

# 그래픽 프로그래밍 기법을 이용한 주축용 유도전동기의 속도 센서리스 토크감시

박진우\*, 권원태\*\*

## Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor using Graphical Programming

Jin Woo Park\* and Won Tae Kwon\*\*

### ABSTRACT

To monitor the torque of an induction motor using current, rotating speed has been measured and used to calculate the slip angular velocity. Additional sensor, however, can cause extra expense and trouble. In this paper, a new algorithm is proposed to monitor the torque of vector controlled induction motor without any speed measuring sensor. Only stator current is measured to estimate the magnetizing current which is used to calculate flux linkage, rotor velocity and motor torque. Graphical programming is used to implement the suggested algorithm and to monitor the torque of an induction motor in real time. To solve the fluctuation problem of estimated torque caused from instantly varying rotating speed of an induction motor, the rotating speed is reconstructed based on the measured current signals. From several experiments, the proposed method shows a good estimation of the motor torque under the normal rotational speed.

**Key Words** : Induction motor(유도모터), Sensorless speed estimation(센서리스 속도추정), Sensorless torque monitoring system(센서리스 토크 모니터링 시스템), Graphical programming(그래픽프로그래밍)

### 기호설명

Subscript d, q = d, q phase component  
Subscript a, b, c = a, b, c phase component  
Subscript s, r = stator, rotor phase component  
Subscript e = synchronous rotation frame component  
Superscript\* = reference value  
 $\omega_e$  = synchronous angular velocity  
 $\omega_r$  = rotor angular velocity  
 $\omega_{sl}$  = slip angular velocity

$\lambda_r$  = flux linkage  
 $i_{mr}$  = magnetizing current  
 $L_r$  = rotor inductance  
 $L_m$  = mutual inductance

### 1. 서론

산업현장에서 많이 사용되는 유도전동기 속도제어 방법인 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)는 공극 자속의 크기를 일정하게 유지시켜 토크제어를 용이하게 해주는 방법이다. 그러나 이 방법

2002년 3월 18일 접수

\* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

\*\* 서울시립대학교 기계정보공학과

은 속도변화에 대한 피드포워드(feed forward) 보상을 매우 복잡하게 행하여야 하며 부하변화에 따른 속도 변동을 제어할 수 없다는 단점이 있다. 이 때문에 속도 센서 없이 유도전동기를 제어하려는 연구가 계속 활발히 이루어져 오고 있다<sup>(1,2,3,4)</sup>. 그러나 이 논문의 결과들은 전류와 전압 측정치들의 순수 적분연산이 필요하여 직류 오프셋에 민감하거나<sup>(1)</sup>, 설정하기 힘든 파라미터들을 포함하고 있거나<sup>(2)</sup>, 모든 동작영역에서의 수렴성을 보장하지 못하거나<sup>(3,4)</sup>하는 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 속도 검출기를 쓰지 않고 고정자 전류만을 측정하여 속도 정보를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 고정자 전류만을 이용하므로 부가적인 하드웨어를 추가하지 않아도 기존에 설치된 유도전동기 시스템에 바로 적용이 가능하다. 이 점을 이용하여 유도전동기의 입력상 전류를 측정하고, 이를 이용하여 회로구성이 간단하며 전동기의 크기나 제어방법과는 관계없이 간단히 적용할 수 있는 유도전동기의 토크를 측정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 기존의 토크 감시 방법보다 간편한 방법으로 토크를 추정하고 실용성을 가진 토크측정 시스템을 개발하였다.

