

하이브리드형 스텝모터의 모델링 및 디텐트 토크 고조파 분석

(Modeling and Detent Torque Harmonic Analysis of Hybrid Type Step Motor)

윤신용* · 백수현 · 김 용 · 김철진

(Shin - Yong Yoon · Soo - Hyun Baek · Kim Yong · Cheri - Jin Kim)

요 약

본 논문은 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터의 모델링, 특성해석 및 디텐트 토크에 대한 고조파 저감을 대상으로 연구하였다. 이를 위하여 기계적인 모델링을 도출하였으며 자계해석을 위해서 퍼미언스법을 이용하였다. 이러한 해석 결과 본 모델에 대한 디텐트 토크를 얻을 수 있었다. 또한 두 모델 구조에 대한 상차의 특성해석 비교를 통하여, 본 모델에 대한 디텐트 토크를 유도해 낼 수 있었다. 이때 5상 스텝모터는 4상 스텝모터에 비하여 디텐트 토크의 감소와 스텝응답이 개선됨을 알 수 있었다. 해석결과 퍼미언스분포의 크기는 평균토크의 발생에 영향을 미치며, 고조파성분의 크기가 토크 리플의 크기를 발생함을 알 수 있었다.

Abstract

This paper did the study target for modeling, characteristics analysis and harmonic reduce with the detent torque of a 4 phase and 5 phase hybrid type step motor. For this, it was attempted to derive the mathematical modeling and used the permeance method for flux field analysis. Through this analysis result, this paper acquired the detent torque of this model. To compare the characteristics analysis of phase difference with two motors structure, it have obtained to derive the operating detent torque with this model. Here, 5 phase motor has known the harmonic reduce of detent torque compare with 4 phase motor. Also, that has showed to improved the step response. The analysis result has represent the effect that a fundamental component of the permeance distribution produces the average torque and that harmonic components produce the ripple torque.

Key Words : Detent torque, step motor, permeance, modeling, step response, harmonics spectrum.

1. 서 론

스텝 모터는 현재 프린터, 플로터, 컴퓨터 주변기기, 공정기기 및 서보기기 등에서 유용하게 사용되고 있

* 주저자 : 동국대학교 산업기술연구원 전임연구원
Tel : 02-2260-3347, Fax : 02-2260-3347

E-mail : yshy@dongguk.edu
접수일자 : 2002년 4월 22일
1차심사 : 2002년 4월 26일
심사완료 : 2002년 8월 24일

다. 스텝 모터는 크게 릴럭턴스형 모터, 영구자석형 스텝모터 및 하이브리드형 스텝모터로 분류한다.

이중 하이브리드형 스텝 모터는 고정밀, 고토크 모터로서 많이 사용되고 있다. 정밀 소형모터의 설계기술은 대부분 실험적 데이터에 기반을 두어왔다. 따라서 제조공정에 있어서 많은 비용, 경험, 그리고 시간을 필요로 한다. 최근 고성능 컴퓨터가 등장함에 따라 많은 기술자들이 전기기계를 해석, 설계하는 데에 수

학적 방법을 채택하고 있다. 다른 전기기계들과는 달리 그 구조상 스텝모터는 매우 작은 공극을 갖으며, 고정자 치와 회전자 치의 형상은 토크특성에 커다란 영향을 준다[1]-[2]. 스텝모터는 펄스의 입력에 따라 모터의 치 구조에 의존해 오픈루프 제어가 가능하므로 모터의 기계적인 구조설계가 매우 중요하다. 영구자석형 모터는 영구자석의 자속에 의해 무어자시 디텐트 토크(detent torque)를 발생한다. 따라서 위치정밀도 및 토크 특성개선을 위해서 적합한 치 구조의 설계와 영구자석에 대한 디텐트 토크의 해석이 요구된다.

