

그래픽 프로그래밍 기법을 이용한 주축용 유도전동기의 속도 센서리스 토크감시

박진우, 홍익준*(서울시립대 대학원 기계정보공학과), 권원태(서울시립대 기계정보공학과)

Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor using Graphic programming

J. W. Park, I. J. Hong, W. T. Kwon(Mech. and Infor. Eng. Dept. Univ. of Seoul)

ABSTRACT

In vector control technique, stator currents of an induction motor are transformed to equivalent d-q currents in reference frame consist of d and q axis, each of which is coincide with flux and torque direction respectively. In this paper, the new algorithm is suggested where the stator current through an induction motor torque is monitored by using a vector control method where an additional equipment is not need. The G-programming is used to apply the suggested algorithm in the experiment and this is applied to an actual system to monitor the torque value of an induction motor on real time. To solve the vibration trouble of estimated torque caused from an unbalanced real rotating speed of an induction motor and measured rotating speed by suggesting the reconstructed in a method based on measurement current signal. This produced system testifies an accuracy of an induction motor through the experiment by comparing the reference value of the control method.

Key Words : Induction motor(유도모터), Sensorless Speed Estimation(센서리스 속도추정), Vector control(벡터제어), Graphical-program(그래픽프로그램)

1. 서론

속도센서가 없는 유도전동기 벡터제어방식⁽¹⁾은 전압/주파수 일정제어방식에서 문제가 되는 기동시 또는 저속 운전시의 토오크 부족현상, 속도 제어 정밀도 등을 해결하기 위한 방안으로 제시되었으며, 이에 관련된 많은 연구 결과들이 발표되었다. 그러나 현재까지 발표된 연구 결과들은 전류와 전압측정치들의 순수 적분연산이 필요하여 직류 오프셋에 민감하거나, 설정하기 힘든 파라미터들을 포함하고 있거나 모든 동작영역에서의 수렴성을 보장하지 못하거나 하는 등의 단점을 안고 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 입력 3 상 전류를 측정하고, 이를 이용하여 회로구성이 간단하며 전동기의 크기나 제어방법과는 관계없이 간단히 적용할 수 있는 유도전동기의 토크를 측정하는 방법을

제시할 것이다. 이는 기존의 제어방법에서 탈피하여 보다 간편한 방법으로 토크를 추정하고 실용성을 가진 토크측정 시스템을 개발할 것이다.

2. 센서리스 벡터제어

2.1 자화전류의 연산

동기 회전 좌표계에서 3 상 유도전동기의 d-q 방정식은 다음과 같다.⁽²⁾

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pL_m & \omega L_m \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega L_m & pL_m \\ pL_m & \omega_s L_m & R_r + pL_r & \omega_s L_r \\ -\omega_s L_m & pL_m & -\omega_s L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 s는 고정자측, r은 회전자측, d는 d 축, q는 q 축 성분을 각각 나타내며 p는 미분 연산자(d/dt)이다. 회전자측 전압은 단락되어 있으므로 0이며 L_m은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스, ω는 동기속도, ω_s은 슬립각속도를 나타낸다.

회전자 자속식은 다음과 같다.⁽³⁾

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_m i_{mr} \quad (2)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3)$$

식(2)에서 i_{mr} 은 자화전류를 나타낸다. 유도전동기에서는 관측의 기준축인 Φ 축의 회전자 자속을 축에 일치시켜 정렬하면 q 축 회전자 자속(λ_{qr})이 0이 되고 d 축 회전자 자속(λ_{dr})은 일정한 값을 가지게 된다. 그리고 (1)식을 이용하여 'd' 축 전류를 계산하여 자화전류를 표현하면 다음과 같다.

$$i_{mr} = \frac{i_{ds}}{1 + \left(\frac{L_r}{L_m}\right) \frac{d}{dt}} \quad (4)$$

2.2 슬립 각속도 추정

회전자 q 축 방정식을 이용하여 슬립각속도를 나타내면 다음과 같다.

$$\omega - \omega_r = -\frac{R_r i_{qr}}{\lambda_{dr}} = \omega_{sl} \quad (5)$$

식(3)과 식(4)를 식(5)에 대입하여 정리하면 슬립 각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{sl} = \omega - \omega_r = -\frac{R_r \left(-\frac{L_m}{L_r}\right) i_{qs}}{L_m i_{mr}} = \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{L_m}\right) i_{mr}} \quad (6)$$

2.3 전동기 각속도 및 Torque 추정

동기속도 ω 는 고정자 각 권선에 인입되는 a, b, c 상 전류의 주파수와 같으므로, 슬립각속도의 추정치 ω_{sl} 를 계산하면 전동기 속도 ω_r 를 추정할 수 있다. 따라서 전동기 속도 추정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega_r = \omega - \omega_{sl} = \omega_e - \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{L_m}\right) i_{mr}} = \omega_e - \frac{L_m i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{L_m}\right) \lambda_r} \quad (7)$$

한편, 유도 전동기에 발생하는 전기적 토크를 구하는 식은 다음과 같다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} \frac{L_m}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (8)$$

여기서 P 는 극수이다.

