

감소차원 토크관측기를 이용한 유도전동기의 저속운전특성 개선

유영석* 윤덕용** 홍순찬*

*단국대학교 전기공학과 **천안공업전문대학 제어계측과

Improvement of Low Speed Characteristics in Induction Motor Drives by Reduced Order Torque Observer

Young-Suk You* Duck-Yong Yoon** Soon-Chan Hong*

*Dankook University **Chonan National Technical College

Abstract - In the speed control system of motors using the low resolution rotary encoder, the period of encoder pulse becomes longer than the sampling time for speed control in the range of very low speed. Therefore, it is difficult to obtain accurate speed information.

In this paper, the speed estimating method at the very low speed region using reduced order torque observer, which has been widely used, is examined. The results of simulation show that the characteristics of the speed control at the very low speed region is improved by using the reduced order torque observer.

1. 서 론

서보 시스템의 속도추정은 성능과 경제적인 측면을 고려할 때 저분해능의 로터리 엔코더를 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 로터리 엔코더를 통해 속도를 검출하는 방식으로는 통상 M/T 방식이 이용되고 있으며, 일반적인 속도제어 범위의 중고속 영역에서는 정확한 속도검출이 가능하다. 이 M/T 방식의 속도검출 형태는 속도제어 주기 사이에 발생하는 엔코더 펄스수와 측정시간의 연산을 통해 이루어지므로 이와 같이 얻어지는 속도는 제어 시점의 순시속도가 아닌 측정주기에서의 평균속도가 된다. 따라서 제어주기내에 발생하는 엔코더 펄스수가 하나 또는 수 개인 저속영역이나 제어주기보다 엔코더의 펄스의 간격이 더 길어지는 극저속영역에서는 각 제어주기에서 필요로

하는 정확한 속도정보를 얻기가 곤란하다.

이와 같은 평균속도 검출에 따른 문제점을 개선하기 위해 많은 방법이 제안되어 왔다. 이들 방식은 부하토크 관측기로 구현된 상태 관측기를 이용하여 매 샘플링 주기동안의 부하토크를 추정하고, 이 추정된 부하토크와 전동기 발생토크 및 평균속도정보를 이용하여 현재 제어시점의 순시속도를 추정하는 방식이 대부분이다.^{[1]~[2]}

또한 최근의 논문에서는 부하에 따른 기계계의 관성모멘트 변화를 추정하는 방식이 제안되고 있다. 그러나, 앞의 방식에서 상태관측기는 기계계의 관성모멘트 변화에 대하여 강인성을 가지므로 시스템의 관성모멘트 값을 모르는 상태에서도 시스템의 속도제어가 가능한 장점이 있다.^[3]

본 논문에서는 이와 같은 속도추정방식을 고찰하고, 부하토크 관측기 구성시에 기존에는 무시했던 마찰계수의 영향을 고려하여 속도제어 성능을 개선하고자 한다. 마찰계수의 크기는 속도가 감소함에 따라 증가하게 되므로 고속에서는 무시할 수 있지만 저속영역으로 갈수록 그 영향을 무시할 수 없게 된다. 따라서, 부하토크 관측기 구성시 마찰계수의 영향을 고려함으로써 속도추정 성능의 향상을 기대할 수 있다.

2. 저속영역에서 엔코더 펄스와 제어주기의 관계

그림 1은 극저속영역에서 엔코더 펄스의 간격과 제어주기의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 엔코더 펄스의 간격은 제어주기보다 상당히 길어 한 제어주기 내에 엔코더 펄스가 하나도 없는 경우가 존재한다.

