

계통의 종합적 미소신호 안정도 해석 알고리즘과 ATC 산정에의 응용에 관한 연구

論 文
48A-10-7

A Unified Framework for Small Signal Stability Analysis of Power Systems and Its Application to Available Transfer Capability

金相巖* · 宋和昌* · 李炳峻** · 權世熾***
(Sangahm Kim · Hwachang Song · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon)

Abstract - This paper presents the framework for analysis of small-signal stability. In this framework the equilibrium points of system DAE model are traced using continuation method and instability points are determined on the solution path. Especially Implicit shift QR-modified Arnoldi method is utilized to calculate the rightmost eigenvalues. Small-signal stability is becoming one of the major factors that affect the ATC in the environment of deregulation. Stability limited ATC is easily evaluated in this stability analysis process.

Key Words : unified framework, continuation method, small-signal stability, deregulation, rightmost eigenvalue, ATC

1. 서 론

저주파진동 현상이나 전압붕괴 현상 등은 계통이 과부하 상태에 있을 때 주로 발생하며, 부하나 발전량의 증가 및 일일 계통운용 등과 같이 점진적인 계통파라미터의 변화에 의해서 발생할 수 있기 때문에 미소신호안정도 확보가 무엇보다도 중요한 문제로 대두되고 있다. 계통의 미소신호안정도를 종합적으로 해석하기 위해서는 미소신호안정도의 한계점을 감지해야 하고 동시에 계통파라미터의 변화에 대한 안정도의 변화여부 또한 알아내야 한다. 미소신호 안정도 한계점을 찾기 위해서는 먼저 계통상태의 변화에 의해 움직이는 계통방정식의 해의 경로를 추적해야 하며, 해의 경로상에서 계통의 상태행렬을 구성하고 고유치 등을 계산해 미소신호 안정도 한계점을 감지한 후 안정한계점에 영향을 미치는 파라미터를 색출하여 예방 수정제어를 위한 정보를 찾아내는 3가지의 독립적인 계산들이 통합되어야 한다.

계통의 평형해의 경로를 추적하는 작업은 일반적으로 Homotopy기법과 연속알고리즘을 이용하여 달성할 수 있다. 국외에서는 V. Ajjarapu[1], F. Albarado[2], H.-D. Chiang[3] 등이 위 방법들을 이용하여 정적인 전압안정도 해석프로그램을 개발하였고, 특히 문헌 [1]의 연속 알고리즘은 주어진 방정식의 평형해를 원래의 수렴성과 관계없이 강인한 수렴성을 갖고 추적할 수 있는 장점을 가지고 있다.

최우측고유치의 계산을 위한 부분고유치 해석법은 국내외 다수의 연구기관에서 지난 십여 년동안 지대한 관심속에 연구되어 왔다[4-7]. 일반적으로 부분 고유치 해석법은 고유치

중 절대값이 큰 고유치로 수렴하는 특성을 갖고 있기 때문에 구하고자 하는 고유치를 절대값이 큰 지배고유치로 만드는 선행변환과정이 필요하다. 그러나 선행변환은 계통상태행렬의 역행렬이 필요하며 이로 인해 계통상태행렬의 sparse특성이 저하되어 계산에 사용되는 메모리의 양이 증가되고, 또한 최우측고유치를 구하기 위해 여러 번 반복해야하는 불편한 점들이 있음이 밝혀졌다.

최근 대수학 분야에서는 다항식 필터를 이용하여 상태행렬의 최우측고유치가 지배고유치가 되게 하는 연구 결과들이 [6-14] 발표되었는데 이 방법은 그 동안 사용되어 오던 선행변환을 피하고 대신 다항식 필터를 사용하여 계통의 sparse 특성을 유지하며, 한번의 실행으로 원하는 수만큼의 고유치를 효율적이며 안전하게 구하는 새로운 개념을 담고 있다. 참고 문헌 [12]에서는 implicit-shift QR 다항식 필터를 수정아놀디법에 결합한 새로운 고유치해석 알고리즘이 전력계통의 고유치해석에 적용되었다.

미소신호 안정도 한계점에서 계통에 영향을 미치는 파라미터 색출은 일반적으로 고유치 감도법이나 운전점의 파라미터에 대한 감도법이 이용되고 있다. 그러나 이들 방법들은 해의 경로를 추적하며 반복계산을 하기에는 계산량이 많고 계산상 수학적인 한계를 갖기 때문에 미소신호 안정도 한계점에서 계산이 불가능해지는 단점이 있다. 그러므로 미소신호 안정도 한계점에서 계산이 가능하며, 반복계산을 위해 계산량이 적은 파라미터 감도 색출을 위한 작업이 요구된다[15][16].

위에서 언급한 3가지 요소는 지금까지 미소신호 안정도 해석에 별개의 문제로 취급되어 왔으나, 미소신호 안정도의 종합적인 해석을 위해 위의 3가지 요소를 동시에 취급하고자 하는 연구가 최근 제기되고 있다[17]. 본 논문에서는 미소신호 안정도를 종합적으로 해석하기 위해 강인한 수렴성을 가지는 연속알고리즘을 이용하여 점진적으로 변화하는 계통파라미터에 대한 계통방정식의 평형해들을 구하고 해의 경로상에서 계통행렬을 구성하고 고유치를 계산해 미소신호 안정도

* 正 會 員 : 高麗大 工科大学 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 高麗大 工科大学 電氣工學科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 高麗大 工科大学 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 3月 4日

最終完了 : 1999年 9月 22日

한계점을 감지한 후 계통의 불안정에 영향을 미치는 파라미터의 색출을 일괄해서 체계적으로 수행하는 알고리즘을 제안한다[20]. 불안정한 운전점의 감지는 Implicit shift QR 수정 아놀드법[12][13]을 이용하여 해의 경로상에서 계통행렬의 고유치들중 원하는 고유치(최우측 고유치)만을 추적할 수 있도록 하고, 중요파라미터 색출법으로 Invariant Subspace Parametric Sensitivity(ISPS)[15]법을 적용하였다.

