

Idle Air Valve-용 PM형 Stepping Motor의 특성해석

金奎卓, 李定奎, 金德顯, 辛興敎, 文正錫, 金泰顯
 昌原大學校 慶尙大學校 成珍電氣(株)
 電氣工學科 電氣工學科

Characteristics Analysis of PM Type Stepping Motor for Idle Air Valve

G. T. Kim, J. G. Lee, D. H. Kim, H. K. Shin, J. S. Moon, T. H. Kim
 Changwon University Gyeongsang University Sungjin Electric Co.
 Dep. of Electrical Eng. Dep. of Electrical Eng.

ABSTRACT

The permanent magnet type stepping motor is used widely for various devices, such as FA and OA machine. Characteristics of the stepping motor is analyzed using permeance method. Static, dynamic and 1 step response characteristics of PM type stepping motor for idle air valve is discussed.

1. 서론

스텝모터는 open-loop 로서 정도 높은 위치제어를 행할 수 있으며 주파수에 비례한 회전속도로 광범위한 속도제어등의 장점이 있어 위치 제어용 Actuator로서 광범한 발전을 이루어 OA, FA기기에 없어서는 안될 중요한 위치를 확보하게 되었다.

그 중 CLOW-POLE을 갖는 PM형 스텝모터는 구조가 간단하고 견고하며 단체 및 재질이 프레스가공에 의하여 低價로 가공할 수 있어 프린터등의 OA기기, 가전기기, 자동차용으로 널리 이용되고 있다.

그러나, 스텝모터는 본질적으로 스텝동작을 행하므로 고유주파수부근에서 진동, 공진현상이 발생하여 탈조의 우려가 매우 높아 운전 주파수가 제한을 받으며 관성 부하에 매우 약하다. 또한, 고속운전시 권선 인덕턴스의 영향으로 발생토크의 급격한 저하로 탈조되기 쉬운 결점이 있어 사용속도 및 부하토크등에 대한 충분한 검토가 선행 되어야 한다.

지금까지의 스텝모터에 대한 연구동향은 설계치로부터 지속분포 및 정특성을 계산하는 방법 및 정특성으로부터 동특성을 계산하는 방법은 많은 연구결과가 발표되었으나 설계치로부터 동특성까지 일련의 특성계산을 행하는 연구는 거의 발표되지 않아 실용적인 스텝모터의 해석법으로써는 불충분하였다.

따라서, 본 연구에서는 자동차에 이용되고 있는 Idle air valve-용 PM형 스텝모터를 퍼미언스법을 이용하여 설계치로부터 정특성, 동특성 및 스텝응답특성을 해석하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 해석모델 설정 및 정, 동특성 해석

2.1 해석 모델

일반적으로 스텝각이 작은 고분해능의 스텝모터를 설계하기 위하여는 상수 및 로우터치수를 증가시켜야 한다. 그러나 분해능을 증가시키기 위하여 상수를 증가시키면 출력단 Power Tr의 증가로 시스템의 생산 단가가 고가로 된다. 또한, 로우터 치수를 증가시키면 치의 가공기술 및 공극유지가 매우 어려워 구조가

복잡하게 된다. 또한 저주파수에서는 소음, 진동등에 많은 문제점이 존재한다. 따라서, 고속성, 고효율 및 고분해능을 위해서는 상수 및 치수를 증가시켜야 하나 가격 및 기계적 가공정도, 저속영역에서의 소음, 진동, 관성부하등을 고려하면 상수 및 치수는 가급적 적을수록 좋다.

따라서, 자동차의 Idle air valve-용과 같이 저속운전, 큰 관성부하, 위치정밀도가 그다지 높지않은 용도의 스텝모터는 기계적 강도, 제작단가등의 영향으로 인하여 그림 2.1과 같은 Clow - pole을 갖는 2상 여자방식의 12극 PM형 스텝모터가 널리 이용되고 있다[1,2]. 자동차용의 스텝모터는 속용성은 그다지 크지 않으므로 구동토크 대 홀딩토크의 비를 크게하면서 공전주파수를 피하기 위하여 구동주파수를 매우 낮게 설정한다. 따라서 발생토크를 크게하기 위하여 Turn수를 많이 시행하여도 리액턴스는 크지 않게 된다. 따라서 본 연구에서의 해석모델의 사양은 표 2.1과 같다.

