

효율적인 전압안정도 한계점 계산에 관한 연구

송길영 * 김세영 ① 최상규 **
 * : 고려대학교 ** : 안양전문대

Effective Calculation Method Finding the Limit of Voltage-Stability

K. Y. SONG * S. Y. KIM * S. G. CHOI **
 * : KOREA UNIVERSITY ** : ANYANG COLLEGE

abstract

Recent, problems on the voltage-instability have been paid attention in power system and methods to find the limit of voltage-stability, concerned with these problems, were developed. However, these methods are short of precision on the limit of voltage-instability. Here, using the second-order load flow⁽⁸⁾, constraint equation($d P_i/d V_i = 0$) and its partial differentiations are precisely formulated. Also, since the Taylor series expansion of power flow equations terminates at the second - order terms, partial differentiations of constraint equation, that is Hessian, are constant. Then, Hessian matrix are calculated once during iteration process.

1. 서론

송전 선로의 과중한 부담 그리고 불충분한 무효전력의 공급으로 인해 전력 계통에서 전압 불안정 현상 또는 전압붕괴와 같은 전압 안정도 문제가 대두되고 있다. 또한 대규모 전력계통이 빈번하게 전압 안정도 한계부근에서 운전됨에 따라 전압불안정 현상에 대한 문제는 매우 중요하고 긴급한 문제 중의 하나로 평가되고 있다. 이러한 전압안정도 문제에 대해 현재 연구가 활발히 진행되고 있는데 그 흐름을 보면 다음과 같다. 먼저, 근사적으로 전압안정도 지표를 계산하는 방법에는 VCP(1) (Voltage Collapse Proximity Index)와 VIP(2) (Voltage Instability Proximity Index) 등이 있다.

한편, 문헌(3)에서는 조류다근 계산법에서 구한 높은해전압과 낮은해 전압에 대한 $d V_i/d P_i$ (P_i : 총부하 수요)를 계산하여 두 기울기가 만나는 점을 전압 안정도 한계점으로 보고 있다. 하지만 조류 다근을 기반으로한 계산법은 일반적으로 계산 시간이 길다는 단점이 있다. 또한, 문헌(4)에서는 호모토피(연속 변형)법을 통해 효율이 좋은 P-V 곡선과 송전 한계점을 구하였고 문헌(5)는 전압 안정 한계점에서 자코비안 행렬이 singular 하다는 성질을 이용하여 한계점을 계산하였다.

최근에, on-line 전압안정도 감시를 위해 신속한 전압안정 한계점 계산법이 제시되고 있는데, 문헌(6)에서는 $d P_i/d V_i = 0$ 의 제약조건식을 조류 계산식에 대입하여 전압 안정 한계점을 직접 구하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 방법은 $d P_i/d V_i = 0$ 식에 대한 편 미분치를 계산할때 근사화된 식을 사용하여 정확성이 부족한 단점이 있다.

본 논문에서는 $d P_i/d V_i = 0$ 식과 이 식의 상태변수 벡터에 대한 편 미분치(Hessian)를 비선형성을 보존한 직각좌표 조류 계산식(8)으로 정식화시킴으로써 보다 정확하게 유도하였다. 그리고 직각좌표 조류 방정식에 대한 Taylor series 전개는 2 차항에서 종결된다. 그러므로, 제약조건식($d P_i/d V_i = 0$)의 편 미분(Hessian)치가 상수로 고정되어 단 1 회의 계산만이 필요하였다. 제안한 알고리즘을 5-모선 계통과 KEPCO 345 KV 계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 본론

2-1. 가정

정적인(Static)전압 안정도 한계점은 다음과 같은 정 전력(Constant Power) 부하특성의 가정하에서 계산된다.

- 1) 각 모선의 역률은 상수로 유지시킨다.
- 2) 발전기 모선 전압의 크기는 상수로 유지한다.
- 3) 각 모선의 부하수요는 총 부하수요에 비례하여 변화한다.
- 4) 각 발전기의 유효전력 출력은 Slack 발전기 모선을 제외하고 같은 비율로 증가하고 송전손실 증분은 Slack 발전기에 의해 흡수된다.

