

# 유도 전동기 파라미터 추정에 관한 연구

김춘환\*, 김규식\*  
 서울시립대학교 전자전기공학부\*

## Study on the Parameter Identification for Induction Motors

Chun-Hwan Kim\*, Gyu-Sik Kim\*

\* Dept. of Electrical Engineering, The University of Seoul

### ABSTRACT

The accurate identification of the motor parameters is crucially important to achieve high dynamic performance of induction motors. In this paper, parameter auto-tuning algorithms for stator( rotor) resistance, stator( rotor) leakage inductance, mutual inductance, and rotor inertia. Stator( rotor) resistance and stator( rotor) leakage inductance are identified based on the stationary coordinate and mutual inductance and rotor resistor on the scalar speed control and the transient motor terminal voltage. To demonstrate the practical significance of our results, we present some experimented results.

### 1. 서론

유도전동기 벡터 제어 방법은 순시토크 제어에 뛰어난 성능을 발휘한다. 그러나 이러한 제어 방법은 유도전동기 파라미터의 정확성에 따라 그 성능이 커다란 영향을 받는다. 따라서 정확한 유도전동기의 파라미터를 얻으려는 연구가 행해져 왔다. 본 논문에서는 오프라인의 무부하 상태에서 유도전동기의 파라미터 추정 방법을 제시하였다.<sup>[1]</sup> 먼저 고정자저항  $R_s$  를 추정하였고 고정자(회전자) 누설 인덕턴스  $L_{\sigma s}(L_{\sigma r})$  를 짧은 임펄스 형태의 전압을 d축 고정자 전압을 가하여 추정하였고, 상호 인덕턴스  $M$  를 동기속도로 회전시켜 무부하 스칼라 제어로 추정하였다. 또 회전자 역시상수(슬립계인)  $K_s(= \frac{1}{T_r})$  를 회전자 자속의 변화로 야기되는 순시전압의 관계를 이용하여 구하였고 이를 통해 회전자 저항을 구하였다.<sup>[2]</sup> 또, 스텝의 토크명령을 인가했을 때 속도와 시간의 편차를 이용하여 관성

모멘트  $J$  를 추정하였다. 그리고 이에 대한 실험 결과를 통해 본 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

### 2. 유도 전동기 파라미터 추정

유도 전동기의 매개변수 초기값을 설정하기 위해 전동기 매개변수를 오프라인 추정한다. 과정은 다음과 같다.

#### 2.1 고정자 저항 $R_s$ 추정

d축 등가회로를 나타낸 그림 1의 인버터에서 일정한 전압  $v_{ds}^*$  을 가하고 그때  $i_{ds}$  가 흐른다고 가정하면 실제 유도전동기에 가해지는 전압은 데드타임 효과에 의한 전압  $V_{ds}^s$  와 스위칭소자에 의한 저항과 환류 다이오드에 의한 저항의 합인  $r'$  에 의한 전압강하 ( $= i_{ds} r'$ ) 를 뺀 만큼 가해진다. 한편, 다음과 같이  $R_s'$  을 정의하고

$$R_s' = R_s + r' \tag{1}$$

전기각속도와 q축 전류를 0으로 놓고 d축 전류를 일정하게 놓으면(즉,  $\omega_s = 0, i_{ds} = \text{상수}, i_{qs} = 0$ )

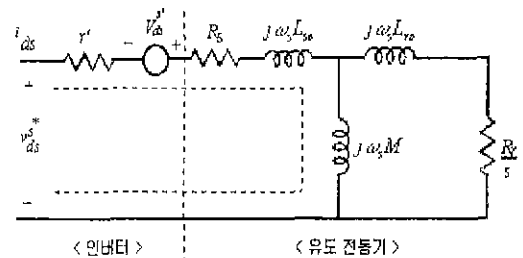


그림 1  $R_s$  추정을 위한 d 축 등가회로  
 Fig. 1 d equivalent circuit for  $R_s$  tuning

그림 1을 간략화 시킬 수 있다. 이때, d축 고정자 전압  $v_{ds}^{s*}$  값을 두 개의 다른 값으로 설정하여 그때 흐르는 d축 고정자 전류측정으로  $R_s'$  을 추정할 수 있다. 이를 다음 식으로 표현 할 수 있다.

$$v_{ds1}^{s*} = -V_{ds}^s + R_s' i_{ds1} \quad (2)$$

$$v_{ds2}^{s*} = -V_{ds}^s + R_s' i_{ds2} \quad (3)$$

식 (2) 과 (3)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$R_s' = \frac{v_{ds1}^{s*} - v_{ds2}^{s*}}{i_{ds1} - i_{ds2}} \quad (4)$$

여기서, 고정자 저항  $R_s$ 는 식 (1)과 식 (4)에서 얻을 수 있다.

