

TCSC의 H_∞ 제어에 의한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제 Part I : 설치지점 선정

論 文

49A-5-5

Damping Inter-area Low Frequency Oscillations in Large Power Systems with H_∞ Control of TCSC PART I : TCSC Siting

金容求* · 沈冠植** · 宋成根* · 全瑩煥*** · 南海鯤§

(Yong-Gu Kim · Kwan-Shik Shim · Sung-Geun Song · Young-Hwan Chun · Hae-Kon Nam)

Abstract - This paper presents application results of the augmented matrix eigen-sensitivity theories to TCSC siting problem for damping the inter-area low frequency oscillation in the large KEPCO system. First and second-order eigen-sensitivities of the inter-area mode are computed for changes in susceptance of the transmission lines. The lines having high sensitivity are chosen as the initial candidates for installing TCSC. Then for each of the chosen candidates, Bode plot of the transfer function with line susceptance as the input and the bus voltage at one side of the line as the output is computed. Using the Bode plots, the lines having any zeros near the inter-area mode are screened out since design of TCSC controller is very difficult in such a case. The H_∞ TCSC controller installed at any finally chosen candidate is found to be effective in damping the inter-area oscillation, and the proposed TCSC siting algorithm is proved to be valid. Design of H_∞ controller is described in Part II of this paper.

Key words : inter-area low frequency oscillation, eigen-sensitivity analysis, augmented matrix, TCSC, H_∞ control

1. 서 론

현대 전력계통에서 고성능 여자기의 사용과 발전용량 대비 송전능력의 감소는 계통의 제동토크를 감소시켜 0.1-2 Hz의 지속적 저주파진동을 유발하는 경향이 있고, 이 저주파진동은 전압안정도와 함께 현대 전력계통의 안전운전을 저해하는 가장 중요한 요인의 하나로 작용하고 있다. 저주파진동은 한 지역의 발전기가 나머지 계통에 대하여 진동하는 지역모드(local mode)와 한 지역의 발전기들이 다른 지역의 발전기들과 약 180°의 위상차이를 가지고 진동하는 지역간모드(inter-area mode)로 나누어진다. 현재 지역모드의 특성은 잘 이해되고 있고, 이 모드의 제동은 PSS (power system stabilizer)를 사용하여 쉽게 개선하는 것이 가능하다. 지역간 저주파진동은 동적으로 강하게 결합된 한 지역의 발전기 그룹이 다른 지역의 발전기 그룹과 취약한 연계선으로 연결되고 이 연계선을 중부하로 운전할 때 발생한다. 지역간모드는 일반적으로 지역모드보다 낮은 주파수대역인 0.1-0.8 Hz로 진동하고, 전체 시스템의 많은 부분이 관련되어 한번 발생되면 계통의 안전운전에 미치는 파급효과가 매우 크고 광역의 정전사고로 발전될 수 있다[1]. 또한 그 특성이 계통 토폴로지, 발전기의 위치와 여자기 유형, 그리고 부하의 특성 및 위치 등 다양한 요인들에 의하여 결정되고 계통마다 달라 잘 파악되어 있지 않다. 지역간모드의

이해는 많은 계통의 경우를 해석한 후에야 가능할 것으로 예상된다. 또한 지역간모드는 다양한 요인에 의해 발생되고, 많은 발전기가 관련되므로 지역모드와는 달리 PSS로 제동 특성을 개선하는 것이 쉽지 않다.

최근 전력전자 기술을 사용하여 전송능력을 향상하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 지역간 저주파진동은 두 지역을 연결하는 취약선로를 통한 전송전력의 진동에 기인하므로, HVDC, TCSC (thyristor controlled series capacitor), UPFC(unified power flow controller)같은 직렬보상 FACTS 기기의 전력전송 제어능력은 지역간 저주파진동 모드의 제동에 매우 효과적일 수 있다. 최근의 브라질 실계통에 TCSC를 투입하여 지역간 진동모드의 제동특성을 향상시킨 것은 하나의 좋은 예이다[2].

TCSC 또는 FACTS 기기의 적절한 설치지점 선정은 성공적인 제어를 위한 필수적 선행요건이다. PSS나 방사상 계통에서 TCSC의 설치지점 선정처럼 직관과 경험에 의하여 간단히 결정되는 경우도 있으나, 복잡한 루프로 구성된 계통에서 TCSC의 설치지점은 체계적인 해석방법을 필요로 한다. TCSC의 설치지점 선정에 유수(residue)와 고유치감도가 가장 많이 사용되고 있다[3,4]. 유수를 사용한 설치지점 선정은 설치지점 후보마다 입력행렬을 계산하여야 하는 번거로움이 있어, 입력행렬을 계산하지 않고도 설치지점을 선정할 수 있는 고유치감도 방법이 유리하다고 할 수 있다. 그러나, 지금까지 보고된 고유치감도에 의한 TCSC의 설치지점 선정 알고리즘은 미소신호모델을 확대상태행렬이 아닌 축약상태행렬을 사용하여 대규모 실계통에 적용이 어렵고, 저차의 시험계통에 적용하는데, 그치고 있다. 또한 1차 고유치감도만을 계산하여 보상의 정도에 따른 고유치변화의 비선형성을 간과하는 오류를 범할 가능성이 있다.

