

H_{∞} 이용한 발전기 여자 시스템 제어

(Generator Exciter Control Using H_{∞})

홍현문*

(Hyun-Moon Hong)

요 약

본 논문에서는 전력 시스템에서 가지고 있는 불확실성과 왜란에 강인함을 보장하면서 원하는 제어성능을 얻기 위해 강인 제어기 중의 하나인 H_{∞} 제어이론을 도입하여 강인제어기를 제안하였다. 디자인된 제어기의 성능은 폭 넓은 비선형 시간영역 모의 실험으로 고찰하였다. 실험결과에서는 기존의 제어기보다 제안된 H_{∞} 제어기가 우수함을 보였다.

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. The performance of the designed controller is examined by extensive non-linear time domain simulation. Results show that the proposed H_{∞} controller is superior to that of the conventional controller.

Key Words : Exciter, Robust control

1. 서 론

디지털 기술의 발달과 보급에 의해서 복잡한 계통의 시간영역 해석이 가능해졌고, 상태변수를 이용하여 시간영역에서 해석 및 합성을 할 수 있는 현대제어이론이 개발되었다. 현대제어이론에서 최근 발전한 분야로는 확정계통(Deterministic System)과 확

률계통(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 보장할 수 있는 제어기를 설계할 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 설계된 계

* 주저자 : 동해대학교 전기전자공학과 조교수
Tel : 033-521-9321, Fax : 033-521-9407
E-mail : hmhong@mail.donghae.ac.kr
접수일자 : 2004년 8월 3일
1차심사 : 2004년 8월 5일, 2차심사 : 2004년 8월 18일
심사완료 : 2004년 9월 6일

통이 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 필요하다[3~8].

따라서, 본 논문에서는 전력시스템에 포함된 불확실성과 외란에 대해 강인성을 보장하면서 원하는 제어성능을 얻을 수 있는 강인제어이론 중의 하나인 H_∞ 제어이론을 도입하여 강인제어기를 설계하였다. 그리고, 설계된 제어기를 디지털로 구현한 개선된 동기발전기용 여자제어시스템을 제안하였다. 제안된 방식의 유용성을 검증하기 위해 모의실험을 수행하고 제안된 강인제어기를 발전기 여자제어시스템에 도입하여 실험하였다. 그리고 제안된 제어시스템이 기존 제어시스템보다 우수한 제어성능을 보였으며 디지털화된 제어기 구현에 용이함을 모의실험과 실험결과로 확인하였다.

2. 시스템 구성

본 장에서는 제안한 H_∞ 제어기를 도입하여 구현하였고, 그림 1과 같은 전압원 정지형 직접여자 제어시스템을 제안하였다.

2.1 시스템 모델

그림 1은 H_∞ 제어기를 사용한 여자시스템을 포함한 전력시스템의 전체 구성도이다.

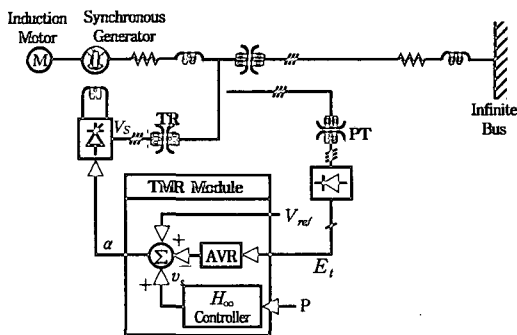


그림 1. H_∞ 제어기로 구현한 시스템 구성도
Fig. 1. Basic block diagram of exciter system with H_∞ controller

제안된 전력시스템은 한 개의 병렬 전송라인을 무한대 버스에 연결한 동기발전기 모델로 표현된다. 제안된 방식을 구현하기 위한 TMR 장비의 기본 사양은 입력모듈, 메인 프로세서 및 출력 모듈에 이르기까지 완벽한 3중화 기술에 의해 설계되어 있으며, 모든 입출력 모듈은 레그(Leg)로 불리는 독립된 3개의 회로망을 내장하고 있다. 입력모듈의 각 레그는 프로세스 데이터를 읽어들이고, 이 자료를 각각에 해당되는 메인 프로세서로 보내며, 3개의 메인 프로세서는 고속의 내부 버스 매체를 통하여 서로 통신을 할 수 있다. 또한 각 입출력 모듈은 핫 스페어(Hot Spare) 모듈을 설치할 수 있는 구조로 되어 있으며, 운전중인 첫 번째 모듈의 고장이 검출되면 자동으로 제어기능이 핫 스페어 모듈로 전환되도록 되어 있다. 또 핫 스페어 슬롯은 온-라인 시스템 보수용으로 사용할 수도 있다.

2.2 H_∞ 제어이론

그림 2는 H_∞ 제어기를 구성을 간략하게 설명한 것이다.

