

유연송전시스템(FACTS)에서의 SSR 억제를 위한 강인한 TCSC 보조 제어기의 설계

서 장철* 김 태현 문 승일 박 중근
서울대학교 공과대학 전기공학부

Design of a Robust TCSC Supplementary Controller to Suppress SSR in FACTS

Jang-Cheol Seo* Tae-Hyun Kim Seung-ill Moon Jong-Keun Park
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper presents an LQG based robust TCSC supplementary controller design to suppress the SSR in the FACTS. This controller is designed to have the robust stability against the plant model uncertainty. The robust stability is guaranteed using the μ analysis. Time domain simulations using a nonlinear system model show that the proposed TCSC supplementary controller can suppress the SSR efficiently against the plant model uncertainty.

1. 서 론

송전선에 직렬로 투입된 커패시터는 터빈과 발전기의 축을 파괴하는 결과를 낳을 수 있는 SSR (Subsynchronous Resonance)을 초래할 우려가 있다. 따라서 전력 시스템에서 직렬 커패시터 보상법을 사용할 때는 SSR의 영향에 대한 분석과 그 대비책이 반드시 필요하다.

최근 디지털 컴퓨터, 통신, 전력 전자 기술의 급속한 발전에 따라 송전선의 임피던스를 가변할 수 있는 유연 송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission Systems)이 고정 보상된 송전 시스템의 대안으로 제시되고 있다. 이러한 유연송전시스템의 설비중 하나인 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator)는 일종의 가변형 직렬 커패시터로 송전선의 조류를 실시간으로 제어할 수 있는 능력을 가지고 있다. 따라서 TCSC를 적절히 제어하여 SSR을 억제하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

본 논문에서는 SSR을 효과적으로 억제하기 위한 TCSC 보조 제어기의 설계 방법을 제안한다. 제어기 설계에는 최적추정 및 최적제어 이론에 기반을 둔 LQG 제어방법을 사용하였다[2].

전력 계통을 구성하는 동기발전기, 터빈, 여자시스템, 송전선로 등의 파라미터들은 그 정확한 값을 알기 힘들다. 따라서 제어기 설계시 사용하는 파라미터들은 항상 실제 값과 어느 정도의 오차를 가지기 마련이다. 최근 들어 각광받고 있는 μ 분석법(structured singular value(μ) analysis)은 제어하고자 하는 모델에 이와 같은 불확실성이 있을 때, 설계된 제어기가 강인한 안정도(robust stability)를 가지는 지 여부를 판단할 수 있는 효과적인 방법이다[3]. 본 논문에서는 설계된 LQG 기반 TCSC 보조 제어기가 모델의 불확실성에 대하여 강인한 안정도 성질을 가질 수 있도록, μ 분석법을 이용하여 그 설계 변수를 설정하였다.

제안된 TCSC 보조 제어기의 성능을 검증하기 위해 IEEE SSR Working Group에 의해 제안된 IEEE second benchmark, System-1 모델[4]을 사용하였다. 이때 원 모델의 직렬 커패시터를 TCSC로 대체하였다. TCSC의 모델은 기존의 저주파 진동 해석을 위해 제안된 간략 모델이 아닌 SSR 현상 분석을 위해 제안된 상세 모델을 채용하였다.

모델 불확실성을 가지는 비선형 시스템을 이용한 시간영역 시뮬레이션을 통해 제안된 TCSC 보조 제어기가 모델 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 전력 계통 모델

본 논문에서는 SSR을 분석하고 이를 효과적으로 억제하는 제어 방식의 개발을 위해 IEEE second benchmark, System-1을 약간 변형한 상세 모델을 사용하였다[4]. 변형된 전력 계통 모델은 그림 1에서 볼 수 있듯이 한쪽 송전선에 TCSC가 장착된 두 병렬 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 증기 터빈과 발전기로 구성되어 있다.