## 2. 센서리스 벡터제어

### 2.1 자화전류의 연산

임의의 각속도  $\omega_e$  에 동기되어 회전하는 d-q 좌표에서 유도전동기의 전압방정식과 쇄교자속과 전류와의 관계는 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} + p \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} + p \lambda_{qr} \quad (4)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (7)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (8)$$

회전자 축 회로가 단락 되어 있으므로 전압  $V_{dr}$  과  $V_{qr}$  이 0 인 것을 고려하면서 식 (5)-(8)을 식 (1)-(4)에 대입하여 정리하면 동기 회전 좌표계에서 3 상 유도전동기의 d-q 방정식은 다음과 같이 유도된다<sup>(6)</sup>.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega_e L_s & pL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + pL_s & -\omega_e L_m & pL_m \\ pL_m & \omega_e L_m & R_r + pL_r & \omega_g L_r \\ -\omega_g L_m & pL_m & -\omega_g L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 때 회전자 자속 식 (7)과 (8)을 자화전류  $i_{mr}$  을 이용하여 표시하면 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_m i_{mr} \quad (10)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (11)$$

유도전동기에서는 관측의 기준 축인  $\Phi$  축의 회전자 자속을 축에 일치시켜 정렬하면 q 축 회전자 자속( $\lambda_{qr}$ ) 이 0 이 되고 d 축 회전자 자속( $\lambda_{dr}$ ) 은 일정한 값을 가지게 된다. 그리고 식(10)과 (11)을 이용하여 d 축 전류를 계산하여 자화전류를 표현하면 다음과 같다.

$$i_{mr} = \frac{\lambda_{dr}}{L_m} = \frac{L_r i_{dr} + L_m i_{ds}}{L_m} = \frac{L_r}{L_m} i_{dr} + i_{ds} \quad (12)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_r}{L_m} i_{qs} \quad (13)$$

식(12)에서  $i_{mr}$  을 계산하기 위하여  $i_{dr}$  전류 값을 알아야 하는데 농형 유도전동기의 경우 이 값을 직접 측정할 수 없기 때문에 유도전동기 전압 방정식을 사용해 간접적으로 계산한다. 회전자 q 축 자속( $\lambda_{qr}$ ) 이 0 이고 d 축 회전자 자속( $\lambda_{dr}$ ) 은 일정한 값을 가지게 되므로,

$$|\lambda_r| = \lambda_{dr}, \lambda_{qr} = 0 \quad (14)$$

식 (14)와 식 (3)에서 회전자에 전류는 0 이라는 사실을 이용하면 식 (3)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{dr} = 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\lambda_{qr} \\ &= R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (7)을  $i_{dr}$  에 대하여 정리하면

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r}(\lambda_{dr} - L_m i_{ds}) \quad (16)$$

식 (16)을 식 (15)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$(R_r + L_r \frac{d}{dt})\lambda_{dr} = L_m R_r i_{ds} \quad (17)$$

식 (17)에서  $\lambda_{dr}$  을 구하여 식 (12)에 대입하면 다음과 같이  $i_{mr}$  에 대한 미분방정식을 얻는다.

$$i_{mr} + \left(\frac{L_r}{R_r}\right) \frac{di_{mr}}{dt} = i_{ds} \quad (18)$$

식 (18)에서  $L_r$  과  $R_r$  은 유도전동기 회전자에 자기인덕턴스와 회전자 저항이므로  $i_{ds}$  를 측정하고 미분방정식을 계산하면 자화전류  $i_{mr}$  을 계산할 수 있다.

## 2.2 슬립 각속도 추정

회전자의 전압은 0 이고 회전자에 q 축의 자속이 0 인 사실을 이용하면 식 (4)는 다음 식과 같이 된다.

$$R_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r)\lambda_{dr} = 0 \quad (19)$$

식 (19)를 슬립각속도의 표현으로 나타내면,

$$\omega_e - \omega_r = -\frac{R_r i_{qr}}{\lambda_{dr}} = \omega_{sl} \quad (20)$$

식 (13)을 식 (20)에 대입하여 정리하면 슬립각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r = -\frac{R_r \left(-\frac{L_m}{L_r}\right) i_{qs}}{L_m i_{mr}} = \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{L_m}\right) i_{mr}} \quad (21)$$

식 (21)에서 알 수 있듯이 회전자에 자기인덕턴스, 회전자 저항, 고정자의 q 축 전류 및 자화전류 값만 알면, 슬립각속도를 추정할 수 있다.

