

# 유도전동기 RFO 구동을 위한 전동기 정수의 자동 조율 기법

이동엽\*, 유재성, 이병국, 원충연  
성균관대학교

## RFO Induction Motor Parameter Auto Tuning Techniques

Dong-Yup Lee, Jae-Sung Yu, Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won  
Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서 사용한 방법은 실제 운전에서 가장 많이 사용하는 전동기 회전자 시정수와 전동기 인덕턴스를 조절하는 것으로 시스템 구조에서 갖는 제어기를 사용하여 다른 전동기 오차에 무관한 정수를 얻는 방법을 사용하여 오차에 대한 민감도가 매우 높은 방법을 채택하였다. 하지만 이 방식에도 정수의 오차를 수동으로 조절하여야 하는 단점을 갖는다. 전동기 정수의 수동 조절은 매우 많은 시간을 투자해야 하는 결함을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 다른 정수의 오차에 무관하며 민감도가 매우 높은 제어기 구조를 이용하고, 더불어 수동으로 조절하던 번거러움을 제거하여 전동기 정수를 자동 조율 기법을 제안하고자 한다.

### 1. 서 론

유도전동기 회전자 자속 기준 제어를 행하기 위해서는 전동기 정수를 초기에 정확히 설정하는 것이 매우 중요하다. 대부분의 온라인 정수 추정법들은 설정 정수 초기값을 기준으로 동작되며, 대부분이 일부 반복 연산 알고리즘을 사용한다. 반복 연산 알고리즘은 초기값의 오차가 큰 경우 수렴하지 않거나 수렴에 있어 상당한 시간이 소요되는 등 초기값의 정확도가 추정 특성에 큰 영향을 미친다. 그리고 산업현장에서 사용될 경우 모터의 설계치를 알지 못하는 경우 초기값을 정확히 알기란 불가능하며 기존의 오프라인 정수 설정법들은 개별 정수 설정시 다른 정수의 오차에 영향을 받고 정수 오차에 따른 민감도가 떨어지며, 타 정수의 오차가 개입되지 않는 방법이라 해도 하나씩 수동으로 조절하여야 하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 석출기 박사가 제안한 전동기 내부 제어기 특성을 이용하여 정수의 오차를 제거는 방법을 기초로 하여 정확한 값을 얻어낸다. 하지만 이 방법에는 오차를 수동으로 조절하여 정수 설정에 많은 시간을 투자하여야 하는 단점을 가진다. 그러므로 타 정수의 오차가 개입되지 않으며 정수 오차에 따른 민감도가 매우 높은 장점을 갖는 제어기 구조를 이용한 정수 결정 방법에 시간적 투자를 줄여주는 자동 오차 조율 기법을 추가하여 새로운 전동기 정수의 자동 조율 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제안한 이론의 타당성을 검증하도록 한다.<sup>[1]</sup>

### 2. 제어기 구조를 이용한 추정 방법<sup>[1,2]</sup>

제어대상이 전동기일 경우 제어기로 대부분 PI 속도제어기와 PI 전류제어기가 사용되고 속도제어기의 경우 제어대상인 플랜트는 기계계로 모델링되고 전류제어기의 경우에 플랜트는 전기계로 모델링하여 제어기를 설계한다.

#### 2.1 회전자 시정수 설정

회전자 시정수의 설정은 전동기 속도 제어기의 특성을 이용하여 이루어지며 이 때 외부에서 급격한 변동이 없다고 가정한다.

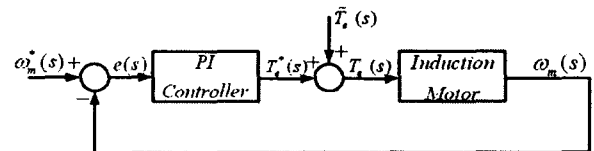


그림 1 PI 속도제어기의 구성

그림 1의 속도제어기가 정상적으로 작동한다고 가정하고, 벡터제어가 정확하게 수행 될 경우 그림 2(a)에 도시한 램프(ramp)형태의 속도지령에 대해서 그림 2(b)와 같은 구형파 형태의 제어기 출력,  $T_e^*(s)$ 을 얻게 된다. 하지만 시스템에 오차가 있을 경우와 같이 시스템의 불확실성이 존재할 경우는 그림 2(c)와 그림 2(d) 처럼 왜곡되게 된다. 이러한 요소들은 제어기 출력  $T_e^*(s)$ 에 의한  $\tilde{T}_e(s)$ 가 합해진 형태로 나타난다.

