

## An Efficient Unified Method to Compute Voltage Collapse Point

南海鯤\* · 金東俊\*\* · 宋忠機\*\*\* · 文英煥\*\* · 金泰均\*\*\* · 李孝祥\*\*\*  
 (H. K. Nam · D. J. Kim · C. G. Song · Y. H. Moon · T. K. Kim · H. S. Lee)

**Abstract** - The saddle node bifurcation (SNB) and the distance to voltage instability are valuable information in power system planning and operation. This paper presents a new efficient, robust and unified strategy to compute the SNB by the combined use of the continuation power flow (CPF), Point of Collapse (PoC) method, and the method of a pair of multiple load flow solutions (PMLFS) with Lagrange interpolation utilizing only their advantages: the approximate nose curves and critical loading are determined fast by Lagrange-interpolating two stable and two unstable solutions obtained by using the robust CPF and PMLFS; the exact SNB is computed by the quadratically converging PoC method. The proposed method has been tested on Klos-Kerner 11-bus, New England 30-bus, IEEE 118-bus and KEPCO 791-bus systems. The method is found to be so efficient that computation time for determining the SNB of the KEPCO 791-bus system is 17.82 sec by a notebook PC with 300 MHz Pentium processor.

**Key words** : voltage collapse, nose curve, Point of Collapse method, continuation power flow, a pair of multiple load flow solutions, Lagrange interpolation

### 1. 서 론

대용량 송전선로의 부하가 증가되고 송전선로의 조류 패턴이 설계시의 의도와 다르게 운전됨에 따라, 전압에 관련된 문제들이 계통의 안전운전을 저해할 수 있는 잠재적 요소로서 중요한 관심사가 되었다. 전력회사들은 경제적 또는 환경적 제약으로 대용량 송전선로를 보강하는 것이 계속 어려울 것으로 예상되어, 전압문제의 획기적 개선은 가까운 시일에 어려울 전망이다. 따라서, 대용량 송전계통은 점점 더, 특히 첩두 부하시 중요 기간선로가 개방되는 경우에, 한계용량에 가깝게 운전될 전망이다. 이러한 상황에서 부하, 발전, 송전단 전압을 포함한 계통운전 조건을 자동으로 조정할 수 있는 정교한 전압제어 해석 알고리즘을 필요로 한다 [1].

현재의 운전점으로부터 전압붕괴 임계점 (saddle node bifurcation, SNB)까지의 거리는 전력계통의 계획과 운전에 중요한 정보이다. SNB는 연속 조류계산법 (continuation power flow, CPF) [2], 한 쌍의 다중조류계산 해 (a pair of multiple load flow solutions, PMLFS)와 [4,5] Lagrange 보간법 [4], 직접법 또는 Point of Collapse (PoC)법 [6] 등 다양한 방법에 의하여 결정할 수 있다.

PMLFS와 Lagrange 보간을 사용한 SNB 결정 알고리즘에서는 [4] 범용 조류계산에 의해 계통을 중부하 상태에 도달하게 한 후에 2개의 중부하에서 nose 곡선의 상부에 위치한 안정한 해와 nose 곡선의 하부를 구성하는 불안정한 해

를 구하고, 이들 4개의 조류계산 해를 3차 Lagrange 다항식으로 보간하여 다항식의 극점으로 근사 임계점을 계산한다. 조류계산에서 불안정한 해는 여러 개가 존재할 수 있으나, nose 곡선을 다항식으로 근사화 하는데는 임계점에서 nose 곡선의 상부와 연결되는 불안정해만을 필요로 한다. 앞으로 “불안정해”는 특별한 언급이 없으면 이 nose 곡선 하부에 위치한 해를 의미한다. 앞에서 계산된 근사 임계점을 사용하여 계통부하를 임계점에 더 가깝게 이동하여 다시 한 쌍의 안정한 해와 불안정해를 계산하고 다시 Lagrange 다항식으로 보간하는 작업을 반복하면 효율적으로 임계점을 계산하는 것이 가능하다. 그러나, 경부하에서는 불안정해가 존재하지 않을 수 있고 경부하에서 불안정해를 찾는 과정을 시작하면 알고리즘이 비효율적이 된다. 따라서 이 방법을 좀더 효율적이고 일반화하기 위해서는, 불안정해가 반드시 존재하는 중부하 상태임을 지시하는 지표로 사용하여 존재하지 않는 불안정해를 찾는 과정을 피하여야 한다. 또한 이 방법은 조류계산에 범용 조류계산 알고리즘을 사용하므로 임계점 부근에서 Jacobian 행렬이 특이행렬에 가까우면 수치적 불안정성을 보일 수 있고, 계통을 중부하로 이동하면서 임계점을 반복하여 보간하여야 하는 반복법의 한계를 지닌다. 최근 PV-곡선의 상부에 위치한 안정한 해와 그 점에서의 기울기만을 사용하여 PV-곡선을 2차 다항식 또는 타원으로 적합하여 임계점을 구하고자하는 시도도 있으나 [11,12], 발전기 무효전력 제약 등에 의해 PV-곡선의 기울기는 불연속성을 보일 경우 이들 방법에 의하여 적합된 곡선은 실제 PV 곡선과 상당한 차이를 보이고, 따라서 예측된 임계점은 실제 임계점을 상당히 상회할 수 있다.

