

부하의 전압특성을 고려한 정량적 전압안정성 지표에 관한 연구

정준모 이봉용* 김정훈**
*홍익대학교 전기제어공학과
**홍익대학교 전자전기제어공학과

A Study on the Quantitative Voltage Stability Index Considering Load Voltage Characteristics

Joon-Mo Jeong* Bong-Yong Lee* Jung-Hoon Kim**

*Dept. of Electrical & Control Eng.

**Dept. of Electrical & Electrical & Control Eng.

Abstract

It is shown that the power flow considering the voltage characteristic of the composite load has some difference comparing with conventional load flow in this paper. When the load flow is used in a study of the static voltage stability, it is necessary to consider the voltage characteristic of load, since the composite load of a typical power system has constant power, constant current, and constant impedance characteristic. The load is modeled to a polynomial form in here, and used in solving the load flow problem. In this way, the effect which the voltage characteristic of the load has on several voltage collapse proximity indicator based on sensitivities is compared with the conventional load flow, or with another load model having a different voltage characteristic. In this paper, the voltage collapse proximity indicator using the sensitivity of real power for transmission loss is also proposed, and compared with other indicators.

1. 서론

부하의 편중화와 특정시기에서의 부하급증, 전력시스템의 대형화에 따른 송전선로 손실증가, 계통의 무효전력 공급원 부족등은 부하측 전압의 하락을 가져오며 발전설비의 전력공급에도 불구하고 더 이상 부하가 증가되지 못하는 최대부하점을 지나 전압저하의 급속한 진전을 보이게 된다. 이러한 현상은 계통의 전압저하와 부하밀집지역에서의 전압붕괴(Voltage Collapse) 현상을 조래하고 결국에는 전체계의 정전이라는 심각한 문제를 일으킬 수도 있다.

이와 같은 전압안정도에 대한 관심의 고조로 계속되는 연구를 통해 대규모 전력시스템에 대한 일반적인 해석과 적절한 전압안정도 지수 개발을 위한 노력이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 조류계산을 이용한 정태적인 전압 안정성 해석을 위해 전압에 대한 다항식 형태의 부하모형을 사용하여 정전력부하 성분, 정전류부하 성분, 정임피던스부하 성분을 포함하는 실제용 부하의 전압에 대한 특성을 고려하고자 한다.

부하 모델을 사용한 조류계산을 통해 전압안정도에 사용되는 몇가지 감도들과 전압붕괴 근접도 지표를 부하가 정전력 특성만을 가진 것으로 보는 상용 조류계산과 비교하여 부하의 서로 다른 전압특성에 대한 감도, 근접도 지수값의 변화를 보았다. 본 연구에서는 전압붕괴 근접도 지표로 계통 손실에 대한 각 부하모선의 유효전력 감도들 사용하여 현 운전점의 안정성을 판단하였고, 사례연구를 통해 전압특성이 다른 부하들에서 이 지표의 효용성을 보였다.

2. 부하의 전압특성에 따른 전압 붕괴 근접도

2.1 부하의 전압특성을 고려한 전력 조류 계산

전체 N 개의 모선으로 이루어진 전력 계통의 경우, 각 모선에서 만족하여야 하는 전력 방정식은 다음과 같다.

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li}(V_i) - P_{Ti}(V, \delta) = 0$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}(V_i) - Q_{Ti}(V, \delta) = 0$$

위 식에서, P_{Gi} , Q_{Gi} 는 각 모선에서의 유효, 무효전력 발전 출력을 나타내고 각 모선에서 계통에 유입되는 유효전력 $P_{Ti}(V, \delta)$, 무효전력 $Q_{Ti}(V, \delta)$ 은

$$P_{Ti}(V, \delta) = \sum_{j=1}^N V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij})$$

$$= \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}]$$

$$Q_{Ti}(V, \delta) = \sum_{j=1}^N V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij})$$

$$= \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}]$$

N: 시스템의 모선수

V_i : i 모선의 전압 크기

δ_i : i 모선의 전압 위상각

y_{ij} : Y_{bus} (어드미턴스행렬)의 모선 i-j 간의 성분

γ_{ij} : 모선 i-j 간의 어드미턴스 y_{ij} 의 위상각

δ_{ij} : 모선 i-j 간의 전압 위상각 차

G_{ij} : 모선 i-j 간의 어드미턴스 유효분

B_{ij} : 모선 i-j 간의 어드미턴스 무효분

$P_{Li}(V_i)$, $Q_{Li}(V_i)$ 는 각 모선에서의 부하 전력을 나타내는데, 부하의 전압 특성을 고려할 경우, 자신의 전압만의 함수로서 정적 운전 전압에 대한 부하와 부하의 전압 특성을 나타내는 $P_{Vi}(V_i)$ 와 $Q_{Vi}(V_i)$ 의 함수로 표현된다.

