

전류 센서만을 이용한 유도 전동기의 파라미터 추정

송주호, 이교범, 송중호*, 최 익*, 김광배*, 임묘택
고려대학교 전기공학과, *한국과학기술연구원 지능제어연구센터

A Parameter Identification Method for Inverter-Fed Induction Motor Drives Only Using Current Sensors

J. Song, K.-B. Lee, J.-H. Song*, I. Choy*, K.-B. Kim*, M. Lim

Dept. of Electrical Eng., Korea Univ., *Intelligent Systems Control Research Center, KIST

ABSTRACT

The accurate values of parameters of an induction motor are required for its high performance control. So far, many methods using current sensors, voltage sensors and speed sensor have been developed. This paper proposes an identification method of parameters of induction motor only using current sensors.

1. 서론

유도 전동기의 제어를 위해서는 파라미터의 값을 정확히 알아야 하므로, 유도 전동기의 파라미터를 정확히 추정하는 것은 매우 중요하다.

전기적 파라미터는 제조 업체에서 제공하는 데이터나 회전자 구속 시험, 무부하 시험 등의 고전적 방법으로 구할 수 있으나, 회전자를 구속하거나 별도의 가변 전압원 등의 추가적인 장치가 필요하며, 이러한 방법으로 얻은 값들은 실제와 차이가 있다. 이러한 문제점 때문에 한 상에 전압 혹은 전류를 인가하여 전동기를 운전하지 않는 상태에서 전류 혹은 전압의 응답을 분석하여 추정하는 정지 시험이 많이 응용되고 있다. 기계적 파라미터의 경우, 무부하 감속 시험과, 부하가 걸린 상태에서 속도 계단 응답을 해석하여 구하는 방법 등이 있다.^{[1][2]}

그러나, 정지 시험으로 유도 전동기의 전기적 파라미터를 구하기 위해서는 전압 센서와 전류 센서가 필요하며, 기계적 파라미터의 경우에는 속도 센서가 필요하다. 본 논문에서는 전압 센서와 속도 센서를 이용하지 않고 전류 센서만을 이용하여, 직류 여자 시험과 교류 여자 시험으로 유도 전동기의 전기적 파라미터를 얻는 방법을 제안하고, 이 값들을 토대로 기계적 파라미터를 구하는 방법을 제안한다. 또한 모의 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

2. 전기적 파라미터

1) 고정자 저항

유도 전동기의 q 상의 전압 방정식은 그림 1의 정상상태 등가회로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} - L_m \frac{di_{qr}}{dt} \quad (1)$$

이 회로에 크기가 일정한 직류 전류가 흐르면 미분항이 모두 0이 되므로, 전압과 전류로부터 R_s 를 구할 수 있다. 크기가 일정한 직류를 공급하기 위해 그림 2와 같은 제어 루프를 구성한다. i_{qs}^* 는 모터의 정격 전류로 설정하여 q 상에 정격 전류가 흐르도록 제어하지만, i_{ds}^* 는 0으로 설정하여 회전자가 회전하지 않도록 한다.