CPF는 임계점 부근에서도 강인하게 해를 구할 수 있고 계통이 중부하 상태에 있는지의 여부를 보여주는 지표로 부하증가에 대한 전압 강하율을 제공하는 장점이 있으나, CPF만으로 임계점을 결정하는 것은 임계점 부근에서 스텝 크기

\* 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 \*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究所  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓國電力公社  
 接受日字 : 1999年 3月 4日  
 最終完了 : 1999年 7月 5日

를 매우 작게 취하여야 하기 때문에 비효율적이다 [3].

직접법 또는 PoC 법에서는 조류계산식에 임계점에서 Jacobian 행렬이 특이 (singular) 행렬이라는 필요조건을 첨가한 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson (NR)법으로 풀기 때문에, 수렴이 시작되면 이차 수렴특성으로 빠르게 정확한 해를 제공하는 장점이 있다. 그러나, 초기치가 해에 충분히 근접하게 주어지지 않으면 NR법의 특성상 발산할 수 있고, 따라서 PoC 법에 필요한 초기치는 다른 방법을 사용하여 제공되어야 한다.

이와 같이 SNB를 결정하기 위한 이들 방법들은 각각 장단점을 가지고 있고, 이들 방법들의 장점만을 활용하는 통합된 방법이 고안된다면, 이 방법은 장인하고 매우 효율적인 방법이 될 수 있다. 본 논문에서는 모든 조류계산을 CPF로 수행하여 PMLFS 법에서의 장인성과 중부하 지표에 관한 약점을 보완하고, PMLFS 및 Lagrange 보간으로 얻은 근사 임계점을 PoC 법의 초기치로 사용하는 통합된 전압붕괴 임계점 결정 알고리즘을 제안하고, 이 알고리즘을 Klos-Kerner 11-모선, New England 30-모선, IEEE 118-모선, 791-모선으로 구성된 2000년 한전계통에 적용한 결과를 기술하였다.

## 2. 전압붕괴 임계점 계산을 위한 통합법

### 2.1 통합법의 알고리즘

그림 1은 전압안정도에 가장 취약한 모선의 전형적인 PV 곡선을 보여주고 있는데, 이 곡선은 다항식에 의해 적합될 수 있음을 알 수 있다 [4]. 그림에서 4개의 조류계산 해 (두 개의 안정한 해 A와 C 그리고 두 개의 불안정한 해 B와 D)가 구해졌다고 가정하자. 부하 파라미터 k는 4개의 조류계산 해를 사용하여 식 (1)과 같이 모선전압 크기 V의 Lagrange 3차 다항식으로 나타낼 수 있고, 근사 임계점은 이 다항식의 극점으로 식 (2)와 같이 계산된다.

$$k(V) = aV^3 + bV^2 + cV + d \quad (1)$$

$$V_{cr} = \frac{-2b \pm \sqrt{4b^2 - 12ac}}{6a} \quad (2)$$

임계점에서 전압의 크기는 보통 0.5-0.9 사이의 값을 가지므로 식 (2)에서 계산된 두 개의 값 중에서 이 범위에 드는 값을  $V_{cr}$  값으로 취한다.

제안된 통합법에서 SNB는 계산된 근사 임계점을 사용하여 부하를 임계점 부근으로 이동하면서 위 과정을 반복 적용하여 효율적으로 결정하는데 그 과정은 다음과 같다. 연속법을 사용하여 계통부하를 기저부하로부터 중부하 상태로 이동시킨다. 이 과정에서  $dV/dk$ 가 설정치보다 크면 (그림 1의 점 A) 중부하 상태에 도달한 것으로 판단하고 PMLFS를 사용하여 불안정해 (그림 1에서 점 B)를 계산한다. 다시, 부하가 적절히 증가한 상태에서 CPF를 사용하여 한 쌍의 다중조류계산 해 (그림에서 C와 D)를 계산한다. 즉, A에서 시작하여 C를 그리고 B에서 시작하여 D를 CPF로 계산하는

