

전압안정도를 고려한 미소신호안정도 해석

김동준 문영환 윤재영
한국전기연구원

Analysis of Small Signal Stability Considering Voltage Stability

D.J. Kim Y.H. Moon J.Y. Yoon
KERI

Abstract - This paper describes the algorithm which can not only take account of voltage stability but also consider small signal stability. As for voltage stability, both CPF and PoC methods are utilized to pinpoint the exact voltage collapse point. Then, using the converged load flow results, full system matrix is configured and its eigenvalues are computed. The suggested algorithm is applied to the Two-area system, and verified its usefulness. In addition, this paper also deals with the results of analyzing the two-area system in terms of voltage stability and small signal stability.

1. 서론

전력계통의 안정운전을 위해서는 여러 가지 안정도를 해석하여 안정도가 벗어나지 않도록 계통을 운전하지 않으면 안 된다. 최근 가장 문제가 되고 있는 안정도는 전압안정도(Voltage Stability)와 미소신호안정도(Small Signal Stability)이다. 전압안정도 문제는 극부적인 문제로서 부하가 집중적으로 모여있는 곳에 발생하며 불안정시 모선전압을 유지 못하는 특성이 있다. 미소신호안정도 문제는 계통의 외란에 대해서 전력동요를 감쇠하지 못하는 댐핑토오르 문제와 발전기 위상각이 지수함수적으로 발산하는 동기화 토오르 문제로 나눌 수 있다. 현재 보고되고 있는 미소신호안정도 문제는 계통에 댐핑토오르가 부족하여 전력동요가 감쇠되지 않은 문제가 주 관심사이다.

전압안정도 해석과 미소신호안정도 해석은 각기 다른 안정도 프로그램을 이용하여 해석한다. 전압안정도는 최대전송능력점 또는 전압붕괴점이라는 운전점을 찾는 변형된 조류계산 알고리즘을 주로 사용하고 있다. 대표적인 전압안정도 알고리즘은 연속법(Continuation Power Flow, 이하 CPF)⁽²⁾과 직접법(Point of Collapse, 이하 PoC)⁽⁶⁾ 등으로 전압붕괴점에서 수치적 안정성이 보장된다. 미소신호안정도 해석은 고전적인 조류계산 알고리즘을 사용하며, 다이나믹 모델링을 고려하여 선형화된 계통의 상태행렬의 고유치를 통해서 계통의 안정도를 판별한다. 대표적인 프로그램으로는 PEALS 나 MASS 프로그램⁽¹³⁾을 들 수 있다. 이러한 전압안정도와 미소신호안정도 해석을 독립적으로 해석하는 경우, 계통에 직접 제한을 가하는 안정도를 구분하기는 쉽지 않다. 특히, 미소신호안정도 프로그램의 조류계산 알고리즘은 고전 알고리즘을 사용하기 때문에 전압붕괴점에서의 정확한 고유치 해석이 거의 불가능하다. 따라서 전압붕괴점을 고려하여 미소신호안정도를 해석할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문은 전압안정도뿐만 아니라 미소신호안정도 해석을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은, 먼저, 전압붕괴점을 CPF와 PoC법을 이용하

여 정확한 전압붕괴점을 계산한다; 그런 다음, 계산된 정확한 조류계산 결과를 상태변수를 초기화하는데 사용하여, 계통행렬을 구성하고 전압붕괴점에서 고유치 계산을 실행한다. 제한된 알고리즘은 4기 11모선인 Two-area 계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였고, 본 논문은, 또한, 이 시스템의 안정도를 분석하고 기술하였다.

