

비례적분제어기와 feedforward 외란상쇄 관측기의 비교분석

김영춘^{1*}, 송호빈², 조문택³

¹공주대학교 기계자동차공학부, ²(주)휴스컴, ³대원대학 전기전자계열

Comparative Analysis of PI Controller and Disturbance Cancellation Observer of a Feedforward

Young-Choon Kim, Ho-Bin Song and Moon-Taek Cho

¹Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kong Ju University

²HUSCOM CO.

³Division of Electrical & Electronic Engineering, Daewon University College

요 약 이 논문은 피드포워드 왜란상쇄 관측기를 이용하여 유도전동기의 강인한 제어를 얻을 수 있었다. 전통적인 비례적분 제어기의 속도응답 특성은 부하 토크 요소의 변이에 영향을 받는다. 제안한 시스템에서 속도제어 특성은 부하토크 외란에 영향을 받지 않는 피드포워드 제어를 사용하였다. 벡터제어를 위한 높은 속도의 계산과 처리를 위해 TMS320C31 디지털 프로세서를 사용하였다. 제안한 제어 방법의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

Abstract This paper designed a robust control of an induction motor using a disturbance cancellation observer of a feedforward control. The speed response of conventional PI controller characteristic is affected by variations of load torque disturbance. In the proposed system, the speed control characteristic used a feedforward control which does not undergo the influence of the load torque disturbance. High speed calculation and processing for vector control is carried out by TMS320C31 digital signal processor. Validity of the proposed control method is verified through simulation and experimental result.

Key Words : Feedforward control, Disturbance cancellation observer, PI control

1. 서론

유도전동기의 제어에 일반적으로 사용되고 있는 비례적분 제어기의 경우 구현이 쉽고 간단하며 제어기 이득을 적절히 조절함으로써 최적의 운전상태를 얻을 수 있다. 그러나 비례적분 제어는 이득값을 설정하기가 어렵고, 부하외란이나 파라미터 변동에 매우 민감하기 때문에 운전범위에 제한을 받는다. 또한, 비례적분 제어는 출력측에 외란의 영향이 나타나고, 이 외란을 보상하는 시간이 많이 걸리게 된다.[1]

외란이 유입되거나 부하토크가 가변 될 경우에는 비례적분 제어기만으로는 안정된 동작 특성을 얻는 것이 힘들게 되어 부가적인 제어기가 필요하게 된다. 이에 본 논

문에서는 부하토크를 외란 요소로 간주하여 부하토크 가변 시에도 양호한 동작 특성을 얻고자 한다. 최소차원 관측기를 이용하여 부하토크를 추정하고, 추정된 부하토크를 feedforward 루프를 통해 상쇄시켜주는 외란상쇄 제어기를 구성하여 외란변동 등의 상황에서도 보다 안정적인 동작을 할 수 있도록 하였다.[2][3]

제안한 이론의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하여 확인하였다. 시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행하였으며, 시스템의 응답특성을 알아보기 위하여 시스템 전달함수를 이용하여 구현하였고, 부하토크의 가변에 대해서 PI제어기 시스템과 외란상쇄 관측기 시스템을 비교 시뮬레이션 하였다.[4]

시뮬레이션에서 얻어진 데이터를 바탕으로 동일한 조

*교신저자 : 김영춘(yckim59@kongju.ac.kr)

접수일 09년 11월 01일

수정일 09년 12월 03일

게재확정일 09년 12월 16일

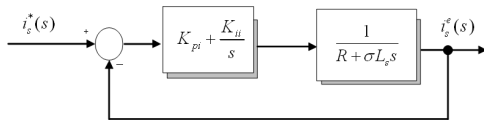
건에서 실제 시스템을 구성하여 실험을 수행하여 제한한 제어기의 적용 가능성을 알아보았다. 실험 장치에 사용한 프로세서는 TMS320 C31이다.

