

4상과 5상 스텝모터의 모델링 및 구동방식에 따른 토크특성해석

최두성*° 백수현* 김용* 윤신용* 김철진** 임태빈***
 *동국대학교 **한라대학교 ***전자부품종합연구소

Modeling And Analysis of Torque Characteristics for Full-step of 4Phase And 5Phase Hybrid Type Step Motors

D.S.CHOI*° S.H.BAEK* Y.KIM* S.Y.YUN* C.J.KIM** T.B.LIM***
 *Dongguk University **Halla University ***KETI

Abstract - The hybrid step motor has found applications in a wide range of mechanical systems as a low cost, open-loop positioning device. The step motor provides good stiffness at rest against disturbing load influences, a combination of moderate speed fine resolution, high reliability and simplicity. In recent years, considerable competition has arisen over the technological issue of whether the device should be applied as a 2-Phase or 5-Phase machine. In this paper, to compare two systems, we have attempted to derive the mathematical model, and analysed operating detent torque with this model. The analysis shows that a fundamental component of the permeance distribution produces the average torque and that harmonic components produce the ripple torque.

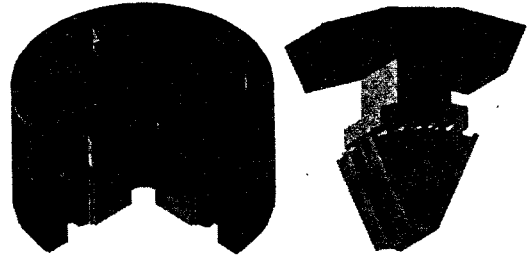
1. 서 론

스텝모터는 현재 OA기기를 비롯하여 각종 FA기계동 컴퓨터 제어화된 기구부의 뼈대를 수 없는 모터가 되었다. 다른 전기기계들과는 달리 스텝모터는 그 구조상 매우 작은 공극(0.02~0.05mm)을 갖기 때문에 설계나 특성 해석시 자기포화현상에 따르는 비선형계산이 반드시 필요하다. 또한 스텝모터의 회전자와 고정자는 모두 치를 가지며 치의 형상과 치 피치의 비율이 모터의 토크특성에 미치는 영향이 매우 크다. 본 논문에서는 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터에 대하여 각각 치의 경계에 있어서의 자계해석을 통해 고조파를 포함하는 퍼미언스가 모터의 토크특성에 미치는 영향을 고찰하고 이를 검증하기 위해 두 모터의 스텝응답을 얻어 각각을 비교 분석하고자 한다.

2. 모터의 구조

4상과 5상모터의 고정자 구조와 치 배열의 차이에서 기인하는 토크특성을 해석하기 위해 먼저 두 스텝모터에 대한 고정자 치와 회전자 치 사이의 관계를 고찰함으로써 공극퍼미언스 모델을 구현하고, 자기회로를 해석함으로써 모터의 토크를 수식적으로 도출할 수 있다.

그림 1에 4상모터 해석모델의 외관과 고정자 극편과 회전자의 경계를 나타낸다. 회전자는 50개의 치로 구성되며, 고정자는 4상 각각 8개와 10개의 고정자 극편을 갖고 있다. 또한 그 극편에 각각 5개, 4개의 치를 갖는 구조로 되어 있다. 축을 중심으로 마주하고 있는 극편 쌍의 극면은 전자기적으로 하나의 상을 형성하도록 동일한 공극위상으로 치를 두고 있다. 이러한 EM위상의 수는 위상정수 k로 나타낸다. 또한 위상당 치의 수 r는



(a) 4상 스텝모터 (b) 고정자극편과 회전자

그림1. 하이브리드형 스텝모터의 구조

연합된 극면에 존재하는 치의 합이 된다. 4상 스텝모터와 5상 스텝모터에 있어서 r는 상대적으로 10과 8이다. 그러므로 5상모터는 4상모터에 비해 더 좁은 극면을 갖는다. 고정자 내에서 회전자를 회전시키면 극면에 있는 치는 공극 위상의 증가분 δ만큼 위상이 이동한다.

