

## 선로조류 감도계수를 고려한 전압안정도 평가에 관한 연구

김 세영\* 최 상규\*\* 송 길영\*

\* 고려대학교 전기공학과 \*\* 안양전문대 제어계측과

### A Study on Evaluating of Voltage Stability Considering Line Flow Sensitivity

Sae-Young Kim\* Sang-Kyu Choi\*\* Ki-yeong Song

\* Korea Univ. \*\* Anyang Technical College

**Abstract** - This paper presents a simple method for evaluating of voltage stability using the line flow equation. Line flow equations( $P_{ij}, Q_{ij}$ ) are comprised of state variable,  $V_i, \delta_i, V_j$  and  $\delta_j$ , and line parameter,  $r$  and  $x$ . Using the feature of polar coordinate, these becomes one equation with two variables,  $V_i$  and  $V_j$ . Moreover, if bus  $j$  is slack or generator bus, which is specified voltage magnitude, it becomes one equation with one variable  $V_i$ , that is, may be formulated with the second-order equation for  $V_i^2$ . Therefore, multiple load flow solutions may be obtained with simple computation, and the formulated equation used for approximately evaluating of voltage stability limit considering line flow sensitivity. The proposed method was validated to 2-bus and IEEE 6-bus system.

#### 1. 서 론

최근에, 전압불안정 현상과 밀접한 관련이 있는 계통사고 이후에 전압안정도 문제는 전력계통 전반에 걸쳐 중요한 관심사가 되고 있다. 현재, 우리나라의 전력수요도 비약적으로 증가하고 있고 이러한 상황에 대처하기 위해서 전력계통은 원격화, 대규모화, 그리고 더욱 복잡화되고 있는데 이에 따라 계통운용에서 부하 급증시 무효전력의 부족으로 인해 발생하는 전압불안정 문제가 중요하게 대두되고 있다. 이와 관련하여 전압불안정 문제는 조류다근과 밀접한 관계가 있고 한쌍의 인접 조류다근의 상호 근접도 또는 조류다근을 기반으로 한 감도계산 등을 통해 계통의 전압안정성을 파악하고 있다. 아울러, 전압안정도의 on-line 감시와 예방제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

먼저, 조류다근의 계산법으로 문헌[1]은 현재 운전전압을 계통특성에 따라 단위량 만큼 감소시켜 이것을 조류다근 계산의 초기치로 사용한다. 문헌[2]에서는 직각좌표계의 전력방정식  $P_i$  와  $Q_i$  를 원의 방정식으로 정식화하고 두 원의 교차점을 조합시킨 초기치로 조류다근을 구한다. 문헌[3]은 조류계산식을 배수(multiplier)의 3차 방정식으로 정식화하고 운전상태가 한계점에 접근하게 되면 수렴특성상 이것 중 하나의 배수가 실수가 되어 이것을 다근계산의 초기치에 사용할 수 있다고 가정한다. 문헌[4]는 주위 모선의 전압크기와 위상각을 고정하면 임의의 모선전압에 2개의 모드(+, -)가 존재해서 이 모드를 조합시킨 초기치로 조류다근을 구하고 있다. 하지만, 이것은 중부하 또는 경부하에

도 모드에 따라서는 해가 구해지지 않는다. 또한, 조류다근에 기반을 둔 전압안정도 평가법으로 문헌[5]은 조류다근 계산에서 구한 높은해와 낮은해전압 각각에 대해  $dV/dP_T$  를 계산하여 두 기울기의 교차점으로 전압안정성 여유[MW]를 구하고 있다.

