

# 전력시스템 동요 억제를 위한 TCSC 제어기의 파라메타 결정

\* 이병하° \*\* 손광평 \*\* 한학근 \*\* 박종근  
\* 인천대학교 전기공학과 \*\* 서울대학교 전기공학과

## The Determination of TCSC Controller Parameters for Damping Power System Oscillations

\* Byung Ha Lee \*\* Kwang-Myoung Son \*\* Hak-Guhn Han \*\* Jong-Keun Park  
\* University of Incheon \*\* Seoul National University

### Abstract

The thyristor controlled series compensator can vary the impedance continuously to levels below and up to the line's natural impedance, thus enabling transmission line capability to be increased and power flow to be controlled. The dynamic performance of TCSC to increase the power system damping is mainly analyzed in this paper. The TCSC controller used here is of the PID type and the input signal to the controller is the active power flow through the TCSC. The TCSC parameters are determined so as to minimize the modal performance measure for damping of power system oscillations.

### 1. 서론

FACTS 장치에 의한 전력조류제어의 고속성과 정밀성은 교류 전력계통제어에 내재하는 문제들을 해결할 수 있는 새로운 방법들을 제시하고 있다. 이 중에서 콘덴서를 직렬 투입함으로써 송전용량을 증대시키고 전력계통의 조류제어 및 안정도 제어에 효과적인 TCSC를 계통에 적용했을 때의 성능을 분석하고, 이의 제어기 파라메타를 최적 결정함으로써 효과적으로 제어하고자 한다. TCSC는 TCR과 커패시터의 병렬구조에 의해 용량성과 유도성에 걸친 범위까지 연속적으로 제어할 수 있다. TCSC는 정상상태에서의 전력조류극대화 및 제어기능과 함께 외란에 의한 과도시의 전력계통 안정화 기능을 수행할 수 있다. TCSC의 전력계통안정화 효과에대한 연구는 주로 전력계통 동요감쇄에 초점을 두고 있다. 직렬보상과 병렬보상의 진동감쇄에 있어서의 효과와 효과적인 위치의 선정에대한 비교를 시도하여 직렬보상이 병렬보상보다 효율적임을 보여준 연구가 있으며[1], 고유치 민감도의 분석에 근거하여 전력시스템의 동요를 억제하는데 CSC와 SVC등이 사용될 수 있음을 보여 주었으며[2], 이외에도 FACTS 설비들이 전력시스템의 동요를 억제하고 안정도를 향상

시키는데 기여할 수 있음을 보여준 연구들이 있다[3-8]. 또, FACTS의 제어기를 설계하는 연구도 있었다[9,10].

이 논문에서는 전력시스템의 동요억제를 위한 TCSC의 제어기의 파라메타 최적선정을 위해 Modal Performance Measure를 최소화하는 기법[11,12]을 적용하고 그 효과를 분석한다. 분석 계통으로는 Ward & Hale의 6모선계통을 사용하고, 발전기의 여자기로서 IEEE type1 여자기를 사용하였고, PSS의 효과도 병행하여 분석한다. TCSC를 제어하기 위해 PID 제어기를 적용하였다. TCSC가 효율적으로 주요 동요모드를 제어하기 위해서는 동요에 직접 영향을 미치는 발전기들의 출력을 제어기의 입력으로 선택하는 것이 바람직하나 이는 현실적으로 어렵다. 여기서는 TCSC를 제어하기위한 입력신호로서 실 적용 가능한 TCSC 설치 지점의 유효전력의 측정치를 이용한다. 전력시스템 동요를 최소화시키는 제어기의 설계가 되도록 상태변수 모우드의 Envelope를 성능지수로 선택하여 이를 최소화시키는 제어기의 파라메타의 값들을 구하고 그 결과를 비교 분석한다.