2-2. 정식화

전력 계통의 전압 안정 한계는 전력 조류 계산의 쌍을 이루는 근접 2근 즉, 높은해 전압과 낮은해 전압이 일치할 때라 할 수 있다. 따라서, 이러한 중근해를 구하는 것은 (1) 식을 만족시키는 것과 동일하다.

$$d F_i(X) / d X_i = 0 \quad (1)$$

여기서, X_i : i 부하모선의 상태변수 벡터
 F_i : i 부하모선의 P 또는 Q 함수

그러므로, 전압 안정 한계점을 구하기 위해서는 종래의 조류 방정식에 임의의 부하 모선에 대한 (1) 식을 대입시켜 이러한 제약 조건식이 만족될때까지 반복계산한다. 즉, 한계점을 구하기 위한 전력조류 방정식은 다음과 같다.

$$P_i = C \cdot P_i \quad (i \in G, L \text{ \& } i \neq k) \quad (2)$$

$$|V_i|^2 = V_i \cdot S_P \quad (i \in G) \quad (3)$$

$$Q_i = C \cdot Q_i \quad (i \in L) \quad (4)$$

$$d P_k/d V_k = 0 \quad (i = k) \quad (5)$$

여기서, L : 부하 모선들의 집합
 G : Slack 발전기를 제외한 발전기 모선의 집합
 k : $d P_k/d V_k = 0$ 을 제약조건으로하는 부하모선
 C : 총 수요 변화율 (P_{r+1}/P_r)

먼저, 전압안정도 한계점을 구하는 반복계산에서 매 반복마다 총 수요가 변화하게되는데 이러한 총수요 변화에 대응하는 발전기 출력과 부하 전력의 변화를 고려해야한다. 여기서는 간편성을 위해 총수요 변화율(C)를 도입하여 부하모선의 P와 Q 그리고 발전기 모선의 P 지정치에 이 계수를 곱해주어 부하모선의 역률을 다음과 같이 일정하게 유지시키면서 총수요 변화분을 각 지정치에 적절히 분배한다. 즉, 초기상태에대한 C는 1.0 이다.

$$P_i \cdot F_i = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{CP}{\sqrt{(CP)^2 + (CQ)^2}} = \frac{CP}{C \sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

위의 식(2)-(5)은 총 부하수요 증가 (\$\Delta P_T\$)에 따라 변화하고 있기 때문에 \$d P_T/d V_k = 0\$와 \$d P_k/d V_k = 0\$의 제약조건식을 전력조류 방정식의 \$P_k\$ 식에 대치시켜 한계점을 계산할때의 차이점은 \$\Delta P_T\$와 \$\Delta P_k\$에 대한 크기의 차이 뿐이고(즉, \$\Delta P_k = m \Delta P_T\$) \$\Delta V_k\$의 값은 동일하다. 그러므로, (5)식은 다음과 같이 설명할 수 있다.

-현재 운전상태에서 총 부하수요가 정적으로 증가하고 있을때 임의의 부하 모선 \$k\$에서 \$d P_k/d V_k = 0\$ 즉, 전압 안정 한계점이면 \$d P_T/d V_k = (d P_k/d V_k)/m = 0\$이며, 총 수요에 대하여도 전압 안정 한계점이다.

2-3. \$d P_k / d V_k = 0\$의 계산

제약조건식에 대해 비선형성을 보존한 직각좌표 조류계산식을 대입하면 다음과 같다. 즉 상태변수 \$X\$는 \$e\$와 \$f\$로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d P_k}{d V_k} &= \frac{\Delta P_k}{\Delta V_k} = \frac{P_k(X + \Delta X) - P_k(X)}{\Delta V_k} \\ &= \frac{P_k(X) + J_k \Delta X + P_k(\Delta X) - P_k(X)}{\Delta V_k} \\ &= \frac{J_k \Delta X + P_k(\Delta X)}{\Delta V_k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, \$J_k\$는 Jacobian 행렬의 \$P_k\$에 해당하는 행벡터

