

유도전동기 속도제어를 위한 비선형 비례적분 제어기 설계

Design of Nonlinear PI Controller for velocity Control of IM

오태석*, 최준배**, 김일환***
 (Tae-Seok Oh*, Joon-Bae Choi**, Il-Hwan Kim***)

Abstract - This paper presents a robust speed control method of induction motors(IM) using a Non-linear PI controller(NPI), NPI is high gain controller in region of small error, and low gain controller in region of large error. so in steady state, system will be robust against variation of load torque. The simulation and experiment results confirm the validity of proposed control scheme.

Key Words :Velocity Control, Nonlinear PI Control, Induction Motor, Vector Control

1. 서론

유도전동기의 속도제어기로는 일반적으로 비례적분 제어기(PI)가 이용되고 있는데 이는 그 구조가 간단하고 구현이 쉽기 때문이다. 그러나 유도전동기의 적용 범위가 점차 확대됨에 따라 보다 고성능의 속도제어기가 요구되고 있다. 고성능 제어기는 빠른 토크 응답특성, 고정밀도를 갖는 제어기라고 할 수 있으며 이를 구현하기 위해서는 전류제어기에 순시 토크제어가 가능한 벡터제어를 사용하며 속도제어기에서는 정밀한 속도측정, 부하외란 보상, 모터 및 기계의 파라미터 추정 보상 등이 필요하다[1-3]. 속도제어기는 부하에 대한 정확한 수식과 그것을 기반으로 제어기를 설계하면 우수한 제어기를 설계할 수 있으나 부하에 대한 정확한 파라미터를 알 수 없으며 또한 사용 용도에 따라 변화하기 때문에 오차가 발생하게 된다. 따라서 모델 오차를 수정할 수 있도록 제어기를 설계하여야만 한다. 특히 부하의 변동은 어느 정도 추정을 할 수는 있으나 관성능률의 정확한 추정은 어렵다. 본 논문에서는 증분형 엔코더 사용으로 생기는 시간지연 문제 해결과 능동적인 부하토크 보상을 위하여 기존의 전차원 관측기를 사용하고 기존의 비례적분제어기 대신 비선형 비례적분제어기를 제안하여 정상상태에서 부하 변동에 강한 특성을 낼 수 있도록 하였다. 모의실험 및 실험을 통하여 속도상태 관측기와 제안된 비선형 비례적분제어기를 같이 사용한 경우의 결과를 보여준다.

2. 본론

2.1 기존 PI 속도제어기 설계

PI 속도제어기 파라미터의 설정은 전류제어기를 1차 지연 필터로 생각하고 개루프 전달함수를 구하면 식(1)과 같다.

$$G_{sc}(s) = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{w_{cc}}{s + w_{cc}} \cdot \frac{K}{Js} \quad (1)$$

여기서 w_{cc} 는 전류제어기의 대역폭이고 K_{sp} , K_{si} 는 속도제어기의 비례, 적분이득이다. 전류제어기의 대역폭(w_{cc})이 속도제어기의 대역폭(w_{sc})보다 훨씬 크다고 가정하면 전류제어기의 전달함수는 1로 생각할 수 있다. PI제어기의 cut-off 주파수 (w_{pi})는 식(2)와 같다.

$$w_{pi} = \frac{K_{si}}{K_{sp}} \quad (2)$$

w_{pi} 가 w_{sc} 의 1/5이하이면 w_{sc} 부근에서 속도제어기는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$G_{sc}(s) = (K_{sp}) \cdot \frac{K}{Js} \quad (3)$$

식(3)에서 $\|G_{sc}(jw)\|=1$ 이 되도록 설정하면 속도제어기의 대역폭은 w_{sc} 가 된다. 따라서 속도제어기의 이득은 식(4)와 같다.

$$K_{sp} = \frac{Jw_{sc}}{K}, \quad K_{si} = K_{sp} \cdot w_{pi} = K_{sp} \cdot \frac{w_{sc}}{5} \quad (4)$$

식(4)로부터 PI제어기의 제어기 이득은 관성 능률, 토크상수 및 제어기의 대역폭에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 부하의 외란이 발생했을 때 제어기의 대역폭을 최대한 크게 하면 외란에 강한 제어기의 설계가 가능하다.