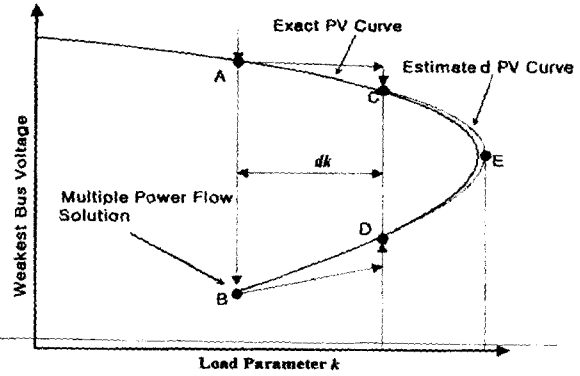


그림 1 다중조류계산을 이용한 라그랑제 보간법

Fig. 1 Lagrange interpolation with the use of multiple load flow solutions

데, PMLFS가 CPF보다 불안정해를 계산하는데 시간이 많이 소요되기 때문에 한 개의 불안정해가 결정된 후에는 PMLFS가 더 이상 사용되지 않는다. 이들 4점 A, B, C와 D는 3차 Lagrange 다항식으로 적합되고 임계점은 이 다항식의 극점으로 계산된다. 끝으로 Lagrange 보간을 2회 수행하여 비교적 임계점에 가깝게 얻어진 근사 임계점을 초기 값으로 하여 PoC 법으로 정확한 임계점을 계산한다. 그림 2는 개선된 통합법의 흐름을 보여주고 있는데, 상세한 과정은 다음과 같다.

### 2.2 연속조류계산법

조류계산식은 아래 식으로 요약될 수 있다.

$$f(\theta, V, \lambda_0 + k\mathbf{n}) = 0 \quad (3)$$

여기서

$\theta$  : 모선전압 위상각 벡터

$V$  : 모선전압 크기 벡터

$\lambda_0$  : 기저부하에서의 P, Q 부하 벡터

$\mathbf{n}$  : 부하증가 방향 벡터

$k$  : 부하수요 파라미터

벡터  $\mathbf{n}$ 는 부하증가 시나리오에 의하여 결정한다. 연속법에서는 예측자와 수정자의 두 단계가 있다.

#### 예측자

이 단계에서는 선형 보간에 의하여 연속 파라미터라고 부르는 상태변수 중에서 하나의 변화에 대한 다음 해를 계산한다. 일반적인 연속법에서는 계산된 해에서 가장 큰 변화를 보이는 변수를 연속 파라미터로 선택한다 [2,3]. 그러나, 이 논문에서는 부하수요가 임계부하를 초과하지 않도록 선택하고 임계점 부근에 도달하면 PoC 법을 사용하므로 연속 파라미터는 부하수요 파라미터  $k$ 로 고정한다. 식 (3)의 비

선형 연립방정식을 풀기 위한 선형방정식은

$$\begin{bmatrix} f_{\theta} & f_V & f_k \\ & & e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $e_k$ 는 부하수요 파라미터에 해당하는 위치를 제외 하곤 모든 요소의 값이 0인 단위벡터이다. 접선벡터가 계산 되면 다음 단계의 해에 관한 예측 값은

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ k_0 \end{bmatrix} + d\sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 아래첨자 "0"은 앞 단계에서 얻어진 해를 의미한다.

부하증가량  $d\sigma$ 의 선택은 임계점을 계산하는 알고리즘의 속도와 강인성의 서로 상반되는 두 가지 목표를 달성하는데 중요하다. 경부하에서는 기저부하로부터 임계점 부근까지 빠른 속도로 도달하는 것이 중요하고 수렴문제는 그리 중요하지 않다. 따라서, 임계점에 빨리 도달하도록 하기 위하여 가능한 한 큰 스텝 크기를 사용하여야 한다. 그러나, 중부하에서는 강인한 수렴특성이 더 중요하므로 작은 스텝 크기가 사용되어야 한다.  $dV_{weakest}$ 를 식 (4)의 선형연립방정식의 해 중에서 전압안정도에 가장 취약한 모선의 전압이라 하면, 제안된 방법에서는 각 단계에서의 전압안정도에 가장 취약한 모선의 전압강하가 부하증가에 대하여 전압의 크기가 선형으로 감소한다는 가정 하에  $V_{drop}$ 이 되도록 스텝 크기를 식 (6)과 같이 정하였다.

$$d\sigma = -\frac{V_{drop}}{dV_{weakest}} \quad (6)$$

식 (6)에서  $V_{drop}$ 은 경험에 의하여 발전기의 Q-limit을 고려하지 않는 경우 0.025 pu, Q-limit을 고려하는 경우 0.011 pu로 선정하였으며, 부하증가에 따른 전압강하가 비선형적으로 변하는 것을 감안하면 이와 같이 보수적으로 단계별 전압강하율을 결정하는 것이 경부하와 중간부하에서 부하증가량을 결정하는데 효과적이었다.

**수정자**

이 단계에선 예측자에 의해 결정된 값을 초기 값으로 하여 식 (3)의 조류계산식을 푼다. 부하수요 파라미터  $k$ 를 연속파라미터로 사용하므로 수정자 식은

$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, k) \\ k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\eta$ 는  $k$ 의 예측값이다.