총 수요가 \$\Delta P_T\$만큼 변화하였을때 각 모선에서의 전력 변화량은 총수요 변화율 \$C = (\Delta P_T + P_{T0})/P_{T0}\$를 사용해 발전기 모선에서는 \$\Delta P_i = (C-1) P_i^{sp}\$이며, 부하모선에서는 \$\Delta P_i = (C-1) P_i^{sp}\$, \$\Delta Q_i = (C-1) Q_i^{sp}\$ (\$sp\$: 지정치)이다. 따라서, (7)식에서 필요한 상태변수 \$X\$의 변화량 \$\Delta X\$는 다음 식으로부터 계산한다. (7)식의 0 요소는 발전기 단자 전압의 변화분이 없다는 것을 의미한다.

$$[J_{old}] \cdot [\Delta X]^t = [\Delta P_k \quad \Delta P_i \quad \Delta Q_i \quad 0]^t \quad (8)$$

여기서, \$J_{old}\$는 종래의 Jacobian 행렬

2-4. \$d P_k / d V_k\$의 편미분치의 계산

\$d P_k/d V_k=0\$의 제약조건식을 전력조류 방정식에 포함시켜 총 수요에 대한 전압안정 한계점을 구하기 위해서는 \$d P_k/d V_k=0\$식의 상태변수에 대한 편미분치를 계산해야 한다. 그리고, \$P_k\$식 대신에 \$d P_k/d V_k=0\$식이 대치된 Jacobian 행렬을 \$J_{new}\$이라하는데 이 \$J_{new}\$행렬에는 \$d P_k/d V_k=0\$식에 대한 편 미분행이 포함되어 있다.

한편, (7)식의 \$P_k(\Delta X) (=1/2 H \Delta X^2)\$항은 직각좌표형식의 2차 편미분(Hessian)이기 때문에 상수항 만이 남게된다. 그러므로 제약조건식에 대한 편 미분치를 계산할 때는 이 항을 무시할 수 있어 근사화를 거의 포함하지 않는다. 그리고, 반복계산에서 \$\Delta X^r\$는 수렴상태에 접근하면 충분히 작아지므로 \$X^{r-1}\$이 \$X^r = X^{r-1} + \Delta X^r\$에 변화하더라도 \$[\Delta X]^t / \Delta V_k\$의 변화는 작아서 일정해진다고 보면 \$d P_T/d V_k\$의 편 미분치는 다음과 같은 식으로도 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{d P_k}{d V_k} \right] \right] &= \left[\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{\Delta P_k}{\Delta V_k} \right] \right] = \left[\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{\partial P_k}{\partial X} \right] \frac{[\Delta X]^t}{\Delta V_k} \right] \\ &\approx \left[\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{\partial P_k}{\partial X} \right] \frac{[\Delta X]^t}{\Delta V_k} \right] \\ &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta V_k \end{bmatrix}^t \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_1^2} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_1 \partial e_M} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_1 \partial f_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_1 \partial f_M} & \frac{\Delta e_1}{\Delta V_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_M \partial e_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_M^2} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_M \partial f_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_M \partial f_M} & \frac{\Delta e_M}{\Delta V_k} \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_1 \partial e_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_1 \partial e_M} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_1^2} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_1 \partial f_M} & \frac{\Delta f_1}{\Delta V_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_M \partial e_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_M \partial e_M} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_M \partial f_1} & \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_M^2} & \frac{\Delta f_M}{\Delta V_k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, \$M\$: Slack 발전기모선을 제외한 모든 모선

제안한 방법에서는 \$d P_k/d V_k=0\$식의 편미분치를 계산할때 필요한 Hessian 행렬이 다음 식과 같이 상수로 고정되므로 전압안정 한계점을 구하기위한 반복 조류계산식에서 단 1회의 계산만으로 충분하다. 그리고 Hessian 행렬의 각 요소는 다음과 같은 계통정수만으로 구성된 식에 의해 계산할 수 있다.