2.2 제안된 비선형 PI 속도제어기

제어기의 목적은 시간이 흐를수록 오차가 작아지는 것이다. 다음의 식은 선형제어기와 비선형제어기의 정상상태 오차를 비교한다. 외란이 w_0 인 시스템을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e} = w_0 + u \quad (5)$$

일반적인 선형 비례제어기의 입력은 식(6)과 같고 비선형

* 江原大學 制御計測工學科 工博
 ** 江原大學 電氣電子情報通信工學部 學士課程
 ***江原大學 電氣電子情報通信工學部 副教授·工博

제어기의 입력은 식(7)과 같다.

$$u = -Ke \quad (6)$$

$$u = -K \cdot |e|^\alpha \cdot \text{sign}(e) \quad (7)$$

위의 식에서 이득(K)이 10이고 모든 시간에 대해 외란의 절대 값이 1보다 작을 때 정상상태 오차를 구해보면 선형 제어기는 0.1보다 작게되고 비선형제어기는 α 의 값에 따라 달라진다. α 의 값이 1/2일 경우 정상상태 오차는 0.01이 되고 1/3일 경우 0.001이 되며 α 값이 0에 가까울수록 정상상태 오차는 줄어들게 된다. 이러한 이유는 오차가 작을수록 더 높은 이득으로 변화되고 오차가 클수록 작은 이득으로 변화하기 때문이다.

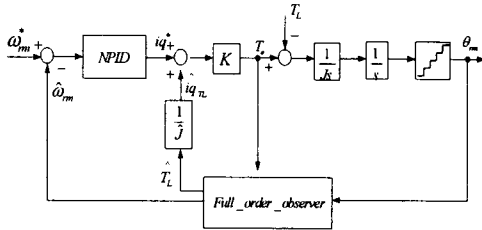


그림 3 제안된 방법의 제어기 구조

비선형 PID제어기는 오차에 따라 이득을 비선형적으로 변하게 하는 제어기이다. 비선형제어의 방법은 퍼지제어, 게인 스케줄링, 또는 다른 비선형 방법들에 의해서 많이 시도되었다. 오차를 필요한 부분에서 조정하여 시스템 제어의 특성을 원하는 방향으로 바뀌게 하고자 할 때 쓰일 수 있는 방법이다. 본 논문에서의 비선형 PI제어기의 목적은 정상상태에서 시스템의 부하가 바뀌었을 때 부하변동으로 인한 성능저하를 개선하고자 하는 것이다. 기존의 PI제어기보다 강한 제어 특성을 얻기 위해서는 대역폭을 최대로 증가시키거나 부하변동을 정확히 추정하여 제어기에 반영을 시켜주는 방법이 있다. 부하 변동의 정확한 추정은 구현하기 어려울 뿐만 아니라 잘 못 추정하였을 경우 시스템을 불안정하게 만들 수도 있다. 전구간의 대역폭을 증가시키는 것은 전구간에서의 특성을 저하시킬 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 일정한 영역의 대역폭만을 변화시켜 원하고자하는 특성을 만족시킬 수 있도록 비선형 PI제어기를 설계하였다. 오차가 작은 부분에서는 상대적으로 대역폭이 커지고 오차가 큰 부분에서는 대역폭이 작아지는 것이 되고 정상상태에서 대역폭이 커지게, 즉 제어 이득이 커지게 되어 외란억제 능력을 개선할 수 있게 된다. 그림3은 비선형 PI제어기의 블록도를 나타낸다. 2자유도 PI제어기에서 외란토크에 대한 속도의 관계식은 식(8)과 같이 표현된다.

$$\frac{w_{rm}}{T_L} = \frac{s}{Js^2 + KK_{np}s + KK_{si}} = \frac{s}{(s + w_c)^2} \quad (8)$$

식(8)에서 외란토크의 영향을 줄이기 위하여 제어기의 차수를 늘리거나 또는 대역폭이 커지면 외란에 대하여 강한 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 정상상태에서 대역폭을 커지게 하여 외란토크에 좀 더 강한 특성을 갖도록 구현하였다. 일정구간에서 대역폭이 매우 커지는 것은 시스템이 불안정해지기 때문에 대역폭을 제한할 필요가 있다.