### 2. TCSC 및 전력시스템 모델

TCSC는 정상상태에서 선로조류제어를 위하여 임피던스 지정치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에서는 보조입력신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수 있다. TCSC 제어기는 PID 타입이 적용되고, 이 제어기에 입력되는 입력신호는 TCSC가 설치된 지점에서 측정이 용이한 유효전력으로 하였다. 이 입력신호는 제어기를 거친후 산정된 임피던스를 구현하는 절호각으로 변환된다. 입력으로부터 원하는 임피던스의 전이는 약간의 시지연이 발생하며, 전력계통안정도 해석에서 TCSC는 이 시지연을 반영한 1차 모델로 고려할 수 있다. TCSC 모델은 그림1에 제시되어 있는데, 여기서  $X_C$ 는 TCSC에 의해 투입되는 임피던스이고,  $T_C$ 는 TCSC의 시정수이고,  $P_{ref}$ 와  $P_r$ 는 각각 TCSC가 설치된 선로의 기준입력 전력 및 보조입력 전력이며,  $K_P, K_I, K_D$ 는 각각 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득이다.

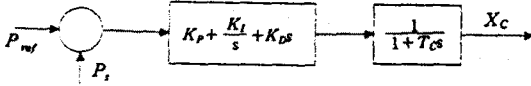


그림1. TCSC제어기의 모델  
Fig.1. TCSC controller model

이 논문에서는 여자기로서 IEEE type 1 여자기를 사용하였고 3차의 PSS 모델[12]을 사용하였다.

### 3. 제어기 파라메타 결정

#### 1. 동적시스템의 수식화

동적 전력시스템의 수학적모델은 아래와 같이 미분 대수방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = f(X, Y) \quad (1)$$

$$0 = g(X, Y) \quad (2)$$

여기서 X는 상태변수들을 나타내고 Y는 모션전압, 위상각 등의 회로변수들을 나타낸다. TCSC를 투입하는 경우 그림1에서 보여진 동적시스템이 수식화되어 TCSC에 의해 조절되는  $X_c$ 를 포함한 상태변수들이 추가된다. 평형점 부근에서 작은 외란 발생시 위의 미분대수 방정식은 아래와 같이 선형화 될 수 있다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta Y \quad (3)$$

$$0 = C\Delta X + D\Delta Y \quad (4)$$

여기서 A, B, C, D는 평형점에서 선형화된 적합한 차수를 가지고 있는 계수 행렬들이다. Load Flow Equation에 해당하는 식(2)에도  $X_c$ 가 포함되어 있으므로 선형화할 때 기존 Jacobian 행렬 성분외에  $X_c$ 와 관련된 값들이 추가된다.

D가 Nonsingular하다고 가정하면 위의 식들은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = (A - BD^{-1}C)\Delta X = \tilde{A}\Delta X \quad (5)$$

$$\Delta Y = -D^{-1}C\Delta X = \tilde{C}\Delta X \quad (6)$$

$Y_r$ 을 Y의 기준값이라 할 때,  $Z(t) = Y(t) - Y_r$  이라 두면, 제어의 목적은 시스템 파라메타에 대한 여러  $Z(t)$ 를 최소화하는 것으로 귀결된다.

이때  $Z(t)$ 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(t) &= \tilde{C}\Delta X + Y_r - Y_r \\ &= \sum_{i=1}^n \tilde{C}_i \Delta X_i(t) + Z_0 \\ &= \sum_{i=1}^n Z_i(t) + Z_0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z_i(t) &= \sum_{j=1}^n Z_{i,j}(t) \\ &= \tilde{C}_i \sum_{j=1}^n (V_j \Delta X_{0j}) U_{j,i} \cdot \exp(s_j t), \quad (8) \end{aligned}$$

$Y_r$ 는  $Y(t)$ 의 정상상태 값,  $Z_0 = Y_r - Y_r$ 이고 U와 V는 각각 Right, Left Eigenvector들이고,  $U_{j,i}$ 는 i번째 Right Eigenvector  $U_j$ 의 j번째 성분이다. 각 Envelope 하의 면적은 아래의 Modal Performance Measure로 표현될 수 있다.

$$J(\rho) = \sum_{j=0}^n J_j \quad (10)$$

여기서,

$$J_j = \int_0^T \sum_{i=1}^n Z_{i,j}^2 W_j^2 Z_{i,j}^2 dt \quad \text{for jth state,} \quad (11)$$

$$J_0 = \int_0^T Z_0^2 W_0 Z_0^2 dt \quad \text{for constant term.} \quad (12)$$

여기서  $W_j$ 는 j번째 상태에 대한 가중치 행렬이고, t와 s는 각각 전치와 공액복소수를 뜻한다.