i) \$H_1\$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_i^2} &= \begin{cases} 2 G_{kk} & (i=k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases} \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_i \partial e_j} &= \begin{cases} G_{kj} & (i=k, j \neq k) \\ G_{ik} & (i \neq k, j=k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \end{aligned}$$

여기서, \$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij}\$

ii) \$H_2\$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_1 \partial f_i} &= \begin{cases} 0 & (i=k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases} \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_i \partial f_j} &= \begin{cases} -B_{kj} & (i=k, j \neq k) \\ B_{ik} & (i \neq k, j=k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \end{aligned}$$

iii) \$H_3\$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_i \partial e_i} &= \begin{cases} 0 & (i=k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases} \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial e_i \partial f_j} &= \begin{cases} B_{kj} & (i=k, j \neq k) \\ -B_{ik} & (i \neq k, j=k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \end{aligned}$$

iv) \$H_4\$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_i^2} &= \begin{cases} 2C_{kk} & (i=k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases} \\ \frac{\partial^2 P_k}{\partial f_i \partial f_j} &= \begin{cases} C_{kj} & (i=k, j \neq k) \\ C_{ik} & (i \neq k, j=k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \end{aligned}$$

2.5 조류 반복 계산식

제 \$r\$ 번째의 수정 반복 계산에서 상태변수 \$X^{r-1}\$를 수정해서 새로운 \$X^r\$를 계산할때 (2), (4)식의 우변치를 다음과 같이 정수로 고정한다.

$$\begin{aligned} P_i(X) &= P_i^{sp,r} & (i \in G, L \ \& \ i \neq k) & \quad (10) \\ Q_i(X) &= Q_i^{sp,r} & (i \in L) & \quad (11) \\ d P_k(X) / d V_k &= 0 & (i=k) & \quad (12) \end{aligned}$$

여기서, 수정 반복 계산은 $d P_k / d V_k$ 가 0 이되는 방향, 즉 전압 안정 한계점 쪽으로 X^{r-1} 이 변화되고 있으므로 총부하 수요 $P_T(X^r)$ 의 값은 $P_T(X^{r-1})$ 의 값보다도 감소(부하전력으로서의 증가)하고 있다. 이때 총 수요 변화율 C 를 각 부하 모선의 P 와 Q , 발전기 모선의 P 에 곱해주면 새로운 지정치 $P^{sp,r}$ 과 $Q^{sp,r}$ 은 다음과 같이 재 계산할 수 있다.

$$P_i^{sp,r} = C^r \cdot P_i^{sp,r-1} \quad (i \in G, L) \quad (13)$$

$$Q_i^{sp,r} = C^r \cdot Q_i^{sp,r-1} \quad (i \in L) \quad (14)$$

$$C^r = P_T(X^r) / P_T(X^{r-1}) \quad (15)$$

그러므로, 상태 변수에 대한 새로운 조정은 아래의 식을 사용하여 (13)-(15)식에서 계산된 지정치가 만족되도록 계산한다.

$$[X^r]^t = [X^{r-1}]^t + [J_{new}^{-1}] \cdot [\Delta P_g \Delta P_k / \Delta V_k \Delta P_l \Delta Q_l |\Delta V_g|^2]^t \quad (16)$$

2.6 계산 알고리즘

- STEP 1 - 상태변수 X 의 초기치 X^0 에 대해 상태추정의 결과를 설정하고 초기 ΔP_T 를 지정한다.
- STEP 2 - 종래의 Jacobian행렬 $[J_{old}]$ 를 구한다.
- STEP 3 - (8)식을 통해 모선 k 에 대한 $d P_k / d V_k$ 를 계산한다.
- STEP 4 - 지정치에 대한 Mismatch를 계산하여 수렴되지 않으면 다음 STEP으로가고 수렴하면 계산을 종료시킨다.
- STEP 5 - $d P_k / d V_k$ 의 편미분치를 계산하여 $[J_{new}]$ 를 구한다.
- STEP 6 - $X^r = X^{r-1} + \Delta X^r$ 에 의해 새로운 상태변수를 구한다.
- STEP 7 - 새로운 상태변수에 의해 C^r 를 계산하고 이 계수를 통해 새로운 지정치를 구한다. STEP 2로 돌아간다.