그림 3은 직류 여자 시험 중에 PWM과 인버터의 출력 전압 파형을 나타낸다. 삼각파의 한 주기

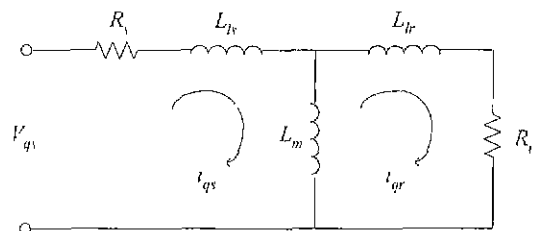


그림 1. 유도 전동기의 정상 상태 등가회로

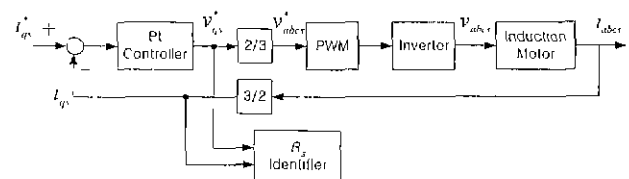


그림 2. R_s 를 구하기 위한 전류 제어 블록 선도

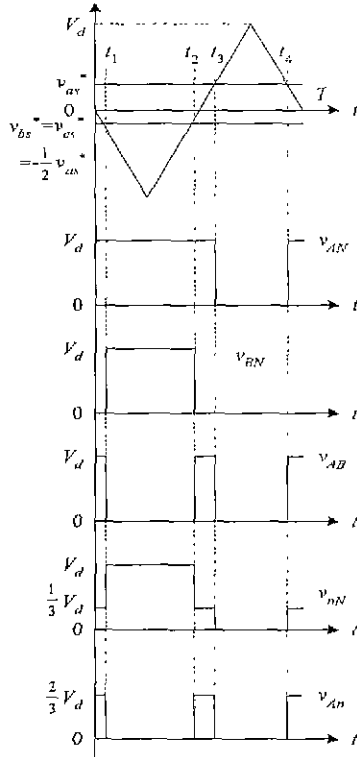


그림 3. PWM과 인버터의 출력 전압 파형

를 T 라고 하면, t_1, t_2, t_3, t_4 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$t_1 = \frac{T}{2} - t_2 = \frac{T}{8} \frac{v_{as}^*}{V_d} \quad t_3 = \frac{T}{2} = T - t_4 = \frac{T}{4} \frac{v_{as}^*}{V_d} \quad (2)$$

따라서 유도 전동기에 인가되는 상전압 v_{AN} 의 시바율은 다음과 같다.

$$D = 2 \times \left(\frac{T}{8} \frac{v_{as}^*}{V_d} + \frac{T}{4} \frac{v_{as}^*}{V_d} \right) \frac{1}{T} = \frac{3}{4} \frac{v_{as}^*}{V_d} \quad (3)$$

따라서, 유도 전동기에 인가되는 상전압은,

$$v_{AN} = D \times \frac{2}{3} V_d = \frac{1}{2} v_{as}^* = \frac{1}{2} v_{as}^* \quad (4)$$

따라서 R_s 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_s = \frac{v_{an}}{i_{as}} = \frac{1}{2} \frac{v_{as}^*}{i_{as}} \quad (5)$$

정확도를 높이기 위해 전압 전류의 값을 여러 번 취하여 최소 자승법을 이용한다.

1.2 고정자 과도 시정수와 고정자 과도 인덕턴스
식 (1)의 회전자 전류를 회전자 자화 전류로 바꾸어 다음과 같이 표현할 수 있다.^[1]

$$v_{as} = R_s i_{as} + \sigma L_s \frac{di_{as}}{dt} + (1 - \sigma) L_s \frac{di_{mv}}{dt} \quad (6)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (7)$$

유도 전동기에 짧은 펄스를 인가하면, 펄스에 포함된 고주파 성분 때문에 자화 인덕턴스에 회전자 자화 전류가 흐르지 못하고 회전자 쪽에만 전류가 흐르게 된다. 따라서 자화 인덕턴스의 영향이 매우 작아지므로^[4] 회전자 자속의 변화가 무시할 정도가 되어,^[1] 식 (6)은 다음 식 (8)과 같이 정리된다.

$$v_{as} = R_s i_s + \sigma L_s \frac{di_s}{dt} \quad (8)$$

인버터의 스위치 순서를 정하여 유도 전동기에 전압 펄스를 인가하면 펄스가 인가되는 동안에 전류가 선형적으로 증가한다. 이 파형으로부터 다음의 식을 이용하여 고정자 과도 시정수 T_s' 과 고정자 과도 인덕턴스 L_s' 을 구할 수 있다. 여기서 I_{peak} 는 고정자 전류의 최고값이고, T_{pulse} 는 전압 펄스의 시간 폭이다. 전압 펄스의 폭은 고정자 전류의 최고값이 정격 전류의 30%가 되도록^[3] 그 폭을 제어한다.

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{I_{peak}}{T_{pulse}} \quad (9)$$

$$T_s' = \frac{\sigma L_s}{R_s} = \left(\frac{v_{as}}{R_s} - I_{peak} \right) \frac{T_{pulse}}{I_{peak}} \quad (10)$$

$$L_s' = \sigma L_s = T_s' R_s \quad (11)$$

1.3 교류 여자 방법

그림 1의 정상 상태 등가 회로는 그림 4와 같이 변형하여 나타낼 수 있다.

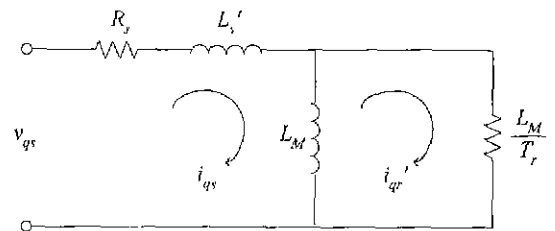


그림 4. 유도 전동기의 정상 상태 등가회로

여기서 L_M 은 L_m^2/L_r 을 의미한다. 이 회로의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z(\omega) = R_s + \frac{\omega^2 T_r L_M}{1 + \omega^2 T_r^2} + j\omega \left(L_s' + \frac{L_M}{1 + \omega^2 T_r^2} \right) \quad (12)$$

