

저속정보를 이용한 2차저항 동정기능을 갖는 유도전동기의 저속영역 속도센서리스 제어

이진국 · 정석권

부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과, 부경대학교 기계공학부

Speed Sensorless Control of Induction Motors in the Very Low Speed Region Considering the Secondary Resistance Identification using Flux Signal

Z. G. Lee and S. K. Jeong

Dep. of Mechatronics Eng. Graduate School, Div. of Mechanical Eng. PKNU

Abstract - This paper investigates a novel speed sensorless control method of I.M considering the secondary resistance identification based on the transientless torque control technique. Especially, this paper aimed at the identification of the secondary resistance simultaneously with speed estimation superposing of sinusoidal flux wave to a constant flux value. Furthermore, the secondary flux with some frequency is controlled independently on torque control. The proposed speed estimation method is derived from a motor circuit equation theoretically and also it can be conducted easily by detecting primary motor currents and primary voltage commands at every sampling time. Some numerical simulations with the assumption of using a pulse width modulation(PWM) voltage source inverter are performed to verify the proposed method.

1. 서 론

농형유도모터(I.M)는 보수의 용이성, 가격의 저렴성 등에서 매우 뛰어난 특징을 가지고 있으며, 파워일렉트로닉스기술의 발전에 힘입어 가변속모터로서 다양한 분야에 적용이 확대되고 있다.

고성능 가변속제어법의 구현에는 속도정보가 필수 요소이며, 이 속도정보는 보통 모터 축에 장착한 엔코더 등 물리적 센서를 통해 얻고 있다. 하지만, 검출기 부착에 따른 모터 제작비의 상승, 모터가 갖는 고유의 강인성의 훼손, 신호선에 혼입되는 노이즈로 인한 원격제어의 곤란등이 문제점으로 지적되어 있다. 따라서 속도센서 없이 속도제어를 행하는 다양한 속도센서리스제어가 연구되고 있다.

그러나, 현재까지는 전 속도 범위에서의 속도센서리스 제어에는 아직 이르지 못하고 있는 실정이다. 그 주된 원인으로는 저속영역에서의 정확한 속도추정의 곤란함과 운전중 큰 폭으로 변화하여 속도추정에 영향을 미치는 2차저항에 대한 동시동정의 어려움을 대표적으로 들 수 있다.

본 논문은 유도모터의 2차저항 동정이 가능하면서도 저속에서 속도추정이 용이한 속도센서리스제어방식을 제안함을 목적으로 한다. 이를 위해, 우선 원하는 출력토크와 2차자속의 크기를 입력 파라미터로 하는 순시토크 제어법을 구축하고, 이 제어법에 근거한 속도추정식과 2차저항 동정식을 유도한다. 특히, 2차자속지령에서 그 크기를 소정의 진폭 및 주기를 갖는 사인파형으로 가변시킴으로써 운전중 변동하는 2차저항을 속도추정과 동시에 동정가능함을 보인다. 마지막으로, 시뮬레이션을 통해 2차저항 변동하에서도 양호한 속도센서리스제어가 실현됨을 보인다.

2. 본 론

2.1 순시토크 제어법

순시토크 제어법은 유도모터의 수학적모델에 근거하여, 과도토크를 발생하지 않는 순시토크 제어를 위한 1차전압지령을 구하는 기법이다. 이 기법에서는 원하는 출력토크와 2차자속의 크기를 입력 파라미터, 모터에 인가하게 될 전압이 출력 파라미터로 된다. 이 기법은 전압지령 연산시 속도정보만을 사용하고 전류정보는 사용하지 않는다는 점과 최 단시간에 원하는 토크를 출력한다는 것이 큰 특징이다.

2.1.1 순시토크 제어법의 이론적 배경

회전자를 고정자축으로 환산한 2상 고정좌표계에서 유도모터의 회로방정식, 전자기적인 순시토크식 및 순시 2차자속의 표현식은 각각 아래의 식(1), 식(2) 및 식(3)과 같이 주어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 D & MD \\ M(D - j\theta_e) & R_2 + L_2(D - j\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = pM \text{Im} [\mathbf{x}_1 \overline{\mathbf{x}_2}] \quad (2)$$

$$\lambda_2 = M\mathbf{x}_1 + L_2\mathbf{x}_2 \quad (3)$$

여기서, D 는 미분연산자, $\theta_e(d\theta_e/dt)$ 는 전기각속도로 고정자 u 상을 기준으로한 회전자와의 전기각 θ_e 의 미분치이다. 또한, 변수 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{u}_1, \lambda_2$ 는 복소변수로서 각각 1차전류, 2차전류, 전동기 인가전압, 2차자속을 나타낸다. 그리고 p 는 극대수, Im 은 허수부, 기호 " $\overline{\quad}$ "는 공액복소수를 각각 의미한다.

