

## 2자유도 제어를 이용한 유도전동기 속도제어

### Speed Control for an Induction Motor Using a 2 Degree-of-Freedom Controller

황 대 규\*      오 태 석\*\*      김 일 환\*\*\*  
Hwang, Dae-Kyu    Oh, Tae-Seok    Kim, Il-Hwan

---

#### Abstract

This paper describes a design of an induction motor control system using a 2 degree-of-freedom PI controller to compensate the effects of disturbance without degrading tracking performance. On the basis of vector control principle, the control system is simulated by using the ACSL and implemented on a DSP system(TMS320C31). In designing the 2 DOF controller, we can tune the performance of either the tracking or disturbance rejection independently without affecting the other. With the experimental results, the 2 DOF controller has shown a better performance in command tracking and disturbance rejection than a conventional PI controller.

Keywords : *induction motor, vector control, 2 DOF controller*

---

#### 1. 서론

산업용으로 많이 사용되고 있는 유도전동기는 직류전동기와 같이 brush와 정류자를 필요로 하지 않기 때문에 대 전류에 의한 brush나 정류자의 마모가 없어 유지, 보수가 필요 없고, 회전자에 자석을 사용하지 않기 때문에 자석의 감자작용이 없는 이상적인 전동기라 일컬어진다. 또한 유도전동기는 가격대 성능비가 높고 수명이 길며, 견고한 장점이 있다. 이러한 유도전동기가 갖는 고유의 구조적인 장점과 최근의 파워 일렉트로닉스 기술의 발전에

힘입어 유도전동기는 제어 분야에 있어서도 정속도 전동기가 아닌 직류전동기를 대체하는 가변속 전동기의 지위를 이미 확립하고 있다. 고로 최근 유도전동기 제어에 대한 연구가 많이 진행되어지고 있다. 속도서보 제어기에서는 시스템의 안정성과 더불어 속도 지령치에 대한 양호한 추종특성 및 모델링 오차를 포함한 부하의란 인가 시 이를 신속히 억제하는 양호한 외란 억제특성이 동시에 요구된다. 그러나 PI제어기에 의한 속도 제어기 및 전류제어기 설계 시 이러한 상충된 두 요구를 동시에 충족시키는 것이 용이하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 2자유도제어법이 사용되어지고 있다. 2자유도제어는 지령치에 대한 추종특성과 제어대상의 외란에 대한 제어특성을 독립적으로 설계하므로 외란에 대해 능동적으로 대처할 수 있다.[1][3][6]

---

\* 강원대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정

\*\* 강원대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정

\*\*\* 강원대학교 제어계측공학과 교수, 공학박사

또한 기존의 PI제어로는 달성하기 어려운 일정 평가함수에 대한 최적성을 보장하는 최적제어계의 설계가 가능하게 된다. 본 논문에서는 유도전동기의 속도 제어성 향상을 위해 속도 제어기에 대한 특성 및 제어기 설계에 대한 연구를 하였다. 기존의 PI이 제어기법이 가지고 있던 단점으로는 속도 지령의 스텝변화에 대한 속도응답 오버슈트를 작게 하고, 동시에 부하 토크의 스텝변화에 대한 응답의 회복 시간도 짧은 속도제어기를 실현하는 것이 불가능하였다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방식으로 2자유도 제어기법을 적용하여 속도의 응답성과 토크외란에 대한 응답 성능을 독립적으로 제어 할 수 있게 하였다. 유도전동기의 벡터 제어의 개념과 함께 모델링방법 그리고 시뮬레이션을 통하여 두 제어기의 결과를 비교하였다.[7] 또한 유도전동기 시스템에 적용하여 성능평가를 해보았다.

2. 제어기

그림 1은 전동기의 속도제어기로 사용되고 있는 비례적분제어기의 일반적인 블록도를 보인 것이다.

