

AC 서보 모터의 일정 토크 실현을 위한 제어기 설계

양남열*, 이계희, 허육열
仁荷大學校 電氣工學科

A Design of Controller on the AC Servo Motor for Constant Torque Implementation

Nam-Yeol Yang, Je-Hie Lee, Uk-Youl Huh

Abstract

Recently, AC servo motor has expanded its application areas due to the development of the power semi-conductor and control technology. But it has large torque ripple for its nonlinear characteristics and phase commutation.

In this paper, we proposed the switching angle overlapping method, and current control using tracking method in order to generate the constant torque of AC servo motor that has the trapezoidal back e.m.f. It is compared the these types of control method with the characteristics through simulation.

We show that these methods lead the torque ripple to reduce and makes the position and speed characteristics improved effectively. Also we prove that current control using tracking method is the best way to reduce torque ripple among the these types of control method.

1. 서론

서보 시스템이란 원하는 궤적을 따라 기구가 움직일 수 있게 제어하는 시스템을 말하며, 이의 구동장치로 최근에는 주로 AC 서보 모터가 쓰인다. AC서보 모터는 DC서보 모터가 가지고 있는 단결인 브러쉬와 정류자를 트랜지스터와 FET등과 같은 일반 반도체 스위칭 소자로 교체한 모터로써 CNC공작 기계, 로봇, FA기 등에 많이 이용되고 있고 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 AC서보 모터는 스위칭 소자의 스위칭이 바뀌는 순간에 토크리플이 발생하는 단점이 있고 이 토크리플은 AC 서보 모터의 성능에 상당한 영향을 미친다. P. Pillay and R. Krishnan은 전류제어(PWM, hysteresis)를 적용하여 토크 리플을 감소 시켰다[3]. 또한 F. Piriou, A. RAZEK, R. Rerret and H. L. Huy 등의 많은 연구자들이 정현파형 AC 서보 모터를 dq 모델에 의한 새로운 벡터 전류 제어 방법을 제안 하였다. F. Piriou, A. Rerret and H. L. Huy는 일정 토크를 발생 시키기 위한 전류의 파형을 계산하였다[5]. 그러나 이러한 방법을 실현하기 위해서는 하드웨어의 구성이 복잡해진다. 그리고 T. W. Xin은 AC 서보 모터의 전기자 결선 이 Δ결선과 Y결선일때 시뮬레이션을 통하여 전류, 토크등의 파형, 순시치, 실효치, 평균치를 구하였다[6].

AC 서보 모터는 크게 동기형과 비동기형으로 분류할 수 있으며 비동기형은 근래에는 거의 사용되고 있지 않다. 동기형 모터는 영구자석형과 리럭턴스(Reluctance)형으로 구분되며 운전효율이 높고 회전자의 발열이 적어 냉각면에서 유리하다. 영구자석형 모터는 고정자에 의하여 형성되는 회전자계내에 영구자석 회전자를 가지며 이 회전자계에 의하여 회전하므로 회전자의 회전속도는 동기속도 즉 입력 주파수에 완전히 비례한다.

본 논문에서는 사다리꼴 형태의 역 기전력을 가진 구형파형 AC 서보 모터를 해석한다. AC 서보 모터에서 고정자 권선의 전류는 코일의 인덕턴스 및 저항에 의한 시정수와 권선 전압과 역기전력 사이의 전압차에 의하여 상승 시간이 결정된다. 따라서 전류파형이 완전한 구형파가 되지않아 토크리플이 발생한다. 본 연구에서 이렇게 발생하는 토크리플을 줄이고, 리플을 줄임으로써 모터의 위치, 속도특성을 향상시킬 수 있는 제어 방법을 제안한다. 스위치의 on, off시간을 조정하여 토크리플을 줄임과 동시에 평균토크를 증가시킬 수 있는 스위칭각의 진상, 지상, 진상-지상 중첩 제어, 그리고 주어진 전류궤적에 따라 전류를 제어하는 추적(Tracking) 기법을 이용한 전류제어 방법을 제안하였다.

