1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

직렬 보상 선로에서의 SSR 억제를 위한 강인한 STATCOM 보조 제어기의 설계

서 장철* 문 승일 박 종근
서울대학교 공과대학 전기공학부

Design of a Robust STATCOM Supplementary Controller to Suppress SSR in Series-compensated Line

Jang-Cheol Seo* Seung-Il Moon Jong-Keun Park
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper presents an H_∞ based robust STATCOM supplementary controller design to suppress the SSR in series-compensated line. This controller is designed to have the robust stability against the plant model uncertainty. Time domain simulations using a nonlinear system model show that the proposed STATCOM 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 [1].

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 STATCOM(STATic synchronous COMpensator)은 일종의 교류 전압원으로 그 출력 전압의 크기와 위상을 신속하게 제어할 수 있다. 따라서 STATCOM를 적절히 제어하여 SSR을 억제하는 연구가 진행되었다 [2].

본 논문에서는 SSR을 효과적으로 억제하기 위한 STATCOM 보조 제어기의 설계 방법을 제안한다.

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. 이러한 모델의 불확실성에 대해서도 강인한 제어기를 설계하기 위해 본 논문에서는 H_∞ 제어 기법을 사용하였다 [3].

제안된 STATCOM 보조 제어기의 성능을 검증하기 위해 IEEE SSR Working Group에 의해 제안된 IEEE second benchmark, System-1 모델 [4]을 사용하였다.

모델 불확실성을 가지는 비선형 시스템을 이용한 시간영역 시뮬레이션을 통해 제안된 STATCOM 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 SSR Working Group에 의해 제안된 IEEE second benchmark, System-1 모델을 사용하였다 [4]. 이 전력 계통 모델은 그림 1에서 볼 수 있듯이 한쪽 송전선에 직렬 보상 커패시터가 장착된 두 병렬 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 증기 터빈과 발전기로 구성되어 있다.

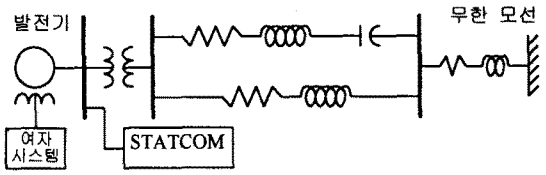

그림 1. IEEE second benchmark, System-1 모델

이 모델에서 축의 전기-기계적 진동을 표현하는 터빈-축 시스템은 여자기, 발전기 회전자, 저압 터빈 및 고압 터빈 등 4개의 mass와 이들을 연결하는 스프링으로 이루어진 spring-mass 시스템으로 구성되어 있다.

2.2 여자 시스템 모델

단자 전압과 전력 동요를 억제하기 위해 본 논문에서는 그림 1에서 볼 수 있듯이 여자 시스템을 사용하였고, 그 모델로 그림 2와 같은 IEEE Type-1 여자 시스템을 채용하였다.

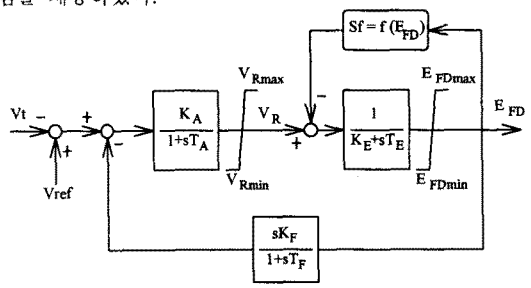

그림 2. IEEE Type-1 여자 시스템

2.3 STATCOM 모델

그림 3은 본 논문에서 채용한 STATCOM 모델의 등가 회로도이다 [5]-[6].

