TCSC의 H∞ 제어에 의한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제 Part II : H∞ 제어기 설계

論 文
49A-5-6

Damping Inter-area Low Frequency Oscillations in Large Power Systems with H∞ Control of TCSC PART II : Design of H∞ Controller

金 容 求* · 全 瑩 煥** · 宋 成 根* · 沈 冠 植*** · 南 海 鯤§
(Yong-Gu Kim · Young-Hwan Chun · Sung-Geun Song · Kwan-Shik Shim · Hae-Kon Nam)

Abstract - This paper presents a systematic design procedure of H∞ controller of TCSC for damping low frequency inter-area oscillations in large power systems. Sensitivities of the inter-area mode for changes in line susceptance are computed using the eigen-sensitivity theory of augmented system matrix and TCSC locations are selected using the line sensitivities. The reduced model required for designing a manageable-size H∞ controller is obtained using the reduced frequency domain system identification method and the various weighting functions are tuned systematically to provide a robust performance. The proposed H∞ controller proved to be very effective for damping the inter-area mode of the large KEPCO power system.

Key words : TCSC, H∞ optimization, robust control design, low frequency inter-area oscillations, eigen-sensitivity

1. 서 론

전력계통에서 지역간 저주파 전력동요는 계통의 광범위한 영역에 걸쳐 안전운전을 위협하고 전력전송 능력을 저하시키는 가장 중요한 요소 중의 하나로 작용하기 때문에 이 진동 모드의 제동특성 개선은 계통의 안전과 효율적 운전에 매우 중요하다[1]. 지역간 저주파 진동모드는 이 모드에 참여하는 발전기들에 모두 PSS를 설치하여 억제하는 것이 가능할 수도 있으나, 이 경우 많은 발전기들에 설치된 PSS사이의 협조제어가 매우 어렵다. 지역간 저주파 진동모드는 지역간을 연결하는 선로가 취약하거나 중부하로 운전되는 경우에 발생하고 지역간의 경계를 형성하는 선로의 조류진동이 원인이므로 이들 선로에 TCSC를 설치하여 조류를 직접 제어하는 것이 더 효과적일 수 있으며, 직렬 캐패시터는 장거리선로뿐만 아니라 중부하의 단거리 선로에도 보상 가능한 장점을 지니고 있다[2,3,4]. 실제로 미국 뉴욕 계통에 존재하는 병목현상 해소 및 상정사고시 안정도 확보를 위한 TCSC 연구가 수행되었으며[5,6], 1999년에는 브라질 계통의 지역간 저주파진동모드를 억제하기 위해 TCSC연구가 성공적으로 수행되었다[7].

* 正 會 員 : 全南大 大學院 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究所 責任硏究員 · 工博
*** 正 會 員 : 西南大 工大 電氣電子通信工學部 · 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 19日

지역간 저주파진동의 억제를 위해 송전계통에 설치된 TCSC와 같은 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)의 제어기는 계통의 다양한 운전조건 및 각종 외란에 의해 수시로 바뀌는 제어 환경 및 모델링 과정에서 발생하는 오차 등에 의한 불확실성을 갖는 시스템에서도 강인하게 동작하여야 한다[6]. 이러한 제어환경을 고려하여 H∞ 최적화 기법을 사용한 TCSC 제어기를 설계하였는데, H∞ 제어이론은 시스템에 존재하는 불확실성에 대한 강인성뿐만 아니라 외란 억제에 대한 제어 성능을 동시에 만족하는 제어기를 체계적으로 계산 할 수 있다[6,7,9]. 특히 이 논문에서는 전력계통의 TCSC의 지역간 저주파 진동 모드의 억제를 위한 제어목적에 맞는 가중함수를 도입하여 4기 11모선의 시험계통과 한전계통의 지역간 저주파 진동모드의 제동특성을 개선하는 TCSC의 H∞ 제어기를 설계하였다.

TCSC 설치지점의 초기후보 선정은 문헌 [10]에 기술된 확대행렬을 이용한 고유치 감도결과를 사용하였으며, 이들 후보 선로들의 주파수 응답 특성을 통해 최종적인 TCSC 설치지점을 선택하였다. 또한 대규모 전력계통은 상태변수가 매우 커 모델을 H∞제어기 설계에 적절한 규모로 축약하여야 한다. 본 연구에서는 중저차 계통에는 balanced truncation방법을 [9], 고차의 경우엔 주파수영역 시스템 동정(frequency-domain system identification)방법을 사용하여 모델을 축약하였다 [12]. 설계된 TCSC의 H∞ 제어기를 4-기 11-모선의 시험계통 및 215-기, 791-모선, 1575-선로로 구성된 대규모 한전계통에 투입하여 고유치 계산 및 비선형 시뮬레이션을 수행한 결과 TCSC 위치선정 및 축약 모델 계산이 정확하였음을 입증하였고, H∞ 제어기가 지역간 저주파 진동모드의 제동특성 개선에 효과적임을 확인하였다.

2. H_∞ 제어기 설계

2.1 TCSC 및 전력계통 모델

저주파진동의 원인과 대책을 해석하는 미소신호안정도에서는, 5-30초까지의 비교적 긴 시간동안의 계통반응을 해석하므로 계통을 구성하는 각종 기기와 제어기 등을 상세히 모델링 하고, 비교적 작은 외란에 대한 계통의 반응을 해석하므로 선형모델을 사용할 수 있다. 특히 대규모 전력계통의 경우 상태행렬 A의 차수가 매우 크므로 상태행렬을 축약행렬 형태로 저장하면, 고유치 및 고유치감도 계산과 같은 선형 해석이 어려워진다. 따라서, 대규모 전력계통에서는 아래 식과 같이 계통방정식을 상태방정식과 대수방정식을 결합한 확대상태방정식의 형태로 표현한다. 또한 계통을 확대방정식 형태로 표현하면 새로운 기기를 추가하거나 모델을 변경하는 경우 모델링에 유연하게 대처할 수 있다. 그림 1은 미소신호안정도에서 알맞은 TCSC모델 블록 다이어그램으로 한 개의 시지연 요소 T_{TCSC}로 모델링될 수 있다[3]. 1차의 TCSC 상태방정식과 TCSC에 의한 선로 정수의 변화를 표현하는 수정된 네트워크방정식 (1)을 확대상태방정식에 포함하면 식(2)와 같다. 여기서 v는 모선의 전방벡터로서 기기와 네트워크의 매개변수 역할을 한다.

