

RLS 알고리즘을 이용한 스텝 모터의 파라미터 추정

연태준, 김동민

충익대학교 전기공학과

Parameter Estimation for Step Motor using RLS Algorithm

Tae Jun Yon, Dong Min Kim

Department of Electrical Engineering, Hongik University.

Abstract - In this paper, recursive least square algorithm is presented to estimate the parameters of step motor under low-speed operation. Parameter estimation is important for compensating the input current by calculating the ratio of the motor torque constant and detent torque constant that causes torque-ripple in low-speed applications. On-line parameter estimation process is a preliminary procedure to apply step motor to adaptive control. Computer simulation shows that the estimated parameters converge in finite time.

1. 서 론

스텝 모터는 구조상 별다른 제어 장치가 없이도 정밀한 개류프 위치 및 속도 제어가 용이하다. 또한 마이크로 프로세서와 전자 부품의 발달로 모터의 활용이 훨씬 쉬워져 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 사용된다. 그러나 일반적인 구형과 펄스 구동시 저속 운전에서 토크 리플에 의한 진동 및 공진 현상이 문제가 되었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 정현파 펄스 구동을 기반으로 한 마이크로 스텝 방식이 일반화되어, 보다 정밀한 위치 제어 및 진동과 소음을 개선할 수 있게 되었다. 그러나 마이크로 스텝 방식으로 정현 전류를 가할 경우, 고속으로 갈수록 그 이점은 사라지게 된다. 그리고 저속에서는 여러 가지 비이상적인 요인들로 인해 전류의 위상과 디텐트 위치가 서로 일치하지 않게 된다. 그 결과 실제로는 디텐트(detent) 토크의 영향을 받게되어 매끈한 토크 파형을 얻을 수 없다.

마이크로 스텝 방식으로 구동할 경우, 저속에서 디텐트 토크의 영향을 없애기 위해 스텝 모터의 파라미터인 모터의 토크 정수와 디텐트 토크 정수의 비율(디텐트 비)을 이용해 입력 전류에 고조파를 인가하여 전류를 보상하는 방식으로 매끈한 토크를 얻을 수 있었다.[1]

본 논문에서는 파라미터를 결정하기 위해 순환 최소자승법(Recursive Least Square Method)을 이용하였다. 디텐트 비를 결정하기 위해 신경망 이론을 적용하거나,[2] 고속 운전에서 디텐트 토크를 고려하지 않고 배치(batch) 프로세스를 이용하여 스텝 모터의 파라미터를 추정하는 방법등이 소개되었다.[3] 여기서 제안하는 알고리즘은 실험으로 얻어진 데이터를 이용하는 방법이 아닌 실시간으로 파라미터를 추정할 수 있는 RLS 알고리즘을 채택하여 마이크로 스텝 방식 기반의 적응 제어를 적용할 수 있는 기초를 마련할 수 있다.

2. 본 론

2.1 스텝 모터의 추정 모델식

저속 운전에서 마찰 계수를 무시하고 디텐트 토크를 고려할 때, 스텝 모터의 dq 변환된 모델식은 다음과 같다.[3][4]

$$L \frac{di_d(t)}{dt} = v_d(t) - Ri_d(t) + LN, \omega(t)i_q(t) \tag{1}$$

$$L \frac{di_q(t)}{dt} = v_q(t) - Ri_q(t) + LN, \omega(t)i_d(t) - K_m \omega(t) \tag{2}$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_m i_q(t) - K_d \sin(4N, \theta(t)) \tag{3}$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) \tag{4}$$

여기서 파라미터에 대한 정의는 다음과 같다.

R : 권선 저항 [Ω]

L : 권선 인덕턴스 [H]

J : 로터의 관성 정수 [N · m · s²]

K_m : 토크 정수 [N · m/A]

K_d : 디텐트 토크 정수 [N · m].