2. 본론

2.1 비례 적분 제어기

2.1.1 비례적분 전류제어기

인버터를 이상적으로 간주하여 이득을 “1”이라 할 수 있다면, PI제어기를 부가한 전류 제어기는 그림 1과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

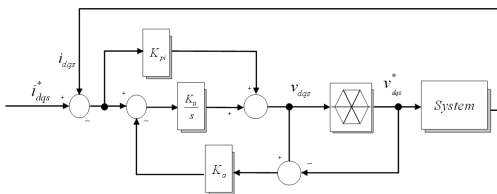


[그림 1] 간단한 전류 제어기

그림 1에서 개루프 전달함수를 구하고, 극과 영점을 소개하기 위하여 $K_{ii}/K_{\pi} = R/\sigma L_s$ 의 관계식을 대입하면 식 (1)과 같은 간단한 1차식 형태의 open-loop 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G_{io}(s) = (K_{\pi} + \frac{K_{ii}}{s}) (\frac{1}{R + \sigma L_s s}) = \frac{K_{\pi}}{\sigma L_s s} \quad (1)$$

식 (1)에 적용한 K_{π} 와 K_{ii} 의 관계식을 이용하여 전류 제어기의 I 이득 K_{ii} 를 구하면 식 (2)와 같다.



[그림 2] Anti-Windup 제어기를 포함한 전류 Π_{iA} 제어기 블록도

$$K_{ii} = \frac{R}{\sigma L_s} K_{\pi} = \frac{R}{\sigma L_s} \omega_c \sigma L_s = R \omega_c \quad (2)$$

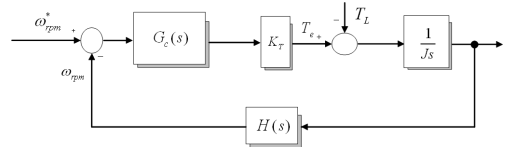
$$= (R_s + R_r \frac{K_m^2}{L_r^2}) \omega_c$$

Anti-Windup제어기를 포함한 전류제어기는 Π_{iA} 라

하고, 블록도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

2.1.2 비례적분 속도제어기

속도 PI제어기의 블록선도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 3] 속도 제어기 블록도

그림 3에서 지령속도 ω_{rpm}^* 에 대한 속도 ω_{rpm} 의 응답 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

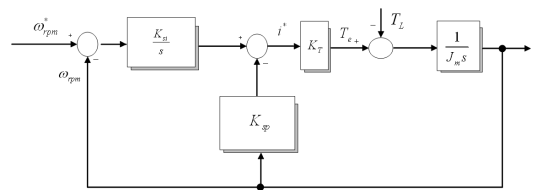
$$G_c = \frac{\omega_{rpm}}{\omega_{rpm}^*} = \frac{K_T G_c(s)}{sJ + K_T G_c(s)} \quad (3)$$

여기서, $K_T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^*$ 이며, 본 논문에서는 2.2958이다.

속도 제어기 $G_c(s)$ 는 식 (4)와 같다.

$$G_c(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} = K_{sp} \left(1 + \frac{K_{si}/K_{sp}}{s} \right) \quad (4)$$

$$= K_{sp} \left(1 + \frac{\omega_{\pi}}{s} \right)$$



[그림 4] IP 속도제어기 블록도

그림 4는 IP 속도제어기의 블록도를 보여준다. 그림 3의 PI 속도제어기의 블록도와 그림 4의 IP 속도제어기의 페루프 전달함수는 다음 식과 같다.

$$\frac{\omega_{rpm}(s)}{\omega_{rpm}^*(s)} = \frac{K_T K_{sp} s + K_T K_{si}}{J_m s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} \quad (5)$$

$$\frac{\omega_{rpm}(s)}{\omega_{rpm}^*(s)} = \frac{K_T K_{si}}{J_m s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} \quad (6)$$

