

## 유도전동기의 파라미터 추정에 관한 연구

이정민<sup>o</sup> 조지원 강웅석 최규하 김한성  
건국대학교 전기공학과

### A Study on Estimation of Induction Motor Parameter

Jeong-Min Lee<sup>o</sup> Jee-Won Joe Woong-Suk Kang Gyu-Ha Choe Han-Sung Kim  
Dept. of Electrical Eng. Kon-Kuk Univ.

**Abstract**

Crucial to the success of the vector control scheme without speed sensor is up to computing instantaneous position of the rotor flux. In tracing this flux depending on the machine parameter, variations of those factor lead to the non-linear characteristic between I/O value and decrease overall efficiency of the vector control scheme. This paper, using recursive least square method estimating instantaneous value of the machine speed and parameter from the shift of current and voltage, proposes an algorithm for compensating the I/O error of the scheme.

**I. 서론**

최근에 많이 연구되어지고 있는 벡터제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어함으로써 유도전동기 구동시스템에서 좋은 성능을 제공하고 있다. 또한 간접벡터제어 시스템에서는 가격, 크기, 위부상의 문제점, 그리고 낮은 신뢰도등의 문제점을 가지고 있는 위치검출기나 속도검출기를 제거하기 위한 기법들이 연구되고 있다. 이러한 속도검출기 없는 벡터제어에 있어서의 성패는 회전자 자속의 순시적인 위치를 계산해 내는데 있는데, 회전자 자속은 전동기 파라미터에 종속적이므로 정확한 전동기 파라미터 또한 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

그러나 운전중의 전동기 파라미터는 온도와 포피효과에 의해 변하는데, 예를들어 전동기 내부온도가 130°일때 회전자 저항 R<sub>r</sub>의 경우 약50%가 증가하고 자기인덕턴스 L<sub>m</sub>은 20%정도 감소한다.<sup>[1]</sup> 이러한 변화는 벡터제어기의 입력과 출력이 비선형성을 나타나게 되고 이러한 결과로 전체 제어 성능이 감쇄된다.

본 논문에서는 이러한 속도 및 파라미터의 순시적인 값을 전동기의 전압과 전류로부터 간접적으로 추정하여 벡터제어기의 입출력오차를 보상하기 위한 알고리즘을 제시한다.

이 알고리즘은 유도전동기의 전달함수를 구하고 이를 linear regression 모델로 구현하며, 이것은 다시 순환최소자승법을 이용, 모델의 파라미터를 추정하여 실제의 전동기 파라미터와 속도를 알아내는 방식이다.

본 논문의 구성은 II절에서 유도전동기의 z영역에서의 전달함수를 구하고, III절에서는 전동기의 속도 및 파라미터 추정의 문제를 linear regression 모델의 파라미터 추정문제로 단순화 시켰다. IV절에서는 순환최소자승법을 소개하고, V절에서는 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

**II. 유도전동기의 모델링**

3상 유도 전동기의 정지좌표계에서의 상태방정식의 자속에 대한 dq모델은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{matrix} = \begin{bmatrix} -R_s L_r & -p\theta & R_s M & 0 \\ \sigma & -R_s L_r & \sigma & R_s M \\ R_r M & 0 & -R_r L_s & -p\beta \\ 0 & R_r M & \sigma & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{matrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{matrix} + \begin{matrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \quad (1)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \beta &= \theta - \theta_r \\ \lambda_s &= \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \\ \lambda_m &= \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \\ v_s &= v_{ds} + jv_{qs} \end{aligned} \quad (2)$$

로 가정하고 이 식을 정리하면 정지좌표계에서  $p\theta=0$ 이므로

$$\frac{d\lambda_s}{dt} = \frac{R_s L_r}{\sigma} \lambda_s + \frac{R_s M}{\sigma} \lambda_r + V_s \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = \frac{R_r M}{\sigma} \lambda_s - \left[ \frac{R_s M}{\sigma} + j\omega_r \right] \lambda_s \quad (4)$$

$$i_s = \frac{L_r}{\sigma} \lambda_s - \frac{M}{\sigma} \lambda_r \quad (5)$$

여기에서  $\sigma = L_r L_s - M^2$  이다.

