

유도 전동기의 외란 상쇄 관측기를 이용한 부하토크 제어에 관한 연구

황락훈, 장진혁, 나승권, 김영수, 조문택, 송호빈

A Study on Control of Load Torque in the Induction Motor using a Disturbance Cancellation Observer

L. H. Hwang,\* J. H. Jang,\* S. K. Na,\* Y. S. Kim,\* M. T. Cho,\*\* H. B. Song\*\*  
Semyung Univ.\* Daewon Science College.\*\*

**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 using a feedforward control isn't affected by a load torque disturbance. High speed calculation and processing for vector control is carried out by ADMC300 digital signal processor. Validity of the proposed control method is verified through simulation and experimental result.

1. 서 론

PI제어기의 경우 구현이 쉽고 간단하며 제어기 이득을 적절히 조절함으로써 최적의 운전상태를 얻을 수 있다. 그러나 PI제어는 부하외란이나 파라미터 변동에 매우 민감하기 때문에 운전범위에 제한을 받는다. 또한, PI제어는 출력 측에 외란의 영향이 나타나고, 이 외란을 보상하는 시간이 많이 걸리게 된다.<sup>[1]</sup> 외란이 유입되거나 부하토크가 가변 될 경우에는 PI제어기만으로는 안정된 동작 특성을 얻는 것이 힘들게 되어 부가적인 제어기가 필요하게 된다. 이에 본 논문에서는 부하토크를 외란 요소로 간주하여 부하토크 가변시에도 양호한 동작 특성을 얻고자 한다.<sup>[2],[3]</sup> 최소차원 관측기를 이용하여 부하토크를 추정하고, 추정된 부하토크를 feedforward 루프를 통해 상쇄시켜주는 외란상쇄 제어기를 구성하여 외란변동 등의 상황에서도 보다 안정적인 동작을 할 수 있도록 하였다.<sup>[4],[5]</sup> 시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행하였다. 시스템의 응답특성을 알아보기 위하여 시스템 전달함수를 이용하여 Matlab으로 구현하였고, 부하토크의 가변에 대해서 PI제어기 시스템과 외란상쇄 관측기 시스템을 비교 시뮬레이션 하였으며, 관측기 상수 L의 변화에 대한 응답 특성을 시뮬레이션 하여 전체 시스템 모델링과 실험에 사용할 수 있도록 하였다.<sup>[6]</sup> 시뮬레이션에서 얻어진 데이터를 바탕으로 동일한 조건에서 실험을 수행하여 제한한 제어기의 적용 가능성을 알아보았다.

2. 본 론

2.1 최소차원 관측기

관측기는 제어 대상에 대한 입력과 출력으로부터 내부 상태의 특정한 값을 간접적으로 추정하는 방법을 말한다. 관측기는 크게 전 차원 관측기와 최소차원 관측기로 나눌 수 있다. 식 (1)과 같은 2개의 상태를 갖는 상태식을 이용하여 설명할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = Cx = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = x_1$$

식 (1)에서 전 차원 관측기관 상태  $x_1, x_2$  모두를 추정하는 관측기를 말한다. 최소차원 관측기는 상태  $x_1$ 과  $x_2$ 중에서 하나의 상태를 가관측으로 하고 하나의 상태만을 추정하는 관측기를 의미한다. 최소차원 관측기를 이용하면 전 차원 관측기에 비해 관측 상태가 감소함으로써 보다 간단한 관측기를 구성할 수 있다.

식 (1)에서  $x_2$ 의 추정치를 "ζ" 기호를 사용하고, 제어기 모델출력  $\hat{y}$ 와 실제 값  $y$ 에 대한 오차를 고려하여 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + G(\hat{y} - y) \quad (2)$$

식 (1)의 두 번째 항과 식 (2)의 차를 나타내는 오차 방정식은

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \hat{x}_2 - x_2 \quad (3) \\ &= [A_{21}x_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + G(\hat{y} - y)] - [A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u] \\ &= A_{22}(\hat{x}_2 - x_2) + G(\hat{x}_1 - x_1) \\ &= A_{22}(\hat{x}_2 - x_2) + GA_{12}(\hat{x}_2 - x_2) \\ &= (A_{22} + GA_{12})e \end{aligned}$$

여기서  $e$ 는  $\hat{x}_2 - x_2$ 를 의미한다.

따라서  $A_{22}$ 와  $A_{12}$ 가 가관 측 조건을 만족하면 이득 값  $G$ 를 선정함에 따라 관측기의 극을 임의로 배치하는 것이 가능하다. 즉,  $(A_{22} + GA_{12})$ 가 안정되도록  $G$ 값을 선정하면 초기에 관측기의 오차가 존재하더라도  $t \rightarrow \infty$ 이면  $e \rightarrow 0$ 으로 되어 결국에는  $\hat{x}_2 \rightarrow x_2$ 와 같은 성질을 가지게 된다.