2. 구동방법 및 원리

사다리꼴 역 기전력을 갖는 AC 서보 모터는 단위 전류당 높은 토크, 간결한 구동방식등의 장점이 있으나 相轉流(commutation)로 인하여 토크 리플이 생기는 단점이 있다.

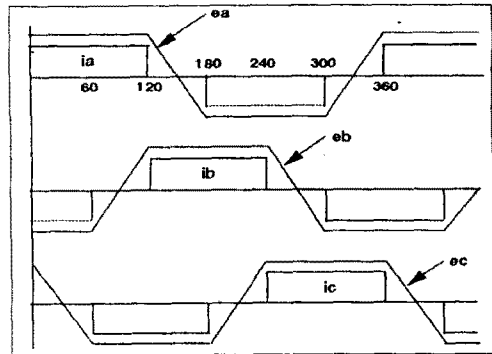


그림 1 이상적인 역 기전력 파형과 전류파형

리플이 없는 일정토크를 발생시키기 위하여 필요한 역기전력 및 전기자 전류의 파형을 그림 1에 나타내었고, 평탄한 부분, 즉 전기자각으로 120° 동안 모터 코일에 구형파 전류를 인가해야 한다. 이렇게 함으로써 토크 발생은 일정하게 된다.

그림 2는 AC 서보 모터의 각상에 전류를 인가하기 위한 서보 시스템의 구성도이다. 시스템은 크게 구동부와 제어부로 나눌수 있는데 구동부는 모터 코일에 60°마다 스위칭 순서를 결정하는 모직회로 및 스위칭 회로등으로 구성된다. 제어부는 기준(reference) 신호와 검출기로부터 검출된 실제신호를 비교하여 오차가 감소하도록 제어 신호를 발생 시키는 제어회로로 구성되어 있다.

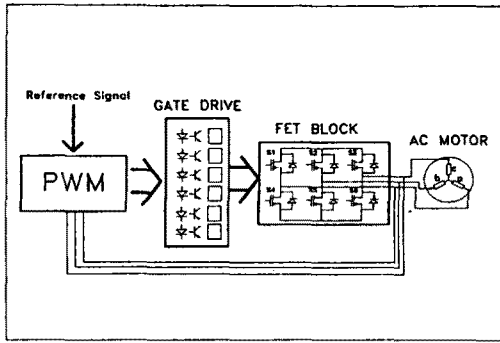


그림 2 서보 시스템의 구성도

표1은 스위칭 소자의 구동순서를 나타낸 것이며 60°마다 스위치의 on, off 순서가 바뀐다.

표1. 스위칭 소자의 구동 순서

	0°-60°	60°-120°	120°-180°	180°-240°	240°-300°	300°-360°
s1	1	1	0	0	0	0
s2	0	0	1	1	0	0
s3	0	0	0	0	1	1
s4	0	0	0	1	1	0
s5	1	0	0	0	0	1
s6	0	1	1	0	0	0

AC 서보 모터의 구동 방법에는 120° 구동방법과 180° 구동방법이 있는데 위의 표는 120° 구동형으로 어느 순간에도 항상 2개의 스위치가 동시에 on이 되어 모터 코일에 전류가 흐르게 한다.

먼저 s1과 s5가 on 된 경우의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = 2Ri_1 + 2(L-M)\frac{di_1}{dt} + e_a - e_b \quad (2.1)$$

$$i_1 = i_a = -i_b$$

$$i_c = 0$$

e_a, e_b, e_c : a, b, c상의 역기전력

환류(freewheeling) 될때의 전압 방정식

$$2Ri_1 + 2(L-M)\frac{di_1}{dt} + e_a - e_b = 0 \quad (2.2)$$

$$i_1 = i_a = -i_b, i_c = 0$$

R: 권선의 저항, L: 코일의 자기 인덕턴스

M: 코일의 상호 인덕턴스

그리고 토크를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{(e_{a1a} + e_{b1b} + e_{c1c})}{\omega} \quad (2.3)$$

ω : 회전 속도

AC 서보 모터의 회전속도를 가변시키려면 일반 DC 모터에서와 같이 전기자 전압 또는 전기자 전류를 가변하면 된다. 또 AC 서보 모터를 정,역 방향으로 운전하고자 하면 표1에서 스위칭 소자의 스위칭 순서를 반대로 하면 된다. 이와같이 하려면 위치 검출기로부터 위치 신호를 받아 스위칭 소자의 스위칭 순서를 결정하는 토직 회로가 필요하게 된다.