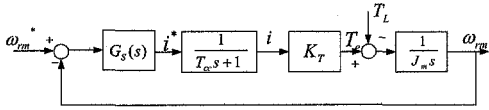


그림 1. 비례적분속도제어기

제어기의 전달함수는 식(1)과 같다.

$$G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \tag{1}$$

여기서  $K_{sp}$ ,  $K_{si}$ 는 각각 비례이득 및 적분이득을 나타낸다. 속도제어기는 개루프 전달함수  $G_{sc}^o(s)$ 의 주파수 특성을 이용한 근사법으로 설계한다. 그림 1의 PI 속도제어계의 개루프 전달함수  $G_{sc}^o(s)$ 는 식(2)와 같다.

$$G_{sc}^o(s) = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{1}{\frac{L_s}{K_i}s + 1} \cdot \frac{K_T}{J_M s} \tag{2}$$

기준속도(Reference Speed) 변동에 대한 응답은 아래 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_{rm}(s)}{\omega_{rm}^*(s)} = \frac{K_T K_{sp} s + K_T K_{si}}{J_m s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} = \frac{\frac{K_T K_{sp}}{J_m} s + \frac{K_T K_{si}}{J_m}}{s^2 + \frac{K_T K_{sp}}{J_m} s + \frac{K_T K_{si}}{J_m}} \tag{3}$$

전달 함수의 영점의 영향에 의해서 계단(step)적인 속도 지령이 인가된 경우 과제동으로 설계되어 있더라도 진동적인(Oscillatory) 응답이 나타난다. 이러한 진동적인 응답은 속도 제어 성능에 있어 문제가 될 수도 있다. 그림 2에서 기준 명령 응답에 대해서는  $G_1(s)$ 를 이용하여 기준 속도 변동에 대해 원하는 응답을 얻고 외란에 대해 강인한 응답은  $G_2(s)$ 를 설계하여 달성할 수 있는 특성을 지니게 된다.

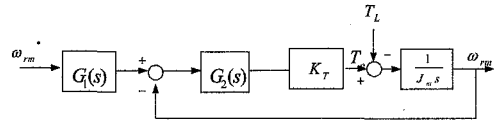


그림 2. 2자유도 제어기(일반형)

PI 속도제어기는 속도지령  $\omega_{rm}^*$ 의 지령에 대한 모터속도  $\omega_{rm}$ 의 응답의 오버슈트를 작게 하면서도, 부하토크  $T_L$ 에 대한 응답의 회복시간을 짧게 하는 속도제어를 실현하는 것이 곤란하다. 이 문제를 해결하기 위한 제어방식으로서 2자유도 속도제어기를 사용한다.

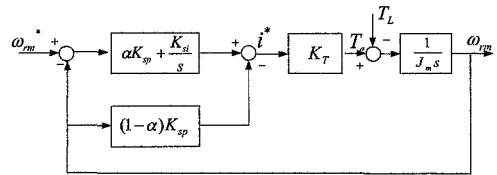


그림 3. 2자유도 속도제어기

위의 그림 3은 PI속도제어기와 IP속도 제어기를 혼합하여 사용하는 속도제어기를 나타내게 된다.

이 제어기에서의 속도지령  $\omega_{rm}^*$  및 부하토크  $T_L$ 에 대한 모터속도  $\omega_{rm}$ 의 전달함수를 구하면 각각 다음과 같다.

$$\frac{\omega_{rm}(s)}{\omega_{rm}^*(s)} = \frac{K_T(\alpha K_{sp}s + K_{si})}{J_M s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} \tag{4}$$

$$\frac{\omega_{rm}(s)}{T_L(s)} = -\frac{s}{J_M s^2 + K_T K_{sp} s + K_T K_{si}} \tag{5}$$

이들의 전달함수에서 이득  $K_{sp}$  및  $K_{si}$ 의 값을 설정하면, 식(5)의 전달함수에서 알 수 있듯이 부하토크  $T_L$ 에 대한  $\omega_{rm}$ 의 응답특성은 결정되지만, 속도지령  $\omega_{rm}^*$ 에 대한  $\omega_{rm}$ 의 응답특성은 이득