하이브리드형 스텝핑 모터의 고정자와 회전자는 모두 치를 가지며 치의 형상과 치 피치의 비율이 모터의 위치 및 토크특성에 큰 영향을 미치며, 다른 전기기계들과는 달리 스텝핑 모터는 그 구조상 매우 작은 공극을 갖기 때문에 설계나 특성 해석에 자기포화 현상에 따르는 비선형 계산이 필요하다[3]-[4]. 본 논문에서는 4상과 5상 하이브리드형 스텝 모터에 대하여 각각 치 경계부분의 자계해석을 통해 고조파를 포함하는 퍼미언스가 모터의 토크특성에 미치는 영향을 고찰하고 이를 검증하기 위해 두 모터의 스텝응답을 비교, 분석하고자 한다.

또한 스텝모터는 치 끝에서의 자속밀도가 철심재료가 갖고 있는 자속밀도의 포화점 부근에서 동작되고 있기 때문에 스텝모터의 설계시 자계해석과 비선형 계산이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 비선형을 고려한 퍼미언스법을 이용하여 모터내부의 형상을 모델링하고, 유한요소법 패키지인 Maxwell 3D를 사용하여 비선형 특성을 고려한 정확한 자계해석을 함으로써 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터를 안정된 디텐트 토크 해석하고자 하였다.

2. 모터의 동작원리 및 구조

하이브리드형 스텝모터는 회전자의 영구자석과 치에 의해 자화된 자속과 고정자 극면에 감겨진 권선 배열에 순서대로 전류를 흘려 자화된 고정자 치와 배열시킴으로써 자기저항의 변화로 이동할 수 있다. 하이브리드형 스텝모터는 영구자석과 릴럭턴스의 치를 사용하므로 큰 홀딩 토크를 발생하지만 이동시 영구

자석에 의한 디텐트 토크를 발생할 수 있다. 입력 펄스에 따라 이동시 치 피치에 비례한 이동을 하므로 위치정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이를 고려하는 것이 중요하다. 또한 스텝모터는 치피치, 치형상 및 극수에 의해서 위치 정밀도에 영구자석과 더불어 큰 영향을 미침으로 이를 고려하여야 한다[5]-[7].

4상과 5상 모터의 고정자 구조와 치 배열의 차이에서 기인하는 서로 다른 토크특성을 비교하기 위해 먼저 두 스텝모터에 대한 고정자 치와 회전자 치 사이의 관계를 고찰함으로써 공극퍼미언스 모델을 구현하고, 자기회로의 해를 얻음으로써 모터의 토크 특성을 도출할 수 있다.

2.1 치의 경계면

그림 1의 (a), (b)는 각각 4상 모터와 5상 모터의 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 모델에서 단지 고정자의 구조만이 서로 다르다.

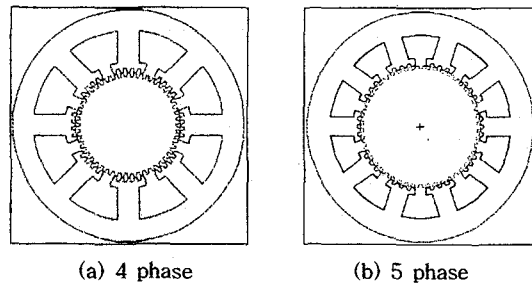


그림 1. 하이브리드형 스텝모터의 구조
Fig. 1. Structure of hybrid type step motor

회전자 치와 고정자 치의 배열을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 그림 2에 하나의 고정자 극면에 있는 치와 회전자 치의 경계면을 나타내었다. 전 경계면에 있어 회전자가 7.2° 이동할 때 공극의 위상은 360° 변화한다. 즉, 임의의 한 회전자 치가 고정자 치와 일렬로 배열된 상태에서 회전자가 7.2° 이동하게 되면 회전자 치는 또다른 고정자 치와 일직선으로 위치한다.