식 (6)의 IP 제어기의 속도 명령에 대한 응답성은 식 (5)의 PI 제어기와 비교해서 분자에 s항이 없다. 그래서 IP 제어기를 사용하면 분자에 dynamics가 없는 시스템 응답을 쉽게 설계할 수 있다. 그러나 두 시스템은 부하토크에 대한 전달함수가 동일한 형태를 갖기 때문에 외란에 대해서는 동일한 응답특성을 가진다. 이와 같이 PI 속도제어기로서는 속도지령의 스텝변화에 대한 전동기 속도의 응답 오버슈트가 작으면서 동시에 부하토크의 스텝변화에 대한 속도 응답의 회복시간도 짧은 속도제어기를 실현하는 것에는 문제가 있다.

2.2 관측기 설계

2.2.1 왜란상쇄 관측기

본 논문에서는 최소차원 관측기를 이용하여 유도전동기의 외부에서 인가되는 미지의 부하토크를 추정하고, 이 추정 값을 이용하여 외란상쇄 관측기를 구성하고자 한다. 즉, 외란 r 은 측정이 불가능하므로 최소차원 관측기를 이용하여 추정하고자 한다. 유도전동기의 상태방정식과 출력방정식에서 x_1 을 측정 가능한 상태변수 x 로, x_2 를 측정 불가능한 상태변수인 외란 r 로 나누어 정리하면 상태방정식과 출력방정식은 식 (7)과 같이 다시 쓸 수 있다.[5]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} i_T \quad (7)$$

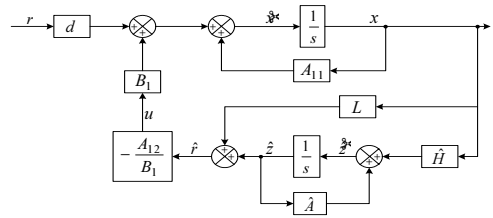
$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ r \end{bmatrix} = x$$

여기서, r 은 외란이다.

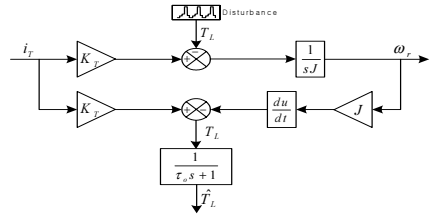
2.2.2 Feedforward 왜란상쇄 관측기

압연기 등의 속도 및 위치제어를 발생하는 모션의 분야에서는 대부분의 경우에 지배적인 외란요소는 토크외란이다. 이 외란을 추정할 때는 그것을 forward-back하여 상쇄가 가능하게 되며 외란상쇄제어를 행할 수 있다. 따 값을 그림 5에 나타난 상쇄제어를 블록도에서 부하의 외란토크 T_L 을 입력전류 i_T 와 각속도 ω_r 에서 추정하는 것을 고려한다.

그림 5에 Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정기의 블록도를 나타내면 그림 6과 같다. 그러나 아직 미분항이 존재하고 있는데, 식 (8)을 이용하면 ω_r 에서 \hat{T}_L 까지의 전달함수가 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.



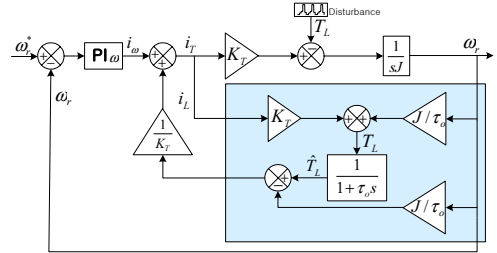
[그림 5] 외란상쇄 관측기 블록도



[그림 6] Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정

$$-\frac{Js}{\tau_o s + 1} = -\frac{J}{\tau_o} \left(1 - \frac{1}{\tau_o s + 1}\right) \quad (8)$$

여기서, 외란 관측기의 극은 Low-pass Filter의 극에 상당하기 때문에 Filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 작은 추정치를 얻을 수 있고 그림 7과 같이 된다.