$$\delta = \frac{2\pi}{k} \text{ radians} \quad (1)$$

이제 우리는 회전자의 위치에 따른 모터 변수의 변화를 고찰하기 위해 치 경계면 상의 공극위상 θ를 정의할 필요가 있다. 회전자의 치가 극면에서 정확히 치 대 치로 배열되어 있다면 θ=0이 된다. 물론 이러한 배열은 50개의 회전자 치일 경우 발생된다. 이때 회전자의 기계적 위치 θ,은 $\theta_r = \frac{\theta}{50}$ 로 정의된다. 그러므로 회전자 N극 스택의 x상 극면에 대한 공극위상은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\theta_{xN} = \theta + x\delta \quad (2)$$

여기서 x는 위상지수이며 $x=0, 1, \dots, k-1$ 이다. 그리고, 회전자의 N극 스택으로부터 x상의 r치로 공극을 통해 흐르는 자속은 식(3)과 같다.

$$\phi_{xN} \text{ (weber)} \quad (3)$$

회전자 S극 스택의 치들이 N극 스택의 치와 치간격의 반 피치만큼씩 어긋나 있는 점에 주목해야한다. 이것은 극면상에 또다른 공극 경계면을 부여한다. 식(2)의 우변에 치간격의 반피치에 해당하는 π(radians)를 더함으로써 우리는 회전자 S극 스택에 대한 공극의 위상은 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_{xS} = \theta + x\delta + \pi \quad (4)$$

또한 S극 스택에서 x상의 극면을 통과하는 자속은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{xS} \text{ weber} \quad (5)$$

3. 모터 동작 Detent의 수학적 모델

고정자 극면에 감긴 권선에 흐르는 위상이 ψ 인 여자 전류에 의해 x 상에서 발생하는 기자력은 식(6)과 같이 표현된다.

$$F_x(\psi) = NI \cos(\psi - x\delta) \quad (6)$$

전기적위상은 모터가 일정한 속도로 회전하는 경우 식(7)과 같이 표현된다.

$$\psi(t) = \omega t = 2\pi f t \quad (7)$$

모터는 회전자로 하여금 공극의 위상이 전기적위상과 같게 되도록 토크를 발생하게 된다. 이것을 동작 Detent 토크라 하여 $T(\theta, \psi)$ 로 표시하며 이것은 고정자 권선에 흐르는 전류의 위상 ψ 가 변화함에 따라 동작 Detent가 이동하고 형태가 변형된다. 이러한 형상의 변화는 토크 맥동과 주기적인 오차를 발생하는 원인이 된다. 따라서 스텝모터에 있어서 이런 요인들을 제거하는 것이 설계상의 주안점이 되고 있다. 동작 Detent를 해석하기 위해 본 논문에서는 선형적인 모델을 채택하였으며 제시된 공극퍼미언스 모델은 강자성체 철심이 그 B-H특성곡선의 선형영역에서 동작하는 것을 전제로 하였다. 회전자 N극 스택의 x 상에서 발생하는 토크는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_x(\theta) = -\frac{\partial W_x(\phi_x, \theta)}{\partial \theta} \quad (8)$$

W_x : 공극에서의 에너지
여기서 공극에너지 W_x 는 식(9)와 같다.

$$W_x = \frac{\phi_x^2}{2P_x} \quad (9)$$

P_x : x 상의 공극 퍼미언스

여기서 P_x 는 치의 형상에 의존할 것이다. ϕ_x 가 일정한 경우 $\theta_r = \frac{\theta}{50}$ 임을 고려하여 식(9)를 식(8)에 대입하여 풀면 식(10)과 같이 표현된다.

$$T_x(\theta) = 25 \frac{\phi_x^2}{P_x^2} \cdot \frac{\partial P_x}{\partial \theta} \quad (10)$$

식(10)은 모터의 전체 토크 식을 도출하는데 기준이 된다. 식(10)을 풀기 위해서는 그림 2와 같이 U_x 와 $P_x(\theta)$ 로 표현되는 자기회로 모델의 해석이 필요하다.