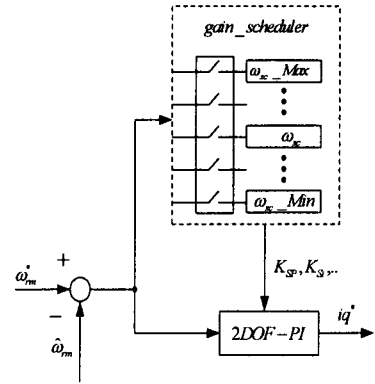


그림 3 제안된 비선형 PI제어기 구조

그림3은 제안된 비선형 PI제어기 구조를 보여주며 gain scheduler에서 속도 오차에 대하여 대역폭을 결정하고 결정된 대역폭에 따라 비례적분 이득을 수정하는 방법으로 오차에 대하여 이득이 변경되도록 설계되었다.

모의 실험 및 실험을 통하여 제안된 방법이 정상상태에서 부하에 대하여 강한 제어 특성을 갖고 전체적인 속도제어 특성도 안정되게 나타나는 것을 검증하였다.

2.3 실험시스템 구성

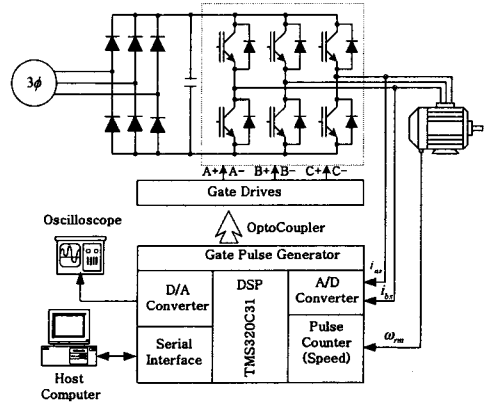


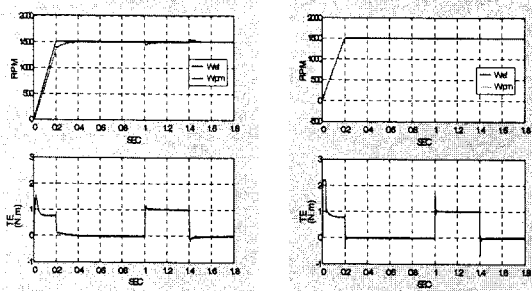
그림 3 실험 시스템 구성

전동기의 구동은 벡터제어를 기본 원리로 Texas Instrument사의 DSP, TMS320C31(50MHz)를 이용하여 전류 제어, 속도제어, 자속추정, 부하토크추정 등을 소프트웨어로 구성하였다. 전류 측정은 Hall 센서를 이용하여 12Bit A/D 변환기를 통하여 입력하였고 속도측정은 광학식 엔코더(1024 Pulses/Revolution)를 이용하여 M/T방법에 의하여 측정하였다. 4채널 D/A 컨버터는 오실로스코프를 통한 디버깅을 위하여 사용되었다. 전력변환부는 크게 나누어 전압형 PWM IGBT 인버터, 400W 유도전동기, 부하 장치인 400W 직류 전동기로 구성되어 있다. 인버터는 페어차일드사의 600V, 20A 용량의 IGBT 모듈을 사용하여 제작하였다. 과전류(over current), 회로 단락(short circuit), 저전압(low voltage)에 대한 검출 및 차단기능, DB(dynamic braking)은 외부에 회로를

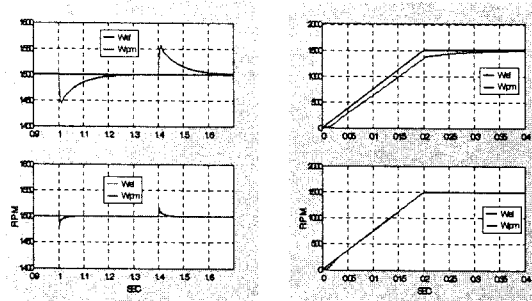
부가하여 제작하였다. 전동기의 상전류를 검출하기 위하여 LEM사의 CT(current transducer) LA-25를 두개 사용하였다. 게이팅 회로, 엔코더 펄스 입력, DIO 등을 위하여 EPLD(erasable programmable logic Device)를 이용하여 구현하였다

2.4 모의실험결과

모의실험은 matlab simulink를 이용하였다.그림 4는 일반적인 2자유도 PI제어기와 제안된 비선형 PI제어기의 모의실험 결과 파형이다. 파형은 속도지령과 실제속도, 지령토크를 나타내며 속도지령은 0초에서 200ms 동안에 0rpm에서 1500rpm까지 ramp 지령이다. 그리고 시간이 1초에서 1.4초까지 1 N·m의 부하외란을 인가했을 때의 파형이다. 기존의 PI제어기의 경우 지령 특성 및 외란토크 특성에서 지령과의 오차가 제안된 방법에서 보다 크게 나타나고 있다.



