

손실재분배와 정적전압의존형 부하모델을 고려한 전압안정도 해석

김근성, 채명석, 신중린, 임한석  
 건국대학교 전기공학과

Voltage Stability Analysis considering Static Voltage  
 Dependent Load Model and Loss Redistribution

K.S.Kim, M.S.Chae, J.R.Shin and H.S.Lim  
 Dep. of Electrical Engineering, Konkuk University  
 Email : jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

Abstract - In many conventional analysis of voltage stability the effect of load characteristics is ignored. But in the real system the load is composed of various components. Therefore if the load composition could be modeled then it will plays an important role in the analysis of static voltage stability. And also, if the system loss generally imposed to slack bus in the conventional load flow calculation is redistributed to each generator the accuracy of static voltage stability analysis can be improved. This paper presents the effect of load composition in the analysis of system stability as well the loss redistribution algorithm. And this paper will compare the result of conventional method with that of the proposed method.

1. 서 론

정적전압안정도해석의 주 관심사는 부하변화에 따라 부하모선전압의 비정상적인 저하 현상을 파악하는 것으로 궁극적으로 이러한 현상이 지속된다면 계통전압의 붕괴에 이른다. 이러한 전압불안정현상이 야기되는 주요한 원인은 갑작스런 부하의 증가나 계통의 무효전력불균형 등이다. 전압안정도 해석은 계통전압에 대한 신뢰도와 전력공급에 대한 안정성 확보면에서 중요하게 다루어져야 할 문제로 대두되고 있다.

전압안정도 연구는 그동안 전압안정성의 해석이나 전압붕괴 조건에 대한 이론 제시 및 현재 계통운전점에서 전압붕괴점까지의 여유를 예측하기 위한 전압 안정도 지수의 제시 등에 많은 관심이 집중되어왔다. 이 외에도 전압에 의한 부하특성의 변화도 전압불안정 문제에 적지 않은 영향을 미치는 것으로서 인식되고 있다[3,4,5]. 또한 기존의 조류계산에서 슬랙모선에 전적으로 부과되던 계통손실을 각 발전기에 재분배한다면 정적전압안정도 해석의 정도를 향상시킬 수 있다[7].

본 논문에서는 전압변동에 따른 부하특성의 영향을 반영하기 위한 전압의존형 부하모델과 손실재분배를 고려한 새로운 정적전압안정도 해석을 시도하고자 하였다. 새롭게 정식화된 모선전력방정식을 이용하여 부하의 패턴별 전압안정여유특성을 기존의 연구결과와 비교하였고 본 논문의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE14모선 표본계통에 적용하여 그 결과를 보인다.

2. 전압의존 부하모델

2.1 전압의존 부하모델을 이용한 전력조류계산

본 논문에서는 기준안정 운전점에서 부하가 증가함에 따른 전압 붕괴점까지의 변화를 다루기 위하여 다음과 같은 다항식

형태의 부하 모형을 사용한다[6].

$$P_i^L(V) = P_{i0}^L \left( \alpha_{Pc} + \beta_{Pc} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right) + \gamma_{Pc} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right)^2 \right) \quad (1a)$$

$$Q_i^L(V) = Q_{i0}^L \left( \alpha_{Qc} + \beta_{Qc} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right) + \gamma_{Qc} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right)^2 \right) \quad (1b)$$

여기서,

- $P_{i0}^L, Q_{i0}^L$  : 기준상태전압에서 i 모선의 유효 및 무효전력부하
- $\alpha_{Pc}, \alpha_{Qc}$  : 정전력부하 성분계수
- $\beta_{Pc}, \beta_{Qc}$  : 정전류부하 성분계수
- $\gamma_{Pc}, \gamma_{Qc}$  : 정임피던스 부하 성분계수
- $V_{i0}$  : 기준상태 전압

전력 방정식에서 (1)식의 부하모델을 고려하여 자코비안 행렬을 수정하면 다음과 같은 행렬형태로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N' \\ J & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 여기서,  $\Delta P$  :  $(n-1) \times 1$  유효전력 편차 벡터
- $\Delta Q$  :  $m \times 1$  무효전력 편차 벡터
- $\Delta \delta$  :  $(n-1) \times 1$  전압의 위상각 편차 벡터
- $\Delta V$  :  $m \times 1$  전압의 절대치 편차 벡터

$H, J$  는 해당 변수 벡터의 자코비안 소행렬로서 기존 조류계산형태와 일치하며,  $N', L'$  의 대각요소만 다항식형태의 부하모델 추가로 인하여 바뀌게 된다. 다음과 같이 식(3)의 자코비안 역행렬을 이용하면

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N' \\ J & L' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

개선된 미지의 상태변수 벡터는 다음과 같이 수렴한계를 만족할 때까지 반복 계산한다.