또한, 2차자속 및 2차전류는 일정실치와 각속도로 회전하는 벡터로서 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\lambda_2(t) = \lambda_0(t) \cdot e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_2(t) = x_{02}(t) \cdot e^{j(\omega t + g(t))} \quad (5)$$

여기서, λ_0, x_{02} 는 스칼라로 시간 t 에 대한 함수이고, $g(t)$ 는 2차자속과 2차전류와의 위상차를 나타낸다. 이하에서는 표기상의 편의를 위하여 $f(t)$ 를 f 로, $g(t)$ 를 g 로 각각 기술한다.

위의 식(1)에서 식(5)까지를 이용하여 유도모터에 인가할 각주파수 지령과 전압 및 그 전압 인가시의 1차전류식은 다음과 같다.

$$f = \frac{R_2 T}{p\lambda_0^2} + \theta_e \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_1^* = \left[\frac{\sigma^2}{M} \left(\frac{b\dot{\lambda}_0 + \ddot{\lambda}_0}{R_2} + j \frac{\dot{T}^*}{p\lambda_0} \right) \right. \quad (7)$$

$$\left. + \frac{\lambda_0 \sigma^2}{MR_2} \left(a + jb \left(\frac{R_2 T^*}{p\lambda_0^2} \right) - \left(\frac{R_2 T^*}{p\lambda_0^2} \right)^2 \right) \right] e^{j\theta}$$

$$\mathbf{x}_1 = \left\{ \left(\frac{\lambda_0}{M} + \frac{L_2}{MR_2} \dot{\lambda}_0 \right) + j \frac{L_2 T}{pM\lambda_0} \right\} e^{j\theta} \quad (8)$$

여기서, 기호 "*"는 지령치를 나타내고, a, b, σ 는 다음으로 주어지는 값이다.

$$a = \frac{R_1 R_2 + j\theta_e R_2 L_1}{\sigma^2}$$

$$b = \frac{R_1 L_2 + R_2 L_1}{\sigma^2} + j\theta_e$$

$$\sigma = L_1 L_2 - M^2$$

이상에서 소개한 순시토크 제어법은 토크지령 가변시에 토크 미분항을 포함한 과도전압을 지령전압에 중첩시킴으로써 1차속 및 2차속전류를 항상 정상상태로 제어할 수 있는 토크속용제어법임을 알 수 있다.

2.1.2 순시토크 제어법의 시뮬레이션 결과

컨트롤러는 전압형 PWM 인버터로서 캐리어주파수 4(kHz), 삼각파 변조방식, 샘플링주파수 및 토크 가변시의 정정시간 Δ 는 1(ms)로 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기는 4극, 3상, 1.5(kW), 농형으로서 정격조건은 220(V), 60(Hz), 1720(rpm)이며, 전동기의 정수는 Table 1과 같다.

Table 1. Motor parameters

R_1	4.426 [Ω]	R_2	4.01 [Ω]
L_1	311.17 [mH]	L_2	311.17 [mH]
M	294.80 [mH]	J	0.002 [$N \cdot m \cdot s^2/rad$]

Fig. 1과 Fig. 2는 스텝상 및 M자 토크지령 하에서의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 모터는 10(rpm)으로 회전하고 있는 것으로 가정하였다.

2.2 속도 추정법과 2차저항 동정법

전체 속도센서리스 시스템에서 검출가능한 상태정보로는 1차전류를 대표적이다. 그러므로, 속도 추정법과 2차저항 동정법 모두 1차전류의 검출치를 이용한 구성으로 한다. 토크제어법에서 이론적으로 구한 1차전류를 식(8)에 나타내었다. 전류센서로 1차전류를 검출한 값이 바로 이 이론적인 값과 같다고 하면, 이 식으로부터 용이하게 속도를 추정할 수 있을 뿐만 아니라 2차저항도 실시간으로 동정할 수 있게 된다.