그러나, 식 (3)에서 보는바와 같이 출력  $y$ 의 미분이 필요하게 된다. 출력 측의 미분 항을 제거하고, 계산을 간편하게 하기 위하여 매개변수  $\zeta$ 를 도입하면  $\hat{x}_2$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$\hat{x}_2 = \zeta - Gy \quad (4)$$

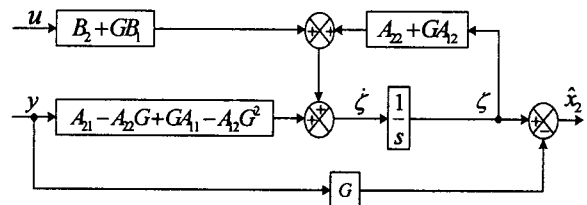
식 (4)를 식 (3)에 대입하여 쓰면

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} - G\dot{y} &= A_{21}y + A_{22}(\zeta - Gy) + B_2u \\ &\quad + G[A_{11}y + A_{12}(\zeta - Gy) + B_1u - \dot{y}] \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있고,  $\zeta$ 에 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= (A_{22} + GA_{12})\zeta + (B_2 + GB_1)u \\ &\quad + (A_{21} - A_{22}G + GA_{11} - A_{12}G^2)y \end{aligned} \quad (6)$$

이 식에 의해 관측기를 구성할 수 있고,  $x_2$ 의 추정치는 식 (4)에 의해 얻을 수 있다. 식 (4)와 식 (6)을 이용하여 최소차원 관측기를 블록도로 나타내면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 1> 최소차원 관측기 블록도

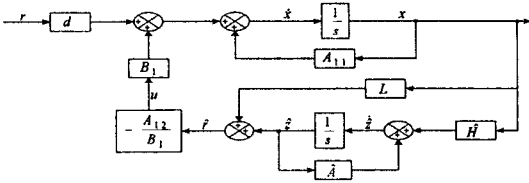
2.2 외란상쇄 관측기

본 논문에서는 최소차원 관측기를 이용하여 유도전동기의 외부에서 인가되는 미지의 부하토크를 추정하고, 이 추정 값을 이용하여 외란상쇄 관측기를 구성하고자 한다. 즉, 외란  $\tau$ 은 측정이 불가능하므로 최소차원 관측기를 이용하여 추정하고자 한다. 식 (1)에서 나타낸 상태방정식과 출력방정식에서  $x_1$ 을 측정 가능한 상태변수  $x_0$ 로,  $x_2$ 를 측정 불가능한 상태변수인 외란  $\tau$ 로 나누어 정리하면 상태방정식과 출력방정식은 식 (7)과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

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

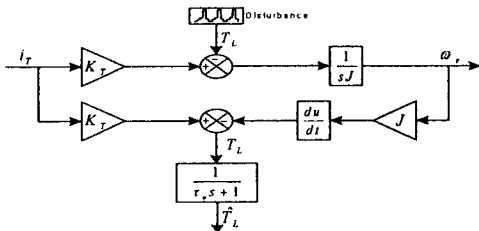
여기서,  $r$ 은 외란이다.



<그림 2> 외란상쇄 관측기 블록도

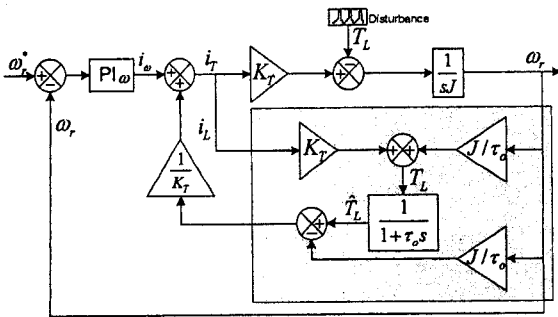
### 2.3 Feedforward 외란상쇄 관측기 설계

압연기 등의 속도 및 위치제어를 발생하는 모션의 분야에서는 대부분의 경우에 지배적인 외란요소는 토크외란이다. 이 외란을 추정할 때는 그것을 forward-back하여 상쇄가 가능하게 되며 외란상쇄 제어를 행할 수 있다. 따라서 그림 2에 나타난 시스템 블록도에서 부하의 외란토크  $T_L$ 을 입력전류  $i_T$ 와 각속도  $\omega_r$ 에서 추정하는 것을 고려한다.



