

전압벡터의 유효분 감도지표 dP/de 수정법에 의한 견고한 전압안정도 평가에 관한 연구

論 文
45-1-1

Robust Algorithm for Estimating Voltage Stability by the Modified Method of Sensitivity Index dP/de of Real Value on Voltage Vector

宋吉永* · 金世榮** · 金龍河***
(Kil-Young Song · Sae-Young Kim · Yong-Ha Kim)

Abstract - Recently, much attention has been paid to problems which is concerned with voltage instability phenomena and much works on these phenomena have been made. In this paper, by substituting $dP_k/d e_k$ ($\hat{v} = e + j f$) for P_k in conventional load flow, direct method for finding the limit of voltage stability is proposed. Here, by using the fact that Taylor series expansion in ΔP_k and ΔQ_k is terminated at the second-order terms, constraint equation ($dP_k/d e_k = 0$) and power flow equations are formulated with new variables Δe and Δf , so partial differentiations for constraint equation are precisely calculated. The fact that iteratively calculated equations are reformulated with new variables Δe and Δf means that limit of voltage stability can be traced precisely through recalculation of Jacobian matrix at $e+\Delta e$ and $f+\Delta f$ state. Then, during iterative process divergence may be avoided. Also, as elements of Hessian matrix are constant, its computations are required only once during iterative process. Results of application of the proposed method to sample systems are presented.

Key Words : Voltage Stability, $dP_k/d e_k = 0$, Hessian Matrix, P - V Curve

1. 서 론

최근, 전압불안정 현상과 밀접한 관련이 있는 계통사고 이후에 전압안정도 문제는 전력계통에 중요한 관심사가 되고 있다. 대표적인 사고로서 80년대 중반 미국, 유럽에서의 전압붕괴사고 특히, 1987년 7월 일본 동경에서 발생한 대정전사고등을 들 수 있다. 이러한 전압불안정 현상은 주로 송전계통의 과중한 부하, peak시 급격한 부하 증가에 대해 부족한 VAR 공급, 송전선로 공급한계등에 의해 발생하고 심한 경우에는 계통이 붕괴하게 된다. 한편, 우리나라의 전력수요도 최근 크게 증가하고 있지만 계통확충이 사회적, 환경적인 이유로 인해 크게 부족한 실정이다. 이로인해 전력 공급에 대한 안정성과 이와 관련한 전압안정도를 평가 감시해야할 필요성이 대두되고 있다.

이러한 배경하에서 전압안정도 문제에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있는데 전압안정도 지표 계산법으로서 VCPI (Voltage Collapse Proximity Index) [1] 와 VIPI (Voltage Instability Proximity Index) [2] 등이 있지만 이들은 계통운용자가 쉽게 이해할 수 있는 물리적 양(Mw)이 아니다.

물리적인 양으로써 전압안정도를 평가하기위한 방법으로 문헌[3]에서는 조류대근 계산으로 구한 높은해와 낮은해 전압 각각에 대해 총 부하증가에 대한 전압 변화량 $dV_i/d P_T$ 를 계산하여 두 기울기가 교차하는 점을 한계점으로 결정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 on-line 으로 전압안정도를 감시할 수

있는 장점이 있지만 근사적으로 한계점을 계산하고 있다. 문헌[4]에서는 호모토피 연속변형(Homotopy Continuation)법을 통해 P-V 곡선과 송전 한계점을 구하였다. 그러나, 이 방법은 계통규모에 따라 상태변수 총 변화량에 대한 가정이 필요하고 계산시간도 비교적 긴 문제점이 있다. 문헌[5]는 전압 한계점에서 자코비안 행렬이 Singular하다는 성질을 이용하여 한계점을 계산하였지만 자코비안 행렬의 차원이 두배로 되는 단점이 있다. 이밖에, P, Q 증가에 대한 P_{loss} , Q_{loss} 감도가 한계점에서는 무한대가 되는 것을 이용하는 방법[6]등이 있다.

문헌[7]의 Saddle Node Bifurcation 법은 Saddle Point 즉, 한계점에서는 계통 파라미터(부하)의 미소량 변화시 운전점이 안정, 불안정의 두 방향으로 나누어진다는 특성을 이용하여 전압안정도를 평가하고 있다. 유사한 방법으로 최근 각광받고 있는 에너지함수법[8]이 있는데 이것은 전압안정도 평가시 중요한 선로저항, 부하특성등을 정확히 고려하지 못하고 있다.

그리고, 문헌[9]는 제약조건식 $dP_i/d V_i=0$ 을 조류계산식에 대입하여 한계점의 직접계산법을 제안하였는데 이 방법은 $dP_i/d V_i$ 식의 Taylor-Series 전개 2 차항 이상을 무시하여 편미분값의 부정확성과 발산하는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 $dP_k/d e_k=0$ ($\hat{v}=e+jf$)의 제약조건식을 임의의 부하모선 k의 P_k 식에 대입하여 전압안정도 한계점을 계산하는 반복 조류계산법을 제안하였다. 여기서는, 전력방정식 P, Q에 대한 Taylor-Series 전개가 2 차항에서 상수항으로 종결된다는 사실을 이용하여 제약조건식과 조류방정식들을 변수 e 와 f 가 아닌 Δe 와 Δf 의 새로운 변수로 정식화함으로써 종래의 방법 ($dP_k/d V_k=0$) [9]에서 결점으로 지적된 제약조건식의 편미분치(자코비안 요소)를 정확히 계산할 수 있었다. 반복조류계산식을 변수 Δe 와 Δf 로 새롭게 정식화한다는 것은 부하의 미소량 증가(ΔP)시 변화된 상태($e+\Delta e$ 와 $f+\Delta f$)

*正會員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正會員 : 生産技術研究所 研究員
***正會員 : 仁川大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
接受日字 : 1995年 6月 2日
1차 修正 : 1995年 9月 12日
2차 修正 : 1995年 10月 31日