본 논문에서는 극좌표의 선로조류방정식  $P_{ij}, Q_{ij}$  특성과 선로조류 감도계수를 이용한 on-line 전압안정도 평가방법을 제시한다. 기본개념은  $i$  에서  $j$  모선으로 흐르는 선로조류  $P_{ij}$  와  $Q_{ij}$  는 상태변수( $V_i, \delta_i, V_j, \delta_j$ )와 선로정수들로 구성되는데 극좌표계의 선로조류방정식 특성상 두 식은 변수  $V_i$  와  $V_j$  만을 포함한 하나의 방정식으로 된다는 것이다. 만일,  $j$  모선이 slack 또는 발전기모선이라면  $V_j$  는 상수이므로 식은  $V_i$  만의 함수로 정의되고 이것을 풀면 두개의 해가 구해지는데 하나는 높은해(조류계산결과, 안정평형점)이고, 나머지는 낮은해(불안정평형점)가 된다. 그러나, 일반적으로 연결된 선로의 반대쪽이 전압크기가 지정되는 slack 또는 발전기모선일지라도 모선에는 다수의 선로가 연결되었기 때문에 구한 다근은 선로조류  $P_{ij}, Q_{ij}$  를 만족하는 다근이지 모선의 주입전력  $P_i(=P_{i1}+P_{i2}+\dots+P_{in})$ ,  $Q_i(=Q_{i1}+Q_{i2}+\dots+Q_{in})$  를 만족하는 다근이지는 않다. 하지만, 정식화 과정에서 근사화를 포함하고 있지 않아 즉, 인접 모선의 전압크기와 위상각을 일정하다고 가정하지 않아 발생하는 오차는 작다. 그리고, 본 연구에서는 유도한 조류계산식에 선로조류 감도계수를 포함하여 정적인 전압안정도 한계점을 근사적으로 구하는 방법을 제안하고 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 2-모선 계통

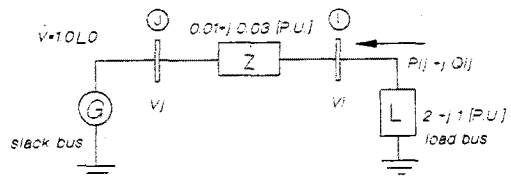


그림 1. 2-모선 계통

그림 1 계통의 선로조류방정식  $P_{ij}, Q_{ij}$  는 다음과 같다.

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* = \frac{V_i^2 - V_i V_j \angle(\delta_i - \delta_j)}{r - jx} \quad (1)$$

(1)식의 양변에  $r - jx$  를 곱하고 양변을 실수부와 허수부에 대해 정리하면 다음 두 식이 된다.

$$rP_{ij} + xQ_{ij} - V_i^2 = -V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

$$rQ_{ij} - xP_{ij} = -V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

그리고, (2), (3)식의 양변을 제곱하고 더해주면 변수  $\delta_i, \delta_j$  가 생략된 변수  $V_i, V_j$  만을 포함한 하나의 식이 되고 결국, 이것은  $V_i^2$ 에 대한 2 차 방정식이 된다.

$$a_i (V_i^2)^2 + b_i (V_i^2) + c_i = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(rP_{ij} + xQ_{ij}) - V_j^2 \\ c_i = (rP_{ij} + xQ_{ij})^2 + (rQ_{ij} - xP_{ij})^2 \end{cases}$$

(4)식은 변수  $V_i$  ( $V_j$  는 상수)만을 포함하고 있고 이것을 풀면 4 개의 해가 구해지는데 전압크기는 - 값을 갖을 수 없으므로 결국 2 개의 해, 높은해전압과 낮은해전압이 구해진다. 이와같이 2 모션계통에서는  $P_{ij}=P_i, Q_{ij}=Q_i$  이므로, 선로조류  $P_{ij}, Q_{ij}$  를 만족하는 다극은 모션  $i$  의 주입전력  $P_i, Q_i$  를 만족하는 조류다극과 동일하다.

