Claw pole형 스텝모터의 특성 해석

김 종 철　　오 철 수
경북대학교 전기공학과

Characteristics Analysis of claw pole type stepper motor

Jong-Chul Kim　　Chul-Soo Oh
Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat.Univ

Abstract - This paper deals with the analysis of the magnetic circuit of a claw pole type step motor. The air gap flux equation is derived using Thevenin equivalent circuit. On the base of the magnetic circuit analysis, both static torque and the dynamic torque characteristics are presented

1. 서　론

스텝모터는 인가 펄스 신호의 주파수에 비례한 회전속도를 얻을 수 있기 때문에 기동, 정지, 정·역전, 변속이 용이하며, 응답성 또한 좋은 특성을 가진다. 그리고, 입력신호에 의한 개루프 제어가 가능해 시스템 전체가 간단해지고 다른 모터에 비해 상당히 저렴하기 때문에 사용영역이 확산되고 있다. Claw pole 스텝모터는 자동차 ISC(Idle Speed Control) 밸브용으로 현재 많이 사용되고 있으며 주로 저주파수에서 운전된다.

본 연구에서는 claw pole 스텝모터의 자기회로 해석을 위해 테브난 등가회로를 도입하여 공극자속식을 유도하였으며, 이 자기회로 해석을 통해 정토크 특성 관계식을 유도하였다. 또한, 이를 토대로 claw pole 스텝모터의 동특성 해석을 제시하고자 한다.

표 1. 적용된 스텝모터의 제원

형식	PM형 2상 12극
정격	12V
coil 저항	20±2Ω
구동방식	bipolar방식
여자방식	2상여자방식
구동주파수	125pps

2. 본　론

2.1 정특성 해석

2.1.1 구조와 동작원리

Claw pole 스텝모터의 각 상의 코일은 치(齒)를 가진 can 모양의 고정자속에 감겨져 있고, 축방향으로 착자된 영구자석 회전자를 가지고 있다. 모터는 여자전류의 방향에 따른 고정자 극성의 변화와 회전자 자극의 상호작용으로 회전력이 발생한다.[1]

2.1.2 자기회로 해석

각 상을 여자시킨 상태에서 외부토크 인가시 회전자 각도 변화에 따른 토크특성식을 유도 하기 위해서 먼저 공극을 통하는 자속 해석이 기본이 된다.

Claw pole 스텝모터는 구조적 형상이 매우 복잡하여 전체적 자속회로 해석이 어렵기 때문에 전체를 1상 자

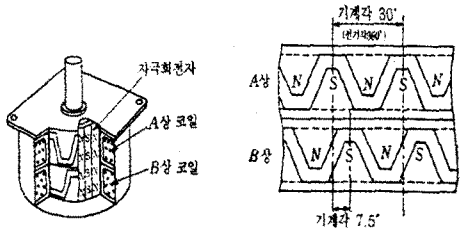


그림 1. Claw pole형 step motor의 구조

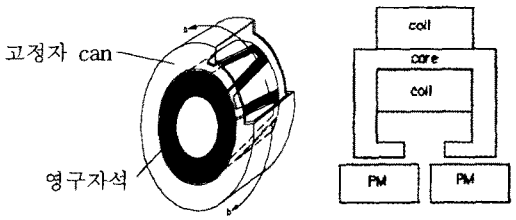
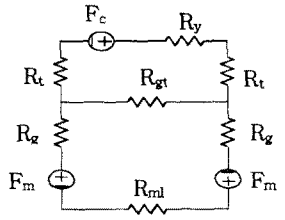
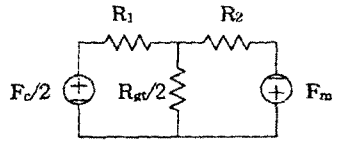


그림 2. 고정자 can의 구조와 자극쌍의 모형

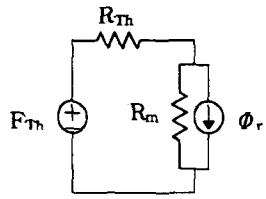
극쌍 모델로 형상화하여 해석하고자 한다. 그림 2의 모델은 ab 방향의 단면도를 근사모델화 한 것이다. 이 자극쌍에 대한 등가 자기회로는 그림 3(a)과 같이 나타낼 수 있다. 회로에서 공극자속은 공극 자기저항을 통하는 자속이므로 회로의 대칭관계를 이용해 그림 3(b)와 같이 나타낼 수 있다. 테브난의 등가회로를 이용하고, F_m을 Φ_r와 R_m 회로로 나타내면 그림 3(c)과 같다.[2]



(a)



(b)



(c)

그림 3 등가 자기회로

F_c	NI
F_m	영구자석 기자력
R_m	영구자석 자기저항
R_t	stator teeth의 자기저항
R_{ml}	영구자석 간 자기저항
R_{gt}	teeth 대 teeth의 공극 자기저항
R_y	철심의 자기저항

