

구조적 오차를 갖는 하이브리드 스텝 모터의 토크 특성

허 옥 열*

* 인하대학교 전기과

김 용 하**

** 삼성전기주식회사

Torque analysis of hybrid step motor with structural errors

U. Y. Huh

Y. H. Kim

1. 서론

하이브리드 스텝 모터는 FDD, HDD 를 비롯한 계산기 주변장치의 구동 장치로 널리 이용되고 있으며 간단한 제어 장치로 정밀한 위치제어가 가능하다는 장점 때문에 그 응용 분야를 더욱 넓혀 가고 있다.

이러한 스텝 모터의 정밀도를 향상 시키기 위해서는 모터의 각 부위의 가공 정밀도를 더욱 향상 시켜야만 가능하다. 특히 최근 스텝 모터의 소형화, 박형화 추세에 따라 가공 정밀도 향상이 더욱 절실할 필요성 되고 있다.

하이브리드 스텝 모터와 같은 소형 정밀 모터에서 이를 설계 제작하는 과정에서 가공 기술의 부족과 높은 생산 단가로 인하여 모든 부분의 가공에 높은 정밀도를 유지하기는 어렵다.

그러므로 토크 특성에 영향을 많이 미치는 부위의 가공 정밀도를 향상 시킴으로써 생산 단가를 줄일 수 있다.

하이브리드 스텝 모터에서 구조상의 오차는 모터의 PERMEANCE를 변화시키고 PERMEANCE의 변화는 이와 직접적인 관련을 갖고 있는 토크를 변화시켜서 결국에는 스텝 모터의 가장 중요한 요소인 정확한 위치 제어를 할 수 없게 된다.

모터의 구조적 결함으로써 다음의 4가지에 대하여 살펴 보았다.

첫째 모터의 회전자가 완전한 원형이 되지 못하고 약간 찌그러진 타원이 된 경우이다.

둘째 하이브리드 스텝 모터는 2개의 STACK을 갖는 구조인데 이 둘 사이의 TEETH 어긋남이 TEETH쪽의 절반이 되지 못한 경우이다.

셋째 고정자의 극의 위치가 등 간격이 아닌 경우이다.

넷째 회전자의 축이 고정자 원의 중심에 있지 않고 어긋난 경우이다.

하이브리드 스텝 모터는 영구자석인 회전자와 고정자 코어가 자기적으로 비선형적인 특성을 가질 뿐만 578

아니라 다양한 구조를 갖고 있으므로 계산기 시뮬레이션 등을 통하여 이를 해석한다.

먼저 PERMEANCE 계산은 KUO, HUH(1)의 방법을 따라 구하였으며 영구 자석 회전자에 대한 해석은 KUO, CHEN(2)의 방법을 따랐고 고정자 코어에 대한 해석은 재질의 BH 곡선 자료를 이용하여 자기 회로 해석을 하였다.

이상의 과정을 통하여 구한 HOLDING 토크 값으로부터 정상인 때와 구조적인 오차가 있는 경우에 대한 토크의 최대치와 DETENT 위치를 서로 비교함으로써 오차에 대한 토크의 영향을 해석한다.

2. 구조적 오차에 따른 PERMEANCE의 변화

모터의 회전자 위치에 따른 PERMEANCE는 일반적으로 다음과 같이 FOURIER 함수로 표현 할 수 있다.

$$P(\theta) = \sum_{i=0}^{\infty} P_{gi} \cos(i\theta) \quad (1)$$

여기서 P(θ)는 PERMEANCE 이고 P_{gi}는 각 고조파에 대한 계수값이며 θ는 전기각이다. 전기각은 기계각과 다음의 관계가 있다.

$$\theta = N_r \cdot \theta_m \quad (2)$$

여기서 N_r은 회전자의 TEETH 수이다.

그러면 이러한 PERMEANCE 함수에 구조적인 오차에 따른 변화에 대하여 살펴 보자.

이때 여러가지 오차가 복합된 경우에 대한 고려는 하지 않았다.

(1) STACK 이 서로 비틀린 경우

하이브리드 스텝 모터의 각 STACK을 각각 STACK1과 STACK2로 정의하면 STACK1은 STACK2와 전기적으로 180 도의 위상차를 가져야 한다. 그러나 이러한 위상차가 θ_e(전기각)만큼 어긋났다고 할

때 각 STACK의 PERMEANCE는 다음과 같이 위상각의 변화를 갖게된다. 그러나 각 고조파의 계수값은 변화가 없다.

STACK1의 각상의 위상각은 다음과 같다.

$$\theta_{A1} = \theta \quad (3)$$

$$\theta_{B1} = \theta + \frac{\pi}{3} \quad (4)$$

$$\theta_{C1} = \theta + \frac{2\pi}{3} \quad (5)$$

$$\theta_{D1} = \theta + \frac{3\pi}{3} \quad (6)$$

또한 STACK2의 위상각은 위상각의 오차만큼 어긋나므로 다음과 같다.

$$\theta_{A2} = \theta + \theta_e \quad (7)$$

$$\theta_{B2} = \theta + \frac{\pi}{3} + \theta_e \quad (8)$$

$$\theta_{C2} = \theta + \frac{2\pi}{3} + \theta_e \quad (9)$$

$$\theta_{D2} = \theta + \frac{3\pi}{3} + \theta_e \quad (10)$$

그런데 하이브리드 스텝 모터의 자기회로를 고려할 때 각 상의 PERMEANCE는 각 STACK의 직렬연결이므로 다음과 같다.

$$P_j(\theta) = \frac{P_{j1}(\theta) \cdot P_{j2}(\theta)}{P_{j1}(\theta) + P_{j2}(\theta)} \quad (11)$$

$j = A, B, C, D$

(2) 회전자가 원이 아닌 경우

이때는 그림1과 같이 회전자가 완벽한 원이 되지 못하고 약간 찌그러진 경우로 고정자의 내부원이 완전한 원이 되지 못한 경우도 이에 해당된다. 이 경우 공극의 크기를 계산하는 과정에서 편이를 위하여 다음의 몇가지 가정을 한다.

