

참 립
40주년학술대회
논문 87-A-20-7

여자제어에 의한 VR 형 스텝모터의 제동특성개선

강 성 수
 서울대학교

한 송 업
 서울대학교

Damping improvement of VR-type step motor
 by exciter control

Kang, Sung soo
 S.N.U.

Hahn, Song yop
 S.N.U

ABSTRACT

In applications of step-motor, the requirements of small-size and strong-power gave birth to feed-back drive to the maximum efficiency and complete damping. In this paper, a new scheme that determines switching times from sensed values of position and speed is presented for simple bang-bang type drive circuit. The optimal values of each phase switching times are obtained using conjugate gradient method.

1. 서 론

스텝모터의 구동에 있어서 기존의 개루프(open-loop) 구동방식은 간단하며 경제적이라는 잇점이 있으나 일반적으로는 특정속도에 공진하기 쉽고, 안정에 필요한 시간이 길다는 결점을 가지고 있으며, 본질적으로 스텝모터의 속도와 회전력을 최대값으로 사용할 수 없으므로, 짐차 증가하는 소형 대출력의 요구를 따라가기 어렵게 되었다.

이에 대한 해결방법으로 스텝모터의 속도, 위치 또는 상전류 등을 검출하여 제어하는 폐루프(closed-loop) 구동방식이 실현되고 있는데, 이러한 폐루프 제어의 경우에도 결국 얼마만큼 제동(damping)을 효과적으로 할 수 있는가의 문제로 볼 수 있다.

본 연구에서는 3상 3-stack VR형 스텝모터를 대상으로 하여, 가장 단순한 형태인 정전압 구동회로의

각 상을 독립적으로 여자하는 것 만으로 효과적인 제동효과를 얻도록 하였다. 여기서 나머지 권선의 적절한 여자시키는 공액경사법(conjugate gradient method)을 사용하여, 회전자의 초기속도에 따른 최적값을 구하였다.

2. 3상 multi-stack VR형 스텝모터의 모델링

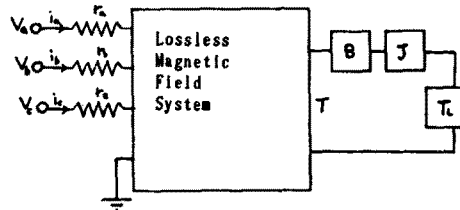


그림 1. VR 형 스텝모터 의 블록선도

일반적으로 3상 VR형 스텝모터와 가장 단순한 형태의 구동회로를 포함한 시스템을 그림1.과 같이 모델링 할 수 있다.*

여기서 전기회로 방정식은

$$V_j = r_j i_j + \frac{d\phi_j}{dt} \quad , j = a, b, c \quad \text{----- (1)}$$

과 같으며, 자기회로에서의 쇄교자속 ϕ_j 는

$$\phi_j = \sum_{k=a}^c L_{jk} i_k \quad , j = a, b, c \quad \text{----- (2)}$$

로 표현된다. 이 때 회전자에서 발생하는 출력토크 T는 각 권선에서 발생하는 토크의 합력이 되므로

$$T = \sum_{j=a}^c \int_0^{i_j} \frac{\partial \phi_j}{\partial \theta} di_j \quad \text{----- (3)}$$

가 되는데, 여기에서는 multi-stack 형이므로 상호 인덕턴스가 0이 되어 식(2)에서 $j \neq k$ 인 항이 제거되므로

$$T = \sum_{j=a}^c \int_0^{i_j} \frac{\partial L_{jj}}{\partial \theta} i_j di_j \quad \text{----- (4)}$$

로 쓸수있다.

또 운동방정식은 일반적으로

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L = T \quad \text{----- (5)}$$

로 표현된다.

이 때 고정자와 회전자를 통과하는 자속에 대한 인덕턴스를 정현적으로 근사화 하고, 자속밀도를 철의 불포화영역 내에서 구동시키며, hysteresis를 무시하면, 회전자각도에 대한 각상의 인덕턴스 L_a, L_b, L_c 는

$$L_a = L_0 + L_1 \cos N_p \theta \quad \text{----- (6)}$$

$$L_b = L_0 + L_1 \cos (N_p \theta - 2\pi/3) \quad \text{----- (7)}$$

$$L_c = L_0 + L_1 \cos (N_p \theta - 4\pi/3) \quad \text{----- (8)}$$

(N_p 은 회전자 치의 갯수)

로 표현할 수 있으며, a상의 인덕턴스 L_a 를 그림 9. 에 도시하였다.