$$P_{Li}(V_i) = P_{Lo} P_{Vi}(V_i)$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Lo} Q_{Vi}(V_i), \quad i \in SL, SL: \text{부하모선 집합}$$

P_{Lo} 와 Q_{Lo} 는 정적 운전전압에 대한 i 모선의 부하이고, $P_{Vi}(V_i)$ 와 $Q_{Vi}(V_i)$ 는 i 모선 부하의 전압특성을 나타내는 함수로 뒤에 선택되는 부하 모형이 사용된다. 시스템 운전점을 구하려면 각 모선의 V, δ 값을 구하여야 하고, V, δ 를 수정하여 값을 구하기 위해 전력 방정식을 테일러 급수 전개하여 선형화한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

2.2 조류 계산을 위한 부하 모형화

전력 조류 계산에서 부하의 표현은 단지 부하와 전압의 관계로 제한되고, 부하와 주파수의 관계 특성은 계통 주파수가 거의 일정하게 유지되므로 무시된다. 전력 조류 계산을 할 때 이어서 모선에서의 부하는 여러 가지 방법으로 전압의 함수로서 표현될 수 있는데, 가장 일반적인 두 형태는 다음과 같다.

$$\text{(Polynomial)} \quad P = a_p V^2 + b_p V + c_p$$

$$\text{(Exponential)} \quad P = a_p V^{b_p}$$

위 모형에서 $a V^2$ 은 정임피던스 부하이고, $b V$ 는 정전류 부하이며, c 는 정전력 부하이다. 특정 모선의 부하 구성에 의해 계수 a_p , b_p , c_p 는 결정, 지수 함수 형태의 a_p 와 b_p 의 경우도 마찬가지이다. 무효 전력 Q에 대해서도 위와 동일한 형태가 사용될 수 있다.

본 논문에서는 안정 운전점인 현 운전점에서 부하가 증가함에 따른 전압 붕괴점까지의 변화를 다루기 때문에 다항식 형태의 부하 모형을 사용한다.

$$P_{Li}(V_i) = P_{Lo} [a_{pi} + b_{pi}(V_i/V_{10}) + c_{pi}(V_i/V_{10})^2]$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Li}[a_{0i} + b_{0i}(V_i/V_{i0}) + c_{0i}(V_i/V_{i0})^2]$$

$i \in SL, SL: \text{부하모선 집합}$

$P_{Li}: \text{정적 운전 전압에 대한 } i \text{ 모선의 유효전력 부하}$
 $Q_{Li}: \text{정적 운전 전압에 대한 } i \text{ 모선의 무효전력 부하}$
 $a_{Pi}, a_{Qi}: \text{정전력 부하 성분 계수}$
 $b_{Pi}, b_{Qi}: \text{정전류 부하 성분 계수}$
 $c_{Pi}, c_{Qi}: \text{정임피던스 부하 성분 계수}$
 $V_{i0}: \text{정적 운전 전압}$

2.3 전압 안정성 해석

현재 주어진 운전점에서 조류 계산의 수렴성이 나빠지는 전압 붕괴점 근처까지 부하를 증가시켜 가며 각 부하 모선의 전압 안정성에 대해 관찰한다. 실제 시스템에서 전체 부하의 증가시각 모선에서의 부하 증가량, 부하 증가 패턴등의 정확한 예측과 그것을 반영하여 시뮬레이션하기는 매우 어렵기 때문에 임의의 부하 증가 형식을 지정하여 매 단계에서 조류계산을 수렴시킬 수 밖에 없다. 이러한 부하의 증가를 처리하는 방법에는 자코비안 행렬식의 그라디언트 방향으로 처리하거나 시스템의 송전손실 증가 방향으로 처리하는 등 여러 경우가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 부하의 증가를 일정비율 증가로 처리하였다.

$$P_{Li}^{new} = r \cdot P_{Li}^{old}$$

$$Q_{Li}^{new} = k_i \cdot P_{Li}^{old}, \quad i \in SL$$

r : 부하의 증가 비율
 k_i : 부하모선 i 에서의 유효전력에 대한 무효전력의 비
 P_{Li}^{old} : 증가된 유효전력 지정치
 Q_{Li}^{old} : 현재 주어진 정적전압에 대한 유효전력
 P_{Li}^{new} : 증가된 무효전력 지정치
 SL : 부하모선 집합