본 논문에서는 대규모 계통의 지역간 저주파진동의 제동

* 正會員 : 全南大 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 西南大 工大 電氣電子通信工學部 · 工博

*** 正會員 : 韓國電氣研究所 責任研究員 · 工博

§ 正會員 : 全南大 工大 電氣工學科 · 工博

接受日字 : 2000年 2月 17日

最終完了 : 2000年 4月 3日

을 위한 TCSC의 H_∞ 제어기 설계에 필요한 TCSC의 위치 선정과 제어기 설계의 두 과정 중에서 고유치감도해석에 의한 체계적인 위치선정 알고리즘을 기술하였고, H_∞ 제어기 설계는 문헌 [5]에 기술하였다. 고유치감도해석은 최근 본 논문의 저자들이 개발한 확대행렬을 이용한 고유치감도 해석법을[6] 사용하여 계통규모에 제한이 없이 적용할 수 있으며, 대규모 계통인 한전계통의 1차 및 2차 고유치감도를 계산하여 비선형성을 고려하였다.

시험계통으로 사용된 한전계통은 215-기, 791-모선, 1575-선로로 구성되고, 축약 상태행렬의 크기는 2658차, 확대행렬의 크기는 4240차로 그 규모가 축약행렬을 사용한 일반적인 고유치계산 알고리즘으로는 고유치감도 계산이 불가능한 큰 규모이다. 지역간 진동모드 제동을 위한 최적의 TCSC 설치지점은 선로정수에 대한 지역간모드의 고유치감도가 큰 선로들을 후보로 선택하고, 이들 선로들 중에서 최종적으로 주파수응답을 통해서 TCSC의 최적위치를 선정하였다. 그리고 선정된 최적위치에 H_∞ 제어기 TCSC를 투입해서 simulation한 결과[5], 지역간 진동모드의 제동특성이 크게 향상됨을 확인하였다.

2. 미소신호안정도 모델과 고유치감도해석

2.1 미소신호안정도 해석

지역간 저주파진동은 전체 시스템의 많은 부분이 관련되고 미소신호안정도 해석은 비교적 긴 시간동안 이루어지므로 전력기기와 그들의 제어기를 상세히 모델링 해야 한다. 일반적으로 선형시스템은 다음 식으로 나타내진다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + U \Delta u \tag{1}$$

$$\Delta y = C \Delta x \tag{2}$$

여기서 x 는 상태변수벡터, u 는 입력변수벡터, A 는 상태행렬(앞으로 확대상태행렬에 대비하여 A 를 축약상태행렬이라 부른다), C 는 출력행렬, U 는 입력행렬을 나타낸다. 그러나 대규모 전력계통을 축약상태행렬로 나타내면, 스파시티 특성을 상실하여 많은 컴퓨터 기억용량과 계산시간을 필요로 한다.

전력계통에서 기기의 상태방정식은 기기의 내부상태와 기기가 연결된 모선의 전압으로 표현할 수 있다[6]. 즉,

$$\Delta \dot{x} = A_G \Delta x + B_G \Delta v + U_G \Delta u \tag{3}$$

여기서 v 는 모선전압을 계통기준축(RI-축)으로 나타낸 R-성분 전압과 I-성분으로 구성된 실수전압벡터이다. 전력계통의 선형모델은 이 상태방정식에 기기들을 연결하는 네트워크 방정식을 추가하여 완성되는데, 기기로부터 계통에 주입되는 전류는 네트워크로 전달되는 전류와 같다는 KCL로부터 네트워크방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta I = C_G \Delta x = Y \Delta v \tag{4}$$

미소신호안정도 해석에서 두 방정식은 다음과 같이 하나로 결합된 확대계통상태방정식(augmented system state equation, ASSE)으로 나타낸다[6].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ C_G & -Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_G \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u \tag{5}$$

$$\Delta y = C_x \Delta x + C_v \Delta v \tag{6}$$

또는,

$$\Delta \hat{x} = \tilde{A} \Delta \hat{x} + \tilde{U} \Delta \hat{u} \tag{7}$$

$$\Delta y = \tilde{C} \Delta \hat{x} \tag{8}$$

여기서 \hat{x} 는 확대상태변수벡터, \tilde{A} 는 확대상태행렬을 나타낸다. ASSE는 상태방정식과 대수방정식의 결합으로 구성되므로 4개의 부분행렬로 구성되어 있고, 각 행렬은 전력계통 특성상 매우 스파스한 행렬이 된다. 따라서, 안정도해석을 위한 모든 연산이 효율적으로 이루어진다.