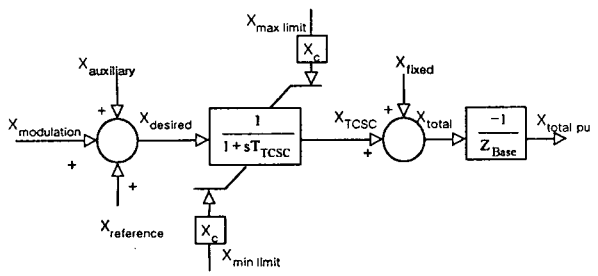


그림 1 TCSC 모델 블록 다이어그램
Fig. 1 TCSC Model block diagram

- TCSC 방정식

$$\Delta \dot{x}_{TCSC} = -T_{TCSC}^{-1}\Delta x_{TCSC} + T_{TCSC}^{-1}\Delta X_{ref}$$

$$\Delta I_{BUS} = Y_{BUS}^{0}\Delta V_{BUS} + f(\Delta x_{TCSC}, V_{BUS}^{0}, Y_{BUS}^{0}) \quad (1)$$

- 확대상태방정식

$$\Delta \dot{x} = A_G \Delta x + B_G \Delta v + B\Delta X_{ref}$$

$$0 = C_G \Delta x + Y\Delta v \quad (2)$$

2.2 TCSC 제어입력 신호와 설치지점 선택

TCSC를 이용하여 지역간 저주파 진동모드를 효과적으로 억제할 수 있는 선로 및 제어하고자 하는 진동모드에 대한 정보를 담고 있는 적절한 제어기 입력신호를 선택하는 것은 TCSC뿐 아니라 모든 FACTS 제어기 설계에서 가장 먼저 결정되어야 하는 중요한 사안이다[3,5,6]. 제동특성을 향상시키고자하는 고유치가 λ_i이고, 이 고유치에 대한 확대상태행렬 $\tilde{A}$의 좌/우고유벡터를 각각 $\tilde{w}_i$와 $\tilde{v}_i$라 하면, 식(2)의 확대상태방정식 모드 가제어성과 모드 가관측성은 각각 식(3)과 (4)로 정의된다.

$$b_i(\lambda_i) = \tilde{w}_i^{T}\tilde{B} \quad (3)$$

$$c_i(\lambda_i) = \tilde{C}\,\tilde{v}_i \quad (4)$$

TCSC 제어기의 경우, 선로 리액턴스에 대한 모드 가제어성 (mode controllability)과 특정 출력값들에 대한 모드 가관측성 (mode observability)을 계산하여 적절한 설치지점 선정과 제어기 입력신호를 결정할 수 있다. 그러나, 식 (3)에 의해 모드 가제어성을 계산하기 위해서는 모든 후보선로들에 대한 입력행렬을 구성해야 하는 단점이 있다. 이 논문에서는 문헌 [10]에서 제안된 확대행렬의 고유치 감도 계산을 통해 TCSC가 투입될 후보선로들을 결정하였다. 이 방법은 모든 후보선로들의 각각에 대한 입력행렬을 구성하지 않고도 하나의 미소신호안정도 모델을 사용하여 한 번의 계산으로 모든 후보선로들을 고려하여 선택할 수 있는 장점이 있다. 즉, TCSC는 선로 리액턴스를 modulation하는 기능을 갖기 때문에 선로 리액턴스가 변화할 때, 지역간 저주파 진동모드는 어떻게 변할 것인가를 계산하는 고유치 감도 이론으로부터 TCSC 설치 후보 지점을 추정할 수 있다.

고유치 감도 계산을 통해 지역간 저주파 진동의 경계선상에 존재하는 선로들을 선택한 후, 이들 선로들에 대한 주파수 응답으로부터 영점과 지역간 모드가 서로 근접하지 않아 제어가 용이할 것으로 판단되는 선로를 최종 투입 선로로 결정한다.

2.3 계통 모델 축약

전력계통은 대규모 시스템이므로 상태변수 수가 매우 커 적절한 규모로 축약하지 않고서는 H_∞ 제어기의 설계가 불가능하며, 오차가 작은 축약모델을 구하는 문제는 H_∞ 제어기 설계의 성패를 결정하는 두 번째 단계이다[3,6].

이 논문에서 채택한 모델 축약 알고리듬은 저차의 계통에는 balanced truncation방법의 Schur 알고리듬을 적용하여 비최소(non-minimum) 모델에서도 수치적 안정성을 잃지 않고 비교적 작은 절대오차 범위 내에서 모델을 축약하였으며[8], 고차의 경우엔 선로 리액턴스와 계통 출력사이의 주파수 응답 데이터를 비선형 가중 최소 자승 문제로 정식화하여, 미리 정해진 차수의 전달함수 파라메터로 적합하는 주파수 영역 시스템 동정(frequency domain system identification)방법을 사용하였다[12].

2.4 TCSC의 H_∞ 제어 특성

극점배치나 주파수 응답법에 의한 제어기 구조는 보통 위상 진/지상 보상기로 국한되고, 제어기 설계를 위해서는

설계자의 많은 경험과 직관을 필요로 하며, 다변수 제어기 설계에는 많은 어려움이 따른다. 특히 FACTS 기기의 modulation처럼 새로이 직면하거나 경험축적이 부족하고, 모델링 및 동작조건의 불확실성이 큰 경우에는 기존의 제어 설계방법보다 좀더 체계적인 방법이 요구된다. H∞ 제어기는 외란 억제 및 각종 불확실성에 대한 설계사양이 대상 계통의 특성을 적절히 반영한 가중함수로 주어지면 제어기 설계 과정이 체계적이고 광범위한 운전영역에서 강인하게 동작하는 특성이 있다.

이 논문에서 사용한 H∞ 제어기 설계 알고리듬은 문헌 [8]에서 PSS에 적용한 방법을 TCSC에 응용한 것으로서, TCSC에 의한 지역간 저주파 진동모드 제어는 보조제어(supplementary control) 기능으로 정상상태의 오차를 제어기 설계에 고려할 필요가 없다는 점에서 일반 서보 제어와는 다르다. 이를 주파수 영역에서 기술하면 DC 이득이 클 필요가 없음을 의미하는데, 기존의 PSS 에서는 washout을 도입하여 정상 상태에서는 PSS가 동작하지 않도록 하는 것과 같은 개념이다. 그리고 지역간 저주파진동은 1~5 [rad/sec] 주파수대역의 외란이므로, 외란억제 사양에 이 주파수대역을 고려하여 다른 진동모드에는 영향을 끼치지 않도록 해야한다. 또한 제어기의 출력에 페널티 가중함수를 가하여 제어출력이 포화되지 않도록 한다.