식(4)로부터 자속은 i_{ds} 에 의해 일정하게 제어될 수 있으며, 식(8)로부터 토크는 i_{qs} 에 의해 제어될 수 있음을 알 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	∅-connected	60Hz

Table 2 Parameter of induction motor

Parameter	실제치
Stator resistance (R_s)	0.2916 \square
Rotor resistance (R_r)	101712 \square
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
Road torque (T_l)	6 kg·m

1024 pulse/rev 엔코더(Encoder)가 내장되어 있고, DC 브레이크 부하시스템이 커플링 되어 있다. U, V, W의 3상 전류는 ABB EL100P2 100A Hall-Sensor를 사용하여 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 측정하였다. 정지상태에서 정상상태까지의 속도변화시 과도응답신호가 발생하였으며, 모터의 정격속도에 맞추어 고주파 성분을 제거하기위해 10kHz차단 주파수를 갖는 저대역 통과 필터를 제작하였다. 고정자 전류신호는 A/D 변환보드인 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board를 통해 A/D 변환한 후 586PC에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 토크 측정 알고리즘인 Fig 2에 따라 Graphical programming기법인 LabVIEW 6.0i⁽⁷⁾⁽⁸⁾를 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다. 유도 모터에는 부하용 DC모터가 연결되어 조건에 따라 가변적인 부하를 제공하였다.

3.2 토크추정 알고리즘

여태까지의 방식은 벡터제어에 의한 목표치의 변화에 의하여 모터토크의 변화를 감시하여 왔으나 목표치와 실제치의 거동에 대한 일치성을 보임으로써 부하에 의한 전체 토크의 변화를 홀 센서를 이용하

여 간단히 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 전체시스템이 전류에 대한 식으로 나타낼 수 있는 근거를 제시한다. 실험에 사용된 PWM 방식의 벡터제어 알고리즘을 Fig 1에 도시하였다. 제어 시스템은 속도를 제어하기 위하여 목표치로 선정된 속도 지령치로부터 모터의 자속과 발생 토크의 목표치가 정해진다. 자속벡터와 같은 방향으로 자속을 발생하는데 필요한 전류 (i_d^{*})와 자속벡터의 직교방향으로 토크를 발생하는데 필요한 전류 (i_q^{*})를 각 권선에 할당한다. 여기서 *는 목표치를 나타낸다.

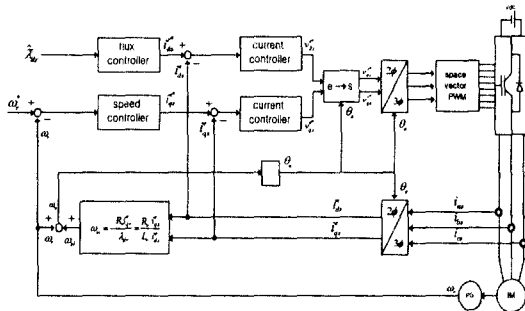


Fig. 1 Vector control block diagram in induction motor

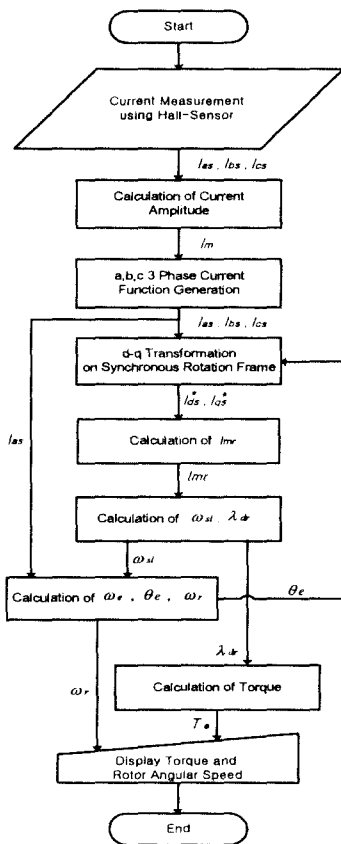


Fig. 2 Torque estimation algorithm

3.3 무부하 상태에서의 구동 실험 결과

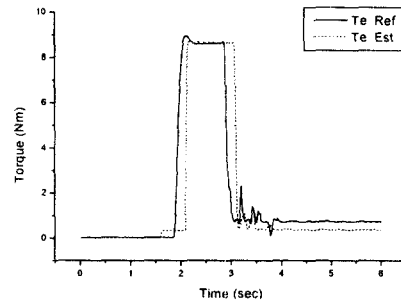


Fig. 3 Estimated and reference torque (Speed = 500rpm)

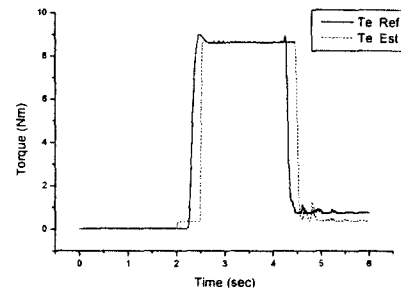


Fig. 4 Estimated and reference torque (Speed = 1000rpm)

