

저주파 진동 감쇠를 위한 PSS와 TCSC의 협조 제어

○ 김태현*, 서장철*, 문경섭*, 손광명*, 이상성*, 박종근*, 문승일**
 *서울대학교 전기공학부, **전북대학교 전기공학부

THE COORDINATED CONTROL OF TCSC AND PSS TO IMPROVE POWER SYSTEM DAMPING

T. H. Kim, J. C. Seo, K. S. Moon, K. M. Son, S. S. Lee, J. K. Park
 Seoul National University
 Seoul, Korea

S. I. Moon
 Cheonbuk National University
 Cheonju, Korea

Abstract - A study of the coordinated control of a TCSC and an existing PSS is presented when both are used to damp the low frequency oscillations. TCSC is modeled by the first order delay model. Linear quadratic Gaussian controller is used for designing PSS and TCSC supplementary controller. The performance of the proposed controllers is simulated in a one machine infinite bus model. As a result, it is shown that to damp the low frequency oscillations efficiently, it is necessary to control TCSC and PSS simultaneously.

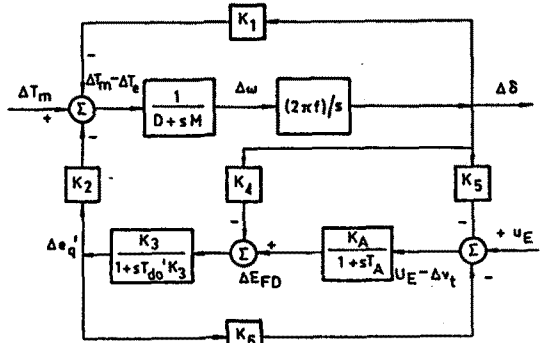


그림 1 저주파 진동 현상 해석을 위한 블록 선도

1. 서론

발전소나 송전 선로를 신설하지 않고 송전 용량을 증가시키기 위하여 유연 송전 시스템(Flexible AC Transmission Systems: FACTS)의 연구가 현재 전세계적으로 활발히 되고 있다. 사이리스터 제어 적렬 보상기(Thyristor Controlled Series Compensator: TCSC)는 그중 한가지 기기로서 송전 용량 증대 뿐만 아니라 저주파 진동 감쇠에도 효과가 있다고 알려져 있다.

저주파 현상에 대한 대책은 주로 여자 제어에 의한 전력 계통 안정기(Power System Stabilizer: PSS)였다. 그러나 종래의 lead-lag 보상은 좁은 범위의 주파수에 대해서만 효과가 있었다. 본 논문에서는 넓은 범위에서도 효과가 있는 LQ(Linear Quadratic) 제어 기법을 사용했다. PSS 만으로서의 효과가 적은 경우도 있어서 본 논문에서는 TCSC에 의한 제어도 동시에 행하였다.

실제의 경우 측정할 수 없는 변수도 있으므로 본 논문에서는 측정할 수 있는 변수만을 이용할 수 있는(linear quadratic Gaussian: LQG) 기법을 이용하였다.

시간 영역 모의를 통해 PSS와 TCSC 협조 제어로 저주파 진동 억제 효과가 가장 크다는 것을 보였다.

2. 저주파 진동 해석을 위한 모형

저주파 진동 해석을 위한 모형의 블록선도는 그림 1과 같다. 이 모형에서는 계자 권선 회로와 여자가 미분 방정식에 의하여 표현되었다. 주기적인 미소 신호를 대상으로 하기 때문에 선형화된 방정식을 이용했다.

저주파 진동 현상의 부가 여자 제어를 전력 계통 안정기(the power system stabilizers: PSS)라고 한다. 부가 여자 제어기의 주된 생 각은 여자 계통을 통하여 발전기의 감쇠 토크를 증가시키는 것이다.

3. TCSC 모형

TCSC는 기준 신호 입력과 추가로 제어할 수 있는 부가 신호로 구성되어 있다. 바라는 임피던스 값을 얻기 위하여 그 값을 얻을 수 있는 점호각이 계산된다. 기준 임피던스 값으로부터 바라는 값(기준+부가)으로의 변화에는 약간의 시간이 필요하므로 이 현상을 지연 요소로서 모형화하였다. 본 논문에서는 TCSC의 동적 특성을 1차 지연 요소로서 모형화하였다 [3-4]. 기준 입력은 정상 상태 전력 조류를 제어하기 위하여 정하여진 값이고, 외란이 있을 때 안정화하기 위하여 부가 입력을 제어하였다. 그러므로 TCSC 모형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_c \dot{X}_c = -X_c + X_{ref} + X_{sup} \quad (1)$$

여기서 X_c 는 TCSC의 임피던스, X_{ref} 는 기준 입력, X_{sup} 는 부가 입력을 각각 나타내고 있다.