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta \delta \quad (4a)$$

$$V_{k+1} = V_k + (\Delta V/V)V \quad (4b)$$

2.3 전압의존 부하모델을 적용한 손실재분배 알고리즘

본 논문에서는 부하특성이 전압안정도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 손실재분배 알고리즘에 전압의존형 부하모델을 적용한다.

모선이 n개인 전력계통에서 1~m까지를 부하모선, (m+1)~(n-1)까지를 발전모선, n번 모선을 슬래모선이라 하였을 때, 기존의 모선전력방정식이 식(1)의 전압의존형 정적부하모델을 대입하고 각 발전기의 손실분담량을 고려한다면 다음과 같이 새로운 형태의 전력방정식을 얻을 수 있다[6].

$$P_i^G - P_i^L(V) - \sum_{j=1}^m V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (5a)$$

$i=1, 2, 3, \dots, m$

$$(P_i^G + P_i^{loss}) - P_i^L(V) - \sum_{j=m+1}^{n-1} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (5b)$$

$i=m+1, m+2, m+3, \dots, n-1$

여기서  $P_i^{loss}$  : 발전기 i의 손실분담량.

$$Q_i^G - Q_i^L(V) - \sum_{j=1}^m V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (5c)$$

$i=1, 2, 3, \dots, m$

#### 가. 손실 재분배 알고리즘

전체 송전손실을 어떻게 각 발전기에 적절히 분배하는가의 문제 또한 정적전압안정도해석에 큰 영향을 미치게 되므로, 실제 시스템의 특성에 고려해야 한다. 시스템의 송전손실은 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하므로 각 발전기의 송전 손실 분담량을 다음과 같이 발전 전류량의 자승에 비례한다고 가정한다.

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{k \in C} |I_k|^2} \times P_{loss} \quad (6)$$

여기서,  $P_{loss}$  : 시스템 전체 송전손실

$I_i$  : i 모선의 순주입 전류

전체 송전손실  $P_{loss}$ 는 선로조류로부터 다음과 같이 표현되며,

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_i G_{ij} (-V_i + V_j \cos \delta_{ij}) \quad (7)$$

(6), (7)식을 (5b)식에 적용하여 다시 정리하면 다음과 같이 발전모선에 대한 새로운 유효전력방정식을 구할 수 있다.

$$P_i = \sum_{j=m+1}^{n-1} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_i^{loss} \quad (8)$$

$$\text{단, } P_i = P_i^G - P_i^L(V) \cong P_i^G - P_i^L$$

여기서 계산편의상 일반적으로 발전모선의 자체부하는 크지 않다고 보아 발전모선의 부하는 전압변동의 영향을 무시하였다. 발전모선의 부하에 대한 전압변동 영향을 고려하더라도 본 연구결과는 크게 영향받지 않을 것이다.

#### 나. Jacobian 수정

발전모선의 전력방정식이 새롭게 구해졌으므로 기존의 자코비안 구성 중 바뀌는 성분은 i번째 발전모선에 대한  $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}$ ,  $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}$ ,  $\frac{\partial P_i}{\partial V_j}$  이 되며, i번째 부하모선에 대하여는  $\frac{\partial P_i}{\partial V_i}$ ,