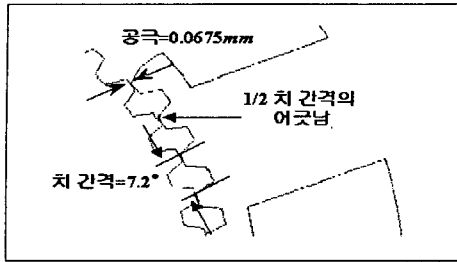


그림 2. 고정자와 회전자 치의 경계면
Fig. 2. Plate of stator and rotor teeth

축을 중심으로 마주하고 있는 극편 쌍의 극면은 전자기적으로 하나의 상을 형성하도록 동일한 공극상에 치를 두고 있다. 이러한 전자석 위상의 수는 위상정수 k 로 나타낸다. 또한 위상당 치의 수 τ 는 연합된 극면에 존재하는 치의 합이 된다. 여기서 4상 스텝모터와 5상 스텝모터에 있어서 τ 는 8 과 10 이다. 그러므로 그림 1에 보이듯이 5상 모터는 4상 모터에 비해 더 좁은 극면을 갖는다. 고정자 내에서 회전자를 회전시키면 극면에 있는 치는 공극 위상의 증가분 δ 만큼 위상이 이동한다.

$$\delta = \frac{2\pi}{k} \text{ [rad]} \quad (1)$$

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

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

여기서 x 는 위상지수이며 $x=0, 1, \dots, k-1$ 이다. 또한 회전자의 N극 스택으로부터 x 상의 τ 치로 공극을 통해 흐르는 자속은 식 (3)과 같다.

$$\phi_{xN} \text{ [wb]} \quad (3)$$

2.2 회전자의 구조

지금까지는 회전자의 N극 스택에 대해서 고려하였지만 모터의 완전한 모델링을 위해 측면으로 바라본 회전자의 구조를 고려해야만 한다. 그림 3에서 보듯이 회전자는 두 개의 분할된 스택과 그 사이에 일정한 양의 자속 ϕ_{PM} 을 발생하는 영구자석으로 구성되어 있다. ϕ_{PM} 은 축방향으로 N극 스택에서 공극을 통해 고정자 극편으로 흐르며, 방사 방향으로는 회전자로부터 고정자 극편으로 치의 경계면을 통해 흐르고 있다.

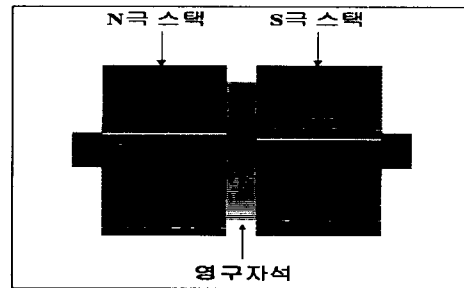


그림 3. 하이브리드형 스텝모터의 회전자 구조
Fig. 3. Rotor structure of hybrid type step motor

그림 3에서 회전자 S극 스택의 치들이 N극 스택의 치와 치간격의 반 피치 만큼씩 어긋나 있는 점에 주목해야 한다. 이것은 극면상에 또 다른 공극 경계면을 부여한다. 이때 식 (2)의 우변에 치간격의 반피치에 해당하는 π (radians)를 더함으로써 회전자 S극 스택에 대한 공극의 위상은 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

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

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

$$\phi_{xS} \text{ [wb]} \quad (5)$$

3. 수학적 모델 및 동작 토크

고정자 극면에 감긴 권선에 흐르는 위상이 ψ 인 여

자전류에 의해 x 상에서 발생하는 기자력은 식 (6)과 같이 표현된다.

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

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

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

여기서 f 는 구동전류의 주파수이다. 모터는 회전자로 하여금 공극의 위상이 전기적 위상과 같게 되도록 토크를 발생하게 된다. 이것을 동작 디텐트 토크라 하여 $T(\theta, \psi)$ 로 표시하며 이것은 모터에 전류가 흐르지 않을 경우의 무여자 디텐트와 구별된다. 왜냐하면 고정자 권선에 흐르는 전류의 위상 ψ 가 변화함에 따라 동작 디텐트가 이동하고 형태가 변형되기 때문이다. 이러한 형상의 변화는 토크맥동과 주기적인 오차를 발생하는 원인이 된다. 따라서 스텝모터에 있어서 이런 요인들을 제거하는 것이 설계상의 주안점이 되고 있다. 동작 디텐트를 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.

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

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

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

여기서, P_x : x 상의 공극 퍼미언스

ϕ_x 가 일정한 경우 $\theta_r = \frac{\theta}{50}$ 임을 고려하여 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 풀면 식 (10)과 같이 표현

된다.