#### 4.2. 최적 파라메타 결정

위의 Modal Performance Measure  $J(\rho)$ 는 파라메타 벡터  $\rho$ 에 관한 Sensitivity를 이용하여 최소화 될 수 있다. Chain rule을 적용하여, J의 Gradient  $\nabla J$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla J &= \frac{\partial J}{\partial \rho} = \sum_{j=0}^n \frac{\partial J_j}{\partial \rho} \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,i} \left( -\frac{\partial \tilde{A}_{k,i}}{\partial \rho} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $(\frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}})_{k,i}$  은 행렬  $(\frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}})$ 의 (k,i)성분이다. 위 식들로부터

$$\begin{aligned} J_m &= \sum_{i=1}^n ( \tilde{C}_m' W_m \tilde{C}_m ) (V_i \Delta X_0) (V_i \Delta X_0)' \\ &\quad \cdot (U_{m,i})(U_{m,i})' \cdot f(\sigma_i) \end{aligned} \quad (14) \quad \text{여기서}$$

$$f(\sigma_i) = \frac{1}{2\sigma_i} (\exp(2\sigma_i T) - 1).$$

[12]에서와 같은 방식으로 진행하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_m}{\partial \tilde{A}} &= \sum_{i=1}^n ( \tilde{C}_m' W_m \tilde{C}_m ) \\ &\quad \cdot \{ f(\sigma_i) |V_i \Delta X_0|^2 2\text{Re} \{ [U_i \ U_m' D_i V_i'] U_{m,i} \} \\ &\quad + f(\sigma_i) |U_{m,i}|^2 2\text{Re} \{ [U_i V_i \Delta X_0 V_i'] V_i' \Delta X_0 \} \\ &\quad + f'(\sigma_i) |V_i \Delta X_0|^2 |U_{m,i}|^2 2\text{Re} \{ [U_i V_i] \} \} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$D_i = \text{diag} [1/(s_i - s_1), \dots, 1/(s_i - s_{i-1}), 0, 1/(s_i - s_{i+1}), \dots, 1/(s_i - s_n)]$$

$\sigma_i$ 는 Eigenvalue  $s_i$ 의 실수부,  $\text{Re}$ 는 그 항의 실수부를 의미하고,

$$\begin{aligned} U &= [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n] \\ V &= [V_1' \ V_2' \ \dots \ V_n'] \\ \tilde{U} &= [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n] \end{aligned}$$

으로 된다.

이 Sensitivity 식으로부터 최대정사법 등을 이용해서 최적

파라메타의 값을 구할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

분석계통으로는 Ward & Hale의 6모선 계통을 사용하였다 [12]. 논문[12]의 그림1과 같은 회로나 다만 5번, 6번 모선 사이에 변압기가 아니라 TCSC가 설치되어 있는 경우를 고려하였다. 적용한 TCSC를 사용하지 않았을 경우와 TCSC를 사용하였을 경우를 그림2에서 비교하였다. 부하의 변동이 외란으로서 발생했을 때의 발전기2의 로우터각의 동요궤적이 보여져 있는데, 실선이 TCSC가 설치되지 않았을 때의 궤적이며, 점선으로 표시된 것이 TCSC가 설치된 경우의 궤적인데  $T_C = 0.1[\text{sec}]$ 으로 가정했고, 위의 제어기 파라메타 결정과정을 통하여  $K_F=8.4$ ,  $K_I=42.5$ ,  $K_D=0.002$ 로 정해졌다. 이 그림에서 TCSC가 없을 때에는 발전기 로우터각의 진동이 상당히 오래 지속되나, TCSC가 설치된 경우는 그 진동이 비교적 빠르게 감쇠함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

주요 동요모드에 영향을 크게 미치는 발전기의 상태변수의 데이터는 송전선로 중간에 TCSC설치단에서 취득이 어려우므로 TCSC설치단에서 측정이 용이한 유효전력을 제어기의 입력으로 선택하여 제어기를 구성하였다. 이 경우에도 TCSC가 전력시스템 동요를 억제하는 효과가 있음을 시뮬레이션을 통하여 보여 준다. 제어기는 상용의 PID제어기를 사용하였고, Modal Performance Measure를 최소화하도록 파라메타를 선택함으로써 전력시스템 동요를 최소화시키는 제어기설계를 할 수 있음을 보여준다. Performance Measure로서 발전기 상태변수 뿐만 아니라 모선전압의 크기나 위상각도 선택할 수 있으므로 동적안정도 외에 전압안정도의 향상을 위해서도 적용이 가능하다.