**2.3 한 쌍의 다중조류계산 해와 Lagrange 보간법**

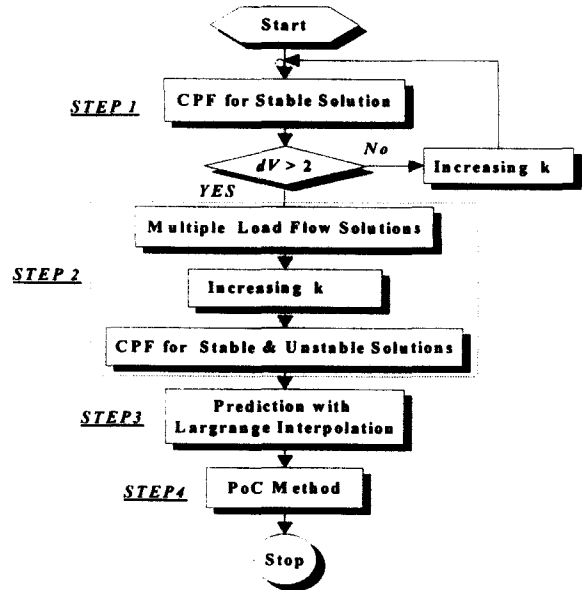


그림 2 SNB를 찾기위한 통합된 방법  
Fig. 2 Unified method to determine the SNB

다중조류계산의 불안정해를 계산할 수 있는 중부하 상태에 도달하면 (그림 1에서 점 A), PMLFS 법을 사용하여 불안정해를 (그림 1에서 점 B) 계산한다. 다중조류계산 해와 Lagrange 보간에 관한 상세한 내용은 문헌 [4]에 기술되어 있다. 단, 지금까지 다중조류계산은 단정도 (single precision)와 극좌표를 사용하여 가능하였으나 한전계통의 경우 수치적으로 불량하여 단정도로는 모선전력의 최대오차를 0.01이하로 감소시키는 것이 불가능하고 불안정해를 찾기 위한 방향벡터를 설정하기 위해서는 배정도 (double precision)로 CPF를 수행하여야 했다.

Lagrange 보간을 수행하기 위하여 부하를  $\Delta k$ 만큼 증가한 상태에서 한 쌍의 다중조류계산 해를 CPF를 사용하여 다시 계산한다 (그림 1에서 점 C와 D). 이 단계에서 점 D에 위치한 불안정 해는 PMLFS 법으로 계산하지 않고, 전 단계에서 계산한 점 B에 위치한 해를 초기 값으로 사용하여 CPF로 계산한다. 스텝 크기  $\Delta k$ 는 경험에 의하여 다음 식으로 결정한다.

$$\Delta k = -\frac{(V_A - V_B)}{2} \times \frac{1}{6 dV_{weakest}} \quad (8)$$

이 스텝 크기는, 부하증가에 따른 전압이 선형으로 감소한다는 가정 하에 부하수요 공간에서 점 A로부터 임계점까지의 거리의 1/6에 새로운 부하점 C를 제공한다. 실제로 전압은 비선형적으로 감소하므로 점 C는 이보다는 임계점에 더 가깝게 놓이나 임계부하를 초과하지 않는다.

그림 1에서 4개의 조류계산 해 (점 A, B, C 및 D)는 식 (1)의 3차 다항식으로 적합되는데, 임계부하와 임계전압은 이 다항식의 극점을 계산하여 산정할 수 있다. 보간에 의한 임계점은 그림 1에서처럼 실제 임계점을 약간 초과하는 경향이 있다.

2.4 Point of Collapse 법

PoC 법에서는 임계점에서 Jacobian 행렬이 특이하다는 조건을 조류계산식과 연립하여 아래 식과 같이 임계점을 직접 계산한다.

$$f(x, \lambda_0 + k n) = 0 \tag{9}$$

$$w^T J = 0 \tag{10}$$

$$w^T w = 1 \tag{11}$$

위에서 식 (9)은 조류계산식, 식 (10)은 임계점에서 Jacobian 행렬  $J$ 가 특이하다는 조건, 그리고 식 (11)은 Jacobian 행렬의 좌고유벡터  $w$ 가 영벡터가 되지 않도록 하는 조건을 각각 나타낸다.

식 (9)-(11)의 비선형 연립방정식은 Newton-Raphson (NR) 법으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} J & 0 & n \\ H & J^T & 0 \\ 0 & 2 w^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta w \\ \Delta k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x, \lambda_0 + k n) \\ J^T w \\ w^T w - 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

위에서 Hessian 행렬  $H$ 의 (i,j) 요소는 다음 식으로 계산 되는데,

$$H_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \frac{\partial^2 f_k}{\partial x_i \partial x_j} \tag{13}$$

Hessian과 Jacobian 행렬의 구조는 같고, Hessian 행렬의 요소는 Jacobian 행렬요소의 값을 사용하여 계산할 수 있으므로 Hessian 행렬을 계산하기 위한 추가 계산부담은 그리 크지 않다. NR-법에서 가장 중요한 단계는 수렴을 보장할 수 있는 해에 근접한 초기 값을 구하는 것인데, 본 논문에서는 임계점 부근에서 CPF, PMLFS로 2개의 안정해와 2개의 불안정해를 얻고, 이 4개의 해를 모든 변수에 대하여 Lagrange 보간하여 근사 임계점을 구한 값으로 PoC법의 초기값으로 사용하였다. 그리고 식 (10)의 좌고유벡터의 초기 값은 Lagrange 보간된 근사 임계점에서 Jacobian 행렬을 계산하고 식 (10)-(11)의 해를 역반복법 (inverse iteration)에 의하여 계산하였다 [9].