2. 본론

2.1 전압안정도 알고리즘

2.1.1 연속법(CPF) 알고리즘 (2),(10)

연속조류계산식은 아래 식으로 요약될 수 있다.

$$f(\theta, V, \lambda_0 + kn) = 0 \quad (1)$$

여기서

- θ : 모선전압 위상각 벡터
- V : 모선전압 크기 벡터
- λ_0 : 기저부하에서의 P, Q 부하 벡터
- n : 부하증가 방향 벡터
- k : 부하수요 파라미터

벡터 n 는 부하증가 시나리오에 의하여 결정한다. 연속법에서는 예측자와 수정자의 두 단계가 있다.

가. 예측자

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 (1)의 비선형 연립방정식을 풀기 위한 선형방정식은

$$\begin{bmatrix} f_\theta & f_V & f_k \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 e_k 는 부하수요 파라미터에 해당하는 위치를 제외하곤 모든 요소의 값이 0인 단위벡터이다. 접선벡터가 계산되면 다음 단계의 해에 관한 예측 값은

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ k_0 \end{bmatrix} + d\sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 아래첨자 "0" 앞 단계에서 얻어진 해를 의미한다. 부하증가량 $d\sigma$ 의 선택은 임계점을 계산하는 알고리즘의 속도와 강인성의 서로 상반되는 두 가지 목표를 달성하는데 중요하다.

나. 수정자

이 단계에선 예측자에 의해 결정된 값을 초기 값으로

하여 식 (1)의 조류계산식을 쓴다. 부하수요 파라미터 k 를 연속파라미터로 사용하므로 수정자 식은

$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, k) \\ k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서 η 는 k 의 예측값이다.

2.1.2 직접법(PoC) 알고리즘 ^[6,10,12]

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

$$f(x, \lambda_0 + kn) = 0 \quad (5)$$

$$w^T J = 0 \quad (6)$$

$$w^T w = 1 \quad (7)$$

위에서 식 (5)은 조류계산 식, 식 (6)은 임계점에서 Jacobian 행렬 J 가 특이하다는 조건, 그리고 식 (7)은 Jacobian 행렬의 좌고유벡터 w 가 영벡터가 되지 않도록 하는 조건을 각각 나타낸다. 식 (5)-(7)의 비선형 연립방정식은 NR법으로 다음과 같이 계산된다:

$$\begin{bmatrix} J & 0 & n \\ H & J^T & 0 \\ 0 & 2w^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta w \\ \Delta k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x, \lambda_0 + kn) \\ J^T w \\ w^T w - 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

위에서 Hessian 행렬 H 의 (i,j) 요소는 다음 식으로 계산된다:

$$H_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \frac{\partial^2 f_k}{\partial x_i \partial x_j} \quad (9)$$

2.2 미소신호안정도

2.2.1 계통행렬 A 구성 ^[11]

다기계통 고유치 해석을 위해서는 계통선형화행렬 A가 필요하다. 계통행렬은 계통의 기기 미분방정식을 선형화 한 행렬과, 계통선로와 부하를 선형화 한 어드미턴스를 이용하여 나타낼 수 있다. 계통행렬 A를 유도하는 과정은 아래와 같다. ^[8]

$$X_g = A_g X_g + B_g V_g \quad (10)$$

$$I_g = C_g X_g - D_g V_g \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} I_{gg} \\ I_{ll} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{gg} & Y_{gl} \\ Y_{lg} & Y_{ll} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_g \\ V_l \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서,

- X_g : 발전기 상태변수벡터
- $V_g(I_g)$: 발전기 단자전압(전류) 벡터
- $V_l(I_l)$: 부하전압(전류) 벡터
- $Y_{gg} \sim Y_{ll}$: 계통 어드미턴스 행렬

위의 행렬들을 정리해서 계통행렬 A를 유도하면 아래와 같다:

$$X_g = AX_g \quad (13)$$

여기서,

$$A = A_g + B_g(Y_g + D_g^{-1})C_g \quad (14)$$

$$Y_g = [Y_{gg} - Y_{gl}(Y_{ll} - J_l^{-1})^{-1}Y_{lg}] \quad (15)$$

본 논문에서 유도된 행렬 A는 극좌표의 발전기 단자전압을 이용하도록 유도하였다. 극좌표의 발전기 단자전압은 발전기 전압 절대치(V)와 위상각(θ)을 갖는다. 발전기 단자전압을 극 좌표계로 사용함으로써, 여자시스템이 부가되었을 때 발전기 모션 절대치 전압을 입력으로 그대로 사용할 수 있다. 그리고 전압안정도에서 수렴

된 조류계산 결과를 변환하지 않고도 사용할 수 있는 장점을 갖는다.