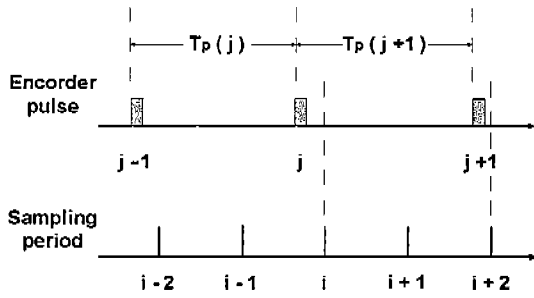


그림 1. 엔코더 펄스와 속도제어주기의 관계

이와 같은 관계에서 제어시점 i 에 채환되는 속도 정보는 $T_p(j)$ 구간의 평균속도에 해당되며 지연시간은 $T_p(j)/2$ 에 j 시점으로 부터 i 시점까지의 시간을 합한 것과 같다. 이처럼 지연된 속도정보에 의해서는 안정된 제어가 이루어질 수 없으며 이 현상은 지속일수록 더욱 심해진다.

속도검출의 지연시간은 속도정보를 대표하는 속도검출 구간의 중간시점에서 이 속도정보가 적용되는 속도 샘플링 구간중 가장 먼 곳까지의 시간으로 정의한다.^[4] 즉, 최대 검출 지연시간을 T_d 라 하면 식(1)과 같다.

$$T_d = \frac{T_p}{2} + T_s \quad (1)$$

따라서, 정확한 속도제어가 이루어지기 위해 제어시점 i 와 $i+1$ 과 같은 제어시점에서는 지연시간이 보상된 순시속도값이 적용되지 않으면 안된다. 여기서 T_s 는 속도제어주기이다.

3. 순시속도 추정방법

그림 2는 속도가 선형적으로 증가한다고 가정할 때 극저속 영역에서 엔코더 펄스와 제어주기의 관계를 나타내고 있다. 평균속도의 검출시점인 엔코더 펄스중에서 j 번째를 고려할 때, 이 시점에서 얻어지는 속도정보는 $T_p(j)$ 구간의 평균속도로서 가

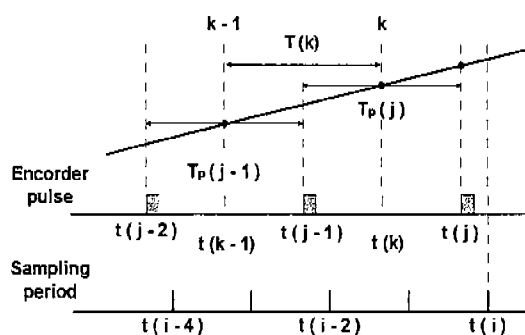


그림 2. 가상의 샘플링 시점을 이용한 순시속도 추정

상의 샘플링 시점 $t(k)$ 에서의 순시속도라고 할 수 있다. 이 가상의 샘플링 시점에서의 순시속도는 속도정보가 얻어지지 않는 제어주기에서의 속도추정에 기준이 된다.

순시속도의 추정은 가상의 샘플링 시점 $t(k)$ 에서 얻어진 평균속도에 속도제어주기마다 연산되는 평균토크를 $t(k)$ 로 부터 $t(i)$ 까지 시간적분한 값을 합하므로써 연산된다.^{[3],[4]} 이 추정속도를 $\hat{\omega}_m$ 이라 하면 식(2)와 같다.

$$\hat{\omega}_m(i) = \overline{\omega}_m(i) + \frac{1}{J} \int_{t-\tau(i)+T_s}^t \{T_m(i) - \hat{T}_L(i)\} dt \quad (2)$$

검출지연시간으로 정의된 속도추정시점 이후로 부터 평균속도가 얻어지지 않는 시점의 속도추정은 이전 샘플링시점에서 추정된 순시속도를 이용하여 식(3)과 같이 계산한다.

$$\hat{\omega}_m(i+n) = \hat{\omega}_m(i) + \frac{T_s}{J} \sum_{l=1}^n \{T_m(i+l-1) - \hat{T}_L(i+l-1)\} \quad (3)$$

여기서 $n(n=1, 2, 3, \dots)$ 은 평균속도 검출이 얻어지지 않는 구간의 횟수를 의미한다.

