

손실재분배 알고리즘을 이용한 조류다근계산법에 의한 전압 안정도 해석

노민호*, 김근성, 박순재, 채명석, 신중린
 건국대학교 전기공학과

Analysis of Voltage Stability Using the Multiple Load Flow Calculation Method with Loss Redistribution Algorithm

Min-Ho Ro*, Keun-Seong Kim, Sun-Jae Park, Myoung-Seck Chae, Joong-Rin Shin
 Dept. of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

Abstract - This paper presents an approach for the analysis of static voltage stability in power system. The proposed approach is based on multiple load flow calculation method using the redistribution algorithm of transmission loss, with which more realistic load flow solution can be obtained in the near of voltage collapse point. Some simulation results of the proposed approach show that the accuracy of static voltage stability analysis can be increased.

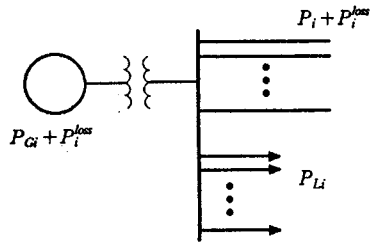


그림 1. 손실을 분담하는 발전모선

1. 서론

이미 선진각국에서는 계통붕괴현상을 경험했으며 [1] 우리나라에서도 최근 냉방부하의 급증으로 전압 불안정을 우려하게끔 되었다. 이에 따라 전압붕괴현상 또는 전압안정도에 대한 많은 연구가 보고 되고 있다. 전압안정도 해석은 정적전압안정도와 동적전압안정도로 나뉘어지며, 전자의 경우 무효전력부하증가에 대한 무효전력 발전변화비로 전압붕괴지수를 삼거나 [2], 전압불안정지수[3] 및 Jacobian 최소특이값[4]을 이용하고 있다. 본 연구에서는 손실재분배 알고리즘[9]을 이용하여 기존의 방법보다 해의 정밀성을 높힐 수 있는 전력조류계산의 다근해를 얻고자 하였고, 그 결과로부터 유효전력과 전압판계곡선으로부터 좀더 현실성 있는 전압붕괴점을 찾고자 하였다. 마지막으로 사례연구를 통하여 본 논문의 효용성 및 타당성을 입증하고자 한다.

2. 본론

2.1. 손실재분배 알고리즘

계통의 송전손실을 각 발전기가 분담한다고 하면 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

여기서, P_{Gi} : i 번째 모선의 발전전력
 P_{Li} : i 번째 모선 부하
 P_i : i 번째 모선의 순주입전력

따라서, 손실을 포함하는 i 번째 발전모선의 전력방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) - P_i^{loss} \quad (1a)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (1b)$$

계통의 송전손실은 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하므로 각 발전기의 송전손실 분담량은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in G} |I_i|^2} \times P_{loss} \quad (2)$$

여기서, 전체 송전손실은 선로조류로부터 다음과 같이 표현된다.

$$P_{loss} = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (e_i (e_i - e_j) + f_i (f_i - f_j)) \quad (3)$$

식(2)와 전류에 관한 항은 계통의 절점방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|I_i|^2 = \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right)^2 \quad (4)$$

2.2. 조류다근 계산법

(1)식의 좌변을 지정치, 우변을 e , f ($V=e+if$)를 변수로 갖는 계산치로 두고 일반화된 함수로 표현 한다면,

$$f(x) = 0 \quad (5)$$

(5)식의 테일러급수 전개는

$$f(x) = f(x_0) + J\Delta x + f(\Delta x) \quad (6)$$

여기서,

x_0 : 반복계산시 계산되는 x 의 추정치

J : Jacobian 행렬

Δx : 해로 수렴하기 위한 미소 증분

수정벡터 Δx 의 크기를 결정하는 승수를 μ 라 정의하면 μ 는 다음과 같은 목적함수 F 를 최소화 시킴으로 구할 수 있다.

$$F = \|f(x) - f(x_0) - \mu J\Delta x - \mu^2 f(\Delta x)\|^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = g_0 + g_1\mu + g_2\mu^2 + g_3\mu^3 = 0 \quad (8)$$

여기서,

$$g_0 = -a^2, \quad g_1 = a^2 + 2a \cdot c$$

$$g_2 = -3a \cdot c, \quad g_3 = 2c^2$$

$$a = f(x) - f(x_0), \quad c = -f(\Delta x)$$

μ 가 결정되면 조류계산의 다중근으로 수렴하기 위해 개선되는 x 값은 다음식에 의해 계산된다.

