

단상 영구자석 모터의 기동토크 특성연구

권 병 일*, 김 기 봉**
 한양대학교* STMicroelectronics**

Characteristics of Starting Torque in Single Phase Permanent Magnet Motor

Byungil Kwon*, Kibong Kim**
 Hanyang Univ.*, STMicroelectronics**

Abstract - 본 논문은 회전자에 영구자석을 사용한 2극 단상 브러시리스 모터에서의 기동토크 특성에 관한 연구결과를 소개함에 목적이 있다. 본 논문에서와 같은 구조의 모터에서의 토크는 전자기력에 의한 기동력과 코깅 토크에 의한 영향력 두가지로 구분된다. 본 논문에서는 기동토크의 이론적 구조식을 유도하고, 물리적 운동방정식과 결합하여 기동시 나타나는 특성을 나타내었다. 본 논문의 목적은 보다 보편적인 기동토크에 의한 회전자의 운동을 구명하고자 함인데, 이 목적을 위하여 일반적 전원으로 사용하는 연속 직류전류가 아니라, 비연속적이고 정현파 형태의 임펄스 반파 전류를 전원으로 사용하였다. 이때 나타나는 임펄스 응답특성은, 전류를 흘렸을 때, 대부분의 경우 모터의 회전자는 전류의 주기와 다른 주기를 가지고 반회전하였다. 모터 회전자의 반전주기는 입력전압, 영구자석의 자화의 강도, 그리고 관성계수 및 마찰 계수와 같은 기계적 상수에 의해 영향을 받는 것을 알수 있는데, 반전주기 속도가 모터의 동기속도와 적절하지 않는 경우, 모터의 회전은 이루어 지지 않거나 심한 흔들림(CHATTERING)의 현상이 나타남을 발견하였다. 이러한 결과를 바탕으로 모터의 회전자를 동기속도로 구동을 하도록 하기 위한 조건을 구하였다.

1. 단상 영구자석 모터

위치나 속도 등을 정밀하게 제어를 하지 않고 단순한 회전력만을 필요로 하는 응용분야는 비교적 많으며, 이들 가운데 소형 기기를 구동하기 위한 것으로 단상 모터가 많이 적용된다. 이러한 응용분야는 비교적 저렴한 가격으로 제작 할수있어야 하는 제한이 가장 크게 강조되므로 모터의 크기를 줄이는 것이 하나의 방법이다. 이 경우 출력을 증가시키기 위하여 회전자에 영구자석을 사용하는 구조로 설계하는 경우들이 많다. 그러나 단상 모터의 경우, 기동력을 직접 얻어내기가 매우 어려우므로 여러가지 변형으로 설계하거나 전자제어의 방법으로 기동을 하도록 한다. 그러나 어떠한 방법으로 기동을 발생하더라도 하더라도 기동력은 회전자와 고정자의 초기 위치에 따른 특성이 있으며 단상 모터의 경우 극간 각도가 거의 전기각 180도에 이르므로 초기에는 점선회전력이 거의 발생하지 않는다. 따라서 기동을 원활히 하기 위한 목적으로 기동력의 특성에 대한 연구가 필요함을 느끼게 된다.

본문에서 소개된 단상 영구자석모터는 회전자에 2극 영구자석을 사용하고 2극의 고정자 코일에 전류를 통전하여 영구자석과의 상호작용력에 의해 회전하는 모터이

다. 고정자 코일에 인가되는 전류가 시불변 직류전류인 경우와 시변 정현파 전류인 두가지 경우가 흔히 사용되는데 본문에서는 시변 정현파 전류가 인가되는 응용연구에 중점을 두었다. 그것은 시불변 정전압원의 경우는 직류형 모터로써 단상 영구자석모터에 비교적 흔히 알려진 구동방식이나, 시변 정현파 전압원은 교류전원을 사용하는 단상영구자석 모터로써 그 응용연구가 흔히 알려지지 않아 필요성이 절실했기 때문이었다.

2. 구동토크의 이론식

Triac 소자를 사용한 회로를 구성하면 임펄스 응답을 실험할 수가 있다. 단상 영구자석형 모터의 실험장치의 전기적 등가회로는 그림1에서와 같다. 여기서 R_{so} 는 외부에 연결된 저항이다.

