

LQG/LTR에 의한 동기발전기와 SVC의 제어기 설계

° 이동희, 이병하  
인천대학교 전기공학과

Design of the Synchronous generator and SVC controller Using LQG/LTR

° Dong-Hee Lee, Byung-Ha Lee  
Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon.

**Abstract** - This paper presents a LQG/LTR method for controlling the PSS and SVC effectively. A one-machine infinite-bus power system is used as an analysis system, where PSS is installed at the synchronous generator and SVC at the generator bus as a parallel compensation device.

The simulation results show that the LQG/LTR controller of PSS and SVC improves the power system stability effectively.

1. 서 론

전력 시스템이 복잡해지고 대용량화 되어감에 따라 안정도가 더욱 중요해지고 정밀한 제어가 요구되어 발전계통의 안정적 운영을 위한 전력계통안정기(PSS) 및 동기발전기에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. 전력계통 내에 존재하는 부하나 발전기 및 각종 선로의 상수들이 변동하거나 지락사고, 단선사고와 같은 각종 사고가 발생하였을 때 발전기의 기계적인 제동 토크의 부족으로 인하여 저주파 진동이 발생하게 되는데, 이러한 진동을 억제하기 위하여 사용되는 장치가 전력계통안정기이다. 또한, SVC(Static Var Compensator)는 병렬보상설비로써 가장 널리 활용되고 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System) 설비 중의 하나로 안정도 목적으로도 적용되고 있고, 일부는 전력 동요의 제동을 강화시키는 PSS와 유사한 보조 안정화 제어를 위해 적용되고 있다.

본 논문에서는 전력시스템의 저주파 동요를 억제하기 위하여 PSS와 SVC를 적용하고, 보상된 시스템의 루프 전달 함수 행렬의 특이값을 설계사양을 만족시키고 있는 목표필터루프의 전달함수 행렬의 특이값 형상으로 회복시킴으로써 다변수 제어 시스템 설계를 조직적으로 할 수 있는 LQG/LTR 제어기법을 도입한다. 분석계통으로는 1기 무한모선 계통을 사용하여 저주파 진동 억제라는 본래의 목적 이외에도 각종 고장이나 외란, 측정 잡음 등에도 효과적으로 동작 할 수 있는 전력계통안정기를 설계한다.

2. 저주파 진동연구를 위한 전력시스템 모델

선형화한 동기발전기의 전달함수 블록 다이어그램은 앞부분의 기계적인 루프와 뒷부분의 전기적인 루프로 구성된다. 기계적인 루프의 입력은 증분 토크로

$(\Delta T_m - \Delta T_e)$  이고 출력은 토크 각  $(\Delta \delta)$  이며, 전기적인 루프의 입력은 보조 제어  $u_E$  와 증분 종단전압  $\Delta v_t$  의 차이로, 출력은 내부 전압  $\Delta e_q'$  이 된다.

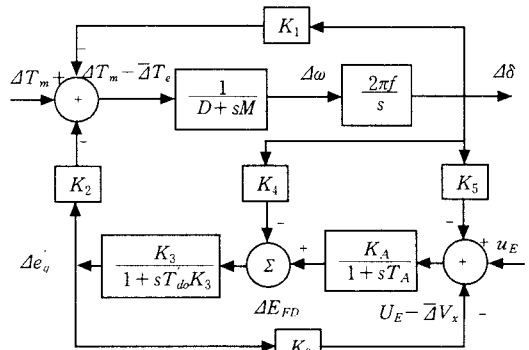


그림 1 선형화한 동기발전기의 전달함수 블록다이어그램  
Fig. 1 Transfer function block diagram for low-frequency oscillation studies

그림2는 1기 무한모선의 전력시스템을 보여 주고 있으며  $B_{SV}$ 는 SVC에 의해 제어되는 출력으로서 서셉턴스(Susceptance)의 양이다.

$$\frac{d}{dt} \Delta B_{SV} = -\frac{1}{T_v} \Delta B_{SV} - \frac{K_v}{T_v} \Delta v_s \tag{1}$$

1기 무한모선의 시스템의 상태 변수는

$$x_p = [\Delta \omega, \Delta \delta, \Delta e_q', \Delta E_{FD}, \Delta B_{SV}]^T \tag{2}$$

이며, 입력은  $[u] = [u_E, \Delta V_s]^T$ 이다.