일반적으로 회전자 자속 기준 벡터제어의 경우 회전자 자속각은 전동기 속도에 슬립주파수를 합한 전기가 속도를 적분하여 구한다. 따라서 전동기의 오차나 슬립주파수 연산을 위한 회전자 시정수에 오차가 발생하면 이는 자속 위치 검출에 오차를 발생 시켜 전동기 토크의 오란 요소로 작용한다.

이러한 오차는 회전자 시정수의 오차로부터 직접적으로 생긴다. 그러므로 속도제어기의 출력인 토크지령을 그림 2(a)와 같은 형태가 되도록 회전자 시정수를 조절하면 다른 전동기 오차에 무관한 회전자 시정수 값을 얻을 수 있으며, 이 경우

회전자 시정수 오차에 기인한 토크 왜곡 정도가 제어기 출력에 직접적으로 나타나므로 오차에 대한 민감도가 매우 높다.

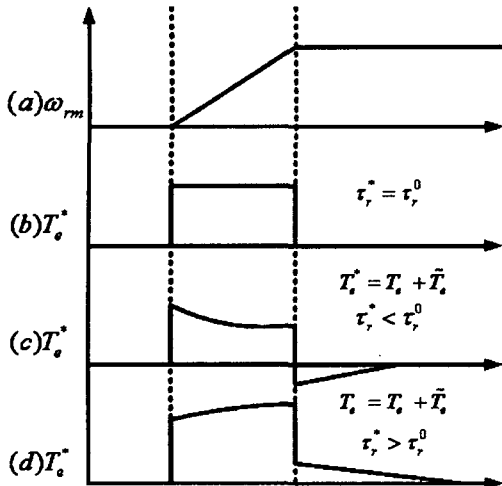


그림 2 회전자 시정수 설정을 위한 속도제어기 출력

## 2.2 인덕턴스의 설정

구동 시스템 내부의 전류제어기를 이용하여 전동기 상호 인덕턴스와 고정자 과도 인덕턴스를 설정한다. 유도 전동기 인덕턴스 값의 변화에 의한 제어기의 영향을 살펴 보기 위해서 동기 좌표계에서의 q축 전류 제어기의 특성을 살펴본다. q축 전류 제어기의 구성은 그림 3과 같은 정상 상태, 즉 자속의 변화가 없다는 가정 하에서의 q축 역기전력 전향(Feed-Forward) 보상 성분은 식 (1)과 같다.

$$V_{qs}^* = \omega_e \widehat{L}_s i_{ds}^e - \omega_s \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e \quad (1)$$

전동기 동기각 속도  $\omega_e$ 와 전류 센서를 통해 측정되어지는 전류의 d축 성분  $i_{ds}^e$ 는 실제 값과 같다고 할 수 있다.

추정된 고정자 인덕턴스 값  $\widehat{L}_s$ 에  $\Delta L_s$ 만큼의 오차가 존재한다면, 즉  $\widehat{L}_s = L_s + \Delta L_s$ 라면, q축 역기전력 전향 보상 성분은 식(2)와 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} V_{qs}^* &= \omega_e \widehat{L}_s i_{ds}^e - \omega_s \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e \\ &= \omega_s L_s i_{ds}^e + \omega_e \Delta L_s i_{ds}^e - \omega_s \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 전향 보상되는 q축 역기전력 성분의 오차는 전적으로 고정자 인덕턴스 값의 오차에 의한 것이라고 생각할 수 있다. 회전자 시정수 설정의 경우와 같이 이러한 전압의 외란 요소는 전류 제어기 출력을 왜곡시키는 형태로 나타나게 된다.

그림3(a)의 속도 램프(lamp) 지령에 대해서 실제 속도와 이를 제어하기 위한 q축 전류 지령은 그림3(b)와 같은 특성을 나타낸다. 이상적인 경우에는 동일한 전류 지령에 대해서 전류 제어기 출력이 왜곡되지 않지만,  $\widehat{L}_s$ 에 오차,  $\Delta L_s$ 가 존재하면 제어기 출력은 제한되는 전류에 나타나는 외란 요소를 제거하도록 동작하고, 결국 전압 지령이 왜곡된다. 이러한 왜곡은 전류 제어기 출력,  $V_{qs}^*$ 에 나타난다.