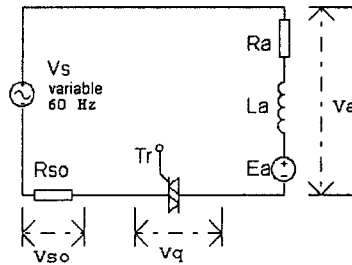


그림 1. 단상 영구자석모터의 전기적 등가회로

이 회로에 대한 전압방정식은 식(1)에서와 같다.

$$V_s = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a + V_q + V_{so} \quad (1)$$

본문에서의 영구자석형 단상 DC 모터에 작용하는 전자기력 토크는 점선분력과 법선분력으로 나뉘어지며 회전을 이루는 점선분력은 다음식에서와 같이 나타내어진다.[1]

$$T = \frac{\pi r_1 B_m \ell_{stk} i_a N_s}{2} \sin \alpha \quad (2)$$

α 는 고정자 권선과 영구자석에 의한 주자계축과의 변이각이다. 전류 i_a 는 식(1)로부터 유도할수 있으며 다음의 식(3)에서와 같이 나타내어진다.

$$I_a(t) = \sqrt{2} I_{a,max} \sin(p\theta - 2\pi ft), \text{ for } 0 < \theta < 2\pi \quad (3)$$

영구자석을 사용하기 때문에 존재하는 또하나의 중요한 토크에는 Cogging torque 가 있으며, 본 논문의 영구자석 모터와 같은 경우, 극수가 2극에 불과하거나 매우 적은 경우가 대부분으로써, 영구자석에 의한 코깅토크의 영향이 다른 구조의 모터에 비하여 비교적 크다. 코깅토크는 다음과 같은 Ackermann 의 유도식을 사용하였다. [2][3]

$$T_{cog} = \frac{\pi}{4} D L_{stk} \sum_n \frac{\sin(n\sigma L_{stk})}{n\sigma L_{stk}} \Lambda_n f_n \sin(n\xi) \quad (4)$$

여기서 $n=jS$ 로서, S 는 스투트수와 극수의 최소공배수를 의미하며 j는 일반 상수이다. σ 는 스투각, ξ 는 회전자의 회전각으로써 $\xi = \theta + \varphi$ 이다. Λ_n 은 회전자에서 본 자기회로의 n차 고조파에 의한 퍼어미언스 이며, f_n 은 n차 고조파에 의한 자기력을 나타낸다.

따라서 전체 전기적 토크 T_m 은 식(5)에서와 같다.

$$T_m = T_e + T_{cog} \quad (5)$$

이 토크와 부하토크가 서로 일치하는 조건에서 물리적으로 다음의 방정식을 만족하는 운동이 이루어진다.[4]

$$T_m = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + k\theta \quad (6)$$

여기서 상수는 k는 무시될 수 있고, 식(5)와(6)를 합성한 비선형 방정식으로 부터 선형화한 equilibrium state 를 구하면 식(7)과 같다.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left[\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}(\theta) \right] (\theta - \theta_0) = 0 \quad (7)$$

여기서, 토크 함수에서의 시변 인자들은 합성기호 A로 표시하였다. 또한 전류의 주기는 인가전압의 주기와 같다고 보았으며 실제로도 그러하다. Triac 을 점화하기 위한 위상제어각은, 보정회로함수 F, 추정값 Ω , 목표제어값 Φ^* 인 경우 다음의 식(8)에서와 같다.

$$T_d = \frac{\Phi^* + \angle F(j\Omega)}{\Omega} \geq 0 \quad (8)$$

3. 구동토크의 응답특성 해석

정전압원으로 구동되는 시스템에서 전류, 토크, 그리고 회전자 운동속도의 변화는 그림 2에서 나타낸바와 같다. 전압원이 정현파이므로 전류는 위상이 지연된 정현파 파형이며, 따라서 토크의 증가는 일정한 비율이 아니라 완만하게 상승하다가 전류의 반주기 부근에서 급격히 상승하는 모양을 나타낸다. 따라서 회전자 속도도 토크 곡선과 유사한 비율의 변화를 나타낸다.

본 연구에서의 중점은 전류의 반주기 안에서 회전자의 반전이 완전히 완성되는 조건을 구하는것과 완전히 반전

되지 않는 현상을 발견을 하고자 함이다. 이를 위하여 운동방정식의 물리적 파라미터들은 그대로 고정시키고 전류의 값을 바꾸어 회전자 운동의 변화를 관찰하였다. 전류의 값을 바꾸는 것은 인가전압을 가변함으로써 이루어진다. 해석에서 사용된 모터의 제원은 다음과 같다.