본문의 2장에서 미소신호 안정도의 해법과 평형해의 경로 추적 및 불안정점의 감지 그리고 중요파라미터의 색출법에 관하여 설명하고 이를 종합한 종합적인 알고리즘을 제안한다. 그리고 3장에서 사례연구로서 제안한 알고리즘을 New England 39모선 계통에 적용하여 미소신호안정도를 종합적으로 해석하고 지역간 전송이 있는 연계계통을 해석하는 과정에서 미래의 상업적 전력시장을 위한 안정도제약 ATC를 계산하는데 있어서 본 알고리즘이 가지는 유용성을 검토하였다.

2. 종합적 미소신호 안정도 해석 절차

계통의 미소신호안정도를 종합적으로 해석한다는 것은 부하와 같은 계통 파라미터가 점진적으로 변화할 때 평형점의 경로를 추적해 가면서 해의 경로상에서 계통의 운전점들이 미소외란에 대해 안정한지의 여부를 판단하고 만일 불안정하거나 잠재적으로 불안정한 상태에 있다면 적절한 조치를 취할 수 있는 정보를 얻는데 있다. 계통이 과부하상태에 있을 때 구조적인 원인으로 작은 외란에 의해서도 심각한 불안정 현상이 발생할 수 있기 때문에 각별히 주의해야 할 문제이다. 이러한 현상은 비선형성이 강한 전력계통의 동적 특성으로 인해 나타나는 분기(bifurcation)현상이 주요한 원인이며 계통 파라미터의 아주 작은 변화에 의해서도 발생할 수 있다.

전력계통의 미소신호 안정도 해석을 하기 위한 수학적인 모델은 일반적으로 동적인 부분과 계통의 정적인 부분 및 계통의 동작과는 관계없는 계통파라미터를 포함하는 미분대수방정식(DAE; differential & algebraic equations)으로 이루어진다.

$$\dot{X} = F(X, Y, P) \tag{1}$$

$$0 = G(X, Y, P) \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서 X는 계통의 동적인 부분을 나타내는 상태변수들이고, Y는 계통의 정적인 부분을 표현하는 대수방정식의 변수들이다. 그리고 P는 계통파라미터를 나타내는 독립 변수이다.

미분대수방정식으로 표현된 계통의 미소신호안정도를 판별하기 위해서는 원래의 방정식을 식 (3)을 만족하는 평형점 (X(P0), Y(P0))근방에서 선형화하고 식 (4)로 표현되는 선형 연립미분방정식의 상태행렬의 고유치를 해석하여야 한다.

$$0 = F(X, Y, P) \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \tag{4}$$

행렬 K1, K2, K3, K4는 (X(P0), Y(P0))에서 X와 Y에 대한 F와 G의 편미분값들이다. 이 때 det(K4)가 0이 아니면, 식 (4)는 식 (5)를 이용하여 대수방정식의 변수 ΔY를 소거하고 식 (6)과 같이 축소상태행렬로 나타낼 수 있다.

$$\Delta Y = -K_4^{-1}K_3\Delta X \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A_{sys}X \\ &= [K_1 - K_2K_4^{-1}K_3]\Delta X \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)의 계통행렬 A_{sys}의 모든 고유치가 음의 실수부를 가지면 식 (1)(2)로 정의되는 전력계통은 점진적으로 안정하다(asymptotically stable)고 한다. 어느 한 평형점의 최우측고유치가 양의 실수부를 가지면 계통은 불안정해지게 된다. 즉 Hopf 또는 saddle-node 분기를 하기 때문이다. 또 대수방정식의 Jacobian이 특이성을 가지게 되는 SI 분기가 존재하며 역시 계통을 불안정하게 하는 원인이 된다.

위와 같이 이러한 고전적인 방법을 이용하여 미소신호 안정도 한계점을 찾기 위해서는 먼저 계통파라미터의 변화에 의해 움직이는 계통방정식의 해의 경로를 추적해야 하며, 해의 경로상에서 계통의 상태행렬을 구성하고 고유치 등을 계산해 미소신호 안정도 한계점을 확인하는 과정이 일괄되어야 한다.

2.1 연속알고리즘을 이용한 평형해의 경로 추적

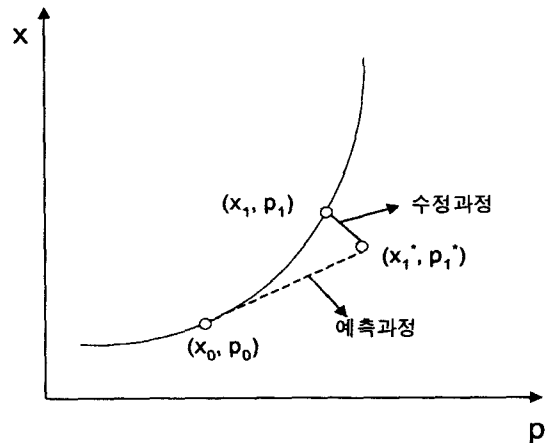


그림 1 연속 알고리즘의 원리

Fig. 1 Continuation algorithm

연속 알고리즘은 그림 1에서와 같이 현재의 평형해에서 다음해의 근사치를 구하는 예측과정과 다음해의 근사치로 부터 정확한 평형해를 구하는 수정과정으로 이루어져 있으며, 예측과정과 수정과정을 반복하며 평형해의 경로를 구해 나간다. 연속 알고리즘은 파라미터화 방법에 따라 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘[1]을 전력조류계산에 적용하여 조류해의 경로를 추적한다. 이를 위해 부하변화를 나타내는 부하 파라미터를 도입하여 전력조류방정식을 재구성하였다.

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \tag{7}$$

현재 부하상태에서의 조류해는 종래의 전력조류계산에 의하여 구할 수 있고 기본 조류해로부터 부하변화를 나타내는 부하 파라미터 λ 의 변화에 따른 조류해의 경로를 구하기 위하여 연속 알고리즘을 시작한다. 또한 종래의 뉴턴-랩슨 반복법의 Jacobian이 특이성을 갖게 되더라도 국부 파라미터화에 의해 덧붙여진 Jacobian은 특이성을 갖지 않게 되어 PV곡선의 정적인 전압불안정점과 같은 평형해 경로의 꼭지점 부근에서 나타났던 수렴곤란성은 완벽히 제거된다.