그리고 식 (1)에 대응되는 축약상태행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A = A_G + B_G Y^{-1} C_G \tag{9}$$

TCSC로 제동특성을 향상하고자 하는 지배적 지역간모드를 계산하기 위해서는 고유치/고유벡터를 계산하여야 하는데, 이 논문에서는 확대행렬의 고유치감도 해석에 필요한 고유치와 고유벡터를 Hessenberg 법과 RQI(Rayleigh quotient iteration)법을 이용하여 계산하였다[7].

2.2 확대행렬의 고유치감도[6]

행렬 A 의 좌/우고유벡터가 각각 w_i 와 v_i 이고, 확대행렬 \tilde{A} 의 좌우고유벡터를 각각 \tilde{w}_i 와 \tilde{v}_i 라 하면, 어떤 계통정수 K 의 변화에 대한 1차 및 2차 고유치감도는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial K} = \tilde{w}_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \tilde{v}_i \tag{10}$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial K^2} = \tilde{w}_i^T \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial K^2} \tilde{v}_i + 2 \tilde{w}_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial K} \tag{11}$$

2차 고유치감도의 계산에 필요한 우고유벡터 감도는 식 (12)와 (13)을 연립하여 풀면 유일하게 결정할 수 있다.

$$(\tilde{A} - \lambda_i \tilde{B}) \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial K} = - \left(\frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial K} \tilde{B} \right) \tilde{v}_i, \tag{12}$$

$$\tilde{w}_i^T \tilde{B} \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial K} = 0 \tag{13}$$

여기에서 행렬 \tilde{B} 의 차수는 확대행렬 \tilde{A} 와 같다. 그리고 행렬 \tilde{B} 는 상태변수 수만큼 대각선요소에 1을 가지고 있고 나머지 요소는 모두 0인 행렬이다.

이 식은 관심 있는 모드의 고유벡터와 그 1차 고유치감도만으로 2차 고유치감도를 계산할 수 있고, 확대행렬을 사용하므로 모든 연산과정에서 스파스한 특성을 그대로 유지할 수 있어 대규모 계통의 고유치감도 해석을 가능하게 한다.

3. TCSC 설치지점 선정

3.1 선로리액턴스에 대한 지역간모드의 고유치감도

TCSC는 선로의 리액턴스를 조절하여 조류를 변동시킨다. 따라서, TCSC의 최적 설치지점은 선로의 서셉턴스(susceptance)의 변화에 대한 고유치감도가 큰 선로가 된다. 확대행렬을 구성하는 4개의 부분행렬 중에서 A_G, B_G, C_G 는 기기의 정수의 함수로 나타내지므로 선로서셉턴스의 변화에 영향을 받지 않는다. 따라서, 모선 k 와 l 을 연결하는 선로의 어드미턴스를 $y_{kl} = g_{kl} + jb_{kl}$ 라 할 때, 서셉턴스 b_{kl} 의 변화에 대한 확대상태행렬의 감도는 다음 식과 같이 간단히 표현된다.

$$\frac{\partial \tilde{\lambda}_i}{\partial b_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial Y}{\partial b_{ij}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

모선 어드미턴스 행렬 Y_{BUS} 의 (ij) 요소를

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (15)$$

로 정의하면, 이 값은 이 모선들에 연결된 선로어드미턴스들의 선형결합으로 표현된다. 식 (4)의 네트워크방정식 중에서 모선 k 와 l 에 관련 부분만을 RI-성분으로 나누어 쓰면,

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{Ik} \\ \Delta I_{Rk} \\ \dots \\ \Delta I_{Il} \\ \Delta I_{Rl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{kk} & G_{kk} & \dots & B_{kl} & G_{kl} \\ G_{kk} & -B_{kk} & \dots & G_{kl} & -B_{kl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{lk} & G_{lk} & \dots & B_{ll} & G_{ll} \\ G_{lk} & -B_{lk} & \dots & G_{ll} & -B_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{Rk} \\ \Delta v_{Ik} \\ \dots \\ \Delta v_{Rl} \\ \Delta v_{Il} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기에서 $\Delta v_{Rk}, \Delta I_{Rk}$ 의 첨자 Rk는 모선 k 의 전압과 전류의 실수부를 나타내고, $\Delta v_{Ik}, \Delta I_{Ik}$ 의 첨자 Ik는 모선 k 의 전압과 전류의 허수부를 나타낸다.