위의 비선형 운동 방정식은 파라미터에 대하여 선형화(linear-in-parameter)된 (5)식과 같이 표현될 수 있다.

$$y[t] = W^T[t] \phi \tag{5}$$

여기서,

$$\phi = [R \ L \ K_m \ J \ K_d]^T \tag{6}$$

$$y[t] = [v_d[t] \ v_q[t] \ 0]^T \tag{7}$$

$$W^T[t] = \begin{bmatrix} i_d[t] & \frac{di_d}{dt}[t] - N, \omega[t]i_q[t] & 0 & 0 & 0 \\ i_q[t] & \frac{di_q}{dt}[t] + N, \omega[t]i_d[t] & \omega[t] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i_q[t] & \frac{d\omega}{dt}[t] \sin(4N, \theta[t]) \end{bmatrix} \tag{8}$$

φ : 실제(actual) 파라미터 벡터

y : 출력 벡터

W : Regressor 행렬

일반적으로 MIMO 시스템은 실시간으로 파라미터를 추정하기 위해 여러 단의 행렬식으로 분리하여 수행한다. 여기서는 전기적 파라미터와 기계적 파라미터로 나누어 수행하며, 두 식에 공통적으로 모터의 토크 정수가 결합되어 있다.

$$v_q[t] = \begin{bmatrix} i_q[t] & \frac{di_q}{dt}[t] - N, \omega[t]i_d[t] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \\ K_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$K_m i_q[t] = \begin{bmatrix} \frac{d\omega}{dt}[t] \sin(4N, \theta[t]) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J \\ K_d \end{bmatrix} \tag{10}$$

1단계에서 매 시간 추정되는 토크 정수는 2단계에서 출력치로 사용된다. 일반적인 모터 제어에서 q축 전류(i_q)는 토크에 관계되는 전류이므로 2단계의 토크 식에 사용되는 것을 알 수 있다.

2.2 RLS 파라미터 추정 알고리즘

시간 t 에서 추정된 파라미터의 벡터를 $\hat{\phi}[t]$ 라 할 때, 그에 의한 출력은 $\hat{y}[t]$ 이며 (11)식과 같이 쓸 수 있다. 그리고 (12)식처럼 실제의 출력치(측정치)와 추정치 사이의 오차를 에러 방정식이라 한다.

$$\hat{y}[t] = W^T[t] \hat{R}[t] \quad (11)$$

$$e[t] = y[t] - \hat{y}[t] = y[t] - W^T \hat{\phi}[t] \quad (12)$$

로터의 치수가 50인 2상 복권형 하이브리드 스텝 모터를 정현 여자 방식으로 구동할 때, 2000 라인 엔코더를 사용할 경우 한 스텝 당 10개의 샘플링 데이터를 얻을 수 있으며, 이를 이용해 로터의 현재 위치와 속도를 얻을 수 있다. 이득 $P[t]$ 는 추정 오차의 크기와 방향 성분에 따라 (13)식과 같이 매 시간 업데이트된다.

$$P[t] = P[t-1] - \frac{P[t-1] W[t] W^T[t] P[t-1]}{1 + W^T[t] P[t-1] W[t]} \quad (13)$$

결국 파라미터 벡터는 새로이 수정된 추정 이득과 regressor 행렬 그리고 에러 방정식 등의 정보에 의해 (14)식과 같이 매 시간 업데이트가 된다.

$$\hat{\phi}[t] = \hat{\phi}[t-1] + P[t] W[t] e[t] \quad (14)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션에 사용한 모터는 2상 복권형 영구자석 스텝 모터를 모델로 사용하였고 구동 전류는 정현 펄스를 이용하였다. (3) 표 1은 실제의 모델에 근거한 실제 파라미터 값과 초기에 추정하는 파라미터 값이다. 전기적 파라미터인 R, L 값은 측정에 의해 근사적으로 알고 있다고 가정한다. 그리고 토크식에서는 저속에서 마찰에 의한 영향을 무시하고 프로세스를 수행하였다. 그림 1에서는 정현 여자 구동시에도 저속에서 디텐트 토크에 의한 리플이 문제가 됨을 알 수가 있다.