2.2.2 모델 선형화 및 계산알고리즘

사용된 기기모델, 여자기모델, 조속기/터어빈 모델 그리고 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)모델은, 국내 한전에서 사용중인 시간영역 시뮬레이터인 상용 프로그램 PSS/E(미국 PTI사)모델을 기본으로 하였다. 본 논문에서 사용된 프로그램은 PSS/E 형식의 조류계산 파일과 다이나믹 모델 파일을 입력 데이터로 사용한다. 프로그램에 사용된 언어는 Digital Fortran이며, 고유치 계산은 IMSL 라이브러리를 이용하였다. 분석 가능한 계통행렬 차수는 만차 행렬을 사용하므로 500차로 제한하였다. ^[11] 아래는 선형화된 모델들을 나타내고 있다:

- 발전기 모델: GENSL, GENROU, CENCLS
- 여자기모델: EXST1, EXST3, EXPIC1, EXAC1, EXAC1A, EXAC3, SCRX, IEEET1, IEEEX2
- PSS 모델: IEEEST, PSS2A
- 조속기/터어빈 모델: IEEEG1, IEEESGO
- 비선형부하 선형화: 점입피어던스 부하, 정전류부하, 정전력부하

그림 1은 전압안정도를 고려해서 미소신호안정도를 해석할 수 있는 제안된 알고리즘을 보여준다. 초기에 조류계산 데이터를 입력하고 기본부하 운전조건에서 초기 조류계산을 수행한다. 그리고 고유치 계산을 기본부하에서 또는 붕괴점에서 선택할 수 있다. 기본부하 조류계산이 수행되고 "모션 Reordering"으로 계산 알고리즘이 진행되면, 기본부하 조류계산에서의 고유치 계산이 실행된다: 그렇지 않고 "전압붕괴점 계산"으로 진행되면, 붕괴점에서 조류계산 결과에서 고유치 계산이 실행된다. 다음으로 조류계산이 수행된 후, 계통 행렬 A를 구성하기 위해서 모션을 발전기 모션과 부하모션으로 분리하여 재배치를 한다. 그리고 어드미턴스 행렬 Y를 계산한다. 그런다음, 다이나믹 입력데이터를 읽어 들여서 모델의 상태변수를 초기화 한다. 마지막으로, 계통행렬 A를 구성하고 IMSL 라이브러리를 이용하여 모든 계통행렬 고유치를 계산한다.

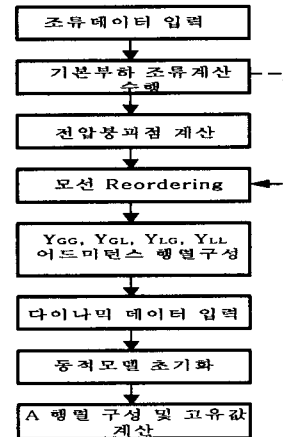


그림 1. 제안된 계산 알고리즘

2.3 Case Study: Two-Area System

제안된 방법의 적용을 위해서 그림 2와 같은 Two-area 계통을 사용하였다. 이 시스템의 완전한 조류계산 데이터와 다이나믹 데이터는 문헌^[3]에 잘 나와 있다. 제시된 발전기 모델과 정수값은 원통형 모델에 맞는다. 여기서 발전기 모델의 포화는 무시한다: 프로그램에 따라 발전기 포화표현이 약간씩 다르다. 여자시스템

(AVR)과 PSS 모델링은 정지형 모델인 "EXST1" 모델과 "IEEEST" 모델로 각각 모델링하여 동일한 제어블록에 제공된 정수값을 갖도록 결정하였다.

