

부하모델을 고려한 전압 안정도 평가지표개발과
시스템 안정도 연구

위 원 석, 함 정 필, *추 진 부 김 정 훈
홍익대학교 전기제어공학과, *한국전력공사

A Study on Developing Voltage Stability Index and System Stability by Incorporating
Dynamic Load Modeling

Won-Seok, Wee, Jung-Pil, Ham, *Jin-Boo, Choo, Jung-Hoon, Kim
School of EE, Hong-ik University, *KEPRI

Abstract - Accurate load models allow more precise calculations of power system stability. This paper presents new static voltage stability index considering the load models. Also, We apply the load models for the existent voltage stability indices, and evaluate them.

1. 서 론

전력산업은 구조개편이라는 새로운 개념의 도입으로 부산한 움직임을 보이고 있다. 전력시장의 경쟁 도입은 국가기간 산업을 민간화하여 경영효율화를 추구하는 것으로 경쟁력이 좋은 시장이 될 것이다. 그러나 민간화된 회사의 이윤추구로 말미암아 전반적인 계통의 고려가 미흡할 가능성이 높아 전원의 안정적 확보와 전력계통의 안정적 운영에 대한 국가적인 관리가 요구되고 있다. 이를 실패하는 경우에는 전력부족과 대규모 정전사태가 야기될 것이다. 이 중 대규모 정전에 대한 사례는 원인은 정확하지 않지만 이미 몇몇 국가에서 일어난 바가 있다. 이를 예방하기 위하여 전력계통안정도 연구가 필요하다.

전력계통안정도 분야는 시간적으로 응답이 빠른 과도적 안정도와 응답이 늦게 일어나는 안정성 판별이 있는데 이 중 두 번째 해당하는 부분 중의 하나가 전압안정도이다. 이 용어는 전 세계적으로 부하의 대도시편중과 냉방부하의 급증으로 중요한 것이 되었다. 전압의 불안정에 의하여 전압붕괴가 발생하는데 선진각국에서 이미 이로 인한 대규모 정전을 경험하였다. 이러한 전압붕괴의 원인으로서는 전력조류 증가, 무효전력 공급원의 부족 및 장거리를 통한 전력수송, 급작스러운 부하증가나 대용량설비의 탈락 등에 의한 과도적, 정태적 무효전력 불균형을 들 수 있다. 우리 나라도 부하의 대도시편중, 냉방부하의 급증으로 전압의 안정성 문제가 이미 심각한 시점에 와 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 개발한 전압붕괴근접지표가 정전력부하와 같은 단순한 부하모델을 취급하여 최대전력전송점과 전압붕괴점을 동일시하고 있는 것을 명백히 분리하여 다양한 부하 형태에서 어떻게 다른지 분석하고, 부하모델의 연동을 고려하여 전압안정성의 여유를 나타낼 수 있는 새로운 전압안정도지표를 제시하였다.

2. 부하모델과 전압안정도

2.1 부하의 표현

전력은 발전전력에 비해 매우 작아지게 된다. 여기서 발부하는 전압과 주파수의 변화에 따라 영향을 받는다. 전압안정성에서는 주파수의 영향에 대한 변화는 고려하지 않으므로 전압에 따른 특성에만 관심을 갖는다. 정전력부하, 정전류부하, 정어드미턴스부하로 구성된 ZIP 모델이 물리적 개념이 확실하여 가장 많이 사용되어 왔다. 그러나 전력부하기기의 발달로 이것으로는 불충분하

여 지수변화와 계수가 음의 부호를 가질 수 있는 다항식 모델 및 지수함수모델등을 사용하기도 한다.[1~3]

