

지역간 진동모드 제동을 위한 H $\infty$ -TCSC 최적 제어기 설계

김용구\* 남해곤\* 전영환\*\* 심관식\*\*\* 송성근\*  
 \*전남대학교 전기공학과 \*\*한국전기연구소 \*\*\*서남대학교 전자전기공학부

TCSC H $\infty$  Controller Design for Damping Interarea Oscillations

Yong-Gu Kim\* Hae-Kon Nam\* Young-Hwan Jeon\*\* Kwan-Shik Shim\*\*\* Sung-geun Song\*

**Abstract** - The design of an H $\infty$  controller for a TCSC to enhance the damping of an inter-area oscillation in a power system is presented. The paper describes a comprehensive and systematic way of applying the H $\infty$  control design algorithm in power systems. Eigen sensitivity analysis to select a TCSC location is described. Time simulation and eigenvalue analysis show that the proposed TCSC H $\infty$  controller can suppress the inter-area oscillations efficiently with robustness.

1. 서 론

전력계통에서 지역간 전력동요는 광범위한 영역에 걸쳐 계통의 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 진동모드는 이 모드에 참여하는 발전기들에 모두 PSS를 설치하여 억제하는 것이 가능하나 이 경우 많은 발전기들에 설치된 PSS의 협조제어가 매우 어렵다. 이보다는, 지역간 모드는 지역간을 연결하는 선로가 취약하거나 중부하로 운전되는 경우에 발생하고 지역간의 경계를 구성하는 선로의 조류진동이 원인이므로 이 조류를 이들 선로에 TCSC를 설치하여 제어하는 것이 더 효과적일 수 있다[2][3].

본 논문에서는 지역간을 연결하고 이들 경계에 위치한 선로 임피던스를 직접적으로 제어할 수 있는 TCSC를 modulation하여, 지역간 진동모드의 제동특성을 개선하는 H $\infty$  최적 제어기를 설계하였다. 고유치 감도해석을 통해 TCSC 설치지점을 선정하였으며[4], H $\infty$  최적제어 설계에서 trade-off 관계인 목적함수와 가중함수의 체계적인 튜닝 방법을 적용하였다[5]. 또한 설계된 제어기를 지역간 저주파진동의 특성을 잘 보여주는 4기 11모선 Benchmark 계통에 투입하여 비선형 시뮬레이션을 통해, H $\infty$  TCSC 제어기가 제동특성 개선에 매우 효과적이고, 전력계통의 다양한 동작조건 및 불확실성에 대해 강인하게 동작함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 전력계통 모델

지역간 진동모드를 분석하고 이를 효과적으로 억제하는 H $\infty$  최적화 제어기 설계를 위해 4기 11모선 계통을 사용하였으며, 계통구성은 그림 1과 같이 두 지역이 연계 선로로 연결되어있다[6]. 4개의 동기기와 여사기는 각각 원통회전형 발전기 모델과 IEEE Type ST1 여사기 시스템을 사용하였으며 이는 PSS/e의 GENROU와 EXST1 모델에 해당한다. 표 1은 Benchmark 계통

의 진동모드들을 나타낸 것으로 2개의 local 모드와 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 제동이 거의 안됨을 알 수 있는데 본 논문에서는 Benchmark 계통에서 가장 문제가 되는 지역간 진동 모드를 억제하기 위해 먼저 효과적인 TCSC위치와 제어기 입력 신호를 선정한다.

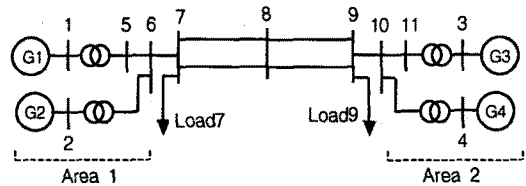


그림 1. 4기 11모선 Benchmark 계통

표 1. Benchmark 계통의 local 모드와 지역간 모드

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 (local 모드 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 (local 모드 2)	1.17	0.092	G3, G4의 $\Delta\omega, \Delta\delta$	G3: 0.60° / -87.5° G4: 0.66° / 96.6°

2.2 TCSC 위치 및 입력신호 선정

2.2.1 선로정수에 대한 1차 고유치 감도

확대행렬  $\lambda$ 의 좌/우고유벡터를 각각  $\tilde{w}_i$ 와  $\tilde{v}_i$ 라 하면, 선로 정수 K의 변화로 인한 1차 고유치감도는 다음 식으로 계산한다[4].