## 2.3 전동기 각속도 및 Torque 추정

동기속도  $\omega_e$  는 고정자 각 권선에 인입되는 a, b, c 상 전류의 주파수와 같으므로, 슬립각속도의 추정치  $\omega_{sl}$  을 계산하면 전동기 속도  $\omega_r$  을 추정할 수 있다. 따라서 전동기 속도 추정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega_r = \omega_e - \omega_{sl} = \omega_e - \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{L_m}\right) i_{mr}} = \omega_e - \frac{L_m i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) \lambda_r} \quad (22)$$

한편, 유도 전동기에 발생하는 전기적 토크를 구하는 식은 다음과 같다.<sup>(8)(9)(10)</sup>

$$T_e = \frac{3 P L_m}{2 L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (23)$$

여기서  $P$  는 극 수이다.

식 (23)에서  $\lambda_r$  은 식(14), (12)를 참조하면  $i_{mr}$  을 이용하여 계산할 수 있다.  $i_{mr}$  은 식 (18)에서 구해지며  $i_{qs}$  는 측정되는 값이므로 식(23)에서 토크  $T_e$  를 구할 수 있다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험장치

실험에 사용된 유도전동기는 프랑스 Leroy Somer 제품인 7.5kw 급 LS-VMV132M 으로 규격은 다음과 같다.

Table 1 Specification of induction motor

Phase/Pole	Rated Power	Rated Current
3phase/4pole	220V	25.5A
Raetd Angular Velocity	Connection	Frequency
1800rpm	$\Delta$ -connected	60Hz

Table 2 Parameter of induction motor

Parameter	실제값
Stator resistance ( $R_s$ )	0.2916 $\Omega$
Rotor resistance ( $R_r$ )	101712 $\Omega$
Stator self-inductance ( $L_s$ )	0.4702H
Rotor self-inductance ( $L_r$ )	0.4702H
Mutual inductance ( $L_m$ )	0.04551H
Inertia ( $J_m$ )	0.0475 kg · m <sup>2</sup>
Load torque ( $T_L$ )	58.8N · m

1024 pulse/rev 엔코더(encoder)가 내장되어 있고, DC 브레이크 부하시스템이 커플링 되어 있다. U, V, W 의 3 상 전류는 ABB EL100P2 100A Hall-Sensor 를 사용하여  $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  를 측정하였다. 정지 상태에서 정상상태까지의 속도변화 시 과도응답 신호가 발생하였으며, 모터의 정격속도에 맞추어 고주파 성분을 제거하기위해 10kHz 차단 주파수를 갖는 저 대역 통과 필터를 제작하였다. 고정자 전류신호는 A/D 변환 보드인 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board 를 통해 A/D 변환한 후 586PC 에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 토크 추정 알고리즘인 Fig. 1 에 따라 Graphical programming 기법인 LabVIEW 6.0i<sup>(11)(12)</sup>을 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다. 유도모터에는 부하용 DC 모터가 연결되어 조건에 따라 가변적인 부하를 제공하였다.

### 3.2 토크추정 알고리즘

지금까지의 방식은 벡터제어에 의한 목표치의 변화에 의하여 모터토크의 변화를 감시하여 왔으나 목표 값과 실제 값의 거동에 대한 일치성을 보임으로써 부하에 의한 전체 토크의 변화를 홀 센서를 이용하여 간단히 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 전체시스템이 전류에 대한 식으로 나타낼 수