## 2.2 한계점의 계산

그림 1 계통에서  $P_{ij}=P_i, Q_{ij}=Q_i$  이므로 (4)식에 조류계산의 지정치인 주입전력  $P_i$  와  $Q_i$  를 대입하면 다음과 같다.

$$a_i (V_i^2)^2 + b_i (V_i^2) + c_i = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(rP_i + xQ_i) - V_j^2 \\ c_i = (rP_i + xQ_i)^2 + (rQ_i - xP_i)^2 \end{cases}$$

만일, 계통의 부하모션  $i$  가 정적으로 변화하는 경우 즉,  $P_i$  와  $Q_i$  가  $k$  배 증가하는 경우의 조류다극은 (5)식의 계수에  $P_i$  와  $Q_i$  대신에  $kP_i$  와  $kQ_i$  를 대입하여 계산한다. 물론, 이 때 모션  $i$  의 역할은 일정하게 유지되고 이와 같이, 부하수요가 점차로 증가하게 되면 두개의 다극은 일치하게 되는데 이에 대한 조건은 다음과 같다.

$$k = \frac{-V_j(rP_i + xQ_i) \pm \sqrt{V_j^2(rP_i + xQ_i)^2 + 4V_j^2(rQ_i - xP_i)^2}}{4(rQ_i - xP_i)^2} \quad (6)$$

## 2.3 n-모션계통

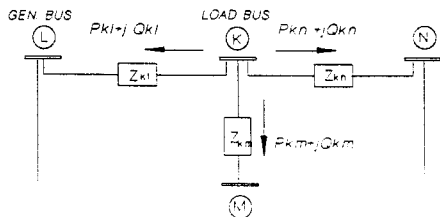


그림 2. n-모션 계통

일반적인 n 모션 계통에서 제안한 방법은 slack 또는 발전기 모션과 연결된 부하모션을 대상으로하여 조류다극을 구하고 그 중에서 가장 감도가 가장 큰 부하모션을 선정하여 전압안정도 여유를 평가한다. 그림 2 처럼 부하모션  $k$  에 3 개의 모션  $l, m, n$  이 연결되고 모션  $l$  이 발전기모션이라고 가정한다. 이때, 조류계산 결과인 선로조류  $P_{kl}, Q_{kl}$  과 선로정수  $r, x$  그리고 상수인  $V_l$  을 (7)식에 대입하면 선로조류  $P_{kl}, Q_{kl}$  를 만족하는 두개의 다극이 구해지는데 여기서 구해진 다극은 조류계산에서 부하모션의 지정치인  $P_k, Q_k$  를 만족하지 않고 선로조류  $P_{kl}, Q_{kl}$  을 만족하는 다극이기 때문에 계산된 조류다극은 그 만큼의 오차를 포함한다고 할 수 있다.

$$a_k (V_k^2)^2 + b_k (V_k^2) + c_k = 0 \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_k = 1 \\ b_k = -2(rP_{kl} + xQ_{kl}) - V_l^2 \\ c_k = (rP_{kl} + xQ_{kl})^2 + (rQ_{kl} - xP_{kl})^2 \end{cases}$$

## 2.4 전압안정성의 평가

제안한 방법으로 계산된 다극은 감도해석을 통해 다음 식으로 전압안정도 여유(MW)  $\Delta P$  를 구한다.

$$\Delta P (MW) = \frac{V_k - V_l}{\frac{\Delta V_l}{\Delta P_T} - \frac{\Delta V_k}{\Delta P_T}} \quad (8)$$

## 2.5 선로조류 감도계수를 고려한 전압안정도 평가

총부하가 정적으로 증가하는 경우 선로조류( $P_{ij}, Q_{ij}$ )도 이에 따라 변화하게 된다. 일반적으로 이러한 경우에 선로조류 값들은 비교적 선형적으로 변화하는 특성을 보이다가 전압 임계점 부근에서 점차적으로 비선형적으로 되고  $Q_{ij}$  가  $P_{ij}$  보다 더 비선형적인 특성을 갖게 있는데 이것은 감도  $\Delta P_{loss}/\Delta P_T$  와  $\Delta Q_{loss}/\Delta P_T$  특성으로부터 알 수 있는데 후자의 것이 더 크다. 본 연구에서는 총부하 변화  $\Delta P_T$  에 대한 선로조류 변화  $\Delta P_{ij}$  의 감도를 계산하여 이것을 (6)식에 포함시켜 전압임계점을 근사적으로 평가하는 방법을 제안하고 있는데 먼저, 총부하가  $\Delta P_T$  만큼 증가한 경우의 총부하 변화를  $k_{PT}$  를 다음과 같이 정의한다(0:base case).