위의 (3), (4), (5)식으로 부터 그림1과 같이 입력이 전압이고 출력이 전류인 형태의 유도전동기에 대한 전달함수  $H(s)$ 를 구한다.

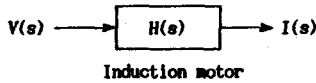


그림1. 유도전동기의 모델링

$$H(s) = \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{\frac{L_r}{\sigma} s + \frac{L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right]}{s^2 + \left[ \frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma} + j\omega_r \right] s + \frac{R_s L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right]} \quad (6)$$

구하여진 전달함수를 z영역으로 변환하기 위하여 식(7)을 식(6)에 대입하여 bilinear 변환을 하고 그 결과는 식(8)과 같다.

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \quad (7)$$

T : sampling time

$$H(z) = \frac{B_2 z^{-2} + B_1 z^{-1} + B_0}{A_2 z^{-2} + A_1 z^{-1} + A_0} \quad (8)$$

여기에서

$$A_2 = 4 - 2T \left[ \frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma} + j\omega_r \right] + \frac{R_s L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] T^2 \quad (9)$$

$$A_1 = -8 - 2T^2 \frac{R_s L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] \quad (10)$$

$$A_0 = 4 + 2T \left[ \frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma} + j\omega_r \right] + \frac{R_s L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] T^2 \quad (11)$$

$$B_2 = -2T \frac{L_r}{\sigma} + \frac{L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] T^2 \quad (12)$$

$$B_1 = 2 \frac{L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] T^2 \quad (13)$$

$$B_0 = 2T \frac{L_r}{\sigma} + \frac{L_r}{\sigma} \left[ \frac{1}{T_r} + j\omega_r \right] T^2 \quad (14)$$

이다. 여기에서 (8)식의 계수가 모두 전동기 파라메터와 속도의 함수라는 점이 주목된다. 이것은 (8)식의 계수를 구할 수 있다면, 구하고자 하는 전동기 파라메터와 속도를 알아 낼 수 있음을 의미한다. 이로부터 표절에서 linear regression 모델을 구하고 문제의 초점을 이러한 전달함수의 계수를 구하는데 맞춘다.

### II. Linear regression 모델

(5)식의 유도전동기 전달함수로부터의 속도 및 전동기 파라메터 추정의 문제는 여기에서 linear regression 모델의 파라메터 추정의 문제로 단순화 된다. linear regression 모델의 구조는 다음 (12)식과 같다.

$$y(k) = C(k)\theta \quad (15)$$

여기에서  $y(k)$  ; 측정값

$C(k)$  ; 측정량의 함수

$\theta$  ; 미지의 값

먼저 (8)식으로부터

$$I(z^{-1}) = -\frac{A_2}{A_0} z^{-2} I(z^{-1}) - \frac{A_1}{A_0} z^{-1} I(z^{-1}) + \frac{B_2}{A_0} z^{-2} V(z^{-1}) + \frac{B_1}{A_0} z^{-1} V(z^{-1}) + \frac{B_0}{A_0} V(z^{-1}) \quad (16)$$

이 되며 이는 다시 (15)식의 구조로서 표현하면

$$I(z^{-1}) = \begin{bmatrix} -\frac{A_2}{A_0} & -\frac{A_1}{A_0} & \frac{B_2}{A_0} & \frac{B_1}{A_0} & \frac{B_0}{A_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z^{-2} I(z^{-1}) \\ z^{-1} I(z^{-1}) \\ z^{-2} V(z^{-1}) \\ z^{-1} V(z^{-1}) \\ V(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

이므로

$$y(k) = I(z^{-1}) \quad (18)$$

$$C(k) = \begin{bmatrix} -\frac{A_2}{A_0} & -\frac{A_1}{A_0} & \frac{B_2}{A_0} & \frac{B_1}{A_0} & \frac{B_0}{A_0} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\theta(k) = [z^{-2}I(z^{-1}), z^{-1}I(z^{-1}), z^{-2}V(z^{-1}), z^{-1}V(z^{-1}), V(z^{-1})]^T \quad (20)$$

이 된다.

