

피드포워드적 토크속응제어법을 이용한
유도전동기의 저속영역 속도 추정

정석권 · 변정환
부경대학교

Speed Estimation Based Quick Torque Control of
Induction Motors in the Very Low Speed Region

S.K. Jeong · J.H. Byun
Pukyong National University

Abstract - In this paper, a speed estimation based on the quick torque control is proposed to realize speed sensorless control in a full range of induction motors. The proposed method can be formulated simply from a motor circuit equation and conducted easily by detecting primary motor currents and a voltage command at every sampling time. Since the method need not the differential values of primary currents in an arithmetic of a speed, it can be expected to improve the precision of speed estimation in a very low speed area, especially. Some numerical simulations were conducted with the assumption of using a Pulse Width Modulation voltage source inverter.

1. 서 론

최근, 서보시스템으로서 유도전동기(I.M) 구동 시스템이 보수적 불필요성 및 저가격, 장수명의 장점등으로 인해 광범위하게 보급되고 있다. I.M의 고속 토크 제어방식으로 개발된 벡터제어법은 I.M를 직류기와 동등한 속도응답을 갖게 하기에 이르렀다. 그러나, 벡터제어법은 자속이나 전압지령 연산시 속도정보를 필요로 하며, 속도정보는 모터 축에 장착된 엔코더등의 속도센서를 통해 얻고 있다. 이들 센서들은 모터 제작비의 상승과 I.M의 견고성을 해치는 주된 요인이 될 뿐만 아니라 모터와 컨트롤러와의 거리가 멀어질 경우 노이즈의 영향으로 인해 원격제어를 어렵게 하는 요인이 되기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 I.M의 다양한 속도센서리스제어법이 개발되어졌으며¹⁻⁶⁾ 수십[rpm] 이상의 영역에서는 이미 상용화에 이르렀다. 그러나 수[rpm]의 저속영역에서의 속도 추정이 어려워 모터의 전 운전 영역에서의 속도센서리스화가 달성되지 못하고 있다.

본 연구의 목적은 I.M의 저속영역에서의 속도 추정이 용이한 속도센서리스 제어방식을 검토하고 PWM인버터에 의한 실현 가능성을 검증하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 토크속응제어법⁷⁾에 근거한 속도센서리스 제어방식을 검토하고 이를 전압형 인버터로 실현하는 것을 전제로 하여, PWM인버터 수치 시뮬레이션을 수행한다.

제안된 방법은 모터의 회로방정식으로부터 유도된 이론식에 근거하여 모터 인가전압과 1차전류 검출에 의해 간단히 구현될 수 있음을 보인다. 또한, 제안된 방법은 속도연산시 1차전류의 미분정보를 이용하지 않으므로 저속영역에서의 속도추정이 비교적 양호함을 보인다.

2. 토크속응제어법에 의한 속도추정

2.1 토크 고속 응답 제어법

I.M의 상태방정식은 1차전류 x_1 과 2차전류 x_2 를 상태변수, 전압을 입력변수로 하여 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} L_2 \\ -m \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$A_{11} = -R_1 L_2 - jm^2 \theta_e, \quad A_{12} = R_2 m - jL_2 m \theta_e$$

$$\sigma^2 = L_1 L_2 - m^2 \quad L_i = \frac{3}{2} L_i + l_i, \quad m = \frac{3}{2} M$$

$$A_{21} = R_1 m + jL_1 m \theta_e, \quad A_{22} = -R_2 L_1 + jL_1 L_2 \theta_e$$

위 식에서 $R_i, L_i, l_i (i=1, 2 : 1차, 2차)$ 는 저항, 인덕턴스, 누설인덕턴스를 각각 나타내며, θ_e 는 전기각도, M 은 상호인덕턴스를 각각 나타낸다. 또한, (1)식에서 변수 x_1, x_2, u 는 복소변수로서 2축좌표계에 있어 실수부가 d 축, 허수부가 q 축에 각각 대응하고 있다.

I.M의 순시토크는 상태변수 x_1, x_2 를 이용해서, 다음과 같이 표현된다.

$$T = Nm \text{Im} [x_1 x_2] \quad (2)$$

여기서, N 은 극대수, Im 은 허수부를 그리고 기호 “-”는 공액복소수를 각각 의미한다.