$K_{sp}$  및  $K_{si}$ 의 값이 결정되어도 파라미터  $\alpha$ 의 값을 조절하는 것에 의해 변화되는 것을 알 수 있다. 즉, 부하토크  $T_L$ 에 대한 모터속도  $\omega_m$ 의 응답은 파라미터  $\alpha$ 와는 관계가 없으므로  $\omega_m^*$  및  $T_L$ 에 대한 응답특성을 독립적으로 설정할 수 있다. 이와 같이 그림 3의 제어기는 2개의 응답특성을 독립적으로 설정 가능한 까닭으로 2자유도제라 불리고 있다. 이렇게 2자유도 속도제어기를 구성하면, 속도지령  $\omega_m^*$ 의 스텝변화에 대한 모터속도  $\omega_m$ 의 오버슈트가 작고, 부하토크  $T_L$ 에 대한 응답의 회복시간이 작은 이상적인 속도제어를 실현할 수 있다. 다만, 2자유도 속도제어기는  $\alpha=1$ 이면, 1자유도의 PI제어제대로 된다. 두 제어기의 비교분석을 통하여 Matlab 시뮬레이션을 이용하고, 실험을 위하여 TMS320C31을 이용하여 하드웨어를 구성하여 결과를 비교한다.[7][8]

### 3. 하드웨어 구성

그림 4는 본 논문에 사용한 하드웨어 구성을 나타내는 블록 선도를 보인 것이다.

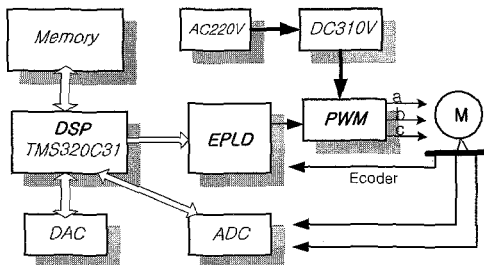


그림 4. 하드웨어 구성

DSP보드는 Texas Instrument(T.I.)사의 DSP TMS320C31-50MHz를 이용하고 있다. 부동소수점 연산방식이며, 연산속도는 1명령 실행 당 40[ns]이다. 디지털 회로는 DSP, Altera사의 EPLD, 메모리 등을 포함한 회로로 구성되었다. 모터제어에 필요한 gate신호와 protection 기능 및 속도측정을 위해 EPLD가 사용되어진다. DSP의 주변 회로는 리셋 및 전원감시회로, 직렬 부트로더 등이 포함되어 있다. EPLD는 EPF10K10, 디코더용으로 EPM-7064를 사용하였다. 아날로그 회로는 입출력회로로써 A/D, D/A 및 각종 필터회로로 구성되었다.

ADC는 8채널용으로 사용되었으며 전류 센싱으로 3개를 사용하고 DC link 전압 센싱에 1개를 사용하였다. 디지털 값을 사용하여 과전압, 과전류 등의 보호를 할 수 있다. 디지털 입출력 회로는 시스템의 제어에 필요한 각종 디지털신호를 입출력하며, 시스템의 상태신호를 전달하는 기능도 한다. 따라서 외부의 장치와 시스템간의 데이터 전달도 가능하다. 이 회로는 외부의 잡음이 시스템에 전달되는 것을 막기 위해 포토커플러(photo-coupler)를 사용한다. 논문에서 사용한 Encoder는 393pulse/rev의 정도를 갖는 마그네틱 Encoder이다. A상과 B상이 출력되며 입력전압은 +5V, -5V, 0V이다. 전류센서는 LEM사의 LA55-P를 사용 하였으며 1:1000의 비율로 스케일이 된다. 비 접촉식 센서로서 1차측에 흐르는 전류를 센싱 하여 2차측에 전달하는 방식이며 성능이 우수하다. 외부로부터 아날로그 신호를 받아들이는 최초 입력 단에는 차동 증폭 회로를 사용하여 Common Mode 잡음을 효과적으로 제거하도록 하였다. 실제 구성한 하드웨어 장치를 그림 5의 사진과 같이 구성하였다.

