 선로 임피던스의 크기 Z_s 에 반비례함과 동시에 부하임피던스 각 ϕ , 선로 임피던스 각 θ 에 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나 수신단의 부하역률이 1일 경우 선로 리액턴스는 저항보다 월등히 큼으로 최대 송전전력은 $V_s^2 / 2Z_s$ 이 된다. 식(4)에서 부하가 변하여도 역률이 일정한 것으로 가정하면 최대 송전전력도 거의 일정하게 된다.

2.2 P-V 곡선

상기 식(2) (3)으로부터 P-V곡선을 그리면 그림 3과 같다. 여기서 임의의 전력 P에 대하여 두 가지의 전압을 취할 수 있는데 V_H 를 안정근, V_L 를 불안정근이라 하며, 안정 여부는 곡선의 기울기에 의하여 판별된다.

즉, 부하의 미소한 감소 ΔP_r 이 있을 경우 안정근 V_S 에서는 전압의 상승으로 인하여 부하가 증가하므로 원래의 운전 점으로 되돌아가게 된다. 한편 불안정근 V_L 에서는 부하가 감소하면 전압은 더욱 저하되면서 부하도 감소하여 드디어 전압 붕괴에 이른다.

송전용량을 나타내는 M점보다 위 부분은 안정영역으로서 전압저하보다 전류증가 크므로 부하 증가에 대하여 전력전송 기능을 가지고 있는 영역이라 할 수 있다. 이에 대하여 M점보다 아래 부분은 전류증가보다는 전압저하가 크므로 전력전송 기능을 상실되는 불안정 영역이라 할 수 있다.

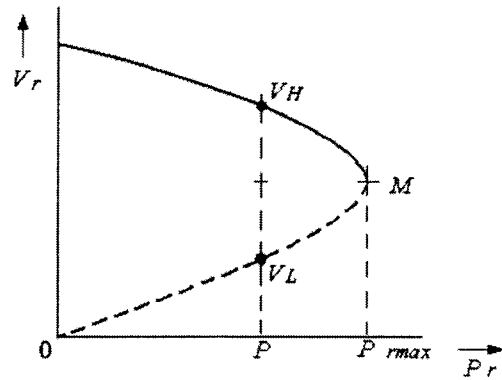


그림 3 P-V곡선

2.3 평가지수 계산

전압안정성을 나타내는 평가지수 VPI(Voltage Performance Index)는 부하가 증가하였을 경우 계통운용을 전압 안정성의 관점에서 평가하기 위한 것이다.

선로 조류가 송전용량을 기준으로 하여 얼마나 많이 흐르는가를 나타내는 VPI는 송전용량에 근접하면 할수록 모션전압은 크게 떨어져 전압 붕괴점에 도달하므로 다음과 같은 평가지수로 나타낼 수 있다.

$$VPI = \frac{P_r}{P_{r,max}} \quad (5)$$

즉, 수신단 전압이 낮아지는 원인은 선로의 전압강하를 고려할 수 있으므로 VPI가 1에 가까운 경우에는 선로조류 P_r 이 선로용량에 가까울 정도로 크게 흐르므로 전압강하는 전압 붕괴점에 이를 만큼 크게 된다. 그러므로 식 (5)를 전압 안정성 여부에 대한 평가지수로 이용할 수 있음을 뜻한다.

3. 모델 계통에의 적용례

본 논문에서 제시한 알고리즘 및 프로그램에 대한 모델계통으로 그림 4와 같은 6 모선 11 선로 계통을 이용하였다.⁽⁶⁾ 선로 용량은 $Z_r / Z_s = 1$ 일 경우 유도된 최대 송전 전력 $P_{r,max}$ 로서 계산되었다.

정상상태에서 5번 모선의 부하를 100% 증가시킨 결과 표 1에서 나타내는 바와 같이 11번 선로의 평가지수가 1.046으로서 가장 높으며 선로 조류의 증가로 인하여 전압강하가 일어남으로 5번 모선의 전압이 $0.882 \angle -0.328$ 으로 떨어짐을 알 수 있다. 10번과 7번 선로도 이의 영향을 받아서 평가지수 VPI가 0.712, 0.620으로 나타나며, 해당선로의 모션인 4번과 2번 모선 전압도 0.968, 0.981로 떨어졌음을 알 수 있었다. 일반적으로 평가지수가 1에 가깝거나 1보다 크면 전압강하가 크게 일어날 것이다. 5번 모선의 부하 전력은 주로 11번, 7번 및 3번 선로에서 공급되지만, 다행히 3번 선로는 선로 용량이 커서 평가지수 VPI는 0.5에 불과하였다.

표 2와 표 3에서도 모선의 부하를 100% 증가시 상정사 고 순위를 나타냈다. 표 2의 경우 2번 모선의 부하가 증가되었는데 2번 모선과 직접 연결되지 아니한 11번 선로와 10번선로의 평가지수가 역시 우선 순위로 선택된 것으로 미루어보아 선로 용량이 부족한 것으로 판단된다.