2.2 전압안정성

주어진 동작상태나 외란에 대해서 전력시스템의 부하측 전압이 외란을 거친 후 평형값에 접근하면 전압안정성이 있다고 한다. 전압안정도란 부하의 급증 등과 같은 외란 후에도 부하모선의 전압이 외란 전과 거의 같은 값을 유지하려는 능력을 말한다.[4] P-V곡선을 통해 하나의 부하전력값에 대하여 두 개의 전압값이 존재한다는 사실과 각각의 부하역률에 대하여 부하에 전송되는 최대 유효전력이 존재한다는 것을 알 수 있다. 최대전력전송점에 가까워질수록 발전전력의 대부분이 송전손실로 빠져나가고 실제로 부하까지 도달하는 전력이 모두 송전손실로 소비 되는 점을 전압붕괴점, 즉 최대전력 전송점으로 간주해 왔다. 전압의 붕괴점은 역률에 따라 다르므로 역률이 중요한 요소임을 알 수 있다. 그러나 실제계통에서 발전기는 일정전압원이 아니기 때문에 모든 경우에 적용될 수는 없다. 또한 부하가 전압에 따라 변화하는 경우에도 마찬가지이다.

3. 부하모델과 전압안정성

3.1 부하모델과 전력조류계산

PSS/E를 통한 2기 5모선 계통에 정전력과 정어드미턴스 모델의 두 경우를 고찰한 결과는 다음 표와 같다. 표3.1에서 부하모델에 의한 전력조류계산 결과는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

표 3.1 Base Case에서의 전력조류계산결과

모 선	전압(p.u.)		위상각		유효전력(p.u.)		무효전력(p.u.)	
	CP	CY	CP	CY	CP	CY	CP	CY
100	1.0600	1.0600	0	0	129.6	145.7	-8.2	-23.0
200	1.0500	1.0500	-2.85	-3.23	20.0	17.9	36.5	-9.9
300	1.0227	1.0474	-4.97	-5.95	-45.0	49.4	15.0	-16.5
400	1.0220	1.0455	-5.30	-6.28	-40.0	43.7	5.0	-5.5
500	1.0175	1.0402	-6.14	7.15	-60.0	64.9	10.0	-10.8

(CP:정전력모델, CY:정어드미턴스모델)

3.2 최대전력전송점과 전압붕괴점

3.2.1 적용 시스템

부하모델이 전압안정도에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 기존 ZIP 모델에 대한 검토를 수행하여 본다. 그림 3.1의 2모선 계통에서 고려해 보는데 일반적인 P-V곡선의 식을 구할 때와 마찬가지로 역률이 일정하고, 전송선로의 임피던스가 결정되어 있을 때 부하와

전압의 관계식은 다음과 같다. [5]

$$|V_2|^4 + (2\beta P_D X - |V_1|^2) |V_2|^2 + (1 + \beta^2) P_D^2 X^2 = 0 \quad (3.1)$$

이 식에 $|V_1|$ 은 1.0, $X = 0.5$ ($\beta = \tan \theta = 0$)를 대입하여 V_2 와 P_2 에 관한 그래프를 그리면 그림 3.2와 같다. 이 그림은 기존의 P-V곡선이다. 위 식에

$$P_D(|V_2|, f) = K_P + K_I |V_2| + K_Y |V_2|^2 \quad (3.2)$$

를 대입하여 $|V_2|$ 를 구하면, ZIP모델을 고려한 시스템 해석이 가능하다. K_P, K_I, K_Y 등의 계수값을 조정하면서, 각 경우의 전압붕괴점을 구해보기로 한다.