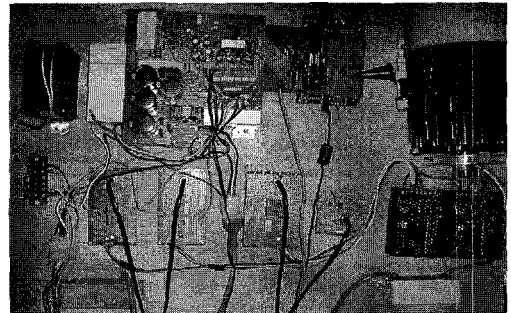


그림 5. 시스템 장치

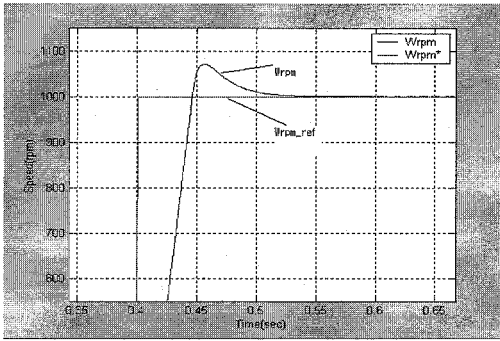
### 4. 시뮬레이션 결과

PI제어법 및 2자유도 제어법을 비교하기 위해 0.4초에 1000[rpm]의 스텝지령을 주고 0.4초~3초까지는 등속도를 유지하는 입력을 가했다. 외란 토크는 0.8초에 스텝입력으로 0.2 [N·m]을 가했다.

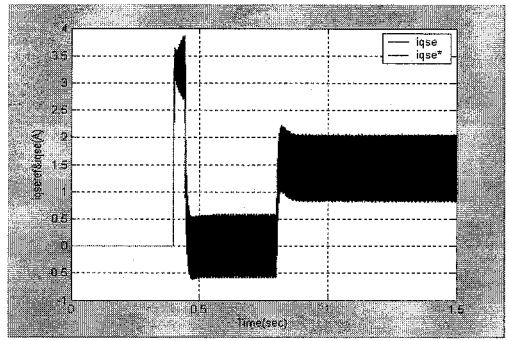
PI 속도제어제기 교차각 주파수  $\omega_{sc}$  를 200rad/sec로 하고 PI 절점 주파수  $\omega_{pi}$ 는 40rad/sec( $\omega_{sc}/5$ )로 설정하면, 속도제어기의 비례이득  $K_{sp}$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.  $K_{sp}=0.2859$ 이다.

$$K_{sp} = \frac{J_M \omega_{sc}}{K_T} \quad (6)$$

적분이득  $K_{si}$ 는  $\omega_{pi} = K_{si}/K_{sp}$ 에 의해 11.4368이 된다.

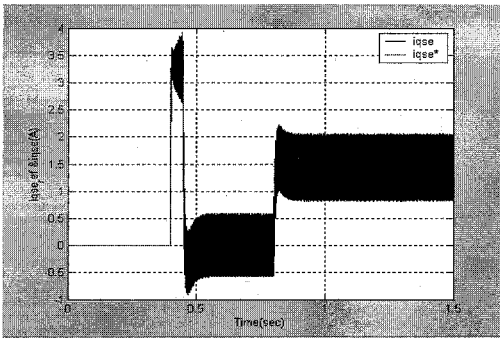


(a) 스텝응답



(b) 전류응답

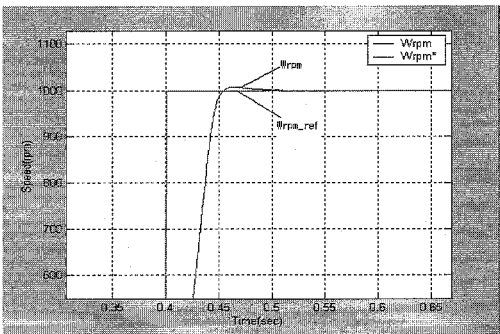
그림 7. 2자유도 제어기



(b) 전류응답

그림 6. PI 제어기

위의 그림 6은 PI속도 제어기에서의 게인 및 교차각 주파수를 설정하여 속도지령에 따른 응답 파형과 전 시뮬레이션 구간에서의  $d-q$ 좌표계에서의 전류응답이다. 파형에서 알 수 있듯이 스텝응답에 대한 오버슈트가 크고 외란 토크에 대한 반응속도가 느린 결과를 보인다. 시뮬레이션 결과로써  $\alpha$ 값을 크게 하면 정상상태 도달시간은 빠르나 오버슈트가 크다는 것을 알 수 있다.