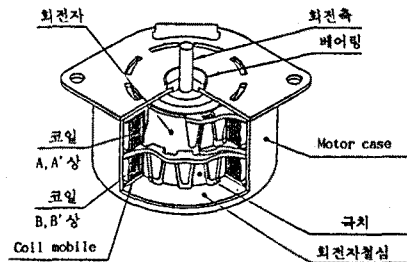


그림 2.1 Clow pole형 PM 스텝모터

표 2.1 해석모델의 제원

입력전압	12 [V]	인덕턴스	23 [mH]
극 수	12	주 파 수	33 [pps]
구동방식	2상여자방식	입력전류	200 [mA]
Turn 수	620 [Turn]	No.	3.0E-3[Wb.Turn]
저 항	50 [Ω]	스텝 각	7.5 [°/step]

2.2 정특성 및 동특성 해석

그림 2.1에 나타낸바와 같이 자동차의 idle air valve-용 스텝모터는 전기자의 齒數는 통상 극수와 같게 설계, 제작하며 고조파자속중 가장 두드러진 3고조파성분도 통상 기본파의 10[%]정도로 이를 무시하면 비돌극형 동기전동기로서 PM형 스텝모터를 모델화 할 수 있다.

따라서, 전기자 권선의 저항을 R, 각 권선의 쇠교자속을 λ_a , λ_b 라 하면 각 상의 전압방정식은

$$\begin{aligned} V_a &= RI_a + d\lambda_a/dt \\ V_b &= RI_b + d\lambda_b/dt \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 각 권선의 자기 인덕턴스를 L이라 하면 계자 자속과 권선과의 전체 쇠교 자속 λ_a , λ_b 는

$$\begin{aligned} \lambda_a &= LI_a + \phi_m \cos\theta \\ \lambda_b &= LI_b + \phi_m \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 여기서 ϕ_m 는 계자자속의 최대치이다. 식 (1)과 (2)를 정리하면 전압방정식은 다음식으로 된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + Ld/dt & 0 \\ 0 & R + Ld/dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} + \theta\dot{\phi} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

한편, a, b상의 토크를 각각 T_a , T_b , detent torque를 T_d 라 하면 발생토크는 이들의 합으로 주어지나 detent torque는 총 발생토크의 수 [%]에 지나지 않으므로 이를 무시하면 식 (4)로 주어진다[1,3].

$$T_a = T_a + T_b + T_d \approx (\partial\lambda_a/\partial\theta)I_a + (\partial\lambda_b/\partial\theta)I_b \quad (4)$$

또한, 스텝모터의 운동 방정식은 식 (5)와 같다.

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + T_L = T_a \quad (5)$$

여기서 T_L 은 부하토크, J는 관성모멘트, D는 점성 마찰 계수이다. 식 (3) - (5)가 스텝모터의 특성을 해석하기 위한 기본방정식이다. 스텝모터의 구동특성을 해석하기 위하여는 이 기본방정식을 풀어야 하나 전압방정식이 시변형이며 운동방정식도 비선형이므로 수치계산을 행하지 않으면 안된다. 따라서 본 연구에서는 동기기 동기회로법의 출력식으로부터 스텝모터의 발생토크를 계산하여 정특성 및 동특성을 해석하였다.

스텝모터를 주파수 F(PPS)로 구동하는 경우, 구동전압의 기본파에 의한 전류는 다음식으로 표현된다.

$$i = (V - E) / Z_a \quad (6)$$

$$= (V_0 e^{-j\omega t} - E_0 e^{-j(\omega t + \delta)}) / Z_0$$

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$E_0 = \omega N\phi_m$$

여기서 E는 역기전력, δ 은 부하각, $\tan\phi = X / R$ 이다.