제안한 계산 알고리즘의 순서도는 다음과 같다.

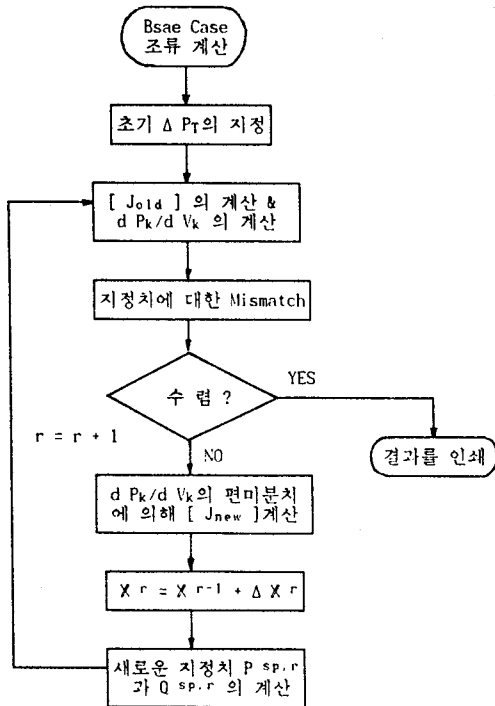


그림 1. 제안된 계산 알고리즘의 순서도.

3. 적용 결과

그림 2 와 3 은 각각 5-모선 계통과 KEPCO-345 kv 계통도 이다.

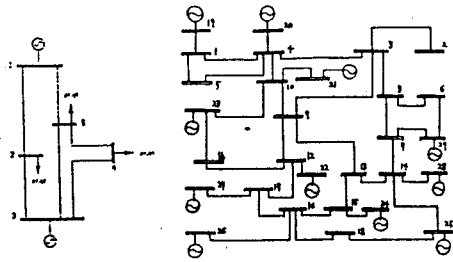


그림 2. 5-모선 계통 그림 3. KEPCO-345 kv 계통

그림 4 는 문헌(7)의 조류다근 계산법으로구한 5-모선 계통의 $P_T - V_4$ 곡선인데 높은해 전압과 낮은해 전압이 일치하는 점이 바로 정적인 전압안정도 한계점이다. 여기서 구한 한계점을 제안한 방법에서 구한 한계점과의 비교대상으로 하고있다.

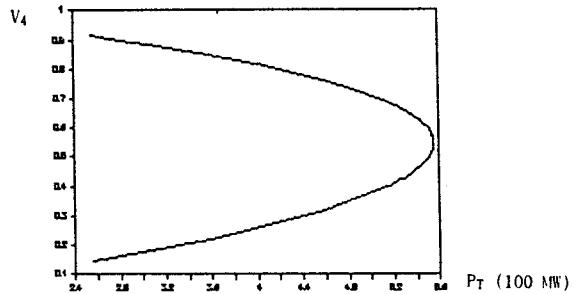


그림 4. 5-모선 계통의 $P_T - V_4$ 곡선

먼저, 문헌(7)의 조류 다근법으로 구한 높은해 전압과 낮은해 전압이 일치하는 정적인 전압 안정도 한계점과 한계점에서의 부하 모선 상태변수들의 실제값, 종래의 방법(6)과 제안한 방법 둘다 초기 부하수요 증가량 (ΔP_T)을 10 Mw로 설정한 계산 결과를 표 1 에 보인다. 5-모선 계통의 Base Case N-R 조류계산의 반복회수는 4 회이다.