$$x^{new} = x^{old} + \mu \Delta x \quad (9)$$

2.3. 수정되는 자코비안 성분

발전모선에 대한 전력방정식이 새롭게 구해졌으므로 자코비안의 구성요소도 변하게 된다. 기존의 자코비안의 요소중 바뀌는 성분은 S, T 가 되며 구별하여 S', T' 라 한다면 식(1)을 편미분하여 다음과 같은 식을 구할 수가 있다.

$$S'_i = S_i - \frac{(\frac{\partial |I_i|^2}{\partial e_i} P_{im} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{im}}{\partial e_i}) \sum_{m \in C} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{im} \frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial e_i}}{(\sum_{m \in C} |I_i|^2)^2}$$

$$T'_i = T_i - \frac{(\frac{\partial |I_i|^2}{\partial f_i} P_{im} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{im}}{\partial f_i}) \sum_{m \in C} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{im} \frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial f_i}}{(\sum_{m \in C} |I_i|^2)^2}$$

$$S'_0 = S_0 - \frac{(\frac{\partial |I_i|^2}{\partial e_i} P_{im} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{im}}{\partial e_i}) \sum_{m \in C} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{im} \frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial e_i}}{(\sum_{m \in C} |I_i|^2)^2}$$

$$T'_0 = T_0 - \frac{(\frac{\partial |I_i|^2}{\partial f_i} P_{im} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{im}}{\partial f_i}) \sum_{m \in C} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{im} \frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial f_i}}{(\sum_{m \in C} |I_i|^2)^2}$$

여기서,

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial e_i} = 2(\alpha_i G_{ii} + \beta_i B_{ii})$$

$$\frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial e_i} = 2 \sum_{m \in C} (\alpha_i G_{im} + \beta_i B_{im})$$

$$\frac{\partial P_{im}}{\partial e_i} = -2G_{ij}(e_i - e_j)$$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial f_i} = 2(\beta_i G_{ii} - \alpha_i B_{ii})$$

$$\frac{\partial (\sum_{m \in C} |I_i|^2)}{\partial f_i} = 2 \sum_{m \in C} (\beta_i G_{im} - \alpha_i B_{im})$$

$$\frac{\partial P_{im}}{\partial f_i} = -2G_{ij}(f_i - f_j)$$

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j), \quad \beta_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)$$

2.4. 손실제분배 알고리즘을 이용한 조류다근 계산법

제안된 알고리즘으로 구한 유효전력 방정식을 사용하여 조류다근 계산법을 수행하면 뉴턴-랩슨 계산과정에 의해 매 계산과정마다 각 모선의 e, f 에 대한 미소 증분 $\Delta e, \Delta f$ 를 구할 수가 있다. 아울러, 식(8)에 의해 μ 가 결정되므로 조류다근을 구하기 위한 미소증분은 $\mu \Delta e, \mu \Delta f$ 가 된다.

지금까지의 과정에 대한 전체적인 순서도는 다음과 같다.

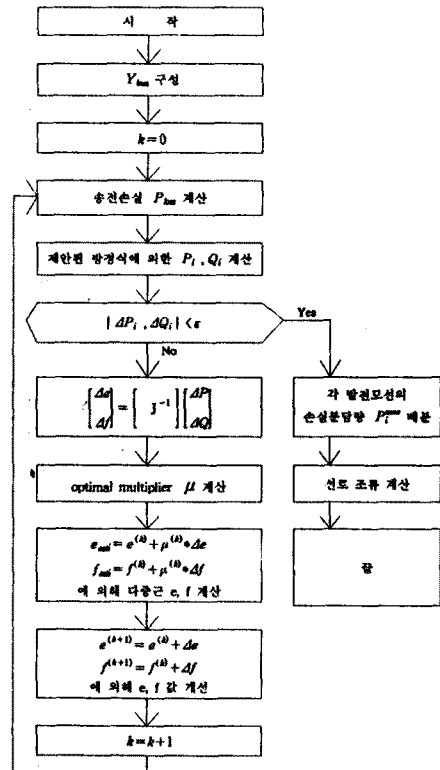


그림 2. 손실제분배 조류다근계산법의 순서도

3. 실험결과 및 검토

제안된 알고리즘을 아래와 같은 IEEE 5모선 계통에 적용한 결과는 다음과 같다.