식(1)의 I.M에 다음의 정현파입력이 인가될 경우,

$$u(t) = u_1 \exp(j\omega_1 t), \quad t \geq 0 \quad (3)$$

전류는 (3)을 (1)에 대입하여 (4)와 같이 얻어진다. 여기서, u_1 은 주파수 ω_1 을 갖는 전압벡터이다.

$$x_i(t) = x_{i1} \exp(-\tau_1 t) + x_{i2} \exp(-\tau_2 t) + x_{i3} \exp(j\omega_1 t) \quad (4)$$

위식에서 τ_i 는 시스템 행렬의 고유치를, $x_{ij} (j=1,2)$, x_{i3} 는 회로정수와 입력조건으로부터 결정되는 상수치를 각각 나타낸다. 또한, 식(4)의 우변 제 1항과 제 2항은 과도상태의 전류를, 그리고 제 3항이 정상상태의 전류를 나타내고 있다. 따라서 (4)식에서의 과도항의 소거가 토크의 과도현상을 없애기 위한 충분조건임이 (2)식으로부터 명백해 진다. I.M의 과도토크가 없는 해석적인 해

는 토크 가변시 정현파 전압에 적절한 임펄스 전압을 인가함으로써 얻어질 수 있다. 그러나 임펄스 인가는 실용적이지 못하므로 미소 정정시간 Δ 후에 과도토크를 소거하는 토크속응제어법⁷⁾을 저자는 제안한 바 있다.

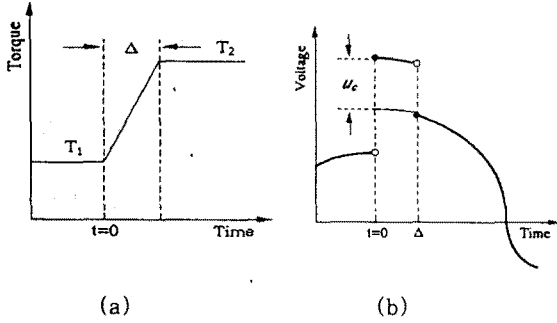


Fig. 1 Desired very quick torque control pattern and reference voltage variation

Fig. 1은 토크속응제어법의 개념도를 나타낸다. 토크속응제어법은 Fig. 1(a)와 같은 스텝적인 토크응답을 (5)식의 1차전압 인가으로써 실현한다. 변수 u_2, ω_2 는 $t \geq 0$ 에서의 전압 및 주파수를, u_c 는 정정시간후의 과도토크를 소거하기 위해 인가되는 전압을 각각 나타낸다.

$$u(t) = \begin{cases} u_1 \exp(j\omega_1 t) & t < 0 \\ u_2 \exp(j\omega_2 t) + u_c & 0 \leq t < \Delta \\ u_2 \exp(j\omega_2 t) & \Delta \leq t \end{cases} \quad (5)$$

Fig. 1(b)는 식(5)에 따른 상전압의 변화 모식도이다. 토크속응제어법에 의하면, 전압지령은

$$u_n = (\tau_1 + j\omega_n)(\tau_2 + j\omega_n) C_n \quad (6)$$

$$u_{cn} = j(\omega_n - \omega_{n-1}) \left\{ \frac{1}{\Delta} - \frac{j(\omega_n + \tau_1 + \tau_2)}{2} \right\} \times (1 - j\Delta\omega_{n-1}/2) C_n \quad (7)$$

와 같이 주어진다. 여기서,

$$C_n = C_i \exp(j\Delta \sum_{k=1}^{n-1} \omega_k)$$

$$C_i = C \exp \left\{ j \left(\varphi + \Delta \sum_{k=1}^{i-1} \omega_k \right) \right\}, i < n$$

$$C = \sqrt{\frac{\sigma^4 T_{rat}}{NR_2 m^2 (\omega_{rat} - \theta_{erat})}}$$

식(7)로부터, 펄스전압은 $\omega_n \neq \omega_{n-1}$ 인 토크 가변시에만 인가됨을 알 수 있다. 파라미터 C 는 I.M의 운전조건으로부터 정해지며 동작점을 의미한다. 임의의 n 시각에서의 주파수지령은 다음식으로 주어진다.

$$\omega_n = \frac{\sigma^4 T_{rat}^*}{NR_2 m^2 C^2} + \theta_{en} = (\omega_{rat} - \theta_{erat}) \frac{T_{rat}^*}{T_{rat}} + \theta_{en} \quad (8)$$

2.2 속도 추정법

I.M의 회로방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p & m p \\ m(p - j\theta_e) & R_2 + L_2(p - j\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

토크속응제어법에 의해 전류치가 정정시간 Δ 를 매개로 정상상태간을 이행하며, 전압지령치도 정상상태에서는 정현파전압만이 인가되므로 식(9)에서의 미분연산자 p 는 $j\omega$ 로 대치할 수 있다. 한편, 식(9)를 d, q 축으로 분리하면, 1차축과 2차축에 관한 (10)식과 (11)식이 각각 얻어진다.