표 1. 파라미터의 실제값과 초기 추정값

파라미터	실제값	초기 추정값
R	0.65	0.7
L	0.0028	0.003
K_m	0.51	1
J	0.00178	0.01
K_d	0.0153	0.03

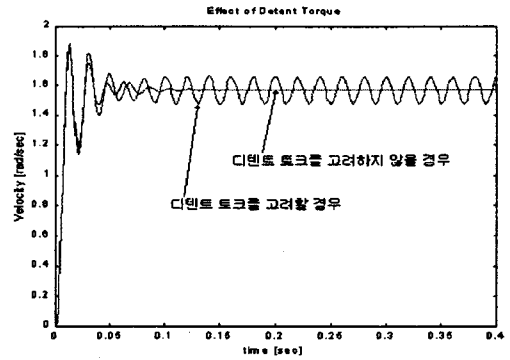


그림 1. 디텐트 토크의 영향

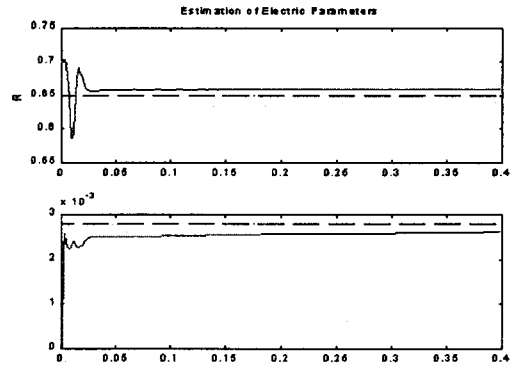


그림 2.1. 전기적 파라미터의 추정

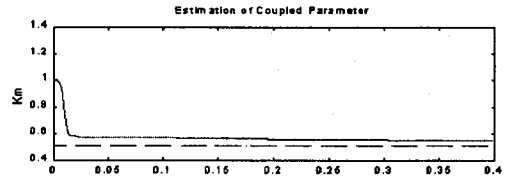


그림 2.2. 토크 정수의 추정

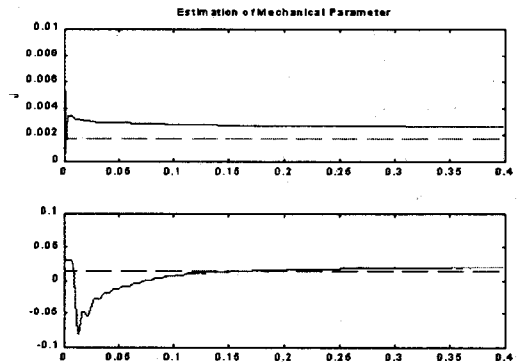


그림 2.3 전기적 파라미터의 추정
주파수 : 1 (Hz), 입력전압 : $\pm 3(V)$ 정현파
스텝 시간 : 0.02 sec/step

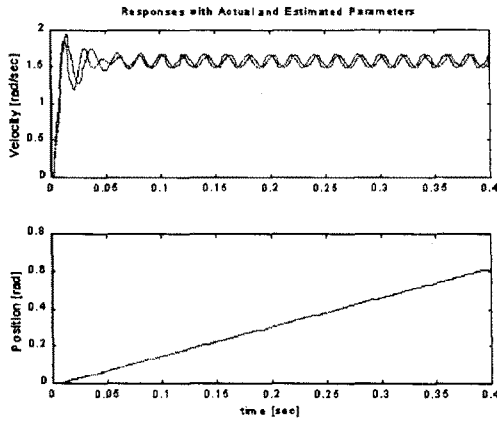


그림 3. 실제 파라미터와 추정 파라미터를 이용한 출력의 비교

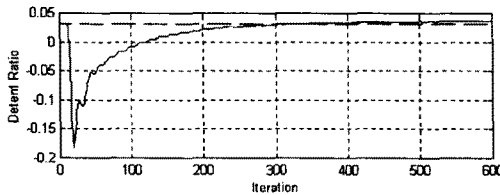


그림 4. 디텐트 비의 변화

표 2. 실험 결과치

	$f=1$ [Hz] 스텝당 샘플링 수:10 스텝수:10 (18(deg))		$f=1$ [Hz] 스텝당 샘플링 수: 20 스텝수: 10(18(deg))	
	추정결과치	오차 [%]	추정결과치	오차 [%]
R	0.66369	2.11	0.65876	1.35
L	0.00235	16.08	0.00256	8.71
K_m	0.59705	17.07	0.55720	9.26
J	0.00295	65.49	0.00270	51.82
K_d	0.01743	13.89	0.01641	7.27

그림 2는 1단계에서 계산되는 전기적 파라미터들은 시간이 진행될수록 실제 파라미터 값에 근사적으로 수렴한다. 매 시간 추정되는 모터의 토크 정수(K_m)는 2단계에서 관성 정수와 디텐트 토크 정수를 구하는 데 사용된다. 그리고 2단계에서 다시 기계적 파라미터를 추정하여 파라미터가 특정값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 디텐트 토크는 2상 모터일 때 기본 주파수 성분의 4배수의 고조파 형태로 나타난다.[5] 따라서 조건에 따라 그 추정되는 값의 변화가 심해진다.

그림 3은 실제 파라미터 값과 추정된 파라미터 값을 이용해 스텝 모터의 속도와 위치에 대하여 해석하였다. 속도에서 리플의 크기는 다르지만 정상상태의 평균 속도는 같다는 것을 알 수 있다. 그리고 위치에 대해서는 거의 오차가 없다. 또한 그림 4에서 볼 수 있듯이 추정 오차가 있더라도 디텐트 비(aK_d/K_m)는 실제값과 추정값 사이의

비율도 실제값에 거의 수렴한다.