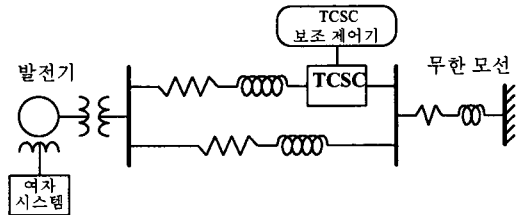


그림 1. 변형된 IEEE second benchmark, System-1 모델

2.2 여자 시스템 모델

단자 전압과 전력 동요를 억제하기 위해 본 논문에서는 그림 1에서 볼 수 있듯이 여자 시스템을 사용하였고, 그 모델로 IEEE Type-1 여자 시스템[5]을 채용하였다. 이 여자 시스템은 DC 회전기에 기반을 두고 있는 모델로, IEEE second benchmark, System-1 모델의 터빈-축 시스템에 잘 부합할 뿐만 아니라, 그동안 여러 연구를 통해 그 성능이 검증되어 왔다[5].

2.3 TCSC 모델

본 논문에서 채용한 TCSC 모델은 제어기 설계를 위해 필요한 선형 모델과 비선형 시간 영역 시뮬레이션을 위해 필요한 비선형 스위칭 모델 등 두 가지이다.

먼저 제어기 설계를 위해 필요한 TCSC 선형 모델은 기존의 저주파 진동 해석을 위한 간략 모델이 아닌 SSR 해석을 위해 제안된 상세 모델이다[6]. 이 상세 모델은 싸이리스터 스위칭과 선로 전류 변화가 커패시터 양단 전압에 미치는 영향을 정확히 예측할 수 있는 모델로 0Hz부터 120Hz까지의 주파수 대역에서 유효하다[6]. SSR 현상은 60Hz 이하의 주파수 대역에서 발생하므로, 이 상세 모델을 SSR 해석에 채용하는 것은 합당하다. 그림 2는 본 논문에서 사용된 TCSC 상세 모델을 이용한 TCSC 해석의 개념도이다.

아래 그림에서 볼 수 있듯이 TCSC 상세 모델은 지금 순간에서의 커패시터 양단 전압, 선로 전류 및 점호 시각을 입력으로 받아 반주기 후의 커패시터 양단 전압을 출력하는 모델이다.

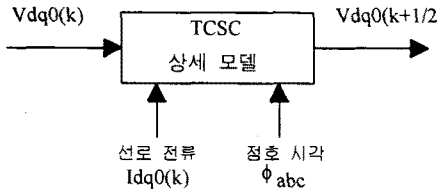


그림 2. 상세 모델을 이용한 TCSC 해석의 개념도.

위 그림의 이산시간 모델을 연속시간 모델로 변환한 TCSC 상세 모델의 최종 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta \dot{V}_{dq0}(t) = A\Delta V_{dq0}(t) + B\Delta I_{dq0}(t) + E\Delta\phi_{abc} \quad (1)$$

비선형 시간 영역 시뮬레이션을 위해 필요한 비선형 스위칭 모델은 개폐 함수 $S(t)$ 를 이용하여 싸이리스터를 on할 경우와 off할 경우를 표현하는 모델이다[7]. 이 경우 단상 TCSC의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{TC} \\ \dot{I}_{TC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{S(t)}{C} \\ \frac{S(t)}{L_i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{TC} \\ I_{TC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix} l \quad (2)$$

위 식에서 V_{TC} 는 싸이리스터 양단 전압, I_{TC} 는 싸이리스터에 흐르는 전류, l 는 선로 전류, C 는 직렬 커패시터, L_i 는 병렬 리액터이다. 그리고 개폐 함수 $S(t)$ 는 점호 시각 ϕ_{abc} 에 의해 결정된다.

2.4 제어기 설계

2.4.1 Linear Quadratic Gaussian 제어기 설계

본 논문에서는 SSR 제어를 위한 TCSC 보조 제어기 설계에 LQG 제어 기법을 사용하였다.