에서 다시 기울기를 구해 정확히 한계점을 찾아간다는 것을 의미하고 이로 인해 편미분치의 부정확으로 인한 발산을 방지할 수 있었다. 또한, 반복계산시 Hessian행렬이 상수로 되어 1 회 계산으로 충분하였고 제한한 알고리즘을 IEEE 6-모선 계통과 28 모선 계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 전압안정도 한계

전압안정도 한계는 부하가 증가했을때 더 이상 부하가 전력을 공급받지 못하는 상태를 의미하는데 이것은 각각 P-V 곡선상의 상,하반부에 존재하는 높은해 전압(안정 평형점)과 낮은해 전압(불안정 평형점)이 일치하는 식(1)의 상태이다.[9]

$$\frac{df_i}{dx_i} = 0 \tag{1}$$

여기서, f_i : 부하모선 i 의 P, Q, x_i : v, δ ($\dot{v} = v/\delta$)

식(1)은 전압안정도 한계점에서는 기울기 dP/dV 또는 $dP/d\delta$ 가 0 이 된다는 것을 의미한다. 즉, 전압안정도 한계점에서는 부하 P 의 증가시 전압크기 V 와 위상각 δ 의 변화가 무한대로 되어 기울기인 감도 dP/dV 와 $dP/d\delta$ 의 값이 0 이 된다. 이때 전압벡터 \dot{v} 를 직각좌표계($\dot{v} = e+jf$)로 표현한다면 한계점에서의 감도 dP/de 와 dP/df 의 값도 0 이 된다. 왜냐하면, 한계점에서는 부하증가에 대한 전압크기 V 와 위상각 δ 의 변화가 무한대로 되기 때문에 전압벡터를 직각좌표계($\dot{v} = e+jf$)로 표현했을 때의 유효분 성분 e 와 무효분 성분 f 도 무한대로 되기 때문이다. 한계점 이전의 상태에서는 동일한 부하 증가시 V 와 e 의 변화분 사이에는 전압벡터 표시(극좌표계 또는 직각좌표계)의 크기에 차이가 있을 뿐이다. 그러므로, 제한한 감도 dP/de 는 감도 dP/dV 와 물리적인 특성은 동일하며 의미는 부하증가시 전압벡터의 유효분 감도지표가 된다. 제한한 방법은 전압벡터의 유효분 감도지표 dP/de 값이 0 이 될때 까지 반복 계산하여 전압안정도 한계점을 구하도록 하였다.

2.2 한계점 계산의 정식화

제약조건 $dP_k/d e_k=0$ 을 임의의 부하모선 k의 P_k 식에 대입해서 직접 전압안정도 한계점을 구하기 위해서는 반복 조류계산식을 정식화하여야 한다. 먼저, 제약조건식을 정식화하기 위해서 부하모선 k 에 대한 ΔP_k 의 Taylor-Series 전개를 하면 다음과 같이 최종항이 2 차 항에서 상수로 종결되고 식(2)에서 Taylor-Series 전개 2 차항에 해당하는 마지막 항은 P_k 식에 e_k, f_i 대신에 $\Delta e_k, \Delta f_i$ 를 대입한 식과 동일하다.[11]

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_1}\right)\Delta e_1 + \dots + \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}}\right)\Delta f_{n-1} + \\ &\frac{1}{2!} \left\{ \frac{\partial}{\partial e_1} \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_1}\right)\Delta e_1^2 + \frac{\partial}{\partial e_1} \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_2}\right)\Delta e_1\Delta e_2 \right. \\ &\left. + \dots + \frac{\partial}{\partial f_{n-1}} \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}}\right)\Delta f_{n-1}^2 \right\} \\ &= \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_1}\right)\Delta e_1 + \dots + \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}}\right)\Delta f_{n-1} \\ &+ P_k(\Delta e_1, \dots, \Delta e_{n-1}, \Delta f_1, \dots, \Delta f_{n-1}) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, 식(2)의 양변을 Δe_k 로 나누어 주면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_k}{\Delta e_k} &= \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_1}\right)\frac{\Delta e_1}{\Delta e_k} + \dots + \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}}\right)\frac{\Delta f_{n-1}}{\Delta e_k} \\ &+ P_k(\Delta e_1, \dots, \Delta e_{n-1}, \Delta f_1, \dots, \Delta f_{n-1})/\Delta e_k \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)에서 ΔP_k 와 Δe_k 값이 총부하가 ΔP_T 만큼 미소량 증가했을때의 상태라고 한다면 식(3)은 식(4)와 동일하다고 볼 수 있다. 결국, 제약조건식은 식(3)과 같이 Taylor-Series 전개 최종항인 2 차항까지 모두 포함한 식으로써 정식화할 수 있고 제약식의 크기는 총부하 ΔP_T 증가시 부하모선 k 의 유효전력 변화량 ΔP_k 와 상태변수 변화량 Δe_k 로부터 계산된다.

$$\frac{dP_k}{de_k} \approx \frac{\Delta P_k}{\Delta e_k} \tag{4}$$

종래의 방법[9]은 제약조건식을 Taylor-Series 전개 1 차항까지만 고려하여 정식화함으로써 이에대한 편미분치의 정확성이 부족하다는 단점이 있었지만 제한한 방법에서는 제약조건식을 Taylor-Series 전개 최종항인 2 차항까지 모두 포함한 Δe 와 Δf 의 새로운 변수로 정식화하였기 때문에 제약조건식에 대한 편미분치의 부정확성에 대한 문제가 해결되었다. r 번째 반복시 제약조건식과 나머지 조류반복 계산식은 식(5)와 같다. 여기서는, 제약조건식 $\Delta P_k/\Delta e_k$ 의 크기를 계산할때 사용한 상태변수 변화량 $\Delta X = (\Delta e, \Delta f)$ 로 총부하의 미소증가시의 상태 $X+\Delta X$ 를 구한 다음 다시 이 상태에서의 기울기를 계산해서 정확하게 P-V 곡선상의 끝점인 한계점을 구해나가도록 하고 있다. 이때, 반복조류 계산식은 X 가 아닌 $\Delta X(\Delta e, \Delta f)$ 의 새로운 변수로 정식화되고 있기 때문에 결국, r 번째 반복계산시 ($X^{l+1}+\Delta X^r$)는 ΔX^r 에 대한 수정량 ΔX^{r+1} 를 계산해서 식(5)처럼 $X^r = (X^{r-1}+\Delta X^r)+\Delta X^{r+1}$ 로 상태변수를 수정한다.