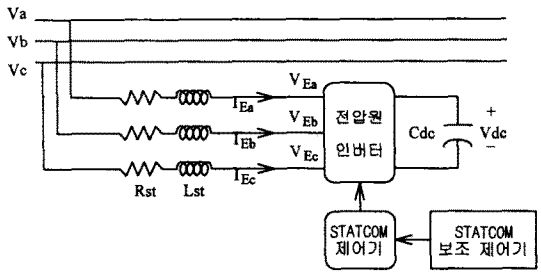

그림 3. STATCOM의 등가 회로도

그림 3에서 확인할 수 있듯이 STATCOM은 GTO를

기반으로 한 전압원 인버터와 dc 측에 연결된 커패시터로 구성된다. 이 STATCOM은 계통과 커플링 변압기를 통해 연결되는 데, 이 변압기는 누설 리액턴스 L_{st} 와 저항 r_{st} 로 표현된다. 위 그림에서 저항 R_{st} 는 커플링 변압기의 저항 r_{st} 와 전압원 인버터의 손실 r_E 를 포함한 값이다.

STATCOM 등가회로의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$x = [\, I_{ED} \;\; I_{EQ} \;\; V_{dc} \,]^T, \quad u = [\, V_D \;\; V_Q \;\; 0 \,]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{st}\omega_0}{L_{st}} & \omega_0\omega & -\frac{m_E\omega_0}{2L_{st}}\cos(\delta_E) \\ -\omega_0\omega & -\frac{R_{st}\omega_0}{L_{st}} & \frac{m_E\omega_0}{2L_{st}}\sin(\delta_E) \\ \frac{m_E}{2C_{dc}}\cos(\delta_E) & -\frac{m_E}{2C_{dc}}\sin(\delta_E) & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{L_{st}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0}{L_{st}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위 식에서 m_E 는 modulation index, $-\delta_E$ 는 동기 회전 좌표계의 D축과 STATCOM 출력 전압과의 위상 차를 의미하고, ω_0 는 120π 이다. I_{ED}, I_{EQ} 는 계통에서 STATCOM으로 흐르는 전류를 동기 회전 좌표계에서의 D, Q 축 값으로 표현한 것이고, V_D, V_Q 는 STATCOM이 연결된 버스의 전압을 동기 회전 좌표계에서의 D, Q 축 값으로 표현한 것이다. 위 식의 모든 값들은 단위 값들이다.

2.3 기존의 STATCOM 제어기

그림 3에서 볼 수 있듯이 STATCOM에는 전압원 인버터의 출력 전압의 위상 각을 조절하기 위해 STATCOM 제어기가 부착되어 있다. 그림 4는 본 논문에서 채용한 STATCOM 제어기의 개념도이다. 이 제어기는 그 동안 제작·운용되어 왔던 많은 STATCOM에서 STATCOM을 자동 전압 제어 모드로 운전할 때 사용해온 범용적인 제어기이다 [7].

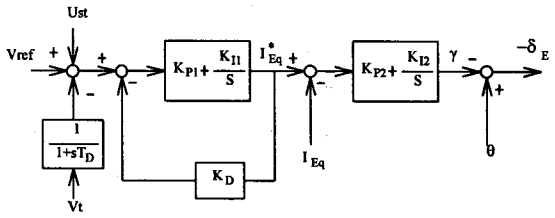

그림 4. STATCOM 제어기

위 그림에서 V_t는 단자 전압의 크기, θ 는 단자전압의 위상 각을 의미하고, γ 는 단자 전압과 전압원 인버터의 출력 전압과의 위상 차를 의미한다. U_{st}는 2.4 절에서 설계하게 되는 STATCOM 부가 제어기의 출력 신호이다.

2.4 제어기 설계

2.4.1 H_∞ 제어 이론

H_∞ 제어 이론은 여러 설계 요구 조건들을 시스템 전달함수의 H_∞ norm을 최소화시키는 수학적 최적화 문제로 변환시켜 해결하는 방법이다. 이때 H_∞ norm은 제어기 성능의 척도가 되는데, 주파수 영역에서 다음과 같이 정의된다.

$$\|P\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}[P(j\omega)] \tag{2}$$

여기서 sup은 최소 상한값(the least upper bound)을 의미하며, $\bar{\sigma}[P(j\omega)]$는 $P(j\omega)$의 최대 특이값(maximum singular value)을 의미한다.

표준 문제를 나타내는 블록선도는 다음과 같다.