추정 오차는 표 2,3과 같이 한 스텝 당 샘플링 수를 늘리면 같은 시간 내에 더 근사적으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 그러나 스텝 모터의 경우에는 스텝각이 미세하고 엔코더의 분해능에 한계가 있기 때문에 스텝 당 샘플링 수를 늘리는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 전기적 파라미터를 추정에 의해 알고 있고, 그 값을 초기 추정치로 사용할 때, 보다 빠르고 정확하게 수렴한다. 또한 가감속 운전을 통하여 특정 주파수 대역에서 파라미터가 지역 최소점에 빠지는 것을 방지할 수 있다.

4. 결 과

정현 여자 방식으로 저속 영역에서 운전하는 경우 디텐트 토크의 영향이 크기 때문에 보상 전류의 크기를 결정할 디텐트 비를 결정하기 위해 토크 정수와 디텐트 토크 정수를 추정해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 저속운전 영역에서 RLS 알고리즘을 이용하여 스텝 모터의 파라미터를 실시간으로 추정하는 모의 실험을 하였다. 이를 통해 스텝 모터의 파라미터들은 모두 스텝이 진행됨에 따라 실제값에 가깝게 수렴한다는 것을 확인하였다. 또한 추정 오차에도 불구하고 거의 같은 디텐트 비로 수렴하는 것을 화강하였다. 추후의 실험을 통해 실시간으로 주위의 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 스텝 모터의 적응 제어를 구현할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hi-Dong Chai, "Position Error Analysis for Microstepping", Conf. on Incremental Motion Control System and Devices(IMCSD), pp265~274, 1985
- [2] 신 규범, "스텝 모터의 低振動을 위한 마이크로 스텝핑의 具現 方法에 관한 研究", KAIST 碩師 卒業論文, 1995
- [3] Andrew J. Blauch, Marc Bodson and John Chiasson "High-Speed Parameter Estimation of Stepper Motor", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 4, Dec 1993
- [4] M. Zribi and J. Chiasson, "Position Control of a PM Stepper Motor by Exact Linearization", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 36, No. 5, May 1991
- [5] Nobuyuki Matsuki, Makoto Nakamura, and Takashi Kosaka, "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 5, Sep/Oct 1996