$$u_d = R_1 x_{1d} - L_1 \omega_n x_{1q} - m \omega_n x_{2q}$$

$$u_q = L_1 \omega_n x_{1d} + R_1 x_{1q} + m \omega_n x_{2d} \quad (10)$$

$$0 = -m(\omega_n - \theta_e) x_{1q} + R_2 x_{2d} - L_2(\omega_n - \theta_e) x_{2q}$$

$$0 = m(\omega_n - \theta_e) x_{1d} + L_2(\omega_n - \theta_e) x_{2d} + R_2 x_{2q} \quad (11)$$

파라미터 u_d 와 u_q, ω_n 은 마이크로프로세서에서 전압지령으로 연산되는 값이며, x_{1d}, x_{1q} 는 1차전류를 검출함으로써 얻어질 수 있으므로 기지의 값이다. 2차저항 R_2 를 일정으로 하면, 미지의 파라미터는 2차전류와 모터속도 임을 알 수 있다. 2차전류는 (10)식의 연립방정식으로부터 다음과 같이 모터정수 및 1차축 파라미터로 치환된다.

$$x_{2d} = (-L_1 \omega_n x_{1d} - R_1 x_{1q} + u_q) / m \omega_n$$

$$x_{2q} = (R_1 x_{1d} - L_1 \omega_n x_{1q} - u_d) / m \omega_n \quad (12)$$

따라서, 모터속도는 (12)를 (11)에 대입하여 (13)식과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} a \theta_e &= b \\ c \theta_e &= d \end{aligned} \quad (13)$$

$$a = R_1 L_2 x_{1d} - \sigma^2 \omega_n x_{1q} - L_2 u_d$$

$$b = -(-R_2 L_1 \omega_n x_{1d} - R_1 R_2 x_{1q} + R_2 u_q) + a \omega_n$$

$$c = -R_1 L_2 x_{1q} - \sigma^2 \omega_n x_{1d} + L_2 u_q$$

$$d = -(R_2 L_1 \omega_n x_{1q} - R_1 R_2 x_{1d} + R_2 u_d) + c \omega_n$$

식(13)을 만족하는 모터속도는 식(14)에서의 Q 를 최소화하는 값으로부터 (15)와 같이 구해질 수 있다.

$$Q = (a \theta_e - b)^2 + (c \theta_e - d)^2 \quad (14)$$

$$\hat{\theta}_e = \frac{ab + cd}{a^2 + c^2} \quad (15)$$

식(15)의 연산은 1차전류치 및 마이크로프로세서로부터의 전압치만으로 수행될 수 있으므로 제어연산 및 제어계의 구축이 대단히 간단하게 된다.

2.3 수치 시뮬레이션

Fig.2는 수치 시뮬레이션을 위해 상정한 유도전동기의 속도추정 시스템 블록도이다. 컨트롤러는 전압형 인

버터로서 캐리어주파수 3(kHz), 삼각파변조방식, 3상, 200V 전원전압을 갖는 것으로 가정하였다. 샘플링주파수 및 토크 가변시의 정정시간 Δ 는 1(ms)로 설정하였다.

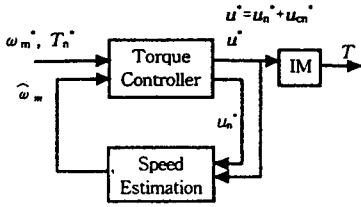


Fig. 2 Speed estimation system

시뮬레이션에 사용된 I.M는 4극, 2.2(kW)로서 모터정수는 R_1 , 0.58(Ω), R_2 , 1.5(Ω), L_1 , 100(mH), L_2 , 108.8(mH)이며, m , 100.4(mH)이다.

Fig. 3은 제안된 이론식을 PWM이 아닌 방법으로 시뮬레이션한 결과이다. (a)는 토크응답과 지령속도 및 추정된 속도를, (b)는 이때의 전압지령을 그리고 (c)는 전류응답을 각각 나타내고 있다. 그림으로부터 설정된 정정시간동안 토크속응제가 수행되고 있음을 알 수 있으며, 속도도 정확히 추정되고 있음을 알 수 있다.

