

2상 하이브리드 스텝핑 모터의 동특성

안호진, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 이종배*, 성하경*, 임태빈*
 창원대학교 전기공학과, (주)모터넷*

Dynamic Characteristic of a 2-phase Hybrid Stepping Motor

Ho-Jin Ahn, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim,
 Jong-Bae Lee*, Ha-Gyeong Sung*, Tae-Bin Lim*
 Department of Electric Engineering, Changwon National University,
 Motor-Net international Co.,LTD*

Abstract - This paper presents dynamic characteristic of a 2 phase hybrid stepping motor which includes pull-out torque with constant voltage drive and one step response. In order to analyze this characteristics, vector diagram of a synchronous motor and torque-voltage equation are used. Analytic results are good agreement with experimental results.

1. 서 론

하이브리드 스텝핑 모터(Hybrid Stepping Motor)는 회전각도가 입력 펄스(pulse)수에 정비례하고, 회전속도는 펄스 주파수에 정비례하므로 제어에 용이하여 사무자동화기와 공장자동화기기를 중심으로 그 시장 규모가 비약적으로 증가하고 있다.

그러나 스텝핑 모터는 기본적으로 스텝 동작에 의한 진동의 문제가 있으며 진동에 의해 고유주파수 부근에서 탈조되기 쉽다. 또한 리액턴스의 영향으로 고속회전시 발생토크가 급격히 저하하여 탈조되기 쉬우므로 회전속도와 부하토크에 따라 운전범위가 제한되어 있다.

본 논문에서는 OA기기에 널리 이용되고 있는 2상 하이브리드 스텝핑 모터에 대해서 제한된 운전범위를 파악할 수 있는 정전압 구동특성과, 진동 및 위치정밀도와 직결된 one step 응답특성을 해석하였다. 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 해석결과와 실험결과를 비교하였다.

2. 정전압 구동특성

하이브리드 스텝핑 모터의 회전자는 돌극구조를 가지지만, 이상적으로 인덕턴스가 회전자의 위치에 무관하여 비돌극형 동기전동기의 벡터도로부터 정전압 구동특성을 파악할 수 있다.

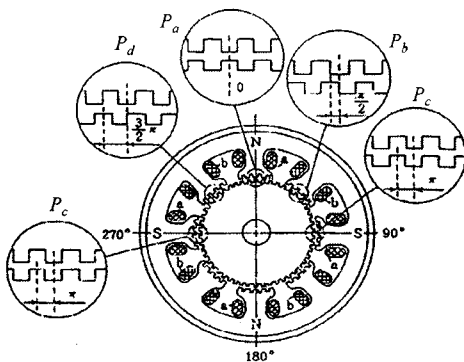


그림 1. 공극퍼미언스의 위상차

2.1 하이브리드 스텝핑 모터의 인덕턴스

하이브리드 스텝핑 모터에서 인덕턴스를 비롯한 대부분의 특성파라미터는 공극퍼미언스로부터 계산할 수 있다[1-2]. 그림 1에 나타낸 바와 같이 각 상의 자극 아래에 있는 회전자 치(teeth)는 1/4피치(pitch)만큼 어긋나 있으므로 각각의 자극 아래의 퍼미언스를 회전각의 함수로 표현했을 때 주기는 같고 단지 위상만 다른 형태로 표현된다[1]. 퍼미언스의 고조파 성분을 무시하고 기본 성분만 고려하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_a = P(\theta_e) \approx P_0 + P_1 \cos N_r \theta \quad (1)$$

$$P_b = P(\theta_e + \frac{1}{2} \pi) \quad (2)$$

$$P_c = P(\theta_e + \pi) \quad (3)$$

$$P_d = P(\theta_e + \frac{3}{2} \pi) \quad (4)$$

(θ_e : 전기각, N_r : 회전자의 치(teeth)수,
 θ : 기계각, $\theta_e = N_r \theta$)

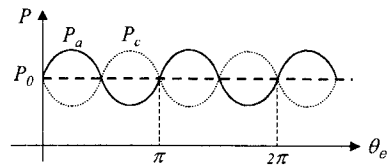


그림 2. 회전각에 따른 공극퍼미언스

각 자극 아래의 퍼미언스가 전기각으로 $\pi/2$ 씩 위상차가 발생하므로 A상의 퍼미언스는 식(5)와 같이 회전각에 무관한 값이 된다.

$$P_A = N_{st} (P_a + P_c) = 2 N_{st} P_0 \quad (5)$$

(N_{st} : 고정자의 한 극당 치(teeth)수)

한편 한 상당 인덕턴스는 퍼미언스로부터 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$L = N_{sc} N_c^2 P_A = 2 N_{st} N_{sc} N_c^2 P_0 \quad (6)$$

(N_{sc} : 한 상당 직렬코일수, N_c : 코일당 턴수)

즉 하이브리드 스텝핑 모터에서 회전자가 비록 돌극 구조이나, 한 상당 인덕턴스는 공극퍼미언스의 기본파만 고려했을 때 회전각에 무관한 일정한 값을 가지게 된다.

