

LQG 제어방식을 이용한 직렬 커패시터 보상선로의 SSR 제어용 PSS의 설계

* 서장철*, 김태현*, 문승연**, 박종근*

* 서울대학교 전기공학부 ** 전북대학교 전기공학부

A LQG based PSS design for controlling SSR in power systems with series-compensated lines

* Jang-Cheol Seo*, Tae-Hyun Kim*, Seung-Il Moon**, Jong-Keun Park*

* Seoul National University ** Cheonbuk National University

Abstracts

This paper presents a linear quadratic gaussian(LQG) based power system stabilizer(PSS) to control subsynchronous resonance(SSR) that occurs in a series capacitor compensated power systems. The complete SSR system based on the IEEE first benchmark model is employed in this study. Eigenvalue analysis and time domain simulations using a nonlinear system model show that the proposed PSS controls SSR efficiently.

1. 서론

교류 송전 시스템에 있어서 직렬 커패시터 보상법은 부하에 많은 전력을 공급하고, 병렬 선로간의 부하 분담을 조절하며, 과도상태의 안정성을 향상시키는 경제적인 방법이다. 현재 이 직렬 커패시터 보상법은 FACTS(Flexible AC Transmission System)의 한 분야로서 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 송전선에 직렬로 투입된 커패시터는 터빈과 발전기의 축을 파괴하는 결과를 일으키는 Subsynchronous Resonance(SSR)현상을 초래할 수 있다[1-5]. 그래서 전력시스템에서 직렬 커패시터 보상법을 사용할 때는 SSR의 영향에 대한 분석과 대책이 반드시 필요하다. [3, 4].

SSR은 1937년에 처음으로 보고되었으나 1970년까지는 축의 비틀림에 의한 진동은 간과되었다. 그러나 1970년 Nevada의 Mohave Generating Station에서 두개의 축이 깨지는 사고가 발생한 후 직렬 커패시터로 보상된 선로와 증기터빈 발전소의 비틀림 상호작용에 관한 이론적 연구가 시작되어, 많은 논문이 나오기 시작했다[3-7].

SSR에 대한 대책으로써 많은 방법이 논의되어 왔지만, Power System Stabilizer(PSS)를 이용한 여자제어(excitation control)방식이 가장 경제적인 방법으로 알려져 있다[3, 8]. 이 방식은 PSS에서 excitation system에 부가적인 신호를 발생시켜 SSR을 제어하는 것으로, 75년 이래 PSS를 이용하여 SSR을 제어하는 많은 논문들이 나왔다[6, 7]. 그러나 초기 논문들의 대부분이 모든 비틀림 모드를 안정화시키는 데는 실패해왔다[9, 10].

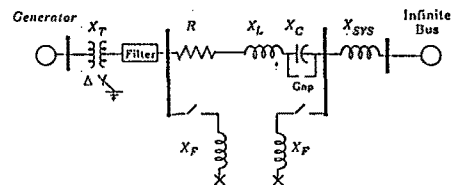
모든 비틀림 모드를 제어하기 위한 시도중 하나로, Yu 등은 상태변수 피드백을 이용한 pole assignment법을 이용하였

다[3]. 그러나 이 방식은 대부분의 상태변수들을 측정할 수 없이 비현실적이었다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 다시 Yu 등은 출력 피드백 여자제어법을 제안하였다[3, 11]. 그러나 이 방식에서 사용하고 있는 상태변수중에도 측정하기 어려운 것(torque angle δ)이 포함되어 있고 측정가능 변수를 너무 많이 상징하고 있어 현실적으로 불가능한 경우가 많다.

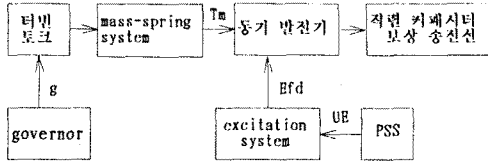
이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 최적추정 및 최적제어 이론에 기반을 둔 Linear Quadratic Gaussian(LQG) 제어방법을 사용하였다. LQG 제어시스템은 모든 상태변수를 측정할 필요없이 현실적으로 측정할 수 있는 출력만을 이용하여 시스템의 상태변수를 추정한 후, 추정된 상태변수를 이용하여 제어를 설계하므로 위 제어방식에 비해 훨씬 현실적이라 할 수 있다[12, 13].