$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$ 가 된다. 이것을 기존조류계산의 자코비안 성분과 구별하여 각각  $H_{ii}'$ ,  $H_{ij}'$ ,  $N_{ij}'$  와  $N_{ii}'$ ,  $L_{ii}'$ 라 하면 해당되는 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{ii}' = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = H_{ii} - \frac{\partial P_i^{loss}}{\partial \delta_i} \quad (9a)$$

$$H_{ij}' = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = H_{ij} - \frac{\partial P_i^{loss}}{\partial \delta_j} \quad (9b)$$

$$N_{ij}' = -\frac{\partial P_i}{\partial V_j} \times V_j = N_{ij} - \frac{\partial P_i^{loss}}{\partial V_j} V_j \quad (9c)$$

$$N_{ii}' = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} V_i \quad (9d)$$

$$L_{ii}' = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} V_i \quad (9e)$$

제안된 알고리즘을 이용한 손실 재분배 전력조류계산은 발전모선에서의 유효 전력 방정식으로서 식(8)을 이용한다는 점과 자코비안 행렬의 일부 요소값 계산이 달라진다는 점을 제외하면 기존의 전력조류계산 과정과 유사하다. 또한 전압의존 부하 모델이 추가될 경우 식(9d)와 식(9e) 같은 형태의 수정된 자코비안을 이용하여 각 모선의 전압과 위상각이 Newton-Raphson 계산 과정에 의해 개선되며 수렴 후에는 각 발전모선의 손실을 포함한 발전량을 계산하는 과정이 포함된다. 최종적으로 수정되는 자코비안 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_{gen} \\ \Delta \delta_{load} \\ \Delta V / V_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & H' & N' \\ H & H & N' \\ J & J & L' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{gen} \\ \Delta P_{load} \\ \Delta Q_{load} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

#### 제 3 장 사례연구

본 논문의 타당성을 보이기 위해 각 경우별 부하 성분 계수들을 다음과 같이 선정하였으며, 모든 계통은 IEEE 14 모선계통으로 하였다.

표 1 사례별 전압의존형 부하모델의 성분계수  
Table 1 Coefficients of load characteristics by case

사례별		부하성분계수		
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
기존	유효 부하	1.00	0.00	0.00
	무효 부하	1.00	0.00	0.00
사례 1	유효 부하	0.85	0.03	0.12
	무효 부하	0.70	0.05	0.25
사례 2	유효 부하	0.74	0.04	0.22
	무효 부하	0.65	0.08	0.27
사례 3	유효 부하	0.59	0.06	0.35
	무효 부하	0.40	0.06	0.54
사례 4	유효 부하	0.30	0.30	0.40
	무효 부하	0.40	0.10	0.50

여기서, 부하성분계수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  는 각각 정전력부하, 정전류부하, 정임피던스 부하의 전체부하별 성분을 나타낸다.

#### 3.1 기존조류계산의 전압의존 부하모델 적용

그림 1은 전압의존 부하모델을 기존조류계산에 적용하여 얻은 안정여유곡선으로 각 부하모선의 부하량을 10% 씩 증가시키면서 최대전력전송점을 얻은 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯

이 정임피던스 부하량이 증가할수록 더 큰 최대 부하 용량을 얻을 수 있으며 같은 부하에서 전압은 더 안정한 영역에 있게 된다.

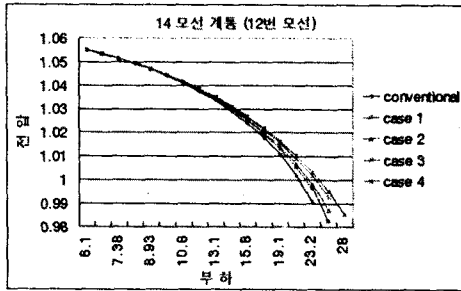


그림 1 사례별 안정여유 비교(P-V<sub>12</sub>)  
Fig. 1 P-V curve at bus 12 for each case

### 3.2 손실재분배 고려한 사례별 연구

그림 2는 전압의존 부하모델과 손실재분배를 동시에 고려한 안정여유곡선으로 총 부하량은 기존방법과 마찬가지로 각 부하량을 10%씩 증가시키면서 최대전력전송점을 얻은 결과이다. 재분배를 적용한 결과 역시 정임피던스부하가 늘어날수록 최대전송전력점이 늘어나고 같은 부하에서 전압이 더 안정한 영역에 존재하는 것을 볼 수 있다.