$\phi_x = U_x P_x$ 임을 고려한 토크 식(10)은 식(11)과 같이 표현된다.

$$T_x(\theta) = 25 U_x^2 \cdot \frac{\partial P_x}{\partial \theta} \quad (11)$$

그림 2에서 회전자 N극 스택에서의 공극퍼미언스 $P_x(\theta)$ 는 식(12)와 같이 표현된다.

$$P_x(\theta) = r \sum_{h=0}^{\infty} P_h \cos(h\theta + hx\delta) \quad (12)$$

P_h : h 차 고조파 퍼미언스

r : 위상당 치의 수

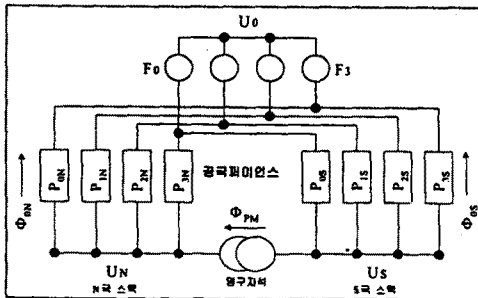


그림2. 4상모터의 등가 자기회로

또한 공극의 퍼미언스는 그림3에 보이는 것처럼 고정자 치와 회전자 치의 경계면에서 Flux tube에 의하여 결정된다. 그림3의 치 피치에 대한 고정자 치폭과 회전자 치폭의 비율에 따라 달라지기도 하는데 본 논문에서는 $b_H/(b_H + b_N) = 0.6$, $b_H/(b_H + b_N) = 0.3$ 의 치 구조를 채택하고 있다.

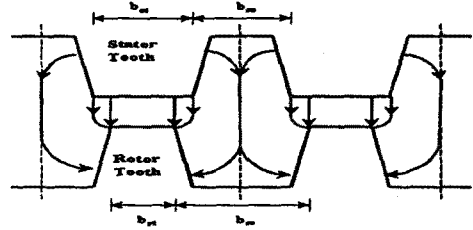


그림3. 모터 공극의 치경계면

그림2의 자기회로모델에서 회전자 N극 스택에 대하여 절점방정식을 적용하면

$$\phi_{PM} = \sum_{x=1}^N (U_x + F_x(\psi)) P_x \quad (13)$$

식(13)으로 되며 N극과 S극 스택 공극에서의 자기 포텐셜을 구하여 식(11)에 대입하면 모터 전체의 발생 토크는 식(14)와 같다.

$$T(\theta, \psi) = \sum_{x=1}^N (T_{xN} + T_{xS}) \\ = 25 \sum_{x=1}^N \left[\left| \frac{\phi_{PM} - \sum_{x=1}^N F_x(\psi) P_x(\theta)}{\sum_{x=1}^N P_x(\theta)} + F_x(\psi) \right|^2 \frac{\partial P_x(\theta)}{\partial \theta} \right. \\ \left. + \left| \frac{-\phi_{PM} - \sum_{x=1}^N F_x(\psi) P_x(\theta + \pi)}{\sum_{x=1}^N P_x(\theta + \pi)} + F_x(\psi) \right|^2 \frac{\partial P_x(\theta + \pi)}{\partial \theta} \right] \quad (14)$$

4. 시뮬레이션 결과

이상에서 살펴 본 바와 같이 하이브리드형 스텝 모터의 토크는 고조파를 포함하는 퍼미언스의 영향을 받고 있다. 본 논문에서는 유한요소법 비선형계산 패키지인 Maxwell 3D Simulator를 사용하여 표 1에서 보이는 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터에 대해 공극에서의 자계를 해석하였다.