평형해의 경로를 추적하기 위하여 먼저 계통부하의 변화패턴과 그에 따른 발전량수급패턴을 정해야 한다.

$$\begin{aligned} P_{Li} &= P_{Lio} + \lambda(k_{Li} S_{base} \cos \phi_i) \\ Q_{Li} &= Q_{Lio} + \lambda(k_{Li} S_{base} \sin \phi_i) \end{aligned} \tag{8}$$

여기에서 λ 는 부하파라미터로써 초기부하상태에서는 0, 정적인 전압불안정점에서의 임계부하상태에서는 λ_c 의 값을 갖는다. P_{Lio}, Q_{Lio} 는 각각 i 모선의 초기 부하값에 해당한다. k_{Li} 는 전체부하에 대한 i 번째 모선의 부하의 비를 나타낸다. 그리고 ϕ_i 는 초기 부하상태에서의 i 모선의 부하역률을 나타내고, S_{base} 는 부하파라미터 λ 가 적당한 임계값 λ_c 를 갖도록 임의로 선택되는 피상전력값이다. 이러한 부하의 증가에 따른 유효전력 발전은 다음식으로 증가시킨다.

$$P_{Gi} = P_{Gio}(1 + \lambda k_{Gi}) \tag{9}$$

여기에서 P_{Gio} 는 i 번째 모선의 초기 유효전력 발전량이고 k_{Gi} 는 계통 전체 유효전력 발전에 대한 i 번째 모선의 유효전력 발전의 비이다.

2.2 계통상태행렬의 구성

연속알고리즘을 이용하여 조류해의 경로를 추적한 해의 경로상에 있는 계통평형점들의 정상상태 안정도를 판별하기 위해서는 선형화된 동적 모델의 계통상태행렬(linearized system state Jacobian)을 구성하여야 한다. 일반적으로 대기 계통의 동적인 모델은 전압과 위상각의 제어요소를 포함하지만 본 논문의 범주에서 동기기의 고정자와 계통 및 부하의 과도현상을 무시할 때 정적인 모델로 표현한다. 이러한 가정하에 계통의 동적인 모델과 정적인 모델과의 관계로부터 선형화된 계통상태행렬을 구성할 수 있다[21]. 즉, 조류해의 경로상에 있는 각 조류단면으로부터 계통방정식의 초기조건을 계산하여 식 (3)을 만족하는 계통의 평형해를 구할 수 있다.

2.3 최우측고유치의 계산

계통의 상태행렬을 구성한 후 계통행렬의 고유치를 계산함으로써 평형점의 미소신호 안정도를 판별할 수 있다. 전통적으로 계통행렬의 모든 고유치를 구하기 위해서 QR법을 이용하여 왔다. 이 방법을 이용할 때는 전체계통행렬(augmented system Jacobian)을 축약한 축소계통행렬(reduced system Jacobian)을 사용하는데 상세계통과 축약계통의 모델 정합성

이 항상 문제가 되고 왔다. 따라서 대규모 계통의 많은 고유치들 가운데 원하는 수만큼의 고유치만을 계산하는 부분 고유치 해석법에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 부분 고유치 해석법들은 수렴특성을 개선하기 위하여 첫 번째로 행렬을 선형변환시켜 구하고 싶은 고유치가 지배고유치가 되게 하고, 두 번째로 구하고 싶은 고유치에 대응하는 고유벡터를 초기벡터 성분안에 많이 포함시키도록 초기벡터를 구성한 후 반복계산하는 과정을 밟고 있다. 이러한 접근 방법들은 계산량이 많아지고, 계통의 sparse 특성이 저하되어, 높은 정확도가 필요할 경우 요구되는 계산량이 대단히 많다고 할 수 있겠다. 본 논문에서는 대규모 계통의 미소신호 안정도 판별을 위한 부분고유치 계산시 기존의 방법에서 사용되던 선형변환 과정의 문제점을 개선하고 응용범위를 확장하기 위한 방안으로, 전력계통의 부분고유치 해석이론에서 지금까지 사용되었던 다른 방법들과는 다른 새로운 접근 방법으로 선형변환기법을 implicit shift QR이라는 다항식 필터로 대체하는 방법을 사용한다. [12]. 이것을 수정아놀디법에 적용한 implicit shift QR modified Arnoldi법(ISQRMA)을 이용하여 대규모 계통에서 최우측고유치를 계산할때 sparse 특성을 원형대로 보존하며, 한 번의 실행으로 원하는 최우측 고유치를 구할 수 있다.

ISQRMA법을 이용할 때 기본적으로 부분공간으로의 사영기법인 식 (10)을 이용한다. 헤센버그행렬 H 와 축소계통행렬 A_{sys} 와의 관계로부터 식 (11)(12)(13)과 같이 다음에 설명하는 중요파라미터 색출법에 사용되는 유용한 정보를 얻을 수 있다. 즉 중요파라미터 색출기법에서 사용되는 최우측고유치의 좌고유벡터를 용이하게 얻을 수 있다.

$$A_{sys}V = VH \quad (\text{단, } V \in R^{m \times n}, H \in R^{n \times n}) \tag{10}$$

$$v^t H = \lambda v^t \tag{11}$$

$$(Vv)^t A = \lambda (Vv)^t \tag{12}$$

$$(Vv_i)^t A = \lambda_i (Vv_i)^t \tag{13}$$

식 (12)와 (13)에서 v^t 는 헤센버그행렬 H 의 좌고유벡터이고 $(Vv)^t$ 는 계통행렬 A_{sys} 의 좌고유벡터이다. 즉 식 (13)을 이용하여 계통행렬의 좌고유벡터를 쉽게 얻을 수 있다.

2.4 중요파라미터의 색출

윗 단계까지의 계산으로 계통 평형점의 미소신호 안정도를 판별할 수 있다. 이제 평형해의 경로상에서 불안정한계점을 확인할 수 있으므로 불안정을 일으키는 지역, 계통요소, 파라미터들을 알아내는 것이 필요하다. 이는 주로 감도해석을 통해 얻어지며 미소신호안정도분야에서는 전통적으로 고유치감도법(eigenvalue sensitivity), 참여도법(participation factor) 등이 사용되어왔다. 본 논문에서는 참고문헌 [15]에 소개된 Invariant subspace parametric sensitivity(ISPS)를 이용한다. 이 방법은 위의 두 방법에 비해 계산량이 매우 적은 ISPS측도(ISPS measure)만을 구하여도 불안정을 유발하는 파라미터의 식별이 가능하므로 반복계산에 용이하다.