표 1. 5모선 계통의 조류계산결과 비교

Bus No	기존 방법			제안 방법		
	e	f	발전량	e	f	발전량
1	1.0600	0	131.1222	1.0600	0	129.8685
2	0.9994	-0.0360	40.0000	0.9994	-0.0353	41.2242
3	0.9840	-0.0798	-	0.9841	-0.0793	-
4	0.9805	-0.0850	-	0.9805	-0.0845	-
5	0.9668	-0.0976	-	0.9668	-0.0970	-
손실			6.1222			6.0927

위의 결과는 기준부하(135MW)에서 전압배터의 실수부(e), 허수부(f)와 발전량, 그리고 송전손실을 비교하고 있다. 기존 방법과 제안된 방법은 전압값에는 거의 변화가 없었으나 전체 송전손실에 있어서는 감소된 결과를 보여주고 있다. 이는 계통의 송전손실은 발전량이 슬랙모선이 아닌 각 발전기에 배분된 결과임을 나타내는 것이며, 따라서 그만큼 조류계산해의 정밀성을 기대할 수 있는 것이라 생각된다.

아래의 그림은 기존조류다단계산법과 제안된 방법에 대한 P-e 곡선을 나타내는 것으로서 그림 3은 IEEE 5모선 계통의 모선 4에 대한 것이며 그림 4는 모선 5에 대한 것이다. 기존 방법에서 얻을 수 있는 임계점보다 수렴성이 증가되어 안정여유도가 증가된 임계점을 얻을 수가 있음을 알 수 있는데 이 역시 계산의 정밀성이 좋아졌음을 나타내는 것이다.

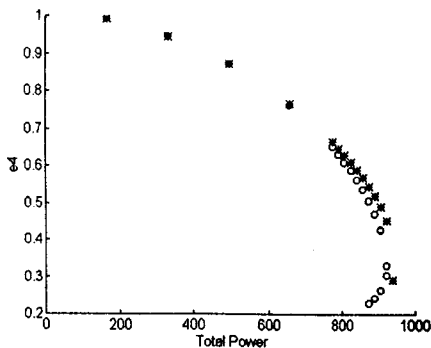


그림 3. 부하증가에 따른 P-e 곡선 (모선 4)
o - 기존방법 * - 제안방법

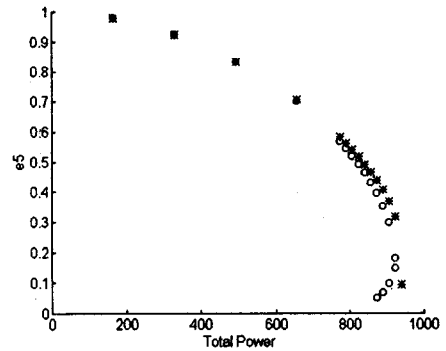


그림 4. 부하증가에 따른 P-e 곡선 (모선 5)
o - 기존방법 * - 제안방법

4. 결론

본 연구에서는 기존 조류다단계산법에 손실계분배알고리즘을 추가함으로써 송전 손실을 슬랙모선으로 하여금 모두 담당하게 함으로써 일어날 수 있는 조류계산상의 오차를 줄일 수가 있었다. 따라서, 전체 송전 손실이 감소되어 해의 왜곡과 손실이 증가되는 전압붕괴점 근방에서의 해의 수렴성이 증가됨으로서 전압 임계점계산의 정밀도가 증가할 수 있음은 되는 모습을 P-e 곡선을 통해 확인할 수가 있었다.

5. 참고문헌

- [1] L.H. Fink, "Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security," EPRI EL-6183, sec. 3.4.
- [2] J. Carpentier, R. Girard, E. Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow," Proceedings of the 8th Power systems Computation Conference, Helsinki, Finland, Aug.1984.
- [3] P. Kessel, H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System," IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986.
- [4] A. Tiranuchit, R.J. Thomas, "A Posturing Strategy against Voltage Instabilities in Electric Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988.
- [5] Y. Tamura, K. Iba, S. Iwamoto, "A Method for Finding Multiple Load-Flow Solutions for General Power Systems," IEEE PES Winter Meeting New York, NY, Feb. 1980.
- [6] Kenji Iba and Hiroshi Suzuki and Masanao Egawa and Tsutomu Watanabe, "A Method for Finding A Pair of Multiple Load Flow Solutions in Bulk Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol.5, No.2, May 1990
- [7] Y. Sekine, H. Ohtsuki, "Cascaded Voltage Collapse," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, Feb. 1990.
- [8] M.K. Pal, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992.
- [9] 박시우, 신중린, 임한석, "슬랙모선의 영향을 고려한 손실 재분배 조류계산 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1995.7, pp 528-530