

부하모델에 따른 한전계통의 정적인 전압불안정점의 변화에 관한 연구

송화창\* 송태용 정문구 이석창 최건수 최선규 조윤성 이병준 권세혁  
고려대학교 전기공학과

A Study on Change of Static Voltage Instability Point Related to Load Model in the KEPCO System

H. Song\* T.-Y. Song M.-G. Jeong S.-C. Lee G.-S. Choi S.-G. Choi B. Lee S.-H. Kwon  
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - Today's power systems operate near their stability limit and numerous incidents closely related to voltage instability phenomena have been reported. In addition, a world-wide fashion towards restructuring in electricity industry can worsen the trend of voltage instability. In this environment, finding exact voltage instability points of practical power systems is a main concern of power system engineers. This paper reports change of static voltage instability point with respect to various load model in the KEPCO system.

1. 서 론

최근 전력계통은 중부하 운전, 부하의 편재화 그리고 전력송전의 장거리화에 의하여 송전계통에서의 무효전력 손실이 증가하고 있으며, 이에 따라 많은 전압 불안정 현상을 경험하고 있다. 또한 전력산업 구조개편 후 전압불안정의 경향은 지속되거나 오히려 심화될 것으로 예상되고 있다. 이러한 환경에서, 실제 계통의 정적인 전압불안정점을 구하는 것은 전압안정도 해석에 있어 아주 중요하다. 본 논문에서는 연속조류계산에 전압 의존 부하모델을 적용하고 이를 이용하여 한전계통에 대한 정적인 전압불안정점을 구하여 본다.

전압안정도 해석에서 정적인 전압불안정점을 구하는 것은 일반적으로 직접법(direct method)과 연속법(continuation method)의 두 가지 방법이 이용되고 있다. 직접법은 정적인 전압불안정점을 계산하는 데 있어 속도가 빠른 반면, 초기근사치가 비교적 불안정점 가까이 존재하여야 한다는 단점이 있다. 연속법은 부하 증가에 따른 조류해의 경로를 추적하며 불안정점을 계산하므로 계산속도는 빠르지 못하나 많은 감도정보를 구할 수 있다는 장점이 있다.

다양한 기기들을 포함하고 있는 전력계통의 부하모델을 구하는 것은 상당히 어렵다. 그러나 정적인 전압안정도 해석에서 이용되는 정적 부하모델은 일반적으로 지수함수형 모델(Exponential model)과 다항식형 모델(Polynomial model)이며 이들은 모선 전압크기에 대하여 의존적인 부하성분만을 고려하고 있다[1]. 한편, 실제 계통의 부하모델을 조사하는 데 이용되는 LOADSYN(2) (load model synthesis)은 전압의존 부하 뿐 아니라 과도 안정도 해석에 필요한 주파수의존 부하 성분 에 대한 정보 또한 제공하고 있다. 그리고 참고문헌 [3]에서는 조류계산과 동적 시뮬레이션에 대한 IEEE Standard 부하모델을 제시하고 있다.

본 논문에서는 먼저 문헌에서 소개되고 있는 부하모델에 대하여 알아보고 개발된 연속조류계산 시스템에 부하모델을 적용하여 본다. 이를 한전계통 771모선 계통에 적용하여 부하모델에 따른 정적인 전압불안정점의 변화에 대하여 살펴보고자 한다. 참고로 본 연구는 고려대학교 전기공학과 2000년도 1학기 전력계통 전압안정

도 수업의 Term Project로 수행되었다.

2. 정적 부하모델

앞에서 언급한 바와 같이, 정적인 전압안정도 해석에서 이용되는 부하모델은 부하의 전압크기에 대한 의존 성분만을 고려한다. 따라서 다음 식과 같이 유효전력 부하와 무효전력 부하는 전압크기에 대한 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_L &= P_L(\mu, V) \\ Q_L &= Q_L(\mu, V) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $\mu$ 는 부하증가를 나타내는 파라미터이다.