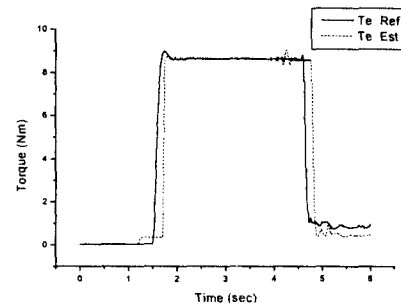


Fig. 5 Estimated and reference torque (Speed = 1500rpm)

Fig 3 부터 Fig 5 까지는 모터의 회전자가 500, 1000, 1500rpm 구동시 무부하일때의 결과를 나타낸다. Fig 3 에서 토크는 기준치와 비교해 1%이내의 오차율을 보임을 알 수 있고 500rpm 의 정상상태에서 토크 값이 심하게 떨리는 현상이 발생하는 이유는 전기적인 잡음과 A/D 변환시의 시간지연과 같은 비선형적인 요소에 의한 현상임을 알 수 있다. 떨림 현상이 없는 구간은 일정한 회전속도를 얻고 있음을 알 수 있다. Fig 4, 5 에서도 측정된 실제치와

기준치의 오차율 또한 1%이내임을 알 수 있다.

3.4 부하 상태에서의 구동 실험 결과

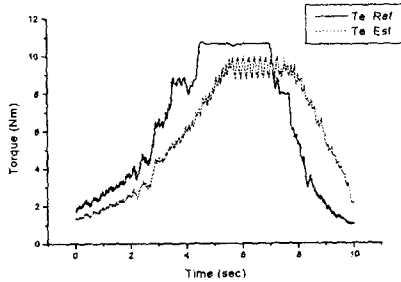


Fig.6 Estimated and reference torque (Speed = 500rpm)

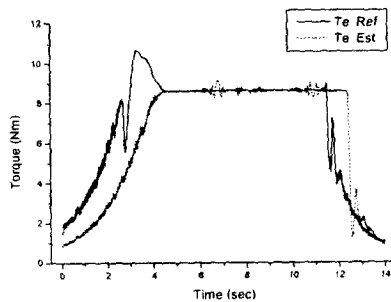


Fig. 7 Estimated and reference torque (Speed = 1000rpm)

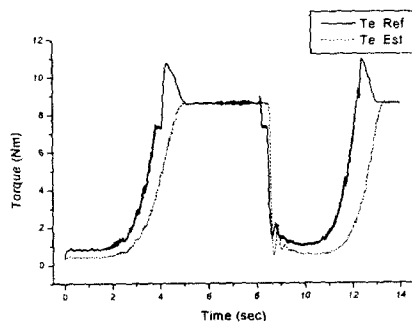


Fig. 8 Estimated and reference torque (Speed = 1500rpm)

Fig 6 부터 Fig 8 까지는 각각 500, 1000, 1500rpm 일때 정상상태에서 DC 부하장치로 부하를 가했을 때의 결과를 나타낸다. 유도전동기에 커플링 된 DC 부하장치에 직류전류를 인가시켜 토크변화를 살펴 보았다. 1000rpm 과 1500rpm 에서는 측정된 토크 실제치와 기준치와의 오차율이 1%이내이지만 저속영역인 500rpm 에서는 오차율이 3.7%이므로 고속영역 보다 상대적으로 큰 오차를 나타내고 있음을 알 수

있다.

4. 결론

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

1) 슬립 각속도를 추정함에 있어 유도전동기에 인입되는 전류신호만을 사용하기 때문에 실제시스템에 적용하기에 매우 편리함을 알 수 있다.

2) 본 논문에서 제안된 알고리즘에 대하여 G-programming 을 사용하여 토크 모니터링을 수행한 결과 속도 검출기를 사용한 기존의 벡터제어 방식보다 시간지연 현상이 상당히 개선됨을 알 수 있기 때문에 응답특성이 우수함을 알 수 있다.

3) 본 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 전동기 속도 및 토크를 추정한 결과 실제값과의 오차 범위가 2%범위 안에 있으므로 추정값에 대한 신뢰도가 우수한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. F. 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.
2. Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986.
3. Peter Vas, "Sensorless vector and direct torque control", Oxford University Press, 1998.
4. 정동화, "유도전동기의 고성능제어를 위한 속도센서리스 벡터제어", 대한전자학회, 93 년도전자공학논문지-B v30-B, pp. 1085-1094, 1993.
5. 설승기, 권봉현, 강준구, "유도전동기의 속도추정 벡터제어에 관한 연구", 대한전기학회논문지 vol.39, pp. 928-933, 1990.
6. 박민호, 설승기, "유도전동기 단자전압, 전류에 의한 속도계산 및 속도제어에 관한 연구", 대한전기학회논문지 vol.35, pp. 445-451, 1986.
7. 장현오, "LabVIEW 그래픽프로그램의 이해", (주)ADC 씨스템, 서울, 1998.
8. National Instrument, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference", 2000.