3. 사례 연구

제안된 전압붕괴임계점 계산 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 Klos-Kerner 11-모선, New England 30-모선, IEEE 118-모선, 그리고 한전 791-모선 계통 등에 적용하였다. 부하증가 방향으로 모든 모선의 부하와 slack 모선을 제외한 모든 발전기의 유효전력 출력은 기저부하에서의 부하분담 비율로 증가하는 것으로 가정하였다. 그러나 실제 계통운전조건 하에서 부하증가 방향은 발전기 보수계획과

경제급전 등 매우 복잡한 시나리오에 의해 결정되고 이러한 조건에서 전압안정도 해석결과는 본 논문에서 가정한 단순한 시나리오 하에서의 전압안정도 해석결과와는 상당히 다를 수 있다. 즉, 특정 계통의 전압안정도를 상세히 검토하기 위해서는 부하증가방향이 실제 계통 운전조건을 반영하여야 하고 상정사고도 함께 검토되어야 하나, 본 논문에서의 결과는 실제 운전조건과는 다른 단순한 가정 하에서의 해석한 결과이므로, 제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위한 예시이지 특정 계통의 전압안정도에 관한 구체적 결론을 유도하기 위한 것이 아님을 강조한다.

제안된 알고리즘은 Fortran 언어로 코딩하였으며, 조류계산은 극좌표와 Tinney의 방법 2를 사용한 모션번호의 최적배열을 사용한 스파시티 기법을 사용하였다 [10]. 표 1은 각 계통에 대한 기저부하에서 시작하여 임계점을 계산하는 CPU 시간을 보여주고 있는데, I/O를 포함한 계산시간은 Intel Pentium processor, 300MHz를 장착한 노트북 PC에 의해 측정되었다.

3.1. Klos-Kerner, New England 및 IEEE 계통

이들 계통에서는 발전기의 무효전력 출력의 제약에 관한 데이터가 주어지지 않거나 또는 해석을 간단하게 하기 위하여 발전기의 무효전력제한을 고려하지 않았다. PMLFS로 nose 곡선의 하부에 위치한 불안정해를 계산하기 위해서는 조류계산을 직교좌표와 배정도 (double precision)로 계산하여야 한다는 Iba등의 주장과는 [5] 달리, 단정도와 극좌표를 사용하여도 수렴하였다. 표 1은 이들 계통의 전압안정도 마진과 NR 법의 회수, 그리고 I/O를 포함한 계산시간을 보여주고 있다. Klos-Kerner 계통을 제외하곤 전압붕괴에 이르기까지 기저부하의 100% 이상의 마진이 있으므로 상당히 견실한 송전 네트워크로 판단된다. 그러나 Klos-Kerner 계통의 경우 기저부하가 거의 전압붕괴 임계점에 인접해 있어 적절한 조치가 요구된다. 그림 3은 IEEE 118-모선 계통의 전압안정도에 가장 취약한 모선의 전압 프로파일을 보여주고 있는데 문헌 [5]의 결과와 정확히 일치한다.

3.2. 한전계통

제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 한전계통을 모든 모선의 부하와 slack 모선을 제외한 모든 발전기의 유효전력 출력은 기저부하에서의 부하분담 비율로 증가한다는 가정 하에 전압안정도를 해석하였다. 한전계통은 2000년 첨두부하를 기준으로 791-모선, 215-기의 발전기, 1575개의 선로로 구성되고, 예상 최대부하는 38,927 MW이다. 발전기 무효전력출력 제약 (Q-limit)을 고려하는 경우와 고려하지 않는 두 가지 경우에 대하여 PV-곡선과 임계점을 계산하였다. 발전기 Q-limit를 고려하지 않는 경우는 송전 네트워크의 송전능력을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있으며, Q-limit를 고려하는 경우는 계통운전을 위한 전압안정도 평가에 사용할 수 있다.

한전계통의 경우 Klos-Kerner, New England 그리고 IEEE 118-모선 계통과는 달리 조류계산이 수치적으로 민감하여 단정도 계산으로는 모선전력의 오차를 0.01 이하로 감소시킬 수

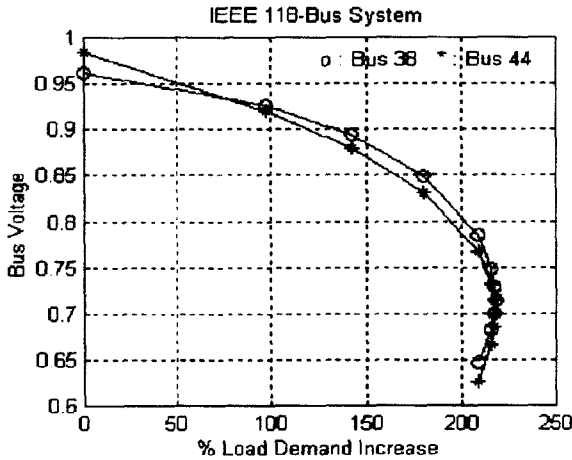


그림 3 IEEE 118-모선 계통의 Nose Curve  
Fig. 3 Nose curves for IEEE 118-bus system

없었으며, PMLFS로 그림 1의 A점으로부터 불안정해 B를 찾기 위한 방향설정이 단정도로는 불가능하였고, 연속법을 사용한 조류계산을 배경도로 프로그램 하여야 했다.