## 2.2 고정자 (회전자) 누설 인덕턴스 $L_{so}(L_{ro})$ 추정

500 - 1000  $\mu\text{sec}$  정도의 짧은 임펄스 형태의 전압을 d축 고정자 전압  $v_{ds}^{s*}$  에 가하면 데드타임 효과에 의한 전압  $V_{ds}^s$  은 거의 무시할 수 있고 그림 2와 같이 간략화 될 수 있다. 이때  $\omega_r=0$ 이고 그림 2에서  $s=1$ 로 간주된다. 회전자측 임피던스가 상대적으로 크게 작아 그림 3에서  $j\omega_s M$  부분을 무시하고 수식을 전개하면 다음과 같다.

$$v_{ds}^{s*} = (R_s' + R_r) i_{ds} + (L_{so} + L_{ro}) \frac{di_{ds}}{dt} \quad (5)$$

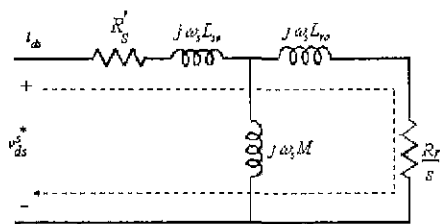


그림 2  $L_{so}(L_{ro})$  추정을 위한 간략화된 모델  
Fig. 2 Simplified model for  $L_{so}(L_{ro})$  tuning

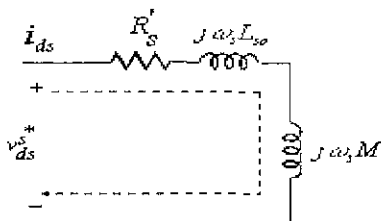


그림 3  $M$ 추정을 위한 간략화된 모델  
Fig. 3 Simplified model for  $M$  tuning

식 (5)에서 우변의 첫 항에 비해 우변의 두 번째 항이 상대적으로 훨씬 크다. 따라서, 식 (5) 은 다음과 같이 간략화될 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} \cong (L_{so} + L_{ro}) \frac{di_{ds}}{dt} \quad (6)$$

한편,  $L_{so}, L_{ro}$ 는 상호인덕턴스  $M$  에 비해 무척 작은 값을 갖는다. 이때  $L_{so}$  와  $L_{ro}$  가 같다고 가정하면 식 (6)에서 다음을 얻을 수 있다.

$$L_{so} = L_{ro} \cong \frac{v_{ds}^{s*}}{2 \frac{di_{ds}}{dt}} \quad (7)$$

## 2.3 상호인덕턴스 $M$ 추정

데드타임 효과에 의한 전압  $V_{ds}^s$  을 무시하면 그림 1은 다음 그림 3과 같이 간략화된다. 따라서, 다음과 같은 동적방정식을 얻을 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} = R_s' i_{ds} + j\omega_s (L_{so} + M) i_{ds} \quad (8)$$

식 (8)에서  $L_{so}$  가  $M$  에 비해 상대적으로 무시할 수 있을 정도로 작고 또한  $R_s'$  값이  $\omega_s M$  값에 비해 작도록  $\omega_s$  를 택하면 식 (8) 는 다음과 같이 간략한 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^{s*} \cong j\omega_s M i_{ds} \quad (9)$$

q축에 대해서도 같은 방식으로 정리하면 다음과 같다.

$$v_{qs}^{s*} \cong j\omega_s M i_{qs} \quad (10)$$

식 (9) 와 (10)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$M \cong \frac{((v_{ds}^{s*})^2 + (v_{qs}^{s*})^2)^{\frac{1}{2}}}{\omega_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

## 2.4 회전자 역시상수 $K_s (= \frac{1}{T_r})$ 추정

유도전동기의 동기 좌표계에서의 전압방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\
v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\
0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\
0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}
\end{aligned} \quad (12)$$