2.2 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터도

이와같이 하이브리드 스텝핑 모터는 인덕턴스가 회전각에 무관하므로 그림 3과 같은 비돌극형 동기전동기의

벡터도로부터 정전압 구동특성을 파악할 수 있다. 벡터도에서 한 상당 출력 및 토크를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$W_o = E \cdot I \cos(\beta - \delta) \quad (7)$$

$$= E \cdot \left[\frac{V}{Z_s} \cos(\alpha - \delta) - \frac{E}{Z_s} \cos \alpha \right]$$

$$T = W_o / \omega_m \quad (8)$$

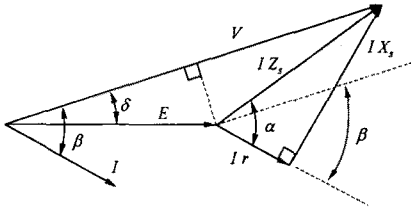


그림 3. 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터도

2.3 정전압 구동특성 해석결과

본 논문의 동특성 해석에 사용된 모터의 제원을 표 1에 나타내었다. 정전압 구동특성 실험은 다이노미터(dynamo-meter)를 이용하였다.

그림 4와 5에 나타낸 바와 같이 해석결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다. 영구자석에 의한 포화현상을 고려하여 정확한 인덕턴스를 계산하기 위해 치-공극부만 따로 모델링하여 자기스칼라퍼텐셜을 이용한 2차원 유한요소법을 적용하였다[2].

표 1. 해석 모델의 제원

홀딩토크 (1상 여자시)	2.6[kgf·cm]	고정자 외경	50.00[mm]
정격전류	1.2[A]	회전자 외경	25.91[mm]
상수	2상	축방향 길이	18.00[mm]
1step 각도	1.8[°]	공극 길이	0.04[mm]
극당 턴 수	53(Turn)	잔류자속밀도	1.28(T)

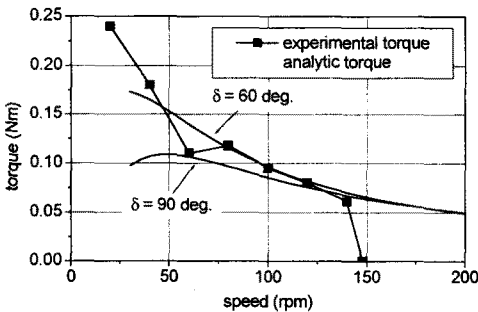


그림 4. 정전압 구동시 속도에 따른 풀아웃 토크

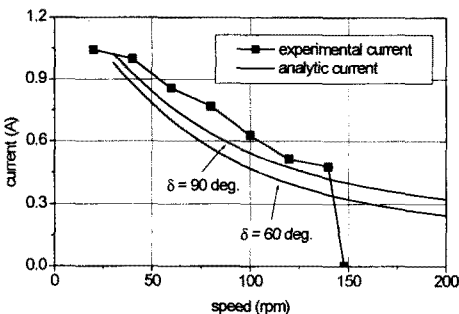


그림 5. 정전압 구동시 속도에 따른 전류

실제로 하이브리드 스텝핑 모터의 공극퍼미언스는 치 구조 및 포화현상에 의해 고조파를 많이 포함하게 되며, 따라서 인덕턴스도 회전각에 따라 변화하게 된다. 그러나 그림 4와 5에 나타낸 결과에서 알 수 있듯이 공극퍼미언스의 기본파만 고려하여 인덕턴스를 산정해도 해석결과와 실험결과가 잘 일치한다.

한편, 권선의 저항이 무시할 수 있을 정도로 매우 작을 경우 식(7)에서 $\alpha = \pi/2$ 가 되어 부하각 $\delta = 90$ 도 일 때 최대토크가 발생하게 된다. 그러나 소형 하이브리드 스텝핑 모터에서는 저항이 무시 못할 정도로 크며, 저속영역에서 리액턴스가 작기 때문에 그림 4와 같이 저속영역에서는 부하각이 90도가 되어도 최대토크가 발생하지 않는다.