위와 같은 방법으로 결정되는 유효전력의 총 증분은

$$\Delta P_L^{total} = \sum_{i \in SL} \Delta P_{Li}, \quad SL: \text{부하모선 집합}$$

발전기모선은 부하모선의 총 부하 증분을 담당하도록 증가시키는 데, 각 발전기모선은 현 운전점에서 다음과 같은 발전력 재배분 계수를 가지도록 하였다.

$$P_{Gi}^{total} = \sum_{i \in SG} P_{Gi}$$

위 식에서 구한 시스템의 총 발전력은 슬랙 발전기를 포함한 발전력이고, 부하 증분에 따른 발전력 재배분 계수는 슬랙을 제외한 발전기모선만이 가지도록 하였다.

$$g_i = P_{Gi} / P_{Gi}^{total}, \quad i \in SG,$$

위 식에서 구한 시스템의 총 발전력은 슬랙 발전기를 포함한 발전력이고, 부하 증분에 따른 발전력 재배분 계수는 슬랙을 제외한 발전기모선만이 가지도록 하였다.

$$g_i = P_{Gi} / P_{Gi}^{total}, \quad i \in SG,$$

SG: 슬랙을 제외한 발전기모선 집합

g_i : 발전기모선 i 의 발전력 재배분 계수

발전기의 발전출력 증분은

$$\Delta P_{Gi} = g_i \cdot \Delta P_L^{total}$$

발전기 모선에서는 발전 출력 P_{Gi} 와 Q_{Gi} 의 한계를 두어 Q_{Gi}^{max} 에 도달한 발전기는 더 이상 전압 제어 능력이 없는 것으로 보아 전압을 수정하게 된다.

$$P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}$$

$$Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i \in SG,$$

SG: 슬랙을 제외한 발전기모선 집합

2.4 전압붕괴 근접도 지표

$$\Delta P / \Delta V, \Delta Q / \Delta V$$

부하모선의 전압변화에 대한 유효, 무효전력 변화의 비는 안정 운전점에서 음의 값을 가지고 붕괴점 이하로 전압이 떨어질 영역에서 양의 값을 가지며, 붕괴점에서는 0을 가진다. 따라서, $\Delta P / \Delta V = 0, \Delta Q / \Delta V = 0$ 인 점을 전압붕괴점으로 하여 위의 감도를 이용한 지표를 추적하면 붕괴점까지의 근접도를 알 수 있다.

$$\Delta P_{Loss} / \Delta P, \Delta Q_{Loss} / \Delta P$$

$$\Delta P_{Loss} / \Delta Q, \Delta Q_{Loss} / \Delta Q$$

부하모선의 유효, 무효전력의 변화에 대한 제손실의 감도를 이용하면 역시 붕괴점에 대한 근접도 지표를 만들 수 있다. 하지만, 이 감도들은 붕괴점에 근접함에 따라 지수함수적으로 증가하며, 붕괴점 근처에서 급격한 증가를 보이고 붕괴점에서 거의 무한대의 값을 가지기 때문에 붕괴점 근접 정도의 판단을 위해서

는 특정값을 붕괴점으로 정하는 데 어려움이 있다. 그래서, 본 논문에서는 붕괴점으로 근접함에 따라 값이 감소하여 붕괴점에서 0을 가지는 지표를 사용하게 되고 값의 지수함수적인 감소를 선형화하기 위해 x 축에 \log 함수를 취하였다. 지수가 선형화되므로 송전손실이 0.1일 때의 예상지수를 구할 수 있다. 즉,

$$INDEX_{P_{Loss}=0.1} = \frac{(P_{Loss}^{crit} - 0.1)^{10} \cdot INDEX_{init}}{(P_{Loss}^{crit} - P_{Loss}^{init})^{10}}$$

$init$ 라 함은 base-case일 때를 말한다.

손실이 0.1일 때의 지수를 분모로 운전점에서의 지수를 분자로 하고 10을 곱하면 현재 운전점의 안정도를 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_i / \Delta P_{Loss}, \quad i \in SL, \quad SL: \text{부하모선 집합}$$

실제비용을 고려한 모의실험을 위해서 발전기의 출력제한을 정하지 않을 수 없는 데, 부하와 발전출력의 증가시 발전기의 출력이 제한치에 도달할 때마다 위에서 열거한 여러 감도들은 급격한 변화를 보이고 이제까지의 변화 경향에서 크게 벗어나게 된다. 이런 현상은 붕괴점에 대한 근접도를 판단하는 데 어려움을 주게 된다. 이런 점에서 위의 근접도 지표는 변화 경향이 비교적 일정하고, 거의 선형화가 가능하므로 훌륭한 전압붕괴 근접도 지표가 될 수 있다.