3. 일정 토크를 위한 제어 알고리즘

AC 모터의 스위칭 소자의 스위칭 순서가 바뀔때 전류의 맥동과 토크리플이 발생한다. 이렇게 발생한 모터의 토크 리플을 줄이는 것이 서보 시스템의 성능을 향상 시키는데 있어서 매우 중요하다.

그로서 본 논문은 스위칭 轉流(commutation)로 일어나는 토크 리플을 감소시키기 위한 제어 방법들을 제시하고 이 방법들을 비교하여 새롭게 제안한 알고리즘, 즉 추적(tracking)기법을 이용한 전류 제어가 가장 좋은 특성을 나타냄을 보여주겠다.

3.1. 진상, 지상, 진상-지상 중첩 제어

일반적으로 60°마다 스위칭 순서가 바뀌는 경우의 토크 파형을 보면 전류 파형과 유사한 형태의 토크 리플을 갖는다. 이렇게 스위칭 순서가 바뀌는 순간의 토크 리플을 감소시키기 위해서는 스위칭이 바뀌는 순간에 전류를 많이 흘려 주어야 한다. 전류를 많이 흐르게 하고, 또한 평균 토크를 증가시키고 토크리플을 감소시키기 위해 진상 중첩제어(lead overlap control)과 지상 중첩제어(lag overlap control), 진상-지상 중첩 제어방법을 제시 하겠다. 이 방법들은 스위칭 시간의 on, off시간을 조정하는 것이다. 여자되어야 할 상의 스위치가 on 시간을 앞당기는 것을 진상 중첩 제어라 하고, 여자되어 있는 상의 스위치의 off시간을 뒤로 늘리는 방법을 지상 중첩제어라 하고 진상, 지상 중첩제어를 같이 하는 방법을 진상-지상 중첩제어라 하고 이를 그림 3에 나타내었다.

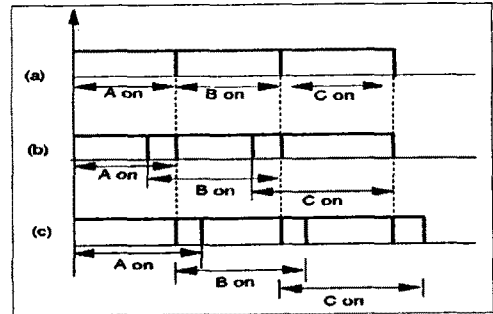


그림 3 진상 - 지상 제어의 스위칭 시점

(a)일반적인 경우 (b)진상 중첩제어 (c)지상 중첩제어

이와같이 중첩제어를 하였을 경우의 전압 방정식은 식 (3.1.1)과 같이 쓸 수있다

$$V = \frac{3}{2}Ri_1 + \frac{3}{2}(L-M)\frac{di_1}{dt} - e_a - e_b - e_c \quad (3.1.1)$$

$$i_1 = i_a = -i_b = -i_c, i_a = i_b + i_c$$

진상, 지상, 진상-지상 중첩 제어에서 중첩되는 각의 범위는 그림 1에서 보면 알수 있듯이 30° 이내에서 이루어져야 하며 30°가 넘을때는 역기전력의 부호가 바뀌므로 특성이 틀리게 된다.