2. Power System Model [2, 3, 14, 15, 16, 17]

직렬 커패시터 보상선로에서의 SSR 분석을 위해서는 저주파 진동(low frequency oscillation) 등과는 달리 시스템에 대한 상세한 모델링이 필수적이다[2, 3, 18]. 따라서 본 논문에서는 SSR 분석을 위해 IEEE SSR Working Group이 제안한 IEEE First Benchmark Model Network[17]을 바탕으로 한 상세 모델을 사용한다. 이 상세 모델에는 SSR 분석에 필요한 동기발전기, 직렬 커패시터 보상 송전선, excitation system, 터빈, mass-spring system, governor 등이 포함되어 있다. <그림 1>은 IEEE First Benchmark Model Network, <그림 2>는 시스템의 전체적인 블럭도이다. <그림 2>에서 볼 수 있듯이 governor에서 제어된 스프링 터빈 토크가 mass-spring system에 작용한다. 동기 발전기는 축을 통해 터빈으로부터 기계적 토크를 받고, excitation system에 의해 여자 전압을 인가받는다. 이 동기발전기는 IEEE First Benchmark Model에 상용하는 직렬 커패시터 보상 송전선에 연결되어 있다.



<그림 1> IEEE First Benchmark Model Network



〈그림 2〉 A block diagram of the complete SSR system

상세모델은 27차 미분방정식으로 표시되고, 그 상태변수들은 아래와 같다.

$$x = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6; T_{M1}, T_{M2}, T_{M3}; a, g; i_{ds}, i_{fd}, i_{1d}, i_{qs}, i_{1q}, i_{1q}; v_{cd}, v_{cq}; V_R, E_{fd}]^T$$

여기서 $\omega_1 \sim \omega_6$ 는 각 mass의 각속도, $\delta_1 \sim \delta_6$ 는 각 mass의 각변위(angular displacement), $T_{M1} \sim T_{M3}$ 는 디빈 토크, v_{cd}, v_{cq} 는 적편 커패시터에 걸리는 전압이다. 또 a, g 는 governor, $i_{ds} \sim i_{1q}$ 는 동기발전기, V_R, E_{fd} 는 excitation system에서 나오는 상태변수들이다.

그리고 시스템의 출력으로는 회전자의 속도(ω_5)와 고정자의 전류(I_t)로 잡았다.

$$y = [\omega_5, I_t]^T$$

3. 제어기 설계 [3.12,13]

선형화된 시스템의 상태방정식이 다음과 같이 주어지면,

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

performance index는 아래와 같이 설정할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Qx + u^T Ru] dt$$

이때 최적 feedback control law는 다음과 같다[3.12].

$$u = -Kx, \quad K = R^{-1}B^T P$$

여기서 P 는 아래 algebraic Riccati equation의 해이다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0$$

4. Kalman filter를 이용한 상태추정기 설계 [12,13]

상태추정기 설계를 위해 고려해야할 시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + \xi$$

$$y = C\hat{x} + \theta$$

여기서 외란백터 ξ 는 강도 ε , 센서잡음백터 θ 는 강도 θ 인 white noise이다.

그러면 상태추정기의 동역학(dynamics)은

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

이 된다. 여기서 \hat{x} 는 추정된 상태변수이다.

이 상태추정기의 동역학은 H 에 의해 지배되는 데, 이 H 는 아래의 Riccati equation의 해로부터 구해진다.

$$AG + GA^T + \varepsilon - GC^T \theta^{-1} CG = 0,$$

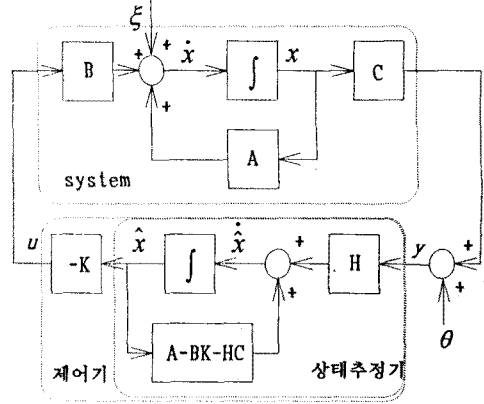
$$H = GC^T \theta^{-1}$$

전국 시스템에 들어가는 제어신호는 다음과 같이 결정된다.

$$u = -K\hat{x}$$

위의 제어기와 상태추정기를 결합한 것이 LQG 제어기이다.