LQG 제어기는 시스템의 측정된 출력 값으로부터 Kalman 필터를 이용하여 시스템의 모든 상태변수를 추정한 후, 추정된 상태변수를 이용하여 제어기를 구성한다. 따라서 폐루프(closed-loop) 시스템의 안정도를 보장하는 LQR(Linear Quadratic Regulator)의 장점과 상태변수들의 안정된 추정을 제공하는 Kalman 필터의 장점을 모두 이용할 수 있다[2].

LQG 제어기는 제어기 구성에 있어 실제의 상태변수가 아닌, 추정된 상태변수를 이용한다. 따라서 LQG 제어기는 모든 상태변수를 측정할 필요 없이 현실적으로 측정 가능한 출력만을 이용하여 시스템의 상태변수를 추정한 후, 추정된 상태변수를 이용하여 제어기를 설계하므로 실제통에서의 구현이 용이하다.

본 논문에서는 측정 가능한 출력으로 싸이리스터 양단 전압, 즉 TCSC 전압을 잡았다.

2.4.2 모델의 불확실성 표현

모델의 불확실성을 표현하는 방법은 모델 파라미터의 불확실성을 표현하는 파라미터 불확실성(parametric uncertainty) 표현법과 고주파 영역에서 모델링되지 않은 시스템의 동특성을 표현하는 모델링되지 않은 동특성(unmodeled dynamics) 표현법 등이 있다[3].

파라미터 불확실성 표현법에서는 상태변수 모델에서의 선형 불확실성을 다음과 같이 표현한다.

모델 불확실성을 갖는 상태변수 모델이 다음과 같다고 가정하자[3].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^m \delta_i \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 A_0, B_0, C_0, D_0 는 공칭(nominal) 모델의 행렬이고, $\delta_i, A_i, B_i, C_i, D_i$ 는 각각 실제 모델과 공칭 모델간의 차이를 나타내는 변수 및 행렬이다.

식 (3)에서 $\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \in R^{(n+n_s) \times (n+n_s)}$ 의 rank를 r_i 라고 가정하면 이 행렬은 특이값 분리(singular value decomposition)를 이용하여 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i \\ F_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_i & H_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

단, $\begin{bmatrix} E_i \\ F_i \end{bmatrix} \in R^{(n+n_s) \times r_i}$, $\begin{bmatrix} G_i & H_i \end{bmatrix} \in R^{r_i \times (n+n_s)}$.

분리된 행렬을 이용하여 가상의 입력과 출력을 가지는 새로운 선형 시스템 G_{ss} 를 정의할 수 있다[3].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \\ z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 & E_1 & \cdots & E_m \\ C_0 & D_0 & F_1 & \cdots & F_m \\ G_1 & H_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_m & H_m & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \\ \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

본 논문에서는 전력 계통의 여러 파라미터 중 터빈-축 관련 파라미터가 전기적인 파라미터에 비해 SSR에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 더 많은 불확실성이 존재한다는 기존의 연구 결과를 이용하여[8], 터빈-축 관련 파라미터에는 15%의 오차를, 전기적인 파라미터에는 10%의 오차를 가정하여 식 (3)를 구성하고, 특이값 분리 결과를 이용하여 식 (5)과 같은 새로운 선형 시스템 G_{ss} 를 구성하였다.

제어기 구성을 위해 사용되는 시스템의 모델들은 대부분 관심 있는 주파수 영역 근처에서만 모델링되기 때문에 고주파 영역에서는 모델링되지 않은 동특성이 있기 마련이다. 모델링되지 않은 동특성 표현법에서는 이러한 불확실성을 다음 그림과 같은 곱셈형 오차 모델(multiplicative uncertainty model)을 이용하여 표현하는 것이 일반적이다[3].