(a) 스텝응답

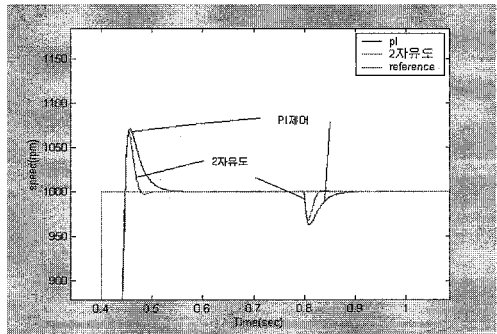


그림 8. 스텝응답과 부하외란에 대한 응답

그림 8에 보인 2자유도 제어기의 속도지령과 외란에 대한 응답 파형을 보면 알 수 있듯이 두 개의 특성이 모두 좋아진 것을 볼 수 있다. 이는 2자유도 제어기의 전달함수로부터 비례이득  $K_{sp}$ 과 적분이득  $K_{ib}$ 을 설정하면 부하 토크에 대한 속도의 응답성은 결정되지만 이 응답성이 결정되어도 파라미터  $\alpha$ 값을 조절하면 속도지령에 대한 응답특

성을 개선할 수 있다. 즉, 속도와 부하토크에 대한 응답 성능을 독립적으로 설정이 가능하다는 뜻이다. 이것이 2자 유도 제어기의 특성이다.

### 5. 실험 결과

실험에 사용한 지령은 속도지령으로 100ms동안 0rpm에서부터 1500rpm까지 속도가 상승하도록 하는 ramp 지령을 주고 실험을 하였다. 일반적으로 산업계에 사용하는 기기제어에서는 지령으로 ramp 지령을 사용하기 때문에 본 논문에서는 위와 같이 지령을 주었다. 그림 9와 그림 10은 위의 절에서 설명한 하드웨어와 소프트웨어를 이용하여 행한 시험결과를 보여주고 있다. 속도지령에 따른 속도

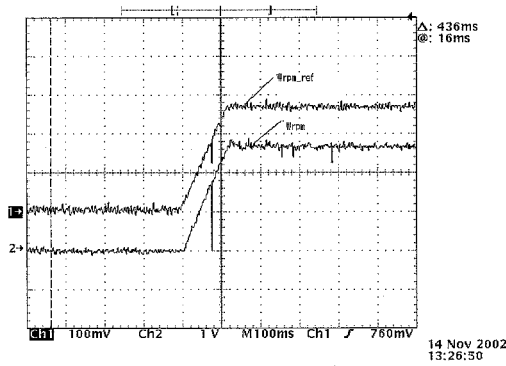


그림 9. PI제어기

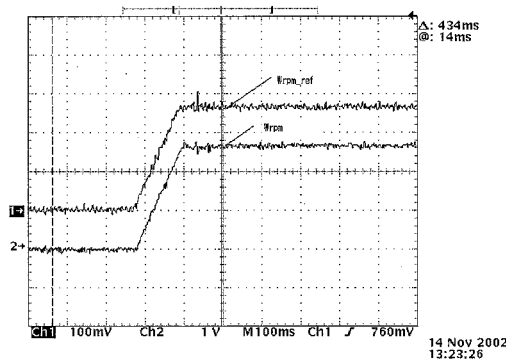


그림 10. 2자유도제어기

응답 파형이다. 그림 9는 PI제어기의 응답파형을 보였다. 위의 파형이 속도 지령이고 아래의 파형이 응답파형이다. 그림 10은 2자유도 제어의 속도 응답파형이다. 마찬가지로 지령치와 응답파형을 보는데 속도응답파형의 오버슈트가 조금 줄어든 것을 볼 수 있다. 그림 11과 그림 12는 시뮬레이션을