2.1 지수함수형 모델

먼저 지수함수형 모델에 대하여 알아본다. 지수함수형 모델은 다른 모델보다 정적인 계통해석에 많이 이용되고 있으며 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_L &= \mu P_{L0} \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \\ Q_L &= \mu Q_{L0} \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $V_0$ 는 기준 전압에 해당하며  $P_{L0}$ ,  $Q_{L0}$ 는 모선 전압이  $V_0$ 일 경우의 유효전력부하, 무효전력부하에 해당한다. 그리고  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 부하의 전압에 대한 특성을 나타내는 파라미터로 지수에 해당한다. 정전력 부하, 정전류 부하, 정임피던스 부하에 대한 부하 지수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{정전력 부하} &: \alpha = \beta = 0 \\ \text{정전류 부하} &: \alpha = \beta = 1 \\ \text{정임피던스 부하} &: \alpha = \beta = 2 \end{aligned}$$

LOADSYN에서는 이 지수함수형 모델을 적용하고 있으며 전압 의존 부하에 대한 부하지수  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 정보를 제공한다.

2.2 다항식형 모델

다항식형 모델은 위에서 설명하고 있는 정전력 부하, 정전류 부하 그리고 정임피던스 부하의 조합으로 실제 부하는 표현하며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_L &= \mu P_{L0} [a_P \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + b_P \left( \frac{V}{V_0} \right) + c_P] \\ Q_L &= \mu Q_{L0} [a_Q \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + b_Q \left( \frac{V}{V_0} \right) + c_Q] \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $a_P$ ,  $b_P$ ,  $c_P$ 는 유효전력부하에 대한 정전력, 정전류, 정임피던스 성분의 비율을 나타내는 상수이며  $a_Q$ ,  $b_Q$ ,  $c_Q$ 는 무효전력부하에 대한 정전력, 정전류, 정임피던스 성분의 비율을 나타내는 상수이다. 이 상수들의 특징은  $a_P + b_P + c_P = a_Q + b_Q + c_Q = 1$ 이 되어야 하며  $b_P$ ,  $b_Q$ 는 음의 값을 찾을 수 있다. 그러나 다항식형 모델은 낮은 전압에서 실제적이지 않다는 단점이 있다[1].

### 3. 연속조류계산에 대한 지수함수형 모델의 적용

본 논문에서는 잘 알려진 지수함수형 모델을 연속조류계산에 적용하여 본다. 조류계산 또는 연속조류계산에는 부하를 모선 전압크기에 독립적인 부하, 즉 정전력 부하라고 가정하고 있다. 그러나 실제 계통에서의 부하는 주거용 부하, 상업용 부하, 산업용 부하등 여러 가지로 존재한다. 따라서 실제계통에 대한 정적인 전압안정도 해석을 수행하는 데 있어서 부하모델의 적용은 필수적이라 하겠다.

연속조류계산을 위한 부하증가 파라미터  $\lambda$ 를 포함하는  $i$ 번째 모선에서의 전력조류방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Ti}(\delta, V) + P_{Li}(\lambda) - P_{Gi}(\lambda) &= 0 \\ Q_{Ti}(\delta, V) + Q_{Li}(\lambda) - Q_{Gi} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위의 방정식은 정전력 부하를 가정하고 있다. 위에서 아래첨자 T, L, G는 각각 주입, 부하, 발전을 나타낸다. 식 (4)에서  $\lambda$ 를 포함하는  $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$ ,  $P_{Gi}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{Li}(\lambda) &= P_{Li0}(1 + k_{Li}\lambda) \\ Q_{Li}(\lambda) &= Q_{Li0}(1 + k_{Li}\lambda) \\ P_{Gi}(\lambda) &= P_{Gi0}(1 + k_{Gi}\lambda) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$ 는  $\lambda$ 가 증가했을 때 초기 부하에 대하여  $k_{Li}$ 의 비율로 일정영역을 가지고 증가하게 된다.

