

Generator Excitor Control Using Robust Control

洪 鉉 文[†] · 鄭 秀 鉉^{*}
(Hyun-Mun Hong · Su-Hyun Jeong)

Abstract - This thesis proposes a robust controller introducing the H_{∞} control theory, one of the robust control theories that can obtain desired control performance while ensuring robustness for the uncertainty and disturbance contained in the power system. This thesis also proposes an improved digital exciter control system for a synchronized generator using a digitally designed controller. Simulation to verify the usefulness of the proposed method was carried. Results show that the proposed control system manifests excellent control performance compared to existing control systems.

Key Words : Excitor, Robust Control

1. 서 론

현대 산업사회에서 운전되고 있는 모든 제어계는 인류가 원시적인 관개농업을 시작하면서부터 발전되어 왔으나, 근대적인 의미에서의 자동제어는 18세기 J. Watt가 조속기를 이용해서 증기기관의 속도를 제어하면서부터 도입되었다. 이러한 자동제어는 20세기에 들어와서 그 중요성이 더욱 인식되었고, 1940년대 주파수응답법(Frequency Response Method)과 근궤적법(Root-locus Method)이 개발되어 제어성능을 만족시키는 선형 궤환 제어계를 설계할 수 있게 되었다.

1960년대 이후에는 디지털 컴퓨터의 보급에 의해서 복잡한 계통의 시간영역 해석이 가능해졌고, 상태변수를 이용하여 시간영역에서 해석 및 합성을 할 수 있는 현대 제어이론이 개발되었다. 현대제어이론에서 최근 발전한 분야로는 확정계통(Deterministic System)과 확률계통(Stochastic System)에 대한 최적제어(Optimal Control), 복잡한 계통에 대한 적응제어(Adaptive Control) 그리고 학습제어(Learning Control) 등을 들 수 있다[3].

위 제어이론들을 적용하여 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상인 플랜트의 동특성을 충분히 표현할 수 있도록 모델링을 수행한 후, 그 수학적 모델로부터 제어기를 설계하게 된다. 특히 플랜트의 파라미터에 불확실성 또는 외란이 포함되어 있지 않은 경우에는 궤환제어계를 구성하고, 위의 제어이론들을 도입하여 제어성능을 보장

할 수 있는 제어기를 설계할 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 설계된 계통이 요구된 제어성능을 만족하지 못할 수도 있다. 따라서 플랜트의 불확실성과 외란에 대해 계통의 강인성을 보장하면서, 원하는 제어 성능을 얻을 수 있는 강인제어(Robust Control)에 관한 연구가 필요했다.[3~8].

본 논문에서는 시뮬레이션 결과로부터 기존의 PSS 경우보다 낮은 오버슈트를 가지면서 빠른 속응특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, 제안된 강인제어기를 갖는 PSS가 기존의 PSS 보다 훨씬 큰 계통을 공급할 수 있고, 모든 동작조건에서 시스템 안정도를 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 동기발전기 여자시스템의 PSS에 제안된 H_{∞} 제어이론을 도입하여 제어기를 설계함으로써 전력시스템의 안정성과 신뢰성을 보장할 수 있을 것이다. 실 디지털 시스템에 대한 테스트도 하였다.

2. 시스템 모델링

그림.1은 PSS로 강인제어기를 사용한 여자시스템을 포함한 전력시스템의 전체 구성도이다. 제안된 전력시스템은 두 개의 병렬 전송라인을 무한대 버스에 연결한 동기발전기 모델로 표현한다. 그림.2는 발전기와 여자시스템을 블록선도로 나타낸 것이다.