<그림 3> Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정  
<Fig 3> Estimation of disturbance torque through low-pass filter

그림 2에 Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정기의 블록도를 나타내면 그림 3과 같다. 그러나  $\omega_r$ 에서  $\hat{T}_L$ 까지의 전달함수가 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.



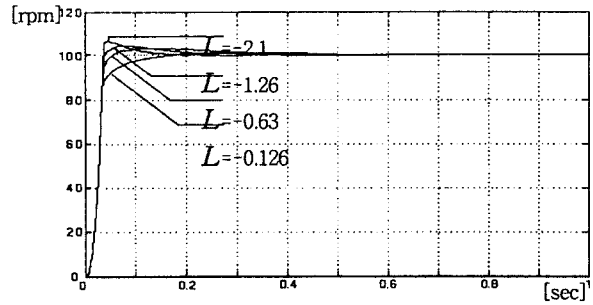
<그림 4> 외란 관측기와 외란상쇄제어 블록도

여기서, 외란 관측기의 극은 Low-pass Filter의 극에 상당하기 때문에 Filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 작은 추정치출 얻을 수 있고 그림 4와 같이 된다.

### 3. 시뮬레이션

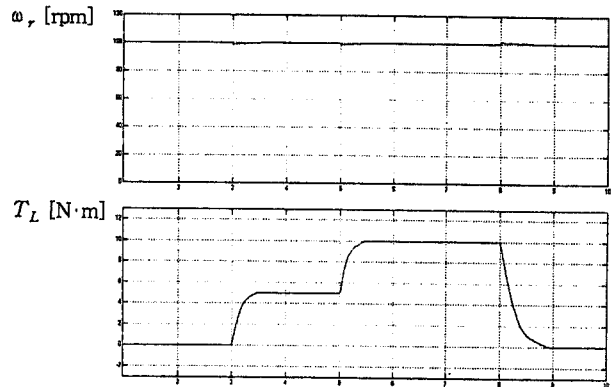
본 논문에서는 제안된 이론을 검증하기 위하여 실험에 앞서 시뮬레이션을 수행하여 이론의 타당성을 입증하였다. 시뮬레이션은 Matlab 6.5의 Simulink를 이용하여 수행하였다. 제안한 외란상쇄 관측기의 동작 성능을 알아보기 위하여 PI제어기 시스템과 비교하여 응답 특성을 알아보았다. 또한, 그림 2의 외란상쇄 관측기 시스

템에서 외란상쇄 파라미터  $L$ 의 값을 변화 시켰을 때 나타나는 응답특성을 시뮬레이션 하면 그림 5와 같다.

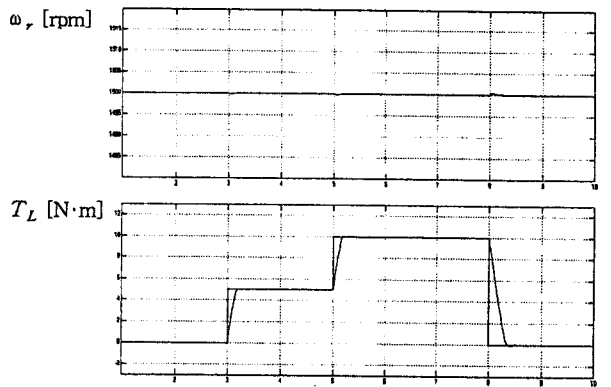


<그림 5> 외란상쇄 파라미터 변화에 따른 속도응답 특성

시뮬레이션은 PI제어기, 부하토크 관측기, feedforward 외란상쇄 관측기 시스템에 대해서 각각 저속 및 고속의 모든 속도영역과 부하의 가변시의 동작에 대해 알아보기 위하여 스텝적으로 부하를 가변하며 시뮬레이션을 수행하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