3.2. 추적(tracking)기법을 이용한 전류 제어

이번 절에서는 일정 토크를 발생시키기 위한 새로운 방법을 소개하는데 제어방법을 추적기법을 이용한 전류제어라 칭한다. AC 서보 모터의 토크 발생식은 다음과 같다.

$$T = \frac{(e_{a1a} + e_{b1b} + e_{c1c})}{\omega} \quad (3.2.1)$$

여기에서 식 2.1의 전압방정식을 다시 고쳐쓰면

$$V_1 = (L-M) \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a - (L-M) \frac{di_b}{dt} - Ri_b - e_b \quad (3.2.2)$$

$$(L-M) \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b - (L-M) \frac{di_c}{dt} - Ri_c - e_c = 0 \quad (3.2.3)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

여기서, $i_a - i_b = i_1$, $i_b - i_c = i_2$, $i_c - i_a = i_3$, $e_a - e_b = e_1$, $e_b - e_c = e_2$, $e_c - e_a = e_3$ 라고 놓으면 식(3.2.1)은 다음과 같아진다.

$$T = \frac{1}{3} \frac{(e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3)}{\omega} \quad (3.2.4)$$

윗식에서 어떤 순간이든지 간에 한상의 전류는 0이 됨을 그림 1을 보면 알 수 있다. 따라서 위의 식들을 간략히 정리하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{(e_a i_a + e_b i_b)}{\omega}, \quad i_c = 0 \quad (3.2.5)$$

$$T\omega = e_a i_a + e_b i_b \quad (3.2.6)$$

$$\therefore i_a = \frac{-e_b}{e_a} i_b + T \frac{\omega}{e_a} \quad (3.2.7)$$

식(3.2.7)과 같이 한상의 전류를 알면 다음식으로 그 상에 인가해야 할 전압을 구할 수 있다.

$$V_a = 2Ri_a + 2L \frac{ia(t+\Delta t) - ia(t)}{\Delta t} + e_a - e_b \quad (3.2.8)$$

식(3.2.7)에서 b상의 전류를 알때 a상에 인가해야 할 전류를 구할 수 있다. 따라서 구해진 상의 전류를 모우터 코일에 인가하면 일정한 토크를 얻을 수 있다. 위의 방법을 그림으로 나타내면 식(3.2.7)에서 보듯이 두상의 전류가 그림 4와 같은 궤적을 따라 움직이면 원하는 일정토크를 얻을 수 있다

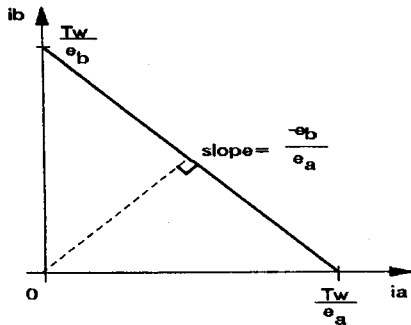


그림 4 추적 기법에 사용된 전류 궤적도

4. 시뮬레이션 결과

일반적으로 60°마다 스위칭을 on, off할때의 토크 파형을 보면 그림 5와 같이 스위칭이 바뀌는 순간에 토크 리플이 발생함을 알 수 있다.

진상 중첩 제어를 하였을 경우 토크 파형은 그림 6에 나타낸것과 같이 평균토크는 증가하였으나 토크리플이 표 2를 보면 알 수 있듯이 더 심해진다. 왜냐하면 이 경우는 온(on)되는 상을 앞당겨서 온(on)을 시켜주는 것이기 때문에 온(on)되는 상의 전류가 상승하고 있으므로 중첩되는 부분에서 토크성분이 그림 6와 같이 커지기 때문이다. 하지만 지상 중첩 제어의 경우에는 그림 7과 같이 평균 토크의 증가와 토크리플 감소에 어느정도 효과가 있다. 이경우는 진상 중첩 제어

와는 조금 틀리게 중첩되는 부분에서 오프(off)되는 상의 전류가 감소하고 있으므로 토크 리플은 진상제어에서 보다는 작게된다. 진상-지상 중첩제어의 경우도 토크 리플은 약간 감소 하였음을 그림 8을 보면 알 수 있다. 그리고 표 2에 지상 중첩 제어의 토크리플과 속도특성에 대한 결과가 15°, 20°, 25°일때 가장 좋으므로 이를 비교하기 위하여 진상 중첩 제어에서 15°, 20°, 25°일때, 그리고 진상-지상 중첩제어에서는 진상 5°, 지상 20°일때의 결과만 나타내었다.