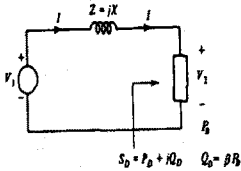


그림 3.1 2모선 계통

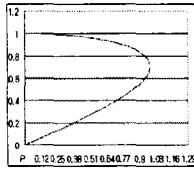


그림 3.2 2모선계통의 P-V곡선

3.2.2 부하모델을 고려한 전압안정도

정전력부하인 경우 $P_D = K_P$ 이므로 일반적인 P-V곡선과 동일해지고 전압은 다음과 같다.

$$|V_2| = \frac{1 - \beta K_P \pm [1 - K_P(K_P + 2\beta)]^{1/2}}{2} \quad (3.1)$$

이 경우, 최대전력전송점과 전압붕괴점은 일치한다. 정전류 부하($P_D = K_Y V$)인 경우는 그림 3.4와 같다. 운전점이 하나로 그때 전압은 식(3.2)이고 최대전력전송점과 전압붕괴점은 다르다.

$$|V_2| = -0.5\beta K_Y + \sqrt{1^2 - 0.25K_Y^2} \quad (3.2)$$

정어드미턴스($P_D = K_Y V^2$)부하는 그림 3.5에서 보는 바와 같이 전압붕괴점은 없고 운전점 전압은

$$|V_2| = \sqrt{\frac{1}{0.25(\beta^2 + 1)K_Y^2 + \beta K_Y + 1}} \quad (3.3)$$

으로 표현된다. 그림 3.5와 같은 일반적인 ZIP 모델의 경우 $|V_2|$ 는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$(0.25(1 + \beta^2)K_Y^2 + 1)V^4 + (0.5(1 + \beta^2)K_Y K_I)V^3 + (0.25(1 + \beta^2)(2K_Y K_P + K_I^2) + \beta K_Y - 1)V^2 \quad (3.4)$$

$$+ (0.5(1 + \beta^2)K_Y K_P + \beta K_I)V + 0.25(1 + \beta^2) = 0$$

위의 수식의 값을 전압의 변화에 따라 나타낸 그림은 3.6과 같고 x축과 만나는 점이 운전점이 된다.

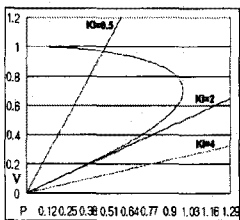


그림 3.3 P-V곡선과 정전류부하곡선

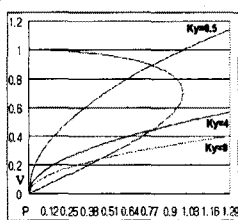


그림 3.4 P-V곡선과 정어드미턴스부하곡선

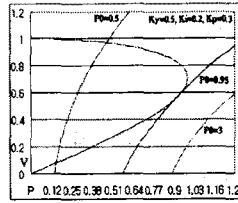


그림 3.5 ZIP모델곡선과 P-V곡선

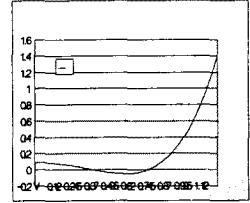


그림 3.6 전압에 따른 함수값

4. 새로운 전압안정성 지수

4.1 기존 전압안정성 지수와 부하모델

기존의 전압안정성 지수에 부하모델의 도입여부를 검토해 보면 다음과 같다.

4.1.1 Capentier의 전압안정성 지수 [6]

$$z = \frac{dQ}{dD} \quad (4.1)$$

무효전력부하의 변화에 대한 무효전력원의 변화로서 임계점에서 z 값은 ∞ 이다. 전압붕괴점에 근접할수록 부하전압은 감소하며 전원으로 부터 공급되는 전력은 모두 손실로 소모됨을 의미하는 지표로서, 무효전력부하가 0일 때 1, 무효전력부하가 임계값에 다다랐을 때 ∞ 로 발산함을 알 수 있다. 이 지수는 부하를 임피던스로 표시하고 있어서, 부하모델을 다양하게 도입할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

4.1.2 Glavitsch의 전압안정성 지수 [7]

$$L = \max_{j \in \alpha_L} \left\{ 1 - \frac{\sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} V_i}{V_j} \right\} < 1 \quad (4.2)$$

단, α_L : 부하모선 집합, α_G : 발전기모선 집합

$$F_{ji}: F = -Y_{LL}^{-1} Y_{LG}$$

지수 L 은 전력조류계산을 통하여 얻어지므로, 계산의 수렴이 어려운 전압붕괴점 부근에서 수렴이 어려우며, 전력조류계산시 모선의 전압에 관계없이 부하의 크기를 임의로 증가시키고 있어 부하특성을 전혀 반영할 수가 없다는 문제점을 가지고 있다.