〈그림 3〉은 시스템, 제어기, 상태추정기의 개형을 보여준다.



〈그림 3〉 시스템, 제어기, 상태추정기의 개형도

5. 고유치(Eigenvalue) 분석

SSR을 분석하는 유용한 방법중 하나인 고유치 분석법은 시스템의 진동주파수와 그 주파수에서의 감쇄정도에 대한 정보를 준다[2,3].

위의 power system을 상태변수의 초기값 근처에서 선형화한 후, 고유치 분석을 통해 구해진 축의 비틀림 모드는 아래 표와 같다.

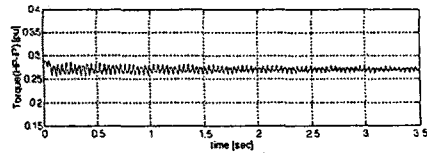
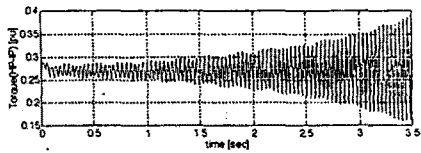
	without the PSS	with the PSS
모드 5	$-3.4 \times 10^{-7} \pm j298.18$	$-0.0002 \pm j298.18$
모드 4	$0.4884 \pm j203.40$	$-1.2494 \pm j203.07$
모드 3	$0.0169 \pm j160.67$	$-0.1693 \pm j160.64$
모드 2	$0.0019 \pm j127.03$	$-0.0827 \pm j127.01$
모드 1	$0.0089 \pm j99.17$	$-0.3561 \pm j98.97$
모드 0	$0.1431 \pm j8.40$	$-2.8530 \pm j2.0012$

위 표에서 PSS가 없을 때에는 고유치 10개의 실수 부분이 양수이므로 negative damping 현상이 발생하여 시스템이 불안정하지만, 제약된 PSS를 부착했을 경우에는 모두 음수가 되어 시스템이 안정화됨을 알 수 있다.

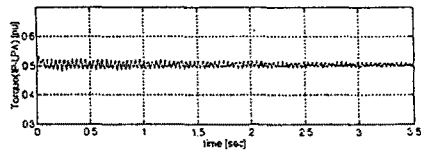
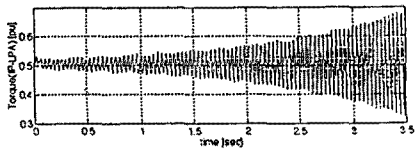
6. 시간 영역 simulation

제약된 PSS의 성능을 확인하기 위해 비선형 시스템을 이용한 시간 영역 simulation을 행하였다. 이 비선형 시스템은 excitation system의 ceiling, PSS에 부착된 limiter 등의 비선형을 포함하고 있다. 외란으로는 입력 토크가 4 cycle동안 5% 증가하는 경우를 상정하였다.

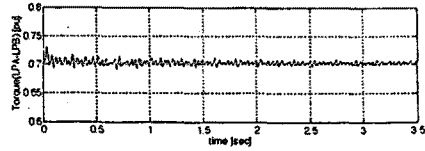
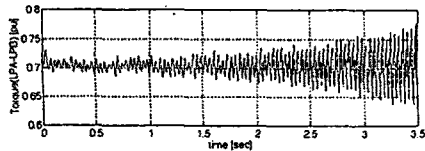
〈그림 4〉부터 〈그림 7〉은 PSS가 없을 경우와 제약된 PSS가 부착되었을 경우의 각 축의 흔들림을 나타낸 것이다. PSS가 없을 경우에는 흔들림이 증가하고 있음에 반해, PSS가 부착되어 있을 경우에는 SSR이 효과적으로 제어되고 있다.