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

식 (10)은 모터의 전체 토크 식을 도출하는데 기준이 된다. 식 (10)을 풀기 위해서는 그림 4와 같이 U_x 와 $P_x(\theta)$ 로 표현되는 자기회로 모델의 해석이 필요하며 $\phi_x = U_x P_x$ 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 4에서 회전자 N극 스택에서의 공극퍼미언스 $P_x(\theta)$ 는 식 (12)와 같이 표현된다.

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

여기서, P_h : h 차 고조파 퍼미언스, τ : 위상당 치의 수

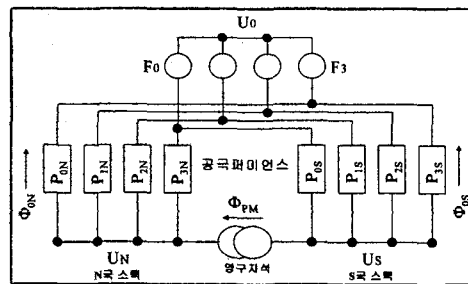


그림 4. 4상 모터의 등가 자기회로
Fig. 4. Equivalent circuit of 4 phase motor

그림 4의 4상 스텝모터 등가회로에서 1상을 더 첨가하면 5상 스텝모터 등가회로가 된다. 여기서 동작 디텐트에 가장 크게 영향을 미치는 것이 공극에서의 퍼미언스 값이므로 공극에 대한 해석은 매우 중요하다. 또한 공극의 퍼미언스는 그림 5에 보이는 것처럼 고정자 치와 회전자 치의 경계면의 자속경로에 의하

하이브리드형 스텝모터의 모델링 및 디텐트 토크 고조파 분석

여 결정된다. 그림 5의 공극 퍼미언스는 치 피치에 대한 고정자 치폭과 회전자 치폭의 비율에 따라 달라지기도 하는데 여기서는 $b_{st}/(b_{st} + b_{ss})=0.6$ $b_{rt}/(b_{rt} + b_{rs})=0.3$ 의 치 구조를 채택하고 있다.

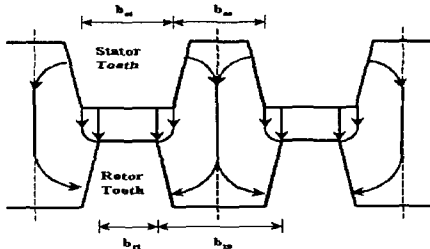


그림 5. 공극의 치 경계면
Fig. 5. Teeth boundary plate of airgap

그림 5의 자기회로 모델에서 회전자 N극 스택에 대하여 절점방정식을 적용하면 다음 식과 같다.

$$\phi_{PM} = \sum_{x=0}^{k-1} (U_n + F_x(\Psi)) P_x \quad (13)$$

식 (13)으로 되며 N극과 S극 스택 공극에서의 자기 포텐셜은 각각 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{xN} = \frac{\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{k-1} F_x(\Psi) P_x(\theta)}{\sum_{x=0}^{k-1} P_x(\theta)} + F_x(\Psi) \quad (14)$$

$$U_{xS} = \frac{-\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{k-1} F_x(\Psi) P_x(\theta + \pi)}{\sum_{x=0}^{k-1} P_x(\theta + \pi)} + F_x(\Psi) \quad (15)$$

따라서, 모터 전체의 발생 토크는 식 (16)과 같다.

$$T(\theta, \Psi) = \sum_{x=0}^{k-1} (T_{xN} + T_{xS})$$

$$= 25 \sum_{x=0}^{k-1} \left\{ \left[\frac{\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{k-1} F_x(\Psi) P_x(\theta)}{\sum_{x=0}^{k-1} P_x(\theta)} + F_x(\Psi) \right]^2 \frac{\partial P_x(\theta)}{\partial \theta} \right. \\ \left. + \left[\frac{-\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{k-1} F_x(\Psi) P_x(\theta + \pi)}{\sum_{x=0}^{k-1} P_x(\theta + \pi)} + F_x(\Psi) \right]^2 \frac{\partial P_x(\theta + \pi)}{\partial \theta} \right\} \quad (16)$$