2.4.1 제어 사양

(a) 외란억제 사양과 가중함수 W_1, W_2

부하의 변동이나 고장 등에 의해서 발생하는 저주파진동 전력동요는 보통 1~5 [rad/sec] 주파수대역에서 나타난다. 즉 계통의 고장이나 부하 변동에 의한 영향은 TCSC시스템으로 볼 때 1~5 [rad/sec]의 주파수 대역에서의 외란으로 모의할 수 있다. 그림 2에서 선로 리액턴스의 기준입력을 r, 모선전압의 크기인 시스템의 출력 y, 외부 외란을 각각 d_1과 d_2로 두면, 각각의 외란에 대한 출력 y는 외란이 플랜트 출력변수에 미치는 영향을 최소화하도록 아래의 설계 조건을 만족하여야 한다.

$$\|y(d_1)\|_2 \le \|(1+KP)^{-1}W_1\|_\infty < \gamma \tag{5}$$

$$\|y(d_2)\|_2 \le \|P(1+KP)^{-1}W_2\|_\infty < \gamma \tag{6}$$

여기서 W_1, W_2는 주파수에 대한 함수로 나타나는 가중함수이다.

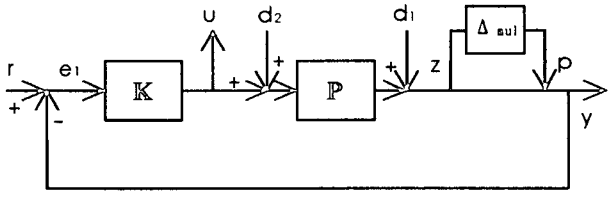


그림 2 플랜트 외란 및 곱셈형 불확실성 모델

Fig. 2 Plant disturbance and multiplicative uncertainty model

(b) 모델 불확실성 사양과 가중함수 W_3

모델링 오차나 플랜트의 다양한 동작조건 등은 그림 2에서 플랜트 출력측에 곱셈형 불확실성 모델로 나타내어 제어기가 강인하게 동작하도록 식(10)으로 정식화한다.

$$\|e_1(p)\|_2 \le \|KP(1+KP)^{-1}W_3\|_\infty < 1 \tag{7}$$

(c) 제어 출력에 대한 사양과 가중함수 W_u

제어 출력에서 고주파 성분을 제거하기 위한 방편으로 제어기 출력을 출력으로 하여 가중함수 W_u와 함께 최적해를 구한다. 외부 신호 d_1, d_2, p 에 대한 제어 출력을 가중함수와 함께 나타내면,

$$\|u(d_1)\|_2 \le \|W_uK(1+KP)^{-1}W_1\|_\infty < \gamma \tag{8}$$

$$\|u(d_2)\|_2 \le \|W_uPK(1+KP)^{-1}W_2\|_\infty < \gamma \tag{9}$$

$$\|u(p)\|_2 \le \|W_uK(1+KP)^{-1}W_3\|_\infty < \gamma \tag{10}$$

2.4.2 목적함수와 가중함수의 결정

그림 3은 앞 절에서 결정한 6개의 제어 사양에 대해 H∞ 최적화하기 위한 확대 플랜트이며, 이를 한 개의 목적함수로 나타내면 식(14)와 같다.

$$\min_{\text{stabilizing K}} \left\| \begin{matrix} T_{e_1 r}W_1 & T_{e_1 d_1}W_2 & T_{e_1 p}W_3 \\ W_uT_{ur}W_1 & W_uT_{ud_2}W_2 & W_uT_{up}W_3 \end{matrix} \right\|_\infty < \gamma \tag{11}$$

여기서 $T(i,j)$는 j에서 i까지의 전달함수이다.

식(14)에서 전달함수 행렬의 H∞ norm이 γ보다 작게 하는 K가 존재한다면, 이 K는 각각의 제어 사양을 모두 만족시키는 H∞ 제어기이다. 위의 목적함수에서 강인성과 성능이 균형을 이룬 H∞ 제어기를 얻기 위해서는 적절한 가중함수를 결정해야 하는데, 전력계통의 지역간 저주파 진동모드 특성을 고려한 가중함수의 결정은 매우 중요하다.

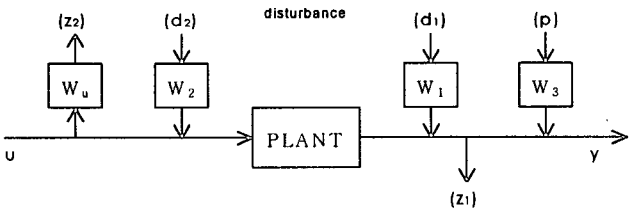


그림 3 H∞ 최적화를 위한 확대 플랜트

Fig. 3 The augmented plant for H∞ optimization

2.4.3 설계 절차

[1단계] TCSC 위치 및 제어기 입력 신호 선택

[2단계] 계통 축약 모델 유도

[3단계] 제어사양에 따른 가중함수 W_1, W_2, W_3, W_u 선택

[4단계] 가중함수를 포함한 목적함수 및 확대시스템 구성

[5단계] 전달함수 행렬의 무한대 norm을 최소화하는 제어기를 계산.

[6단계] 최적 γ 값이 크면, 전주파수 영역에서 가중 함수 W_1, W_2의 가중치를 작게 하여 최적해를 다시 계산. 이 때 가중치를 변화 시키면서 trade-off 관계인 외란억제와 강인성이 서로 균형을 이룰 수 있게 튜닝.

[7단계] 제어기를 실계통에 투입, 고유치해석 및 비선형 시뮬레이션을 수행하여 검증.

3. 사례 연구

3.1 4-기 11-모선 시험계통

4-기 11-모선 시험계통은 지역간 진동모드 및 플랜트모드가 확실히 나타나 미소신호안정도 해석 및 제어기 설계에 많이 사용되는 모델로, 그림 4와 같이 두 지역이 연계 선로로 연결되어 있으며 전체 부하는 2,734MW로 중부하 운전조건이다[6].

4개의 동기기와 여자기는 각각 원통회전형 발전기 모델과 IEEE Type ST1 여자기 시스템을 사용하였다. 표 1은 계통의 진동모드들을 나타낸 것으로 2개의 지역모드(local mode)와 0.61Hz 대역의 지역간 모드가 존재함을 알 수 있다. 특히 지역간 모드의 고유치와 고유벡터를 통해 두 지역의 발전기가 약 180° 의 위상차로 동요를 일으키며, 고유치 실수부가 0에 근접하여 제동특성이 매우 악화되어 있음을 알 수 있고 이는 그림 5의 비선형 시뮬레이션 결과와도 일치한다.