따라서, 모선 k 와 l 을 연결하는 선로의 감도 $\frac{\partial Y}{\partial b_{kl}}$ 는 식 (16)에서 B가 위치하는 8개의 부분행렬의 대각선 항에서만 1 또는 -1의 값을 가지고 그 밖의 값은 모두 0의 값을 가지게 된다. 이 결과와 식 (14)를 (10)에 대입하면, 선로 kl 의 서셉턴스에 대한 모드 i 의 1차 고유치감도는 다음과 같음을 보일 수 있다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial b_{kl}} = \Delta w_{iR} \Delta v_{iR} - \Delta w_{iI} \Delta v_{iI} \quad (17)$$

여기서,

$$\Delta w_{iR} = w_{iR}^k - w_{iR}^l, \quad \Delta v_{iR} = v_{iR}^k - v_{iR}^l \quad (18)$$

$$\Delta w_{iI} = w_{iI}^k - w_{iI}^l, \quad \Delta v_{iI} = v_{iI}^k - v_{iI}^l \quad (19)$$

이고, v_{iR}^k, v_{iI}^k 는 각각 모선 k 의 전압 v_R 과 v_I 에 대응되는 확대행렬의 우고유벡터 성분이며, w_{iR}^l, w_{iI}^l 은 모선 l 의 전압 v_R 과 v_I 에 대응되는 확대행렬의 좌고유벡터 성분이다.

이 식으로부터 임의의 선로의 서셉턴스에 대한 고유치감도는 단순하게 그 선로가 연결된 양쪽 모선의 전압에 대응되는 좌고유벡터와 우고유벡터의 성분만의 연산에 의하여 매우 효율적으로 계산됨을 알 수 있다.

3.2 TCSC 설치지점 선정

TCSC의 설치지점 후보는 앞에서 기술한대로, 선로의 서셉턴스 변화에 대한 고유치감도가 큰 선로이다. 이 논문에서는 선로서셉턴스의 100% 변화에 대한 고유치변동의 크기가 큰 선로들을 TCSC 설치지점 후보로 선택하고, 고유치의 변동량은 다음 식으로 계산하였다.

$$\Delta \lambda_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial b_{kl}} \Delta b_{kl} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial b_{kl}^2} \Delta b_{kl}^2 \quad (20)$$

계산의 효율성을 제고하기 위하여 1차 고유치감도를 식 (17)에 의하여 우선적으로 계산하고, 1차 감도가 큰 선로에 한하여 2차 고유치감도를 계산하였다.

3.3 주파수응답에 의한 설치지점의 여과

고유치감도에 의하여 선로의 서셉턴스의 변화에 대한 고유치감도가 크면 TCSC의 modulation에 의한 지역간 모드의 가제어성(modal controllability)이 큰 것을 의미한다. 제어기 설계를 위해선 출력변수(제어기의 입력변수)를 선택해야 하는데, 직렬신호인 지역간조류를 제어하기 위한 보조 제어 예선 병렬신호인 모선전압이 적절하다[8]. 본 논문에서는 선로 양단의 모선전압 중에서 가관측성(observability)이 큰 모선의 전압을 출력변수로 선정하였다. 고유치감도에 의하여 입출력변수가 결정되었다고, 대규모 전력계통제어에서 지역간 진동모드 근처에 영점이 있으면, 제어기의 제어효과를 기대하기 어렵다. 이와 비슷한 사례는 PSS 설치지점 선정과정에서 극점 근처에 영점이 존재할 때, 비록 유수(residue)나 속도 참여율이 큰 값을 가지고 있더라도 제어기의 설계가 매우 어려운 것에서도 발견할 수 있다. 따라서, 고유치감도에 의해 결정된 TCSC 설치지점 후보들 중에서 영점과 극점이 가까이 있으면 이 후보는 설치지점으로 적합하지 않다. 영점과 극점이 가까이 존재하는지의 여부는 영점을 계산하여 점검하는 것도 가능하나, 전달함수의 주파수

응답 곡선 (Bode plot)을 사용하여 판별하였다. 구체적인 방법은 사례연구에서 기술한다.

4. 사례연구

본 논문에서는 한전계통의 2000년 첨두부하시 장기에측 데이터를 대규모계통의 사례연구 시스템으로 사용하였다. 이 계통 데이터는 그 이후의 계통조건 변화를 반영하지 못하였으므로 실제 계통조건과 상당한 차이가 있을 수 있으며, 따라서 이 논문의 해석 결과는 실제와 다를 수 있다. 즉, 사례연구를 위해 사용된 한전계통은 고유치감도 해석에 의한 TCSC의 설치지점 선정 알고리즘을 시험하기 위한 하나의 시험계통에 불과하며 한전계통에 대한 구체적 평가를 하기 위한 것은 아님을 밝힌다.

4.1 한전계통의 고유치해석

2000년 한전계통은 215-기, 791-모선, 1575-선로로 구성되어 있는 대규모 시스템이다. 이 시스템의 총 부하는 38,927 MW로 부하는 일정 MVA로 모의되었고, 확대행렬의 차수는 4240이다. 그림 1은 큰 발전력과 부하를 중심으로 이 계통의 간략한 단선도를 보여주고 있다.

문헌 [7]의 Hessenberg 법을 이용하여 이 계통의 고유치를 계산한 결과, 다음과 같이 제동특성이 좋지 않은 2개의 지배적 진동모드가 계산되었다.