3. one step 응답특성

스텝핑 모터에서 one step 응답특성은 진동과 위치정밀도에 직결되는 중요한 특성이다. 본 논문에서는 정전압 펄스 인가시의 one step 응답특성을 해석하였고 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

3.1 토크방정식과 전압방정식

회전기에서 무부하 손실토크 및 코깅토크를 무시했을 때 토크방정식은 식(9)와 같다. 한편, 스텝핑 모터에서 권선여자시 회전각에 따른 발생토크는 기본파만 고려하여 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$T(i, \theta) = T_L + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (9)$$

$$T(i, \theta) = -T_H(i) \sin(N_r \theta) \quad (10)$$

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + E(\omega, \theta) \quad (11)$$

(T : 발생토크, T_L : 부하토크 J : 관성모멘트,

B : 점성감쇠계수, T_H : 홀딩토크)

식(11)은 전압방정식을 나타낸 것이다. 토크방정식에서 홀딩토크는 전압방정식의 해(solution)인 전류의 함수이고, 전압방정식에서 역기전력은 토크방정식의 해인 각속도의 함수이므로 초기치를 가정하고 미세시간 간격으로 두 방정식을 동시에 풀어야 한다. 두 미분방정식의 풀이에는 수치해석적인 방법 중 가장 기본적인 오일러법(Euler's method)을 이용하였다.

3.2 one step 응답특성 해석결과

토크방정식에서 점성감쇠계수는 쉽게 산정할 수 있는 값이 아니므로 실험결과와 해석결과를 비교하면서 점성감쇠계수를 표 2와 같이 추측하였다. 모터와 엔코더(encoder)의 관성모멘트는 매뉴얼 상의 값이며 커플링의 관성모멘트는 엔코더에 비해 매우 작기 때문에 완전한 원통으로 가정하고 계산한 값이다.

표 2. 토크방정식의 파라미터

	모터	커플링	엔코더
관성모멘트 ($g \cdot cm^2$)	60	27	350
점성감쇠계수 ($Nm \cdot sec/rad$)	0.001		0.002
손실토크 [Nm]	0		0.05

그림 6과 그림 7을 비교해보면 전류파형은 거의 비슷하나 각도변위에 대한 실험파형이 매끄럽지 못하는데, 이것은 변위각이 매우 작아 노이즈의 영향이 상대적으로 크고, 실험에 사용된 DSP 보드의 D/A 컨버터 사양이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 실험에 사용된 엔코더는 1회전당 9600펄스의 고분해능을 갖기 위해 반

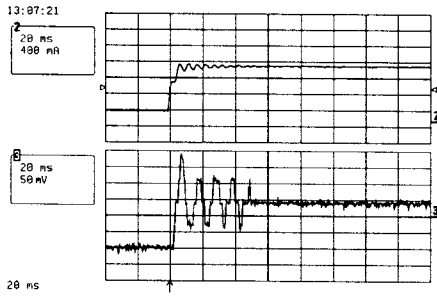


그림 6. one step 응답특성 실험결과

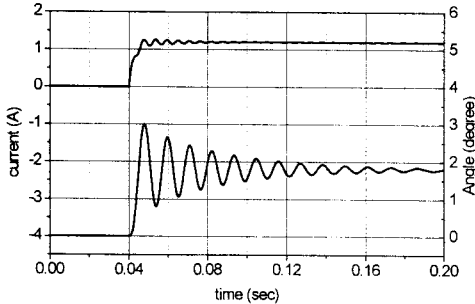


그림 7. one step 응답특성 해석결과

경이 너무 큰 관계로 표 2에 나타난 바와 같이 관성모멘트가 모터의 6배에 이른다. 즉 엔코더 자체가 큰 부하로 작용하기 때문에 그림 6과 7은 모터 자체의 고유특성인 one step 응답특성을 잘 반영하지 못한다.

따라서 본 논문에서는 하이브리드 스테핑 모터 고유의 one step 응답특성을 엔코더로 직접 측정할 수 없으므로 해석결과만 제시하였다. 해석결과와 타당성을 검증하기 위해 펄스 인가시의 전류파형을 검출하여 해석결과와 비교하였다. 표 2에 나타난 스테핑 모터 자체의 점성감쇠계수도 실험결과와 해석결과를 비교하여 추측한 값이다. 그림 8의 해석결과에서 점성감쇠계수를 변화시켰을 때 전류파형이 실험결과와 많이 달라지므로 실험결과와 비교하여 추측한 점성감쇠계수가 비교적 정확할 것으로 사료된다.