식 (5)에 식 (2)로 표현되는 지수함수형 부하모델을 적용하여 보자. 적용은 비교적 간단하며 다음 식으로 부하모델을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Li}(\lambda) &= P_{Li0} \left(\frac{V}{V_0}\right)^\alpha (1 + k_{Li}\lambda) \\ Q_{Li}(\lambda) &= Q_{Li0} \left(\frac{V}{V_0}\right)^\beta (1 + k_{Li}\lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

위 식을 살펴보면 식 (1)에서의 부하증가를 나타내는 파라미터  $\mu$ 는 다음과 같이 표현되고 있음을 알 수 있다.

$$\mu = 1 + k_{Li}\lambda$$

식 (6)을 전력조류방정식 (4)에 대입하므로써 지수함수형 모델을 적용한 조류방정식이 되며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{Ti}(\delta, V) + P_{Li}(V, \lambda) - P_{Gi}(\lambda) &= 0 \\ Q_{Ti}(\delta, V) + Q_{Li}(V, \lambda) - Q_{Gi} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

위 식을 연속 알고리즘을 적용하여  $\lambda$  증가에 대한 조류해의 경로를 계산할 수 있다. 연속조류계산 적용에 있어 주의할 점은 연속조류계산에서 이용되는 확대 자코비안을 구하는 데에 있다. 식 (4)와 같이 정전력 부하만을 고려한 경우에서는 확대 자코비안의 부하에 대한 성분이 고려될 필요가 없었으나, 지수함수형 모델이 고려된 경우는 전압 의존부하에 대한 성분이 고려가 되어야 한다.

### 4. 한전계통에 대한 적용

지수함수형 부하모델이 적용된 연속조류계산 시스템을 개발하여 한전 771모선계통에 적용하여 보았다. 실제적으로는 지수함수형 부하모델의 부하지수가 모선별로 또는 지역별로 산정되어야 하나, 본 연구에서는 모든 부하가 일정한 부하지수를 갖는다고 가정하고 계통적용 결과를 구하였다. 실제 계통의 지수함수형 모델의 부하지수를 정전력 부하( $\alpha = \beta = 0.0$ )부터 정입피턴스 부하( $\alpha = \beta = 2.0$ )까지  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 0.2씩 증가시켜가며 계통의 정적인 전압불안정점을 구하였다.

먼저 대표적인 정전력, 정전류, 정입피턴스 부하에서의 정적인 전압불안정점을 구해본다.

#### 4.1 정전력 부하( $\alpha = \beta = 0.0$ )

정전력 부하의 경우 P-V 곡선과  $\lambda$ -V 곡선을 그림 1과 그림 2에서 보이고 있다. 조류계산 및 연속조류계산에 일반적으로 이용되는 정전력 부하모델의 경우, 조류계산 수행 시 P-V 곡선의 꼭지점에서 전력조류 자코비안이 특이성을 갖게 되어 이 부근에서의 조류해를 구할 수 없다. 그리고  $\lambda$ -V곡선의 꼭지점과 P-V곡선의 꼭지점(최대 전력수송점)은 일치하게 되며, 부하 파라미터  $\lambda$ 가 약간 증가하면 조류해가 존재하지 않게 된다. 따라서 이 점이 정적인 전압불안정점이 된다.