이와 같이 순시속도의 추정에서는 부하토크에 관한 정보가 반드시 필요하게 된다. 또한 고속영역에서는 큰 영향을 주지 않았던 마찰계수 역시 저속영역으로 갈수록 그 값이 증가한다. 따라서, 운전속도에 따른 마찰계수의 변화를 측정하고 순시속도연산에 요구되는 부하토크 추정시 이 파라미터의 영향을 고려한다.

유도전동기 및 타여자 직류발전기로 구성되는 MG 세트에서 전기자 전압 V_a 와 계자전압 V_f 를 인가하여 타여자 직류전동기로 구동하면 회전속도에 따라 달라지는 MG 세트의 합성 마찰계수 B_m 을 식(4)와 같이 구할 수 있다.^[5]

$$B_m = \frac{K i_f i_a}{\omega_m} = \frac{i_a (V_a - R_a i_a)}{\omega_m^2} \quad (4)$$

여기서 K 는 속도계수, i_f 는 계자전류, i_a 는 전기자

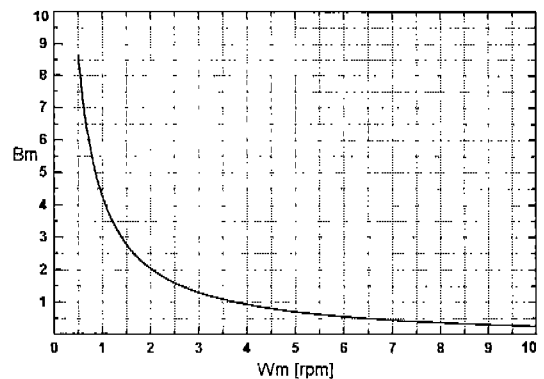


그림 3. 속도에 따른 마찰계수의 변화

전류, R_a 는 전기자 저항이다.

식(4)에서 직류전동기의 전기자 인가전압 V_a 를 단계적으로 변화시키면서 이에 대응하는 ω_m 에서 V_a , i_a 를 측정하면, 각각의 회전속도에 대한 마찰계수를 얻을 수 있다. 샘플전동기에 대하여 극저속영역으로부터 10[rpm]까지의 마찰계수 변화를 측정한 결과는 그림 3과 같다.

4. 감소차원 부하토크 관측기 구성

속도추정식에는 반드시 부하토크에 관한 정보가 필요하다. 그러나 부하토크는 외란으로 알 수 없는 입력중의 하나이며 측정이 불가능하다. 따라서, 측정 가능한 속도를 포함한 상태방정식을 구성하고 이를 통해 부하토크를 추정한다.

4.1 이산계 상태방정식 표현

유도전동기의 속도계 운동방정식은 관성모멘트를 J 라 하고 마찰계수를 B_m , 발생토크와 부하토크를 각각 T_m , T_L 이라고 하면 식(5)와 같다.

$$T_m - T_L = J \frac{d}{dt} \omega_m + B \omega_m \quad (5)$$

식(5)의 연속계 운동방정식을 엔코더 펄스 관계에 따라 이산적으로 처리하면 식(6)과 같이 된다.

$$\omega_m(i+1) = (1 - \frac{B_m}{J} T_s) \omega_m(i) + \frac{T_s}{J} [T_m(i) - T_L(i)] \quad (6)$$

추정하고자 하는 부하토크의 이산계 표현식은 제어기의 샘플링주기보다 부하토크의 변화가 매우 느리다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_L(i+1) = T_L(i) \quad (7)$$

따라서, 속도와 부하토크의 이산계 상태방정식은 식(8)과 (9)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \omega_m(i+1) \\ T_L(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{B_m}{J} T_s & -\frac{T_s}{J} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m(i) \\ T_L(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_m(i) \quad (8)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega_m(i) \\ T_L(i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