$$k_{PT} = \frac{P_T^0 + \Delta P_T}{P_T^0} \quad (9)$$

그리고, 선로조류  $P_{ij}, Q_{ij}$  에 대한 변화율은 다음과 같다.

$$k_{P_{ij}} = \frac{P_{ij}^0 + \Delta P_{ij}}{P_{ij}^0}, \quad k_{Q_{ij}} = \frac{Q_{ij}^0 + \Delta Q_{ij}}{Q_{ij}^0} \quad (10)$$

그러므로, 총부하가  $k$  배 만큼 증가한 경우에 선로조류는 다음과 같이 변화하게 된다.

$$\frac{k_{P_{ij}}}{k_{PT}} \cdot k_{P_{ij}}^0, \quad \frac{k_{Q_{ij}}}{k_{PT}} \cdot k_{Q_{ij}}^0 \quad (11)$$

결국, (11)식을 (6)식의  $P_i$  와  $Q_i$  에 대입하면 총부하가 증가하는 경우의 전압임계점을 근사적으로 평가해 볼 수가

있는데 이것을 적용결과에서 보인다.

### 3. 사례연구

그림 3 은 그림 1 의 계통에서 제안한 방법으로 구한 P-V 곡선을 보이고 있다. 여기서, 한계점은 8.284[pu]인데 이것은 (6)식으로 계산한 k 값이 4.142 이고 base case 의 P=2[pu]가 정적으로 4.142 배 증가한 상태를 의미한다. 그리고, P-V 곡선은 현재운전점과 한계점 사이를 일정한 간격으로 나누고 각 상태의 다근을 (5)식으로 구해 나가면 쉽게 작성할 수가 있다.

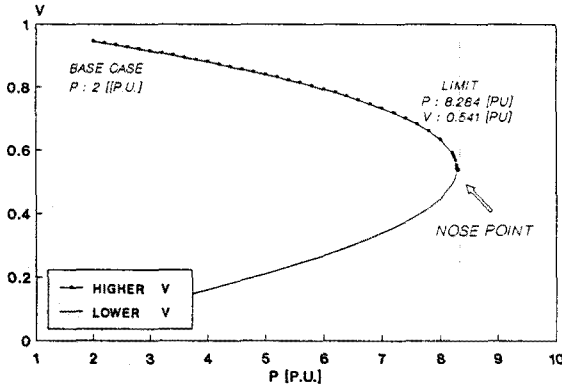


그림 3. P - V 곡선 ( 2-모선 )

그림 4 에서 IEEE 6-모선 계통의 총부하 변화  $\Delta P_T$  에 대한 선로조류 변화  $\Delta P_{ij}$  의 감도를 고려하여 전압임계점을 구한 결과를 보이고 있는데 이것은 2.5 절에서 설명한 것처럼 전압임계점을 구하는 식(6)의  $P_i$  와  $Q_i$  에 식(11)의  $k_{P46}$ ,  $P_{46}^0$  와  $k_{Q46}$ ,  $Q_{46}^0$  를 대입해 전압임계점을 구한 결과이다. 이 것에서 알 수 있듯이 제안한 방법으로 평가한 한계점은 실제 P-V 곡선의 한계점과 거의 일치 함을 알 수 가 있다.