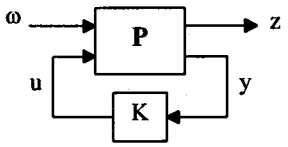

그림 5. H_∞ 표준 문제 블록선도

위 그림에서 ω 는 명령 신호, 외란, 센서 노이즈 등의 외부 입력 신호, u는 제어 입력, y는 측정된 출력, z는 제어될 출력을 의미한다. 전달함수 P는 가중 함수를 포함하는 일반화된 플랜트를, K는 제어기를 의미한다.

만약 P를 식 (3)과 같이 표현한다면, 그림 5에 의해 식 (4)의 관계식이 나오게 된다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$z = P_{11}\omega + P_{12}u$$
$$y = P_{21}\omega + P_{22}u \tag{4}$$
$$u = Ky$$

식 (4)에서 u와 y를 소거하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z &= [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}]\omega \\ &= F_L(P, K)\omega \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)는 외부 입력 변수 ω 에서 z로의 폐루프 전달함수이며, $F_L(P,K)$ 는 P와 K의 LFT(Linear Fractional Transformation) 표현이다.

여기서 H_∞ 최적화 문제는 제어기 K가 플랜트 P를 안정하게 한다는 조건하에서 w에서 z로의 전달 행렬 $F_L(P,K)$의 H_∞ norm을 최소화시키는 제어기 K를 구하는 것이다.

$$\underset{K \text{ stabilizing}}{\text{Min}} \; \|F_L(P,K)\|_\infty \tag{6}$$

그러나 좀더 실용적인 측면에서 $F_L(P,K)$의 H_∞ norm을 기준이 되는 γ 이하로 만드는 제어기 K를 구하는 H_∞ 표준 문제를 푼다.

$$\underset{K \text{ stabilizing}}{\text{Find}} \; \|F_L(P,K)\|_\infty \le \gamma \tag{7}$$

2.4.2 H_∞ 제어기 설계

H_∞ 제어 이론의 실제 적용에 있어서는 그림 6과 같이 외란의 영향과 모델 불확실성에 의한 영향을 고려한다.

그림 6이 나타내는 시스템에서 감도 함수 $S(s)$ 는 외란 d로부터 출력 y로의 전달 함수를 나타내며, S(s)의 특이값은 외란의 억제 정도를 의미한다. 전력 계통에서

의 외란은 대부분 저주파 영역에 한정되어 있으므로, 외란 d가 출력 y에 미치는 영향이 최소가 되도록 저주파 영역에서 감도 함수 S(s)의 ∞ norm을 최소화하는 제어기 K를 설계할 수 있다. 이때 외란 억제 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma}[S(j\omega)] < |W_e^{-1}(j\omega)| \quad (8)$$

여기서 $W_e^{-1}(j\omega)$는 적절한 외란 억제 요소이다.

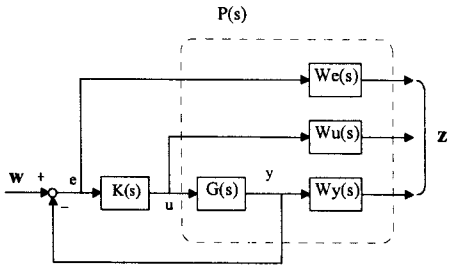

그림 6. 가중 함수를 갖는 폐루프 시스템

상보 감도 함수 $T(s)$ 는 제어 시스템의 안정도 여유, 즉 모델의 불확실성과 관련된 함수이다. 따라서 제어기 설계시 다음의 강인 안정도 조건을 만족하도록 제어기를 설계한다.

$$\bar{\sigma}[T(j\omega)] < |W_y^{-1}(j\omega)| \quad (9)$$

여기서 $W_y^{-1}(j\omega)$는 예측되는 시스템의 불확실성을 나타낸다.