$$P_i^r = P_i^{r-1} + [J_{i,1}, \dots, J_{i,2(n-1)}][\Delta e_1, \dots, \Delta f_{n-1}]^T + P_i(\Delta e_1, \dots, \Delta f_{n-1}) \quad (i=k)$$

$$Q_i^r = Q_i^{r-1} + [J_{i,1}, \dots, J_{i,2(n-1)}][\Delta e_1, \dots, \Delta f_{n-1}]^T + P_i(\Delta e_1, \dots, \Delta f_{n-1}) \quad (i=l)$$

$$V_i^{g,r} = V_i^{g,r-1} + [J_{g,i}, J_{g,2i}][\Delta e_i, \Delta f_i]^T + V_i^g(\Delta e_i, \Delta f_i) \quad (i=g)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta e_k}\right)^r &= \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_1}\right)\frac{\Delta e_1}{\Delta e_k} + \dots + \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}}\right)\frac{\Delta f_{n-1}}{\Delta e_k} \\ &+ P_k(\Delta e_1, \dots, \Delta e_{n-1}, \Delta f_1, \dots, \Delta f_{n-1})/\Delta e_k \end{aligned} \tag{5}$$

(l : 부하모선, g : 발전기모선, k : 임의의 부하모선)

식(5)로 정식화한 조류방정식을 Newton-Raphson 법으로 풀기 위한 자코비안요소 J_{ij}^r 는 각 식을 새로운 상태변수 Δe 와 Δf 로 편미분하여 식(6)과 같이 계산할 수 있다. (6)식에서 J_{ij} 는 종래의 자코비안 요소이고 $J_{ij}|_x$ 와 $J_{ij}|\Delta x$ 는 종래의 자코비안 행렬에 각각 X 와 ΔX 를 대입한 값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \partial P_i / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} + J_{ij} |_{\Delta \mathbf{x}} = J'_{ij} \quad (i \neq k) \\ \partial Q_i / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} + J_{ij} |_{\Delta \mathbf{x}} = J'_{ij} \quad (i = l) \\ \partial V_i^2 / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} + J_{ij} |_{\Delta \mathbf{x}} = J'_{ij} \quad (i = g) \end{aligned} \quad (6)$$

그리고, 제약조건식의 자코비안 요소 J'_{ij} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta e_i} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta e_k} \right) &= \begin{cases} (J_{ki} |_{\mathbf{x}} + \Delta f_k B_{ki}) / \Delta e_k \quad (i \neq k) \\ -[J_{k1}, \dots, J_{kj}] [\Delta \mathbf{X}]^T / \Delta e_k^2 \\ + [B_{k1}, \dots, B_{kn}] \Delta f_k / \Delta e_k \\ + G_{kk} - \Delta f_k^2 G_{kk} / \Delta e_k^2 \quad (i = k) \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial \Delta f_i} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta e_k} \right) &= \begin{cases} (J_{ki} |_{\mathbf{x}} + \Delta f_k G_{ki}) / \Delta e_k \quad (i \neq k) \\ (J_{kk} |_{\mathbf{x}} + 2 \Delta f_k G_{kk}) / \Delta e_k + \\ [G_{k1}, \dots, G_{kn}] \Delta f_k / \Delta e_k \quad (i = k) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

이러한 반복계산을 통해 초기 제약조건 ($\Delta P_k / \Delta e_k$) 의 크기가 점차 감소되어 수렴상태 (한계점) 에 접근하게 되었을때 이 상태에서 총부하 미소증가에 대한 ΔV_k 또는 Δe_k 의 값은 P-V 또는 P-e 곡선 성질(P-V 또는 P-e 곡선은 한계점에 접근할수록 동일한 부하변화 ΔP 에 대해 상태변수 변화량 ΔV 또는 Δe 는 급격히 커지게된다)상 초기상태에 비해 매우 커지게된다. 이러한 경우 $\mathbf{x} + \Delta \mathbf{X}$ 상태에서 다시 기울기를 구해 상태변수 수정량을 계산하게 되면 한계점의 상태변수값을 크게 벗어난 상태로 되는 문제가 발생한다. $\Delta P_k / \Delta e_k$ 가 0 이 되면 한계점이므로 제약조건식의 크기가 0 에 가깝게 되어 수렴상태에 접근하게 되거나 또는 초기상태 값에 비해 일정비율 이상 감소하게되면 $\Delta \mathbf{X} / \Delta e_k$ 는 일정해지는데 이 사실을 이용하여 제약조건식에 대한 편미분치는 식(9)로 나머지 조류계산식의 J 요소는 식(8)로 계산한다. 이때, 상태변수 수정량은 $\mathbf{x}^r = \mathbf{x}^{r-1} + \Delta \mathbf{x}^r$ 로 된다. 그리고, 전력방정식의 Taylor-Series 전개가 2 차항에서 상수로 종결되기 때문에 식(9)의 Hessian 행렬(H) 이 상수로 고정되어 1회의 계산 만으로 충분하였다.