그림.2에서 발전기 모델은 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

[†] 교신저자, 正會員 : 東海大 工大 電氣電子工學科 助教授 · 工博

^{*} 正 會 員 : 大元科學大 電氣電子科 副教授 · 工博

接受日字 : 2004年 5月 11日

最終完了 : 2004年 10月 30日

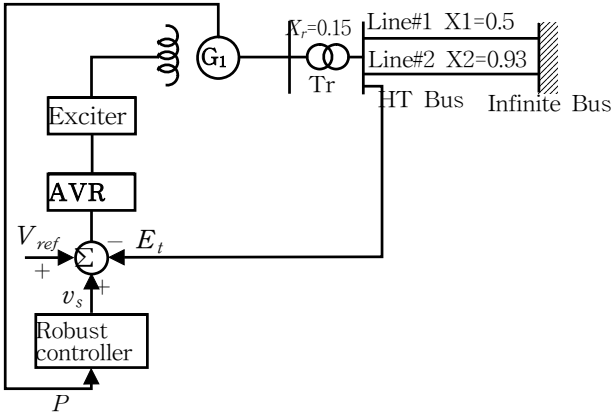


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System Configuration

E_{fd}

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{(T_m - T_e - K_D \cdot \Delta\omega_r)}{2H} \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_o \cdot \Delta\omega_r \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{fd}}{dt} = \omega_o [e_{fd} - R_{fd} \cdot i_{fd}] \quad (3)$$

여기서,

- ω_o : electrical frequency
- T_m : mechanical torque
- T_e : electrical torque
- K_D : damping constant
- H : inertia constant
- δ : rotor angle
- Ψ_{fd} : flux linkage in the field winding
- Ψ_{ad} : d-axis mutual flux linkage
- Ψ_{aq} : q-axis mutual flux linkage

이다.

그리고 AVR과 여자기의 관계식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{(E_t - v_1)}{T_R} \quad (4)$$

$$E_{fd} = K_A \cdot (V_{ref} - v_1 + v_2) \quad (5)$$

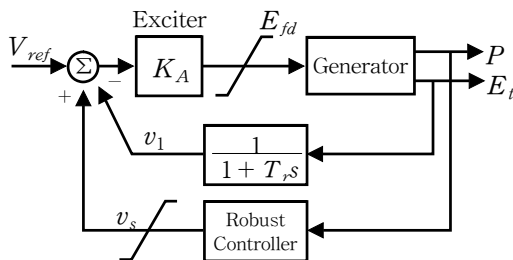


그림 2 AVR & PSS 가진 여자기와 발전기 블럭다이어그램
Fig. 2 Block diagram of exciter and generator with AVR & PSS

여기서,

T_R : time constant of the voltage transducer

K_A : exciter gain

이다.

또한 그림.2에서 여자기의 출력 리미터 E_{fd} 와 강인제 어기의 출력 리미터 v_2 의 조건식은 각각 다음과 같다.

$$E_{fd_{min}} \leq E_{fd} \leq E_{fd_{max}} \quad (6)$$

$$v_{2_{min}} \leq v_2 \leq v_{2_{max}} \quad (7)$$

여기서,

v_1 : output of the voltage transducer

E_t : generator terminal

이다.

비선형 미분방정식 식(1)부터 식(3)을 공칭 동작점에서 선형화하고, 선형 상태방정식의 2장의 선형화 모델의 공칭행렬 A_o, B_o, C_o, D_o 로부터 다음과 같은 공칭 모델의 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G_o(s) = C_o(sI - A_o)^{-1}B_o + D_o \quad (8)$$

3. 강인 제어 이론

전력시스템에서 모델 불확실성의 주요 원인은 동작 조건변화에 의한 것이다. 불확실성은 공칭 모델(Nominal Model)의 주파수응답에 의한 크기의 변화량으로 나타난다. 이와 같은 변화량은 구조적 불확실성을 갖는 경우에 승산 또는 가산형태로 나타낼 수 있으며, 본 논문에서는 불확실성을 승산형태를 고려하였다. 만약 공칭 모델과 실제 모델의 전달함수를 각각 $G_o(s)$ 과 $G(s)$ 로 나타내면, 관계식은 다음과 같다.

$$G(s) = (I + \Delta_m(s))G_o(s) \quad (9)$$

여기서, $\Delta_m(s)$ 는 불확실성의 범위를 나타낸다.