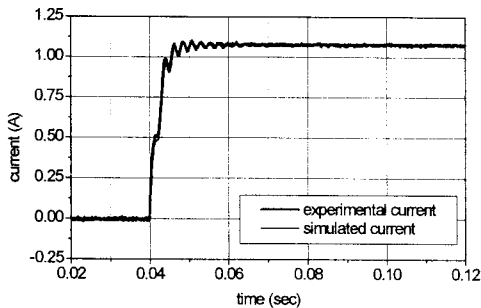
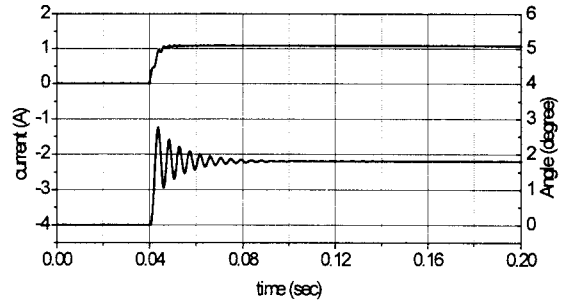
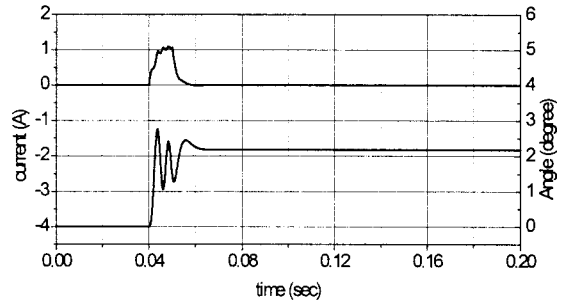


그림 8. 무부하시 one step 응답 전류파형 비교

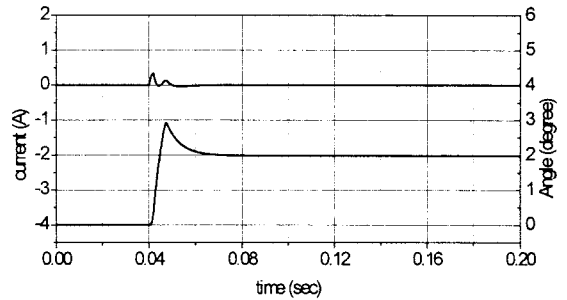
그림 9는 무부하시 one step 응답특성으로 모터 자체의 고유특성을 나타낸다. 스테핑 모터의 무부하 손실 토크를 고려하면 발생토크가 감소하므로 오버슈트와 세틀링타임이 감소한다. 또한 그림 9에서 알 수 있듯이 펄스폭이 세틀링타임보다 짧으면 회전자의 관성에 의해 위치정밀도가 떨어지게 된다. 정지되는 위치는 펄스폭에 따라 달라진다. one step 응답특성의 정확도를 향상시키면 자기동 영역(start stop region)과 풀인 토크(pull-in torque)를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 4[V]로 전압 유지



(b) 펄스폭 10[ms]



(c) 펄스폭 5[ms]

그림 9. 무부하시 one step 응답특성 (구형파 4[V] 펄스)

4. 결 론

본 논문에서는 2상 하이브리드 스테핑 모터의 동특성을 해석하였다. 공극퍼미언스의 기본과만 고려하면 인덕턴스가 회전각에 무관하므로 정전압 구동특성 해석시 비동극형 동기기의 벡터도를 이용할 수 있으며, 해석결과가 실험결과와 잘 일치하였다.

한편 one step 응답특성은 토크방정식과 전압방정식을 결합시켜 수치해석적인 방법으로 해석하였다. 엔코더의 높은 관성모멘트로 인하여 모터의 고유특성을 직접적으로 측정할 수 없으며 전류파형으로부터 파라미터를 추측하여 정확도 높은 해석결과를 얻을 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 東芝小形モータ研究會, "實用モータ設計マニュアル", p209-251, 1992.
- [2] 안호진, 강규홍, 김규택 외 4인 "하이브리드 스테핑 모터의 치형상 변화에 따른 특성 해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p138-140, 2001.
- [3] Benjamin C. Kuo, "Theory and Application of Step Motors", West Publishing Co., 1974.