회전자 극수	2극
최대입력	90 watts
회전자 직경	1.9 cm
적층높이	2.7 cm
고정자 직경	3 cm

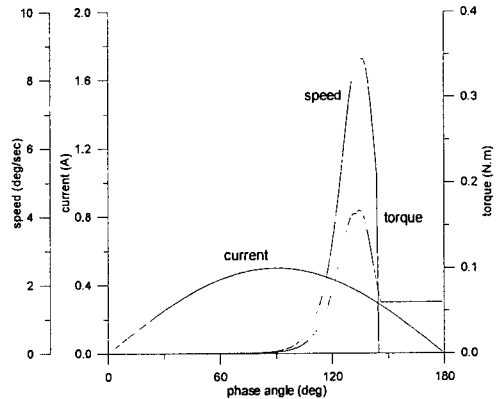


그림 2. 정현파 전압원에 의한 전류, 토크, 속도

그림 3에서는 전류의 값이 0.7(A), 0.5(A), 0.4(A), 0.35(A) 등으로 변화하였다. 전류의 위상과 주기는 전류값의 변화에 관계없이 항상 일정하다. 운동의 결과로써 회전자가 180도 위상을 반전하는 각도의 변화추이는 다음의 그림에 나타낸바와 같다.

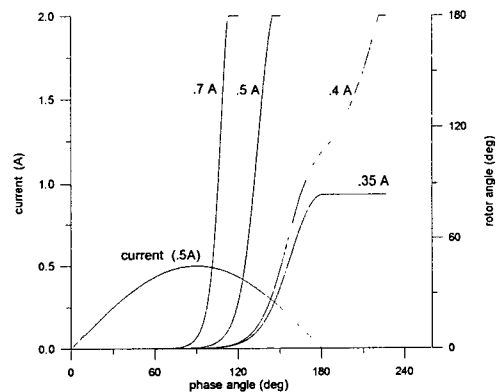


그림 3. 전류의 값 변화에 따른 응답추이

예상한바와 같이 전류의 값이 증가하면 회전자반전의 시간이 짧아지며, 반대로 전류의 값이 감소하면 회전자반전의 시간이 길어지다가 경계조건 이하에서는 반전이 이루어 지지 않음을 알수 있다. 위의 시뮬레이션의 경우, 0.4(A)에서는 회전자 반전이 전자기력에 의해 완성되지 않고 코요깅 토크에 의해 마무리 됨을 볼수 있는

데, 이 조건은 매우 불안정한 상태로써 실제구동에서는 이상적 환경조건이 아니므로 반전이 일어날수도 있고 실패 할수도 있다. 이렇게 반전이 일어나는 조건이 불안한 경우, 회전자 반전을 하다가 다시 코강력에 의해 원위치로 돌아갔다가 다음의 반주기 전류에 의해 반전이 시도되었다가 실패하여 원위치로 돌아가는 운동이 여러 번 반복되는 경우가 일어날 수 있다. 이러한 현상을 흔들림(chattering) 이라고 부르기로 한다. 이것은 기동을 불안하게하며 이러한 현상에 의해 모타의 기계적 피로가 누적되어 구조의 파괴를 가져올수도 있다. 이러한 결과로 다음과 같은 안정 기동조건을 설정할 수 있다.

$$\frac{dT_m}{dt} < 0, \quad \text{iff } \theta > \pi/2 \quad (9)$$

$$\int_{\pi/2}^{\pi} \frac{dT_m}{d\theta} d\theta < 0.25 f^{-1} \quad (10)$$

여기서 f 는 인가전압의 반주기의 역수를 2배한 것이다.

4. 구동토크의 응답 실험

입력량에 따른 변화를 설명하기 위하여 임펄스 전류를 사용한 응답특성을 실험하였다. 60Hz 인 교류전원을 전압가변기를 통하여 입력량을 제어하며, 마이크로 컨트롤러를 이용하여 펄스수를 제어하였다. 이 경우 비교의 공통성을 유지하기 위하여 전원의 주파수는 제어하지 않으므로 전류의 진폭은 항상 60 Hz 이다.