고정자의 입력되는 교류 전압과 응답 전류, 그리고 전압과 전류의 위상차를 이용하여 식 (12)를 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$\text{Re}(Z) = \left| \frac{v_{qs}^*}{2i_{qs}} \right| \cos \theta = R_s + \frac{\omega^2 T_r L_M}{1 + \omega^2 T_r^2} \quad (13)$$

$$\text{Im}(Z) = \left| \frac{v_{qs}^*}{2i_{qs}} \right| \sin \theta = \omega \left(L_s' + \frac{L_M}{1 + \omega^2 T_r^2} \right) \quad (14)$$

이 두 식으로부터 회전자 시정수 T_r 을 얻는다.

$$T_r = \frac{\text{Re}(Z) - R_s}{\omega \text{Im}(Z) - \omega^2 L_s'} \quad (15)$$

회전자 시정수를 구하면 식 (13), (14)로부터 L_M 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_M = \frac{(1 + \omega^2 T_r^2)(\text{Re}(Z) - R_s)}{\omega^2 T_r} \quad (13)$$

$$L_M = (1 + \omega^2 T_r^2) \left(\frac{\text{Im}(Z)}{\omega} - L_s' \right) \quad (14)$$

이 두 값을 평균하여 L_M 을 얻는다.

이렇게 얻어진 T_r 과 L_M 으로부터 고정자 인덕턴스 L_s 를 다음과 같이 계산하여 얻을 수 있다.

$$L_s = L_s' + L_M \quad (15)$$

L_r 이 L_s 와 같다고 가정하면 회전자 저항 R_r 과 자화 인덕턴스 L_m 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_m = \sqrt{L_M L_r} \quad (16)$$

$$R_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (17)$$

고정자에 인가하는 교류 전압의 주파수는 2~4Hz의 저주파가 좋다. 그 이유는, 고정자의 관점에서, 회전하는 회전자에는 슬립에 해당하는 저주파 교류 전압이 흐르기 때문이다. 전압의 크기는 유도전동기의 운전에 필요한 V/f 비율에 맞춰, 운전 중의 환경과 유사하게 만들어주어야 한다.

3. 기계적 파라미터

기계적 파라미터인 관성은, 전기적 파라미터 추정과는 달리 유도전동기를 벡터 제어 방식으로 구동시키는 상태에서 추정한다. 유도전동기의 기계적 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (18)$$

이 식을 관성에 대하여 다음과 같이 정리한다.

$$J = T_e \frac{P}{2} \frac{\Delta t}{\Delta \omega_r} \quad (19)$$

이 식을 이용하여 관성을 얻으려면 토크와 속도를 알아야한다. 속도 센서 없이 속도를 추정하기 위해 회전자 자속과 속도를 추정하는 적응 관측기^[5]를 사용하였으며, 관측기 구성에 필요한 여러 파라미터들은 앞에서 제안한 방법으로 얻은 전기적 파라미터의 값을 이용한다. 토크는 앞에서 얻은 전기적 파라미터 값과 관측기에서 얻은 회전자 자속을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \hat{\psi}_{dr} - i_{ds} \hat{\psi}_{qr}) \quad (20)$$

이러한 방법으로 관성을 구하는 제어 블록 선도를 그림 5에 나타내었다. 토크 지령치는 계단 입력으로 인가한다. 벡터 제어에 사용되는 제어기의 영향을 줄이기 위해 회전자 자속 지령치로부터 d 축 전류를 구하는 다음 식으로 제어기를 대체한다.

$$i_{ds}^{e*} = |\phi_r^*| / L_m \quad (21)$$

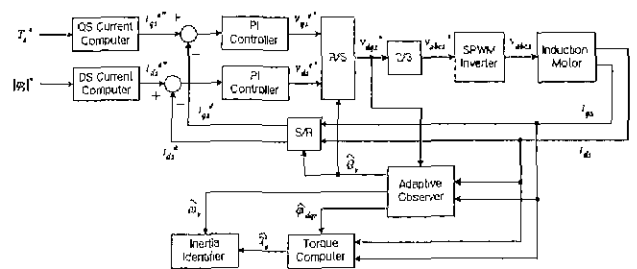


그림 5. 관성을 구하기 위한 제어 블록 선도

4. 모의 실험

제안한 파라미터 추정 방법을 검증할 모의 실험에 사용된 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 스위칭 주파수는 540Hz로, 샘플링 간격은 300μsec로 설정하였다.