전압붕괴점 계산시 부하증가율은 부하 모선의 부하뿐만 아니라, 발전기의 발전량도 증가하도록 방향벡터를 설정하였다. 이와 같이 함으로써, 전압붕괴점에서 슬랙 모선의 발전량이 비합리적으로 증가하지 못하도록 할 수 있다.

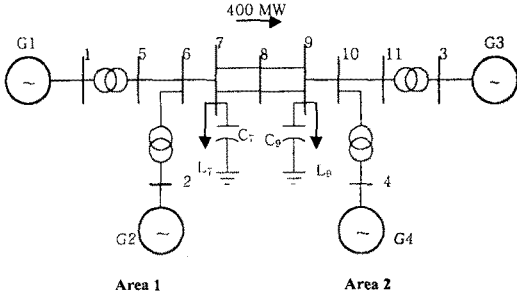


그림 2 4기 11모선(Two-Area System)

2.3.1 정상상태 고유치 해석

다이나믹 데이터 중 발전기 데이터만 입력하여 기본부하조건에서 조류계산을 통해서 고유치를 계산하였다. 제한된 알고리즘의 계산결과를 검증하기 위해서 똑같은 조건으로 MASS⁽¹³⁾ 프로그램을 이용해서 고유치를 계산하여 비교하였다. 발전기 포화, 여자기 모델, 그리고 PSS 모델은 MASS 프로그램에서는 다소 입력방식과 모델표현이 차이가 있으므로 본 비교에서는 생략한다. 발전기만 있는 경우의 주요 고유치 결과 비교는 표 1과 같다. 두 프로그램의 3개의 중요 동요모드 계산 결과는 거의 비슷하다. 총 계통행렬 차수는 24차 시스템을 갖는다. 제동이 잘 되지 않는 모드는 3번 모드으로써 동요주파수가 0.542Hz로 댐핑율이 0.027이다.

표 1. MASS결과와 제한된 알고리즘 계산결과 비교 (기본부하조건에서의 주요 고유치 결과비교)

중요 Mode	MASS 결과		제한된 알고리즘 결과	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	-0.5771	7.015	-0.579	7.021
2	-0.5742	6.793	-0.576	6.798
3	-0.09293	3.402	-0.093	3.406

4기의 여자기 모델을 동일한 정수 값을 갖는 "EXST1" 모델로 모델링하고 PSS는 "IEEEST" 모델로 모델링하여, 제한된 알고리즘으로 고유치를 계산하였다. 모델링 된 총 차수는 40차이고 주요 모드는 표 2와 같다: 여자기 모델과 "IEEEST" 모델이 없는 결과와 비교하면, 대체적으로 댐핑율이 증가했으므로 표 2로 알 수 있다.

표 2 PSS와 AVR 모델이 있는 경우 주요 고유치 계산 결과 (기본부하조건)

중요 Mode	제한된 알고리즘 계산 결과			
	REAL	IMAG	Hz	Damping Ratio
1	-17.446	±18.369	2.923	0.689
2	-18.121	±14.849	2.363	0.773
3	2.238	± 8.650	1.362	0.253
4	-2.138	± 8.211	1.307	0.254
5	-0.712	± 3.787	0.603	0.185

2.3.2 전압 붕괴점 계산(CPF+PoC)

제한된 알고리즘과 같이 전압 붕괴점을 CPF에 의해서 붕괴점까지 부하 증가량을 증가시키고, 붕괴점 부근에서 PoC법을 사용하여 정확한 붕괴점을 구할 수 있다. 최대 부하증가량은 기본부하조건에서 22.442141% 증가할 수 있는 운전점이다. 본 알고리즘에서는 부하량뿐만 아니라 발전량도 동일하게 증가하는 것으로 설정하였다. 표 3은 붕괴점에서의 PoC법 방향 벡터를 보여주고 있다. 전압에 대해서 감도가 가장 큰 모선은 8번 모선이다. 따라서 8번 모선에 무효전력보상장치를 설치할 때 가장 크게 전압을 보상할 수 있는 지점이 된다. 위상각 감도는 모선 9번으로써, 부하가 가장 많이 걸려있는 모선과 일치한다.