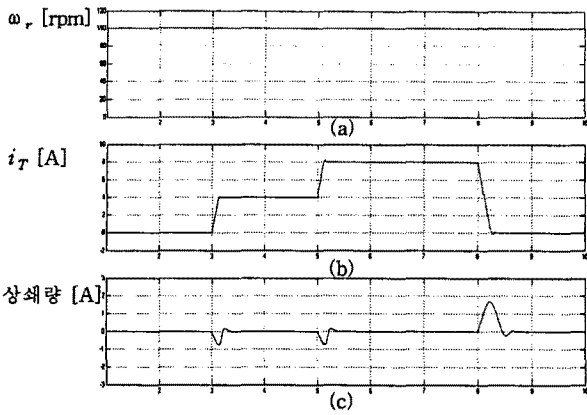


<그림 6> PI제어기의 속도-토크 파형



<그림 7> 부하토크 관측기의 속도-토크 파형

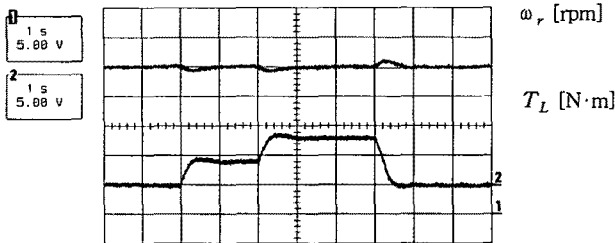
그림 8은 속도명령을 100[rpm]으로 인가하고, 부하를 스텝적으로 가변하였을 경우의 외란상쇄 관측기에 의한 상쇄량으로서 (b)에 나타난 토크전류  $i_T$ 의 진동을 (c)의 상쇄량만큼 상쇄시켜 줌으로서 (a)에서 보는 바와 같이 부하변동에 따른 속도의 변동을 억제하게 된다.



〈그림 8〉 Feedforward 외란상쇄 관측기의 상쇄량

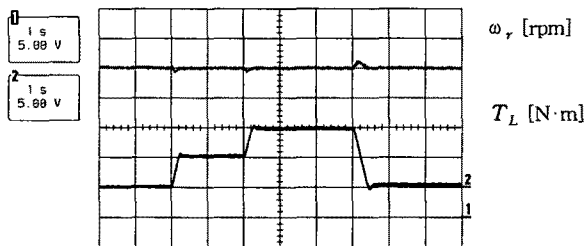
#### 4. 실험결과

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.



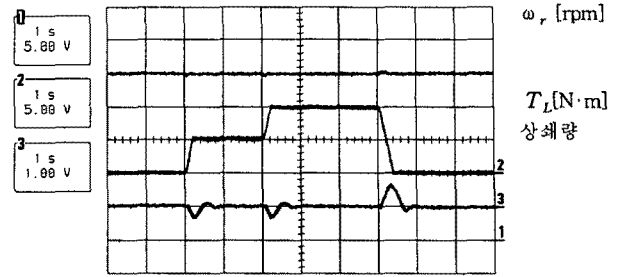
〈그림 9〉 PI 제어기의 속도와 토크파형(Speed : 100[rpm])

그림 9는 PI제어기 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 정적 속도에 도달하는 시간도 오래 걸리는 것을 볼 수 있다.



〈그림 10〉 PI제어기의 속도-토크 파형(Speed : 100[rpm])

그림 10은그림에서 보는 바와 같이 PI제어기만의 시스템에 비해 관측기에 의해 부하토크의 변화를 추정하여 제어함으로써 부하의 변동에 따른 속도 변동을 억제하는 것을 보여주고 있다.



〈그림 11〉 Feedforward 외란상쇄 관측기의 상쇄량

그림 11은 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 부하전류  $i_T$ 의 진동을 상쇄된 양만큼 상쇄해 줌으로써 속도의 변동을 억제해 주는 것을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 부하외란 변동에 강한 속도제어기를 구현하기 위하여 부하토크 외란 관측기를 적용한 feedforward 외란상쇄 관측기를 제안하였고, 제안한 방법을 5[Hp] 유도전동기 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 부하외란에 의한 영향을 검토한 결과 기존의 PI제어기에 비해 feedforward 외란상쇄 관측기를 사용하였을 때 부하외란을 상쇄시켜 더욱 더 속도 변동이 억제되었다.
  - [2] 부하토크 관측기에 있는 미분항이 없는 형태로 구성하여 feed-forward 함으로서 토크 변동과 속도의 변동을 억제할 수 있었다.
  - [3] 전통적인 제어기와 종래의 최소차원 관측기보다 제어기 설계가 간단하게 이루어짐을 확인하였다.
- 앞으로의 과제는 다른 파라미터의 변동에도 강인하게 동작하는 간단한 제어기 등에 관한 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

#### 〈참 고 문 헌〉

- [1] 서영수, "전동력 제어", 도서출판 대경 pp 291-394, 1999.3
- [2] M. Iwasaki and N. Matsui, "Robust speed control of IM with torque feedforward control", *IEEE Trans. Ind. Electronic*, Vol 40, No 6, pp 553-554, 1993
- [3] 서영수, 임영배, 김영춘, 성대용, 김종균, "부하토크 피드포워드 제어를 이용한 유도전동기 속도제어", *전력전자학회지*, 제3권, 제2호, pp 99-106, 1998.6
- [4] Satoshi Kadowaki and Kiyoshi Ohishi, "Re-adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer and Sensor-less Vector Control", *PCC-Osaka 2002*, pp 1020-1025, 2002
- [5] 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