$$\begin{aligned} \partial P_i / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} \quad (i \neq k) \\ \partial Q_i / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} \quad (i = l) \\ \partial V_i^2 / \partial \Delta x_j &= J_{ij} |_{\mathbf{x}} \quad (i = g) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta \mathbf{X}} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta e_k} \right) &= \frac{\partial}{\partial \Delta \mathbf{X}} \left(\left[\frac{\partial P_k}{\partial e_1}, \dots, \frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}} \right] \right. \\ &\quad \left. \left[\frac{\Delta e_1}{\Delta e_k}, \dots, \frac{\Delta f_{n-1}}{\Delta e_k} \right]^T + P_k(\Delta \mathbf{X}) / \Delta e_k \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial \Delta \mathbf{X}} \left[\frac{\partial P_k}{\partial e_1}, \dots, \frac{\partial P_k}{\partial f_{n-1}} \right] \left[\frac{\Delta e_1}{\Delta e_k}, \dots, \frac{\Delta f_{n-1}}{\Delta e_k} \right]^T \\ &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_3 & H_4 \end{bmatrix} \left[\frac{\Delta e_1}{\Delta e_k}, \dots, \frac{\Delta f_{n-1}}{\Delta e_k} \right]^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$H_i: \frac{\partial}{\partial e_i} \left(\frac{\partial P_k}{\partial e_i} \right) = \begin{cases} 2 G_{kk} & (i = k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} H_2: \frac{\partial}{\partial e_i} \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_j} \right) &= \begin{cases} G_{kj} & (i = k, j \neq k) \\ G_{ik} & (i \neq k, j = k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \\ H_3: \frac{\partial}{\partial e_i} \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_i} \right) &= \begin{cases} 0 & (i = k) \\ 0 & (i \neq k) \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial e_i} \left(\frac{\partial P_k}{\partial f_j} \right) &= \begin{cases} -B_{kj} & (i = k, j \neq k) \\ B_{ik} & (i \neq k, j = k) \\ 0 & (i \neq k, j \neq k) \end{cases} \end{aligned}$$

$$H_3 = H_2^T$$

$$H_4 = H_1$$

2.3 계통변화의 모의

한계점 계산시 부하 증가에 대한 부하의 P, Q 발전기의 P 출력분담에 대한 모의를 가정해야 하는데 이것은 다음과 같다.

- (1) 각 부하 모선의 역률은 일정하다고 본다.
- (2) 발전기 모선 전압의 크기는 일정하다고 본다.
- (3) 각 모선의 부하수요는 총 부하에 비례한다고 본다.
- (4) 각 발전기의 유효전력 출력은 Slack 발전기 모선을 제외하고 총 부하와 비례해서 변화한다고 본다.

여기서, 발전기 출력을 제한 가정처럼 일정비율로 변화시키지 않고 이것을 경제부하배분(ELD)에 의해 변화시켜 실제 통 운전방법에 따라 모델화 할 수도 있다.

2.4 반복 조류 계산식

제안한 방법에서는 반복시 변화하는 상태변수로 계산되는 식(13)의 총부하 변화율 S^r 에 따라 지정치가 재지정되는데 이것은 지정치가 한계점을 찾아가기 위해 변화된다는 것을 의미한다. 그리고, S^r 이 총부하 증가율을 의미하므로 지정치 P, Q는 S^r 값에 따라 변화시킬 수 있고 이때, 부하모선의 역률 $p.f. = P / \sqrt{P^2 + Q^2} = s^r \cdot P / \sqrt{(s^r \cdot P)^2 + (s^r \cdot Q)^2} = s^r \cdot P / s^r \cdot \sqrt{P^2 + Q^2}$ 로 일정하게 유지된다.

$$P_i^r = s^r P_i^{r-1} \quad (i \neq k) \quad (10)$$

$$Q_i^r = s^r Q_i^{r-1} \quad (i = l) \quad (11)$$

$$(\Delta P_k / \Delta e_k)^r = 0 \quad (i = k) \quad (12)$$

$$s^r = P_T(\mathbf{x}^r) / P_T(\mathbf{x}^{r-1}) \quad (13)$$

2.5 계산 알고리즘

- STEP 1** - 초기치 \mathbf{x}^0 와 총부하 증가량 ΔP_T^0 를 지정한다.
- STEP 2** - 자코비안 행렬 [J]를 계산한다.
- STEP 3** - 부하모선 k 에 대한 $(\Delta P_k / \Delta e_k)^r$ 를 계산한다.
- STEP 4** - 지정치의 편차를 계산하고 이것이 ϵ 보다 크면 STEP 5 로 가고 그렇지 않으면 계산을 종료한다.
- STEP 5** - 식(6),(7) 또는, 식(8),(9)로 [J']를 구한다.
- STEP 6** - r 번째 반복에서의 상태변수 수정량을 계산한다.
- STEP 7** - s^r 에 의해 지정치를 재 계산하고 STEP 2 로 간다.

2.6 알고리즘의 순서도

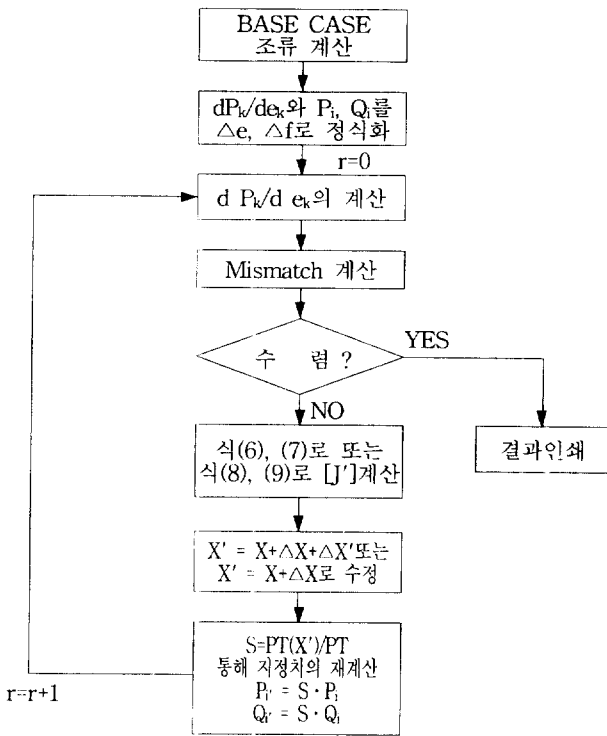


그림 1 제안된 계산 알고리즘의 순서도
Fig. 1 Flow Chart

3. 적용 결과

3.1. IEEE 6-모선 계통의 적용예

그림 2는 IEEE 6-모선 계통도이고 그림 3, 4 는 문헌[10]의 조류다단계계산법으로 구한 P-V 곡선과 P-e 곡선을 보여준다. 곡선 하반부의 낮은 전압은 실제적으로는 계통 운전상태가 될 수 없는 불안정 평형점이지만 이것과 높은 전압(안정 평형점)과 일치하는 점이 한계점이기 때문에 비교하여 한계점에 대한 검증할 수가 있다. 그러나, 조류다단계 계산법으로 구한 P-V 곡선과 한계점은 많은 계산시간과 시행착오에 의해 구해지기 때문에 이것을 통해 구하는 것은 비효율적이다.