3. 사례연구 및 결과

3.1 7모선 시스템

3개의 발전기(슬랙모선 포함)와 4개의 부하모선으로 이루어진 7모선 시스템을 대상으로 부하의 전압 특성이 다른 case 별로 비교하였다. 사용한 부하모형의 정전력, 정전류, 정임피던스 계수들은 다음과 같다.

표3-1 부하모형의 전압특성 계수

		정전력	정전류	정임피던스
CONVENTIONAL	P	1.00	0.00	0.00
	Q	1.00	0.00	0.00
CASE 1	P	0.85	0.03	0.12
	Q	0.70	0.05	0.25
CASE 2	P	0.74	0.04	0.22
	Q	0.65	0.08	0.27
CASE 3	P	0.59	0.06	0.35
	Q	0.40	0.06	0.54
CASE 4	P	0.30	0.30	0.40
	Q	0.40	0.10	0.50

부하를 정전력 부하로만 간주하는 일반적인 조류계산의 경우와 정전력에 대한 정전류, 정임피던스 부하의 성분비를 늘려가며 조류계산 한 결과를 보면, 정임피던스 부하 성분비를 많이 포함 할수록 전송될 수 있는 최대부하는 늘어나게 된다.

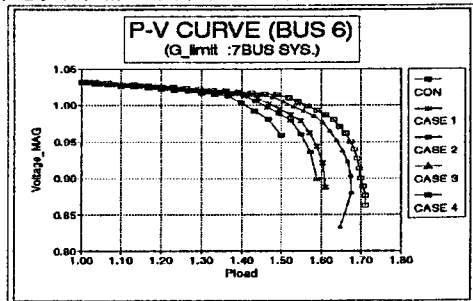


그림3-1 부하의 전압특성에 따른 부하와 부하전압과의 관계

부하 증가시 각 부하모선의 유효전력에 대한 $\Delta P / \Delta V$ 의 변화는 붕괴점에 근접함에 따라 거의 선형적으로 증가하고, 단지, 부하증가시 발전출력의 증가로 발전기가 출력제한에 도달하는 경우 이제까지의 변화 경향에서 크게 벗어난 후 다시 선형적으로 증가하는 형태가 현 운전점에서 붕괴점까지의 여유를 구하고자 할 때 어려움을 준다.

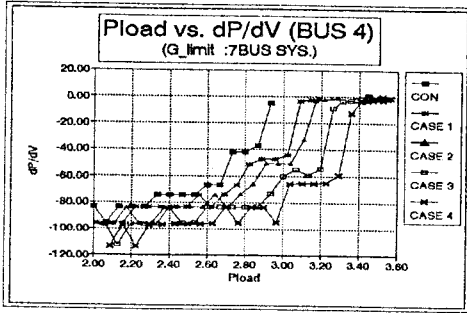


그림3-2 전압특성에 따른 부하전압에 대한 유효전력의 감도

부하전압에 대한 유효전력의 감도는 유효전력의 감도와 유사한 경향을 보이지만 부하의 전압특성에 차이에 따라 무효전력의 크기에서 차이를 보이므로 유효전력의 감도보다는 유용한 것으로 보인다. 이 감도의 경우에도 발전출력 제한으로 인한 경향변화를 보이고 있다.

부하모선의 유효전력 증가에 따른 시스템의 손실변화를 관찰하였다. 초기 운전점에서 전압 붕괴점과 비교적 먼 거리의 운전점까지는 부하의 변화에 대한 손실변화를 감지하기에는 값이 너무 작다는 단점이 있고, 붕괴점 근처의 급격한 증가 역시 근접도 판단에 어려움이 있다. 유효전력의 손실변화가 유효전력에 비해서는 비교적 큰 값을 가지고 있어 좀더 유용함을 보인다.

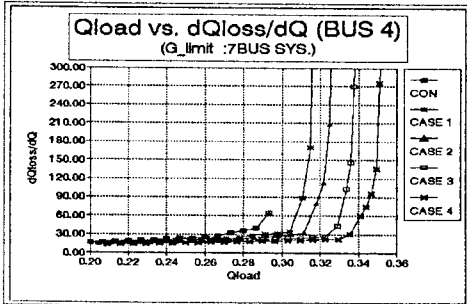


그림3-3 전압특성에 따른 무효전력에 대한 무효전력손실감도

이제까지의 여러 감도들과 비교해 볼 때 다음의 dP/dP_{LOSS} 의 경우, 유효전력손실 측에 기준하면 발전출력의 제한에 걸린 순간에도 거의 경향의 변화를 보이지 않으며, 로그함수를 취함으로써 확실한 선형성을 보여주고 있다. 이러한 변화형태는 붕괴점까지의 근접도 계산에 정확성을 더 해줄 수 있다.