그림 4의 경우는 입력전압이 110V 인 경우 이다. 회전자의 극성이 완전히 바뀌는 것은 전류의 반주기인 8.3 msec가 완전히 지난후인 약 12.5 msec 이다. 그림 5에서와 같이 입력전압을 140 V 로 증가시키는 경우 회전자의 극성이 완전히 바뀌는 것은 이보다 짧아진 약 10.0 msec 이다. 이것은 입력의 증가에 의해 회전력이 증가하고 따라서 회전자 반전시간이 짧아진 것으로서 예상된 결과이다. 회전자의 영구자석은 약 0.7 (T) 로 착자되었던을 사용하였다.

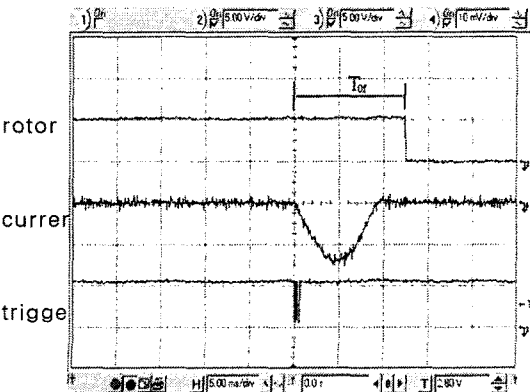


그림 4. 전압110V에서의 임펄스 응답파형

위의 그림에서 T_{tr} 는 회전자 반전 시간으로 정의되며, trigger 즉, 전류 흐름의 시작에서 회전자반전이 완성되는 시간까지의 주기이며 전자기동 토크와 코강토크의 합성력에 의한 운동량에 의해 주기가 결정된다.

만일 입력전압이 110V 보다 훨씬 낮아지면 회전자는 반전하지 않는다. 그것은 이미 전자력에 의한 회전력은 상실된 상태에서 코강토크에 의한 복원력이 더 강할수 있기 때문이다. 그리고 8.3 msec 의 반주기 시간이후에 부호가 바뀐 교번전압이 전원으로 인가되었을 경우, 그리고 회전자 반전이 충분히 이루어지지 않은 경우 전자기력은 회전력으로 작용하는 것이 아니라 정지력으로 작용하므로 회전이 이루어지지 않는다. 만일 전압의 입력량이 경제조건에 가까운 것이면 기동이 제대로 이루어 지지는 않으나 진동만 발생하는 흔들림 현상(chattering) 이 생긴다.

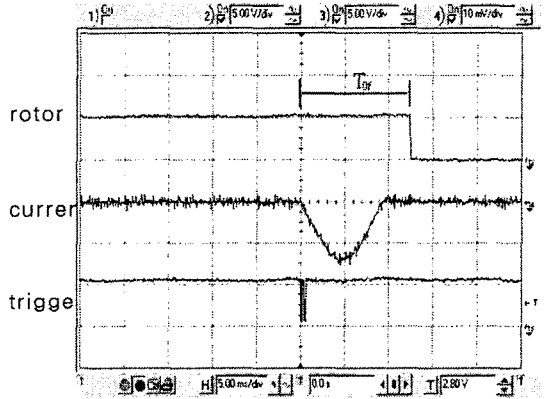


그림 5. 전압140V에서의 임펄스 응답파형

반대로 영구자석의 자속밀도 또는 입력전압이 매우 높은 경우, 회전자 반전시간이 전류의 반주기 시간보다 더 짧아지고, 이 경우 회전자가 반전되었으나 전류의 극성은 변하지 않았음으로써 토크는 기동력이 아니라 정지력으로 작용하게 된다. 그러나 다음 교번전류가 인가되면 회전자는 역시 빠른 반전시간으로 회전을 하게 될것이므로 기동이나 회전에는 문제가 없다. 하지만, 잉여 토크에 해당하는 량이 손실로 되어 효율을 저하시키며 소음과 진동의 원인된다. 그림 6은 영구자석의 자속밀도가 1.2 (T)으로 높아진 경우이며 전압이 140 V 다. 이 시험에서는 임펄스를 일정한 간격으로 연속적으로 인가하였는데, 이때 임펄스 간격은 회전자 맴핑이 충분히 안정될 수 있는 값을 유지시켰다. 실험에서는 회전자의 반전시간은 전류의 주기에 비해 짧으며 흔들림 없이 반전이 이루어졌다. 그러나 전류의 값은 나타난 바와 같이 증가하였음을 알수 있는데, 이것은 출력의 증가가 있음은 물론이나 정지토크의 발생으로 손실이 늘어난것도 원인으로 추정된다.