표 2. 등가회로의 요소

$$R_1 = R_t + \frac{R_y}{2} \tag{1}$$

$$R_2 = \frac{R_{ml}}{2} + R_g \tag{2}$$

$$F_{Th} = \frac{F_c}{2}\,\frac{\frac{R_{gt}}{2}}{\frac{R_{gt}}{2}+R_1} \tag{3}$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 \cdot \frac{R_{gt}}{2}}{R_1+\frac{R_{gt}}{2}} + R_2 \tag{4}$$

공극의 자속을 두 부분으로 나누어 생각하면

F_{Th}에 의한 자속 $\Phi_{g1} = \dfrac{F_{Th}}{R_{Th}+R_m}$ (5)

Φ_r에 의한 자속 $\Phi_{g2} = \dfrac{R_m}{R_{Th}+R_m}\Phi_r$ (6)

식 (5), (6)과 같이 나타내며, 공극을 통하는 자속은 이 두 자속의 합이 되므로 식 (7)이 됨을 알 수 있다.

$$\Phi_g = \Phi_{g1}+\Phi_{g2} = \frac{F_{Th}+R_m\Phi_r}{R_{Th}+R_m} \tag{7}$$

여기서, 영구자석의 $\Phi_r = A_m B_r = 24\,\mu$Wb이며, 실제 치수로의 자극쌍당 모터의 최대 Φ_{gm}값을 계산한 결과 약 0.53[μWb]이었다(그림 4 참조). 이 값은 후의 holding 토크 계산시나 탈출토크 계산시 적용된다.[3]

그림 4는 위의 식들을 이용해 영구자석 Φ_r값에따른 Φ_g 대 F_c 의 그래프이다

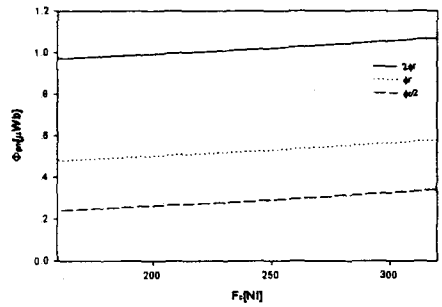


그림 4. Φ_r에 따른 F_c 대 Φ_g의 곡선

2.1.3 토크식 유도

모터에서의 토크는 공극에서 저장된 coenergy W_c의 회전자 위치 θ의 미분으로 구할 수 있다.[4]

$$T(\theta) = \frac{dW_c(\theta)}{d\theta} \tag{8}$$

$$\therefore T(\theta) = \frac{1}{2}\sum_{k=1,2} i_{1,2}\frac{d\lambda_{1,2}}{d\theta} = \sum_{k=1,2} I_{s1,2} Np \frac{d\Phi_g(\theta)}{d\theta} \tag{9}$$

N : 턴수 , p : 고정자 자극쌍의 수

a상과 b상은 서로 기계적으로 δ(12극 7.5 °) 만큼 어긋나 있기 때문에 각 상 토크는 δ 만큼의 위상 차가 생긴다.

a상에 의한 토크

$$T_a(\theta) = I_a N_a p^2 \Phi_g \sin p\theta \tag{10}$$

b상에 의한 토크

$$T_b(\theta) = I_b N_b p^2 \Phi_g \sin p(\theta+\delta) \tag{11}$$

전체 토크는 각 상 토크의 합으로 주어지며, 또한 각 상의 전류, 권선수, 자극쌍수, 자속이 같으므로 전체 토크는 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$T = T_a(\theta)+T_b(\theta) = INp^2\Phi_g(\sin p\theta+\sin p(\theta+\delta)) \tag{12}$$

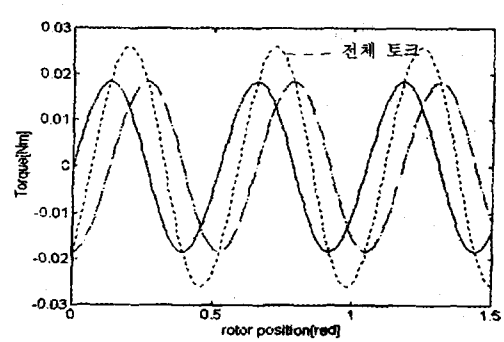


그림 5. 회전자 위치에 따른 토크특성곡선

따라서, 각도 변화에 따른 토크 특성곡선은 그림 5와 같이 나타나며, 이것은 실제모터의 토크 특성곡선이다. 그림 5에서 점선이 나타내는 것이 전체 토크가 된다.