표1. 4상과 5상 모터의 치수

	4상 모터	5상 모터
회전자 반경	21.5325mm	21.5325mm
회전자 치의 수	50	50
고정자 내경(외경)	21.45(40.25)mm	21.45(40.25)mm
고정자 치의 수	40	40
공극의 길이	0.0675mm	0.0675mm
영구자석 재질	AlNiCo5	AlNiCo5
영구자석 반경	17.3mm	17.3mm
영구자석 폭	10mm	10mm
기자력	168AT	168AT
한 극당 치의 수	10	8

그림4는 4상모터와 5상모터의 해석 모델과 각각에 대하여 정자계영역에서 해석한 모터 표면에서의 자속밀도를 나타낸다.

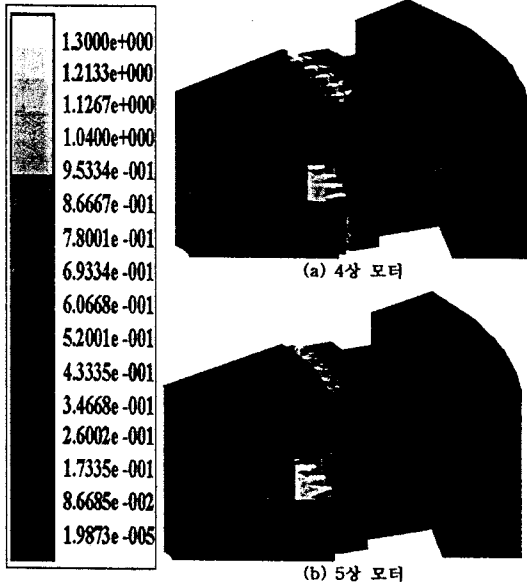
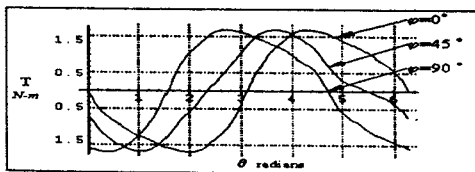


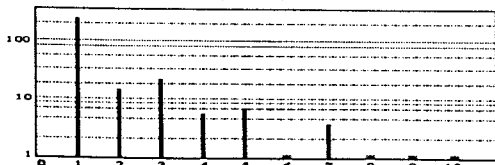
그림 4. 스텝모터의 해석모델 및 자속밀도 분포

4상모터의 동작 Detent 토크의 파형은 그림5에 나타난 것이다. 그래프의 수평축은 회전자의 기계적 변위를 나타내며, 수직축은 동작 Detent값을 나타낸다. 만약 회전자 자유롭게 움직이고 마찰이나 외부토크에 영향을 받고 있지 않다면, 그림5-(a)의 Detent파형은 수평축을 지나는 점에서 평행이 될 것이다. 이 그래프에서 전기적 위상 ψ 의 값은 각각 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 전기적 위상이 변화하면 Detent의 파형이 왜곡되고 있다. 이러한 요인은 스텝모터의 실제적인 구동 시 전기적 위상이 균일한 증분으로 진행하게 되면 회전자는 주기적인 위치오차를 갖도록 만든다. 그림5-(a)는 파형에서 나타난 고조파 성분을 해석하기 위해 FFT변환을 적용한 결과 동작 Detent의 스펙트럼은 그림5-(b)와 같이 나타난다. 그림에서 수직축은 Detent의 log값이다.

또한 5상 모터에 대하여 해석과정을 진행한 결과로서 5상 모터의 동작 Detent의 스펙트럼을 그림 (c)에 보이고 있다. 이 그림에서 기본파와 제2고조파 성분의 크기가 4상과 일치하는 것으로부터 두 모델에서 발생하는 유효토크는 동일하다는 것을 알 수 있다. 하지만 4상에서 보이던 제3~제8고조파 성분은 나타나지 않고 있다. 이것으로 5상 모터가 회전자의 주기적인 위치오차나 토크맥동이 4상 모터에 비하여 저감된다는 사실을 알 수 있다.