#### 6. 참고문헌

1. L. Angquist, B. Lundin, J. Samuelsson, "Power Oscillation Damping using controlled reactive power compensation - A Comparison between series and shunt approaches", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993.
2. M. Noroozian, G. Anderson, "Damping of inter-area and local modes by use of controllable components", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993
3. Sanchez-Gasca, N.W. Miller, A. Kurita, S. Horiuchi, "Multivariable control for damping interarea oscillations", IEEE Control System Magazine, Vol. 9, No. 1, January, 1989
4. B. L. Agrawal, R. A. Hedin, R. K. Johnson, A. H. Montoya, B. A. Vossler, "Advanced Series Compensation(ASC) steady-state, transient stability and subsynchronous resonance studies", FACTS Conference 2, EPRI TR-101784, Boston, Massachusetts, May 1992

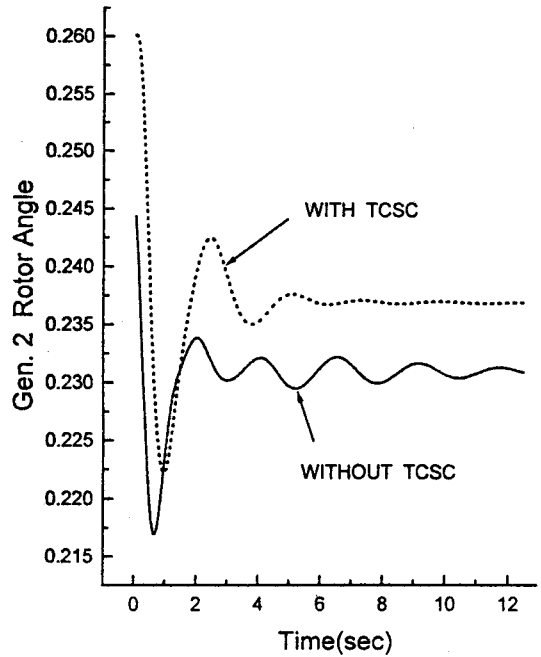


그림2. 발전기 로우터각의 변화 비교

5. J.J. Paserba, E.V. Larsen, "A stability model for Thyristor Controlled Series Compensation(TCSC)", FACTS Conference 2, EPRI TR-101784, Boston, Massachusetts, May 1992
6. F.P. de Mello, "Exploratory concepts on control of variable series compensation in transmission systems to improve damping of intermachine/system oscillations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994
7. Paserba, N.W. Miller, E.V. Larsen, R.J. Piwko, "A Thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July, 1995.
8. P. Pourbeik, M.J. Gibbard, "Damping and synchronizing torques induced on generators by FACTS stabilizers in multimachine power systems", IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, MD, January 1996, #96 WM 253-5 PWRS
9. F.D. Freitas et. al., "Coordinated setting of stabilizers for synchronous generators and FACTS devices in power systems", CIGRE Symposium, Tokyo, Japan, #320-03, 1995
10. P.S. Dolan, J.R. Smith, W.A. Mittelstadt, "A study of TCSC optimal damping control parameters for different operating conditions", IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY, January 1995, #95 WM 187-5 PWRS
11. J.W. Jung, J.B. Choo, Y.M. Park, "Optimal PSS-parameter selection algorithms with new performance measure", Proc. IFAC Symposium on PSPCC, Seoul, Korea, August 1989
12. B.H. Lee and K.Y. Lee, "Dynamic and static voltage stability enhancement of power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, February 1993
13. Kwang-Myoung Son, Jong-Keun Park, Byung Ha Lee, "On the stabilization of power system by advanced series compensation", Proceedings of JIEE Conference, 1995. 8, Nagoya Japan