4.2 감소차원 관측기

n 차원의 상태방정식을 일반식으로 표현하면 식(10), (11)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

$$y = Cx \quad (11)$$

여기서 C 의 랭크는 q 이며 이에 따라 식(10)과 (11)을 측정가능한 상태와 불가능한 상태로 분리

하여 표현하면 식(12)와 (13)이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (12)$$

$$y = [I_q \ 0] x = x_1 \quad (13)$$

여기서 I_q 는 단위행렬이다. 식(13)을 통해 q 차원의 상태가 측정가능하며 $n-q$ 차원의 관측기가 구성될 수 있음을 알 수 있다. $x_1=y$ 로 놓으면 식(12)는 식(14)로 된다.

$$\dot{y} = A_{11}y + A_{12}x_2 + B_1u \quad (14)$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}y + A_{22}x_2 + B_2u$$

여기서 다음과 같이 정의하면

$$U = A_{21}y + B_2u, \quad W = \dot{y} - A_{11}y - B_1u \quad (15)$$

식(14)는 식(16)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_2 = A_{22}x_2 + U \quad (16)$$

$$W = A_{12}x_2$$

여기서 U 와 W 는 알고 있는 입력 u 와 출력 y 의 함수이다. 식(14)가 관측가능하면 그 행렬의 부분행렬로 구성된 식(16)도 역시 관측가능하다. 따라서 x_2 의 관측기가 구성될 수 있다. x_2 의 $n-q$ 차원 상태 관측기는 식(17)과 같다.

$$\dot{\hat{x}}_2 = (A_{22} - LA_{12})\hat{x}_2 + LW + U \quad (17)$$

여기에 U 와 W 를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= (A_{22} - LA_{12})\hat{x}_2 \\ &+ L(\dot{y} - A_{11}y - B_1u) + (A_{12}y + B_2u) \end{aligned} \quad (18)$$

y 의 미분항을 소거하기 위해 $z = \hat{x}_2 - Ly$ 라고 놓으면 식(18)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= (A_{22} - LA_{12})z \\ &+ [(A_{22} - LA_{12})L + (A_{12} + LA_{11})]y \\ &+ (B_2 - LB_1)u \end{aligned} \quad (19)$$

$$\hat{x}_2 = z + Ly \quad (20)$$

식(8), (9)를 식(19), (20)에 적용하면 부하토크 관측기는 식(21)과 (22)로 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} z(i+1) &= z(i) + L \frac{T_s}{J} [\hat{T}_L(i) - T_m(i)] \\ &+ L \frac{B}{J} T_s \omega_m(i) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\hat{T}_L(i) = z(i) + L \omega_m(i) \quad (22)$$

식(19)와 (20)에서 $z+Ly$ 와 x_2 의 차를 실제 출력과 관측기 출력의 오차라고 하면 이산계 오차방정식은 식(23)으로 나타낼 수 있다.

$$e(i+1) = (1 + L \frac{T_s}{J})e(i) \quad (23)$$

$$\left| 1 + L \frac{T_s}{J} \right| < 1 \quad (24)$$

본 이산계 시스템의 안정도는 식(24)와 같이 오차방정식의 고유값의 크기를 1보다 작게 설정함으로써 가능하다. 식(23)에서 오차방정식의 고유값은 L 의 함수이므로 관측기 이득 L 을 적절히 조절함으로써 관측기의 수렴속도를 임의로 결정할 수 있다. 감소차원 부하토크 관측기를 블록도로 표현하면 그림 4와 같다.