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial K} = \tilde{w}_i^T \frac{\partial \lambda}{\partial K} \tilde{v}_i \quad (1)$$

위 식에서 선로 리액턴스 K에 대한 확대행렬의 편미분 행렬은 특정 리액턴스에 의해 직접적으로 영향을 받는 부분 행렬의 16개 요소들의 변동만 고려하고 그 외의 감도행렬 요소는 영이라고 가정하여도 큰 오차를 수반하지 않는다. 표 3은 지역간 진동모드 고유치의 각 선로의 리액턴스에 대한 고유치감도를 계산한 결과 중에서 감도가 큰 선로들에 대한 1차 고유치감도를 나타내었다. 이는 선로 리액턴스를 계통 입력으로 하여 계산한 선형 상태시스템의 모드 가제어성 결과와 일치하는 것으로 선로 7-8이 선로 8-9보다 약간 더 큼을 알 수 있고, 선로

7-8에 TCSC에 투입하는 것이 지역간 진동모드 제동특성 향상에 보다 효과적일 것으로 예상할 수 있다.

### 2.2.2 제어입력 신호 선정

지역간 진동모드에 대한 정보를 많이 갖고있는 제어입력 신호를 선택하기 위해 TCSC 입력과 계통의 출력변수사이의 모드 가관측성을 계산하였다. 여기서 조사된 출력변수로는 TCSC가 투입된 선로의 유효전력과 모선 전압의 크기로서, 제어기의 신뢰성 및 비용 절감을 위해 지역신호로 제한하였다. 이들 출력변수들은 각각 대표적인 직/병렬 신호들이다. 표 2의 결과를 보면 선로의 유효전력이 모선 전압보다 매우 큰 모드 가관측성을 갖을 수 있어 이를 TCSC 제어입력으로 사용하는 것이 타당할 것으로 예상된다. 하지만 직렬 기기인 TCSC에 직렬신호인 유효전력을 입력으로 사용할 경우 매우 큰 네트워크 케환 이득이 발생하여 TCSC가 포화되는 현상이 일어날 수 있고, 이를 방지하기 위해선 제어기 이득이 매우 낮게 제한되어야 한다[7]. 따라서 선로의 유효전력보다는 모선 전압중에서 모드 가관측성이 가장 큰 모선 8의 전압을 제어입력신호로 선택하였다.

표 2. 1차 고유치 감도 및 가제어성과 가관측성

TCSC 위치	입력 신호	1차 고유치감도	모드 가제어성	모드 가관측성
선로 7-8	$P_{line7-8}$	0.03971-j0.59030	2.3013	2.1283
	$ V _{bus7}$	0.03971-j0.59030	2.3013	0.0895
	$ V _{bus8}$	0.03971-j0.59030	2.3013	0.1327
선로 8-9	$P_{line8-9}$	0.03766-j0.58835	2.2885	2.0155
	$ V _{bus8}$	0.03766-j0.58835	2.2885	0.1327
	$ V _{bus9}$	0.03766-j0.58835	2.2885	0.0381

### 2.3 계통 모델 축약

전력계통의 특성상 대규모 시스템이므로 상태변수 수가 매우 커 적절한 규모로 축약하지 않고서는  $H_\infty$ 제어기의 설계가 불가능하다. 또한 축약된 모델을 사용하여 얻어진  $H_\infty$ 제어기도 필요이상으로 차수가 커질 수 있으므로 제어기의 축약이 필요할 수도 있다. 계통의 바람직한 모델축약은 원래 모델의 차수를 과감히 축약하는 한편, 관심 주파수 대역에서의 계통 동적 특성은 유지되는 것으로서 오차가 적은 축약모델을 구하는 문제는  $H_\infty$  제어기 설계의 성패를 결정짓는 매우 중요한 전제 조건이다 [3][5]. 본 논문에서 사용한 모델 축약 알고리즘은 balanced truncation방법의 Schur 알고리즘으로 nonminimum 모델에서도 수치적 안정성을 잃지 않고 비교적 작은 절대오차 범위 내에서 모델을 축약할 수 있다[8]. 표 3은 선로 7-8의 TCSC출력을 계통입력으로, 모선8의 전압을 계통 출력으로 하는 32차의 원 계통을 4차의 축약 전달함수로 나타낸 것이다.

표 3. 축약 전달함수

극점	영점	이득
$-0.0212 \pm j0.0631$	$-0.0345 \pm j0.1186$	0.05554
$-0.0026 \pm j3.8228$	$6.5361 \text{ \& } -4.0387$	

### 2.4 $H_\infty$ 최적화 제어기 설계

$H_\infty$  최적제어 기법은 SISO뿐 아니라 MIMO 제어기까지 적용할 수 있으며, 설계단계에서 계통의 다양한 불확실성을 가중함수를 통해 고려하여 강인성과 성능이 균형을 이룬 제어기를 설계할 수 있는 방법이다[3][5].