표 3 전압붕괴점에서 PoC법 방향 벡터

모선 번호	절대치 전압 감도	위상각 감도
7	0.1026	0.077
8	0.2102	0.280
9	0.1015	0.477

그림 3은 부하량 증가에 따른 모선 8과 모선 9의 전압 Profile을 보여주고 있다. 그림에서 "+"는 조류계산이 수행한 전압 값을 나타낸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 경부하에서는 부하량 증가 정도가 크고, 전압붕괴점에 가까울수록 부하량 증가정도가 적다. 이것은 CPF법이 전압 붕괴점을 지나쳐서 조류계산이 되지 않도록 하고, 강건하게 전압붕괴점을 찾기 위한 본 알고리즘에서 사용하는 부하증가 전략에 기인한다.

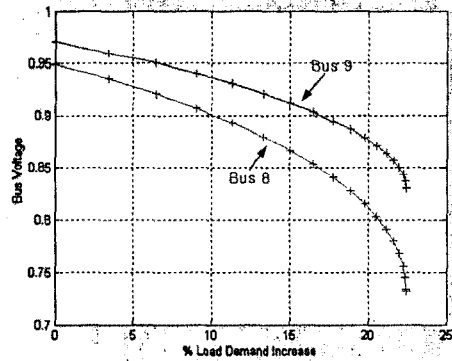


그림 3 부하증가에 따른 모선 8과 모선 9의 전압 Profile

2.3.3 전압 붕괴점에서의 고유치 해석

전압붕괴점에서 조류계산 결과는 다이나믹 모델의 상태변수를 초기화하는데 상용된다. 상태변수가 초기화 되면 계통행렬을 구성할 수 있고, 고유치 계산이 가능하다. 표 4는 전압붕괴점에서의 주요 고유치 계산 결과를 보여주고 있다. 1.3Hz대의 동요모드의 댐핑율은 전압붕괴점에서 약간 감소했음을 보여주고 있고, 0.543Hz의 광역모드는 표 2와 비교하여 증가하였다. 그리고 표 6에서 관심을 갖고 봐야 할 모드는 모드 6이다. 이 모드는 실수부가 양수이고 허수부가 없는 불안정 모드를 보여주고 있다. 모드 6에 관련된 변수를 살펴보기 위해서, 우고유 벡터를 통하여 관련 상태변수를 조사하였다. 우고유 벡터에 의한 이 모드에 관련된 주 상태변수는 4기의 발전기 상차각(δ) 상태변수였다. 따라서, 이 모드는 발전기의 동기화 토모크가 부족하여 나타나는 상차각 불안정이라고 말할 수 있다. 모드 6의 실수값은 3.049로 전압붕괴점 이전에 벌써 불안정 영역으로 진행했음을 추측할 수 있다. 이것은 최대송전능력 전압안정도에서 제한받기 전에, 미소신호안정도인 발전기 상차각 안정도에서 제한받고 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 전

안정도나 미소신호안정도 프로그램을 독립적으로 실행시켰을 때 포착하기 어려운 부분이다.