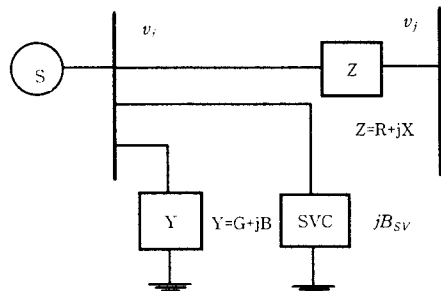


그림 2 1기 무한 모선의 전력 시스템  
Fig. 2 A one-machine infinite-bus power system

이때, 시스템 방정식 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p \mu \\ y &= C_p x_p \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. LQG/LTR 제어시스템의 설계

LQG/LTR 보상기는 모델기준 보상기(MBC)의 구조를 하고 있으며 안정도-강인성 및 시스템의 주파수역 성능을 만족하는 목표필터루프(Target Filter Loop : TFL)를 설계하고, 루프전달회복(Loop Transfer Recovery : LTR) 방법을 이용하여 보상된 시스템의 루프전달함수행렬의 특이값을 이미 설계사양을 만족시키고 있는 목표필터루프의 전달함수행렬의 특이값 형상으로 회복시킴으로서 다변수 시스템 설계를 조직적으로 할 수 있는 기법이다.

MBC를 이용한 출력 피드백 제어시스템의 상태공간 모델식은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ld(t) \\ y(t) &= Cd(t) \end{aligned} \quad (4)$$

플랜트 TFM  $G(s)$ 는

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (5)$$

MBC의 TFM  $K(s)$ 는

$$K(s) = G(sI - A + BG + HC)^{-1}H \quad (6)$$

이다.

피드백이 없는 자유적분요소를 포함하는 설계플랜트모델(DPM)의 상태공간 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_p & A_p \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad C_p], x(t) = \begin{bmatrix} u_p(t) \\ x_p(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다.

· 필터게인행렬  $H$ 의 계산

$$\begin{aligned} AP + PA^T + LE L^T - PC^T \theta^{-1} CP &= 0 \\ H &= PC^T \theta^{-1}, \quad \theta = \mu I \end{aligned} \quad (9)$$

· 제어게인행렬  $G$ 의 계산

$$\begin{aligned} KA + A^T K + Q - KBR^{-1}B^T K &= 0 \\ G &= R^{-1}B^T K, \quad R = \rho I \end{aligned} \quad (10)$$

Kalman 필터루프 계인을 조정하는데 사용하는  $\mu$ 의 값은 요구되는 대역폭 혹은 교차주파수를 만족하도록 선정한다.

$L$ 은 주파수역에서 특이값 형상을 조정하며 바람직한 루프형상이 되도록 선정한다.

$$L = \begin{bmatrix} -(C_p A_p^{-1} B_p)^{-1} \\ C_p^T (C_p C_p^T)^{-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

시스템  $[A, B]$ 가 안정가능하고  $[A, C]$ 가 검출가능하며 설계플랜트가 최소상위플랜트라는 가정 아래서  $\rho$ 가

0으로 접근할 때 모델기준보상기(MBC)의 TFM,  $K(s)$ 가 다음과 같이 극한 거동을 한다.