4. 해석 결과

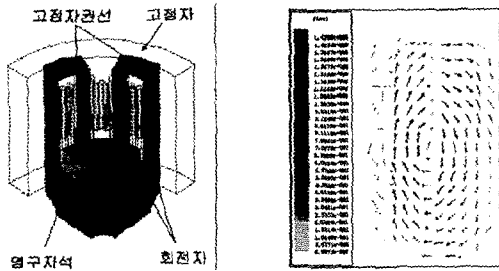
이상에서 살펴본 이론을 바탕으로 본 논문에서는 회전자, 영구자석, 회전자와 고정자의 치 형상, 그리고 고정자권선의 기자력이 동일한 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터에 대하여 동작 디텐트 토크를 해석하기 위해 유한요소법 비선형 계산 소프트웨어인 Maxwell 3D를 사용했다. 해석 모델의 기본적인 사양은 표1과 같이 나타내었다.

표 1. 4상과 5상 모터의 사양
Table 1. Specifications of 4 phase and 5 phase motor

품명 [단위]	4상 모터	5상 모터
회전자 반경[mm]	22.5	22.5
회전자폭(스택당)[mm]	25	25
회전자 치의 수	50	50
고정자 내경(외경)[mm]	21.45(40.25)	21.45(40.25)
고정자 폭[mm]	61	61
고정자 치의 수	40	40
공극의 길이[mm]	0.0675	0.0675
영구자석	AlNiCo5	AlNiCo5
영구자석 반경[mm]	17.3	17.3
영구자석 폭[mm]	11	11
기자력 [AT]	168	168
상당 치의 수	10	8

그림 6 (a)는 축을 중심으로 1/4을 절단한 하이브리드형 스텝모터의 내부구조를 나타내고 있으며 그림 6 (b)는 유한요소법의 정자계 영역에서 그림 6(a)를 해

석한 모터 표면에서의 자속분포 크기와 방향을 나타낸다.



(a) 스텝 모터의 내관 (b) 자속분포도
(a) Reflection of step motor (b) Flux distribution

그림 6. 하이브리드형 스텝모터의 외관 및 자속분포
Fig. 6. Flux distribution of hybrid type step motor

그림 7은 4상과 5상 스텝 모터의 해석모델과 정자계 영역에서 해석한 모터 표면에서의 자속밀도를 나타낸다.

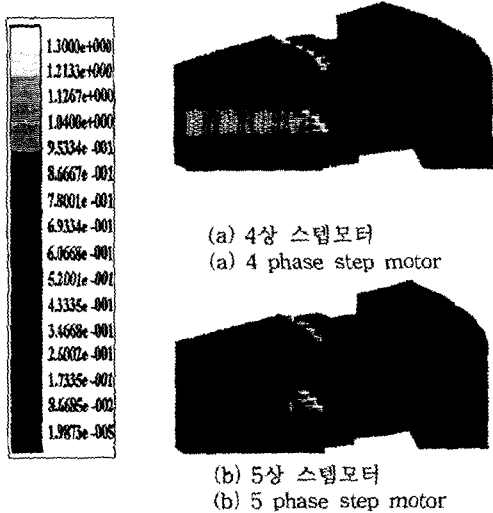
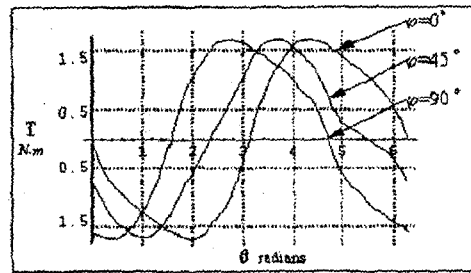


그림 7. 스텝 모터 해석모델의 자속밀도 분포
Fig. 7. Flux density distribution of step motor analysis model