표 1. 실제 한계점과 계산 한계점의 비교 (5-모선)

부 하	실제 한계점		종래의 방법(6)		제안된 방법	
	V	θ (rad)	V	θ (rad)	V	θ (rad)
2	0.8411	-0.3096	0.8409	-0.3119	0.8411	-0.3096
4	0.5456	-0.6633	0.5294	-0.6811	0.5455	-0.6633
5	0.7959	-0.2729	0.7907	-0.2757	0.7959	-0.2729
한계점	555.3 MW		554.88 MW		555.31 MW	
반 복	조류다근 계산		31 회		18 회	

표 1 에서 알 수 있듯이, 제안한 방법이 한계점과 한계점에서의 상태 변수들이 훨씬 정확하고 계산 반복 회수도 더 작음을 알 수 있다. 5-모선 계통의 Base Case 에 대한 총 부하수요는 255 MW 이다.

KEPCO -345 kv 계통의 계산 예는 다음과 같은 3 Case가 있다. Base Case 에 대한 조류계산 반복회수는 5 회 이다.

- i) CASE 1 : 경부하 운전상태 (Base Case)
(총 부하 수요 - 10930.66 MW)
- ii) CASE 2 : 모든 부하의 무효전력 5 % 증가
(총 부하 수요 - 10930.66 MW)
- iii) CASE 3 : 부하모선 2 의 유효전력 10 % 증가
(총 부하 수요 - 11023.15 MW)

효율적인 전압안정도 한계점 계산에 관한 연구

표 2. KEPCO 345 Kv 계통 (CASE 1)

부하모선	실제 한계점		제안된 방법	
	V	0 (rad)	V	0 (rad)
1	0.97688	-1.47379	0.98025	-1.48851
2	0.71594	-1.52271	0.71381	-1.54013
3	0.73468	-1.34521	0.73272	-1.36139
4	0.90287	-1.41962	0.90504	-1.43444
5	0.92667	-1.46744	0.92920	-1.48210
6	0.90049	-0.18382	0.89423	-0.18605
7	0.90002	-0.24577	0.89447	-0.25037
8	0.77720	-0.48338	0.77057	-0.49036
9	0.83244	-0.79034	0.83233	-0.80442
10	0.92141	-0.83511	0.92428	-0.84940
11	0.95911	-0.46060	0.96793	-0.47597
12	0.95087	-0.46046	0.95210	-0.47392
13	0.83421	-0.54823	0.82981	-0.56086
14	0.96199	-0.26404	0.95964	-0.27287
15	0.98607	-0.15484	0.97816	-0.16356
16	0.99106	-0.17661	0.98814	-0.18675
17	0.96620	-0.34458	0.97158	-0.35672
18	1.00240	-0.15002	0.99991	-0.15971
한계점	21025.40 (MW)		21050.78 (MW)	

표 3. KEPCO 345 Kv 계통 (CASE 2)

부하모선	실제 한계점		제안된 방법	
	V	0 (rad)	V	0 (rad)
1	0.97735	-1.44008	0.97587	-1.48123
2	0.72556	-1.48395	0.71083	-1.53181
3	0.74376	-1.31188	0.72994	-1.35265
4	0.90491	-1.38646	0.90060	-1.42691
5	0.92807	-1.43383	0.92461	-1.47477
6	0.90428	-0.18221	0.89899	-0.18343
7	0.90423	-0.24093	0.89831	-0.24602
8	0.78614	-0.47571	0.77402	-0.48371
9	0.83442	-0.76973	0.82797	-0.79520
10	0.92281	-0.81194	0.91973	-0.84072
11	0.95815	-0.44275	0.95719	-0.46515
12	0.95087	-0.44332	0.94885	-0.46447
13	0.83301	-0.53306	0.82870	-0.55127
14	0.96195	-0.25267	0.96052	-0.26588
15	0.98584	-0.14151	0.98522	-0.15773
16	0.99059	-0.16325	0.99013	-0.17956
17	0.96531	-0.32943	0.96436	-0.34782
18	1.00206	-0.13719	1.00181	-0.15293
한계점	20921.55 (MW)		20935.01 (MW)	

표 4. KEPCO 345 Kv 계통 (CASE 3)