θ 에 대한 각 상의 인덕턴스가 식 (6), (7), (8)과 같이 주어지면 식(4)로부터 출력토크 T는

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=a}^c \frac{\partial L_{jj}}{\partial \theta} i_j^2 = -\frac{N_p L_1}{2} \sum_{j=a}^c i_j^2 \sin(N_p \theta - \frac{2j}{3}\pi) \quad \text{----- (9)}$$

와 같으며, 식(1)로부터

$$v_j = r_j i_j + L_j \frac{di_j}{dt} + i_j \frac{\partial L_{jj}}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad \text{----- (10)}$$

$$L_j = L_j + i_j \frac{\partial L_{jj}}{\partial i_j} \quad ; \text{ incremental inductance) } \quad \text{--- (11)}$$

$$\frac{dL_j}{d\theta} = -L_j N \sin(N_p \theta - \frac{2j}{3}\pi) \quad \text{----- (12)}$$

3. 여자시기의 GRADIENT

최적의 여자시기를 찾기 위한 여자시기

$T = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T$ 의 gradient를 구하기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 사용하였다.⁶

a) 해석하고자 하는 system equation

$$\dot{x} = f(x, u) \quad ; \quad x(t_0) = c \quad \text{----- (13)}$$

을 $[t_1, t_2]$ 구간에 대하여 해를 구한다.

b) a)에서 얻은 $x(t_2)$ 로부터 adjoint system

$$\dot{\lambda} = -f_x^T \lambda \quad ; \quad \lambda(t_2) = \nabla_x \phi(x(t_2)) \quad \text{----- (14)}$$

을 $[t_2, t_1]$ 구간에 대하여 해를 구한다.

c) T의 gradient는

$$[g(T)]_i = \sum_{j=1}^m (t_j) [f(x, u)|_{t_j} - f(x, u)|_{t_{j-1}}] \quad \text{--- (15)}$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

로부터 얻는다.

4. 적용 및 결과

최소화 시키고자 하는 cost function J를

$$J = \int_{t_1}^{t_2} (\theta - a) dt \quad \text{----- (16)}$$

(a 는 1 step의 각도, 여기서는 $2\pi/3N_p$)

로 하여 스텝모터에 b상만을 여자시켰을 경우, 그림 2.와 같은 응답을 보이며, $J = 1.836 \times 10^{-7}$ 의 값을 갖는다.

이 때 b상 외의 나머지 권선 즉 a, c상을 보조적으로 여자했을 때 (a상은 $[t_1, t_2]$, c상은 $[t_3, t_4]$), 공역경사법을 통하여 $T = [t_1, t_2, t_3, t_4]^T$ 의 최적값을 구하면

$$T^* = [8.4, 15.2, 14.7, 19.0]^T \quad (J = 1.727 \times 10^{-7})$$

이 되며, 이 경우의 파형을 그림 4. 에 도시하였다.

또 회전자의 초기속도에 따라 최적값이 달라지므로 각 초기속도에 따른 T^* 의 변화를 그림 8. 에 도시하였다.

한편 역상제동(back-phase ON)의 경우 즉, a상만을 보조적으로 여자한 경우에는 $T^* = [6.05, 12.7, 0, 0]^T$ ($J = 1.746 \times 10^{-7}$)의 값을 가지며 a, c 상을 모두 여자한 앞의 경우보다 특성이 떨어짐을 알수있다. (그림 7.)

5. 결론

컴퓨터 주변기거나 사무기 등에 널리 쓰이는

스텝모터는 이 방면의 산업이 고도화됨에 따라 필연적으로 더욱 작고도 강력한 성능을 요구하게 되었는데, 스텝모터를 운전하는 구동체계의 중요성이 스텝모터의 자체의 설계의 중요성 못지않게 절실히 대두되고 있으며 특히, 진동이나 공진 등의 제동문제가 어려운 과제로 남아있다.