추적기법을 이용한 전류 제어에서의 결과는 그림 9와 같이 토크 리플이 거의 생기지 않는다. 그리고 그림 9에서 한상의 전류를 알때 일정 토크를 발생시키기 위해 전류가 그림 4의 궤적을 따라감에 따라 다른 상에 인가해야 할 전류 파형과 이로인한 토크 파형을 나타내었고 제안한 알고리즘중에서 가장 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 각각의 제어 방법의 토크 리플율과 속도 특성을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이 새로 제안한 추적기법을 이용한 전류 제어 방법이 토크리플과 속도특성에서 가장 좋은 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 2. 제어 방법에 따른 특성비교

	최소	최대	최저	최대	토크 리플율 [%]	
	토크 [N-M]	토크 [N-M]	속도 [rpm]	속도 [rpm]		
스윗칭 각 고정	0.846	1.164	2652	2667	31.6	
진상각 제어	15°	0.969	1.368	2806	2823	34.1
	20°	0.972	1.397	2865	2887	35.9
	25°	0.984	1.428	2905	2926	36.8
지상각 제어	15°	0.965	1.129	2734	2743	15.7
	20°	0.973	1.133	2740	2749	15.2
	25°	0.98	1.137	2742	2751	14.8
진상5°-지상20° control	0.976	1.208	2788	2800	21.2	
추적기법 제어	1.096	1.101	2721	2725	0.5	