이러한 결과로 부터 부하에 따른 원활한 기동과 부드러운 운전을 위한 입력의 최적조건이 존재함을 알게되고,

그러한 조건으로 구동될 때 최적의 효율과 흔들림 없이 그리고 소음과 진동이 최소로 유지될수 있음을 알수 있다. 그림 1과 2에서 정의된 회전자 반전시간 T_{or} 는 안정적 기동을 위한 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$T_{or} < 1.25 f^{-1} \quad (11)$$



그림 6. 자속밀도 1.2 (T), 입력전압 140V 에서의 파형

그림 7은 최적조건으로 정속운전하고 있는 상태의 파형이다. 실험에서는 인가전압의 zero crossing detect마다 triac 을 접화시켜 전류를 인가하였는데, 전류의 주기와 회전자 반전 주기는 인가전압의 주파수와 일치하고 있으며 회전자의 반전은 전류에 비하여 위상이 지연된 동기속도를 이루고 있다. 그림 7에서의 운전조건은 0. (T) 영구자석과 입력전압 120 V 이나 이것은 부하조건이 실험적으로 이에 최적이기 때문이다. 그림 7에서와 같이 전류의 파형은 phase angle delay 의 영향을 고하면 거의 정현파에 가깝고 회전자의 반전시간도 일정하다.

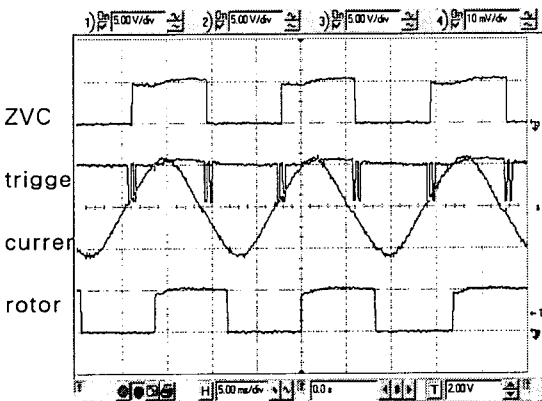


그림 7. 정상구동 상태에서의 연속파형

본문에서는 영구자석을 회전자로 갖는 단상 BLDC 모터의 구동 성능향상에 관한 연구의 목적으로써 정현파 전압원에 대한 회전자의 응답특성을 알기 위함에 중점을 두었다. 본문의 연구내용은 회전자가 반전을 완성 할수도 있고 실패할수도 있음을 시뮬레이션하고 실험으로 나타내 보였다. 그리고 결과적으로 회전자가 반전을 안정적으로 완성하는 일반적 조건을 제시하는 것이다. 이러한 연구결과 제시의 목적은 영구자석을 사용하여 기동하는 구조에서 흔들림(chattering)없이 원만히 모터를 기시켜 안정적 구동을 이루고자 하는 것이다.

전류가 경계조건 이하 인 경우 발생하는 흔들림은 기동을 불안하게 할뿐 아니라 모터의 기계적 구조를 파괴할수도 있거나 강성을 높여 제작하도록 하는 불리함을 가져준다. 또한 사용자로 하여금 귀에 거슬리게 하여 제품의 신뢰성을 상당히 저하시키고 상품으로써의 가치가 상실하도록 만들수도 있다. 따라서 모터의 설계에 있어서 이것을 충분히 감안하여 기동의 안정성을 확보하도록 함이 중요하다. 앞절에서의 해석 결과에 나타난바와 같이 기동 토크는 회전자 위상각 초기에는 크기가 매우 미미하다. 그것은 토크의 두 성분 가운데 회전력은 접선 분력이며 단상 구조에서는 극간 각도가 180도로써 기동개시각에서는 매우 미미하다. 따라서 설계에서는 이점을 충분히 고려하여야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] TJE Miller, "Blushledd Permanent-Magne Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, 1989
- [2] Ackermann et al, "New Technique for red cogging torque in a class of brushless DC mot IEE proceedings, 139, No.4, pp315-320, 1992
- [3] Hendershot and TJ Miller, "Design of bru permanent magnet motors", Magna Physics Publ and Clarendon Press, 1994
- [4] H.Woodson, J.Melcher, "Electromech Dynamics", Krieger Publishing Co. 1968