또한, 회전자와 고정자 자속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\phi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\
\phi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\
\phi_{dr} &= M i_{ds} + L_r i_{dr} \\
\phi_{qr} &= M i_{qs} + L_r i_{qr}
\end{aligned} \quad (13)$$

전기적 역시상수는 회전자 자속에 의해 발생한 과도 상태 전동기 단자전압에 의해 추정된다. 위의 식 (13)의 첫 번째 식과 네 번째 식에서 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\phi_{dr}}{dt} = R_r \frac{M}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \quad (14)$$

q축의 회전자 자속을 0으로 놓고 식 (12), (13), (14)을 이용하면 유도전동기의 고정자 동기좌표계 d-q축 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
v_{ds} &= (R_r + R_s \frac{M^2}{L_r^2}) i_{ds} + (L_{so} + L_{ro}) \frac{di_{ds}}{dt} \\
&\quad - \omega_s (L_{so} + L_{ro}) i_{qs} - R_r \frac{M}{L_r} \phi_{dr}
\end{aligned} \quad (15)$$

여기서 식 (15)의 정상상태를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \Delta v_{ds} \quad (16)$$

여기서 식(16)의  $\Delta v_{ds}$ 과  $K_s (= \frac{1}{T_r} = \frac{R_r}{L_r})$ 의 관계를 이용하여 유도전동기의 전기적 역시상수를 추정할 수 있다. 표 1은  $K_s$ 와  $\Delta v_{ds}$  사이의 관계를 나타내었다.

## 2.5 관성 모멘트 $J$ 의 오프라인 추정

무부하 상태에서 토오크명령을 스텝으로 주었을 때 속도변화와 시간변화를 이용하여 관성 모멘트

표 1  $K_s = \frac{R_r}{L_r}$ 와  $\Delta v_{ds}$

Table 1 Relationship between  $K_s = \frac{R_r}{L_r}$  and  $\Delta v_{ds}$

	$\phi_{dr_{err}}$	$\phi_{qr_{err}}$	$\Delta v_{ds}$
$K_s < \frac{R_r}{L_r}$	+	+	-
$K_s = \frac{R_r}{L_r}$	0	0	0
$K_s > \frac{R_r}{L_r}$	-	-	+

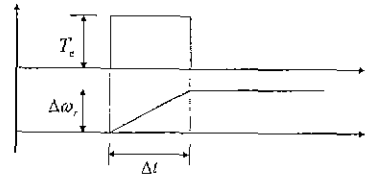


그림 4  $J$  추정 방법  
Fig. 4 Method for  $J$  tuning

$J$ 를 식 (17)와 같이 추정할 수 있다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = -B\omega_r + T_e \quad (17)$$

식 (17)에서  $B\omega_r$  항을 무시하면 관성 모멘트  $J$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.(그림 4참조)

$$J = T_e \frac{\Delta t}{\Delta \omega_r} \quad (18)$$

## 3. 실험결과

실험은 DSP chip인 TMS320C31을 이용하여 구현하였고 220V, 25.5A, 1735rpm의 Leloy Somer사의 유도 전동기 파라미터를 추정하였다. 그림 5은 실험에 사용된 전체 시스템의 구성도를 나타내었다. 고정자 저항( $R_s$ )은  $v_{ds1}^{5*}$ 을 정격의 90%를 1초 동안 가하고  $v_{ds2}^{5*}$ 을 정격의 30%로 1초 동안 가하는 것을 반복하여 구하였다. 그리고 고정자(회전자) 누설 인덕턴스  $L_{so}(L_{ro})$ 는 800  $\mu$ sec 정도의 짧은 임펄스 형태의 전압을 d축 고정자 전압  $v_{ds}^{5*}$ 에 가한 뒤 이때 흐르는 d축 고정자 전류를 측정하여 누설 인덕턴스를 구하였다. 또, 상호 인덕턴스  $M$ 는 무부하 상태에서 스칼라제어를 하면서 기록한 고정자 전류  $i_s (= (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)^{1/2})$ 와 식 (11)로부터 구하였다. 그리고,  $L_s = L_r$ 라는 가정