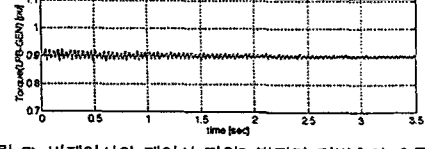
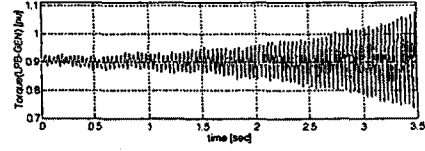
〈그림 4〉 비제어시와 제어시 고압-중압 터빈축의 흔들림



〈그림 5〉 비제어시와 제어시 중압-저압 터빈축의 흔들림



〈그림 6〉 비제어시와 제어시 저압-발전기 터빈축의 흔들림



〈그림 7〉 비제어시와 제어시 저압-발전기 터빈축의 흔들림

7. 결론

본 논문에서는 최적추정 및 최적제어 이론에 기반을 둔 Linear Quadratic Gaussian(LQG) 제어방법을 사용하여 직렬 커패시터 보상선로에서의 SSR 제어를 위한 PSS를 설계하였다. 사용한 power system은 IEEE First Benchmark Model을 바탕으로 한 상세모델이다.

제어된 PSS는 발전기의 회전자 속도와 고정자 전류를 측정하여 상태추정기를 통해 시스템의 상태변수를 추정한 후, 추정된 상태변수를 이용하여 제어를 설계하므로 Yu 등의 제어방식에 비해 훨씬 현실적이다. 고유치 분석과 시간 영역 simulation을 통해 제안된 PSS가 SSR을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] IEEE SSR Working Group, "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations", IEEE Trans. PAS, NO.6, pp.1326-1334, June 1985
- [2] P. M. Anderson, B. L. Agrawal and J. E. Van Ness, **Subsynchronous Resonance in Power Systems**, IEEE Press, 1990
- [3] Y. N. Yu, **Electric Power System Dynamics**, Academic Press, 1983
- [4] IEEE Committee Report, "Reader's guide to subsynchronous resonance", IEEE Trans. PWS, NO.1, Feb. 1992
- [5] D. N. Walker, C. E. J. Bowler, R. L. Jackson and D. A. Hodges, "Results of subsynchronous resonance test at Mohave", IEEE Trans. PAS, No. 5, pp.1878-1889, Sept/Oct 1975
- [6] IEEE Committee Report, "Second supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems", IEEE Trans. PAS, No.2, pp.321-327, Feb. 1985
- [7] IEEE Committee Report, "Third supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems", IEEE Trans. PWS, No.2, pp.830-834, May 1991
- [8] IEEE SSR Working Group, "Countermeasures to subsynchronous resonance problems", IEEE Trans. PAS, No.5, pp.1810-1818, Sept/Oct 1980
- [9] A. A. Fouad and K. T. Khu, "Damping of torsional oscillations in power systems with series-compensated lines", IEEE Trans. PAS, NO.3, pp.744-753, May/June 1978
- [10] Li Wang and Y. Y. Hsu, "Damping of subsynchronous resonance using excitation controllers and static var compensators: A comparative study", IEEE EC, No.1, pp. 6-13, March 1988
- [11] A. Yan and Y. N. Yu, "Multi-mode stabilization of torsional oscillation using output feedback excitation control", IEEE Trans. PAS, No.5, pp.1245-1253, May 1982
- [12] 김 종식, 선형 제어시스템 공학, 淸文閣, 1988
- [13] F. L. Lewis, **Applied Optimal Control and Estimation**, Prentice-Hall, 1992
- [14] P. M. Anderson, A. A. Fouad, **Power System Control and Stability**, IEEE Press, 1977
- [15] P. C. Krause, **Analysis of Electric Machinery**, McGraw-Hill, 1987
- [16] A. R. Bergen, **Power Systems Analysis**, Prentice-Hall, 1986
- [17] IEEE SSR Working Group, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Trans. PAS, No.5, pp.1565-1572, Sept/Oct 1977
- [18] T. J. Hammons, "Shaft torsional phenomena in governing large turbine-generators with non-linear stream valve stroking constraints", IEEE Trans. PAS, No. 3, pp.1013-1022, March 1981