

# 유도전동기의 저속운전을 위한 H infinity 제어기 설계

## H infinity controller design for induction motor with low speed

반기종\*, 윤광호\*, 최성대\*, 박진수\*\*, 남문현\*\*\*, 김낙교\*\*\*  
 Ban Gi Jong\*, Yoon Kwang Ho\*, Choi Sung Dai\*, Park Jin Soo\*\*  
 Nam Moon Hyon\*\*\*, Kim Lark Kyo\*\*\*

**Abstract** - In this paper we design  $H_{\infty}$  infinity controller for Induction motor with low speed operation.  $H_{\infty}$  controller is applied in order to design a state feedback static controller for field oriented control of an induction motor.

$H_{\infty}$  controller are linear plant can be set up using the same assumptions that are at the basis of field oriented control. Thus,  $H_{\infty}$  control theory can be successfully used to set up a state feedback controller for field oriented control of an induction motor. The performances of the  $H_{\infty}$  controller is numerically analysed and experimentally verified to prove the validity of the design procedure. In this paper show that performances with high robustness to variations of system parameter.

**Key Words** : induction moter, H infinity, control, vector control

### 1장. 서론

현대의 많은 제어시스템은 다입력과 다출력을 가지는 다변수 시스템으로 구성되어있다.

서보모터는 시스템의 고성능화에 따라 DC서보 전동기에서 AC 서보로 발전되어 왔으며 현재는 AC 서보 전동기가 주류를 이루고 있으며, 로봇등에서 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 AC 서보 전동기로의 발전은 동기전동기나 유도 전동기를 고성능으로 제어할 수 있는 제어이론이 개발되었고, 인버터등 고속의 스위칭 소자들이 개발됨에 따라 교류전력을 고정밀 고속으로 제어할 수있게 되었기 때문이다. 또한 DSP등 디지털 신호처리 마이크로프로세서의 발달로 소프트웨어의 서보화가 구현되었다.  $H_{\infty}$ 제어는 선형 다변수 제어이론에서 자승 형태의 성능 평가 함수를 이용하여 피드백 제어계의 성능을 최적화시키는 제어기를 설계하는  $H_2$  (Wiener-Hopf)제어기 [1]가 갖는 플랜트의 정확한 전달함수를 구할 수 없는 경우에 발생하는 한계성을 극복하기 위하여 1980년대 초에 플랜트의 불확실성을 고려한 강인 제어 기법인  $H_{\infty}$  기법이 연구되기 시작하여 1980년대 말에 그 공식이 완성되었다[2].

본 논문에서는  $H_{\infty}$  제어를 비선형 특성을 갖는 유도 전동기 시스템에 적용하기 위한 설계 절차 및 모델선형화 방법을

제안하여 유도전동기의 속도를 제어하기 위한  $H_{\infty}$  제어 설계이론을 적용하여 강건 안정한 성능을 내는 유도전동기 제어 시스템을 제안한다.

### 2장. 3상 유도전동기 간접벡터제어

유도전동기의 토크와 자속 제어를 위해서는 전동기에 공급되는 고정자 전류를 기준 자속에 직교되는 토크분 전류와 자속분 전류로 나누어 각각 제어해야 한다[3][4].

회전자 자속 기준 간접 벡터제어는 회전자 자속의 순시 속도( $\omega_e$ )를 적절히 제어하여 회전자 자속이 d축에만 존재하도록 제어하는 것이다. 따라서, 회전자 자속이 d축에만 존재하고,  $\lambda_{qr}^e = 0$ 이므로 쇄교 자속은 식(1)과 같다.

$$\lambda_r^e = \lambda_{dr}^e + j\lambda_{qr}^e = \lambda_{dr}^e \quad (1)$$

기준 고정자 수직축 전류  $i_{\alpha\beta}^e$ 는 기준 토크식으로부터 구하며 식 (2)로 표현된다.

$$i_{\alpha\beta}^e = \frac{2}{3} \frac{T_e}{p L_m \lambda_{dr}^e} \quad (2)$$

여기서,  $L_r$ 은 회전자 인덕턴스,  $L_m$ 은 여자 인덕턴스,  $\lambda_{dr}^e$ 는 회전자 자속이다.

기준 고정자 수평축 전류  $i_{\alpha\beta}^e$ 는 식 (3)으로 구해진다.

$$i_{\alpha\beta}^e = \frac{\lambda_{dr}^e}{L_m} \quad (3)$$

따라서, 토크는 식(2)와 식 (3)으로부터 식(4)로 나타낼 수 있다.