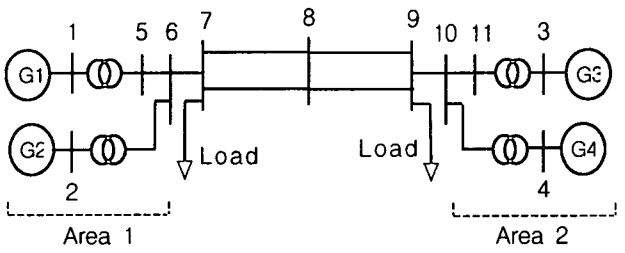


그림 4 4기 11모선 시험 계통

Fig. 4 4-machine 11-bus benchmark system

3.1.1 TCSC 위치 및 제어입력신호 선정

TCSC의 위치는 직관적으로 두 지역의 연계선로인 선로 7-8 혹은 8-9이 적절함을 알 수 있고, 표 2의 1차고유치 감도 및 모드 가제어성의 결과도 다른 선로들보다 선로 7-8과 8-9가 훨씬 크게 계산되었다. 이 논문에서는 TCSC 투입위치로 선로 7-8을 선택하였다.

지역간 진동모드에 대한 정보를 많이 갖고 있는 제어입력 신호를 선택하기 위해 출력변수 사이의 모드 가관측성을 계산하였다. 후보 출력변수들로는 TCSC가 투입된 선로의 유효전력과 모선 전압의 크기로서, 제어기의 신뢰성 및 비용절감을 위해 지역신호로 제한하였다. 이들 출력변수들은 각각 대표적인 직/병렬 신호들이다. 표 2의 모드 가관측성 결과 선로의 유효전력이 모선 전압보다 매우 커 이를 TCSC 제어입력으로 사용하는 것이 타당할 것으로 예상된다. 하지만 직렬 기기인 TCSC에 직렬신호인 유효전력을 입력으로 사용할 경우 매우 큰 네트워크 궤환 이득이 발생하여 TCSC의 출력이 포화되는 현상이 일어날 수 있고, 이를 방지하기 위해선 제어기 이득이 매우 낮게 제한되어야 하는 단점이 있다[7]. 실제 유효전력을 입력신호로 제어기를 설계하였을 경우, 고유치가 전압인 경우보다 더 우수였지만 비선형 시뮬레이션 결과 TCSC 출력이 포화되어 계통이 불안정해지는 현상이 발생하였다. 따라서 선로의 유효전력보다는 모선 전압중에서 모드 가관측성이 가장 큰 모선 8의 전압크기를 제어기 입력신호로 선택하였다.

표 1 4기 11모선 시험계통의 고유치 해석

Table 1 Eigen-analysis of 4-machine 11-bus system

고유치	주파수 (Hz)	제동비	지배적 상태변수	회전자각의 모드 형태
-0.0025±j3.82 (지역간 모드)	0.61	0.00065	G1,G2,G3,G4의 $\Delta\omega$, $\Delta\delta$	G1: 0.47∠-115.4 G2: 0.33∠-104.1 G3: 0.57∠75.5 G4: 0.52∠72.6
-0.67±j7.06 (지역모드 1)	1.12	0.094	G1, G2의 $\Delta\omega$, $\Delta\delta$	G1: 0.62∠34.4 G2: 0.66∠-143.5
-0.67±j7.26 (지역모드 2)	1.17	0.092	G3, G4의 $\Delta\omega$, $\Delta\delta$	G3: 0.60∠-87.5 G4: 0.66∠96.6

표 2 4-기 11-모선 계통의 고유치감도, 모드 가제어성, 모드 가관측성

Table 2 Eigensensitivity, mode controllability and mode observability of 4-machine 11-bus system

선 로	1차 고유치감도	모드 가제어성
선로 7-8	0.0397-j0.5903	2.3013
선로 8-9	0.0377-j0.5884	2.2885

출력변수	P_{7-8}	P_{8-9}	$\|V\|_7$	$\|V\|_8$	$\|V\|_9$
모드 가관측성	2.1283	2.0155	0.0895	0.1327	0.0381

3.1.2 계통 모델 축약

저차의 4-기 11-모선 계통에선 상태방정식에 모델 축약 알고리듬을 직접적으로 사용할 수 있다. 따라서 balanced truncation방법의 Schur 알고리듬으로 비최소 모델에서도 수치적 안정성을 잃지 않고 비교적 작은 절대오차 범위 내에서 모델을 축약하였다[8]. 표 3은 선로 7-8의 선로리액턴스를 입력으로, 모선8의 전압크기를 출력으로 하는 32차의 원 계통을 4차의 축약 전달함수로 나타낸 것이다.

표 3 4-기 11-모선 계통의 축약 전달함수 극점과 영점
Table 3 Poles and zeros of reduced transfer function of 4-machine 11-bus system

극 점	영 점	이 득
-0.0212±j0.0631 -0.0026±j3.8228	-0.0345±j0.1186 6.5361 & -4.0387	0.05554

3.1.3 가중함수

앞의 2.4.1 절에서 기술한 제어사양을 만족하게 하는 가중함수들은 다음과 같이 결정한다. 플랜트 출력 외란은 추종성능과 밀접한 관련을 갖고 있으므로 이를 출력 외란 사양의 가중함수 W_1으로 포함한다[8]. 또한 계통 부하의 변동이나 고장 등에 의해서 발생하는 저주파진동 전력동요는 보통 1~5 [rad/sec] 주파수대역에서 나타나므로 이의 억제는 식 (13)의 가중함수 W_2에 포함한다. 모델링 오차나 다양한 동작조건 등의 불확실성에 대한 제어기의 강인성은 식 (14)의 가중함수 W_3로 나타내며, 제어 출력에서 고주파 성분을 제거하기 위해 고주파 대역의 제어기 출력에 페널티를 가하는 가중함수 W_u는 식 (15)와 같다. 특히 TCSC에 의한 지역간 저주파 진동모드 억제는 보조제어 기능으로 정상상태의 오차를 제어기 설계에 고려할 필요가 없다. 즉 주파수영역에서 설명하면 DC 이득이 클 필요가 없음을 의미하는데, 이는 아래의 모든 가중함수에 공통적으로 적용된다.