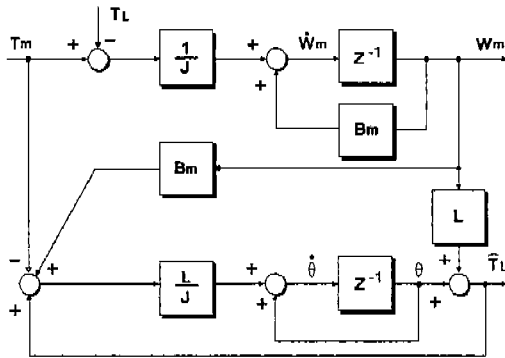


그림 4. 감소차원 부하토크 관측기의 블록도

부하토크 추정시 고려된 마찰계수는 식(21)의 우변의 세 번째 항이 된다. 마찰계수가 고려된 경우와 그렇지 않은 경우의 부하토크 추정능력을 살펴보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 기준속도를 5[rpm]으로 하였고 기동후 0.5초와 1.5초에서 정격의 1/6과 1/3의 부하토크를 각각 인가하였다. 적용된 마찰계수는 0.696으로 이는 전동기의 속도가 5[rpm]일 때 계산된 값이다. 그림 5는 마찰계수를 무시했을 경우의 시뮬레이션 파형으로 저속에서 증가된 마찰계수는 부하토크의 추정에 오차를 발생시키고 있다. 반면 그림 6은 마찰계수가 고려된 경우로서 정확한 추정특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같이 추정된 부하토크는 속도추정의 성능을 향상시킬 수 있다.

5. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 명세 및 상수는 표1과 같다. 로터리 엔코더의 모델을 구성하여 실제와 같도록 엔코더 펄스를 생성하고 이를 통해 제어 주기내에서 발생되는 펄스수를 계수하였다.

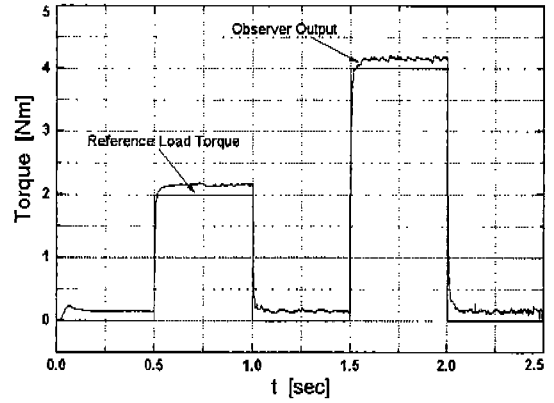


그림 5. 마찰계수를 고려하지 않았을 경우의 부하토크 관측기(기준속도 : 5[rpm])

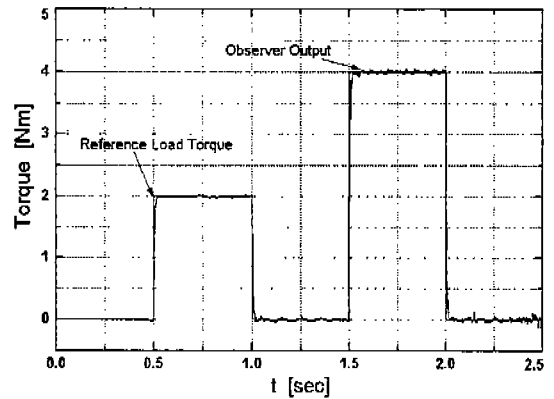


그림 6. 마찰계수를 고려했을 경우의 부하토크 관측기(기준속도 : 5[rpm])

표1. 샘플전동기의 명세 및 상수

명세		상수	
정격 전압	220[V]	고정자 저항	0.921[Ω]
정격 전류	8.6[A]	회전자 저항	0.583[Ω]
출력	2.2[kW]	고정자 인덕턴스	0.0671[H]
정격 속도	1740[rpm]	회전자 인덕턴스	0.0671[H]
극수	4극	상호 인덕턴스	0.0650[H]

이와 같이 계수된 펄스수가 한 제어주기내에 하나 이상인 경우와 없는 경우를 구분하여 이상인 경우에는 평균속도 측정방식을 적용하고, 없는 경우는 토크 관측치에 의한 추정속도를 적용하는 방식을 취했다. 1회전당 2000[ppr]의 엔코더를 2채배로 모델링하였고, 속도제어주기는 1[ms]로 하였다. 그림 7은 평균속도 측정방식에 의한 속도제어 특성 파형이다. 인가된 기준속도는 0.1초의 시점에서 5[rpm]으로 운전하고 이후 0.5초에서 1[rpm], 다시 1.5초에서 5[rpm]으로 변화시켰다. 파형에서 알 수 있듯이 평균속도 측정방식으로 인해 속도파형에 상당한 맥동이 발생한다.