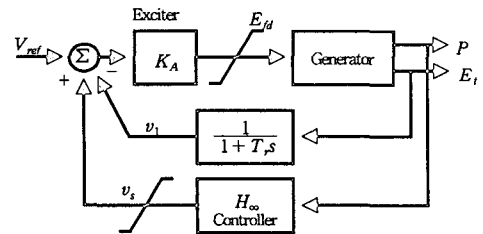


그림 2. H_∞ 제어기를 가진 여자기와 발전기 구성도
Fig. 2. Block diagram of exciter and generator with H_∞ controller

또한, 전력시스템에서 모델 불확실성의 주요 원인은 동작 조건변화에 의한 것이다. 불확실성은 공칭 모델(Nominal Model)의 주파수응답에 의한 크기의 변화량으로 나타낸다. 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.

H_∞ 이용한 발전기 여자 시스템 제어

$$G(s) = (I + \Delta_m(s))G_o(s) \quad (1)$$

여기서, $\Delta_m(s)$ 는 불확실성의 범위를 나타낸다. 불확실성을 가진 페루프 시스템의 안정도의 강인성 문제는 다음과 같은 경계조건을 만족하여야 한다.

$$\| \Delta_m(s) T(s) \|_{\infty} = \sup [\sigma_{\max}(\Delta_m(s) T(s))] \leq 1 \quad (2)$$

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

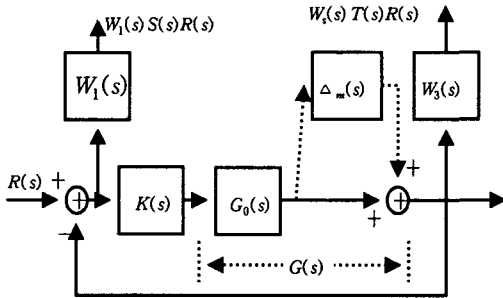


그림 3. 불확실성 모델과 하중 감도
Fig. 3. Uncertain model and weight sensitivity

$$T(s) = G_o(s)K(s)[I + G_o(s)K(s)]^{-1} \quad (3)$$

그리고 페루프 시스템의 감도함수(Sensitivity Function) $S(s)$ 는 그림 3으로부터 다음과 같이 정의된다[10].

$$S(s) = [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \quad (4)$$

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

$$\min \left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} = \min \left\| \begin{matrix} W_1(s) [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \\ W_3(s)G_o(s)K(s) [I + G_o(s)K(s)]^{-1} \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (5)$$

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

식 (5)을 최적화하는 것은 하중 혼합함수의 최대

고유치를 최소화하도록 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것을 의미한다. H_{∞} 제어문제는 일반적으로 주어진 제어 목적 즉, 최소화된 $K(s)$ 를 만족하는 하중함수 $W_1(s)$ 과 $W_3(s)$ 를 식별하는 문제이다. $W_1(s)$ 은 시스템에 요구되는 정상상태성능을 얻기 위해서 사용되고, $W_3(s)$ 은 식 (5)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.

$$W_1(s) = 0.7 \frac{s+2}{s+1} \quad (6)$$

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

$$W_3(s) = 0.03 \frac{(s^2 + 8s + 16)(s + 200)}{100(s + 400)} \quad (7)$$

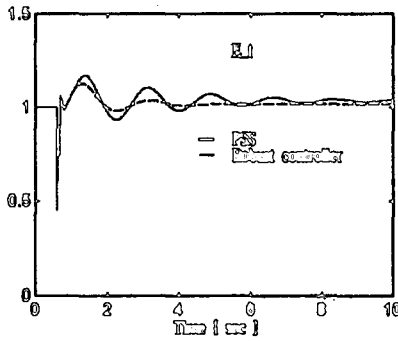
식 (6)과 (7)은 발전기용량 2,200[MVA], 출력전압 24[kV]에서 단위계[p.u]로 표현된 유효전력 $P=0.9$, 무효전력 $Q=0.436$, 단자전압 $E_t=1.0 \angle 28.35^\circ$, 무한버스전압 $E_B=0.90081 \angle 0^\circ$, 고장제거시간이 0.007[sec]이고, 위 조건에서 MATLAB을 이용하여 설계된 하중함수이다[9].

3. 모의실험 및 실험결과

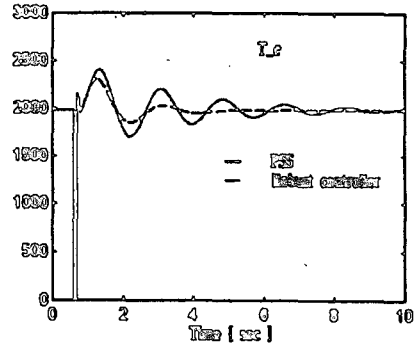
본 장에서는 발전기 디지털 여자 시스템을 구현하여 우수한 성능을 증명하였다. 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 1에서 선간 고장이 일어나고, 0.06초 후에 계통 전송선이 분리된 조건에서 선형화된 모델에 대해 설계된 식 (6)과 (7)의 강인제어기를 비선형 모델식에 적용하였다. 그리고 기존의 제어기를 갖는 여자 시스템과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