[그림 7] 외란 관측기와 외란상쇄제어 블록도

3. 시뮬레이션

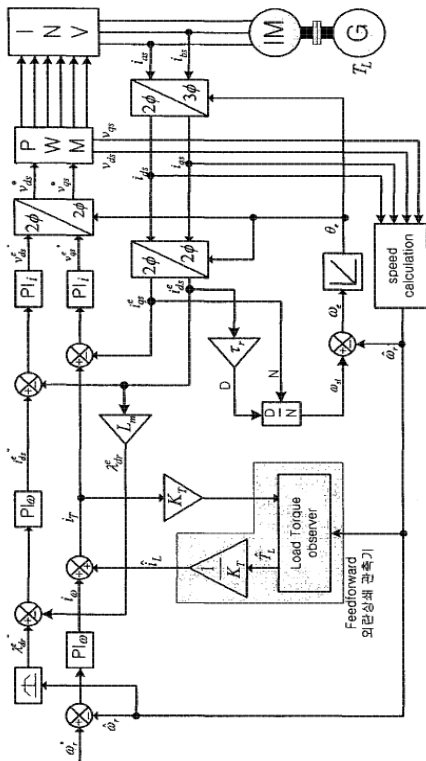
시뮬레이션은 Matlab Simulink를 이용하여 수행하였다. 유도전동기 파라미터는 표 1과 같고, 각각의 제어기 이득 및 변수들은 M-file를 통해 링크하였다. 시뮬레이션에 사용한 전체 시스템의 제어 블록도는 그림 8에 나타내었다.

시뮬레이션은 비례적분 제어기, feedforward 외란상쇄 관측기 시스템에 대해서 각각 저속 및 고속의 모든 속도

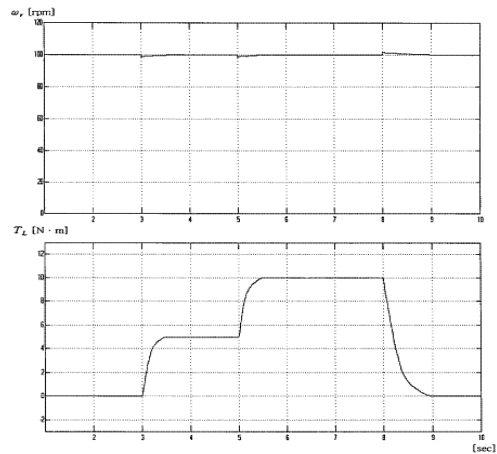
영역과 부하의 가변시의 동작에 대해 알아보기 위하여 스텝적으로 부하를 가변하며 시뮬레이션을 수행하였다. 비례적분 제어기를 이용하여 저속인 100[rpm]으로 구동시의 속도-토크 파형을 그림 9에 나타내었으며 그림 10은 feedforward 외란상쇄 관측기를 적용하였을 경우의 속도-토크 파형을 나타내었다.

[표 1] 유도전동기 파라미터

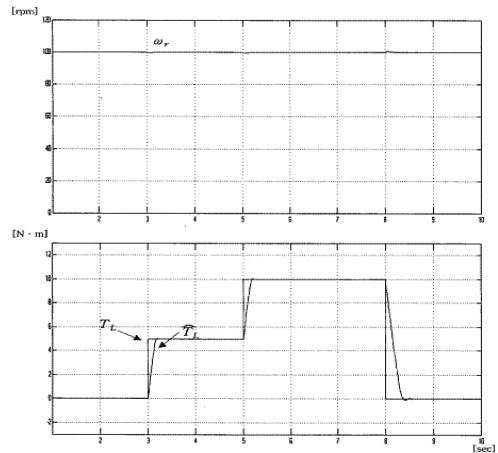
항 목	기호	값
정격출력	kW	3.7[kW]
정격전압	V	220[V]
정격전류	I	12.9[A]
정격속도	ω_{rpm}	1720[r/min]
극수	P	4극
고정자저항	R_s	0.9210[Ω]
회전자저항	R_r	0.5830[Ω]
고정자 인덕턴스	L_s	0.0671[H]
회전자 인덕턴스	L_r	0.0671[H]
상호 인덕턴스	L_m	0.0650[H]
관성 모멘트	J	0.0418[kg · m ²]
마찰계수	B	0.0045[kg · m ² /s]