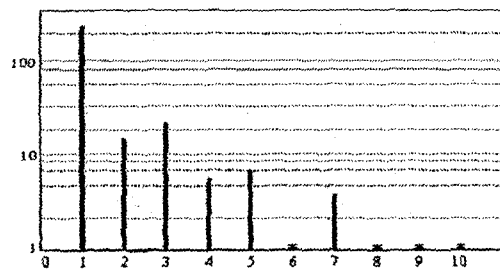
그림 8(a)는 해석된 4상 모터의 디텐트 토크 결과 나타내며, 여기서 수평축은 회전자의 기계적 변위, 직축은 디텐트 토크를 의미한다. 만약 회전자가 자

유롭게 움직이고 마찰이나 외부 토크에 영향을 받지 않다면 그림 8(a)의 디텐트 파형은 변위에 대해서 일정하게 될 것이다. 그러나 이때 마찰, 비선형 자기저항 및 외부 토크에 영향을 받고 있는 상태에서 전기적 위상이 변화하면 디텐트 토크의 파형이 왜곡된다. 여기서 전기적 위상 ψ 의 값은 각각 0° , 45° , 90° 이다. 이러한 요인은 스텝 모터의 실제 구동시 전기적 위상이 균일한 증분으로 진행하게 될 때 회전자는 주기적인 위치오차를 갖게 된다.

그림 8(a)의 파형에서 나타난 고조파 성분을 해석하기 위해 주파수분석기(FFT변환)를 적용한 결과 동작 디텐트 토크 스펙트럼은 그림 8(b)와 같이 나타난다. 여기서 기본파 이외의 제 2~7고조파 성분이 많이 포함됨을 알 수 있으며 이는 정 토오크의 왜형인 디텐트 토크를 발생하게 되는 원인 된다. 따라서 이를 억제하는 것이 매우 중요하다.



(a) 4상 스텝모터의 동작 디텐트토크
(a) Movement detent torque of 4 phase step motor



(b) 디텐트 토크의 고조파 스펙트럼
(b) Harmonic spectrum of detent torque

그림 8. 4상 스텝모터의 동작 디텐트토크 해석결과
Fig. 8. Movement detent torque analysis result of 4 phase step motor

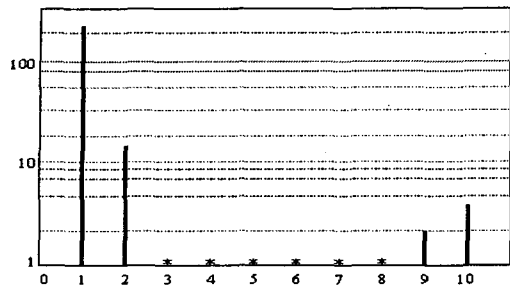
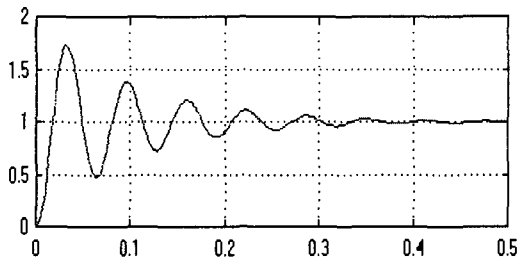
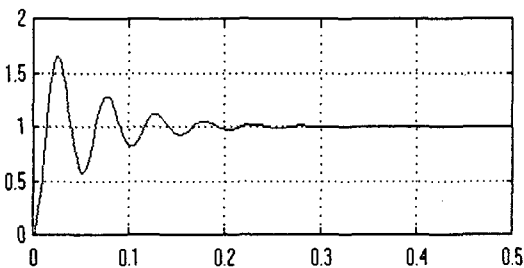


그림 9. 5상 스텝모터의 동작 디텐트토크 고조파 스펙트럼
 Fig. 9. Harmonic spectrum for movement detent torque of 5 phase step motor



(a) 4상 스텝 모터
 (a) 4 phase step motor



(b) 5상 스텝 모터
 (b) 5 phase step motor

그림 10. 4상과 5상 스텝모터의 스텝응답
 Fig. 10. Step response of 4 phase and 5 phase step motor