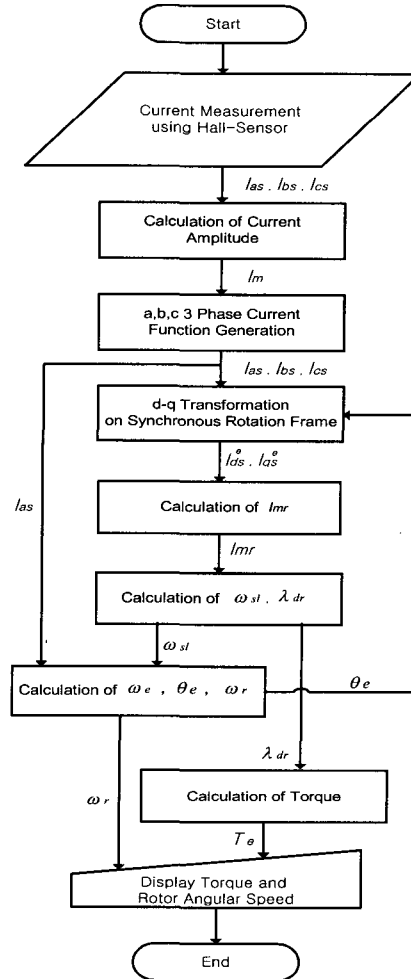


Fig. 1 Flow chart of torque estimation

있는 근거를 제시한다. 실험에 사용된 PWM 방식의 벡터제어 알고리즘을 Fig. 2 에 도시하였다. 제어 시스템은 속도를 제어하기 위하여 목표 값으로 선정된 속도 지령 값으로부터 모터의 자속과 발생 토크의 목표치가 정해진다. 자속벡터와 같은 방향으로 자속을 발생하는데 필요한 전류( $i_{ds}^*$ )와 자속 벡터의 직교방향으로 토크를 발생하는데 필요한 전류( $i_{qs}^*$ )를 각 권선에 할당한다. 여기서 \*는 목표치를 나타낸다.

### 3.3 무부하 상태에서의 구동 실험 결과

토크 감시 시스템을 구축하여 토크를 추정한

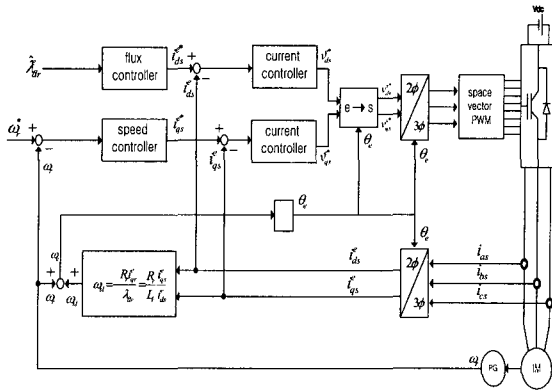


Fig. 2 Vector control block diagram in induction motor

결과 Fig. 3(a)와 같이 심하게 진동하였다. 이는 3상 전류가 정확히 120°의 위상차를 갖지 못한 상태에서 회전속도의 미세한 변화가 발생할 때 일어나는 현상이다. 이를 극복하기 위하여 식 (24)와 같이, 측정된 전류성분으로 전체전류의 실효율을 구한 후, 계산된 속도성분으로 회전변위를 구하고 전류신호를 재 생성하여 d-q 변환과정의 회전변위와 전류의 변위를 일치시켰다<sup>(13)</sup>. 결과적으로 Fig. 3(b)와 같이 토크신호를 안정시킬 수 있었다.

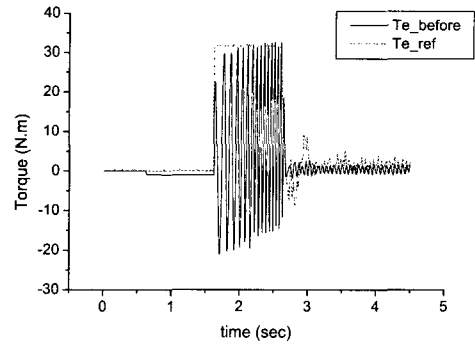
$$I_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{as}^2 + i_{bs}^2 + i_{cs}^2} \quad (24)$$

$$i_{as} = I_m \cos \theta_e \quad (25)$$

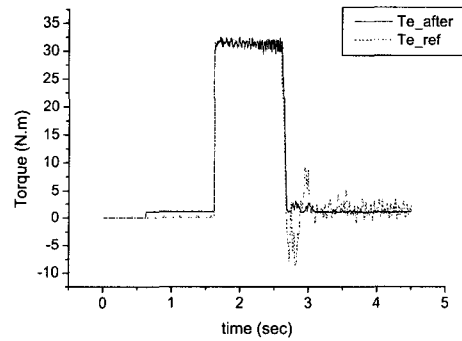
$$i_{bs} = I_m \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (26)$$