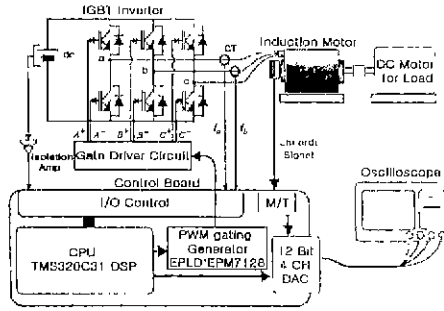
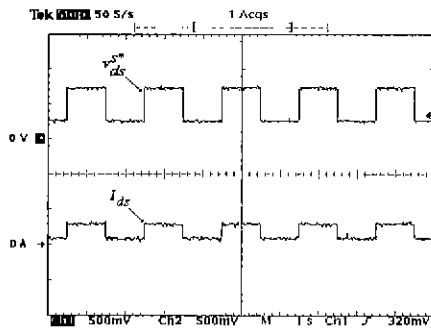
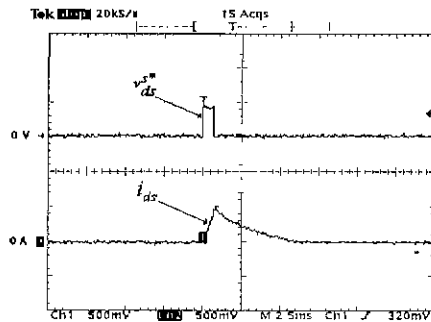


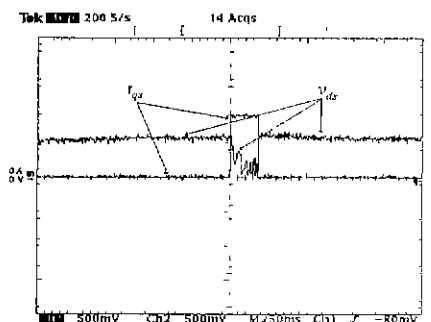
그림 5 전체 시스템 구성도  
Fig. 5 Vector control System



(  $v_{ds}^*$  : 200V/div,  $i_{ds}$  : 17.5A/div )  
(a)  $R_s$  추정 실험결과



(  $v_{ds}^*$  : 125V/div,  $i_{ds}$  : 33.5A/div )  
(b)  $L_{so}(L_{ro})$  추정 실험결과



(  $v_{ds}$  : 7V/div,  $i_{ds}$  : 10A/div )  
(c)  $K_s = \frac{R_r}{L_r}$  와  $\Delta v_{ds}$ 의 관계를  
이용한 파형 추정 실험결과

그림 6 실험결과  
Fig. 6 Experimental results

표 2 파라미터 추정결과

Table 2 Results of parameter tuning

$R_s$	$L_{so}(L_{ro})$	$M$	$R_r$	$J$
0.0289	0.0015	0.0455	0.1880	0.0333

에서 전기적 역시상수  $K_s (= \frac{1}{T_r} = \frac{R_r}{L_r})$ 로부터 회전자 저항을 구하였다. 그림 6는 각각의 파라미터 추정 실험 결과를 보여준다. 그리고 마지막으로 관성 모멘트  $J$ 를 추정하였다. 표 2는 각각의 추정결과를 나타낸 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 오프라인에서의 무부하시 유도전동기 파라미터추정에 관한 알고리즘을 실험을 통해 나타내었다. 이러한 알고리즘은 오프라인에서 실제 다양한 유도전동기의 파라미터추정에 유용할 것으로 보인다. 그리고 이후 온라인상에서 전동기 운전중에 자속에 따라 변하는 상호 인덕턴스와 전동기 온도에 민감한 회전자 저항을 추정하는 비간섭 선형제어기를 구성할 수 있다.<sup>[3]</sup>

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(핵심전문연구 981-0911-053-2) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] A.Khambadkone and J.Holtz "Vector-Controlled Induction Motor Drive with a self-Commissioning Scheme," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 38, No.5, pp.322-327, Oct., 1991.
- [2] Masahiko Akiyama, Kohji Kobayashi and Ichiro Miki Mohamed A.El-Sharkawi, "Auto-Tuning Method for Vector Controlled Induction Motor Drives," *T.IEE Japan*, Vol. 115-D No.8, pp.884-851, 1996.
- [3] Young-Dae Kim, Gyu-Sik Kim, Joon-Hwa Lee and Ju-Yeop Choi, "Study on the rotor resistance adaptation algorithm for induction motors," *International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp.254-259, 12, 1997.