4. 결합된 상태 방정식

TCSC와 PSS의 동적 특성을 동시에 고려하기 위해서 전력 계통 모형과 TCSC 모형을 결합하여야 한다.

그림 2에 보인 것처럼 이 계통은 1개의 발전기, 무한 모선과 2개의 병렬 송전 선로로 구성되어 있다. 전력 조류 제어 능력과 저주파 진동 현상 억제 효과를 보기 위하여 병렬 선로 중 한 선로에 TCSC를 설치하였다.

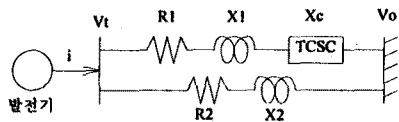


그림 2 TCSC가 설치된 1기 무한대 모선 모형

고유치를 알아 보고 제어 법칙을 만들기 위하여는 상태 방정식을 선형화하여서 1차 미분 방정식의 형태로 나타내어야 한다. 결합된 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

$$x = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta e_q', \Delta E_{fd}, \Delta X_c]^T \quad (3)$$

$$u = [u_E, x_{mp}]^T \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_m}{M} \\ 0 & -\frac{K_A}{T_{\omega'}} & -\frac{1}{T_{\omega'} K_s} & \frac{1}{T_{\omega'}} & -\frac{K_r}{T_{\omega'}} \\ 0 & -\frac{K_A K_s}{T_A} & -\frac{K_A K_s}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_r}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

행렬 A 요소 중 왼쪽 4개의 열과 위쪽 4개의 행의 요소는 1기 무한 대 전력 계통에 의한 것이고, 마지막 열의 요소는 TCSC에 의한 것이다. A의 마지막 열의 요소를 유도하기 위해서는 X_c 에 대한 i_d 와 i_q 의 미분을 계산하여야 한다. X_c 에 대한 미분은 다음과 같다.

$$T_e = i_d e_q' + (x_q - x_d') i_q i_q \quad (7)$$

$$K_m = \frac{\partial T_e}{\partial X_c} = \frac{\partial i_d}{\partial X_c} e_q' + (x_q - x_d') \left(\frac{\partial i_d}{\partial X_c} i_q + i_d \frac{\partial i_q}{\partial X_c} \right) \quad (8)$$

$$K_s = (x_d - x_d') \frac{\partial i_d}{\partial X_c} \quad (9)$$

$$v^2 = v_d^2 + v_q^2$$

$$K_1 = \frac{\partial v_i}{\partial X_c} = \frac{\partial v_d}{\partial v_d} \frac{\partial v_d}{\partial X_c} + \frac{\partial v_i}{\partial v_q} \frac{\partial v_q}{\partial X_c} \quad (10)$$

$$= \frac{1}{v_{\omega}} \left(v_{\omega} x_q \frac{\partial i_q}{\partial X_c} - v_{\omega} x_d' \frac{\partial i_d}{\partial X_c} \right)$$

X_c 에 대한 i_d 와 i_q 의 미분을 계산하기 위하여 다음과 같은 식을 유도한다.

$$Z1 = R1 + j(X1 + X_c) \quad (11)$$

$$Z2 = R2 + jX2 \quad (12)$$

$$Z = Z1 // Z2 = \frac{Z1 * Z2}{Z1 + Z2} = R + jX \quad (13)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial X_c} = \frac{\partial R}{\partial X_c} + j \frac{\partial X}{\partial X_c} = j \frac{Z^2}{Z1^2} \quad (14)$$

$$Zi = v_i - v \quad (15)$$

$$v_i = v_d + j v_q \quad (16)$$

$$v = v_0 (\sin\delta + j \cos\delta) \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} R & -X \\ X & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - v_0 \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e_q' - \begin{bmatrix} 0 & -x_q \\ x_d' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} R & -(X+x_d') \\ X+x_d' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e_q' - v_0 \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Z_1^2 = R^2 + (X+x_d')(X+x_d') \quad (21)$$