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} K(s) \rightarrow [C(sI - A)^{-1}B]^{-1}C(sI - A)^{-1}H = G^{-1}(s)G_p(s) \quad (12)$$

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

전력시스템의 안정화 장치의 제어기 성능과 안정성을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

표 1 발전기의 상수값

Table. 1 Constants of Generation Systems

발전기정수	$M=9.26$ $x_d=0.19$	$x_d=0.973$ $x_q=0.55$	$D=0$ $T_{d0}=7.76$
여자기정수	$K_A=50$	$T_A=0.05$	
선로 정수	$R=0.021$ $G=0.249$	$X=0.226$ $B=0.262$	
초기 상태	$P_{d0}=1.0$	$Q_{d0}=0.015$	$V_{d0}=1.05$

$P_{d0} = 1.0$  [p. u]의 발전기 시스템의 여러 상수들은 표 1과 같고, 이러한 전력 시스템의 계수  $K_1 \sim K_6$ 은 다음과 같다.

$$K_1 = 1.745 \quad K_2 = 1.896 \quad K_3 = 0.3536$$

$$K_4 = 1.302 \quad K_5 = 0.03712 \quad K_6 = 0.5113$$

안정도-강인성 조건식을 만족시킬 수 있는 설계파라미터  $\mu$ 를 0.05로 선정한다. 이때 설계행렬인 필터게인행렬  $H$ 는 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} -3.6287 & -7.7612 \\ -31.0496 & -86.6109 \\ 0.1565 & 0.1126 \\ 9.9417 & 6.2602 \\ -7.6262 & -4.9650 \\ 14.9683 & -207.7341 \\ 24.6682 & 69.2381 \end{bmatrix}$$

위와 같이 선정된 필터게인행렬  $H$ 를 갖는 목표 필터루프  $G_F(s) = (sI - A)^{-1}H$ 의 특이값 선도는 그림 3과 같다. 이제 LTR 절차를 이용하여 보상된 시스템을 TFL로 회복시키면  $\rho$ 의 값이  $10^{-8}$ 일 때 그림 4와 같이 만족스러운 LTR이 수행되어진다. 이때 설계행렬인 제어게인행렬  $G$ 의 값을 계산하면 다음과 같다.

$$G = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0000656 & -99456.3001 & -9725.6353 & 293.2236 & 0.2503 & 2.6770 \\ -0.00000066 & 0.9995 & -389.5734 & -11169.8416 & 10283.0592 & -0.0535 & -1222.9651 \end{bmatrix}$$

본 시뮬레이션에서는 LQG/LTR 제어이론을 사용한 시스템과 제어기가 없는 시스템에 대한 시험을 비교하였다. 또한 시뮬레이션 사례로는 정상상태의 모델계통에 부하 등의 외란이 투입되는 시간을 정상상태의 1초부터 1초 동안만 지속하도록 가정하였다.

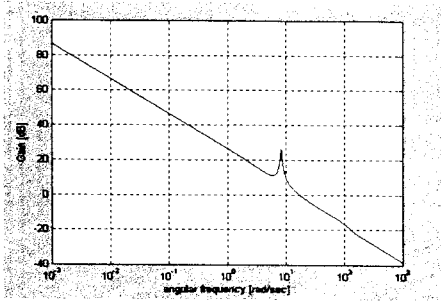


그림 3 목표 필터루프  $G_F(jw)$ 의 특이값 선도  
 Fig. 3 Singular value bode diagram of target filter - loop  $G_F(jw)$

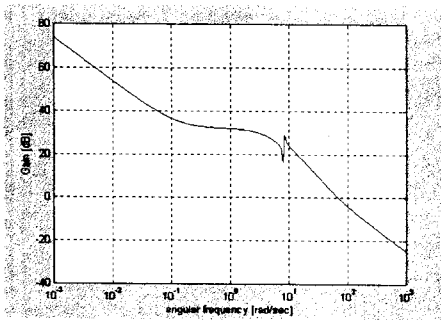


그림 4 개루프  $T_F(jw)$ 의 특이값 선도  
 Fig. 4 Singular value bode diagram of open-loop  $T_F(jw)$

그림 5의 제어기가 없는 시스템에서는 동기각속도의 진동이 큰 폭으로 발생하고 있으며, 그림 6의 LQG/LTR 제어기를 적용한 시스템에서는 동기각속도가 외란 투입 후 0.028 [rad/s]까지 상승하였다가 진동이 감쇄하기 시작하여 약 4초 정도에서 안정되게 제어되고 있다.