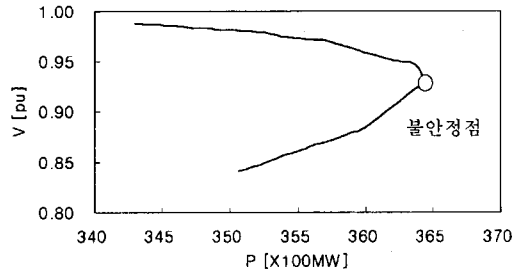


그림 3. 정전력 부하의 경우 P-V 곡선

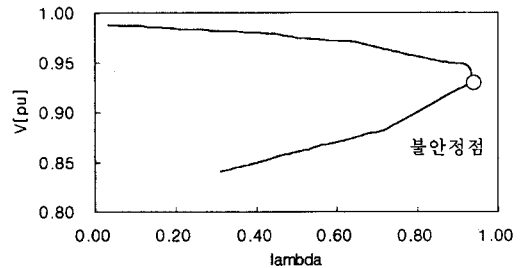


그림 6. 정전력 부하의 경우  $\lambda$ -V 곡선

#### 4.2 정전류 부하( $\alpha = \beta = 1.0$ )

정전류 부하의 경우 P-V 곡선과  $\lambda$ -V 곡선을 그림 3과 그림 4에서 보이고 있다. 이 경우 P-V 곡선의 꼭지점(최대 전력수송점)과  $\lambda$ -V 곡선의 꼭지점은 일치하지 않게 되다.

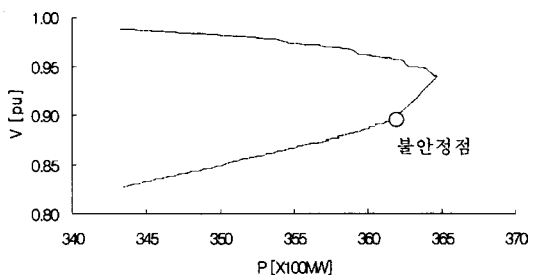


그림 3. 정전류 부하의 경우 P-V 곡선

또한 그림 3에서 보여지는 바와 같이, 정전류 부하의 경우에서의 정적인 전압불안정점은 정전력 부하의 경우에서와는 달리 최대 전력수송점이 아닌 P-V 곡선의 아래 부분에 존재하게 된다.

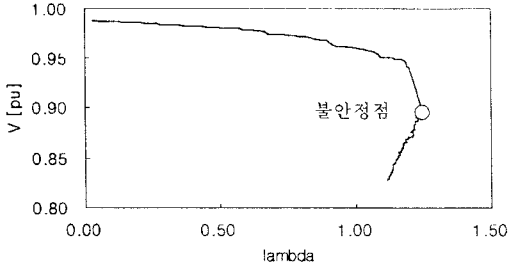


그림 4. 정전류 부하의 경우  $\lambda-V$  곡선

### 4.3 정임피던스 부하 ( $\alpha = \beta = 2.0$ )

정임피던스 부하의 경우 P-V 곡선과  $\lambda-V$  곡선을 그림 5과 그림 6에서 보이고 있다. 이 경우  $\lambda-V$  곡선을 살펴보면  $\lambda$ 가 어느 값을 갖던지, 조류해는 존재하게 된다. 따라서 정적인 전압불안정점은 존재하지 않게 된다.