본 연구에서는 비교적 간단한 형태의 3상 VR형 스텝모터를 대상으로, 제동을 효과적으로 개선할 수 있는 새로운 형태의 구동체계를 제안하였으며, 실제로 많이 사용되는 4.5상 하이브리드형 스텝모터에 적용되던 더욱 우수한 제동효과를 개선할 것으로 생각된다.

6. 참고 문헌

- 1) B. C. Kwo. " Step motors and control system " Vol.II, 1979.
- 2) M. Nakno, et al. " Bang-bang feedback control and its learning-type design method for step motor positioning servo systems "
- 3) J. W. Vraets and D. French, " Minor closed loop control of stepping motors for use in high speed positioning ". 1981.
- 4) R. Wetter. " Measurement and mathematical simulation of reluctance stepping motor inductances ", Annual symposium on incremental motion control, 1980.
- 5) T. Kenjo, " Stepping motors and their microprocessor controls ". Rendon Press, Oxford, 1984.
- 6) L. Hasdorff, " Gradient optimization and nonlinear control ". Wiley-Interscience publication, 1976.
- 7) Nikola B. Nedeljkovic, " New algorithms for unconstrained nonlinear optimal control problems ", IEEE Trans. on automatic control, Vol.AC-26, NO. 4, aug. 1981.
- 8) H. Mukai, " A scheme for determining stepsizes for unconstrained optimization methods ", IEEE Trans. on automatic control, Vol.AC-23, NO. 6, dec. 1978.