따라서, 발생토크 T_a 는

$$T_a = (2/\omega)(V_0 E_0 \cos(\phi - \delta) / Z_0 - E_0^2 \cos\phi / Z_0) \quad (7)$$

이다. 식 (7)로 부터 최대토크인 탈출토크 T_{out} 은 $\phi - \delta = 0$ 인 경우이므로 $\cos\phi = R/Z_0$ 가 되어

$$T_{out} = (2/\omega)(V_0 E_0 / Z_0 - E_0^2 R / Z_0^2) \quad (8)$$

이다. 따라서 여자시 최대정지 토크인 Holding torque는 pps가 0인 경우이므로

$$T_{hold} = 2 (N \phi_m V_0) / R \quad (9)$$

이다. 따라서 스텝모터의 정특성인 각도변화에 따른 각 상의 스티프니스 특성식은 식 (10)으로 주어진다.

$$T_i = -T_{hold} \sin(Zr\theta - \pi(i-1)/2) / \sqrt{2} \quad (10)$$

또한, 동특성인 주파수-토크곡선은 식 (7) 및 (8)로 부터 계산할 수 있으므로 이를 그림 2.2 및 2.3에 나타내었다.

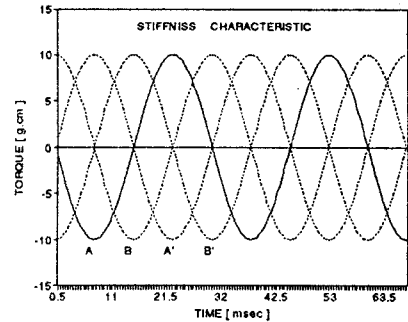


그림 2.2 스티프니스 특성곡선

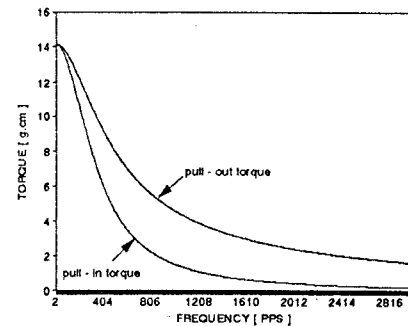


그림 2.3 주파수-토크 특성곡선

또한, 스텝모터는 스텝동작의 반복으로 회전하므로 관성부하의 크기에 따라 특성이 크게 변화한다. 관성부하가 증가하면 자기동 주파수가 저하되고 자기동 영역도 줄어들어 탈조의 위험이 있다. 따라서 관성부하가 커 slew영역에서의 운전이 필요한 경우에는 가, 감속운전을 행하여야 하므로 관성부하에 따른 자기동 주파수의 특성은 매우 중요하다. 최대 자기동 주파수와 관성부하에 따른 자기동 주파수의 관계는 식 (11)로 주어지며 이때의 특성을 그림 2.4에 나타내었다[4].

$$F = F_s / \sqrt{1 + J_L / J_r} \quad (11)$$

여기서

- F = 관성부하가 있는 경우의 자기동주파수의 최대치(pps)
- F₀ = 스텝모터의 최대 자기동 주파수(pps)
- J_r = 로우터의 관성 모멘트(g·cm²)
- J_L = 부하의 관성 모멘트(g·cm²)

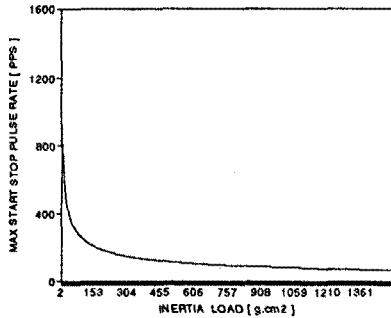


그림 2.4 관성부하 - 자기동 주파수 특성

3. 2차계 모델에 의한 1스텝 응답 특성

스텝모터를 자동차의 idle air valve용으로 이용하는 경우, 진동이 적고 원활한 회전을 위하여는 위치정밀도 및 속응성이 양호하여야 하므로 이를 평가하기 위한 1스텝 응답특성에 대하여 고찰한다.