$$W_1 = \frac{s}{(2s+1)(s+1)} \tag{12}$$

$$W_2 = \frac{s}{(s+1)(\frac{1}{5}s+1)} \tag{13}$$

$$W_3 = W_u = \frac{(0.5s+1)(0.033s+1)}{(s+10^{-4})(10^{-5}s+1)} \tag{14}$$

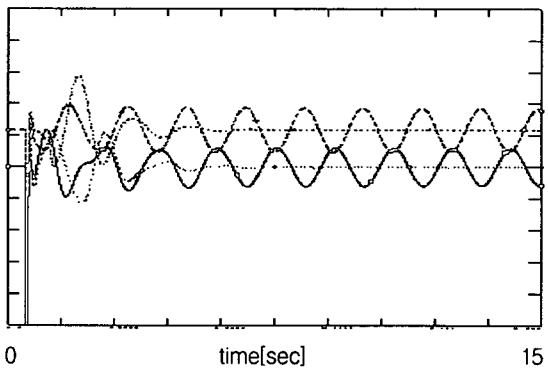
3.1.4 고유치 해석 및 비선형 시뮬레이션

식(15)-(17)의 가중함수와 계통축약 모델을 식(14)의 목적함수로 나타낸 뒤, H_∞ 최적화 알고리듬을 통해 식(14)를 만족시키는 안정화 제어기 K를 계산한다. 플랜트에 제어기 K를 투입한 후 선형공간에서 고유치를 계산하였고, 이의 검증을 위해 전력계통 시뮬레이터인 PSS/e를 이용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 표 4의 고유치 계산 결과에서 지역간 진동모드의 해당 고유치가 좌반평면으로 크게 이동하였으며, 두 개의 지역모드에는 별 영향이 없음을 알 수 있다.

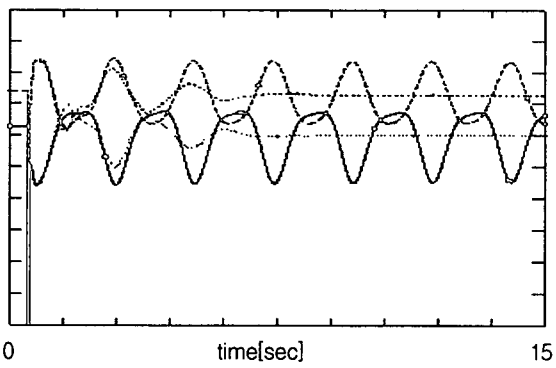
비선형 시뮬레이션의 경우 모듈레이션 범위는 선로리액턴스의 ±10%이며 정상상태에서 고정보상은 하지 않는 것으로 가정하였고, 모의된 시나리오는 두 경우로, 하나는 모선 8에 3 cycle 3상 단락사고를, 다른 하나는 선로 7-8의 1회선이 고장 후 탈락된 사고로서 15초 동안 시뮬레이션하였다. 그림 5-(a)는 모선사고인 경우로 발전기 1과 발전기 3의 발전기 유효전력을 나타낸 것이다. 그림에서 진동이 감쇠되지 않고 두 지역의 발전기가 약 180° 의 위상차로 지속되는 것은 TCSC가 없는 경우이며, 진동이 바로 억제되는 것은 TCSC의 H_∞ 제어기가 투입된 경우이다. 특히 그림 5-(b)는 고장정도 및 고장 후 계통 변화가 큰 선로사고 경우로서 결과는 그림 5-(a)와 동일하여 H_∞ 제어기가 강인하게 동작함을 알 수 있다.

표 4 4-기 11-모선 시험계통의 지배적 고유치
Table 4 Dominant eigenvlaues of 4-machine 11-bus system

	지역간 모드	지역모드 1	지역모드 2
without TCSC	-0.0025±j3.82	-0.6700±j7.06	-0.6700±j7.26
with TCSC Controller	-0.7572±j3.93	-0.6638±j7.06	-0.7070±j7.28



(a) 모선8 3상 고장



(b) 선로 8-9 고장

그림 5 4-기 11-모선 계통의 시간영역 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Time domain simulation results of 4-machine 11-bus system

3.2 한전 계통에 응용

제안된 H_∞ 제어기를 대규모 계통에 시험하기 위하여 2000년 한전계통을 시험계통으로 사용하였다. 이 계통은 215-기, 791-모선 1575-선로로 구성되고 확대행렬의 차수가 4240차인 대규모 계통이며, 제동특성이 불량한 1개의 지역모드와 1개의 지역간 진동모드가 존재하여 시험계통으로 적합하다. 간단한 단선도를 그림 6에 나타내었다. 계통데이터는

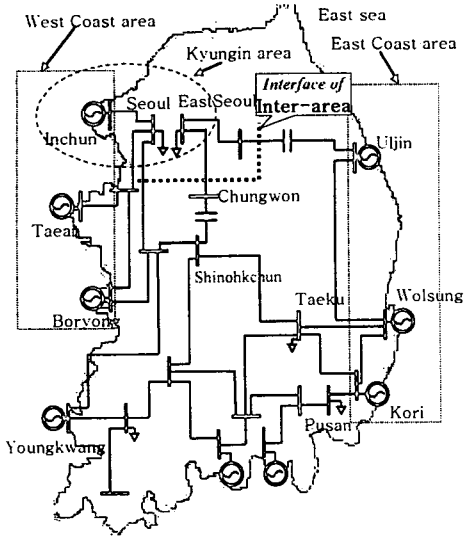


그림 6 한전계통의 간략화 된 단선도
Fig. 6 Simplified one-line diagram of the KEPCO System

하계첨두부하의 장기예측자료이며 총부하는 38,927 MW이며 부하는 일정 MVA로 모의되었다. 이 데이터는 한 시점에서 장기 예측한 것으로 그 이후의 계통조건 변화를 반영하지 못하였으므로, 2000년의 실제 계통조건과는 상당한 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 논문의 미소신호안정도 해석결과는 실제와 다를 수 있고, 한전계통은 TCSC의 H_∞ 제어기를 대규모 전력계통의 지역간 진동모드 제동에 관한 연구를 위한 benchmark 계통으로만 사용한 것임을 첨언한다.

표 5는 문헌 [11]의 Hessenberg법으로 2000년 한전계통에 대한 고유치를 계산한 것으로, 0.69Hz와 0.86Hz의 두 개의 제동특성이 불량한 모드가 계산되었다. 이 두 고유치에 대하여 고유벡터를 구한 결과 첫 번째 고유치는 서해안의 발전기가 동해안 및 동남해안의 발전기들에 대하여 180 °의 위상차로 동요하는 지역간 모드이고, 두 번째 고유치는 울진 발전기들의 지역 모드임을 확인하였다. 두 개의 지배적 진동모드 중에서 울진원전의 지역모드는 울진 발전기들에 PSS를 설치하여 진동을 쉽게 제동시키는 것이 가능하였으며, 지역간 진동모드 및 해당 고유벡터는 그림 9의 비선형 시뮬레이션 결과 두 지역의 발전기들이 180° 위상차이로 동요하는 것과 일치하였다. 특히 0.69Hz의 지역간 모드는 서해안의 거의 모든 발전기와 동해안 및 동남해안의 발전기들이 참여하여 제동특성의 개선이 쉽지 않을 전망이고, 이들 발전기에 의한 발전량이 전체 발전량의 약 70% 이상을 점유하여 계통의 안전운전에 심각한 위협을 가할 가능성이 있다.