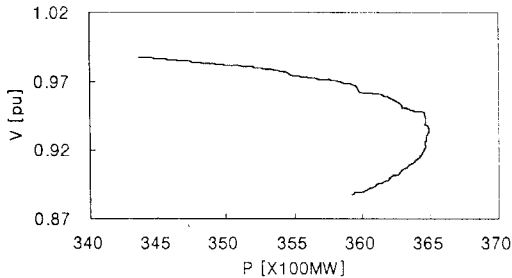


그림 5. 정임피던스 부하의 경우 P-V 곡선

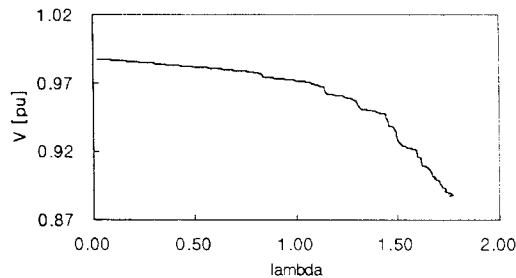


그림 6. 정임피던스 부하의 경우  $\lambda-V$  곡선

### 4.4 결과

본 연구에서는  $\alpha, \beta$ 를 각각 0.2씩 증가시켜 가며 정적인 전압불안정점을 부하모델을 포함하는 연속조류계산 시스템을 적용하여 계산하였다. 그림 7에서는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값이 같은 경우에 대한  $\lambda-V$  곡선을 보이고 있다. 이 그림을 살펴보면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- $\alpha = \beta = 1.0$ 을 기점으로 정전류부하에 가까운 경우에는 정적인 전압불안정점이 존재하나, 그 밖의 경우에는 정적인 불안정점이 존재하지 않는다.
  - 정적인 전압불안정점이 존재하는 경우, 부하지수가 증가할수록 불안정점에서의 전압은 감소하는 경향을 보이고 있다.
- 위의 결과는 참고문헌 [1]에서 제시하는 2모선 계통의

예제에서의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

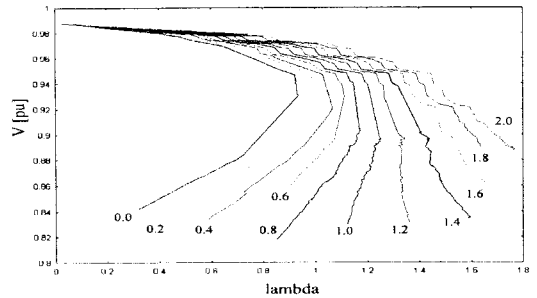


그림 7. 각  $\alpha, \beta$ 에 대한  $\lambda-V$  곡선

현재 이용되고 있는 다항식형 모델의 한전계통에 대한 a, b, c 계수를 다음 표에서 보이고 있다.

표 1. 한전계통에 대한 다항식형 모델의 계수

	a	b	c
P	0.52	0.13	0.35
Q	0.36	0.08	0.56

다항식형 모델을 본 연구에서 이용하고 있는 지수함수형 모델로 변환하기 위하여 다음 식을 이용한다.

$$\alpha = \ln(a_p + b_p x + c_p x^2) / \ln(x) \quad (8)$$

$$\beta = \ln(a_q + b_q x + c_q x^2) / \ln(x)$$

위 식에서  $x = V/V_0$ 에 해당하므로 부하지수  $\alpha, \beta$ 는 어느 한 값을 갖지 않지만 근사화할 수 있다.  $x$ 를 0.9에서 1.0까지 0.01씩 증가하여 계산한 결과  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 1.2$ 의 값을 갖게 되었다. 이 경우에서 최대 전력수송점에서의 전체부하  $P_{max} = 36532$  [MW], 정적인 전압불안정점에서의 전체부하  $P_c = 36372$  [MW]로 계산되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 지수함수형 부하모델을 연속조류계산에 적용하여 한전계통에 대하여 각각의 부하지수에서의 P-V 곡선,  $\lambda-V$  곡선을 작성하고 그 특성을 알아보았다. 이는 2모선 계통의 간단한 예제에서와 비슷한 경향을 갖는 결과를 보이고 있다. 실제계에 대한 비선형 부하모델에 대한 정확한 전압불안정점의 영향을 평가하기 위해서는 먼저 LOADSYS 등을 이용한 정확한 부하모델 지수 측정이 선행되어야 할 것이다.

본 연구는 고려대학교 전기공학과 2000년도 1학기 전력계통 전압안정도 수업의 Term Project로 수행되어 본 논문에서는 기본적인 결과만을 보이고 있지 않으나, 학회 발표에는 감도해석등 더 많은 결과를 보일 수 있을 것이다.

### (참고 문헌)

- [1] T. V. Cutsem, C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] W. W. Price, K. A. Wirgau, A. Murdoch, J. V. Mitsche, E. Vaahedi, M. A. El-Kady, "Load Modelling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", IEEE Trans. PWRs, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988.
- [3] IEEE Task Force, "Standard load models for power Flow and dynamic performance simulation", IEEE Trans. PWRs, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.