**발전기 Q-limit를 고려하지 않는 경우**

표 1은 발전기의 유효 및 무효전력의 제약을 고려하지 않고 안정도 마진, CPU 계산시간 등 해석 결과를 요약하고 그림 4는 전압안정도에 가장 취약한 모선중의 하나인 부안 154kV 변전소의 PV-곡선을 보여주고 있다. 표 1에서 전압 붕괴에 이르기까지 약 41%의 부하증가가 가능하며, 기저부하는 임계부하의 95%로 정의되는 전송한계 (transfer limit) [8] 이내에서 운전되기 때문에 전압안정도 상의 문제는 없는 것으로 판단된다. 그러나, 기간선로가 개방되는 상정사고 하에서도 기저부하가 전송한계 이내에 들지는 더 검토를 요한다. 전압안정도에 취약한 모선들은 포천/철원, 대전/충남, 대구/경북내륙, 광주를 포함한 전남 및 전북 등 발전소로부터 비교적 원거리에 위치한 부하지역에 위치해 있다.

기간 선로인 345 kV 모선 중에서 전압안정도에 취약한 모선으로, 신경산, 선산, 서대구 변전소는 부하밀집 지역이며, 청양은 보령화력과 영광원전이 인근 부하지역과 서서울 지역으로 전력을 공급하는 경로이며, 청원과 신옥천은 영광 원전/하동/광양지역의 발전소에서 생산된 전력이 동서울 지

표 1 SNB 계산 요약

Table 1 Summary of SNB computation

system	Klos-Kerner	New England	IEEE 118-bus	KEPCO 791-bus	
				without Q-limit	with Q-limit
Margin [%]*	0.0319	379	218	40.9	10.91
N-R iterations	15	28	30	34	41
PoC iterations	2	3	3	2	1
CPU time [sec]	0.03	0.20	0.60	17.82	14.81

\* This voltage stability margin, the distance from base load to SNB, is given in percent of the base load.

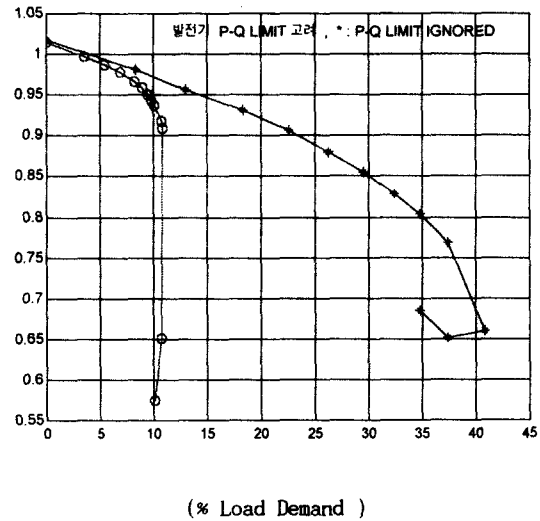


그림 4 부안 변전소의 nose curve (154kV)  
Fig. 4 Nose curves of Puan S/S (154kV)

역으로 공급되는 경로이다. 임계점에서 충청, 호남지역의 345 kV 모선이 심한 저전압을 보이는 것은 멀지 않은 시일 내에 이들 지역에 전력을 공급하는 전송능력이 포화될 수 있음을 시사한다.

**발전기 Q-limit를 고려하는 경우**

현재의 발전설비를 가지고 운용측면에서의 전압안정도를 검토하기 위하여 발전기의 무효전력 상한을 고려하면서 임계점을 계산한 결과를 표 1과 그림 4에 보였다. 이 경우 전압안정도 마진이 기저부하의 약 11%로 발전기 Q-limit를 고려하지 않는 경우에 비하여 현저하게 감소하였고 전송한계 이내에서 운전되거나 전송한계에 가깝다. 기간선로의 개방과 같은 상정사고를 고려하면 이 마진은 상당히 줄어들 가능성이 있고, 따라서 전압안정도의 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