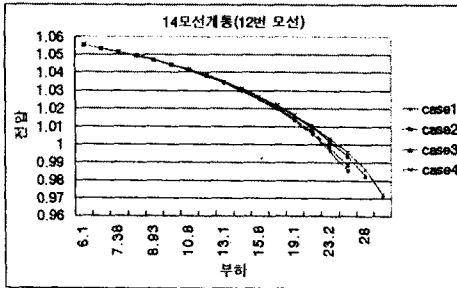


그림 2 사례별 안정여유 비교(P-V<sub>12</sub>)  
Fig. 2 P-V curves at bus 12 for each case

### 3.3 전압의존형 부하모델에 대한 기존방법과 제안방법 비교

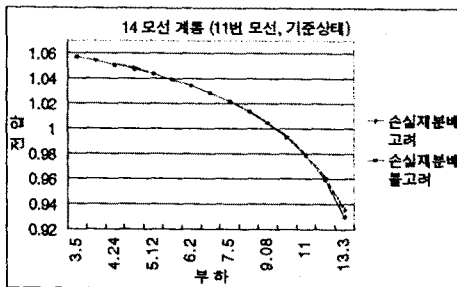


그림 3 방법별 모선전압 비교(기존)  
Fig. 3 Comparison of bus voltage(base case)

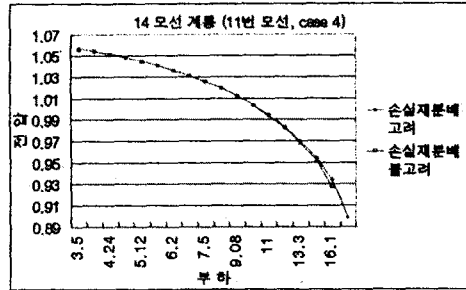


그림 4 방법별 모선전압 비교(사례 4)  
Fig. 4 Comparison of bus voltage(case 4)

그림 3, 4는 전압의존형 부하모델만을 고려한 경우와 손실재분배를 함께 고려한 결과를 비교한 것이다. 최대전력전송점은 손실재분배를 함께 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 증가하였고 전압안정성면에서도 같은 부하에 대해 운전점이 우위에 있는 것을 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서 제시한 알고리즘의 특성과 사례연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 전압의존형 부하모델을 손실재분배와 동시에 고려했을 때 최대전력 전송점은 더 증가하였고 전압안정성면에서도 같은 부하에 대해 운전점이 우위에 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 송전손실의 전부를 분담하던 슬래모선의 역할을 각 발전기에 분담시킴으로서 보다 실제에 가까운 해를 얻을 수 있는 결과라 말할 수 있다.

나. 각 사례별로 같은 부하량에서 보았을 때 전압안정성의 효과는 정임피던스부하가 증가하면 할수록 더 안정한 효과를 가진다. 이유는 정전력부하인 경우 항상 같은 전력을 소비하기 때문에 전압이 낮아지면 그만큼 전류가 증가하기 때문에 손실이 증가하고 결국에는 부하모선의 전압을 더 저하시키는 역할을 하지만, 정임피던스 비중이 큰 부하모선인 경우 소비전력이 부하의 전압에 따라 감소하기 때문에 전압저하에 큰 역할을 하지 않기 때문이라 할 수 있다.

### 5. 참고문헌

- [1] Elgerd, Olf. I, "Electric energy systems theory", McGraw-Hill, 1982, pp 219-271
- [2] Tinney, W. G and Powell, W.L, "Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power Flow Problem", Bonneville Power Administration, 1971, pp 5-16
- [3] Tiranuchit, A and Thomas, R. J, "A Posturing Strategy against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 3, No 1, February 1988, pp 87-93
- [4] Alvarado, F. L and Jung, T. H, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions", EPRI EL-6183, Proceedings : Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage Stability and Security, Jan 1989, Section 5.2
- [5] Taylor, C. W, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill Inc, 1994, pp 17-40
- [6] Kundur, P, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc, 1994, Chapter 14
- [7] 박시우, 신중린, 임한식, "슬래모선의 영향을 고려한 손실재분배 조류계산 알고리즘", 대한전기학회 1995년 하계학술대회 논문집(B), pp. 528-530, 대덕호텔, 1995.7