- Mode 1 : $-0.0415+4.3364i$ (0.69 Hz)
- Mode 2 : $-0.0309+5.4118i$ (0.86 Hz)

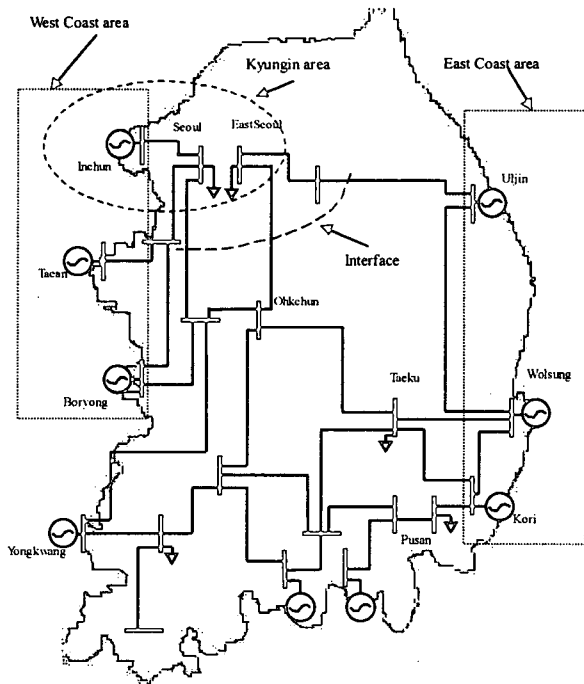


그림 1 한전계통의 간략화 된 단선도
Fig. 1 Simplified one-line diagram of the KEPCO System

이 두 모드의 우고유벡터와 속도참여율을 계산한 결과, 모드 2는 울진원전의 지역모드이며, 울진의 발전기에 PSS를 설치하여 제동특성을 개선할 수 있었다. 표 1은 모드 1의 우고유벡터와 속도참여율을 보여주고 있는데, 이 고유벡터로부터 서해안의 발전기가 동해안 및 동남해안의 발전기들에 대하여 180°의 위상차로 동요하고 있는 전형적인 지역간 모드(inter-area mode)임을 알 수 있다.

표 1 한전계통의 지역간 진동모드의 우고유벡터와 SPF
Table 1 Right Eigenvectors and SPF for the Inter-area Mode of KEPCO System

No.	Mode 1 (-0.0415+4.3364i)				
	Eigenvector			SPF	
	Mag.	Angle	Gen	Mag.	Gen.
1	1.00000	0.00	29151(울진)	1.00000	29151
2	0.82294	-2.49	29361(울산)	0.91387	29152
3	0.81283	2.58	29251(울진)	0.90033	29251
4	0.79613	-4.41	29366(울산)	0.90033	29252
5	0.72289	-3.59	30371(남강)	0.33051	28154
6	0.71772	1.18	29522(삼랑진)	0.33051	28153
7	0.70357	179.47	26168(보령)	0.33051	28152
8	0.66431	-0.65	30154(삼천포)	0.32766	28151
9	0.65746	-175.61	26164(보령)	0.29972	29353
10	0.65490	-3.67	29330(울산)	0.29972	29352

4.2 고유치감도 해석에 의한 TCSC 설치지점 선정

TCSC는 선로의 서셉턴스 변화에 대해 지역간모드의 감도가 큰 선로에 설치하는 것이 효과적임을 앞에서 기술하였다. 표 2는 지역간모드에 대해서 한전계통의 1575개 선로 중에서 서셉턴스에 변화에 대한 2차 고유치감도 중에서 크기가 큰 것들을 보여주고 있다. 표에서 SOESBr은 선로서셉턴스가 100% 증가할 때, 고유치 실수부 변화량의 크기가 큰 순서로 나타낸 것이고, SOESBm은 고유치 변화의 크기가 큰 순서로 나타낸 것이다. 선로서셉턴스를 100% 증가하는 것은 선로를 1회선 병렬로 추가로 투입하는 것과 같은 효과가 있으며, 표에 기술하지는 않았으나 계산결과의 검증을 위해 실제로 선로 1회선을 추가로 투입한 상태에서 조류계산을 수행하고, 새로운 운전점에서 생성된 확대상태행렬에 Hessenberg법을 적용하여 계산된 고유치 변화량과 고유치감도에 의해서 추정된 고유치 변화량을 비교한 결과, 거의 일치하여 고유치감도 계산의 정확성을 확인하였다.

표 2의 SOESBr 값에서 실수부의 감도가 매우 작기 때문에 1회선의 증설은 실수부의 이동에 큰 영향을 주지 않으므로, 새로운 선로 증설과 같은 네트워크 보강은 지역간모드의 개선에 별 도움이 되지 못하고 지역간모드의 제동특성 개선을 위해서는 단순한 선로보강보다는 TCSC 등 다른 방법을 사용하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다. 또한, TCSC 설치지점으로는 SOESBm 값이 큰 선로들을 우선적으로 고려하면 되나, 영점과 극점이 지역간모드 가까이 존재하는 경우는 제어기 설계에 어려움이 있으므로 주파수응답곡선을 사용하여 여과한다.