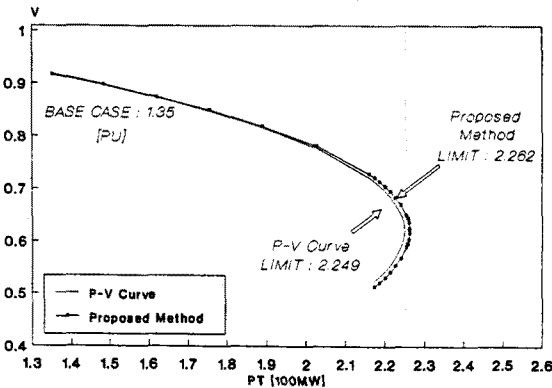


그림 4.  $P_{46}$ - $V_4$  곡선과  $P_4$ - $V_4$  곡선 간의 비교

그리고, 그림 5 는 KEPCO 345 KV 계통에 대해서 제안한 방법을 적용한 결과인데 계통상태가 정적으로 증가하여 전압안정도 평가에서 중요시되는 중부하영역에 접근할수록 평가한 한계점과 실제 한계점과의 오차가 작아짐을 알 수 가 있다.

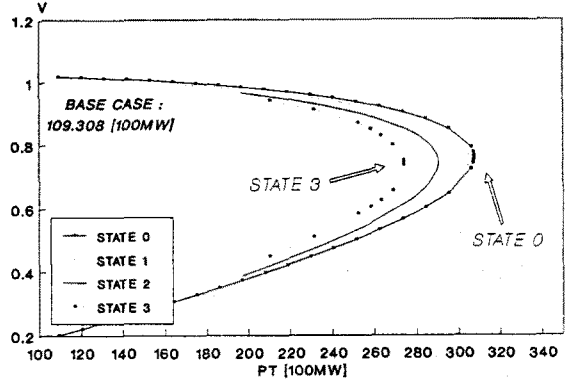


그림 5. 선로조류 감도계수를 고려한 한계점 결과

### 4. 결론

1. 선로조류방정식  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$  특성을 이용하여 현재운전점의 조류계산 결과로 간단히 수치계산할 수 있는 조류다근계산법과 이것을 기반으로 한 새로운 전압안정도 평가방법을 제시하였다.
2. 조류다근의 계산과 감도해석(  $\Delta V/\Delta P$  )에 필요한 계산 시간이 거의 없으므로 현재 운전점과 한계점 사이의 전압안정도 여유( MW )를 고속계산할 수 있어 전압안정도의 on-line 감시에 사용할 수 있다는 장점이 있었다.
3. 총부하에 대한 선로조류의 감도계수를 이용하여 부하가 정적으로 증가한 경우에 안정한계점을 근사적으로 구하는 고속계산방법을 제안하였다.

### 참고 문헌

- [1] 鈴木守, 佐藤正弘, 青柳眞理, “電力系統の近接潮流根の求解法”, T.IEE Japan. Vol. 109-B. No.10, 1989. P451-458.
- [2] 伊庭健二, 岩本伸一, 田村康男, “實規模系統に對する潮流多根計算法”, 電學論. 55-B30, 昭55-5, P257-264.
- [3] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, Isutomu Watanabe, “A Method For Finding a Pair of Multiple Load Flow Solutions in Bulk Power Systems”, IEEE Trans. on Power and Systems, Vol.5, No.2, May 1990.
- [4] 朴鍾根, 關根泰次, “潮流多根解の 一解法について”, 電學論 55-B31 (昭 54-4)
- [5] Akihiko Yokoyama, Yasuji Sekine, “A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solutions”, Engineering Foundation Conferences. 1988
- [6] 송 길영, 김 세영, 최 상규, “효율적인 조류다근 계산법”, 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, 1990/7, P 158-161.
- [7] 송 길영, 김 세영, 김 용하, “전압백터의 유효분 감도 지표 dP/de 수정법에 의한 견고한 전압안정도 평가에 관한 연구”, 전기학회논문지, 1996/1, P1-8.