4.1.4 손실감도에 의한 전압안정성 지수 [8]

$$\lambda_P = \frac{dP_{LOSS}}{dP_G}, \lambda_Q = \frac{dQ_{LOSS}}{dQ_G} \quad (4.3)$$

전압안정성 지수 λ_P, λ_Q 는 유·무효 발전량에 대한 손실의 감도를 뜻하게 되는데, 이 지수에서 유·무효전력은 일정값(상수)으로 주어져 있다. 만약 이 값을 전압의 함수로 표시하게 되면 최적 조건이 달라지게 되어 복잡한 문제가 된다. 따라서 이 지수는 부하모델을 고려하는 경우에 수식의 변형이 크게 요구된다.

4.1.3 상태식별법에 의한 전압안정성 지수 [9]

송전손실 상태식별법은 부하모선의 부하값이 초기치 산정시에 전력조류계산에 반영될 뿐, 수식전개에는 전혀 영향을 주지 않는다. 부하의 조건에 상관없이 계통전압으로부터 부하를 역산하기 때문이다. 알고리즘을 수행하는 데는 전혀 지장이 없으나 계통전압 값으로 부하를 계산하면 부하모델식에 대입하여 얻은 값과 일치할 지는 의문이다.

4.2 새로운 전압안정성 지표

전압붕괴점은 P-V 곡선과 부하모델곡선이 한 점에서 만나는 경우이므로 이 접점에서는 기울기가 같아질 것이다. 새로운 전압안정성지수로 다음과 같이 L_{TEST} 를 고려하여 본다.

$$L_{TEST} = \left(\frac{dP}{dV} \right)^{nose} - \left(\frac{dP}{dV} \right)^{Load} \quad (4.1)$$

L_{TEST} 는 전압붕괴점에서 0이 되며 L값을 전압붕괴점에서 멀리 떨어져 있으면 기울기 차이가 크게 나타나 L값의 절대값이 큰 값을 갖게 된다. 이 지수를 그림 3.1의 2모선 계통에 적용하면

$$P = 4 V_2 - 4 V_2^4 \quad (4.2)$$

이를 V에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1-2V^2}{\sqrt{1-V^2}} = \left(\frac{dP}{dV} \right)^{nose} \quad (4.3)$$

식(4.1) 우변의 부하에 대한 전압에 관한 미분식은 정전력, 정어드미턴스, 정전류, ZIP 부하의 특성인 식(3.2)로 구해진다. 이렇게 그린 L_{TEST} 는 선형이 아니므로 안정성 여유판별이 쉽지 않다. 따라서 안정성 여유판별을 용이하게 하기 위하여 두 개의 새로운 안정도 지수를 고려하여 본다.

$$L_1 = \sqrt{\exp\left\{\left(\frac{dP}{dV}\right)^{nose} - \left(\frac{dP}{dV}\right)^{load}\right\}} - 1 \quad (4.4)$$

$$L_2 = \exp\left\{\left(\frac{dP}{dV}\right)^{nose} - \left(\frac{dP}{dV}\right)^{load}\right\} - 1 \quad (4.5)$$

이 두 전압안정성 지표의 그래프는 다음과 같다. 아래의 그래프에서, A는 정전력 부하를 고려한 경우이고 B는 정어드미턴스 부하, 정전력 부하, 정전류 부하를 고려한 경우, C는 정전류 부하를 고려한 경우이며, D는 정어드미턴스 부하와 전력 부하를 고려한 경우의 전압에 따른 지표의 변화를 나타내고 있다. 아래의 그림과 같이 두 지표가 거의 선형적인 특성을 보이고 있는데, 그림 4.2가 지수값이 0 이상인 부분에서 선형성이 돋보이고 있다.