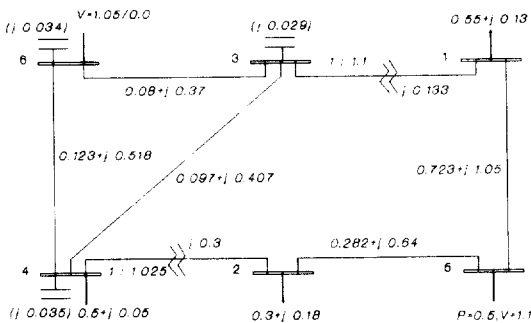


그림 2 IEEE 6-모선 계통도
Fig. 2 Diagram of IEEE 6-bus system

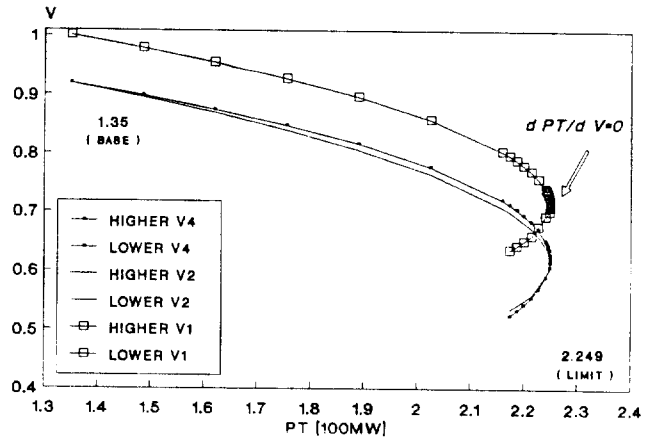


그림 3 P-V 곡선
Fig. 3 P-V Curves

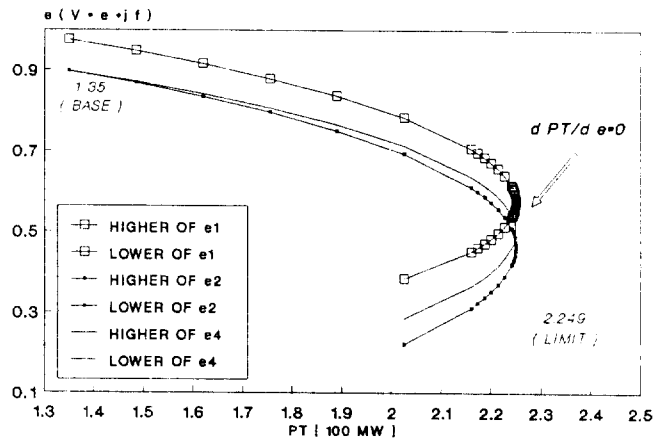


그림 4 P-e 곡선
Fig. 4 P-e Curves

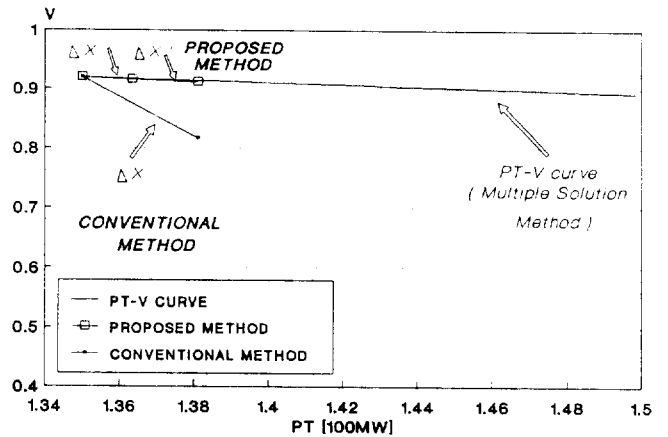


그림 5 한계점 계산시 수렴특성의 비교
Fig. 5 The comparison of convergence characteristics

종래의 방법 ($d P_k/d V_k = 0$) [9]에서는 한계점을 찾아나가기 위해 필요한 제약조건식에 대한 차코비안요소(기울기)는 제약조건식을 근사적으로 정식화하였기 때문에 부정확하다는 결

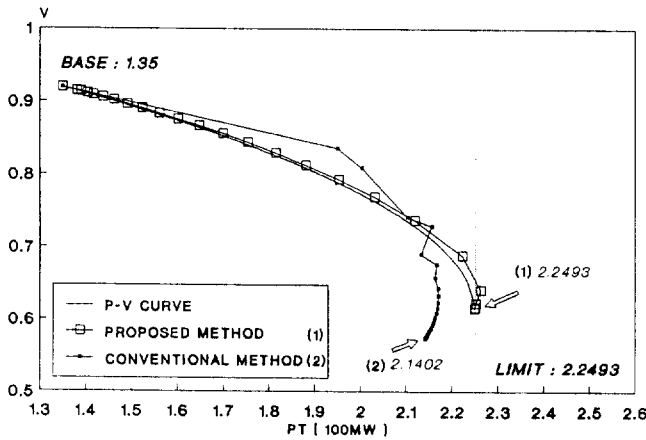


그림 6 전압안정도 한계점 계산결과
Fig. 6 Results of calculation on voltage stability limit

점을 지나고 있다. 그로인해, 종래의 방법은 초기 반복계산시 발산하거나 한계점으로 정확히 수렴하지 못하지만 제안한 방법에서는 dP/dV 의 제약조건식을 Taylor-Series 전개 최종항인 2 차항까지 Δe 와 Δf 로 정확히 정식화함으로써 자코비안 요소 계산시 근사화를 포함하지 않는다. 이 결과, 총 부하가 ΔP_T 미소량 증가시 상태 $X^0 + \Delta X$ 에서 기울기가 재 계산되므로써 P-V 곡선상의 끝점인 한계점으로 수렴해나간다는, 좋은 수렴특성을 가지게 되는데 이것을 그림 5 에서 보여주고 있다.