전압안정도에 취약한 345 kV 기간선로에 위치한 변전소 중에서, 신용진3, 청원3, 신옥천3, 신남원3 그리고 영광NP#1은 영광, 하동 및 광양등의 발전단지로부터 동서울 지역으로 전력을 공급하는 경로이며, 청양3은 보령과 영광원전으로부터의 전력을 서서울지역에 전력공급하는 경로이다. 또한, 전압안정도에 취약한 신경산, 선산, 서대구의 345 kV 모선들은 발전원으로부터 원거리에 위치한 부하밀집 지역이며, 신강진, 남광주 및 신광주의 345 kV 부하모선들이 저전압현상을 보이는 것은 전압안정도에 취약한 신남원 변전소와 영광원전으로부터 전력을 공급받기 때문인 것으로 판단된다. 이들 345 kV 모선들은 대부분 발전기 Q-limit를 고려하지 않는 경우에도 전압안정도에 취약한 모선이다. 전압안정도에 취약한 154 kV 모선들은 충무와 거제를 제외하곤 전압안정도에 취약한 345 kV 모선들의 주변에 위치한 모선들이고, 거제와 충무는 인근에 충분한 무효전력원이 존재함에도 불구하고 저전압을 보이는 것은 선로용량에 비하여 부하가 크기 때문으로 판단된다.

표 2는 Q-limit에 도달하여 발전기 단자전압이 정격전압보다 상당히 감소한 대용량 발전기들을 보여주고 있는데, 이

들 발전기가 무효전력출력 상한에 도달한 것도 위의 결론을 뒷받침한다. 평택을 제외하곤 전압안정도에 취약한 345 kV 모선지역에 위치한 발전기들의 단자전압이 정격전압으로부터 많은 전압강하를 보이고 있다. 즉, 장거리 선로를 통하여 경인지역으로 전력을 공급하거나 인근 부하지역에 공급되는 무효전력 수요로 이들 발전기에 요구되는 무효전력 발전량이 과다하여 이들 발전기가 Q-limit에 도달한다.

기저부하로부터 시작하여 임계점 계산까지의 계산시간이 300MHz Pentium processor를 장착한 노트북 PC로, 발전기 무효전력 상한을 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우 각각 약 17.8초와 14.8초로서 온라인 적용이 가능할 정도로 신속히 안정도 마진, 임계점 그리고 근사 PV-곡선을 결정하였다. 이는 계통에 대한 사전지식이 전혀 없이 수행한 경우로, 만약 온라인으로 반복 적용하는 경우라면 사전 해석결과가 있으므로 계산 시간은 더 감소될 것으로 예상된다. 또한 전압안정도 해석이 고도의 정밀도를 요하지 않는 엔지니어링 목적이라면 연속법만으로 근사임계점을 계산하는 것이 효율적일 수 있다. 한전계통의 경우 발전기 무효전력 상한

점만을 활용하도록 고안되었다. 즉, 제안된 통합법은 연속법으로 모든 조류계산을 수행하여 강인하고, 다중조류계산과 Lagrange 다항식으로 PV-곡선을 적합하여 근사 임계점을 결정하고, 이차 수렴특성을 보이는 PoC법으로 정확한 임계점을 계산한다. 제안된 통합법을 Klos-Kerner 11모선, New England 30-모선, IEEE 118-모선 그리고 한전계통에 적용한 결과 제안된 방법이 매우 효율적이고 강인함을 확인하였다. 한전계통의 경우 기저부하로부터 시작하여 임계점 계산까지의 계산시간이 300MHz Pentium processor를 장착한 노트북 PC로, 발전기 무효전력 상한을 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우 각각 약 17.8초와 14.8초로서 온라인 적용이 가능할 정도로 신속히 안정도 마진, 임계점 그리고 근사 PV-곡선을 결정하였다. 또한 고도의 정밀도를 요하지 않는 엔지니어링 목적이라면 연속법만으로 임계점을 결정하는 것이 더 유리할 것으로 생각된다.

한전계통의 경우 발전기 무효전력 제약을 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우 2000년 첨두부하에서 안정도 마진이 각각 기저부하의 40.9%와 10.9%로 전송한계 이내에서 들어 문제가 없는 것으로 판단되나, 기간선로의 개방 등 상정사고를 고려하는 경우 다른 결론을 얻을 수 있다. 대전/충남, 대구/경북 내륙, 호남 등 발전원으로 부터 비교적 원거리에 위치한 부하지역이 전압안정도에 취약하였으며, 특히 영광원전, 하동/여수지역의 전력을 동서울 지역에 공급하는 신남원-신옥천-청원-신용인 345 kV 선로와 영광원전과 보령화력으로부터 서서울 지역에 전력을 공급하는 청양 345 kV 변전소가 전압안정도에 취약하여 병목현상을 일으킬 가능성이 있는 것으로 판단되었다. 그러나 앞의 해석결과는 모든 모선의 부하와 발전량이 기저부하에서의 비율로 증가한다는 가정과 상정사고를 고려하지 않은 상태에서 얻은 것이므로, 좀더 정확한 결과를 얻기 위해선 정밀한 검토를 요한다.