식 (1)과 (2)로부터 평형점에서 각 상태변수들에 대한 파라

미터감도가 얻어진다.

$$\frac{\partial X}{\partial P} = A_{ss}^{-1} \left[\frac{\partial F}{\partial Y} \left[\frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial G}{\partial P} - \frac{\partial F}{\partial P} \right] \quad (14)$$

ISPS는 식 (14)로 얻어지는 감도정보와 고유치해석을 통한 안정도정보를 결합한 중요파라미터 색출지표이다. 미소신호 안정도에서 각 고유치는 해당하는 eigenbasis에 속해 있다. 따라서 eigenbasis의 불변성에 의해 계통의 불안정성은 임계 고유치(최우측고유치)의 부분공간의 동특성에 지배된다고 할 수 있다. 따라서 파라미터감도를 최우측고유치에 해당하는 부분공간으로 사영한다. 식 (14)의 양변에 M_i 를 곱하면 식 (15)과 같다.

$$\begin{aligned} M_i \frac{\partial X}{\partial P} &= M_i \left[\sum_{i=1}^m \frac{M_i}{\lambda_i} \right] L \\ &= \frac{M_i}{\lambda_i} L \\ &= \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} u_{i1}v_{i1} & \cdots & u_{i1}v_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im}v_{i1} & \cdots & u_{im}v_{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & \cdots & l_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{1m} & \cdots & l_{nm} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 l_j 벡터는 감도벡터 L 의 열이다. 각 항 $M_i l_j / \lambda_i$ 는 파라미터감도의 i -번째 고유치공간으로의 사영을 나타낸다. 이 사영된 파라미터감도를 Invariant subspace parametric sensitivity(ISPS)로 정의한다. 그리하여, n 개의 파라미터중에서 특정 부분공간에 대해 가장 민감한 파라미터는 $M_i l_j / \lambda_i$ ($j = 1, \dots, n$)중 최대치를 취함으로써 얻어진다.

가장 민감한 파라미터를 선별하기 위하여 모든 j 에 대해 $M_i l_j / \lambda_i$ 를 일일이 계산할 필요는 없다. 단순히 v_i^T 와 l_j 의 내적의 최대값을 취해도 같은 결과를 얻는다. 새로운 기호 $\sigma_j = \sum_{i=1}^m v_{i,k} l_{j,k}$ 를 정의하고, 이 기호를 사용하여 (15)식을 다시 써보면,

$$\begin{aligned} \frac{M_i L}{\lambda_i} &= \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} u_{i1}\sigma_1 & \cdots & u_{i1}\sigma_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im}\sigma_1 & \cdots & u_{im}\sigma_n \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} u_{i1} \\ \vdots \\ u_{im} \end{bmatrix} [\sigma_1 \cdots \sigma_n] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{M_i l_j}{\lambda_i} = \frac{\sigma_j u_i}{\lambda_i} \quad (17)$$

$$\text{Max} \left\| \frac{M_i l_j}{\lambda_i} \right\|_2 = \text{Max} \left\| \frac{\sigma_j u_i}{\lambda_i} \right\|_2, \quad (j=1, \dots, n) \quad (18)$$

식 (18)에서 λ_i 가 최우측고유치이고 최우측고유치의 계산 과정에서 최우측고유치에 대한 좌고유벡터를 쉽게 얻을 수 있으므로 최우측고유치에 영향을 미치는 파라미터들의 ISPS를 계산할 수 있다. u_i / λ_i 는 모든 파라미터에 공통이므로 불

안정을 유발하는 가장 민감한 파라미터는 $\text{Max} \{ \sigma_j \} (j = 1, \dots, n)$ 로부터 얻어진다. 따라서 σ_j 는 가장 민감한 파라미터를 찾아내는 훌륭한 척도(measure)가 된다.

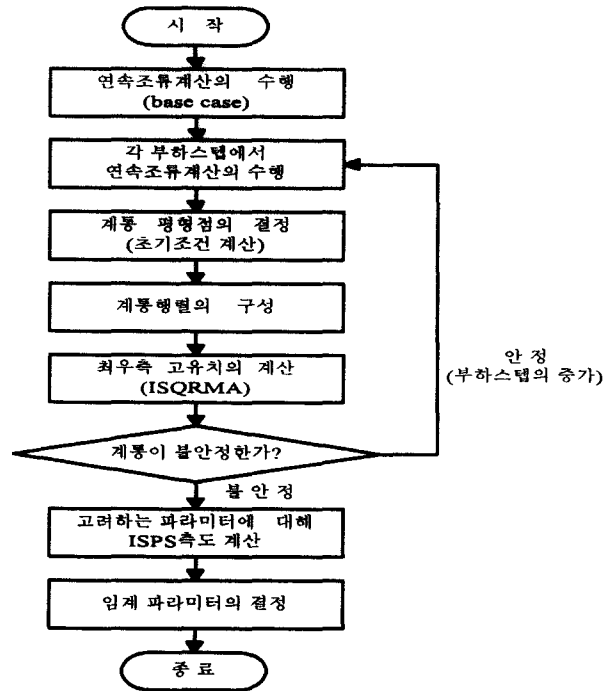


그림 2 종합적 미소신호 안정도 해석알고리즘의 순서도
Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

본 논문에서 제안하는 통합알고리즘에서는 그림 2와 같이 연속알고리즘을 중심으로 점진적인 파라미터변화에 대해 해의 경로를 추적해 가면서 모든 불안정한 점들을 찾아가는 작업을 일괄적으로 수행한다. 또한 계통의 불안정을 유발하거나 유발할 가능성이 있는 파라미터들에 대한 정보 역시 설명한 방법을 이용하여 고속계산을 하도록 하고 있다.