#### 2.4.1 문제의 정식화

TCSC에 의한 지역간 진동모드 제어는 일반의 서보 제어와는 아주 다른데, 정상 상태 오차등은 고려할 필요가 없다는 점을 들 수 있다. 이를 주파수 영역에서 설명하면 DC 이득이 클 필요가 없다는 것인데 기존의 PSS에서는 washout 개념을 도입하여 정상 상태에서는 PSS가 동작하지 않도록 하였다. 그러나  $H_\infty$  최적제어 이론을 적용하기 위해서는 washout 개념이 설계 단계에서부터 고려가 되어야 하므로 이러한 설계 사양등은  $H_\infty$  최적제어를 위한 목적함수와 가중함수에 체계적으로 고려되어야 한다[5].

#### 2.4.2 제어 사양

가. 외란억제 사양

외란을 각각  $d_1$ 과  $d_2$ 로 두면, 각각의 외란에 대한 출력  $y$ 는 다음을 만족하여야 한다. 단

$$\|y(d_1)\|_2 \leq \|(1+KP)^{-1}W_1\|_\infty < \gamma \quad (2)$$

$$\|y(d_2)\|_2 \leq \|P(1+KP)^{-1}W_2\|_\infty < \gamma \quad (3)$$

나. 모델 불확실성 사양

모델링 오차나 플랜트의 모델 불확실성에 대한 제어 사양은 곱셈형 모델 불확실성을 제어기 입력측에 모델링하여 식 (4)같이 정식화한다.

$$\|e_1(p)\|_2 \leq \|KP(1+KP)^{-1}W_3\|_\infty < 1 \quad (4)$$

다. 제어 출력에 대한 사양

제어 출력에서 고주파 성분을 제거하기 위한 방법으로 제어 출력을 출력으로하고 가중함수  $W_u$ 와 함께 최적해를 구한다. 외부 신호  $d_1, d_2, p$ 에 대한 제어 출력을 가중함수와 함께 나타내면,

$$\|u(d_1)\|_2 \leq \|W_u K(1+KP)^{-1}W_1\|_\infty < \gamma \quad (5)$$

$$\|u(d_2)\|_2 \leq \|W_u PK(1+KP)^{-1}W_2\|_\infty < \gamma \quad (6)$$

$$\|u(p)\|_2 \leq \|W_u K(1+KP)^{-1}W_3\|_\infty < \gamma \quad (7)$$

#### 2.4.3 목적함수와 가중함수의 결정

위에서 결정한 6개의 제어 사양을 최적화하기 위해서는 한 개의 목적함수로 나타내어야 하는데,

$$\min_{\text{stabilizing } K} \left\| \begin{array}{ccc} T_{e_1} W_1 & T_{e_1} W_2 & T_{e_1} W_3 \\ W_u T_{u_1} W_1 & W_u T_{u_2} W_2 & W_u T_{u_3} W_3 \end{array} \right\|_\infty < \gamma \quad (8)$$

여기서  $T(i, j)$ 는  $j$ 에서  $i$ 까지의 전달함수이다.

식 (8)과 같이 하면 각각의 제어 사양을 모두 만족하는 안정화 제어기  $K$ 가 구해진다. 위의 목적함수에서 우리가 목적으로 하는 강인성과 성능이 균형을 이룬 제어기를 얻기 위해서는 가중함수를 결정해야 하는데, 이 가중함수가  $H_\infty$  최적화 제어기 설계의 성패를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 가중함수는 다음과 같다.

$$W_1 = \frac{s}{(2s+1)(s+1)} \quad (9)$$

$$W_2 = \frac{s}{(s+1)(\frac{1}{5}s+1)} \quad (10)$$

$$W_3 = W_u = \frac{(0.5s+1)(0.033s+1)}{(s+10^{-4})(10^{-5}s+1)} \quad (11)$$

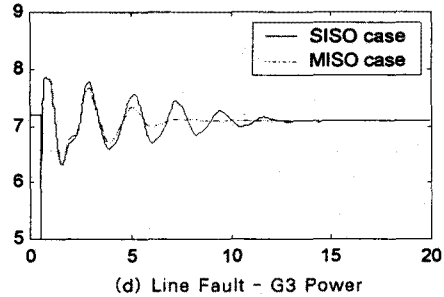
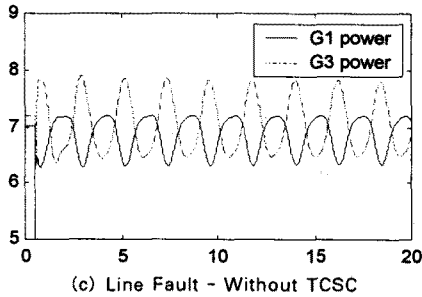
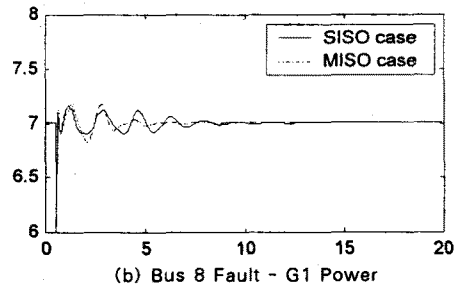
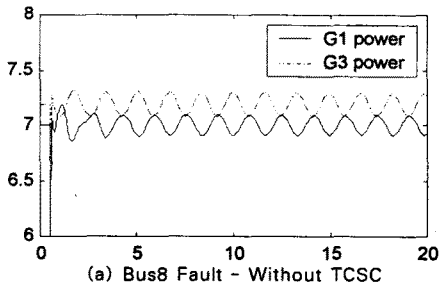