그림 6 은 조류다근 계산법으로 구한 실제 한계점(IEEE 6-모선 : 2.2493 [100 MW])으로 정확히 수렴되고 있음을 보이고 있다. 이에 반하여, 종래의 방법은 실제한계점으로 수렴하지 못하고 있는데 이것은 제약조건식의 근사화로 생긴 편미분치의 부정확성에 기인한다고 생각할 수 있다.

표 1 에서는 모선 4 와 모선 2 사이 선로의 변압기 Tap 값이 0.95~1.05 범위에서 변화되었을때 계산한 한계점 값을 나타내고 있는데 BASE CASE(Tap = 1.025)에서의 전압안정도 여유가 가장 큼을 알 수가 있다. 이것은 현재운전상태(BASE CASE)가 송전손실(P_{loss})을 최소로 하는 계통제어(V-Q 제어, 제어설비로써 변압기 탭이 고려된다면 전압조정을 통해 전압유지를 하는 것 이외에 송전손실을 최소화하는 목적의 역할을 할 수 있다.[13])를 변압기 탭에 대해서 시행한 결과라고 생각할 수 있다. 왜냐하면, 한계점에서는 P, Q 증가에 대한 송전손실 증분($\Delta P_{loss}/\Delta P$)이 무한대이므로 송전손실이 최소로되

표 1 변압기 Tap 변화시 전압한계점 변화
Table 1 Results on changing of transformer tap setting

변압기 Tap	전압 안정도 한계[100 MW]	전압 안정도 여유[100 MW]	비고
0.950	2.2467	0.8967	
0.975	2.2482	0.8982	
1.000	2.2490	0.8990	
1.025	2.2493	0.8993	BASE CASE
1.050	2.2490	0.8990	

표 2 발전기 단자전압 변화시 한계점 변화
Table 2 Results on changing of generator terminal voltage

발전기 V_t^0	전압 안정도 한계[100 MW]	전압 안정도 여유[100 MW]	비고
1.050	2.1787	0.8287	
1.075	2.2145	0.8645	
1.100	2.2493	0.8993	BASE CASE
1.125	2.2830	0.9330	
1.150	2.3157	0.9657	

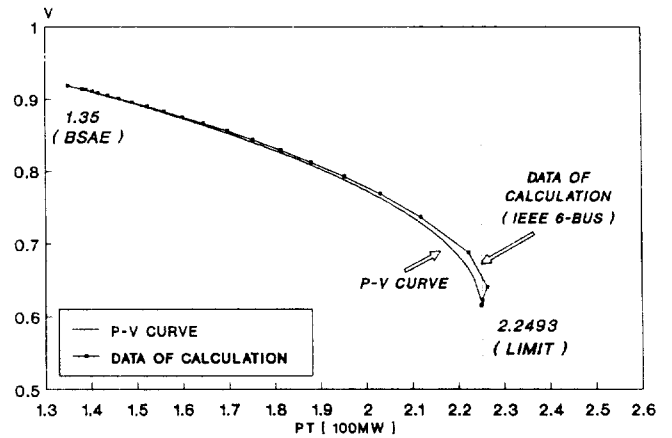


그림 7 최소자승법에 의한 P-V 곡선의 작성
Fig. 7 Results on P-V curve of Least-Square Method

는 변압기 탭 설정치는 전압안정도 여유를 가장 크게 하는 효과가 있다. 표 2 에서는 발전기 5 의 단자전압이 1.05~1.15 [P.U.]의 범위에서 변화할때의 한계점 계산치를 보여주는데 발전기 단자전압이 증가할때 전압안정도 여유도 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

이밖에, 반복계산시의 출력 데이터들(P^r 와 e^r , 또는 V^r)과 최종적으로 얻게되는 한계점결과를 최소자승법(Least-Square Method)의 입력데이터(한계점에 대한 데이터가 가장 중요하므로 이것의 가중치를 제일 크게 둔다.)로 사용하여 계통운용자가 전압안정도를 평가, 감시하는데 유용한 P-V곡선을 작성하였다. 그림 7 에서 최소자승법과 조류다근 계산법으로 구한 P-V 곡선을 비교하고 있는데 낮은해 영역까지 거의 동일함을 알 수 있다.

3.2 28 모선 계통의 적용 예

그림 8 은 28 모선의 계통도이다. 그리고, 28 모선계통에 대한 한계점 계산결과를 표 3 과 그림 9 에서 보이고 있다. 표 3 에서 반복시 계산되는 P_T (총부하)값이 실제 한계점 값(22.7028 [100 MW]) 보다 초과하고 있는 부분이 음영으로 되어있다. 이것은 반복계산시 먼저, 수정된 상태변수로 총부하 증가를 나타내는 S(총부하 변화율)값을 계산한다음 이것을 운전모의에따라 부하모선의 지정치 P 와 Q, 발전기모선의 P

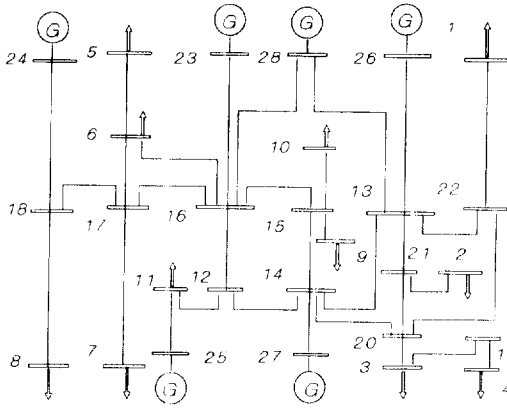


그림 8 28 모선 계통도
Fig. 8 Diagram of 28 bus system

표 3 전압안정도 한계점 계산 결과 (부하모선 1)