3. 사례연구

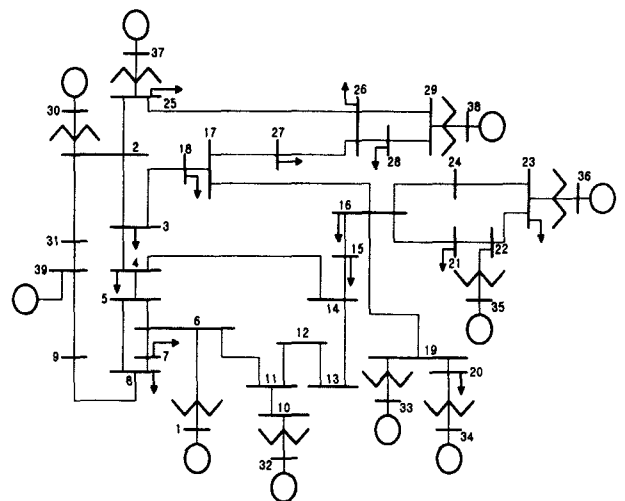


그림 3 New England 39모선 계통
Fig. 3 New England 39-bus system

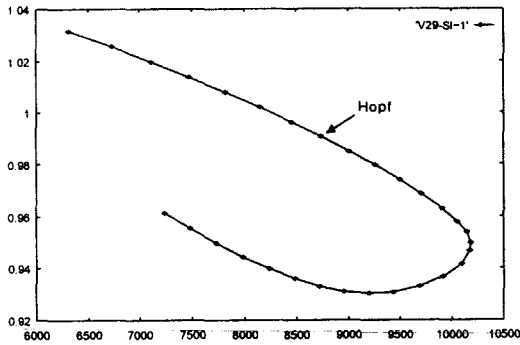


그림 4 계통파라미터의 변화에 대한 평형해의 경로
Fig. 4 Equilibrium Paths of state and algebraic variables

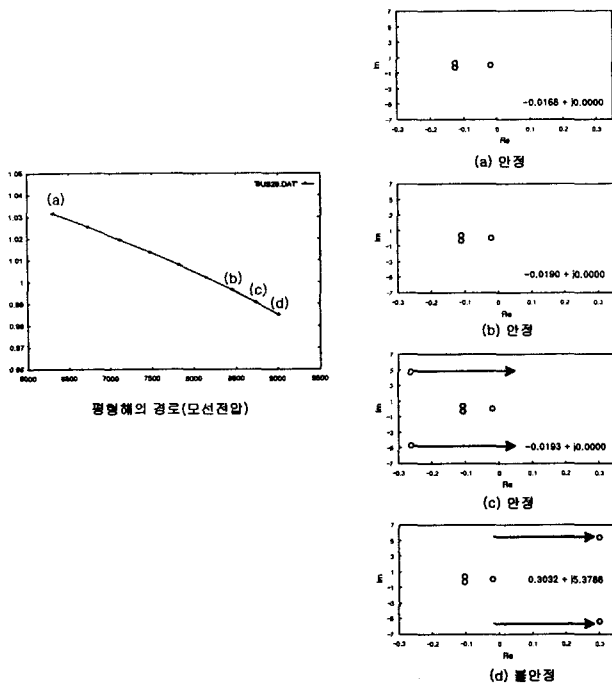


그림 5 최우측고유치의 추적
Fig. 5 Tracing of rightmost eigenvalues

제안한 알고리즘의 유용성을 그림 3의 New England 39모선 모델계통을 통해서 검증하였다. 계통을 표현하는 수학적 모델은 발전기, 여자기 등의 동적인 부분과 계통의 정적인 부분을 포함한다. 계통파라미터로 선정한 총부하를 점진적으로 변화시키면서 식 (3)을 만족하는 모든 해를 계산하는 것이 곧 파라미터변화에 대한 계통방정식의 평형해의 경로를 추적하는 것이 된다. 본 절에서는 고려하는 상태변수들의 경로를 파라미터변화에 대해서 도시해보고 최우측고유치의 변화를 추적하였다.

그림 4는 계통의 총부하가 점진적으로 변화할 때 상태변수의 경로를 도시한 예로서 29번 모선의 부하전압의 경로이다.

그림 5의 왼쪽그림은 계통전압해의 경로이다. 해의 경로상에서 3개의 최우측고유치의 변화를 추적하여 보았다. 기저부하일 때 그림 5(a)에서 보이듯이 모든 고유치들이 고유치평면의 좌방면에 위치하고 있음을 알 수 있다. 기저부하로부터 조금씩 부하를 증가시켜보았을 때 (b)점 (c)점까지 안정하던

계통이 총부하증가량이 2433MW인 (d)점에서 고유치평면의 좌방면에 있던 (c)점의 세 번째 복소고유치 한 쌍이 빠르게 허수축을 지나감을 알 수 있다. 고유치가 양의 실수부를 가지므로 계통이 불안정해지고 있음을 알 수 있다. 안정한계점의 최우측고유치가 불안정을 유발하지는 않지만 최우측고유치를 감시함으로써 계통이 불안정해지는 점을 찾을 수 있다.

이제 고려하는 파라미터들인 부하모선의 부하증가 KLi, 여자기 정수 KA, KE, KF 중 불안정을 유발하는 파라미터들을 조사하기 위해 (c)점 및 (d)점에서 관찰할 수 있었던 불안정을 유발하는 고유치에 대한 ISPS측도를 계산하여 보았다. 그림 6(a)는 각 부하모선의 부하증가 파라미터들에 대한 ISPS측도들이고 그림 6(b)는 여자기정수 KF에 대한 ISPS측도이다. 중요파라미터들을 표 1에 정리하였다.

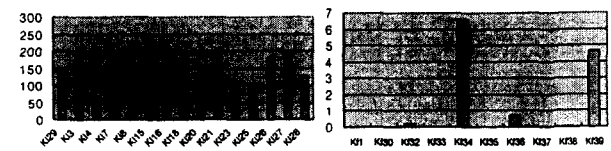


그림 6 불안정을 유발하는 중요파라미터의 색출(최우측고유치에 대한 ISPS측도)
Fig. 6 Detecting of critical parameters to small-signal instability (ISPS measures to rightmost eigenvalues)

표 1 불안정을 유발하는 중요파라미터
Table 1 Critical parameters effecting small-signal instability

최우측 고유치	$\lambda_{15,14} \quad .30317 \pm j5.37876$
measure of ISPS (σ_j)	KL15, KL16, KF34, KF39, KA38, KE34

3.1 고찰

3.1.1 $\Delta Pt = 2144 \text{ MW}$

기저부하로부터 총부하가 2144MW만큼 증가하였을 때의 운전점은 아직 불안정한 상태는 아니지만 최우측의 실고유치가 허수축에 매우 근접하고 있다. 따라서 최우측고유치에 가장 큰 영향을 미치는 계통 파라미터의 식별은 중요해지고 있다.