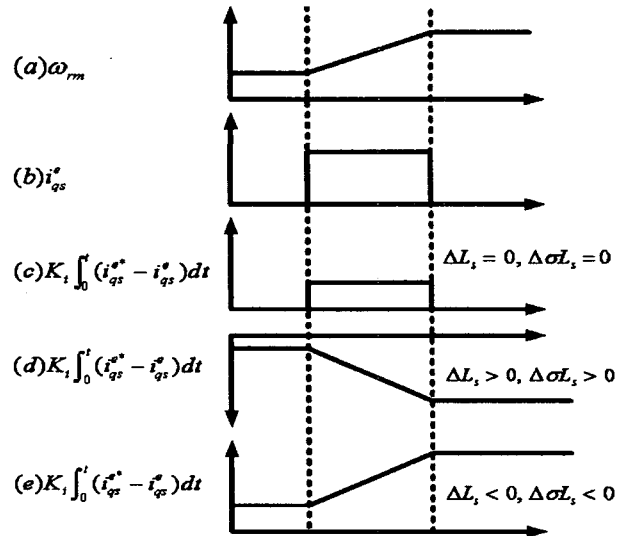


그림 3 유도전동기 인덕턴스 설정을 위한 전류제어기 출력

따라서 속도 램프 지령에 대해서 전류 제어기 출력인 전압 지령의 적분항을 그림3(b)와 같은 형태가 되도록 고정자 인덕턴스를 조정하면 다른 전동기 정수 오차에 무관한 고정자 인덕턴스 값을 얻을 수 있다.

## 3. 자동 조율 기법

위 장에서 설명한 회전자 시정수 설정 방식은 다른 전동기 정수에 무관하며, 오차에 대한 민감도가 높아 비교적 정밀한 제어가 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 토크 왜곡에 대해 회전자 시정수 값을 수동으로 바꾸어 주어야 하는 단점을 가지고 있어 정수 설정에 많은 시간을 투자해야만 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 절에서는 전류 제어기 출력 적분항의 왜곡된 정도를 인식하여 왜곡된 기울기만큼을 자동으로 보정해주는 방법을 제안한다.

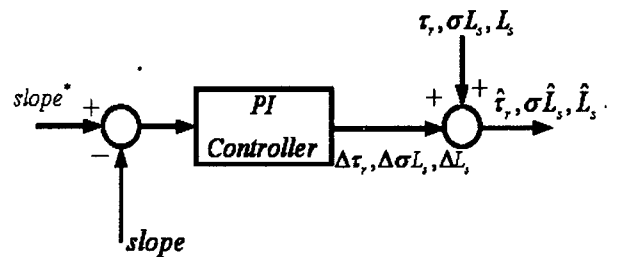


그림 4 제안된 방식의 블록도

전동기 정수가 정확히 맞을 경우의 전류제어기의 적분구간을 살펴보면 토크 파형과 유사한 구형파가 출력되게 된다. 하지만 정수에 오류가 있을 경우 적분구간의 파형이 증가하거나 감소하게 된다. 이때 증가 또는 감소하는 시점의 짧은 구간의 기울기를 연속적으로 입력 받아 그 기울기를 영으로 만들어 줌으로써 자동적으로 전동기 정수를 조율하게 된다. 이때의 PI제어기의 이득값은 전류제어기의 PI값에 아주 낮은 1/20정도의  $\omega_c$ 를 곱하여 구해준다.

$$K_p = \sigma L_s \cdot \omega_c$$

$$K_i = (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) \cdot \omega_c \quad (3)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 PSIM 6.0으로 수행하였고, 벡터제어 블록은 PSIM의 DLL 블록을 사용하여 ANSI-C로 코딩하여 구성하였다.

표 1 시뮬레이션에 사용한 유도전동기 파라미터

5 [kW], 28 [V], 4 pole, 90 [Hz], 2700 [rpm]	
Rs : 0.01 [ $\Omega$ ]	Rr : 0.01 [ $\Omega$ ]
Lls : 0.0385 [mH]	Llr : 0.0584 [mH]
Lm : 0.971 [mH]	Jm : 0.0845 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

다음의 시뮬레이션 파형은  $\sigma L_s$ 를 대상으로 시뮬레이션 한 결과이다.