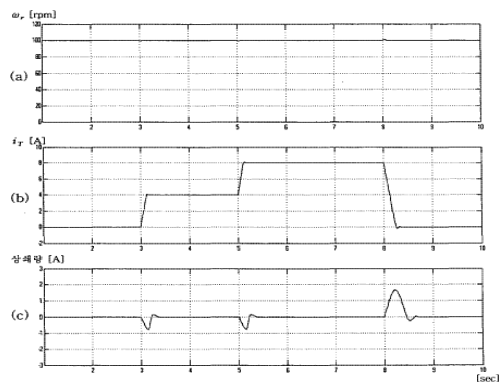
[그림 8] 시스템 제어블록도



[그림 9] 비례적분 제어기의 속도-토크 파형



[그림 10] feedforward 외란상쇄 관측기 속도-토크 파형



[그림 11] Feedforward 외란 관측기의 상쇄량

그림 11은 속도명령을 100[rpm]으로 인가하고, 부하를 스텝적으로 가변하였을 경우의 외란상쇄 관측기에 의한

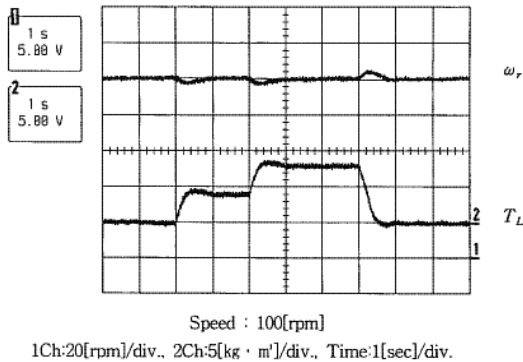
상쇄량으로서 (b)에 나타난 토크전류 i_T 의 진동을 (c)의 상쇄량만큼 상쇄시켜 줌으로서 (a)에서 보는 바와 같이 부하변동에 따른 속도의 변동을 억제하게 된다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 feedforward 외란상쇄 관측기 시스템을 구현하기 위하여 시뮬레이션을 토대로 실제 시스템을 구현하여 실험을 수행하였다. 시스템은 앞 절에서 기술한 제어시스템을 이용하였으며 유도전동기와 3.7[kW] 직류 발전기를 MG 세트로 구성하였다.

시스템의 저속부터 고속까지의 전 속도 영역에서 동작 성능을 알아보기 위하여 저속 영역은 100[rpm]에서, 그리고 고속 영역은 1500[rpm]에 대해 실험을 수행하여 결과를 확인하였다.

그림 12는 비례적분 제어기 시스템에 속도명령을 100[rpm]으로 인가하고 부하를 스텝 적으로 가변 하였을 경우의 출력속도 파형이다. 그림에서 보는 바와 같이 일정 부하일 경우는 원활한 속도를 유지하지만 부하가 스텝 적으로 가변되는 경우에는 속도 변동이 발생하고 정격속도에 도달하는 시간도 오래 걸리는 것을 볼 수 있다.