표 2 KEPCO 시스템의 선로정수에 대한 고유치변화 (Mode 1)

Table 2 Eigen-Sensitivity for Line Parameters of KEPCO Systems

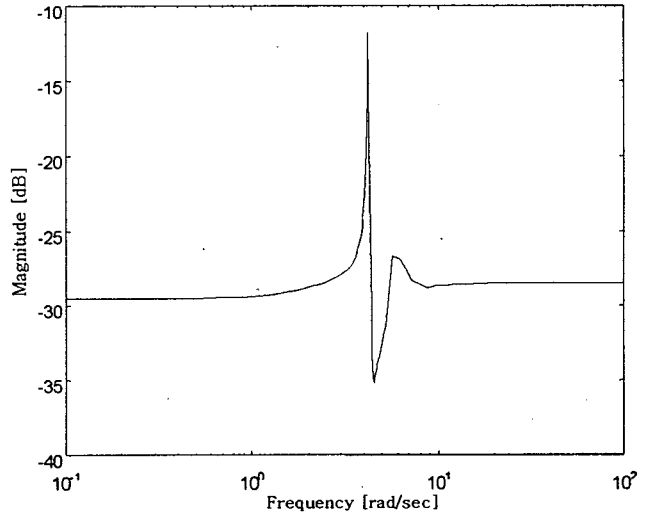
Ranking	Line No. & Name		SOESBr	Line No. & Name		SOESBm
1	4700 신영인3	6900 신당진3	-0.00478+j0.01834	5500 신영주3	8500 신포항3	-0.00251+j0.05621
2	5500 신영주3	8500 신포항3	-0.00251+j0.05621	4700 신영인3	4900 청원3	-0.00207+j0.03750
3	6600 신옥천3	7100 신남원3	-0.00234+j0.03143	6600 신옥천3	8600 서대구3	-0.00113+j0.03187
4	8500 신포항3	9250 고리NP#2	-0.00207+j0.02513	6600 신옥천3	7100 신남원3	-0.00234+j0.03143
5	4700 신영인3	4900 청원3	-0.00207+j0.03750	8500 신포항3	9250 고리NP#2	-0.00207+j0.02513
6	6150 보령TP	6950 아산3	-0.00196+j0.00655	2500 동서울3	5700 신제천3	-0.00021+j0.02087
7	8150 월성NP#1	8500 신포항3	-0.00189+j0.00664	4900 청원3	6600 신옥천3	-0.00092+j0.01935
8	4600 서서울3	6800 청양3	-0.00183+j0.00792	4700 신영인3	6900 신당진3	-0.00478+j0.01834
9	6151 보령TP#2	6800 청양3	-0.00166+j0.00603	1500 의정부3	5150 울진NP#1	-0.00029+j0.01652
10	6450 신김제3	7150 영광NP#1	-0.00126+j0.00628	5500 신영주3	5700 신제천3	-0.00081+j0.01258

4.3 주파수응답특성에 의한 여과

단순히 고유치감도만으로 TCSC 설치지점을 선정하면, 표 2의 SOESBm에서 선로 5500-8500, 4700-4900, 6600-8600 순서로 감도의 크기가 큰 선로들이 선택된다. 이 후보선로들 중에서 전달함수의 영점이 지역간모드에 가까이 존재하는 경우는 제어기 설계에 어려움이 있으므로 이를 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 선로 양단 모선의 전압 중에서 가관측성이 큰 모선의 전압을 출력변수로 선로서셉턴스를 입력변수로 취하고, 전달함수를 계산하여 영점이 지역간모드에 가까이 존재하는지를 검증하였다. 그림 2는 고유치감도가 큰 선로들의 전달함수 주파수응답곡선 중에서 4개를 보여주고 있다. 그림 2(a)와 2(b)는 선로 5500-8500과 4700-4900의 전달함수에 대한 주파수응답으로 지역간모드의 주파수 0.69 Hz 부근에서 급격한 변화를 보인다. 이는 이들 전달함수의 영점이 지역간모드 근처에 존재함을 의미한다. 표 2에서 상위 5개 선로가 이러한 양상을 보이며 이들 선로는 TCSC를 투입해도 지역간모드의 제동특성을 기대하기 어렵고, 실제로 이들 선로에 H_{∞} 제어기를 설계하여 투입한 결과 효과가 없음을 확인하였다. 이와는 대조적으로, 그림 2(c)와 2(d)에서 선로 4900-6600(청원3-신옥천3), 선로 2500-5700(동서울3-신제천3)에서는 지역간모드의 주파수 근처에서 전달함수의 크기의 변화가 상대적으로 작아 영점이 지역간모드로부터 이격되거나 그 영향이 작아 TCSC 설치에 적합하다고 할 수 있다. 이들 선로 이외에 표 2에 나타난 10개의 선로들 중에서 선로 5500-5700(신영주3-신제천3)도 주파수응답을 그려보면 영점이 주파수 0.69 Hz로부터 상당히 떨어져있어 TCSC의 적절한 위치로 선정될 수 있다. 실제로 이 선로들에 TCSC의 H_{∞} 제어기를 설계하여 투입하였을 때, 지역간모드의 제동특성이 크게 향상되었는데, H_{∞} 제어기를 설계와 simulation 결과는 문헌 [5]에 상세하게 기술되어 있다.