$$i_{cs} = I_m \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (27)$$

Fig. 4-6은 무 부하 상태에서 모터의 회전자가 500, 1000, 1500rpm로 각각 회전할 때, 토크 추정 결과를 나타낸다. Fig 4에서 토크는 기준치와 비교해 1% 이내의 오차율을 보였다. 500rpm의 정상 상태 초기상태에서 토크 값이 심하게 떨리는 현상이 발생하는 이유는 저속으로 회전할 때 전동기내 전기장의 비대칭과 전기적인 잡음 등에 의한 것으로 추정된다. 떨림 현상이 없는 구간은 일정한 회전속도를 얻고 있음을 알 수 있다. Fig 5, 6에서도



(a) Estimated torque before the improvement of the torque estimation algorithm



(b) Estimated torque before the improvement of the torque estimation algorithm

Fig. 3 Comparison of the estimated torque before and after the improvement of the torque estimation algorithm

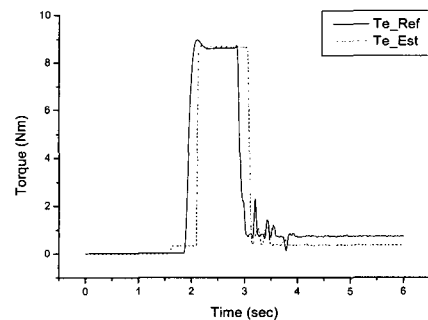


Fig. 4 Estimated and reference torque at 500rpm without load

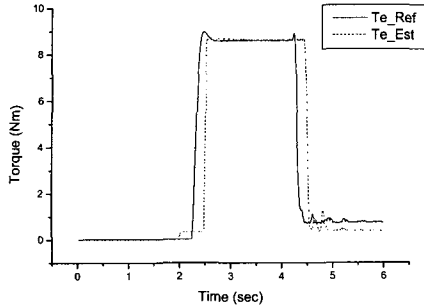


Fig. 5 Estimated and reference torque at 1000rpm without load

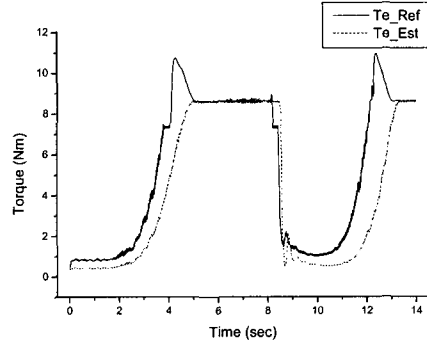


Fig. 8 Estimated and reference torque at 1000rpm with load

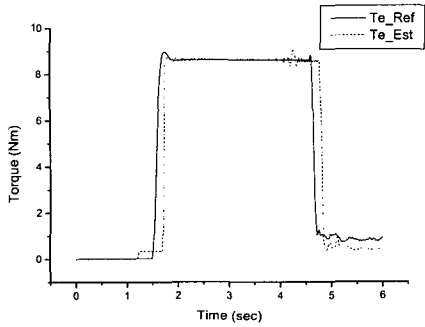


Fig. 6 Estimated and reference torque at 1500rpm without load

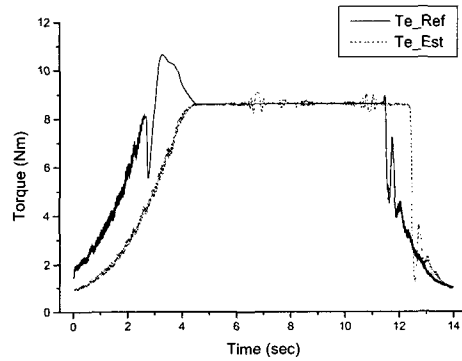


Fig. 9 Estimated and reference torque at 1500rpm with load

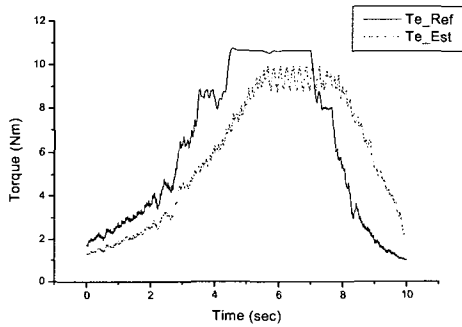


Fig. 7 Estimated and reference torque at 500rpm with load

측정된 실제 치와 기준치의 오차율 또한 1%이내임을 알 수 있다.