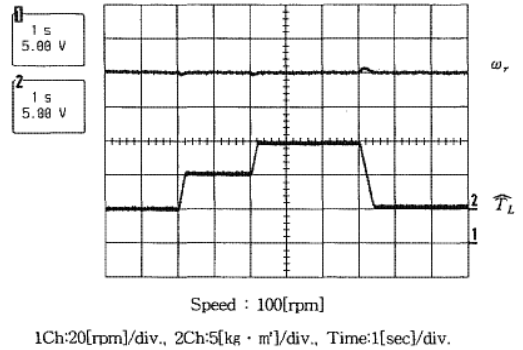


[그림 12] 비례적분 제어기의 속도와 토크파형

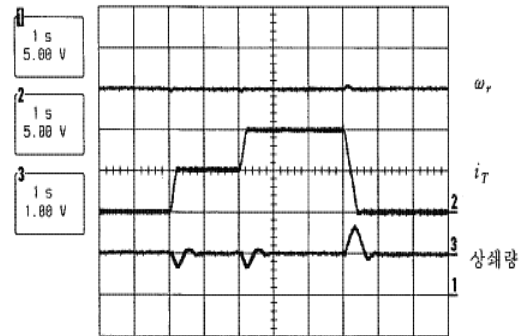
그림 13은 그림에서 보는 바와 같이 PI제어기만의 시스템에 비해 관측기에 의해 부하토크의 변화를 추정하여 제어함으로써 부하의 변동에 따른 속도 변동을 억제하는 것을 보여주고 있다.

그림 14는 PI제어기에 feedforward 외란상쇄 관측기를 부가하여 운전하였을 경우의 속도와 부하전류 i_T 그리고 외란상쇄 제어기에 의해 상쇄되는 양을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 외란상쇄 제어기에 의해 부

하전류 i_T 의 진동을 상쇄된 양만큼 상쇄해 줌으로서 속도의 변동을 억제해 주는 것을 알 수 있다.



[그림 13] Feedforward 외란상쇄 관측기의 속도-토크 파형



[그림 14] Feedforward 관측기의 상쇄량

5. 결론

본 논문에서는 부하외란 변동에 강인한 feed-forward 외란상쇄 관측기를 제안하였고, 기존의 비례적분 제어기와 비교 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 부하외란에 의한 영향을 검토한 결과 기존의 비례적분 제어기에 비해 부하외란을 상쇄시켜 더욱 속도 변동이 억제되었다.
- (2) 부하토크 관측기에 있는 미분항이 없는 형태로 구성하여 feedforward 함으로서 토크 변동과 속도의 변동을 억제할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Hideki Hashimoto and Yuko Ohno, "Torque control of induction motor using predictive observer", IEEE, pp.271-278, 1989.
- [2] Marko Hinkkanen, "Analysis and Design of Full-Order Flux Observer for Sensorless Induction Motors", IEEE 2002, 77 ~ 82, 2002.
- [3] Hou-Tsan Lee, Li-Chen Fu and Su-Hau Hsu, "Adaptive Speed/Position Control of Induction Motor with Unknown Load Torque", Proceedings of American Control Conference Anchorage, pp.4583 ~ 4588, 2002. 5.
- [4] Yen Shine Lai, " Machine Modeling and Universal Controller for Vector-Controlled Induction Motor Drives", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol 18, No. 1, pp 23 ~ 32, 2003. 4
- [5] Satoshi Kadowaki and Kiyoshi Ohishi, "Real-time Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer and Sensor-less Vector Control", PCC-Osaka 2002, pp 1020 ~ 1025, 2002

김 영 춘(Young-Choon Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 대전공업대학교 전기공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 :공주대학교 기계자동차 교수

<관심분야>

전기자동차전력변환, 전장제어, 하이브리드자동차

송 호 빈(Ho-Bin Song)

[정회원]



- 1998년 2월 : 명지대학교 공과대학원 전기공학과(공학 석사)
- 2004년 2월 : 명지대학교 공과대학원 전기공학과(공학 박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 대원대학 전기전자과 겸임교수
- 2007년 1월 ~ 현재 : (주)휴스컴 연구개발팀장

<관심분야>

전력전자, 소방전기, 신재생 에너지

조 문 택(Moon-Taek Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 대원과학기술대학 전기전자과 부교수

<관심분야>

전력변환장치, 대체에너지, 철도차량, 전기자동차