또한, 최대 정지토크인 holding 토크식은 각 상이 전기각으로 90° 위상차가 나기 때문에 식 (13)으로 주어진다.

$$T_H = \sqrt{2}T_{1H} = \sqrt{2}IN\Phi_g p^2 \quad (13)$$

이로서, 자기회로 해석을 통해 공극자속을 구할 수 있었으며, 이 공극자속을 적용함으로써 정토크식을 유도하였다. 실제치수(권선수 600T, 전류 0.4A, 공극자속의 최대치 0.53μWb, p=12)의 모터 여자시 최대 정지토크인 holding torque 를 계산하면

$$T_H = \sqrt{2} \cdot 0.4 \cdot 600 \cdot 0.53 \cdot 12^2 = 0.048 \text{ [Nm]}$$

위의 계산값은 이론적값이며 실제 측정값은 모터의 cogging, 기계적 마찰력, 자속의 효율적분배등을 고려하면 이 이론치보다 훨씬 적게(약 0.026[Nm]) 생성됨을 알 수 있다. 이 정특성 해석을 기본으로 다음장의 동특성해석이 가능하다

2.2 동특성 해석

2.2.1 전압방정식과 토크식 유도

주파수변화에 따른 토크 특성을 스텝모터의 동특성이라 하며, 이는 모터에서 매우 중요하게 다루어 진다.

기본파에 비해 고조파 성분비가 현저히 작으므로 기본파성분만을 고려하면 영구자석형 스텝모터는 비돌극형 영구자석형 동기기로서 다음과 같은 전압방정식(14)(15)로 나타낼 수 있다.

$$V_a = R_a i_a + L\frac{di_a}{dt} + e_a \quad (14)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b\frac{di_b}{dt} + e_b \quad (15)$$

V_a, V_b는 각각 A상, B상의 인가전압이고 e_a, e_b는 유기기전력이다. Bipolar 구동 이기 때문에 각 상 전압은 $\pi/2$ 만큼의 위상차를 가지므로 시간변화에 따른 자속의 변화율로 정의되는 유기기전력은 식 (16), (17)과 같게 된다.

$$e_a = -N_a\Phi_g p(\sin p\theta)\frac{d\theta}{dt} \quad (16)$$

$$e_b = N_b\Phi_g p\sin p(\theta + \frac{\pi}{2})\frac{d\theta}{dt} \quad (17)$$

따라서 식 (14), (15), (16), (17)에서 전류의 식을 얻을 수 있다.

동기모터에 속하는 스텝모터가 관성모멘트J, 제동계수 D, 부하 마찰력에 의한 토크가 모터에 가해졌을 때의 기본적 운동방정식은

$$T = J\frac{d^2\theta}{dt^2} + D\frac{d\theta}{dt} + F \quad (18)$$

으로 주어지고,

$\frac{d\theta_e}{dt} = \omega$, $p\theta = \theta_e$ 놓으면, 정토크 특성방정식과 운동방정식과의 토크 평형관계에서 동특성식을 유도할 수 있다

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + D\frac{d\theta}{dt} + F = N_a\Phi_M pi_a\cos\theta_e - N_b\Phi_M pi_b\sin\theta_e \quad (19)$$

위의 방정식들은 모두가 비선형 미분방정식이기 때문에 직접해를 구하기는 어렵다. 따라서, 방정식을 풀기위해 수치해석 방법(Runge-Kutta)을 도입한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하였다.

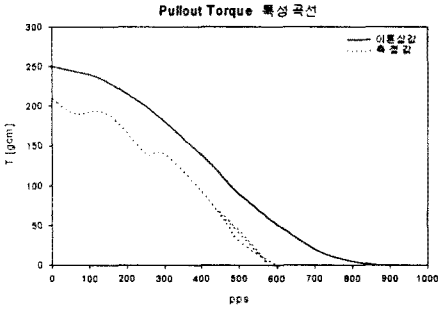


그림 6. Step motor의 동특성곡선

그림 6의 pull-out 토크 곡선에서 실측값이 시뮬레이션 곡선 보다 동작영역이 좁다는 것을 알 수 있다. 이것은 모터의 cogging이나 기계적 마찰, 그리고, 전기자 반작용으로 인한 전압강하의 요인이라 생각된다. 이로써 claw pole 스텝모터의 자기회로 해석에서부터 정특성해석을 비롯해 동특성까지 해석되어졌다.

3. 결 론

본 연구에서는 claw pole 스텝 모터의 기본적 근사모델을 도입하여 자기회로 해석을 하였으며, 이를 통해 모터의 정특성, 동특성 해석이 제시되었다. 수식의 검증을 위해 현재 개발중인 모터 sample로 실험되어졌으며, 차후 완제품의 실험결과와 특성해석과의 신뢰성을 얻는 것이 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Jack.A.G., "Claw pole Armature permanent Magnet Machines Exploiting soft Iron Power Metallurgy", IEEE International electric machines and drives conference record, MA1-5.1, 1997

[2] B.C.Kuo, "Nonlinear magnetic circuit model and its application to static holding torque prediction of hybrid step motors", Pro. 13th Annual Symposium onIncremental Motion Control System and Devices,University of Illinois,1986,pp303

[3] Andrzej M.Pawlak, "Magnets in modern rotary actuators". Concerence Record of the 1995 IEEE Industry Applications Society Thirtieth IAS Annual Meeting. 1995.pp498

[4] Andrzej M.Pawlak, "Static and dynamic analysis of claw pole stepper moter with permanent magnet". Pro.13th Annual Symposium on Incremental Motion Control System and Devices, University of Illinois,1984, pp134