이와 같이 LQG/LTR 제어기를 적용한 경우에 제어기가 빠른 감쇄현상을 보이면서 수렴함을 알 수 있듯이 제어기의 성능이 만족스럽고 양호하게 나타났다.

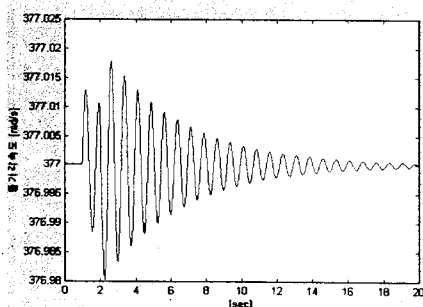


그림 5 제어기가 없는 시스템의 동기각속도의 변동  
 Fig. 5 Synchronous angular velocity variation without controller

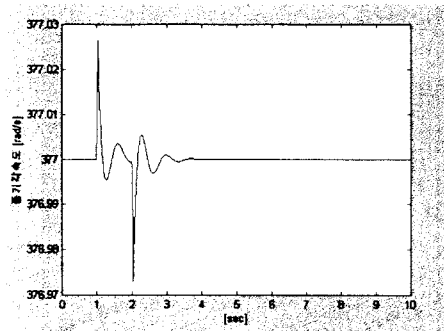


그림 6 LQG/LTR 제어기가 있는 시스템의 동기각속도의 변동  
 Fig. 6 Synchronous angular velocity variation of LQG/LTR controller

## V. 결론

본 논문에서는 전력시스템의 저주파 동요를 억제하기 위하여 PSS와 SVC를 적용하고, PSS와 SVC를 효과적으로 제어하기 위하여 LQG/LTR 기법을 도입하였다. 분석계통으로는 1기 무한모선 계통을 사용하며, 동기발전기에 PSS를 설치하고 발전기 모선에 SVC를 병렬보상설비로서 설치한다. PSS와 SVC의 제어에 LQG/LTR 기법을 적용함으로써, PSS로서 동기발전기의 로우터각의 진동을 억제토록하고, SVC로서 모선전압을 빠르고 연속적으로 제어함으로써 전력시스템의 동요를 효과적으로 억제한다.

MATLAB 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행한 결과, LQG/LTR 제어기법을 적용한 PSS와 SVC의 제어기가 전력시스템의 동요를 효과적으로 억제하고 안정도를 향상시키는 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

- [1] Q.H. Wu and B.W. Hogg, "Robust self-tuning regulator for a synchronous generator", IEE proc. Vol. 135, pp463-473, 1988
- [2] D.Xia, "Self-tuning Controller for generator excitation control", IEEE PAS, Vol. PAS-102, No. 6, 1877-1885, June, 1983
- [3] J.C. Doyle, K. Glover, State-Space Solution tonstandard  $H_2$  and  $H_\infty$  Control problem", IEEE Autom. Control, Vol. 38 No. 8, pp. 831-847, 1989.
- [4] Y. Yu, K. Vongsuriya and L. N. Wedmen, "Application of an Optimal Control Theory to a Power System," IEEE Trans. on. PAS. Vol. 89, No.1, pp. 55-62, 1970.
- [5] Ali Feliachi, Xianofan Zhang et. al, " Power System Stabilizers Design Using Optimal Reduced Order Models, Part II : Design ", IEEE Trans on Power System, Vol. 3 No. 4, pp. 1676-1684, 1988.
- [6] 김종식, "선형제어 시스템 공학", 청문각, pp487-520,1997