표 2 KEPCO 계통의 전압붕괴점에서 Q-Limit에 도달한 대용량 발전기들

Table 2 Generators reaching Q-limit in KEPCO system at the Critical Point

Name	Total MVA rating	Terminal voltage	
		Scheduled	at critical loading
평택G #1-#4	390	1.01	0.9896
충주 #1-#4	118	1.01	0.9852
무주#1 & #2	343	1.01	0.9616
서천 #1-#2	246	1.01	0.9828
LG민자	200	1.00	0.9894
영광원전 #1-#4	1151-1213	1.01-1.00	0.9389-0.9709
여수 #1	235	1.00	0.9952
호남 #1-#2	353	1.01	0.9755

을 고려하지 않고 연속법만으로  $dV$ 가 20보다 크면 근사 임계점으로 취하는 경우 계산시간이 약 11초가 소요되었으며 이 근사 임계점과 PoC법으로 계산한 정확한 임계점과의 차이는 기저부하의 0.1%에 불과하였다. 따라서 온라인 적용에는 연속법만으로 해석하는 것이 유리할 수도 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 전압안정도 해석을 위해 PV-곡선과 전압붕괴 임계점을 강인하고 효율적으로 계산하는 통합법을 제안하고, Klos-Kerner 11-모선, New England 30-모선, IEEE 118-모선, 한전의 791-모선 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

제안된 통합법은 강인한 연속조류계산법, 효율적인 한 쌍의 다중조류계산 해와 Lagrange 보간법 그리고 PoC법의 장

#### 감사의 글

본 연구는 과학재단 과제 94-0100-05-01-03 및 한국 전력공사 지원 94-지-1에 의해 지원되었음

#### 참고 문헌

- [1] Y. Ichida, "Studies under way in Japan for improved analysis of voltage related system behaviors," *Proc. of Bulk Power System Voltage Phenomena*, Missouri, pp. 2-47-55, Sept. 1989.
- [2] V. Ajjarapu and C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, Feb. 1992.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [4] H. K. Nam, D. J. Kim and C. J. Moon, "Calculation of a Pair of Multiple Load Flow Solutions and Voltage Collapse Point for On-line

Assessment of Power System Voltage Stability," *Trans. of Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 43, No. 8, pp. 1226-1238, Aug. 1994

[5] K. Iba, H. Suzuki, M. Egawa and T. 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, pp. 582-591, May 1990.

[6] F. L. Alvalado and T. H. Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions," *Proc. of bulk Power System Voltage Phenomena*, Missouri, pp. 5-23-38, Sept. 1988.

[7] A. Klos and A. Kerner, "The Non-Uniqueness of Load Flow Solutions," *Proc. Of Power Systems Computation Conference*, pp. 3.1-8, Cambridge, 1975.

[8] S. Zelingher, B. Shperling, J. D. Mounford, and R. J. Koessler, "Analytical Studies for Thyristor-Controlled Series Compensation in New York State, Part I Steady State Analysis," *Proc. of FACTS Conference 2*, pp. 2.1-1~13, Dec. 1992

[9] J. H. Wilkinson, *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Clarendon Press, 1969.

[10] W. F. Tinney and J. W. Walker, "Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorizations," *Proc. IEEE*, Vol. 55, No. 11, 1967.

[11] H. D. Chiang, C. S. Wang and A. J. Flueck, "Look-ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large Scale Power Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 173-180, Feb. 1997

[12] 문영현, 최병곤, 조병훈, 이태식, "P-e 곡선의 타원특성을 이용한 전력계통의 최대허용부하의 예측," 대한전기학회논문지, 48권, 1호, 1999. 1.

저 자 소 개



남 해 곤 (南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학박). 1975년~1978년 한국전력 원자력 건설부 근무. 1986년~1988년 한국전기연구소 근무. 1988년~현재 전남대 공대 전기공학과 부교수

Tel : 062-530-1745

E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr



김 동 준 (金東俊)

1971년 1월 7일생. 1992년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹 연구원. 관심분야 : 전압 붕괴점 프로그램 개발(CPF법, PoC법), 발전기/제어계 모델링, 디지털 제어, AVR/PSS 정수 튜닝, 디지털 PSS 개발.

Tel : 0551-280-1318

E-mail : djkim@keri.re.kr



송 충 기 (宋忠機)

1970년 월 일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 근무.

Tel : 02-787-8364

E-mail : cgsong@dava.kepco.co.kr



문 영 환 (文英煥)

1956년 5월 13일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 서울대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 1990년 Univ. of Texas(Arlington) 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹장, 책임연구원. 관심분야 : 발전기/제어계 모델링, HVDC 제어, EMS 프로그램 개발, 전력구조 개편, 실계통 AVR/PSS 정수 튜닝, 디지털 PSS 개발.

Tel : 0551-280-1311

E-mail : yhmoon@keri.re.kr

김 태 균 (金泰均)

전기학회 논문지 제48권 제 4호 참조

Tel : 042-865-5831



이 효 상 (李孝祥)

1955년 2월 26일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 계통운용처 급전기술부장.

E-mail : lhs707@dava.kepco.co.kr