그림 4는 단자전압과 전기적 출력을 나타낸 것으로, 이 그림으로부터 기존의 제어기보다 낮은 오버



(a) terminal voltage



(b) electrical output

그림 4. 기존의 제어기와 H_{∞} 제어기

Fig. 4. Conventional controller and H_{∞} controller

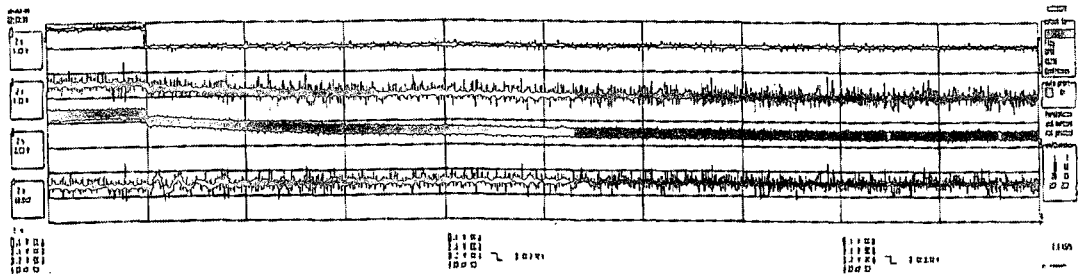


그림 5. 기존 제어기인 전력시스템에 연결시 실험 파형

Fig. 5. Experiment waveforms to connect Power system with conventional controller

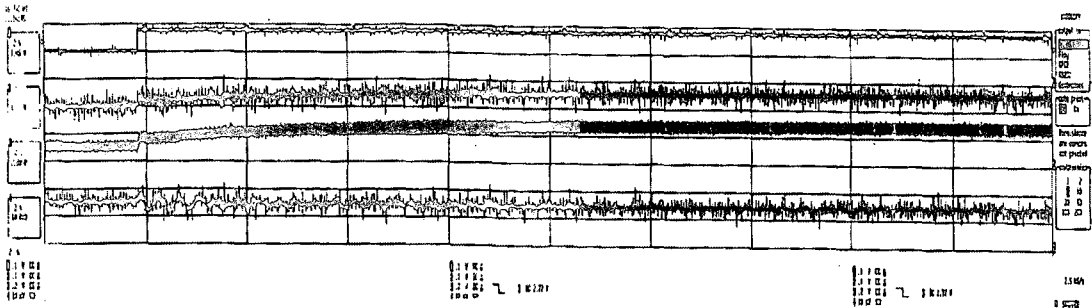


그림 6. H_{∞} 제어기인 전력시스템에 연결시 실험 파형

Fig. 6. Experiment waveforms to connect Power system with H_{∞} controller

슈트를 가지면서 빠른 속응특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 즉, 제한된 H_{∞} 제어기가 기존의 제어기보다 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 활용 될 수

있다.

그림 5는 기존의 제어기로 동기발전기를 전력계통에 투입한 실험결과이다. 여기서, 각각의 파형은 위에서부터 차례로 기준 여자전류, 전류 프로브의 측정결과, 실제 여자전류, 유효전력을 나타낸다. 그림 5의 마지막 파형에서 알 수 있듯이 기준 여자전류를 10% 증가하였을 때 전력의 동요가 일어남을 확

H_∞ 이용인 발전기 여자 시스템 제어

인할 수 있다. 전력계통의 안정화를 위해서는 이 파형의 첫 번째 스윙이 너무 크지 않고, 빠르게 정상상태로 돌아가도록 하여야 함을 의미한다.

그림 6은 제안된 방식인 식 (6)과 (7)을 이용하여 설계한 H_∞ 제어기 PSS에 대해 동기발전기를 전력계통에 투입한 실험결과이다. 여기서, 각각의 파형은 위에서부터 차례로 기준 여자전류, 전류 프로브의 측정결과, 실제 여자전류, 유효전력을 나타낸다. 이 그림의 마지막 파형으로부터 첫 번째 스윙이 적어졌고, 정상상태응답에 있어서도 앞의 두 경우보다 안정하면서 빠른 추종성능을 보임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 동기발전기용 여자시스템의 제어를 위해 H_∞ 이론을 이용하여 제안한 여자제어 시스템의 설계방법은 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 제어기보다 낮은 오버슈트를 가지면서 빠른 속응특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, 제안된 강인제어기를 갖는 제어기가 기존의 제어기보다 훨씬 큰 제동을 공급할 수 있고, 모든 동작조건에서 시스템 안정도를 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 동기발전기 여자시스템의 제안된 H_∞ 제어이론을 도입하여 제어를 설계함으로써 전력시스템의 안정성과 신뢰성을 보장할 수 있을 있었다.

References

- (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.
- (5) T. Kailath, Linear Systems, Prentice-Hall Inc., 1980.
- (6) I. M. Horowitz, Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, New York, 1963.
- (7) J. J. D'Azzo and C. H. Houpis, Linear Control System Analysis, McGraw-Hill Pub. Co., 1988.
- (8) MATH WORK, Robust Control Toolbox, MATH WORK Inc., 1995.
- (9) P. Kundur, Power System Stability & Control, McGraw-Hill Inc., 1993.

◇ 저자소개 ◇

홍현문 (洪鉉文)

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