표 2 최우측고유치에 대한 ISPS측도
Table 2 ISPS measures to rightmost eigenvalues

최우측 고유치	$\lambda_{47} \quad -.01931$
measure of ISPS (σ_j)	KL15, KL27, KF38, KF34, KF33, KE30, KA38

여자기정수들에 대한 ISPS측도 중에서 KA38, KF38가 큰 값을 보이고 있고, 각 모선의 부하증가파라미터들 중에서는

15번 모선의 부하증가가 가장 큰 값을 보이고 있다. 특히 15번 모선의 부하증가는 계통의 미소신호안정도를 해치는 중요한 파라미터로 보인다.

이 운전점에서 두 번째로 최우측에 서있는 복소고유치는 최우측고유치는 아니지만 Hopf분기 근처에 있는 안정한 고유치로서 그 실수부의 부호가 계통파라미터에 매우 민감한 상태에 있다. 그러므로 이 고유치에 대한 파라미터 감도의 계산은 필수이다. 잠재적으로 불안정해질 가능성이 가장 큰 고유치에 가장 민감한 파라미터는 역시 38번 발전기의 여자기 정수와 15번 모선의 부하증가임을 알 수 있다.

표 3 최우측고유치에 대한 ISPS측도
Table 3 ISPS measures to rightmost eigenvalues

최우측 고유치	$\lambda 58,50 - .10600 \pm j.35548$
measure of ISPS (σ_j)	KL15, KL16, KF38, KA36, KE35

3.1.2 $\Delta Pt = 2432 MW$

이 운전점에서는 계통이 이미 Hopf분기점을 지나 이미 불안정한 상태에 있다. 이 때의 중요파라미터들은 38번 모선 발전기의 여자기정수와 15, 16번 모선의 부하증가이다. 이는 위의 부하증가 ΔPt 2144MW일 때 살펴본 결과 중 두 번째 최우측 고유치에 대한 파라미터감도해석 결과와 동일하다. 즉 불안정을 유발하는 고유치가 반드시 최우측고유치가 아님을 알 수 있다.

이 점으로부터 조금 더 부하를 증가시켜보면, 이들 고유치가 두 개의 동일한 실수고유치로 되는 NF 분기를 맞이하게 된다. 이 고유치들은 그 순간부터 고유치공간의 실수축을 따라 서로 반대방향으로 향하게 된다. 그리고 ΔPt 31.83pu일 때, 양의 방향으로 증가하던 고유치가 SI분기를 지나면서 매우 큰 값을 가지게 된다. 음의 방향으로 진행하던 고유치는 다시 실수부를 지나면서 SN 분기를 하게 된다. 그러나 양의 방향으로 진행하던 고유치는 SI분기를 지나면서 다시 원점을 향하게 되지만 허수축을 지나 음의 영역으로 들어가는 않는다.

4. 규제완화환경을 고려한 미소신호안정도의 해석에

4.1 Available Transfer Capability(ATC)

ATC는 넓은 의미에서 계통의 안전도(security)가 확보된 상태에서 한 계통에서 다른 계통으로 최대로 전송될 수 있는 전력을 의미한다. 안전도의 정의가 매우 포괄적이고 유동적이지만 송전계통을 계획하거나 운용할 때 상정사고를 고려하여 계통의 전압이나 전류 등이 원치 않는 값이 되지 않는 범위에서 ATC를 계산하여야 함을 의미한다. 이러한 의미에서 안전도는 계통자체의 열용량과 더불어 과도안정도, 전압안정도, 미소신호안정도 및 계통신뢰도 등을 모두 포함하고 있다.

운용단계에서의 ATC는 계통운전조건이 변화할 때 열용량 제약, 전압제약, 안정도제약을 고려한 송전허용용량(Total

Transfer Capability;TTC)으로부터 쉽게 구해지며, 계획단계에서의 ATC는 신뢰도를 포함한 안전도제약하의 최적조류계산을 이용하여 계산할 수 있다. 북미신뢰도협회(North American Electric Reliability Council; NERC)에서 정의한 바에 의하면 운용단계에서 ATC는 그림 7과 식 (19)에서 알 수 있듯이 TRM와 ETC가 주어진다면 결과적으로 TTC를 계산함으로써 쉽게 구할 수 있다[18].

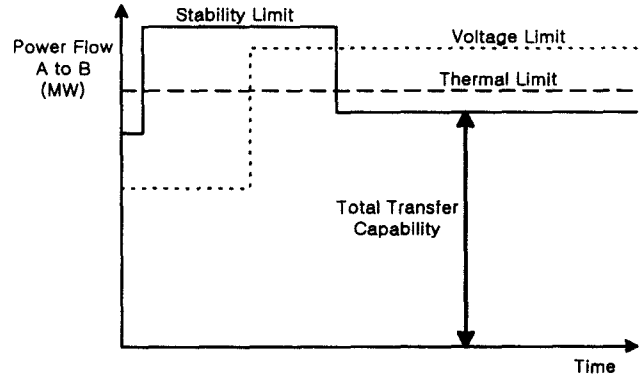


그림 7 송전허용용량(TTC)의 제약들
Fig. 7 The limits of Total Transfer Capability

$$ATC = TTC - TRM - ETC(CBM 포함) \quad (19)$$

- 여기서 TTC : Total Transfer Capability
- TRM : Transmission reliability margin
- ETC : Existing transmission commitments
- CBM : Capacity benefit margin,

본 논문에서는 제안하고 있는 종합적 미소신호 안정도 해석 알고리즘은 운용단계의 ATC제약들 중에서 정적인 전압안정도와의 미소신호안정도제약을 고려하는 ATC를 구하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 다음의 예에서 연계된 모델 계통의 TTC를 구하기 위해 제안하는 알고리즘을 이용하여 ATC제약들 중 계통의 미소신호안정도가 보장되는 범위에서 계통이 최대로 전송할 수 있는 전력의 양을 계산하는 예를 보이고자 한다.