그림 6(a)는 고정자 저항의 추정시의 전압 전류 파형을 나타낸다. 고정자의 q 축 전류가 정격 전류가 되도록 제어하였다. 그림 6(b)는 고정자 과도시정수와 고정자 과도 인덕턴스를 구하기 위해 전압 펄스를 인가할 때의 전압과 전류의 파형을 나타

표 1. 모의 실험에 사용된 유도 전동기의 파라미터

정격 용량	10 HP	고정자 저항, R_s	0.1695 Ω
정격 전압	320 V _{LL}	회전자 저항, R_r	0.161 Ω
정격 전류	29.4 A	상호 인덕턴스, L_m	22.77 mH
정격 속도	1740 rpm	고정자 인덕턴스, L_s	23.97 mH
극수	4	회전자 인덕턴스, L_r	24.56 mH
		관성, J	0.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

내며, 그림 6(c)는 교류 여자시의 전압과 전류의 파형을 나타낸다. 그림 6(d)는 관성을 구하기 위해 유도 전동기를 운전할 때의 토크 지령치와 추정치, 실제 속도와 속도 추정치 등을 나타낸다. 이 때의 제어 궤환의 샘플링 주파수는 2.16kHz로 하였다. 표 2에 나타낸 바와 같이, 실제값과 수 % 오차 범위 내에서 파라미터 값이 추정됨을 알 수 있다.

표 2. 모의 실험에 의한 추정 결과

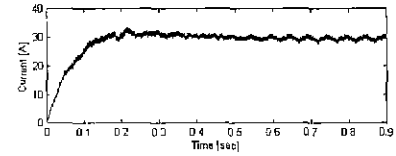
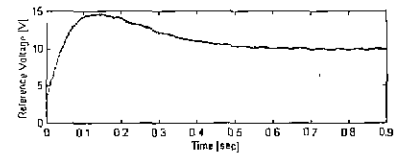
파라미터	실제값	추정값	오차율
R_s	0.1695 Ω	0.1689 Ω	-0.4231 %
R_r	0.161 Ω	0.1543 Ω	-4.19 %
L_m	22.77 mH	23.91 mH	5.021 %
L_s	23.97 mH	25.37 mH	5.831 %
L_r	24.56 mH	25.37 mH	3.289 %
J	0.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.1962 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	-1.906 %

5. 결론

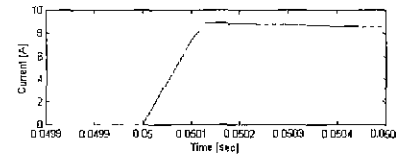
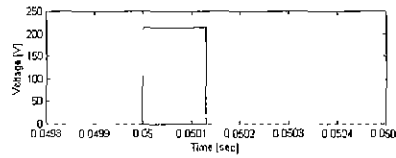
본 논문에서는 전압 센서와 속도 센서 없이 전류 센서만으로 유도 전동기의 전기적 파라미터와 기계적 파라미터를 구하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법으로 수 %이내의 오차 범위 내에서 파라미터 값이 추정됨을 모의 실험을 통하여 확인하였다.

참고 문헌

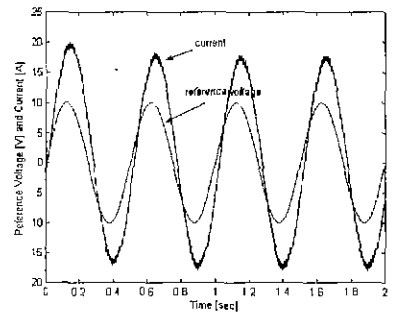
- [1] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Clarendon Press, Oxford, 1993
- [2] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 2nd ed., Springer, 1996
- [3] A. M. Kambadkone, J. Holtz, "Vector-Controlled Induction Motor Drive with a Self-Commissioning Scheme," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 38, No. 5, pp. 322-327, 1991
- [4] J. Godbersen, P. Thøgersen, M. Tønnes, "A Practical Identification Scheme for Induction Machine at Standstill Using Only a AV Inverter as the Actuator," *EPE'97*, pp. 3.370-3.374, 1997



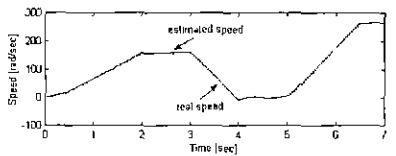
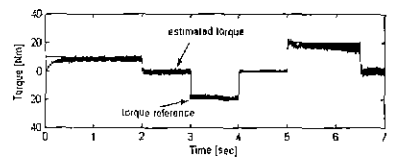
(a) R_s 추정시



(b) T_s' 과 L_s' 추정시



(c) 교류 여자 시험시



(d) 관성 추정시

그림 6. 제안한 방법으로 유도 전동기의 파라미터 추정시의 전압, 전류 및 토크, 속도 파형

- [5] H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano, "New Adaptive Flux Observer of Induction Motor for Wide Speed Range Motor Drives," *IEEE IECON'90*, pp. 921-926, 1990