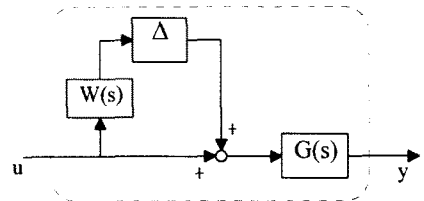


그림 3. 곱셈형 오차 모델.

그림 3에서 $W(s)$ 는 오차 가중 함수를 의미하며, 본 논문에서는 오차 가중 함수 $W(s)$ 를 아래 식 (6)처럼 저주파 영역에서는 약 10%의 오차를 갖고, 고주파 영역인 1600 Hz (10000 rad/sec) 이상에서는 100%의 오차를 갖도록 선정하였다.

$$W(s) = \frac{1.5(s+800)}{s+12000} \quad (6)$$

본 논문에서 사용한 파라미터 불확실성과 모델링되지 않은 동특성 모두를 가진 시스템 G_{mix} 의 블록선도는 다음과 같다.

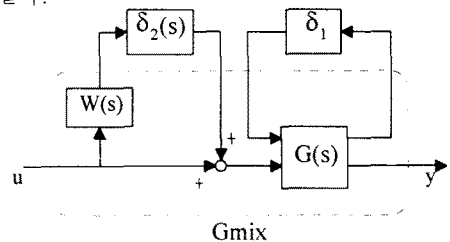


그림 4. 혼합된 불확실성을 가진 시스템.

2.4.3. μ 분석법을 이용한 강인한 안정도 분석

μ 분석법은 모델 불확실성이 주어졌을 때 폐환 (feedback) 형태로 반영된 구조화된 불확실성 (structured uncertainty)에 대한 시스템의 강인성을 분석할 수 있는 효과적인 방법이다(3).

아래 그림 5의 (a)처럼 모델 불확실성을 가진 시스템에 폐환 제어기 K 가 연결되어 있을 때, G_{mix} 와 폐환 제어기 K 를 함께 묶어 그림 5의 (b)와 같은 새로운 시스템 $M(s)$ 를 구성한다.

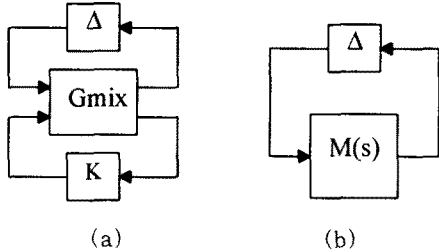


그림 5. 일반적인 형태로의 변환.

만약 $\|M\|_{\infty} < \frac{1}{\beta}$ 라고 할 때 강인한 안정도 조건은 다음과 같다(3).

$$\sup_{\omega \in R} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) \leq \beta \quad (7)$$

즉 G_{mix} 와 폐환 제어기 K 를 함께 묶어 구성한 새로운 시스템 $M(s)$ 가 식 (7)의 강인한 안정도 조건을 만족시키면, $\|M\|_{\infty} < \frac{1}{\beta}$ 를 만족시키는 모든 불확실성에 대해 시스템은 안정하게 된다.

본 논문에서는 2.4.2에서 상술한 바와 같이 모델 불확실성을 모델링하고 $\|M\|_{\infty} = 1$ 로 가정한 후, 폐환 제어기 K 인 LQG 기반 TCSC 보조 제어기가 식 (7)의 강인한 안정도 조건을 만족시키도록 설계 파라미터를 선정하였다.

2.5 모의 실험 결과

제안된 LQG 기반 TCSC 보조 제어기가 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하기 위해 비선형 시스템을 이용한 시간영역 시뮬레이션을 수행하였다. 송전선로의 직렬 커패시터 보상률은 55%를 가정하였고, 외란으로는 저압 터빈의 토크가 3주기 동안 10% 증가하는 것으로 상정하였다. 제어기 설계시 사용되는 파라미터들의 불확실성을 반영하기 위해, 터빈-축 관련 파라미터에는 15%의 오차, 전기적인 파라미터에는 10%의 오차를 가정하여 TCSC 보조 제어기를 설계하였다.