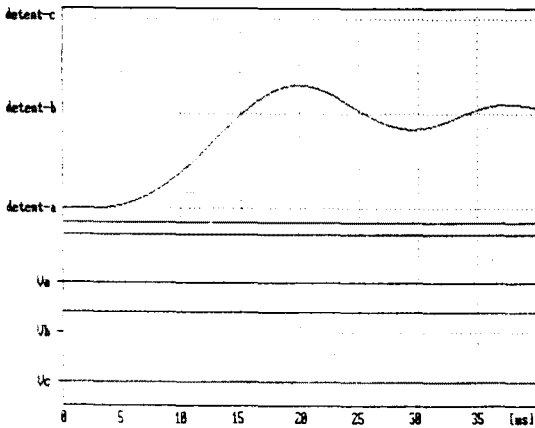


그림 2. b 상만을 여자시켰을 경우

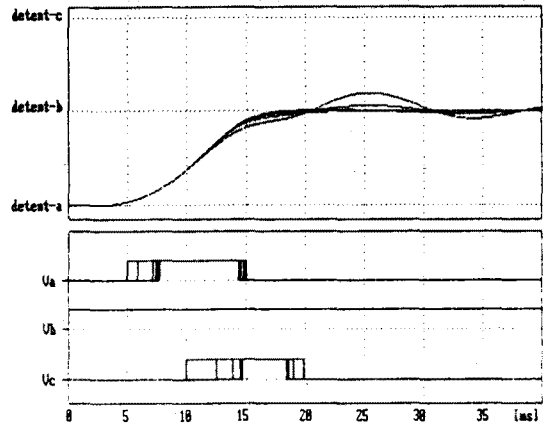


그림 3. 초기값 $\tau_0 = [5, 15, 10, 20]^T$ 로부터 최적값 τ^* 를 찾아가는 과정

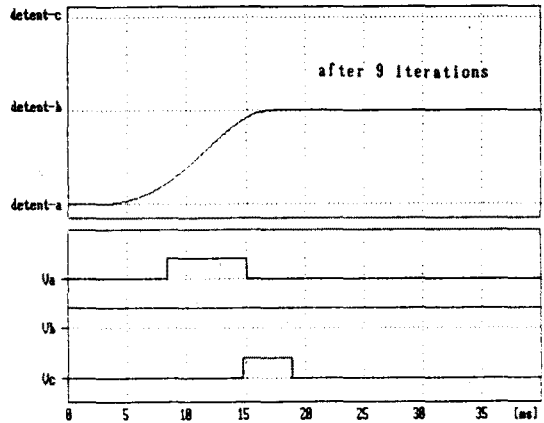


그림 4. 최적값 τ^*

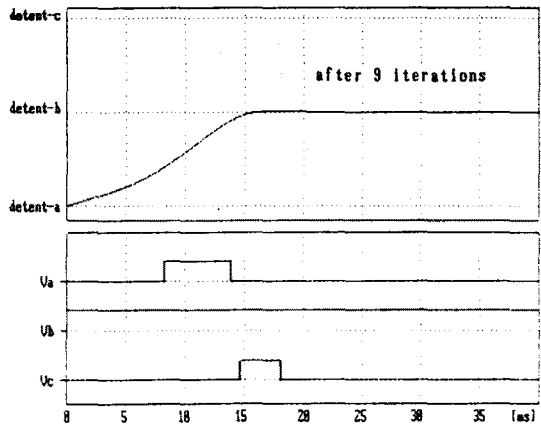


그림 5. 회전자의 초기속도 $\dot{\theta} = 2$ (rad/s)에서의 최적값 τ^*

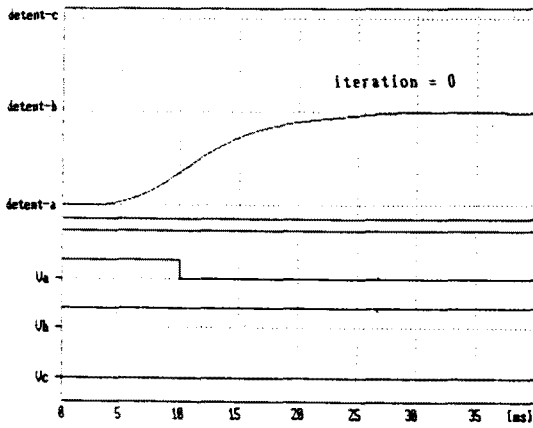


그림 6. a 상을 보조여자 시켰을 경우 초기값 $T_0 = [0, 10, 0, 0]^T$

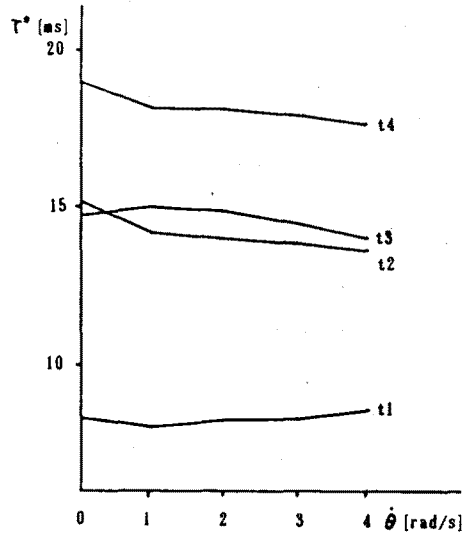


그림 8. 회전자의 초기속도가 증가함에 따른 최적값 T^* 의 변화

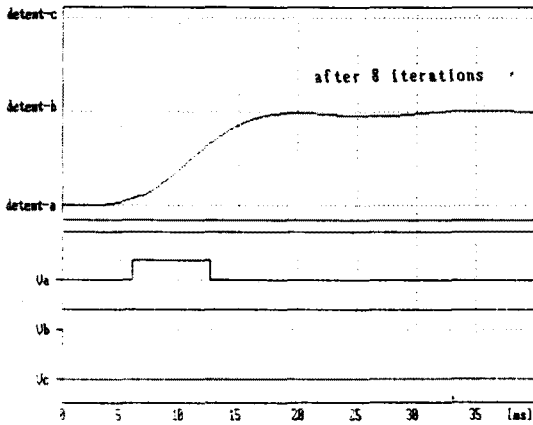


그림 7. a 상을 보조여자 시켰을 경우 최적값 T^*

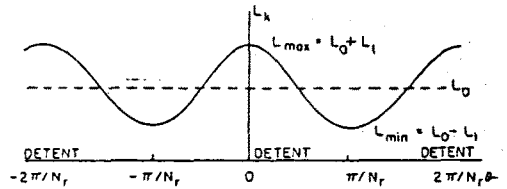


그림 9. a 상의 인덕턴스