불확실성을 가진 폐루프 시스템의 안정도의 강인성 문제는 다음과 같은 경계조건을 만족하여야 한다.

$$\|\Delta_M(s)T(s)\|_{\infty} = \sup [\sigma_{\max}(\Delta_M(s)T(s))] \leq 1 \quad (10)$$

여기서, $T(s)$ 는 보수감도함수(Complementary Sensitivity Function) 또는 폐루프 전달함수라 하고, 다음과 같이 정의된다.

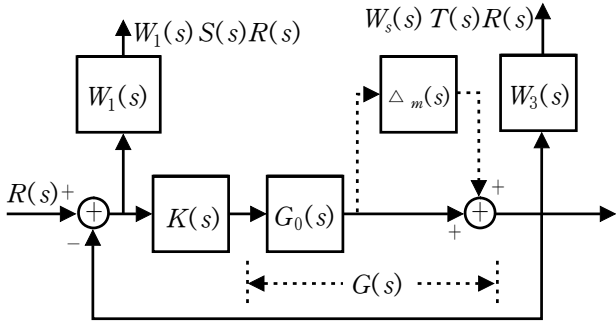


그림 3 불확실성 모델과 하중 민감
Fig. 3 Uncertain model and weight sensitivity

$$T(s) = G_o(s)K(s)[I + G_o(s)K(s)]^{-1} \quad (11)$$

그리고 페루프 시스템의 감도함수(Sensitivity Function) $S(s)$ 는 그림.3로부터 다음과 같이 정의된다.

$$S(s) = [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \quad (12)$$

강인성의 성능은 $K(s)$ 를 선택함에 있어서, 다음과 같은 혼합감도를 최소화함으로써 얻을 수가 있다.

$$\min \left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} = \min \left\| \begin{matrix} W_1(s) [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \\ W_3(s)G_o(s)K(s) [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (13)$$

여기서, $\|\cdot\|_{\infty}$ 는 무한정규(Infinite Norm)를 나타낸다.

식 (13)을 최적화하는 것은 하중 혼합함수의 최대 고유치를 최소화하도록 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것을 의미한다. H_{∞} 제어문제는 일반적으로 주어진 제어목적 즉, 최소화된 $K(s)$ 를 만족하는 하중함수 $W_1(s)$ 과 $W_3(s)$ 를 식별하는 문제이다. $W_1(s)$ 은 시스템에 요구되는 정상상태 성능을 얻기 위해서 사용되고, $W_3(s)$ 은 식 (13)을 만족하도록 선택하여야 한다.

H_{∞} 제어이론을 이용하여 설계를 하면, 다음과 같은 $W_1(s)$ 는 외란 주파수대역에 대한 감도를 최소화한다. 즉, 외란에 대해 좋은 전압회복과 낮은 주파수 부하각의 편차를 감소시킨다.

$$W_1(s) = 0.7 \frac{s+2}{s+1} \quad (14)$$

그리고 H_{∞} 제어이론을 이용하여 설계된 $W_3(s)$ 는 다음과 같다.

$$W_3(s) = 0.03 \frac{(s^2 + 8s + 16)(s + 200)}{100(s + 400)} \quad (15)$$

식 (14)와 (15)은 발전기용량 2,200[MVA], 출력전압 24[kV]에서 단위계[p.u]로 표현된 유효전력 $P=0.9$, 무효전력 $Q=0.436$, 단자전압 $E_t=1.0 \angle 28.35^\circ$, 무한 버스전압 $E_B=0.90081 \angle 0^\circ$, 고장제거시간이 0.007[sec]이고, 위 조건에서 MATLAB을 이용하여 설계된 하중함수이다[9].