그림 6과 그림 7은 본 연구에서 사용된 전력 계통 모델의 세 축 중 가장 큰 흔들림을 보이는 발전기와 저압 터빈 사이 축 토크의 흔들림을 나타낸다. 그림 6은 모델 불확실성을 가진 실제 시스템에 강인한 안정도 조건을 만족시키지 않는 TCSC 보조 제어기를 부착시켰을 경우 시스템의 모델 불확실성에 의해 제어기가 제대로 작동하지 않음을 보여 준다. 반면에 그림 7은 식 (7)의 강인한 안정도 조건을 만족시키도록 설계된 LQG 기반 TCSC 보조 제어기는 상정된 모델 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여 준다. 이로부터 TCSC 보조 제어기 설계시 대상 시스템의 모델 불확실성을 고려하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 LQG 제어 방식을 이용하여 SSR을 제어하기 위한 TCSC 보조 제어기의 설계 방법을 제안하였

다. 제어 대상 시스템으로는 변형된 IEEE second benchmark, System-1 모델을 사용하였는데, TCSC 보조 제어기 설계시 μ 분석법을 이용하여 제어 대상 시스템의 모델 불확실성에도 불구하고 강인한 제어가 되도록 LQG 기반 TCSC 보조 제어기의 설계 변수를 선정하였다.

모델의 불확실성을 가지는 비선형 전력 계통의 시간영역 시뮬레이션을 통해 제안된 TCSC 보조 제어기가 모델의 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다

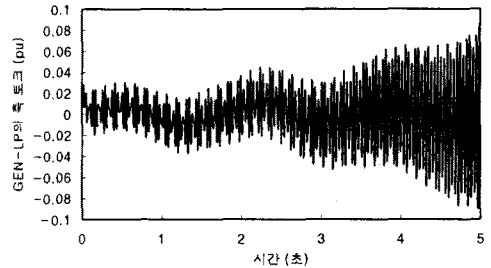


그림 6. 강인한 안정도를 갖지 않는 TCSC 보조 제어기 부착시 축 토크의 흔들림.

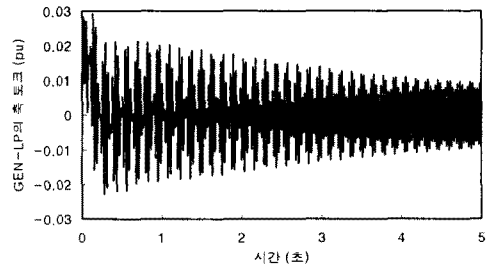


그림 7. 강인한 안정도를 갖는 TCSC 보조 제어기 부착시 축 토크의 흔들림.

(참 고 문 헌)

- [1] R.J.Piwko, C.A.Wegner, S.J.Kinney, J.D.Eden, "SSR Performance Tests of the Slatt TCSC", *IEEE Trans. on Power Delivery*, No.2, pp.1112-1119, April 1996.
- [2] F.L.Lewis, *Applied Optimal Control and Estimation*, Prentice-Hall, New Jersey, 1992.
- [3] K.Zhou, J.C.Doyle and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [4] IEEE SSR Working Group, "Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, No.5, pp.1057-1066, May 1985.
- [5] P.M.Anderson, A.A.Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, New York, 1994.
- [6] H.A.Othman, L.Angquist, "Analytical Modeling of TCSC for SSR Studies", *IEEE 95 WM 171-9 PWRs*
- [7] H.G.Han, J.K.Park, B.H.Lee, "Analysis of Thyristor Controlled Series Compensator Dynamics Using the State Variable Approach of a Periodic System Model", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.12, No.4, October 1997
- [8] J.C.Seo, T.H.Kim, J.K.Park, S.I.Moon, "An LQG Based PSS Design for Controlling the SSR in Power Systems with Series-Compensated Lines", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.11, No.2, pp.423-428, June 1996.