(a) 4상 모터의 동작 Detent



(b) 4상 모터의 고조파 스펙트럼

(c) 5상 모터의 고조파 스펙트럼

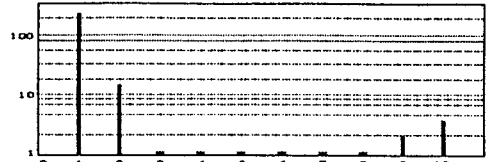


그림 5. 모터의 동작 Detent 파형 및 고조파스펙트럼

이상에서 살펴본 바와 같이 하이브리드형 스텝모터에 있어서 공극의 퍼미언스에 포함된 고조파성분이 모터의 토크특성에 미치는 영향을 검증하기 위해 시스템의 모델링, 시뮬레이팅, 해석을 위한 소프트웨어 패키지인 SIMULINK를 사용하여 4상과 5상 모터의 스텝응답을 해석하였다. 그 해석결과를 그림6에 보이고 있다.

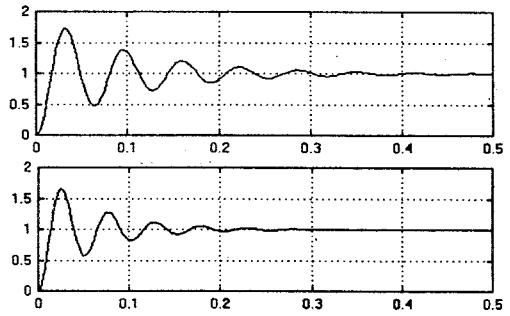


그림 6. 두 시스템의 스텝응답

5. 결 론

하이브리드형 스텝모터는 영구자석에 의해 자화된 회전자의 치를 고정자 극면에 감겨진 권선에 미리 설정된 다양한 조합과 순서로 전류를 흘려 자화된 고정자 치와 배열시킴으로써 회전력을 얻는다. 또한 회전자는 공극의 기자력과 외부에서 작용된 회전력 사이에서 평형을 찾는데 이 회전력은 회전자를 이동시킨 변위의 함수에 대해서 반환토크를 발생한다. 본 연구에서 5상 스텝모터는 동일한 NI값에 대해 4상 스텝모터와 같은 크기의 Detent 토크를 발생한다. 또한 5상 모터는 토크맥동과 주기적인 오차를 야기시키는 고조파성분이 4상에서보다 훨씬 작다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 5상 하이브리드형 스텝모터는 정밀한 위치제어나 부드러운 동작을 요구하는 시스템에 적합할 것이다. 또한 이를 확인하기 위해 본 논문에서는 동적 시스템해석을 위한 소프트웨어 패키지인 SIMULINK를 사용하여 4상과 5상모터의 스텝응답을 해석한 결과 5상의 경우 4상보다 응답속도가 빠르고 맥동이 적은 것을 알 수 있었다. 추후 스텝모터의 구동방식(full step, half step, microstep)에 따른 실제의 두 모델에 대한 동작 Detent 토크의 타당성을 검증하고, 이상의 모델에 대한 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 일반적인 시스템에 사용되고 있는 실제 모터에 대해 실험함으로써 해석결과의 타당성을 입증하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] B.C.Kuo and W.R.Coon, "Permeance model of step motor tooth structures and their effects on harmonic torques and step accuracy", IMCSD, pp.411~418, 1985
- [2] Jack Nordquist, "Technological Review of 5-Phase and 4-Phase Step Motors", Intelligent Motion, October 1993 Proceedings, pp.259~274, 1993
- [3] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", pp.25~99, 1992
- [4] Benjamin C. Kuo, "Theory and Applications of Step Motors", pp.120~153, 1974