그림 7 (a)에 보인 4상 스텝모터의 고정자를 5상 스텝모터의 고정자로 대체할 경우 5상 모터의 모델을 얻을 수 있다. 4상 스텝모터에서와 같이 5상 스텝모터에 대하여 해석과정을 진행한 결과 5상 스텝모터의

동작 디텐트토크 스펙트럼을 그림 9에 보이고 있다. 이 그림에서 기본파와 제 2고조파 성분의 크기가 4상과 일치하는 것으로부터 두 모델에서 발생하는 유효토크는 동일하다는 것을 알 수 있다. 하지만 4상에서 보이던 제 3~8고조파 성분은 나타나지 않고 있다. 이것으로 5상 스텝모터가 회전자의 주기적인 위치오차나 디텐트 토크가 4상 스텝모터에 비하여 상당히 저감된다는 사실을 알 수 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터의 공극 퍼미언스에 포함된 고조파 성분이 모터의 토크특성에 미치는 영향을 알 수 있었다. 따라서 4상보다는 5상을 제안함으로써 상수의 증가와 영구자석의 폭비감소 및 치피치의 세분화로 디텐트토크 감소와 정밀도를 개선할 수 있었습니다.

그림 10은 4상과 5상 모터의 스텝입력에 대한 응답 특성을 나타낸 것이다. 여기서 5상 모터는 4상 모터에 비해 빠른 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 하이브리드형 4상과 5상 스텝모터의 등가자기회로 모델링을 통하여 설계사양을 도출하였다. 또한 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터의 디텐트토크의 특성해석을 통하여 두 모터의 고조파 스펙트럼을 비교, 검토하였으며 이 결과 5상 스텝모터는 4상 스텝모터에 비해 형상구조를 변형함으로써 디텐트 토크가 개선됨을 알 수 있었다.

해석결과 5상 스텝모터는 맥동토크와 주기적인 오차를 야기 시키는 고조파 성분이 4상에서 보다 훨씬 작다는 사실을 알 수 있었다. 또한 4상과 5상 모터의 스텝응답을 비교 해석한 결과, 5상 모터가 4상 모터에 비해 빠르고 안정된 응답과 토크의 맥동이 적은 것을 알 수 있었다.

앞으로 5상 하이브리드형 스텝모터는 정밀한 위치제어나 부드러운 동작을 요구하는 고 토크 정밀 제어 시스템에 적합하게 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 특히, 고정밀 및 고토크용 모터로서 각종 고정밀 프린터, 플로터, X-Y 테이블 및 정보기기 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 여겨진다.

Reference

- [1] Nobuyuki Matsui, "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, NO. 5, pp.1176~1180, 1996.
- [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.
- [5] E. Kokornacayk, "Modelling of Detent Torque Permanent-Magnet Stepping Motors", Proc. of the Annual Symposium IMCSD, Urbana, Illinois, pp.1087-1090, 1985.
- [6] Toshiyasu Takura, "Magnetic Equivalent Circuit Representation of Stepping Motor using Boundary Element Method," Technical meeting on magnetics of IEE of Japan, 1987. pp.1056-1059.
- [7] Kuo. B. O, "Effect of tooth shapes on the position accuracy of step motors," proceedings of the Anaaul Symposium IMCSD, Urbana, Illinois, pp.149-158, 1983.

◇ 저자소개 ◇

윤 신 용 (尹信容)

1964년 9월 1일생. 1992년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1994년 동국대 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994년~1997년 전자 부품연구원 정밀기기제어팀 연구원. 1997년~현재 동 서울대학 전기과 겸임교수. 1999년~현재 동국대 산업 기술연구원 선임연구원.

백 수 현 (白壽鉉)

1949년 5월 2일생. 1972년 한양대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년~현재 동국대 전기공학과 교수. 대한전기학회 부회장(평의원). 1999년 현재 동국대 산업기술연구원 원장.

김 용 (金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년~1995년 대림 대학 제어계측과 교수. 1995년~현재 동국대 전기공학과 부교수.

김 철 진 (金澈珍)

한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1995 생산기술연구원, KETI 제어기 기 연구실장. 1995~현재 한라대학교 전기전자제어 공 학부 교수.