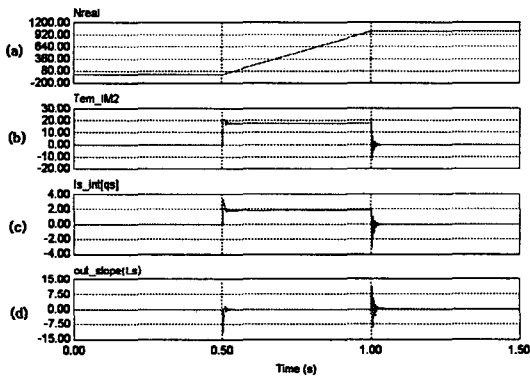


그림 5  $\sigma L_s$ 가 정상일 때 (a) 실제속도  $\omega_e$  (b) 토크  $T_e$  (c) 전류제어기 적분항 (d) 기율기  $\Delta L_s$

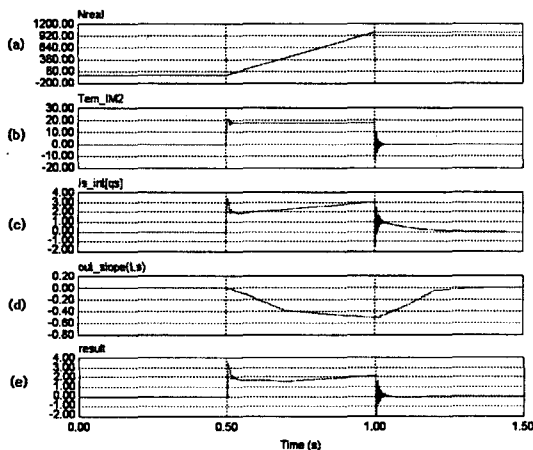


그림 6  $\sigma L_s$ 가 1.2배 변동한 경우 전류 제어기 출력 (a) 실제속도  $\omega_e$  (b) 토크  $T_e$  (c) 전류제어기 적분항 (d) 전류제어기 기율기 (e) 조율된 기율기

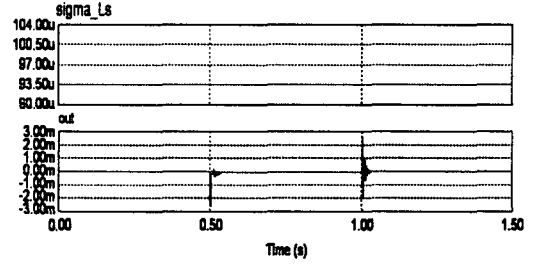


그림 7  $\sigma L_s$ 가 정상일 경우(0.0935mH)와 변동된 값(0mH)

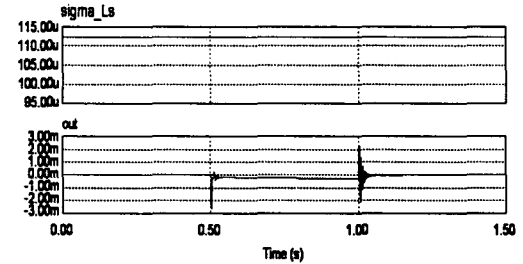


그림 8  $\sigma L_s$ 가 1.2배 변동한 경우(0.1122mH)와 변동된 값(0.0187mH)

#### 5. 결론

기존의 전동기 정수 설정법들은 개별 정수 설정시 다른 정수의 오차에 영향을 받고 정수 오차에 영향을 받고 오차에 따른 민감도가 떨어지며, 타 정수의 오차가 개입되지 않는 방법이라 해도 하나씩 수동으로 조절하여야 하는 문제점을 가지고 있었다.

본 논문에서는 전동기 정수의 개별 설정시 다른 정수의 오차에 따른 민감도도 높 자동으로 정수를 조절하는 방법을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘은 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

1. 변동한 적분항과 변동한 기율기의 합으로 보정된 값을 얻을 수 있다.
2. 변동한 기율기로 정확한 오차 값을 얻을 수 있다.

이 논문은 산업자원부의 지원을 받아 2005-0635-000에 의하여 연구되었음. (2005.010~2006.10)

#### 참고 문헌

- [1] Jul-Ki Seok, Seung-Ki Sul, "Induction Motor Parameter Tuning for High-Performance Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp.35~41, 2001.
- [2] 설승기, "전기기기제어론", 홍릉과학출판사, pp.451~488.
- [3] P.Vas, Vector control of AC Machines. London, U.K.:Oxford Univ.Press,1990, pp.122~215.
- [4] R.Krishnan and F.C. Doran, "A study of parameter sensitivity in high performance inverter fed induction motor drive system," IEEE Trans. Ind Applicat, vol. IA-23, 623-635, July/Aug. 1987.
- [5] P.Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. London, U.K.: Clarendon, 1993.