부하모선	실제 한계점		제안된 방법	
	V	0 (rad)	V	0 (rad)
1	0.97878	-1.43958	0.97750	-1.47494
2	0.72430	-1.50458	0.71130	-1.54647
3	0.74486	-1.32060	0.73276	-1.35586
4	0.90858	-1.38786	0.90488	-1.42265
5	0.93123	-1.43354	0.92824	-1.46873
6	0.90444	-0.18266	0.89984	-0.18367
7	0.90461	-0.24803	0.89943	-0.25252
8	0.78603	-0.47960	0.77548	-0.48647
9	0.84389	-0.78515	0.83840	-0.80727
10	0.92774	-0.82921	0.92514	-0.85421
11	0.96259	-0.46988	0.96178	-0.48953
12	0.95585	-0.46955	0.95414	-0.48812
13	0.84639	-0.54841	0.84279	-0.56432
14	0.96527	-0.27444	0.96404	-0.28615

15	0.98859	-0.17314	0.98808	-0.18751
16	0.99304	-0.19369	0.99266	-0.20813
17	0.96949	-0.35648	0.96869	-0.37269
18	1.00356	-0.16749	1.00335	-0.18143
한계점	20491.20 (MW)		20501.27 (MW)	

KEPCO 345 Kv 계통의 3 CASE 에 대한 반복회수는 각각 32, 28, 28회 이다. 표 2, 3, 4 에서 알 수 있듯이 부하모선에서의 무효전력의 변화(역류의 변화)에 따라 현재 운전상태에 대한 총 부하 수요가 같을지라도 한계점이 다르게 되고 부하 모선에서 유효전력의 소비가 증가할때에도 한계점이 변화하게 된다. 일반적으로 현재 운전상태에서 부하 모선의 유효전력 또는 무효전력 소비가 증가할수록 계통이 붕괴되는 정적인 전압안정도 한계점은 증가 상태 전 보다 가까워진다.

4. 결론

본 논문에서는 $d P_k / d V_k = 0$ 의 제약조건을 비선형을 보존한 직각좌표 전력조류 방정식으로 정식화하여 정확한 전압안정도 한계점을 구하는 방법을 제시하였고 5 - 모선과 KEPCO 345 Kv 계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

1. 식 $d P_k / d V_k = 0$ 와 이 제약조건식의 상태변수에 대한 편미분치를 비선형성을 보존한 직각 좌표 조류계산식을 사용하여 더 정확히 정식화하였다.
2. 조류 방정식에 대한 Taylor series expansion이 2 차항에서 종결되기 때문에 제약조건식의 편 미분치 계산에서 필요한 Hessian 행렬이 상수로 고정되어 단 1 회 만의 계산으로 충분하였다.
3. 발전기 제약조건 그리고 부하의 동특성을 고려한 전압안정도 한계점 계산법과 계산된 한계점을 실제 운전에서 필요한 전압안정도 감시제어에 적용하는 연구가 필요하다.

참고문헌

1. J. Carpentier, R. Girard and E. Scano : " Voltage Collapse Proximity Indicators computed from an Optimal Power Flow ", Proc. PSCC VIII, P671 (1984)
2. 橋本, 餘利野, 田村 : " 電力系統에서의 電壓安定性 余裕의 常時 監視 ", 電學論 B, 108 卷 65 號, (昭 63-2)
3. Akihiko Yokoyama, Yasuji Sekine : " A Static Voltage stability Index based on Multiple Load Flow Solutions ", Engineering Foundation Conferences, 1988.
4. Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, Tsutomu Watanabe : " Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.2, May 1991.
5. Ferando, I. Alvarada, Tay Ho Jung : " Direct Defection of Voltage Collapse Conditions ", Engineering Foundation Conferences, 1988.
6. 鈴木守, 棚木堅 : " 電力系統의 電壓安定限界的 直接解法 ", 電學論 B, 110 卷 11 號, 平成 2 年.
7. Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, Isutomu Watanabe : " A Method For Finding a Pair of Mutifile Load Flow Solutions in Bulk Power Systems ", IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. 5, No. 2, May 1990.
8. S. Iwamoto, Y. Tamura : " A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1978.
9. V.H. Quintana, N. Muller : " Studies of Load Flow Methods in Polar and Rectangular Coordinates ", Electric Power Systems Research, 20 (1991) 225-235.