4. 모의실험 및 실험

그림 1에서 1, 2선간 고장이 일어나고, 0.06초 후에 계통 전송선이 분리된 조건에서 선형화된 모델에 대해 설계된 식 (14)와 (15)의 강인제어기를 비선형 모델식에 적용하였다. 그리고 기존의 PSS를 갖는 여자시스템과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

그림.4은 단자전압과 전기적 출력을 나타낸 것으로, 이 그림으로부터 기존의 PSS 경우보다 낮은 오버슈트를 가지면서 빠른 속응특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 즉, 제안된 강인제어기를 갖는 PSS가 기존의 PSS보다 훨씬 큰 제동을 공급할 수 있고, 모든 동작조건에서 시스템 안정도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 H_{∞} 제어이론을 이용할 경우 설비의 신뢰성을 보장하면서 다양한 동작조건에 대해 강인성을 보장하는 제어기 설계방식으로 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 또한 고정된 이득을 갖는 제어방식이므로 빠른 디지털 프로세서의 연산이 필요없기 때문에 다음 장에서 기술할 디지털 여자제어시스템 구현에 적합한 방식으로 사료된다.

그림.5(a)는 무부하상태에서 기준 여자전류를 5% 증가한 경우에 대한 실험결과이다. 이 경우에는 실제 여자전류와 단자전압이 5% 증가하여 추종함을 알 수 있다. 여기서, 각각의 파형은 위에서부터 차례로 출력전압, 기준 여자전류, 실제 여자전류를 나타낸다. 그림.5(b)는 무부하상태에서 기준 여자전류를 10% 증가한 경우에 대한 것이다. 따라서 무부하상태에서는 AVR만으로도 우수한 추종성능을 보인다.

그림.6은 PSS의 입력 주파수를 1[Hz]로 하였을 때 기존 PSS만 적용한 결과이다. 그림.6(a)에서 연속파형은 입력파형이고, 이산파형은 위시아웃 출력파형이다. 그림.6(b)는 연속파형은 입력파형이고, 이산파형은 PSS의 최종 출력단 파형이다.

5. 결론

본 논문에서는 동기발전기용 여자시스템의 제어를 위해 H_{∞} 이론을 이용하여 제안한 여자제어시스템의 설계 방법은 페루프 안정조건을 만족하도록 시스템의 외란에 대한 영향을 최소화하고, 루프 전이함수의 허용오차가 상·하한 경계조건에 해당하는 페루프 안정여유를 얻을

수 있도록 하는 방식이다. 시뮬레이션 결과로부터 기존의 PSS 경우보다 낮은 오버슈트를 가지면서 빠른 속응 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, 제안된 강인제어기를 갖는 PSS가 기존의 PSS 보다 훨씬 큰 제동을 공급할 수 있고, 모든 동작조건에서 시스템 안정도를 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 동기발전기 여자시스템의 PSS에 제안된 H_{∞} 제어이론을 도입하여 제어기를 설계함으로써 전력시스템의 안정성과 신뢰성을 보장할 수 있을 것이다. 실디지털 시스템에 대한 시스템에 대한 성능실험도 해 보았다. 앞으로 실디지털 시스템에 적용하는 것이 과제이다

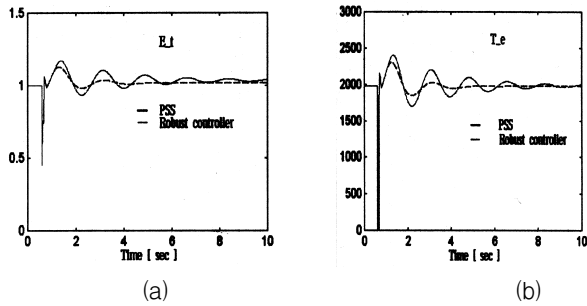


그림 4 기존 PSS와 제안된 PSS : (a)단자전압 (b)전기적출력
 Fig. 4 Conventional PSS and proposed PSS :a)terminal voltage (b) Electrical output