(a) 기존의 비례적분제어기 (b)비선형비례적분제어기
그림4 비례적분제어기 비교1

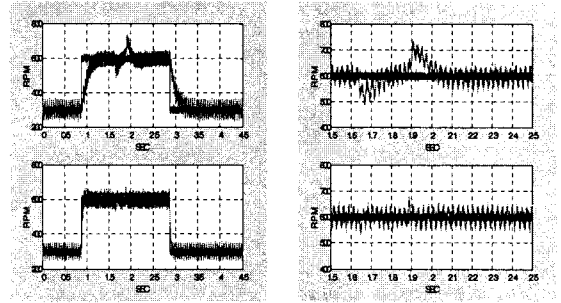


(a) 외란 특성 비교 (b)지령 추종 특성
그림5 비례적분제어기 비교2

그림5는 그림4의 파형을 외란과 지령에 대한 특성을 부분적으로 확대한 파형이다. 위에 파형은 기존의 2자유도 비례적분제어기이고 아래파형은 제안된 방법의 제어기이다. 2자유도 PI제어기만을 사용한 경우는 외란에 대하여 +70rpm, -70RPM 리플 발생하였으며 회복 시간이 200ms정도 걸리며 가변속 구간의 오차는 가변속 전구간에 걸쳐 150RPM정도의 오차를 보였다. 제안된 방법의 경우 외란에 대하여 +20rpm, -20RPM 리플 발생하였으며 회복 시간은 50ms 정도이며 가변속 구간 오차는 초기 30ms 구간 동안만 50RPM 오차를 보였다. 따라서 제안된 방법의 경우 속응성, 정밀성, 강인성 등에서 보다 우수한 성능을 보임이 검증되었다.

2.5 실험 결과

실험은 0.5초일 때 속도지령을 300RPM에서 600RPM으로 스텝지령을 주었다. 0.75초부터 1.25초까지 외란부하를 인가하고 응답속도를 측정한 것이다. 비선형제어기의 경우 이득을 최대한 높일 수 있어서 외란특성이 우수함을 알 수 있다. 그림 6의 위쪽파형의 경우 외란 인가후 속도 리플이 크게 나타난다. 이는 대역폭이 낮게 설정되어 속응성이 떨어지기 때문이다. 아래쪽 파형인 제안된 방법의 경우 외란에 대하여 거의 영향이 없는 것을 알 수 있다.



(a) 비교실험 (b)외란 특성
그림6 비례적분제어기 비교(실험)

2자유도 PI 제어기만의 실험 결과는 외란에 대하여 +100rpm,-100RPM 정도의 리플 발생하였고 회복시간은 150ms정도이고 가변속 구간에서도 오차가 큰 것을 알 수 있다. 하지만 제안된 방법의 경우 외란에 대하여 +50rpm,-50RPM 정도의 리플이 발생하였고 회복시간이 50ms 정도이고 가변속 구간의 오차도 상당히 작아진 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제안된 방법에서의 성능이 보다 우수한 것으로 검증되었다.

2. 결론

2자유도 PI제어기의 성능개선을 위하여 비선형 PI제어기에 관하여 연구하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 비선형 PI제어기의 성능을 검증하였다. 전차원 관측기를 사용하여 순시속도 추정이 가능하며 부하 토크를 추정하여 능동적으로 외란을 억제할 수 있었으며 비선형 PI 제어기 구조를 제안하여 정상상태에서 큰 이득을 사용하여 외란에 대한 영향 억제 및 속도 추종 특성을 개선할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Zhiqiang Gao, Shaohua Hu, and Fangjun Jiang, "A Novel Control Design Approach Based on Active Disturbance Rejection" the 2001 IEEE Conference on Decision and Control, 2001
- [2] Zhiqiang Gao and Yi Huang, Jingqing Han, "An Alternative paradigm for Control System Design" the 2001 IEEE Conference on Decision and Control, 2001
- [3] Kichul Hong and Kwanghee Nam, "A Load Torque Compensation Scheme under the Speed Measurement Delay", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No.2, April 1998.