표 4에서 5번 모선의 부하를 2.0배까지 증가시킨 결과 (11번 선로조류 P_r 증가) 선로 용량에 해당하는 $P_{r,max}$ 의 변동은 없으며, 평가지수 VPI가 증가하면 해당 모션 전압의 크기는 낮아지며, 기준모선에 대한 상차각은 계속 증가되는 한편, 평가지수가 1이상으로 크면 모션 전압은 다소 크게 떨어짐을 나타내고 있다.

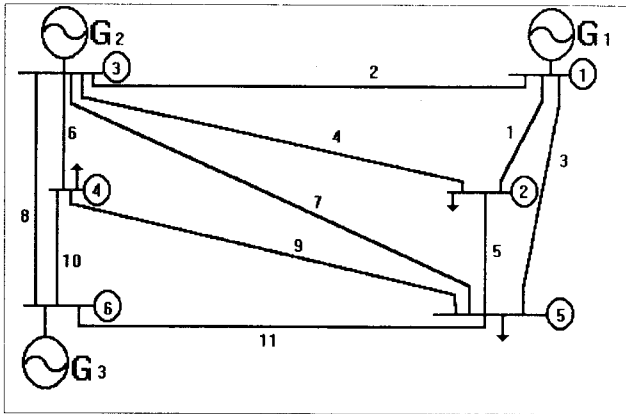


그림 4 6 모선 모델 계통도

표 4 선로조류 P_r 증가시 VPI와 모선전압의 변화 (5번 모선 부하증가시 11번 선로의 경우)

증가 배수	P_r	$P_{r,max}$	VPI	모선전압 V
1.0	0.537	0.967	0.555	0.977 ∠ -0.153
1.1	0.585	0.967	0.605	0.969 ∠ -0.169
1.2	0.634	0.967	0.655	0.961 ∠ -0.185
1.3	0.682	0.967	0.705	0.952 ∠ -0.201
1.4	0.730	0.967	0.755	0.943 ∠ -0.218
1.5	0.777	0.967	0.804	0.934 ∠ -0.235
1.6	0.825	0.967	0.853	0.924 ∠ -0.252
1.7	0.872	0.967	0.902	0.914 ∠ -0.270
1.8	0.919	0.967	0.950	0.904 ∠ -0.289
1.9	0.965	0.967	0.998	0.893 ∠ -0.308
2.0	1.011	0.967	1.046	0.882 ∠ -0.328

표 1 5번 모선 부하증가시 상정사고 순위

순위	선로번호	P_r	$P_{r,max}$	VPI
1	11	1.011	0.967	1.046
2	10	1.044	1.467	0.712
3	7	0.573	0.924	0.620
4	9	0.299	0.526	0.569
5	3	0.508	1.015	0.500

5번 모선 P=2.4, Q=1.162 (100%증가)

4 결론

본 논문은 전압안정성을 고려한 상정사고 선택을 위하여 선로용량 $P_{r,max}$ 를 $Z_r/Z_s = 1$ 인의 조건으로부터 계산하였다. 부하 역률이 변하여도 선로 용량은 거의 일정하며, 또한 모선의 부하를 증가시킴으로서 전압 강하에 의하여 수전단 모선의 전압이 낮아지므로 전압이 붕괴되는 상황을 나타내는 평가지수 VPI를 선로조류와 선로용량과의 비로부터 산정하여 선로 순위를 결정하는 알고리즘을 제시하였다.

[참고 문헌]

- [1] M. Moghavvemi, "Real-time contingency evaluation and ranking technique", IEE proceeding C, vol 145, No 5, pp. 517-524, September 1998.
- [2] A.M.Chebbo, "Voltage collapse proximity indicator : behaviour and implication", IEE proceeding C, vol 139, No 3, pp. 241-252, May 1992.
- [3] 朴圭弘, 鄭在吉, "전력설비의 신속한 상정사고 선택 알고리즘", 한국조명 전기 설비학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 20 - 25, Feb. 1999.
- [4] 朴圭弘, 鄭在吉, "線路切換에 의한 過負荷 解消 알고리즘", 대한전기학회지, Vol. 41, No. 5, pp. 459 - 467, 1992.
- [5] 朴圭弘 외, "새로운 선로사고 분배계수를 이용한 과부하 해소대책 알고리즘" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 588 - 590, 1995.
- [6] A. J. Wood, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley, pp.368 - 373, 1984.

표 2 2번 모선 부하증가시 상정사고 순위

순위	선로번호	P_r	$P_{r,max}$	VPI
1	11	0.918	0.967	0.949
2	10	1.060	1.467	0.723
3	4	0.957	1.370	0.698
4	8	0.853	1.703	0.500
5	5	0.306	0.766	0.400

2번 모선 P=2.4, Q=1.162 (100%증가)

표 3 4번 모선 부하증가시 상정사고 순위

순위	선로번호	P_r	$P_{r,max}$	VPI
1	10	1.124	1.467	0.847
2	11	0.794	0.967	0.822
3	6	1.186	2.476	0.479
4	8	0.764	1.703	0.448
5	4	0.449	1.370	0.328

4번 모선 P=2.4, Q=1.162 (100%증가)