식 (5)로 주어진 운동방정식이 비선형 방정식이 되기 때문에 수치계산을 행하여야 한다. 2상 여자 방식이므로 각상의 전류는 i_1 를 교대로 반복시켜 여자를 행하므로 1로 여자시킨 경우를 기준으로 하며 이때의 회전자 정지위치는 $\theta = \pi/4$ 인 점을 x 라 하면 식 (5)는 식 (12)와 같은 방정식으로 표현된다.

$$J\ddot{x} + D\dot{x} + T_L = -T_{hold} \sin x \quad (12)$$

여기서 D는 점성 마찰 계수이다. 따라서 식 (12)를 정규화하여 변형하면 다음과 같다.

$$d^2x_1/d\tau^2 + 2\zeta dx_1/d\tau + T_L' = -\sin x_1 \quad (13)$$

여기서

$$x_1 = x$$

$$\tau = t\omega_n = t\sqrt{T_{hold}Z_r / J}$$

$$\zeta = D\omega_n / (2T_{hold} Z_r)$$

$$T_L' = T_L / T_{hold}$$

이다. 식 (13)을 수치계산법으로 풀기 위하여 $dx_1/d\tau = x_2$ 라고 하여 전개하면 식 (14)이 구해진다.

$$dx_1/d\tau = x_2 \quad (14)$$

$$dx_2/d\tau = -\sin x_1 - 2\zeta x_2 - T_L' x_2$$

식 (14)는 Runge - Kutta법을 적용하여 계산 하였다. 따라서 식 (14)는 초기치 문제이므로 초기조건을 대입하면 스텝모터의 1스텝 응답시의 위치 및 각속도를 구할수 있으며 이를 그림 3.1

에 나타내었다.

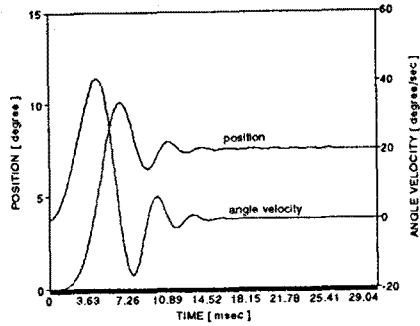


그림 3.1 1스텝 응답특성

그림 3.1에 나타낸바와 같이 1스텝 응답은 감쇄진동을 한다. 만일 진동이 커지고 진폭이 안정영역을 초과 하면 역전이나 미스 스텝이 발생한다. 또, 감쇄진동중 역방향으로 토크가 작용하고 있는 동안에 다음 입력펄스를 가하면 정방향의 토크와 역방향의 토크가 복잡하게 작용하여 회전이 불안정하게 되거나 최악의 경우 탈조하게 된다. 이를 피하기 위하여는 부하의 운동 속도를 바꾸거나 감속비를 바꾸어 모터의 속도를 변경하여 공진을 억제시키거나 마찰부하를 덧붙여서 진동의 진폭을 작게하거나 관성부하를 피하므로써 공진영역을 낮은 주파수로 이동시켜야 한다. 그러나 본 해석의 적용모델인 Idle air valve용 PM형 스텝모터는 공기량을 단순 조절하며 입력 주파수가 33pps이므로 진폭이 그다지 크지 않고 주기가 크므로 1스텝 응답시 진동은 있으나 탈조에 이르지 않으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차에 이용되고 있는 Idle air valve용 PM 스텝모터를 피미언스법을 이용하여 정특성, 동특성을 해석하였으며 수치해법인 Runge - Kutta법을 적용하여 1스텝 응답특성을 해석하였다. 차후 실험결과와 비교하여 해석방법의 신뢰성을 확인한 후 국내 실정에 맞는 MPI엔진용 유량게어 스텝모터의 설계 지표를 제시 하고자 한다.

參 考 文 獻

1. 百目鬼英雄, "스텝핑모터의 저속안정성에關する考察" 電氣學會研究會資料 RM-90-117, pp.83-89, 1990
2. 百目鬼英雄 外 3人, "스텝핑모터의脫出トルクに關する一考察", 電氣學會研究會資料 RM-91-129, pp.81-87, 91
3. D.W.J.Pulle et al, "Normalised high-speed performance analysis of small hybrid stepping motors", IEE Pro., Vol. 134, No. 6, pp 333-337, 1987
4. 眞壁昭昭, "스텝핑모터制御回路 設計"