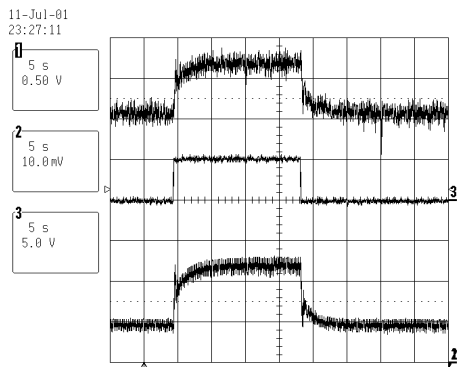
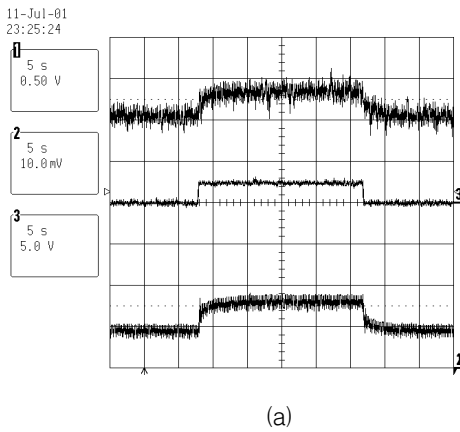


그림 5 무부시 스텝 변화시 출력전압 여자 기준전류와 여자 실제전류 (a) 5% 스텝 (b)10% 스텝 : 1. 단자전압, 2. 여자기준전류, 3. 여자실제전류

Fig. 5 Experiment waveforms of output voltage excitation reference current and excitation real current with step change of no load : 1.Terminal voltage, 2. Exciter reference current, 3. Exciter real current

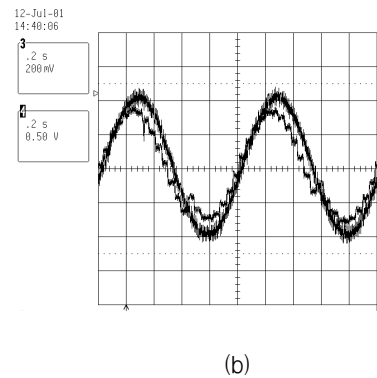
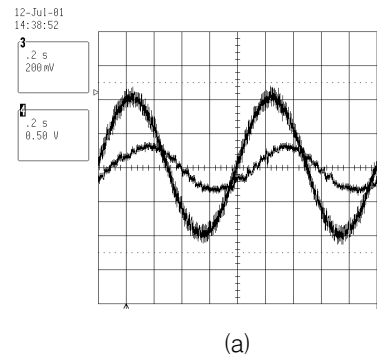


그림 6 1[Hz]시 디지털 PSS의 실험파형 (a)워시아웃 출력 : 1. 입력 신호, 2. 워시아웃 출력 (b) PSS 출력 출력 : 1. 입력 신호, 2. 워시아웃 출력

Fig. 6 Experiment waveforms of digital PSS at 1[Hz] (a) Wash-out output : 1. Input signal, 2. Wash-out output (b) PSS output : 1. Input signal, 2. PSS out signal

참 고 문 헌

[1] H. M. Rustebakke, *Electrical Utility Systems and Practice*, John Wiley & Sons Inc., 1983.
 [2] C. A. Gross, *Power Systems Analysis*, John Wiley & Sons Inc., 1986.
 [3] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall Inc., 1997.
 [4] C. T. Chen, *Linear System Theory and Design*, Holt, Rinehart and Winston, 1970.
 [6] T. Kailath, *Linear Systems*, Prentice-Hall Inc.,

1980.

- [7] I. M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*, Academic Press, New York, 1963.
- [8] J. J. D'Azzo and C. H. Houpis, *Linear Control System Analysis*, McGraw-Hill Pub. Co., 1988.
- [9] MATH WORK, *Robust Control Toolbox*, MATH WORK Inc., 1995.

저 자 소 개



홍 현 문 (洪鉉文)

1965년 11월 11일생. 1992년 충북대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사 졸업. 2002년 동 대학원 박사졸업. 1998년~현재 동해대학교 전기전자공학과 조교수.

Tel : 033-520-9321

Fax : 033-521-9407

E-mail : hmhong@donghae.ac.kr



정 수 현 (鄭秀鉉)

1985년 충북대 전기공학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995년 ~현재 대원과학대학 전기전자과 부교수.

Tel : 043) 649-3211

Fax : 043) 645-9170

E-mail : shjeong@daewon.ac.kr