$$\frac{\partial Z_1^2}{\partial X_c} = 2R \frac{\partial R}{\partial X_c} + (2XX + x_d' + x_q) \frac{\partial X}{\partial X_c} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_1^2} \begin{bmatrix} X+x_d' & e_q' \\ R & X+x_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_c} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X_c} \frac{1}{Z_1^2} + \frac{1}{Z_1^2} \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial X_c} + x_q \\ \frac{\partial R}{\partial X_c} \end{bmatrix} e_q' \quad (24)$$

$$- \frac{v_0}{Z_1^2} \begin{bmatrix} \frac{\partial R}{\partial X_c} & \frac{\partial X}{\partial X_c} + x_q \\ \left(\frac{\partial X}{\partial X_c} + x_d' \right) & \frac{\partial R}{\partial X_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \end{bmatrix}$$

상수 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_1^2} \begin{bmatrix} X+x_q \\ R \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = -\frac{v_0}{Z_1^2} \begin{bmatrix} R & X+x_q \\ -(X+x_d') & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_0 \\ \sin\delta_0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_d \\ Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (x_q - x_d') i_{\omega} \\ e_{\omega} + (x_q - x_d') i_{\omega} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$K_3 = \frac{1}{1 + (x_q - x_d') Y_d} \quad (28)$$

$$K_4 = (x_q - x_d') F_d \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_{\omega}}{v_{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_d \\ Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{x_d' v_{\omega}}{v_{\omega}} \\ \frac{x_q v_{\omega}}{v_{\omega}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

5. LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어기의 설계

LQG 제어기를 설계하기 위한 확률적 선형 동적 계통은 다음과 같다 [5,6]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + \xi \quad (31)$$

$$y = Cx + \theta \quad (32)$$

여기서 ξ 는 강도 σ 를 가진 확률 잡음 외란이고 θ 는 강도 σ 를 가진 확률 측정 잡음을 나타낸다. 둘 다 평균이 0인 정규 분포를 가진 stationary 확률 과정으로 가정하였다.

가격 함수는 다음과 같다.

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x^T Q x + u^T R u] dt \right\} \quad (33)$$

여기서 Q는 양의 반 한정 대칭 상태 가중 행렬이고, R은 양의 한정 대칭 제어 가중 행렬이다.

이 경우 최적 제어 문제는 (31)식의 제약 조건 하에서 가격 함수 J를 최소화하는 제어 법칙 $u(t)$ 를 찾는 문제이다.

LQG 제어기는 칼만 필터와 전 상태 궤환 제어기로 구성된다. 즉, LQG 제어기에서는 폐루프 계통의 안정도를 보장하는 linear quadratic regulator(LQR)와 상태를 안정하게 추정하는 것을 보장하는 칼만 필터를 이용한다 [5].

LQG 제어기의 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + H(y - C\hat{x}) \quad (34)$$

$$u = -G\hat{x} \quad (35)$$

여기서 \hat{x} 는 추정된 상태 변수이다.

식 (35)에서 본 것처럼 LQG 제어기는 실제 제어기 구성에 있어 측정이 불가능한 상태 변수가 있을 수 있으므로, 실제 신호 $x(t)$ 대신 추정된 상태 $\hat{x}(t)$ 을 개환한다. 그러므로 LQG 제어기는 측정할 수 있는 변수만을 이용해서 구현될 수 있다.

분리 이론에 의하여 필터 이득 행렬 H 와 제어 이득 행렬 G 를 독립적으로 결정할 수 있다.

필터 이득 행렬 H 는 다음의 필터 대수 Ricatti 방정식에서 구한다 [5].

$$AP + PA^T + \varepsilon - PC^T\Theta^{-1}CP = 0 \quad (36)$$

$$H = PC^T\Theta^{-1} \quad (37)$$

제어 이득 행렬 G 는 다음의 제어 대수 Ricatti 방정식에서 구한다 [5].

$$KA + A^TK + Q - KBR^{-1}B^TK = 0 \quad (38)$$

$$G = R^{-1}B^TK \quad (39)$$

6. 이산 제어기의 설계

오늘날 마이크로 프로세서의 빠른 속도와 작은 크기 때문에 대부분의 제어 시스템은 디지털 기술을 이용하여 구현되고 있다 [5].

디지털 설계에는 두가지 접근법이 있다. 즉, 연속 제어기 설계방법과 직접 이산 시간 설계방법이 그것이다. 후자는 전자에 비해 보다 정확한 성능을 보일 뿐만 아니라, 더 큰 샘플링 시간을 허용한다. 따라서 본 논문은 이산 LQG 제어기를 설계할 때, 직접 이산 시간 설계방법을 채용하였다.