2.2.1 속도 추정법

식(8)로부터 허수부분을 나타내면 다음과 같다.

$$x_{1q} = \frac{L_2 T}{pM\lambda_0} \quad (9)$$

식에서 q 는 2상 회전좌표계에서의 허수축 성분을 가리킨다. 위 식에서 토크 T 는 다음 식과 같다.

$$T = \frac{pM\lambda_0}{L_2} x_{1q} \quad (10)$$

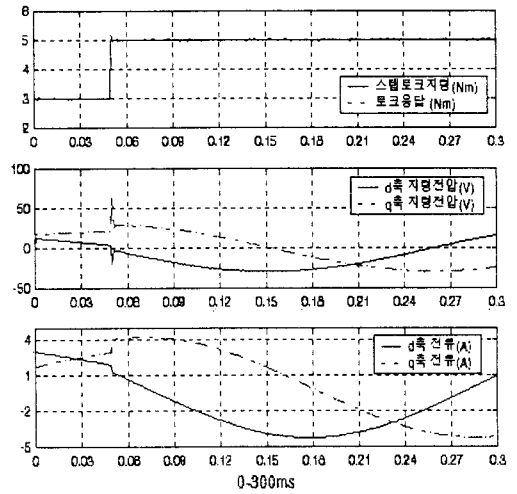


Fig. 1 Simulation result according to step torque reference (10rpm)

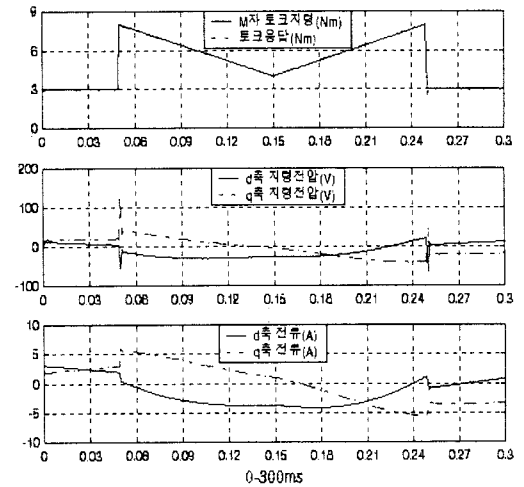


Fig. 2 Simulation result according to M-torque reference (10rpm)

속도는 토크의 적분을 통해 얻어지므로, 속도추정식의 위의 식(10)을 이용하여 식(11)과 같이 용이하게 유도할 수 있다. 식에서 K_p , K_i 는 PI제어를 나타낸다.

$$\hat{\theta}_e = K_p(T - T^*) + K_i \int (T - T^*) dt \quad (11)$$

2.2.2 2차저항 동정법

모터 운전중 2차저항값은 보통 크게 변동하여 정확한 순시토크 제어성능에 영향을 주게 된다. 따라서 정확한 순시토크 제어와 엄밀한 속도추정을 하기 위해서는 운전중 변동하는 2차저항값을 동정할 필요가 있다.

2차저항 동정에 관해서는 비교적 많은 방법들이 제안되고 있지만 2차저항 동정과 속도추정을 동시에 하는 방법들은 그다지 많지 않다. 여기서는 앞에서의 순시토크 제어에서 2차자속 정보를 이용한 2차저항 동정법에 관해 간단히 소개한다.

식(8)에서 실수부분을 나타내면 다음과 같다.

$$x_{1d} = \frac{\lambda_0}{M} + \frac{L_2}{MR_2} \dot{\lambda}_0 \quad (12)$$

식에서 d 는 2상 회전좌표계에서의 실수축 성분을 가리킨다. 위 식으로부터 2차저항은 다음 식과 같이 동정할 수 있다.

$$\widehat{R}_2 = \frac{L_2 \dot{\lambda}_0}{m x_{1d} - \lambda_0} \quad (13)$$

식(13)에서 알 수 있듯이 2차저항은 1차전류치의 검출 정보 및 2차자속과 2차자속의 미분정보를 구함으로써 쉽게 동정될 수 있다. 또한, 2차저항 동정시에는 2차자속의 미분정보가 필요하므로 2차자속을 교류가 중첩된 형태로 제어해야함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서의 2차자속은 교류가 중첩되는 형태로 순시토크지령과 독립적인 제어가 가능하므로 식(13)의 실현은 용이하게 이루어진다.

2.2.3 수치 시뮬레이션 결과

컨트롤러와 모터의 파라미터는 앞에서의 조건과 동일하다. Fig. 3은 램프상의 토크지령 및 정부하 토크(3Nm)에서의 속도 추정 및 2차저항 동정의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에서 2차자속지령의 크기는 식(14)와 같이 주어지고 있다.

$$\lambda_0 = 0.892(1 + 0.1 \sin(10t)) \quad (14)$$

시뮬레이션에서 토크제어기에 사용하게 될 속도는 전압지령과 전류응답에 의해 추정된 속도를 사용하였고, 실제속도는 출력토크에 기계적인 관성을 고려하여 연산한 값을 나타낸다.