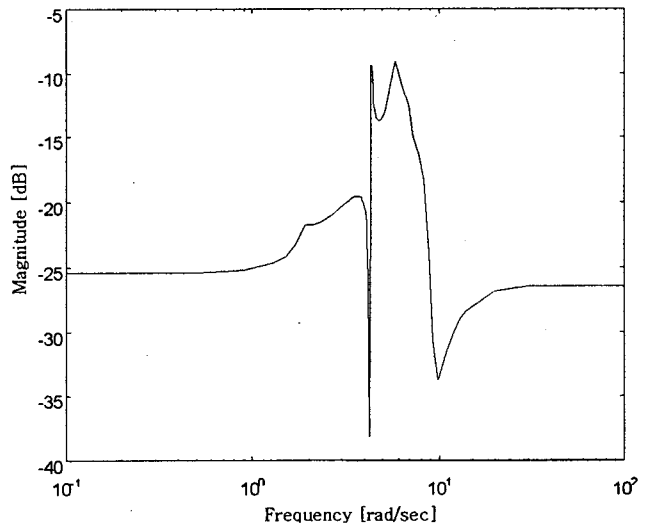
결론적으로, 고유치감도로 TCSC의 설치지점 후보를 선정하고, 이들 후보들을 주파수응답특성으로 여과하여 TCSC의 설치지점을 효과적으로 선택할 수 있다.

V5500/Line 5500-8500 Magnitude

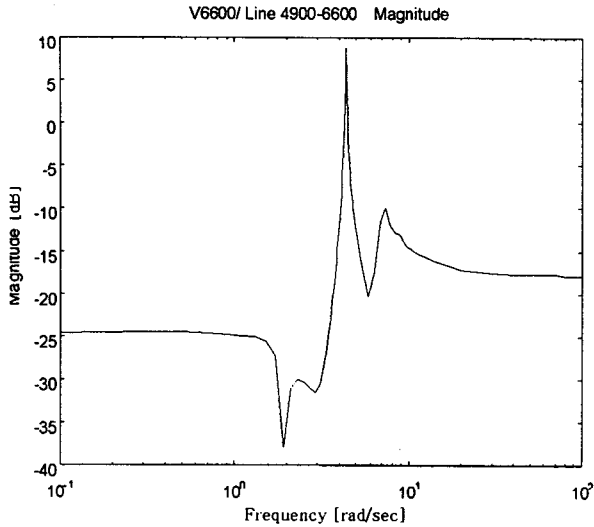


(a) Frequency response of $V_{5500}/X_{5500-8500}$

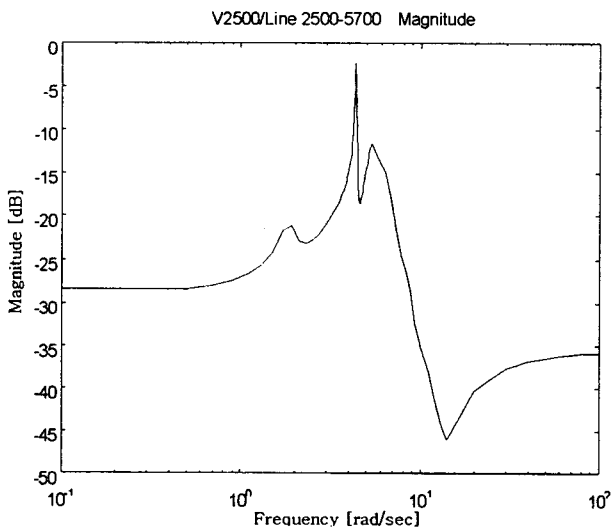
V4700/Line 4700-6900 Magnitude



(b) Frequency response of $V_{4700}/X_{4700-6900}$



(c) Frequency response of $V_{6600}/X_{4900-6600}$



(d) Frequency response of $V_{2500}/X_{2500-5700}$

그림 2 선로리액턴스와 모션전압 사이의 주파수응답
Fig. 2 Frequency response of line reactance and bus voltage

5. 결 론

이 논문에서는 대규모 전력계통에 적용이 가능한 확대행렬의 고유치감도 이론을 실제 계통인 한전계통의 지역간저주파진동의 제동특성 향상을 위한 TCSC의 설치지점 선정에 응용한 결과를 기술하였다. 한전계통은 215-기, 791-모선, 1575-선로로 구성되고 확대행렬의 차수는 4240차이다.