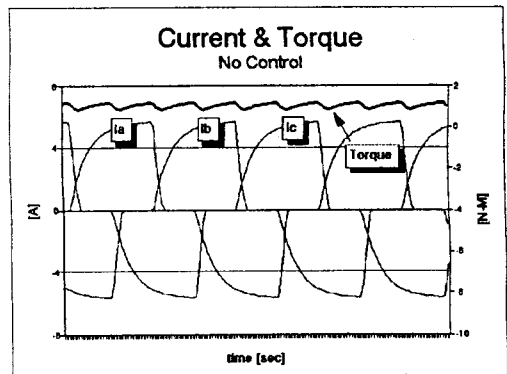


그림 5 일반적인 경우의 전류와 토크 파형

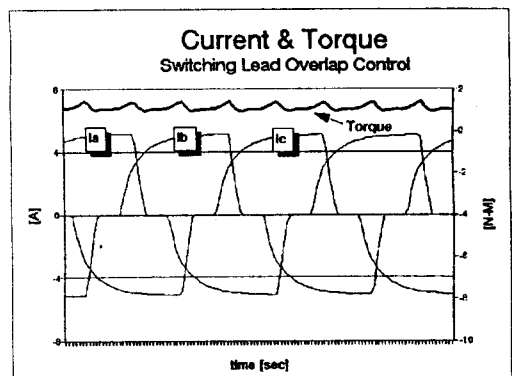


그림 6 진상 중첩 제어를 했을경우의 전류와 토크 파형

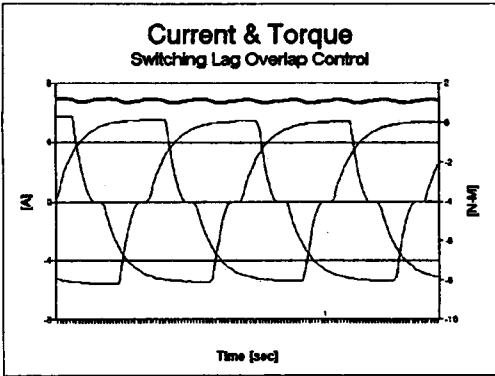


그림 7 지상 제어를 했을 경우의 전류와 토크 파형

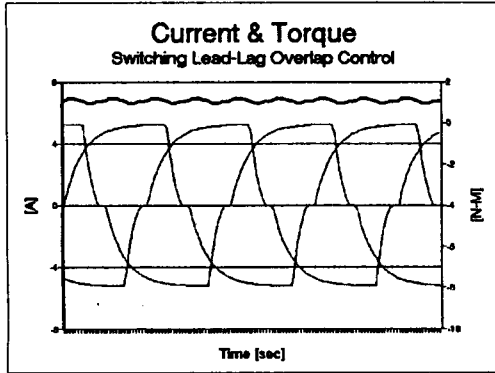


그림 8 진상-지상 중첩 제어로 전류와 토크 파형

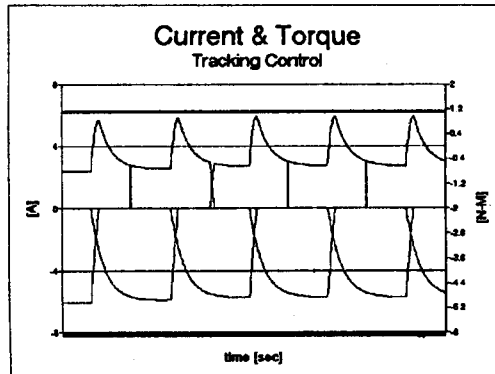


그림 9 추적 기법을 이용했을 경우의 전류와 토크 파형

5. 결론 및 고찰

AC 서보 모터에서 토크 리플은 위치, 속도 등 모터의 성능에 상당한 영향을 미침을 알 수 있고, 본 논문에서 제안한 추적기법을 이용한 전류 제어 방법이 제안한 방법들 중 토크 리플을 감소시키고, 속도 특성을 향상시키는데 가장 좋은 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고 이 방법에서 1상의 전류를 알때 일정 토크를 발생시키기 위해 필요한 전류를 테이블(table)로 구성하여 모터의 권선에 인가하면 되고, 이의 타당성을 실험을 통하여 증명하는 것이 앞으로의 과제도 남아 있다.

- [1] T. Kenjo and S. Nagamori, 'Permanent magnet and Brushless DC motors, So-Go electronics publishing company Tokyo', pp.58-80, 1984
- [2] 정밀 소형 모터 기술, 한국 공업 표준협회 기술 사업실, pp 7~60
- [3] P. Pillay and R. Krishnan, "MODELING, SIMULATION AND ANALYSIS OF A PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE", in Proc. IEEE IAS Ann. Mtg., 1987.
- [4] A. Hoshino, H. Kuromaru and S. Kobayashi, "AC synchronous servo based on the Armature voltage model", IECON '87', spice Vol.854, pp. 205-211, 1987.
- [5] F. Piriou, A. Razek, R. Rerret and H. L. Huy, "Torque characteristics of brushless DC motor with imposed current waveform", in Proc. IEEE IAS Ann. Mtg. pp. 176-181, 1986.
- [6] T. W. Xin, "WYE & Delta circuit comparison and Waveform simulation for Brushless motors", IMCSD proc., pp.115-134, 1987.
- [7] Y. Dote and S. Kinoshita, 'Brushless servomotor fundamentals and applications', Oxford science publications, 1990.
- [8] C. K. Taft and R. Gauthier, "Brushless motor torque-speed and efficiency curve", IMCSD proc., 1987.
- [9] C. K. Taft, "The dynamic characteristics of a three phase BLDCM.", IMCSD proc., pp. 51-62, 1986.
- [10] E. Persson, "Brushless DC motors in high performance servo systems.", IMCSD proc. pp. T1-T15, 1987.
- [11] U. Y. Huh and I. C. Baik, "High speed control of the switched reluctance motor" IMCSD proc., 1992.
- [12] T. J. E. Miller, 'Brushless permanent magnet and reluctance motor drives', Clarendon press oxford, 1992.
- [13] J. Tal, "Optimal design of incremental motion servo systems", IMCSD proc., 1978.