이용한 실제 데이터를 측정된 것이다. 파형에 리플이 섞여있지 않아서 결과를 확실하게 볼 수 있다. 이 실험은 약 2500rpm의 지령을 주고 측정된 파형이다. 위의 결과와 마찬가지로 2자유도 제어기를 사용한 결과가 오버슈트가 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

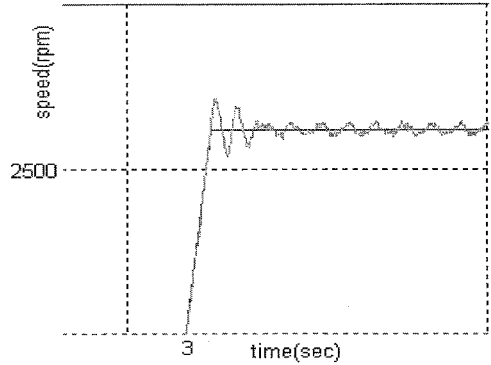


그림 11. PI 제어기

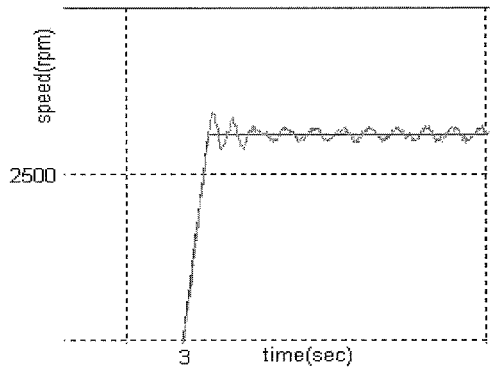


그림 12. 2자유도 제어기

### 6. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 속도 제어성 향상을 위해 속도제어기에 2자유도 제어기법을 적용하고 그 결과를 기존의 PI제어기와 비교 분석하였고 시스템에 적용하였다. 2자유도 제어기법은 PI제어법이 갖는 지령치 추종특성과 외란 억제특성간의 상충 문제를 해결하고, 제어계의 최적성을 확보하고자 도입되었으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유효성을 확인하였다. 속도응답과 부하외란에 대한 응답 성능을 독립적으로 설정이 가능하게 되었다. 이렇듯 추종특성과 외란 억제특성간의 상충 문제를 해결할 수 있었다. 본 제어기를 이용하여 유도

전동기 시스템에 적용하여 실험한 결과, 제어에 있어 속도 성능을 향상 시킬 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Araki, "2자유도 제어계- I-PID 미분선행형 I-PD 제어계의 통일적 견해에 대하여", 시스템과 제어, Vol. 29 No. 10, pp 649~656, 1985
- [2] R. D. Lorenz and D. B. Lawson "Performance of Feed Forward Current Regulators for Field Oriented Induction Machine Controllers" 1986, IEEE
- [3] T. Sugie and T. Yoshikawa, "General solution of robust tracking problem in two-degree-of-freedom control systems", IEEE Trans. Automat. Contr., vol.
- [4] Shu Yamamoto 외 4인, "A Design of Two-Degree-of-Freedom PID Position Controller for Linear Servo Motor Drivers", T.IEE Japan. Vol. 116-D, No.8, pp. 868~873, 1996
- [5] Tewodros Tesfaye, Yasuzumi Ochiai, "Two-degree-of-freedom I-PD Position Controller Design for a Linear Pulse Motor Driver by Controller Diagram Method,(CDM)", ICARCV'98 pp. 434~438, 1998
- [6] 권혁진, 김영복, 정석권, "2자유도 제어기법을 이용한 BLDC 모터의 속도제어", 한국동력기공학회 춘계학술논문집, pp. 325~331, 1999
- [7] Field Oriented Control of 3-phase AC-Motor Texas Instrument.
- [8] Space-Vector PWM with TMS320C24x Using H/W & S/W Determined Switching Pattern TI.