3.2.1 TCSC 위치 및 제어입력신호 선정

문헌 [10]의 고유치감도와 전달함수의 Bode 플롯에 의한 TCSC 설치지점 선정 결과에 따라 선로 4900-6600, 선로 2500-5700 및 5500-5700을 최종 투입선로로 결정하였다. TCSC의 제어기 입력신호로는 4기 11모선과 같이 TCSC가 투입된 선로의 모선 전압 크기를 선택하였다.

표 5 KEPCO 계통의 지배적 고유치
Table 5 Dominant eigenvalues of KEPCO System

	지배적 고유치 (주파수 Hz, 제동비)	
	지역간 모드	UJ 지역모드
without 울진 PSS	-0.0415+j4.3364 (f=0.69, ζ=0.0096)	-0.0309+j5.4118 (f=0.86, ζ=0.0057)
with 울진 PSS	-0.0418+j4.3369 (f=0.69, ζ=0.0096)	-0.4553+j5.5518 (f=0.88, ζ=0.0817)

3.2.2 계통 모델 축약 및 가중함수

KEPCO계통은 4240차의 대규모 시스템으로서 4기11모선 축약에 사용되었던 알고리듬을 사용 할 수 없으며 대신 주파수 응답 데이터를 비선형 가중 최소 자승 문제로 정식화하여, 미리 정해진 차수의 전달함수 파라메터로 적합하는 frequency-domain system identification 방법을 사용하였다 [12]. 표 6과 그림 7은 선로 4900-6600의 TCSC 출력과 모선6600의 전압크기를 각각 계통 입/출력으로 하는 6차의 축약 전달함수와 주파수 응답이다. 표 6의 축약 모델은 영점이 우반평면에 존재하는 비최소 위상으로서 제어기의 이득 결정에 세심한 주의가 필요하며, 그림 7의 주파수 응답곡선으로부터 축약된 모델이 관심 주파수 대역에서 동적 특성을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다.

선로 4900-6600 TCSC 설계에 적용된 전형적인 가중함수는 4기 11모선의 경우와 비슷하며 아래와 같다. 식 (16)의 W_2는 제어기 성능(performance)을 나타내는 가중함수이며,

표 6 축약 전달함수 파라미터
Table 6 Parameters of Reduced transfer function

극점	영점	이득
-6.8487±j12.036	-7.4256±j12.306	5.7017e-002
-0.4828±j 6.910	-0.4258±j 6.237	
-0.0415±j 4.337	+0.4732±j 3.048	

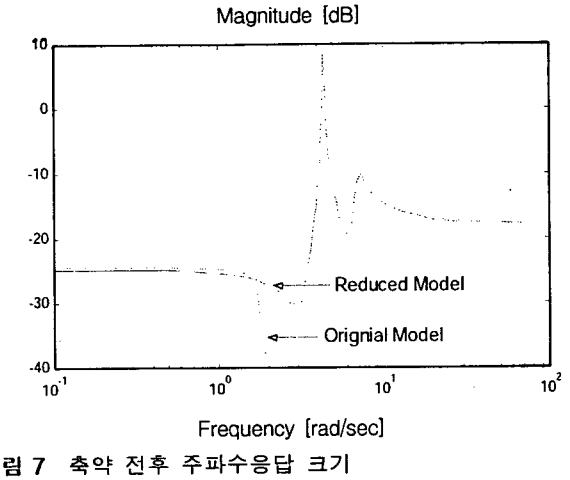


그림 7 축약 전후 주파수응답 크기
Fig. 7 Bode plot of Transfer functions

식 (17)의 W_3은 제어기의 강인성(robustness)에 직접적인 영향을 미치는 가중함수이다. 즉 가중함수 W_2와 W_3는 trade-off 관계에 있으므로, 제어기의 강인성을 강조하기 위해서는 W_2는 작게 하고 W_3에 보다 높은 가중치를 두어야 한다. 한전계통은 4기 11모선 시스템에 비하여 모델의 축약정도도 매우 크고, 축약에 사용된 주파수영역 시스템 동정법의 수치적 안정성도 4기 계통에 사용된 Shcur 방법에 비하여 좋지 않으므로 제어기 설계에 사용된 축약모델의 불확실성도 크다. 따라서 한전 계통에 적용한 가중함수는 4기 계통에 비해 성능 가중치는 줄이고 강인성 가중치는 크게 하였다.

$$W_1 = \frac{s}{(2s+1)(s+1)} \tag{15}$$

$$W_2 = \frac{0.5s}{(s+1)(0.2s+1)} \tag{16}$$

$$W_3 = \frac{5(0.5s+1)(0.033s+1)}{(s+10^{-4})(10^{-5}s+1)} \tag{17}$$

$$W_u = \frac{(0.5s+1)(0.033s+1)}{(s+10^{-4})(10^{-5}s+1)} \tag{18}$$

3.2.3 고유치 해석 및 비선형 시뮬레이션

설계된 TCSC의 H_∞ 제어기가 지역간 진동모드를 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하기 위해 PSS/e 프로그램을 이용한 비선형 시뮬레이션과 고유치 계산을 수행하였다. TCSC 투입선로는 앞서 결정한 선로 4900-6600, 선로 5500-5700, 선로 2500-5700으로서 각 선로의 2회선 모두에 설치하였다. 그림 8은 선로 4900-6600 에 투입된 TCSC의 H_∞ 제어기의 보드 선도를 나타낸 것으로 정상상태 및 고주파영역에서 이득은 낮고, 관심주파수 대역에선 높은 값을 갖는다. 표 7의 고유치 계산 결과에서, 지역간 모드의 고유치가 좌반평면으로 크게 이동하여 해당선로에 대한 H_∞ 제어기가 효과적임을 확인하였고, 축약모델에서의 고유치와 별다른 차이가 없음을 통해 계통 축약이 성공적으로 이루어졌다는 것도 유추할 수 있다.