그러나 실제 제어기 설계시에는 감도 함수와 상보 감도 함수가 상보 관계에 있으므로 이를 적절히 절충할 필요가 있다. 이를 혼합 감도 문제라고 하는데 그림 6과 같이 표준 보상기 형상화에 의해 H_∞ 제어기를 설계하면 다음 식 (10)과 같이 주파수 영역에서 가중된 감도 함수 S(s)와 상보감도 함수 T(s)의 H_∞ norm을 최소화하는 제어기를 설계할 수 있다.

$$\underset{K(s)}{Min} \left\| \begin{matrix} W_e(j\omega)S(j\omega) \\ W_y(j\omega)T(j\omega) \end{matrix} \right\|_\infty \quad (10)$$

2.5 모의 실험 결과

제안된 H_∞ 기반 STATCOM 제어기가 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하기 위해 비선형 시스템을 이용한 시간 영역 시뮬레이션을 수행하였다. 직렬 커패시터 보상률은 50%를 가정하였고, 외란으로는 저압 터빈의 토크가 시작후 3주기 동안 15% 증가하는 것으로 상정하였다. 제어기 설계시 사용되는 파라미터들의 불확실성을 반영하기 위해, 터빈-축 관련 파라미터에는 20%의 오차, 전기적인 파라미터에는 10%의 오차를 가정하여 STATCOM 제어기를 설계하였다.

그림 7과 그림 8은 본 연구에서 사용된 전력 계통 모델의 세 축중 가장 큰 흔들림을 보이는 발전기와 저압 터빈 사이 축 토크의 흔들림을 나타낸다. 그림 7은 STATCOM 보조 제어기가 없을 경우의 축 토크의 흔들림으로 흔들림이 계속 증폭되어 축에 손상이 갈 수 있음을 보여준다. 그림 8은 강인한 특성을 갖도록 설계된 STATCOM 보조 제어기가 상정된 모델 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여 준다.

3. 결 론

본 논문은 H_∞ 제어 방식을 이용하여 SSR을 제어하기 위한 STATCOM 보조 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 제어 대상 시스템으로는 IEEE second benchmark, System-1 모델을 사용하였는데, STATCOM 보조 제어기 설계시 제어 대상 시스템의 모델 불확실성에도 불구하고 강인한 제어기가 되도록 H_∞ 제어 기법을 사용하였다.

모델의 불확실성을 가지는 비선형 전력 계통의 시간 영역 시뮬레이션을 통해 제안된 STATCOM 보조 제어기가 모델의 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다

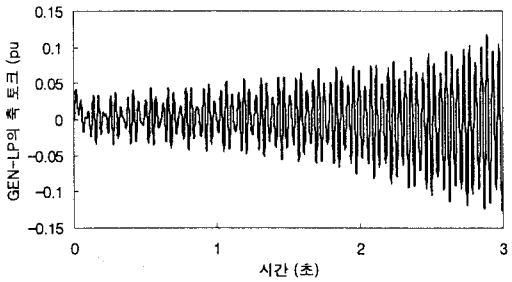

그림 7. STATCOM 보조 제어기가 없을 경우 축 토크의 흔들림.

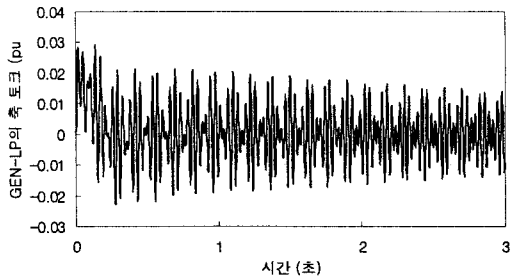

그림 8. 강인한 안정도를 갖는 STATCOM 보조 제어기 부착시 축 토크의 흔들림.

[참 고 문 헌]

[1] P.M.Anderson, B.L.Agrawal and J.E.Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, IEEE Press, New York, 1990.

[2] K.V.Patil, J.Senthil, J.Jiang, R.M.Mathur, "Application of STATCOM for Damping Torsional Oscillations in Series Compensated AC Systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.13, No.3, pp.237-243, September 1998.

[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] C.Schauder, H.Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators", *IEE Pro.-C*, Vol.140, No.4, pp.299-306, July 1993.

[6] A.Nabavi-Niaki, M.R.Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller(UPFC) for Power System Studuies", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.11, No.4, pp.1937-1943, November 1996.

[7] C. Schauder, etc., "Operation of ±100 MVAR TVA STATCON", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.12, No.4, pp.1805-1811, October 1997.