$\theta$ 는 linear regression 모델에서의 미지의 값으로서 본 논문에서 속도와 전동기의 파라미터는  $\theta$ 를 구함으로써 얻어질 수 있다.

IV. 순환 최소 자승법

linear regression 모델의 순환최소자승법에 의한 파라미터 추정을 위한 순환방정식은 다음과 같다.

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k) \{y(k) - C^T(k) \theta(k-1)\} \quad (21)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1) C(k)}{\lambda I + C^T(k) P(k-1) C(k)} \quad (22)$$

$$P(k) = \{I - K(k) C^T(k)\} P(k-1) / \lambda \quad (23)$$

$I =$  단위행렬

여기에서  $\lambda$ 는 망각 인자로서  $0 < \lambda \leq 1$ 의 값을 갖으며  $K(k)$ 는 가중인자이고  $P(k)$   $k=0$ 는 약  $10^6$ 에서  $10^{11}$  정도의 값으로 초기값이 주어진다.

V. 시뮬레이션

이 장에서는 앞에서 제안한 방법에 의한 유도전동기의 파라미터 추종능력을 시뮬레이션하고 그 결과를 나타낸다. 우선 유도전동기 시스템은 비선형 미분방정식형태로 표현되며 이의 해를 구하기 위하여 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

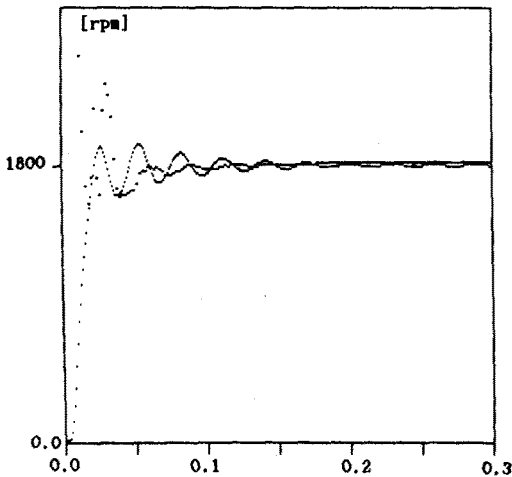


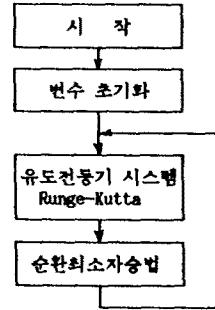
그림2. 실제속도와 추정속도 [Sec]

사용한 전동기 파라미터는 다음과 같다.

$$L_s = 0.109[H] \quad L_r = 0.109[h] \quad L_m = 0.106[H]$$

$$R_s = 1.26[\Omega] \quad R_r = 1.28[\Omega]$$

제안한 방법을 위한 시뮬레이션의 흐름도는 다음과 같으며 유도전동기 시스템의 샘플링 시간은  $50[\mu sec]$ , 순환최소 자승법의 샘플링 시간은  $1[ms]$ 이다.



VI. 결과 및 검토

시뮬레이션 결과는 그림2,3,4,5와 같다. 그림2는 실제속도와 추정속도, 그림3은 실제속도와 추정속도의 오차를 나타낸다. 그림에서 보듯이 과도상태에서 오차가 많이 나타나고 있다. 또한 그림3과 그림4는  $R_r$ 를 임의의 시간에서 50[%] 증가 시켰을 경우의  $A2/A0$ 의 실제값과 추정값, 그리고 그 오차를 나타내었다. 역시 여기에서도 과도상태에서의 오차와 정상상태에 이르기까지의 시간이 다소 길어보이나 실제의 시스템에서는 이러한 파라미터의 급격한 변화가 발생하지 않으므로 문제가 되지 않는다.