TCSC의 설치지점 후보는 선로의 서셉턴스 변화에 대한 지역간모드의 고유치감도로 선정하였고, 이 고유치감도를 네트워크의 스파시티 특성을 활용하여 매우 효율적으로 계산하는 방법도 제시하였다. 선정된 후보선로 중에는 영점이 지역간모드와 근접하게 위치하여 제어기 설계가 어렵고, 지역간모드의 제동특성 개선을 기대하기 어려운 선로들이 포함될 수 있으므로, 전달함수의 주파수응답곡선을 사용하여

적절하지 못한 후보들을 여과하였다. 최종적으로 선택된 후보들에 H_{∞} 제어를 설계하여 투입한 결과 제동특성이 크게 개선되어 이들 선로가 적절하게 선택되었음도 확인하였다. 또한 한전계통의 고유치감도 해석 결과, 선로보강이 지역간모드의 제동특성 개선에 큰 도움이 되지 못하며, 지역간모드의 제동특성 개선에는 PSS와 TCSC 등 적절한 제어기를 설치하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학재단 특정기초연구 지원(과제번호:1999-1-302-001-3) 및 한국전력공사의 전력기술기초연구비 지원(과제번호:제99-033호)으로 수행되었음.

참 고 문 헌

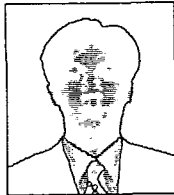
- [1] P. Kundur, "Introduction to the special publication on inter-area oscillations," in Inter-Area Oscillation in Power Systems, IEEE Publication 95TP101, 1994. 10.
- [2] Carlos Gama, "Brazilian north-south interconnection control application and operating experience with a TCSC", IEEE PES '99 Summer Meeting, Vol.2, 1999, pp. 1103-1108
- [3] N. Yang, Q. Liu, J. D. McCally, "TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations," IEEE Trans. on PWRs, Vol 13, No. 4, 1998. 11, pp. 1304-1310
- [4] L. Rouco, F. L. Pagola, "An Eigenvalue Sensitivity Approach to Location and Controller Design of Controllable Series Capacitors for Damping Power System Oscillations," IEEE Trans. on PWRs, Vol 12, No. 4, 1997. 11, pp. 1660-1666
- [5] Y. G. Kim, Y. H. Moon, S. G. Song, K. S. Shim, H. K. Nam, "TCSC의 H_{∞} 제어에 의한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제 PART 2 : TCSC H_{∞} 제어기 설계," 대한전기학회 논문지, 49권, 5호, 2000. 5.
- [6] H. K. Nam, Y. G. Kim, K. S. Shim, K. Y. Lee, "A New Eigenvalue Sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis", IEEE Trans., PE-464-PWRs -0-02-1999
- [7] H. K. Nam, S. G. Song, K. S. Shim, C. J. Moon, D. J. Kim, Y. H. Moon, "Hessenberg Method for Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems," 대한전기학회 논문지, 49권, 4호, 2000. 4.
- [8] S. Zelingher, B. Shperling, J.D. Mountford, R.J. Koessler, "Analytical Studies for Thyristor Controlled Series Compensation in New York State, Part II: Dynamic Stability Analysis," Paper presented at the EPRI FACTS 2 Conference, May 18-20, 1992, Boston, MA. pp.2.1.15-2.1.32
- [9] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.

저 자 소 개



김 용 구 (金 容 求)

1969년 12월 29일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료
Tel : 062-530-0745, Fax : 062-530-1749
E-mail : u9798005@chonnam.chonnam.ac.kr



심 관 식 (沈 冠 植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공학박). 1997년~현재 서남대 전자전기공학과 전임강사
Tel : 0671-620-0298
E-mail : simgong@tiger.seonam.ac.kr



송 성 근 (宋 成 根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정
Tel : 062-530-0745, Fax : 062-530-1749
E-mail : u0030211@chonnam.chonnam.ac.kr



전 영 환 (全 瑩 煥)

1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 한국전기연구소 전력계통연구부 연구원. 1997년 동경대 전기공학과 졸업(공학박). 1996년-1998년 동경대 전기공학부 조수 역임. 현재 한국전기연구소 전력연구단 FACTS & PQ 연구 그룹 그룹장.
관심분야는 large system analysis and control, robust control, 전력제어 등
Tel : 0551-280-1303
E-mail : yhchun@keri.re.kr



남 해 곤 (南 海 鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학박). 1975년~1978년 한국 전력 원자력 건설부 근무. 1986년~1988년 한국전기연구소 근무. 1988년~현재 전남대 공대 전기공학과 부교수
Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749
E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr