

전력시스템의 안정도 향상을 위한 STATCOM과 SSSC의 강인 제어

이동희, 최광윤, 이병하
인천대학교 전기공학과

A Study on the Robust Control of STATCOM and SSSC for Improving the Power System Stability

* Dong-Hee Lee, Kwang-Youn Choi, Byung-Ha Lee
Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon.

Abstract - A H_∞ controller is applied in order to control STATCOM and SSSC effectively under the circumstances where there exist some disturbances, modeling errors and noises. A one-machine infinite-bus power system is used as an analysis system. It is shown that the H_∞ controllers of STATCOM and SSSC provide robust control performances to the power system with some disturbances and noises.

1. 서 론

지속적인 경제성장으로 전력부하는 급속히 증가하고 있는 반면, 새로운 발전, 송변전설비를 건설하는 일은 점차 어려워져 가고있어, 동일한 송전선로 확보공간을 보다 효율적으로 사용하여 전력전송과 계통안정화를 극대화하기 위한 노력이 더욱 필요하게 되고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 노력의 일환으로 전력용 반도체 스위칭 소자 개발의 진전을 바탕으로 한 전압, 유·무효전력을 연속, 고속으로 효율적으로 제어하는 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기들에 대한 연구가 선진국을 중심으로 국내외에서 활발히 연구 중에 있으며[1]-[3], 그 중에서 대표적인 기기로 STATCOM(Static Synchronous Compensator)과 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)를 들 수 있다. STATCOM과 SSSC는 스위칭 회로에 재래식 싸이리스터 대신에 GTO(Gate Turn Off) 싸이리스터를 사용한다. STATCOM은 3상 전압원 인버터와 에너지 저장용 직류 커패시터 그리고 제어회로로 구성되어있으며, 진상 무효전력에서 지상 무효전력까지 무효전력의 세밀한 연속 제어가 가능하고, 응답특성이 빨라 계통의 과도 안정도 향상에 기여할 수 있어 송전용량의 더 큰 증대가 가능하다. SSSC는 정지형 동기 직렬 보상기로서 STATCOM과 유사한 구조를 갖고 선로와 직렬로 동작하는데, 전압원 인버터, 직류커패시터, 주입변압기, 제어 및 펄스 발생회로로 구성된다. 선로의 리액턴스를 연속적으로 신속하게 조절하여 전송용량을 증대시키고 과도안정도도 개선시킬 수 있다. 이러한 기기들에 대한 제어기의 설계에 대한 연구는 아직 정립되어 있지는 못하고, 이 기기들의 모델링도 확정적인 것은 아니다. 전력용 반도체 소자의 복잡한 동작특성이 포함되어 있으

므로 모델링의 오차가 상당히 클 소지가 내포되어 있으며, 노이즈와 외란의 영향도 비교적 크다고 할 수 있다. 본 논문에서는 이런 점들을 고려하여, H_∞ 제어 기법을 사용하여 STATCOM과 SSSC의 제어기를 설계함으로써, 모델링의 오차와 외란이 존재하는 경우에도 강인한 특성을 유지하는 제어기를 구성한다. 1기 무한대 모선에 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 효과를 분석한다.

2. H_∞ 제어기 설계

2.1. H_∞ 제어기의 정식화

H_∞ 제어 이론은 플랜트의 불확실성을 섭동 모델로 표현하고 특정한 조건을 만족하는 모든 섭동에 대하여 제어 시스템을 안정화 시키는 제어기를 구하는 것이다. H_∞ 제어 시스템을 2단자 블록 다이어그램(two-port block diagram)으로 표현하면 아래 그림과 같이 나타낼 수 있다.

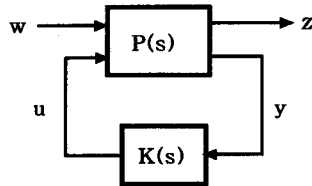


그림 1 H_∞ 제어기의 2단자 블록 다이어그램

Fig. 1 The 2-port block diagram of H_∞ control

여기서, $P(s)$ 는 제어 대상 플랜트, $K(s)$ 는 제어기를 나타내고, w 는 외부입력, z 는 제어되는 출력이다. 플랜트는 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \tag{1}$$

z, y, u 를 전달함수를 사용하여 관계식을 나타내면

$$\begin{aligned} z &= P_{zw}w + P_{zu}u \\ y &= P_{yw}w + P_{yu}u \\ u &= Ky \end{aligned} \tag{2}$$

으로 표현될 수 있다. 외부입력 w 와 제어되는 출력 z 는

$$z = T_{zw}w \quad (3)$$

$$\text{여기서, } T_{zw} = P_{zw} + P_{zu}K(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw} \quad (4)$$

이다.

H_∞ 제어 문제는 위의 페루프 전달함수의 $\|T_{zw}\|_\infty$ 을 최소화하는 내부적으로 안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것이다. 일반적인 H_∞ 제어 문제는 아래의 조건을 만족하는 것이 요구된다.

- 1) (A, B_2) 는 안정가능하고, (C_2, A) 는 검출가능하다.
- 2) $D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$, $D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}$ 으로 표현가능하다.
- 3) $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$ 와 $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix}$ 는 Full rank를 가진다.

2.2 전력시스템 모델과 확대 플랜트

본 논문에서는 소신호 안정도 관점에서 STATCOM과 SSSC의 H_∞ 제어기를 설계하고, 1기 무한대 모선에 적용한다. 안정도 분석에서 중요한 역할을 하는 동기발전기의 모델은 선형화 모델을 사용하고, STATCOM과 SSSC의 모델은 아래와 같이 아주 간결한 하나의 시 지연요소를 포함하는 모델로 근사화하여 적용한다.

○ STATCOM 방정식

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{STAT} = -\frac{1}{T_{ST}} \Delta X_{STAT} + \frac{K_{ST}}{T_{ST}} \Delta S_{STAT} \quad (5)$$

○ SSSC 방정식

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{SSSC} = -\frac{1}{T_{SSSC}} \Delta X_{SSSC} - \frac{K_{SC}}{T_{SSSC}} \Delta S_{SSSC} \quad (6)$$

여기서 X_{STAT} 과 X_{SSSC} 는 각기 STATCOM과 SSSC의 새로운 상태변수로서 STATCOM의 전류와 SSSC의 직렬주입전압의 크기를 나타내고, S_{STAT} 과 S_{SSSC} 는 제어기에 의해 제어되는 보조신호, T_{ST} 와 T_{SSSC} 는 시정수를, Δ 는 선형화한 변동분을 나타낸다. STATCOM은 모선 전압을 원하는 값으로 유지되도록 제어하고, SSSC는 선로 전력의 흐름을 원하는 값으로 유지되도록 제어하는 것으로 구성하였다.

외란으로 외부 토오크의 변동이 가해지는 경우를 고려하고 원하는 값과 실제 값과의 오차를 측정하는 개소에 측정 노이즈가 들어 가는 것으로 하고, 외란과 노이즈에 대하여 효과적인 제어가 되도록 각기 외란 입력에 가중함수 W_d 와 노이즈 입력에 가중함수 W_n 을 부가하여 확대 플랜트를 구성하고, H_∞ 제어기를 $K(s)$ 로 표시하여 나타내면 그림 2와 같다.

외란 입력에 가해지는 가중함수 W_d 와 노이즈 입력에 가해지는 가중함수 W_n 은 각기 아래와 같다.

$$W_d = \frac{5s}{(s+5)(s+10)} \quad (7)$$

$$W_n = \frac{30(s+1)}{(s+10^4)} \quad (8)$$

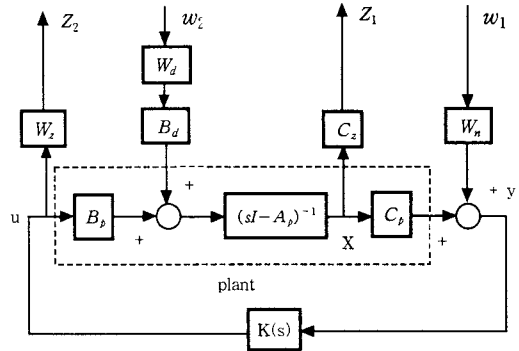


그림 2 확대 플랜트
Fig. 2 An augmented plant

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 H_∞ 제어기를 1기 무한 모선에 적용한다. STATCOM을 적용한 경우의 회로도는 아래 그림과 같으며, 여기서 v_i 는 동기발전기 모선 전압, v_j 는 무한 모선의 전압이며, Y는 부하를 나타낸다. SSSC는 발전기 모선과 무한 모선 사이에 접속되며, 동일 회로도를 적용한다.

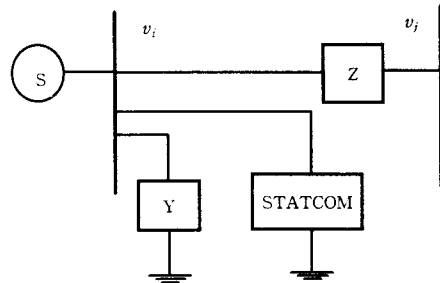


그림 3 1기 무한 모선의 전력 시스템
Fig. 3 A one-machine infinite-bus power system

발전기 시스템의 여러 상수들은 참고문헌 [8]과 같다. 정상상태의 전력시스템에서 1초부터 1초 동안 토오크 외란이 가해지는 것으로 가정하고, 시뮬레이션을 행한다. 제어기가 투입되지 않은 시스템에서 발전기 모선에서 무한 모선으로의 선로에 흐르는 전력의 흐름이 그림 4에 보여져 있는데, 심하게 동요하고 있음을 보여준다. H_∞ 제어기가 설계된 STATCOM을 설치한 경우에 선로의 전력흐름이 그림 5에 보여져 있다. 전력 흐름의 진동이 잘 제동되고 있다. H_∞ 제어기가 설계된 SSSC를 설치한 경우

에 대해서는 그림 6에 보여져 있는데, 이 것 또한 전력 흐름의 진동이 잘 제동되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

강인 제어 기법인 H_∞ 제어 이론을 적용하여 STATCOM과 SSSC의 제어기를 설계함으로써, 모델링의 오차와 외란이 존재하는 경우에도 강인한 특성을 유지하는 제어기를 구성하였다. 1기 무한대 모선과 선형화된 동기 발전기 모델에 적용하여 MATLAB 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

전력시스템의 STATCOM과 SSSC에 강인 제어인 H_∞ 제어기를 적용한 결과 외란과 노이즈가 존재하는 조건하에서 전력시스템의 동요를 효과적으로 억제하고 강인한 안정도 특성을 보여주는 것으로 나타났다.

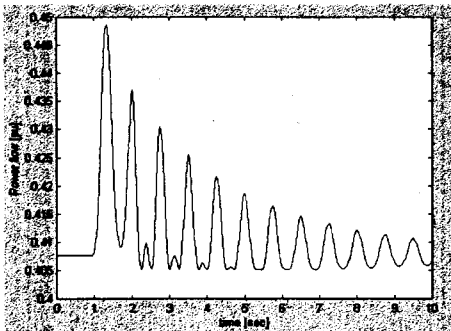


그림 4 제어기가 없는 시스템의 선로 전력흐름
Fig. 4 The line power flow of the system without a controller

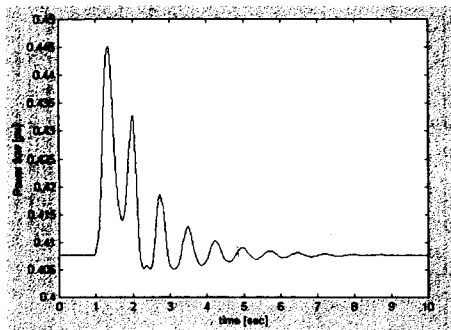


그림 5 H_∞ 제어기의 STATCOM이 설치된 시스템의 선로 전력흐름
Fig. 5 The line power flow of the system with STATCOM of a H_∞ controller

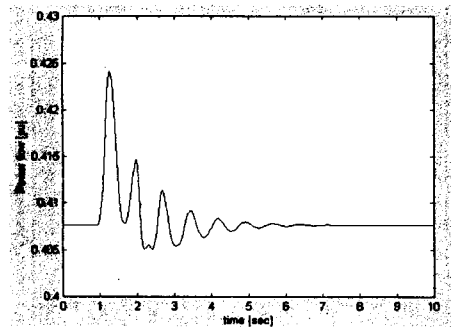


그림 6 H_∞ 제어기의 SSSC가 설치된 시스템의 선로 전력흐름
Fig. 6 The line power flow of the system with SSSC of a H_∞ controller

참 고 문 헌

- [1] M.M.Butts, R.A.Jones, J.N.Maughn, "Flexible AC Transmission System(FACTS): System studies to assess FACTS device requirements on the Southern Electric System", *EPRI Final Report*, TR-103168, Project RP-3022-14, Dec. 1993.
- [2] 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, pp.1744-1750, October 1997.
- [3] Einar V.Larsen, Daniel J.Leonard, Nicholas W.Miller, Hisham Othman, John J.Paserba, Steven T.Naumann, "Application studies for a distribution STATCON on Commonwealth Edison's Power System", *FACTS Conference 2*, EPRI TR-101784, Dec 1992.
- [4] E.J.Davison, "The robust control of a servomechanism problem for linear time invariant multivariable systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-21, pp 25-34, 1976.
- [5] S.S Ahmed, L.Chen and A. Petroianu, "Design of suboptimal H_∞ excitation controller", *IEEE Trans on Power Systems*, Vol. 11, No.1, pp. 312-318, Feb., 1996
- [6] S.S Ahmed, L.Chen and A. Petroianu, "Design of suboptimal H_∞ excitation controller", *IEEE Trans on Power Systems*, Vol. 11, No.1, pp. 312-318, Feb., 1996
- [7] Zhou,k,Doyle,J.C. and Glover,K., *Robust Optimal Control*. Prentice Hall. 1996
- [8] 이동희, 이병하, "LQG/LTR에 의한 동기발전기와 SVC의 제어기 설계", *대한전기학회 하계학술대회논문집*, 2000. 7.