표 4 전압붕괴점에서 주요 고유치 계산 결과

중요 Mode	제한된 알고리즘 고유치 계산 결과			
	REAL	IMAG	Hz	Damping Ratio
1	-18.236	±27.747	4.416	0.549
2	-17.862	±12.906	2.054	0.811
3	-1.821	± 8.271	1.316	0.215
4	-1.460	± 7.795	1.241	0.184
5	-1.070	± 3.411	0.543	0.299
6	3.049	0.0	0.0	-1.0

3. 결 론

본 논문에서 기술한 전압안정도를 고려한 미소신호안정도 해석에 대해서 요약하면 아래와 같다:

- 제한된 알고리즘은 전압붕괴점을 CPF와 PoC법을 이용하여 정확한 전압붕괴점을 계산할 수 있고, 전압붕괴점에서 고유치 계산이 가능하다.
- 4기 11모선인 Two-area 계통에 제한된 알고리즘을 적용하여 알고리즘의 유용성을 확인하였다; 전압붕괴점을 정확하게 계산하였고, 발전기 모델, 여자기 모델, 그리고 PSS 모델이 있는 40차 시스템의 고유치 계산을 수행하였다.
- 적용된 Two-area 계통은 전압붕괴점에서 전압문제뿐만 아니라, 동기화 토모크 부족에 의한 미소신호안정도 문제가 있음을 확인하였다. 이것은 기존 전압안정도 프로그램에서 분석할 수 없는 것이다.

향후 연구는, 본 논문에서 다룬 기본부하운전점과 전압붕괴점뿐만 아니라, 임의의 부하운전점에서 미소신호 해석이 가능하게 알고리즘을 개선하는 것과, 전압안정도와 미소신호안정도를 모두 고려한 안정도 향상 대책에 대해 연구하는 것이 필요하다.

Appendix: 모델 정수

GENROU (900MVA):

$T_{do}'=8.00, T_{do}''=0.030, T_{qo}'=0.40, T_{qo}''=0.050,$
 $H=6.50(\text{for } G1 \text{ and } G2), H=6.175(\text{for } G3 \text{ and } G4),$
 $D=0.0, X_d=1.80, X_q=1.70, X_d'=0.30,$
 $X_q'=0.550, X''=0.250, X_l=0.200, S(1.0)=0.0,$
 $S(1.2)=0.0$

EXST1:

$T_R=0.01, V_{imax}=9999.0, V_{imin}=-9999.0, T_c=0.0,$
 $T_b=0.0, K_A=200.0, T_a=0.00, V_{rmax}=6.00,$
 $V_{rmin}=-6.00, K_c=0.0, K_r=0.0, T_F=1.0$

IEEEEST:

Speed(입력신호), $A_1=0.0, A_2=0.0, A_3=0.0, A_4=0.0,$
 $A_5=0.0, A_6=0.0, T_1=0.05, T_2=0.02,$
 $T_3=3.0, T_4=5.4, T_5=10.0, T_6=10.0,$
 $K_s=20.0, L_{smax}=0.15, L_{smin}=-0.15, V_{cu}=0.0,$
 $V_{ei}=0.0$

[참 고 문 헌]

- [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] F.P. Demello and C. Concordia, Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-88, April 1969, pp. 316-329
- [8] K. Yoshimura, N. Uchida, "Countermeasures for Power System Stability Improvement (Part 4) Double input signal PSS parameter optimization method", Komae Research Laboratory Rep. NO. T96027
- [9] William F. Tinney, Walter L. Powell, "Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power Flow Problem", BPA, Portland, Oregon April 1971
- [10] 남해곤, 김동준, 송충기, 문영환, 김동준, 이효상, "전압붕괴 임계점 계산을 위한 효율적 통합법" 대한전기학회, 논문지 제43권 제8호, 1999.
- [11] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "대형계통 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램 개발", 1998년 5월, 대한전기학회 춘계학술 대회
- [12] 남해곤, 송충기, 김동준, "최단 전압붕괴점 계산을 위한 개선된 직접법과 재급전에 의한 전압안정도 향상", 대한전기학회 논문집 제48권 8호.
- [13] SSSP Ver 3.0, 1993, Feb., EPRI