Table 3 Results of calculation on voltage stability limit

반복	P_r	$d P/d e$	$d P/d v$	v	e	ΔP	ΔQ
1	22.0580	0.4627	0.6907	0.9485	0.5903	0.0718	0.0576
2	22.5327	0.2785	0.3923	0.9237	0.5568	0.1121	0.0138
3	22.5805	0.1977	0.2701	0.8810	0.4920	0.2697	0.0702
4	22.7054	0.0477	0.0618	0.8698	0.4889	0.0171	0.0103
5	22.7108	-0.0131	-0.0165	0.8727	0.4939	0.0128	0.0007
6	22.7056	-0.0048	-0.0060	0.8738	0.4950	0.0045	0.0003
7	22.7037	0.0004	0.0005	0.8737	0.4948	0.0016	0.0001
8	22.7031	0.0002	0.0003	0.8736	0.4947	0.0005	0.0000
9	22.7028	0.0001	0.0001	0.8736	0.4946	0.0002	0.0000

는 지정치가 한계점으로 되돌아와 수렴하는 견고한 수렴특성을 보이고 있다.(한계점을 나타내는 제약조건식에 대한 지정치는 0으로 항상 일정하게 되고 다만, 반복계산시 지정치의 편차 (mismatch)를 계산하기 위해 $\Delta P/\Delta e$ 값이 재계산되는 상태변수들에 의해 변화하게될 뿐이다.)

그림 9 에서는 제안한 방법과 종래의 방법의 계산결과 그리고 고 조류다근 계산법으로 구한 실제 P-V 곡선등을 보여주고 있는데 종래의 방법은 한계점이라고 생각되는 부분 □에서 제약조건을 만족($d P_k/d V_k < \epsilon$)하지 못하기 때문에 수렴하지 못하고 낮은 영역으로 이동하다 결국에는 발산하고 있지만 제안한 방법에서는 한계점으로 정확히 수렴되고 있다.

3.3 KEPCO 345KV 계통의 적용 예

그림 10 은 KEPCO 345KV 의 계통도 이다.

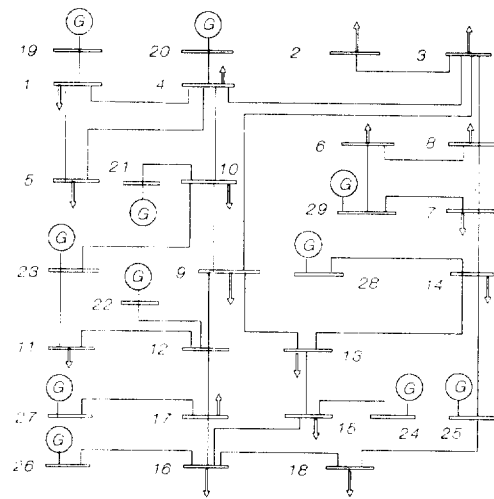


그림 10 KEPCO 345KV 계통도
Fig. 10 Diagram of KEPCO 345KV system

그림 11 에서는 KEPCO 345KV 계통의 한계점 계산결과를 보여주고 있는데 종래의 방법($d P_k/d V_k = 0$)은 실제 한계점 못미쳐 □ 부분으로 한계점을 찾아나갔는데 이 부분은 실

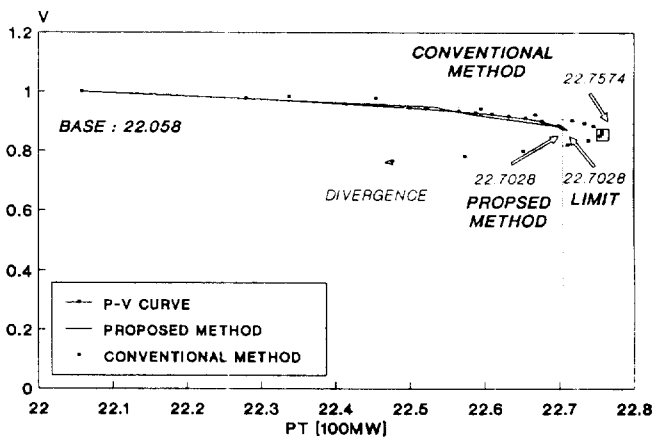


그림 9 전압안정도 한계점 계산결과
Fi9. 9 Results of calculation on voltage stability limit

에 재분담시켜 다시 지정하고 있는데 이 과정에서는 여기서 얻어진 지정치로 1 회 만 반복계산하고 있기 때문에 그 지정치를 상태변수가 정확히 표현하는 것은 아니기 때문이다. 그러나, 이때 재지정된 상태가 한계점을 벗어났어도 그 이후의 반복에서

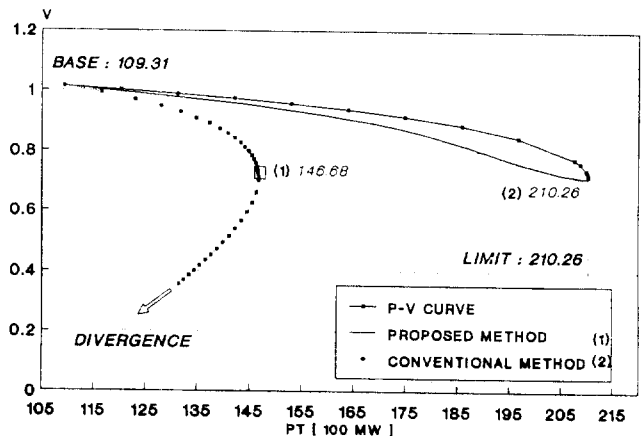


그림 11 전압안정 한계점 계산결과
Fig. 11 Results of calculation on voltage stability limit

표 4 한계점 계산시간의 비교
Table 4 Comparison of computing times

	제안한방법 (dP _k /de _k)	종래의방법 (dP _k /dV _k)	비고
IEEE-6 모선	1.0	2.174	실제한계점으로 수렴하지 못함
28 모선	1.0	1.667	그림 9 와 11 의 □ 를 한계점으로 고려 (실제는발산하므로 계산시간은 ∞)
KEPCO 345 KV 계통	1.0	2.064	