지역간 전송이 연계계통에서 TTC를 계산하기 위해서는 연속알고리즘을 적용하기 위한 부하증가 시나리오를 재구성하여야 한다. 이러한 경우 전력전송경로가 많아지고 지리적으로 확장될수록 시나리오 구성이 어려워지므로 ATC계산은 더욱 복잡해진다.

그림 8은 다지역 동시전송의 일반적인 모델을 도시하고 있다. 전체계통에서 동시에 n개의 전송(transaction)이 이루어지고 있다면 각각 2개의 지역간의 전송으로 보아서 총 2n개의 다른 지역간의 전송이 이루어지고 있다고 생각할 수 있다. 여기에 불안정한 운전점을 얻기 위해 앞서 언급한 평형해의 추적기법을 적용하여 그 점에서 각 전송량을 지정된 전송량에 대하여 검토하여 본다.

위에서 언급한 바와 같이 연계계통의 경우 지역간 전력전송량이 고정되어 있기 때문에 단일지역에서의 식 (8)(9)의 KLi와 KGi를 그대로 사용하면 안된다. 본 논문에서는 지역간 전송을 고려하여 수정된 부하 및 발전량 증가 시나리오를 사용한다[19].

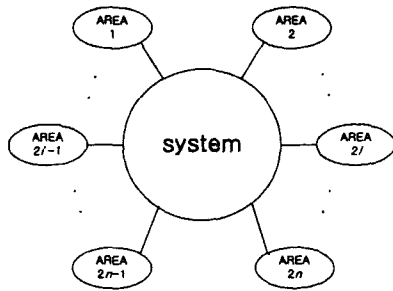


그림 8 다지역 전송모델
Fig. 8 Multi-Area transactions

4.2 지역간 전송량을 고려한 경우의 미소신호안정도의 해석에

그림 9에 도시되어 있는대로 New England 모델계통을 4지역으로 분할하고 전체의 총부하가 6310.5MW(base case)일 때 지역1에서 지역2로 1545.8MW, 지역3에서 지역 4로 1676.7MW의 전력이 동시에 전송되고 있다. 이때 부하증가파라미터 λ 를 도입하기 위해 단일지역에서의 시나리오를 수정하여 지역간 전송량을 고려한 지역2와 지역4의 부하증가를 결정한다. 지역2와 지역4를 살펴보면 지역1과 지역3으로부터 발전된 전력을 공급만 받고 외부로 전력을 보내지는 않으므로 이들 지역의 부하들은 일정한 비율로 증가하고 이에 따라서 지역1과 지역2에서의 발전량 증가도 구할 수 있다.

전체부하에 대한 발전량의 배분을 공급해야 할 지역의 부하 증가시나리오를 구성하면 표 4와 같이 부하 및 발전량의 분배로써 정리된다.

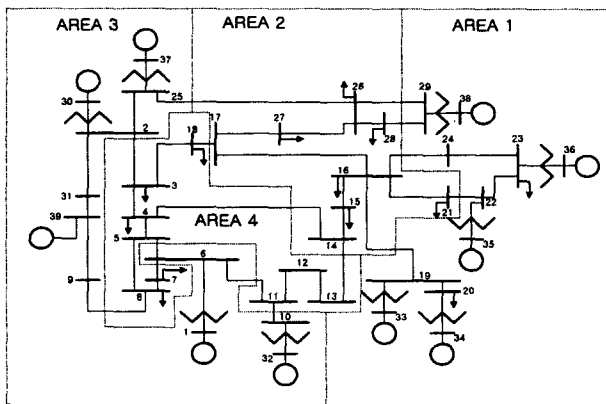


그림 9 지역간 전송을 고려한 모델계통의 예
Fig. 9 New England systems considering multi-area transactions

표 4 각 지역의 부하 및 발전량 증가의 분배(KLi, KGi)
Table 4 Load increase and generation sharing parameters at each area

Area	Load increse	Generation sharing
1		0.48723
2	1	
3		0.86205
4	0.9681	

표 5 최우측고유치와 중요파라미터

Table 5 rightmost eigenvalues and critical parameters

최우측 고유치	$\lambda_{15,14} = .1600 \pm j5.1520$
measure of ISPS (σ_j)	KL4, KL15, KF35, KE33, KE35

위와 같은 시나리오를 가지고 제안한 알고리즘을 적용하여 안정도를 해석하였을 때 기저부하로부터 1918.04MW만큼 총 부하가 증가하였을 때 한 개의 복소고유치의 실수부가 양이므로 계통이 Hopf분기점을 지난 직후의 불안정한 상태에 있음을 알 수 있다. 중요파라미터들은 고려하는 파라미터들의 ISPS 측도를 계산하여 그 크기를 비교함으로써 쉽게 알 수 있었다. 표 5에서와 같이 35번 모선 발전기의 여자기정수와 4, 15번 모선의 부하증가로서 불안정을 유발하는 중요파라미터임을 알 수 있다.

그림 10은 모델계통의 지역간 전송량이 평형해의 경로상에 증가되는 형태를 보여주고 있다. 처음으로 만나는 불안정점에서의 전송량이 안정도제약하의 TTC가 됨을 알 수 있다.

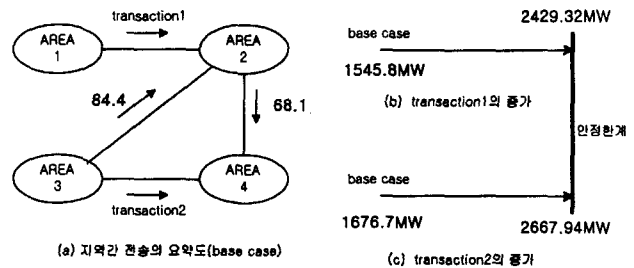


그림 10 지역간 전송량과 증가한계량
Fig. 10 Limits of multi-area transactions

5. 결 론

본 논문에서는 계통의 부하가 점진적으로 증가할 때 평형해의 경로 위에서 계통의 미소신호 안정도를 판별하고 불안정하거나 잠재적으로 불안정한 평형점을 감지하여 중요 파라미터를 색출해내는 알고리즘을 제안하였다. 연구의 목적을 위해 불안정한 점에서도 강인한 수렴성을 보이는 평형해의 추적기법인 연속알고리즘과 추적된 해의 경로상에서 불안정점을 감지하기 위해 최우측고유치 계산법(ISQRMA)을 적용하였다. 또한 불안정한 운전점에 영향을 미치는 중요파라미터를 색출하는 방법으로 수학적인 한계를 갖지않고 계산량이 적어서 실제계에 적용가능한 감도해석법(ISPS)을 적용하였다.