본 알고리즘은 시뮬레이션결과 속도추정에 있어서, 과도 응답의 개선과 전동기 파라미터의 추정에서의 정상상태 오차 보상에 대한 연구가 더 필요하다고 본다.

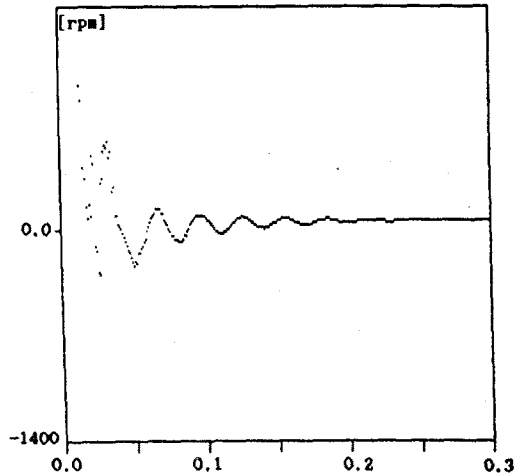


그림3. 실제속도와 추정속도의 오차 [Sec]

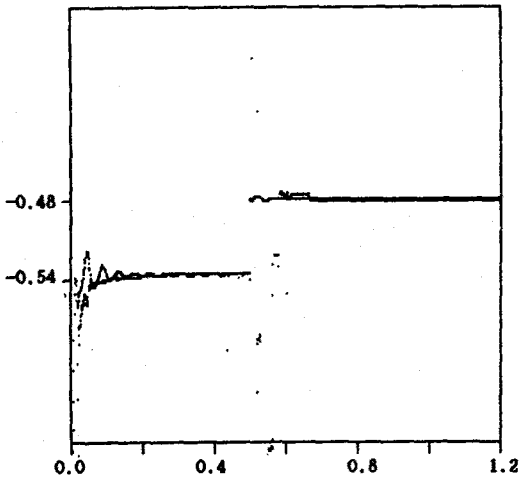


그림4.  $A_2/A_0$ 의 실제값과 추정값 [Sec]

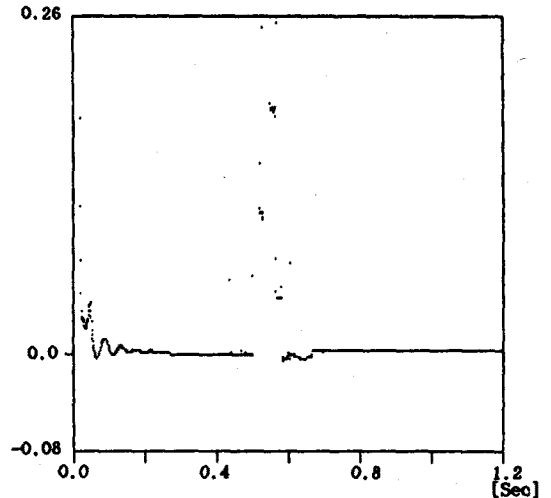


그림5.  $A_2/A_0$ 의 실제값과 추정값의 오차

#### VI. 참고문헌

- [1] R. Krishnan, Frank C. Doran, "Study of parameter sensitivity in high performance inverter-fed induction motor drive systems", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-23, No.4, July/August, 1987.
- [2] P.C.Krause, C.H.Thomas, "Simulation of symmetrical Induction machinery", IEEE Trans. on Power Appl. Syst., Vol. PAS-84, No.11, 1965.
- [3] P.C.Krause, "Analysis of Electric machinery", McGraw-Hill Book Co., 1986.
- [4] X.Xu, R.D.Donker, D.W. Novotny, "A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive", IEEE PESC Record, 1988, pp.870-876.
- [5] M.V.Reyes et.al, "Recursive Speed and Parameter Estimation for Induction Machines", IEEE IAS, 1989, pp607-611.