2차저항 동정시 식(13)의 분모항이 0으로 되는 것을 방지하기 위하여, 분모값이 0에 근접하는 경우, 한 샘플링 이전에 동정된 값을 재사용하였으며, 데이터의 검출오차를 저감시키기 위해 실시간 동정된 2차저항값에 필터를 설계하여 이를 통과한 2차저항을 구하였다.

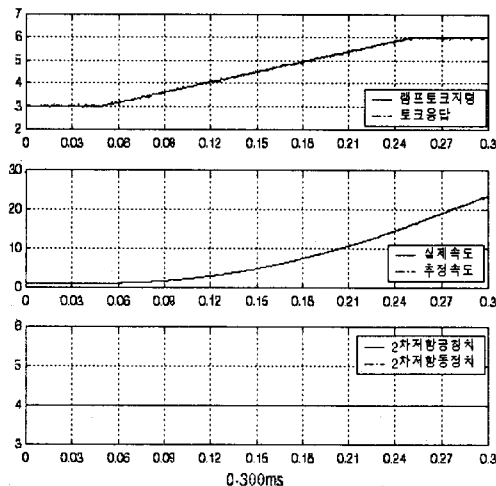


Fig. 3 Simulation result according to ramp torque reference with rated load torque (3Nm)

Fig. 3에서 보듯이, 시뮬레이션상으로는 속도 추정과 2차저항 동정이 양호하게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

2.3 속도센서리스 제어시스템의 구축

Fig. 4는 구현하려고 하는 속도센서리스 제어시스템의 블록도이다. 그림에서, 시스템은 속도오차에 대응하는 토크지령을 연산하는 속도제어기, 앞서 소개한 순시토크 제어기와 속도연산 및 2차저항동정부, 그리고 인버터와 제어대상인 유도모터로 구성되어 있다.

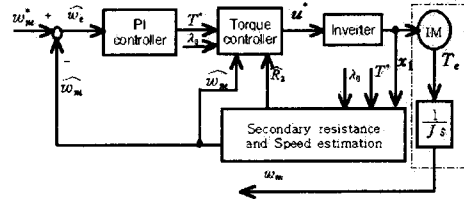


Fig. 4 Speed sensorless control system

3. 결 론

본 논문에서는 지령토크와 2차자속의 크기를 파라미터로 하는 순시토크 제어법에 근거한 속도센서리스 제어방식을 제안하였다. 제안된 방법은 모터파라미터와 토크지령, 1차검출전류, 2차자속정보를 이용하여 모터의 회전속도 추정과 동시에 2차저항의 동정이 가능함을 보였다. 또한, 수치 시뮬레이션을 통해 제안방식의 타당성을 확인하였다.

특히, 순시토크 제어기의 2차자속 크기의 지령을 원래의 정격 자속크기에 일정 주파수와 일정 크기의 교류를 중첩시킴으로써 속도추정과 2차저항 동정을 동시에 진행하면서도, 순시토크 제어에는 영향이 없음을 확인하였다. 또한, 저속영역에서의 정밀한 속도추정을 목표로 하였으므로, 순시토크 제어 시뮬레이션은 10(rpm) 이하에서 행하였다.

추후, 속도센서리스 제어 시뮬레이션 및 이에 대응한 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 속도센서리스 제어법의 유효성을 증명하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 林知宏, "誘導電動機の二次磁束をパラメータとする瞬時トルク制御における電壓指令の實現法", 横浜國立大學大学院修士論文, 1999
- [2] D.W.Norvotny and T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Clarendon Press·Oxford, 1996
- [3] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998
- [4] 정석권·황동일·유삼상, "2차저항 동정을 고려한 유도전동기의 속도센서리스 제어방식에 대한 검토", 한국동력기계공학회 춘계학술대회논문집, pp. 307-313, 1999
- [5] 황동일, 정석권, "2차저항 동정을 고려한 유도전동기의 저속영역 속도센서리스 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1042-1045, 2000
- [6] 久保田壽夫, 吉原大助, 松瀬實規, "速度センサレスベクトル制御誘導電動機の二次抵抗同定", 電學論D, Vol. 117, No. 8, pp. 940-945, 1997
- [7] 赤津觀, 河村篤男, "過渡状態を利用した誘導機の速度と二次抵抗の同時推定", 電學論D, Vol. 118, No. 12, pp. 1409-1416, 1998