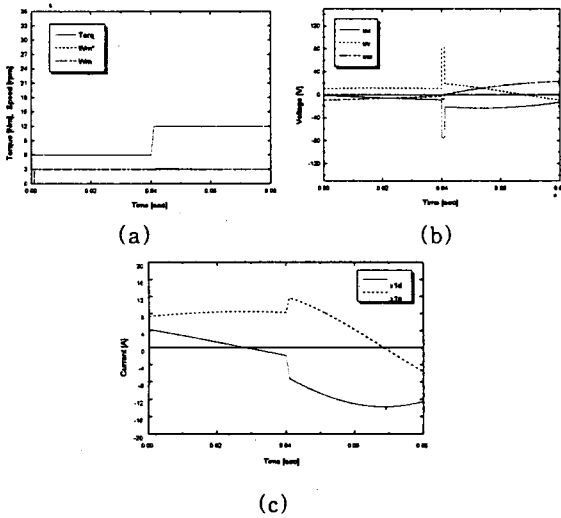


Fig. 3 Simulation result under the without PWM

Fig. 4는 Fig. 3과 동일조건하에서 PWM 시뮬레이션을 수행하였을 경우의 결과를 나타내고 있다.

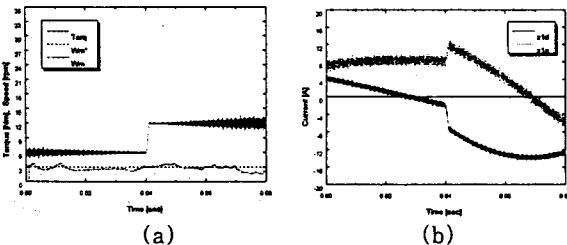


Fig. 4 Simulation result under the PWM

그림으로부터 스위칭시의 전류리플성분으로 인해 속도 추정에 다소의 오차는 있으나 3(rpm)과 같은 저속영역에서도 비교적 양호한 속도 추정 정도를 보이고 있다.

Fig. 5는 추정된 속도를 이용하여 토크제어를 수행하였을 때의 토크응답 및 속도변화를 나타낸다.

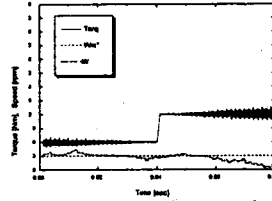


Fig. 5 torque control using estimated speed

이 그림을 통하여 추정된 속도에 의해서도 Fig. 4와 동등한 정도의 토크제어가 가능함을 알 수 있다.

3. 결 언

본 논문에서는 I.M의 수(rpm)대의 저속영역에서도 속도센서리스제어가 가능하도록 하기 위하여, 토크속응 제어법을 이용한 속도추정법을 검토하였다. 수치시뮬레이션을 통하여 PWM이 아닌 경우에는 정확한 속도추정이 가능함을 알 수 있었고, PWM인버터를 상정한 시뮬레이션시에는 전류리플성분으로 인해 속도 추정정도가 다소 감소함을 알 수 있었다. 그러나, 본 방안은 3(rpm)과 같은 저속에서도 속도추정이 가능하였고 추정된 속도를 이용한 토크제어도 가능함을 확인할 수 있었다. 향후 2차저항 변동을 고려한 대책등을 강구하고, 실기실험을 통해 I.M의 전 속도 범위에서의 속도센서리스제어가 실현될 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T.W.Kim, A.Kawamura, "Sensorless Slip Frequency Estimation of Induction Motor in the Very Low Speed Region", IEE Japan, Vol. 116-D, No. 6, 652-658, 1996
- [2] A.Gastli, M.Iwasaki, N.Matsui, "Speed Sensorless Vector Control of Secondary Flux Controlled Induction Motor", IEE Japan, Vol. 113, No. 1, 87-95, 1993
- [3] H.Kubota, M.Ozaki, K.Matsuse, T.Nakano, "Direct Field Oriented Control of Induction Motor Without Speed Sensors Using Adaptive Flux Observer", IEE Japan, Vol. 111, No. 11, 954-960, 1991
- [4] T.Okuyama, N.Hujimoto, T.Matsui, Y. Kubota, "Vector Control Scheme of Induction Motor without Speed and Voltage Sensors", IEE Japan, Vol. 107, No. 2, 191-197, 1987
- [5] T.Ohtani, E.Watanabe, H.Takasaki, N. Takada, "Approach of Vector-Controlled Induction Motor Drives without Speed Sensor", IEE Japan, Vol. 107, No. 2, 199-206, 1987
- [6] 정석권, 전봉환, 김상봉 "유도전동기의 토크 속응제어방식에 근거한 속도 추정법의 제안", 대한전기학회 하계학술대회는논문집, 255-257, 1995
- [7] S.K.Jeong, Y.Fujii, T.Sekiguchi, "A Method to Realize Very Quick Torque Control of Induction Motor Systems with Voltage-Source Inverter", IEE Japan, Vol. 115-D, No. 4, 394-401, 1995