그림 3은 전체 제어시스템의 블록선도를 나타낸다.

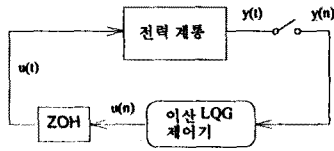


그림 3 전체 제어시스템의 블록선도

이산 LQG 제어기 구성을 위해서는 필터 이득 행렬 H 와 제어 이득 행렬 G 의 계산이 필요하다. 그러나 이 행렬들은 오프라인으로 미리 계산되기 때문에, 온라인 디지털 제어기는 단지 행렬간의 곱만 수행하면 된다. 게다가 본 논문에서는 제어기 구성을 위해 필요한 전력계통의 출력으로써 1주기에 한번씩 검출되는 발전기 속도를 가정하였다. 즉 이산 LQG 제어기는 1주기에 한번 새로운 제어신호를 전력계통에 보내 제어한다. 이 정도의 계산량은 현재 이용가능한 digital signal processors(DSP)에 의해 충분히 수행될 수 있다.

7. 시간 영역 모의

제한된 제어기가 저주파 진동 현상을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하기 위해 비선형 계통을 이용한 시간 영역 모의를 했다. 비선형성은 여자의기, 최대, 최소값, PSS와 TCSC의 제한기 등을 포함한다. 외란으로는 TCSC가 없는 선로에서의 3주기 3상 지락 사고를 모의하였다.

그림 4는 TCSC 또는 PSS의 단독 제어보다 TCSC와 PSS의 협조 제어가 좋다는 것을 보여 주고 있다. 그림 5와 그림 6에서 보면, 3상 사고가 심해서 TCSC의 제어기 출력이 포화되지만 저주파 진동 현상이 잘 감쇠되는 것을 알 수 있다.

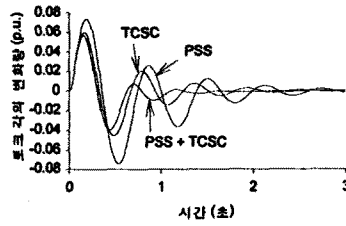


그림 4 토르크각의 변화량 ($\Delta\delta$)

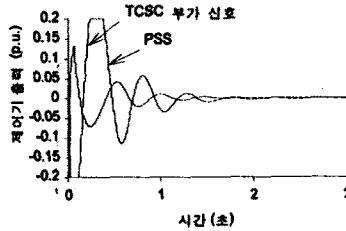


그림 5 PSS와 TCSC 제어기의 출력 (u_B, X_{map})

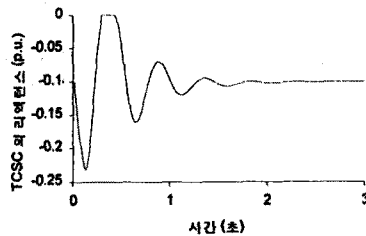


그림 6 TCSC 리액턴스의 변화 (X_c)

8. 결론

TCSC와 PSS가 동시에 사용된다면, 결합된 동적 특성을 해석하여야 한다. 본 논문에서는 PSS가 설치되었을 때 TCSC의 동적 특성을 해석하기 위하여 TCSC와 PSS의 결합된 선형 동적 특성을 해석하였다. 제어 입력으로는 부가 여자 제어기와 TCSC의 부가 리액턴스가 이용되었다. 저주파 진동 현상을 억제하기 위하여 이산 LQG 제어기가 사용되었다. 본 논문에서 제시된 방법에 의해서 저주파 진동 현상이 효과적으로 억제됨을 알 수 있다.

Reference

- [1] Yao-Nan Yu, *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, 1983
- [2] K.P. deMello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1969, pp. 316-329
- [3] K.M. Son, J.K. Park et. al, "The Effect of Thyristor Controlled Series Compensation to the Power System Stability", *ICEE*, 1995 pp. 41-44
- [4] John J. Paserba, Einar V. Larsen, "A Stability Model for Thyristor Controlled Series Compensator", *EPRI FACTS conference*, Boston Massachusetts, May 18-20, 1992, 2.8-1~2.8-6
- [5] F.L.Lewis, *Applied Optimal Control and Estimation*, Prentice-Hall, 1992
- [6] B.Shahian, M.Hassul, *Control System Design using MATLAB*, Prentice-Hall, 1993