### 3.4 부하 상태에서의 구동 실험 결과

Fig. 6 부터 Fig. 8 까지는 각각 500, 1000, 1500rpm 일 때 정상상태에서 DC 부하장치로 부하를 가했을 때의 결과를 나타낸다. 유도전동기에 커플링 된 DC 부하장치에 직류전류를 인가 시켜 토크변화를 살펴보았다. 1000rpm 과 1500rpm 에서는 측정된 토크 실제 치와 기준치와의 오차율이 1%이내이지만 저속 영역인 500rpm 에서는 오차율이 3.7%이므로 고속영역보다 상대적으로 큰 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 500rpm 은 비교적 낮은 속도이므로 충분한 관성을 얻지 못하고 전기장의 비대칭효과가 고속일 때보다 크게 나타나므로 전류로 추정된 토크가 실제 토크와의 오차가 커지는 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 별도의 부가적인 장치 없이 고정자 전류만을 이용하여 기존에 설치되어 있는 유도전동기의 벡터제어에 의한 새로운 토크추정 알고리즘을 개발하였다.

- 1) 고정자 전류신호를 이용하여 자화전류를 구하였고, 자화전류로부터 자속, 슬립각속도, 유도전동기에 인가되는 토크를 구하였다.
- 2) 잡음 때문에 발생하는 전류의 불안정요소를 제거하기 위해 프로그램내에서 전류를 재구성하였으며 이를 포함한 토크모니터링 시스템을 graphical programming 을 이용하여 구축하였다.
- 3) 개발된 시스템은 하중이 주어지지 않았을 때나 주어졌을 때 둘 다 작동하였으며 특히 1000rpm 이상의 속도에서 토크를 1% 오차 이내로 매우 잘 추정하였다.

#### 후 기

본 논문은 2001 년도 서울시립대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

#### 참고문헌

1. K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsure, "Sensorless Control of AC Motor Drives," IEEE PRESS, pp. 1-19, 1996.
2. Thomas A. Lipo, "Motion Control with Induction Motors," Proceedings of The IEEE, Vol. 82. No. 8, August 1994.
3. T. Kanmachi and I. Takahashi, "Sensorless Speed Control of An Induction Motor with No Influence of Secondary Resistance Variation," IEEE IAS Ann. Mtg, pp. 408-413, 1993.
4. J.HU and B.WU, "New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux Over a Wide Speed Range," IEEE PESC'97, pp. 1075-1081, 1997.
5. Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed Loop Control System for Rotation Field Machines," Siemens Reviews, Vol. 34, pp. 217-220, 1972.
6. Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery," McGraw-Hill, 1986.
7. Peter Vas, "Sensorless vector and direct torque control," Oxford University Press, 1998.
8. 정동화, "유도전동기의 고성능제어를 위한 속도 센서리스 벡터제어," 대한전자학회, 93 년도 전자공학논문지-B v30-B, pp. 1085-1094, 1993.
9. 설승기, 권봉현, 강준구, "유도전동기의 속도 추정 벡터제어에 관한 연구," 대한전기학회논문지, Vol. 39, pp. 928-933, 1990.
10. 설승기, "유도전동기 단자전압, 전류에 의한 속도계산 및 속도제어에 관한 연구," 대한전기학회논문지, Vol. 35, pp. 445-451, 1986.
11. 장현오, "LabVIEW 그래픽프로그램의 이해," (주)ADC 시스템, 서울, 1998.
12. National Instrument, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference," 2000.
13. 이인환, 권원태, "Graphic-programming 을 이용한 주축용 유도전동기의 토크감시 시스템 개발," 한국정밀공학회논문집, 제 18 권, 제 10 호, pp. 184-193, 2001.