저자 소개

- \* 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 博士課程
- \*\* 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 碩士課程
- \*\*\*正 會 員 : 건국大學 전기공학科 教授 · 工博

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (4)$$

회전자 자속과 슬립 각속도  $\omega_{sl}$ 은 식(5)로 표현되며

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r = \frac{R_r}{\lambda_{dr}^e} \frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e \quad (5)$$

회전자 자속의 위치  $\Theta_e$ 는

$$\Theta_e = \int_0^t \omega_e d\tau = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) d\tau \text{ 로 구해진다.}$$

간접벡터 제어는  $\Theta_e$ 를 통해 슬립각 속도  $\omega_{sl}$ 를 제어하여 고정자 전류의 분배비를 제어하고, 자속 및 토크분 전류의 크기가 상대적 위치를 간접적으로 제어한다.

그림 1은 3상 유도전동기의 간접 벡터제어를 위한 속도 제어기의 구조를 나타내며 표 1에는 본 논문에서 사용한 유도전동기의 파라미터를 나타내었다.

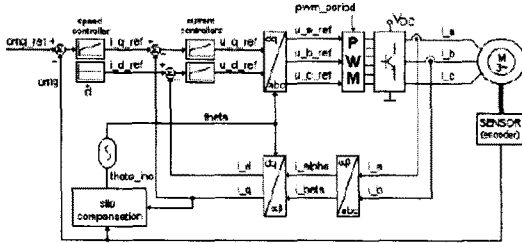


그림 1. 유도전동기의 속도제어 구성도

표 1. 유도전동기 parameter

Parameter	값
정격 Power	370W
정격전압	230V
정격 속도	2820rpm
정격토크	1.3Nm
정격전류	1.7A
기동전류	4.56A
기동토크	3.9Nm
최대토크	4.55Nm
회전자관성	$3.5 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$
고정자상저항	$24.6 \Omega$
회전자상저항	$16.16 \Omega$
자기인덕턴스	1.46H
전기적시정수	$1.62 \times 10^{-3}$

### 3. 장 H Infinity 제어기 설계

2장의 그림 1에 나타낸 속도제어기를 설계하기 위해서는 시스템의 전체 전달함수를 알아야 한다.

유도 전동기의 수학적 모델은 측정된 매개변수의 불확정성, 기계적 마찰 그리고 잘못된 정보로부터 발생하는 오차를 포함하는 문제를 해결하기 위하여 MATLAB의 Identification Toolbox를 사용하였다. 측정된 입출력 데이터로에서 동적 모

델을 결정하기 위한 과정은 입출력 정보, 모델 구조, 식별 방법으로 나타낼 수 있다[5][6].

MATLAB의 SimPowerSystems 의 예제의 전달함수를 식별한다. 식별한 전달함수는 2차 시스템으로 근사화 시킨다.

$H_\infty$ 강인 제어기는 3상유도전동기를 제어하기 위해 설계하며, 플랜트에 대한 수학적 모델링을 통해 설계한다.

제어 시스템에 대한  $H_\infty$ 이산 시스템은 Chen과 Francis가 제시한 7단계 과정을 통하여 구할 수 있다.[7, 8]

본 논문에서는 3상유도전동기시스템의 강인한 속도제어를 위한 이산시간 제어를 설계하기 위하여, 샘플치 (SD) 최적 제어 이론을 적용한다[7]. SD 최적제어 이론은 연속시간  $H_\infty$ 제어기를 이산시간 제어기로 변환할 때 발생하는 다양한 문제에 좋은 성능을 나타낸다. SD 최적제어 이론은 또한 연속시간  $H_\infty$ 강인 제어이론을 기반으로 하는 이산시간  $H_\infty$ 제어기와 긴 샘플주기로 인한 성능의 악화를 줄이기 위하여 "올림 기법에 의한 직접설계"가 사용된다. Chen과 Francis의 설계기법은 다음과 같은 과정을 거친다.

동일한 유한 차수 입출력 이산 시스템은 쌍선형 변환에 의한  $H_\infty$  norm 보존을 갖는 가상 연속시간 시스템 안에 다시 전달 된 계산을 통한 샘플치 제어시스템으로부터 구하며, 연속시간  $H_\infty$ 최적 제어기는 기존의  $H_\infty$ 제어 기법을 이용하여 설계한다. 즉, 이산  $H_\infty$ 최적 제어기는 연속시간  $H_\infty$ 최적 제어기로부터 구한다.

본 논문에서는 SD 최적제어 기법을 위하여, 샘플치 최적 제어이론을 적용하고 MATLAB을 이용하여 설계하였다.

$H_\infty$ 최적제어 문제에서 하중함수  $W_e, W_u, W_n$  ,를 갖는 일반적인 제어 대상을 위한 형태를 갖는다.

적분기 출력의 하중함수  $W_e$ 는 제어기 이전의 순간적 정상 상태 성능을 결정한다. 그림 2는 제안한  $H_\infty$ 제어기의 구조를 나타낸다.