그림 2. 제어시와 비제어시의 발전기 유효전력의 변화

#### 2.4.4 설계 절차

(1단계) 외란  $d_1, d_2$ 를 모의하며,  $W_1, W_2$  선택  
 (2단계) 곱셈형 모델 오차를 플랜트 출력측에 모의하며, 모델링 오차에 의한 외란은  $p$ 로서, 가중함수  $W_3$ 선택.  
 (3단계) 외란에 의한 출력 신호는  $y$ 로 주어지며, 제어기 출력신호는  $u$ 로 두고, 외란 신호  $d_1, d_2, p$ 에 대한 출력  $y$  및  $u$ 까지의 전달함수 행렬의 무한대 노음을 최소화하는 제어기를 계산.  
 [4단계] 최적  $\gamma$ 값이 크면, 전주파수 영역에서 가중 함수  $W_1, W_2$ 의 가중치를 작게 하여 최적해를 다시 계산. 이때 가중치를 변화 시키면서 trade-off 관계인 성능과 강인성이 서로 균형을 이룰 수 있게 튜닝.

#### 2.5 사례 연구

설계된 TCSC-H $\infty$  제어기가 지역간 진동모드를 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하기 위해 Benchmark 계통에 투입하여 고유치 계산과 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. H $\infty$  제어기는 7-8의 1회선에만 투입된 SISO와 2회선 모두에 투입된 MISO, 두 가지 경우에 대해 설계하였고, 표 4의 고유치 계산 결과에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 지역간 진동모드의 해당 고유치가 좌반평면으로 크게 이동하였다. 비선형 시뮬레이션의 경우 TCSC의 리액턴스 모델레이션 범위는  $\pm 10\%$ 이며, 정상상태에서 고정보상은 하지 않는 것으로 가정하였다. 모의된 사고는 bus8에 3상 3주기 사고와 선로 8-9의 1회선의 고장 후 탈락된 사고 두 경우를 상정하였다. 그림 2는 지역 1과 지역 2의 발전기의 유효전력 출력을 나타낸 것이다. TCSC가 없는 경우 두 지역의 발전기가 약 180°의 위상차로 서로 임계 진동하였으나, TCSC-

H $\infty$  제어기가 투입된 경우엔 안정화되었다. 특히 고장 정도 및 고장 후 계통 변화가 큰 선로탈락의 경우에도 TCSC H $\infty$  제어기가 강인하게 동작하였으며, 2회선모두에 투입하는 것이 1회선보다 효과적이었다.

### 3. 결 론

전력계통의 지역간 진동모드의 제동특성을 개선하는 TCSC - H $\infty$  최적제어기를 설계하였다. Benchmark 계통에 설계된 H $\infty$  제어기를 투입하여 시뮬레이션한 결과 제동특성 개선에 효과적이고, 계통의 다양한 고장에 대해 강인함을 확인하였다.

#### [참고 문헌]

- [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] "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Scoping Study, Volume 2, Part 1: Analytical Studies," EPRI Reports EL-6943, September 1991.
- [3] M.Klein, L.X.Le, G.J.Rogers, S.Farrokhpay, N.J.Balu, "H $\infty$  Damping Controller Design in Large Power Systems," IEEE Trans., PWRs, Feb. 1995, pp. 158-166
- [4] 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.
- [5] Y.H.Chun, "General Performance Index and Weighting Function Design for H $\infty$  Optimizations and Its Applications to Motion and Power System Control," PhD Thesis of The Univ. of Tokyo, December 1996.
- [6] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.
- [7] 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.
- [8] Robust Control Toolbox, MATLAB User's Guide, 1998

표 4. 지역간 진동모드에 대한 H $\infty$  제어기의 효과

		지역간 모드 고유치	주파수 (Hz)	제동비
No TCSC		-0.0025±j3.82	0.608	0.00065
with TCSC	line 7-8의 1회선	-0.8181±j4.22	0.672	0.1903
	line 7-8의 2회선	-0.7572±j3.93	0.625	0.1892