제, 제약조건식에 대한 조건 $d P_k/d V_k \leq \epsilon$ 를 만족하지 못하기 때문에 낮은 영역으로 이동하다 결국에는 한계점을 찾지 못하고 발산하게된다. 이러한 현상은 제약조건식의 근사적인 정식화로 생긴 편미분치의 부정확성 때문에 제대로 한계점으로 수렴하지 못한다고 생각할 수 있다. 시험계통으로 선정된 3 개의 계통의 특징을 살펴보면 IEEE 6-모선 계통과 KEPCO 345KV 계통은 현재운전상태(BASE CASE)와 안정한계점 사이가 벌어져있는 비교적 전압안정도에 여유가 있는 계통상태이고 28 모선의 운전상태는 안정한계점과 근접한 상태이다.(① IEEE 6-모선 : 현재운전점 - 1.35 [pu], 한계점 - 2.2493 [pu], ② 28 모선 : 현재운전점 - 22.058 [pu], 한계점 - 22.7028 [pu], ③ KEPCO 345 KV : 현재운전점 - 109.31 [pu], 한계점 - 210.26 [pu]) 즉, 이러한 계통상태에서 종래의 방법으로 전압안정도 한계점을 구하면 전압안정도 여유가 작은 경우는 실제 한계점을 벗어난 상태 쪽으로 찾아나가고 큰 경우는 실제 한계점을 못미치는 쪽으로 한계점을 찾아나가는 특성을 갖고 있다고 생각할 수 있다.

그리고, 표 4 에서는 종래의 방법과 제안한 방법을 3 개의 시험계통에 적용하여 얻은 계산시간의 비교결과를 보여주고 있는데 제안한 방법이 종래의 방법[9]($d P_k/d V_k = 0$)보다 계산소요시간 면에서 이점을 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 제안한 방법이 제약조건 $d P_k/d e_k$ 를 Δe 와 Δf 의 새로운 변수로 정식화하여 총 부하가 ΔP_T 만큼 미소량 변화했을때의 상태 $X^0 + \Delta X$ 에서 다시 기울기(J 행렬)를 재계산하므로써 신속한 수렴 특성을 가질수 있었고 반복계산시 필요한 Hessian행렬이 상수로 고정되어 1 회 만의 계산으로 충분하였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 $d P_k/d e_k=0$ 의 제약조건식을 임의의 부하모선 k 의 P_k 식에 대입하여 직접 전압안정도 한계점을 계산하는 반복 조류계산법을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 시험계통에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 조류계산식(직각좌표계)의 Taylor-Series 전개가 2 차항에서 상수항으로 종결된다는 사실을 이용하여 제약 조건식 $d P_k/d e_k$ 와 나머지 전력방정식을 변수 e 와 f 가 아닌 Δe 와 Δf 의 새로운 변수로 정식화하였기 때문에 종래의 방법[9]에서 결점으로 지적된 제약조건식에 대한 편미분치(자코비안행렬 요소)의 부정확성을 피할 수 있었다.

(2) 부하수요가 미소증가(ΔP)하였을때 변화된 상태(e + Δe 와 f + Δf)에서 기울기를 재계산하여 한계점을 찾아나가는 알고리즘을 이용함으로써 수렴특성을 향상시킬 수 있었다.

(3) 종래의 방법에서는 제약조건식의 편미분치 계산에서 필요한 Hessian 행렬요소(전력 방정식의 2 차 편미분 항)를 반복시 마다 재계산해야 되지만 제안한 방법에서는 이것이 2 차항에서 상수로 종결되어 단 1 회 계산 만이 필요하게 되었다.

(4) 부하변동에 대한 계통전압 특성이 심한 비선형인 ,발전기 무효전력 한계, 부하특성, 그리고, 무효전력 보상설비(Qc, SVC, TCUL 등)를 고려한 전압안정도 평가와 실제 계통 전압안정도 예방제어등에 적용하는 연구가 앞으로 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

[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 trans. on Power and Systems, Vol.6, No.2, May 1991.

[5] Fernando.L. Alvarado, & Tay Ho Jung, " Direct Detection of Voltage Collapse Conditions", Engineering Foundation Conferences, 1988.

[6] A. Semlyen et al., "Calculation of the Extreme Loading Condition of a Power System for the Assessment of Voltage Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No.1, pp.307-315, Feb. 1991.

[7] I.Dobson, "New Methods for Computing a closet Saddle Node Bifurcation and Worst Case Load Margin for Voltage Collapse", IEEE Trans. Power and Systems, Vol 8, No. 3, Aug. 1993.

[8] T. J. Overbye et al., " Improved Techniques for Power System Voltage Stability Assessment using Energy Methods", IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. 6, No. 4, Nov. 1991.

[9] 鈴木守, 柵木堅 : "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.

[10] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, & Isuto-mu 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.

[11] S. Iwamoto, Y. Tamura, " A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity ", IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. PAS-97, No.5, Sept/Oct 1978.

[12] V. H. Quintana, N.Muller, "Studies of Load Flow Meth-

ods in Polar and Rectangular Coordinates ", Electric Power Systems Research, 20 (1991) pp.225-235.
 [13] J. Qiu, S. M. Shahidehpour, "A New Approach for Mi

nimizing Power Losses and Improving Voltage Profile", IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. PWRS-2, No. 2, May 1987, pp.287-295.

저 자 소 개



송길영 (宋吉永)

1934년 5월 15일생. 1953년 서울대 공대 기계공학과 중퇴. 1958년 일본 무사시대 공대 전기공학과 졸업. 1961년 일본 와세다대 대학원 졸업(석사). 1967년 동 대학원 박사과정 졸업(공학). 1970년~1974년 과학기술처 중앙 전자 계산소장, 1974년~1976년 한양대 전기공학과 교수, 현재 고려대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원



김용하 (金龍河)

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 인천대 공대 전기공학과 조교수



김세영 (金世榮)

1963년 6월 1일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 생산기술연구소 연구원