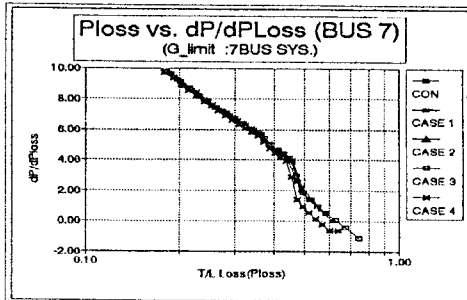


그림3-4 전압특성에 따른 유효전력손실에 대한 유효전력감도

3.2 14모선 시스템

14모선으로 이루어진 계통에 대하여도 앞의 사례연구와 같은 전압특성 계수를 사용하였다.

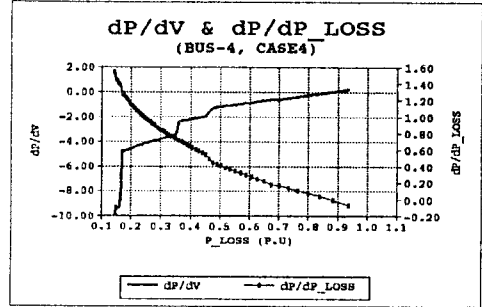


그림 3-5 4번모선의 감도 비교

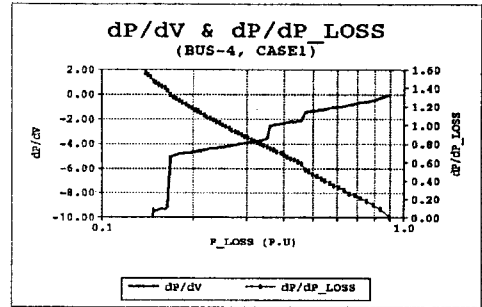


그림3-6 유효전력 손실에 대한 유효전력 감도

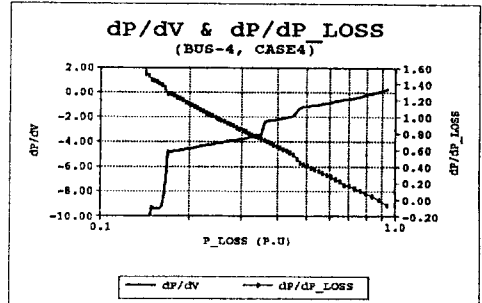


그림3-7 유효전력 손실에 대한 유효전력 감도

일반적인 조류계산에서의 부하치리와는 달리 부하의 전압 특성을 고려한 부하모형을 조류계산에 사용하여 전압 안정성에 관련한 몇가지 감도들과 지표에 미치는 영향 보았고, 부하의 전압 특성과 발전기의 출력제한이 있는 계통의 사례 연구를 통해 제시한 전압 붕괴점 근접도 지표의 효용성을 보였다.

4. 참고문헌

- [1] J. Capentier, R. Girard & E. Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow", Proceeding of 8th PSCC, 1984.
- [2] H. Glavitsch & P. Kessel, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", 1985 PICA Conference Paper, 1985.
- [3] Y. Tamura, K. Iba, S. Iwamoto, "A Method for Finding Multiple Load-Flow Solution for General Power Systems", IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1980.
- [4] M. K. Pal, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.7, No.1, February 1992.
- [5] V. Ajjarapu, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.7, No.1, February 1992.
- [6] Carson W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, Inc., 1994, pp.17-40.
- [7] B. M. Weedy, Electric Power Systems, John Wiley and Sons. pp.196-198, pp.325-329.
- [8] 김태근, 김준현, "전력계통에 있어 부하의 전압특성을 고려한 정적전압붕괴 근접도에 관하여", Vol.40, No.10, OCT. 1991.
- [9] 이상준, "손실감도 분석에 근거한 전력계통의 전압붕괴 근접도 산정에 관한 연구", 석사학위 논문, 충남대학교, 1992.
- [10] 김용환, 김진중, 김원규, 이상준, "무효전력 손실감도를 이용한 정적 전압붕괴 지표", 전기학회논문지, Vol.43, No.8, AUG. 1994.