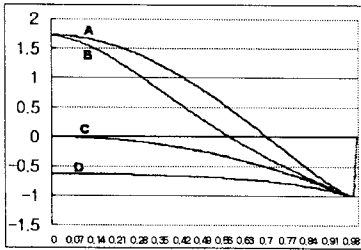


그림 4.1 전압안정도지수 L_1 의 전압에 따른 변화

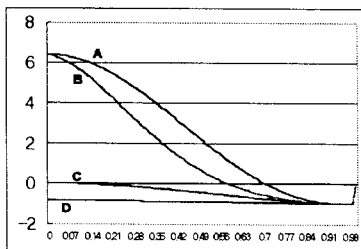


그림 4.2 전압안정도지수 L_2 의 전압에 따른 변화

본 연구는 부하모델을 전압안정도에 접목시키는 데 의의를 두고 있다. 부하모델을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 부하모델을 적용한 결과 기존의 최대전력전송점을 전압붕괴점으로 취급하였는데 이 두 점은 다르다는 것을 밝혔다. 특히 정어드미턴스 부하인 경우에는 전압붕괴점이 존재하지 않았다.
2. 기존의 전압안정성 지수에 부하모델을 접목시키려고 시도하여 보았으나 알고리즘의 특성상 부하를 상수로 모두 취급하여 추가 연구 없이는 불가능하였다. 다만 송전손실 상태식별법은 그대로 가능하나 부하모델을 연동시킬 방법은 없었다.
3. 부하모델을 반영한 새로운 전압안정성 지수를 제안하였다. 이 지수는 성질이 거의 선형이므로 전압붕괴지점을 쉽게 예측할 수 있다. 즉, 안정성 여유를 쉽게 판단할 수 있다.
4. 많은 부하모선은 부하특성이 서로 다르다. 즉, 정전력, 정전류 및 정어드미턴스 부하의 비율이 서로 다르기 때문에 과거의 지수가 P-V 곡선에서 도출된 정보만으로 안정도 여유를 판별하였으나 본 연구 결과, 부하의 특성을 포착할 수 있어 정확하다.
5. 실제 계통에 적용시 부하모선별 안정성 여유를 구할 수 있어 무효전력보상의 우선 순위 및 필요량을 결정할 수 있는 정보로 사용할 수 있다.

※본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 수행되었음

[참고 문헌]

- [1] 한국전력공사, 전력계통 안정도 해석을 위한 적정부하 모델에 관한 연구, 1990.
- [2] J. H. Kim, J. P. Lee, J. Y. Lim, K. D. Kim, S. W. Park, "A Load Modeling Using ANN for Power System Analysis" IEEE Region 10 Conference, Vol.2 pp.1475~1478, September 1999.
- [3] 김정훈, 임재윤, '부하모델을 위한 합리적인 부하구성비 추정 방법에 관한 연구', 대한전기학회지, pp. 21-31, 1993, 12.
- [4] Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill International Ed.(EPRI), pp 17-66
- [5] Arthur R. Bergen, "Power system Analysis", Prentice-Hall, pp 44-45, 1986
- [6] J.Carpentier, R.Girard, and E.Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow," Proceedings of the 8th Power System Computing Conference, pp.671-678
- [7] H.Glavitsch & P.Kessel, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", 1985 PICA Conference Paper, 1985.
- [8] 김용배, 김진중, 추진부, 김원경, 이상중, "손실 감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표", 대한전기학회 1992 하계학술대회 논문집, 1992
- [9] 전동훈, 김정훈, 심건보, 이봉용, "송전손실 상태식별법에 의한 정태 전압안정성 해석", 대한전기학회 1992년도 하계학술대회 논문집, 1992