비선형 시뮬레이션의 경우 모듈레이션 범위는 각 선로 리액턴스의 ±10%, 정상상태에서 고정보상은 하지 않는 것으로 가정하였고 30초 동안 시뮬레이션 하였다. 모의된 첫 번째 시나리오는 모선 6600에 3상 3주기 모선 사고를 상정한 것으로, 이는 모선 6600이 계통 중앙에 위치하여 고장 파급이 전체 계통으로 전달될 수 있는 이상적인 모선이기 때문이다. 그림 9는 지역간 저주파 진동을 일으키는 두 지역의 대표적인 발전기인 고리 발전기와 보령 발전기의 유효전력 응동 특성을 나타낸 것이다. TCSC가 없는 경우 그림 9-(a)와 같이 두 지역의 발전기가 약 180° 의 위상차로 0.69Hz의 진동이 지속되었으나 TCSC의 H_∞ 제어기가 투입된 그림 9-(b),(c),(d)의 세 경우 모두 과도상태를 지난 약 15초 전후로 안정화되어 설계된 제어기가 효과적임을 입증하였고, 선형해석 결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 9-(b), (c), (d)에서 아래 파형은 선로의 리액턴스가 TCSC에 의해 모듈레이션되는 것을 나타낸 것이다.

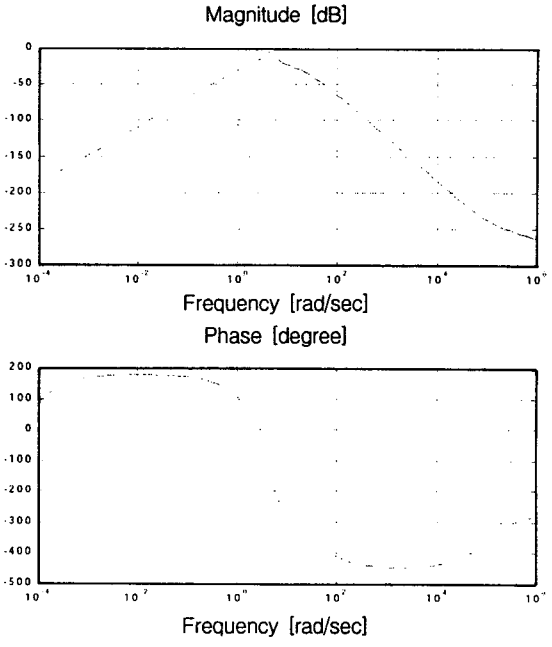


그림 8 H_∞ 제어기의 보드선도
Fig. 8 Bode plot of H_∞ controller

표 7 지역간 저주파 진동 모드 고유치의 변화
Table 7 Eigenvalue of inter-area mode

Case	Full System	Reduced System
Without TCSC	-0.0418±j4.337	-0.0415±j4.337
선로 4900-6600	-0.2727±j4.210	-0.2754±j4.215
선로 5500-5700	-0.2865±j4.298	-0.2850±j4.278

두 번째 시나리오는 제어기의 강인성을 시험하기 위한 것으로 병렬선로인 4900-6600 및 5500-5700의 4 회선 모두에 TCSC를 투입, 운전중 3개 선로에 고장이 발생한 뒤 3주기 후에 고장선로들을 제거한 것이다. 위의 고장조건은 지역간 모드의 인터페이스 역할을 하는 중요 회선 3개를 탈락시킨 것으로 지역간 연계 선로의 약화 및 나머지 선로들의 중부하 운전 심화를 상정한 매우 가혹한 시나리오이다. 이는 H_∞ 제어 측면에서 보면 계통 토포로지 및 운전 조건이 변함에 따라 설계 당시의 공칭 시스템에 비해 불확실성이 크게 늘어난 것이다. 그림 10의 (a)는 선로 5500-5700의 2회선 모두 및 선로 4900-6600 2회선 중 1회선이 탈락되어 선로 4900-6600의 1 회선만 TCSC가 동작하는 경우이다. 빠른 제동 성능면에서는 첫 번째 시나리오보다 뒤떨어지지만 제어기가 제동특성을 유지하면서 강인하게 동작함을 알 수 있다. 그림 10의 (b)는 선로 4900-6600의 2회선 모두 및 선로 55000-5700 2회선 중 1회선이 탈락되어 선로 5500-5700의 1회선만 TCSC가 동작하는 경우로서, 제어기가 첫 번째 시나리오와 동등한 성능을 발휘함을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과로부터 제안된 H_∞ 제어기가 지역간 저주파 진동을 매우 효과적으로 강인하게 억제함을 알 수 있다.

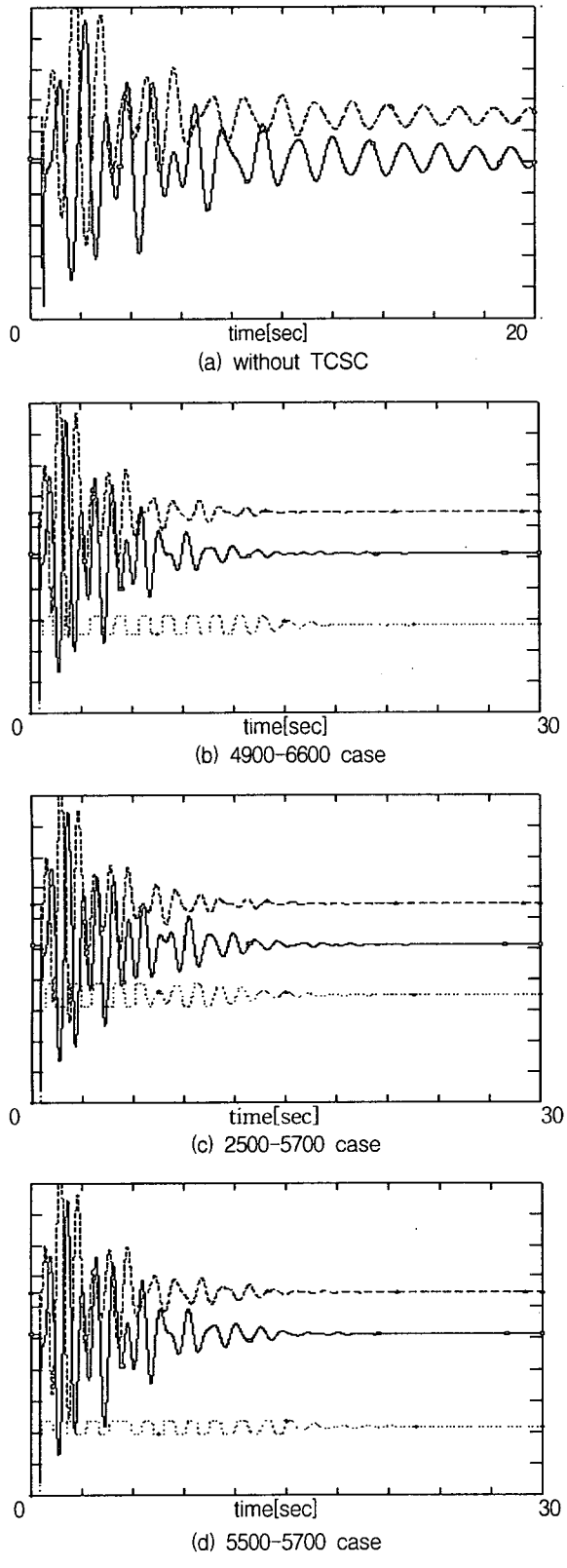


그림 9 6600 모선 고장 시뮬레이션 결과 ; 고리(-), 보령(--)의 발전기 유효전력, TCSC 출력(··)