제안하는 알고리즘을 모델계통에 적용하여 미소신호 안정도를 해석하여 알고리즘의 유용성을 검증하였다. 추가로 미래의 상업적 전력시장을 고려하여 다지역으로 분할된 모델계통에서 안정도를 해석하고 안정한계점에서의 전송량을 계산하였다.

제안하는 종합적인 미소신호 안정도 해석 알고리즘은 사용

하는 모델의 정확성과 관계없이 그 체계를 유지하고 있으며 어떠한 경우에도 주어진 계통파라미터의 점진적인 변화에 대한 계통의 안정한계점의 색출이 가능하다. 따라서 부하나 발전기 또는 계통제어기기 등 고려할 수 있는 동적부분의 정확한 수학적인 모델을 포함하거나 예상되는 시나리오의 변화에 대해 일관성있게 미소신호 안정도를 해석할 수 있다.

특히 미래의 상업적 경쟁체제의 전력시장에서 계통은 강한 제약하에서 운전되어질 것으로 예상된다. 운용단계에서의 ATC는 계통운전조건이 변화할 때 열용량제약, 전압제약, 안정도제약을 고려한 송전허용용량(Total Transfer Capability ; TTC)으로부터 쉽게 구해지며, 본 논문에서는 제안하고 있는 종합적 미소신호 안정도 해석 알고리즘은 TTC제약들 중 정적인 전압안정도와의 미소신호안정도제약을 자동적으로 제공하고 있다. 특히 운용단계 뿐만아니라 계획단계에서 포괄적 범위의 안전도제약하의 ATC계산에 본 알고리즘이 유용하게 사용될 것으로 기대되며, 특히 계통운전의 변화시나리오로서 예상되는 전력 수요공급의 변화, 새로운 계통제어기기(예: FACTS)의 투입 등에 쉽게 적용이 가능한 알고리즘이라 사료된다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 97년도 단기과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(관리번호 97-지-04).

참 고 문 헌

[1] V. Ajjarapu and C. Christy, "The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, February, 1992.

[2] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, February, 1993.

[3] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, and N. Balu, "CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 623-634, May, 1995.

[4] Adam Semlyen, Lei Wang, "Sequential computation of the complete eigensystem for the study zone in small signal stability analysis of large power systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3 No. 2, pp. 715-725, May 1988.

[5] N. Uchida and T. Nagao, "A new eigen-analysis method of steady state stability studies for large power systems : S-matrix method," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.2, pp705-714, May 1988.

[6] 남해곤, 심관식, 문채주, "Hessenberg Process를 이용한

대형전력계통의 고유치해석," 대한전기학회 논문지 42권 10호, pp53-63, 1993년 10월.

[7] 남해곤, "Lanczos Process를 이용한 대기 전력계통의 고유치해석," 대한전기학회 논문지 40권 10호, pp984-970, 1993년 10월.

[8] Saad, Y. "Chebyshev acceleration techniques for solving nonsymmetric eigenvalue problems," Math.Comput.Vol.42, pp567-588, 1984.

[9] Ho, D., Chatelin, F., and Bennani, M. "Arnoldi-Tchebyshev procedure for large scale nonsymmetric matrices," Math. Model. Numer. Anal. 24, pp53-65, 1990.

[10] Jennifer A. Scott. "An Arnoldi code for computing selected eigenvalues of sparse, real, unsymmetric matrices," ACM Trans. on Math. Software, Vol.21, No.4, pp432-475, December 1995.

[11] Karl Meerbergen and Dirk Roose, "Matrix transformation for computing rightmost eigenvalues of large sparse non-symmetric eigenvalue problems," IMA Journal of Numer. Anal, Vol.16, pp297-346, January 1996.

[12] B. Lee, K. Iba and M. Hirose, "The Calculation of Rightmost Eigenvalues for Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems," IEE Japan Power & Energy '96, International Session of IEE Japan & Energy Society Annual Conference, Aug.7-8, 1996.

[13] B. Lee, "Calculation of the Rightmost Eigenvalue Using Implicit Shift QR modified Arnoldi Method", Journal of KIEE, Vol.46, No.1, Dec. 1997.

[14] 김동명, 이병준, "전력계통의 임계 고유치 계산에 관한 연구(아놀디체비세프법의 적용)," 대한전기학회 논문지, 47권 6호, 1998.

[15] B. Lee and V. Ajjarapu, "Invariant Subspace Parametric Sensitivity (ISPS) of Structure-Preserving Power System Models", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp.845-850, May, 1996.

[16] Bo Long, The Sparse formulation fo ISPS and its Application to Transfer Margin Estimationas Limited by Dynamic Voltage Collapse, Master of Science Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 1997.

[17] Y. Mansour, editor, Suggested techniques for voltage stability analysis, Technical Report 93TH0620-5PWR, IEEE/PES, 1993.

[18] North American Electric Reliability Council, Available Transfer Capability Definition and Determination, June, 1996

[19] V. Ajjarapu and Geng Wang, "The Influence of Dynamic Voltage Stability on Availity Transfer Capability"

[20] 김상암, 이병준, 권세혁, "계통의 종합적 미소신호 안정도 해석에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집A, 1998.

[21] P. W. Sauer and M. A. Pai, "Power system

steady-state stability and the load-flow Jacobian,"
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4,
pp. 1374-1383, November 1990.

저 자 소 개



김 상 암 (金 相 岩)

1968년 9월 8일생. 1993년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997~현재 동 대학원 박사과정 재학

Tel : 3290-3803

E-mail : sakim@elec.korea.ac.kr

이 병 준 (李 炳 峻)

전기학회논문지 제48권 제3호 참조

권 세 혁 (權 世 燦)

전기학회논문지 제48권 제3호 참조

송 화 창 (宋 和 昌)

전기학회논문지 제48권 제3호 참조