그림 8은 같은 조건하에서 추정속도 제어방식에

의한 속도제어 특성을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 기준속도변화시 짧은 과도상태가 지나면 안정된 속도제어 특성을 나타내고 있다.

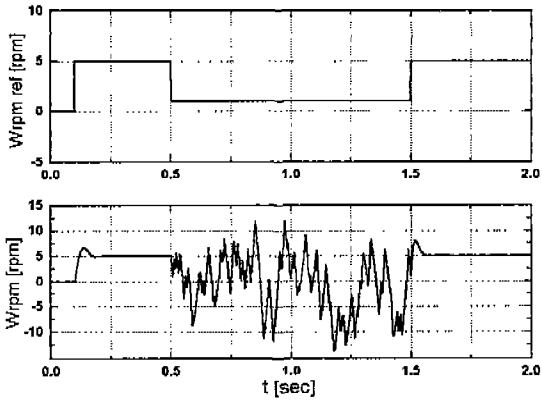


그림 7. 평균속도 추정방식에 의한 속도제어

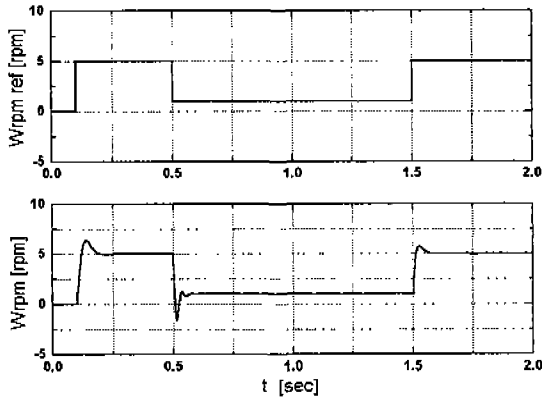


그림 8. 순시속도 추정방식에 의한 속도특성

6. 결 론

본 논문에서는 저분해능의 로터리 엔코더를 이용하는 유도전동기 속도제어시 저속영역의 속도제

어 특성을 개선하기 위하여 부하토크관측기를 이용한 속도추정방식을 고찰하고 시뮬레이션을 수행하였다.

순시속도추정에 요구되는 부하토크 관측시 마찰계수를 고려하였고 이러한 방식에 의해 수행된 시뮬레이션으로 저분해능의 로터리 엔코더를 사용한 저속운전시 속도특성이 향상됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Shigeru Itoh, Makoto Iwata, and Tetsuhyko Ohno, "Control Characteristic of Speed Estimation System Improved Capacity of Load Torque Estimation", 日本電氣學會 産業應用部門全國大會 論文集, pp. 813~816, 1993.
- [2] Tetsuo Yamada and Masayuki Mori, "A Method for Improving Speed Control Characteristic at Very Low Speed Region by the Least Order Disturbance Observer", JIEE Trans., Vol. 114-D, No. 4, pp. 415~423, 1994.
- [3] N. J. Kim, H. S. Moon, M. Lee, and D. S. Hyun, "Inertia Identification for the Speed Observer of the Low Speed Control of Induction Machines", IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp. 1938~1943, 1995.
- [4] Y. Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor Using Low Precision Shaft Encoder", IEEE IECON Proc., pp.73~78, 1993.
- [5] 홍순찬, 윤덕용, 박영진, 김종구, 최욱돈, "전기자동차 고효율 인버터 설계기술", 차세대자동차기술개발사업 연구보고서, 1995.