Fig. 9 Simulation results of bus 6600 fault ; active power of Kori(-), Boryung(--), TCSC output(··)

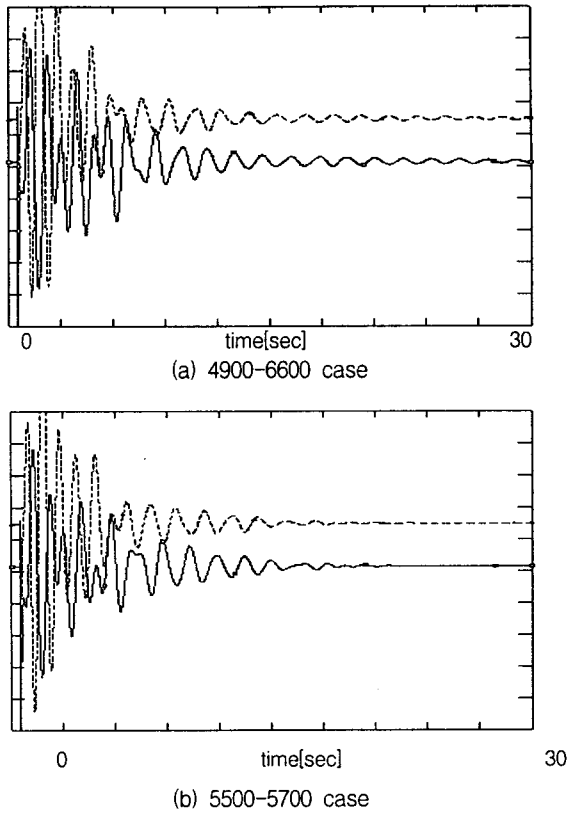


그림 10 선로 고장 시뮬레이션 결과 ; 고리(-), 보령(--)의 발전기 유효전력

Fig. 10 Simulation results of line fault ; active power of Kori(-), Boryung(--)

4. 결 론

전력계통의 지역간 진동모드 제동특성을 향상하는 TCSC의 H_∞ 제어기를 설계하였다. TCSC가 진동모드를 효과적으로 제동할 수 있도록 TCSC 위치 선정에 고유치감도이론과 주파수응답 특성을 적용하였고, 모드 가관측성과 비선형 시뮬레이션을 바탕으로 모선 전압의 크기를 제어기 입력신호로 결정하였다. 또한 주파수 응답 데이터로부터 H_∞ 제어기 설계가 가능한 차수의 축약 전달함수를 적합하였으며, 지역간 저주파 진동 억제 특성을 반영한 가중함수를 제안하였다. 제안된 방법으로 설계된 TCSC의 H_∞ 제어기를 4기 11모선 시험계통과 KEPCO 계통에 투입하여 고유치 계산 및 비선형 시뮬레이션을 수행한 결과 TCSC 위치선정 및 축약 모델이 정확하였음을 입증하였고, H_∞ 제어기가 지역간 저주파 진동모드의 제동특성을 강인하게 향상시킴을 확인하였다.

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] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems," IEEE Trans., PWRS, Vol.7, pp. 914-920, 1991.

[2] 김용구, 남해곤, 전영환, 심관식, 송성근, "지역간 진동모드 제동을 위한 H_∞-TCSC 최적 제어기 설계"", 대한전기학회 1999년도 하계 학술대회 논문집 C, pp. 1032-1034, 1999. 7. 19-21

[3] "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Scoping Study, Volume 2, Part 1: Analytical Studies," EPRI Reports EL-6943, September 1991.

[4] M. Klein, L.X. Le, G.J. Rogers, S.Farrokhpay, N.J.Balu, "H∞ Damping Controller Design in Large Power Systems," IEEE Trans., PWRS, Feb. 1995, pp. 158-166

[5] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.

[6] S. Zelingher, B. Shperling, J.D. Mountford, R.J. Koessler, "Analytical Studies for Thyristor Controlled Series Compenstion in New York State, Part II: Dynamic Stability Analysis," Paper presented at the EPRI FACTS 2 Conference, May 18-20, 1992, Boston, MA.

[7] Carlos Gama, "Brazilian north-south intercnnection control application and operating experience with a TCSC", PES Summer Meeting, 1999. IEEE Vol.2, 1999, pp. 1103-1108

[8] Y.H.Chun, "General Performance Index and Weighting Funtion Design for H_∞ Optimizations and Its Applications to Motion and Power System Control," PhD Thesis of The Univ. of Tokyo, December 1996.

[9] Robust Control Toolbox, MATLAB User's Guide, 1998.

[10] 심관식, 송성근, 김용구, 전영환, 남해곤, "TCSC의 H_∞ 제어에 의한 대규모 전력계통의 지역간 저주파진동 억제 PART 1 : TCSC 설치지점 선정", Vol. 49, No. 5, 2000. 게재 예정.

[11] 남해곤, 송성근, 심관식, 김용구, 김동준, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 선형해석 프로그램 개발", 대한전기학회 1999년도 하계 학술대회 논문집 C, pp. 1054-1056, 1999. 7. 19-21

[12] Frequency Domain System Identification Toolbox, MATLAB User's Guide, 1998.

저 자 소 개

김 용 구 (金 容 求)

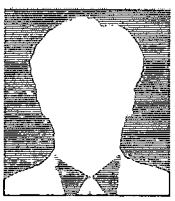
1969년 12월 29일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료.
Tel : 062-530-0745, Fax : 062-530-1749
E-mail : u9798005@chonnam.chonnam.ac.kr

전 영 환 (全 塋 煥)

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



심 관 식 (沈 冠 植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~현재 서남대 전자전기공학과 전임강사
Tel : 0671-620-0298
E-mail : simgong@tiger.seonam.ac.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(공박). 1975년~1978년 한국전력 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