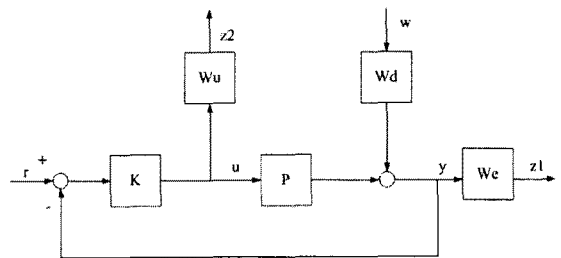


그림 2. H Infinity 제어기

$$P = \frac{s-2}{(s+1)(s-3)} \text{ 로 하면 } W_d=1, W_u = \frac{s+10}{s+100}$$

일때  $W_e = \frac{1}{s}$  으로 구해지고  $H_\infty$  제어기  $K_\infty$ 는 식 (6)으로 나타낸다.

$$K_\infty = \frac{7.85(s+1)(s+100)(s-0.1545)}{s(s+32)(s-20)} \quad (6)$$

그림 3과 그림 4는 50-100rpm의 저속에서 운전할 때  $H_\infty$  제어기를 적용하기 전과 적용 후의 응답 특성을 보여준다.

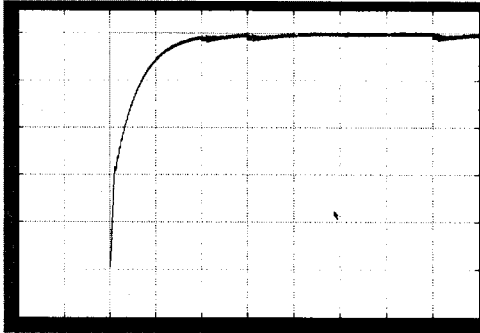


그림 3. 제어기 적용전의 응답 특성

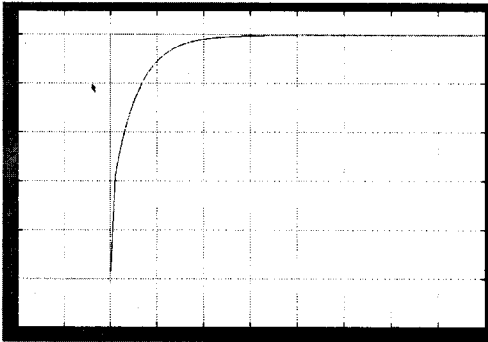


그림 3. 제안한 H infinity 제어기에 의한 응답 특성

그림 3과 그림 4에서 보여준 결과와 같이  $H_\infty$  최적 샘플치 제어기의 응답 특성이 제어기를 적용하기 전보다 제어기 적용 후의 응답 특성이 좋게 나타남을 알 수 있었다.

#### 4장 .결론

본 논문에서 제안한 제어기를 적용하기 위해서는 모델이 선형화 되어야 하므로 유도전동기의 비선형 모델을 선형화를 통하여 선형 모델로 가정을 하여 제어기를 설계한다. 또한, 플랜트에 적용하기 위하여 모델을 이산모델로 바꾸고 시스템의 전달함수를 MATLAB의 시스템 식별 함수를 이용하여 계산상 오차를 감소시켜서 제어기 설계에 있어서 최적의 상태를 만들어야 한다.

본 논문에서는 저속운전에서도 기존에 사용하고 있는 PI제어기보다 강인한 성능을 갖는  $H_\infty$  제어기를 설계하였다. 그리고 MATLAB 시뮬레이션을 통하여 성능을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

[1]. D. C. Youla, H. A. Jabr, and J. J. Bongiorno,

Modern Wiener-Hopf Design of Optimal Controllers, Part II: The Multivariable Case, IEEE Trans. Auto. Control, AC-21:319-338, 1976.

[2]. J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, and B. A. Francis, State-space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_\infty$  Control Problems, IEEE Trans. on Auto. Control, AC-34(8):831-847, August 1989.

[3] Lorenz, R.D., Lipo, T.A., and Novotny, D.W., "Motion control with induction motors", IEEE Proc., Special issue on Power Electronics and Motion Control", 1994, 82, (8), pp. 1215-1240.

[4] Bose, B. K., "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1986

[5] L. Ljung, "System Identification Toolbox User's Guide", The Math Works, Natick, 1998.

[6] L. Ljung, " System Identification: Theory for the User", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987.

[7] T. Chen and B. Francis, "Optimal Sampled-Data Control Systems, Springer, London, 1995

[8] T. Chen and B. Francis, "  $H_\infty$  Optimal sampled-data control: computation and design", Automatica, vol. 32, no. 2, pp. 223-228, 1996.

[9] P Gahinet, A. Nemirovski, and A. J. Laub, "LMI Control Toolbox User's Guide", The Math Works, Natick, 1995.

[10] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, "Robust and Optimal Control", Prentice-Hall New Jersey, 1996