- 1) 가장 작은 공극의 크기가 정상이라 가정한다.
- 2) 회전자가 완전한 타원이라 가정한다.
- 3) 공극이 그림 2와 같이 회전자의 위치에 따라 정현파로 변한다고 가정한다.
- 4) 1 개의 극 내에서 공극의 크기도 일정하다고 보며 이러한 공극의 크기는 극 중심의 공극과 같다고 한다. 이러한 경우에는 고정자의 각 극과 회전자와의 공극의 크기가 서로 다르며 이는 고정자의 위치에 대한 함수이다. 또한 회전자가 회전함에 따라 공극의 크기가 달라진다. 그러므로 회전하는 매순간마다 각상의 PERMEANCE를 계산하여야 한다.

회전자가 만큼 이동한 위치에 있을때 각 고정자 극과 회전자 사이의 공극의 크기는 다음과 같다.

$$\theta_i = \theta_m + \frac{2\pi}{P} (i-1) \quad (12)$$

$(i=1, 2, \dots, P)$

이때 $2\pi/P$ 는 각고정자 극이 이웃한 극과 이루는 사이각이다.

또한 각 상의 PERMEANCE는 해당되는 극들의 PERMEANCE의 합이다.

(3) 고정극의 사이각이 서로 다른 경우

그림 3과 같이 고정자 극이 등간격이 되지 못하고 고정자 극 사이각이 서로 다른 경우이다. 이때에는 고정자 TEETH와 회전자 TEETH 사이의 각이 일정치 않게 되어 PERMEANCE의 크기와 위상각 모두에 영향을 미치게 된다. 고정자 극의 각의 오차를 각각 $\Delta\theta_{ci} (i=1, 2, \dots, P)$ 라하면 A 상의 PERMEANCE는 다음과 같다.

$$P_A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} P_{gi} \sqrt{Q_i} \cos(i(\theta + \Delta\theta_{ci})) \quad (13)$$

$$Q_i = \left(\sum_{j=0}^{i-1} \cos(i\Delta\theta_{cj+1}) \right)^2 + \left(\sum_{j=0}^{i-1} \sin(i\Delta\theta_{cj+1}) \right)^2 \quad (14)$$

$$\Delta\theta_{ci} = \frac{1}{i} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=0}^{i-1} \sin(i\Delta\theta_{cj+1})}{\sum_{j=0}^{i-1} \cos(i\Delta\theta_{cj+1})} \right) \quad (15)$$

(4) 축의 중심이 일치되지 않을 경우

이는 회전자 축이 고정자의 중심에 있지 않고 뒤틀어진 경우이다. 이때에는 고정자 극과 회전자 사이의 공극이 고정자 극에 따라 달라진다. 이때에도 한고정자 극에 대한 공극의 크기는 극의 중심에서의 크기로 대표된다. 이러한 축의 불일치 정도를 쏠린 방향과 오차의 크기로 그림 4와같이 나타낸다. θ_g 는 오차에 대한 방향각을 나타내며 오차의 크기는 d 이다. 이는 공극의 크기를 변화시키므로 각 고정자 극과의 공극의 크기가 모두 다르다.

$$GAP = \frac{ID}{2} - (d \cos(\theta_i - \theta_g) + \sqrt{\left(\frac{ID}{2}\right)^2 - d^2 \sin^2(\theta_i - \theta_g)}) \quad (16)$$

여기서 ID 고정자의 내부원 지름이다.

이때에도 각극과의 PERMEANCE를 계산하여 각상의 값을 계산해야 한다.

이상과 같이 스텝 모터가 네가지 형태의 구조적인 오차를 갖는 경우에 이들이 PERMEANCE 함수에 미치는 영향을 살펴 보았다.

3. 하이브리드 스텝 모터의 토크

하이브리드 스텝 모터는 V.R 형 스텝 모터의 특성과 P.M 형 스텝 모터의 특성을 동시에 갖고 있다. 그러므로 하이브리드 P.M 스텝 모터의 토크는 다음과 같은 세가지 형태로 구분할 수 있다.

- 1) 권선에서의 MMF 만에 의한 토크 (V.R TYPE TORQUE)
 - 2) 영구 자석 만에 의한 토크 (DETENT TORQUE)
 - 3) 영구 자석과 권선의 MMF 상호작용에 의한 토크
- 이들 중 세번째의 영구 자석과 권선의 MMF와의 상호작용에 의한 토크가 하이브리드 P.M 스텝

모터의 발생 토크 토오크 중에서 가장 큰 부분을 차지한다.

잘 알려진 바와 같이 모터의 토오크는 모터의 COENERGY의 위치에 대한 편미분 형태로 표현된다.

$$T = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \quad (17)$$

여기서 W' 는 COENERGY 이며 다음과 같이 자속 전류에 대한 적분 형태로 표현된다.

$$W' = \int_0^I \phi di \quad (18)$$

그러므로 AC상의 공극에서의 COENERGY

$$W'_{AC} = \int_0^{F_A} \phi_{AC} dF \quad (19)$$

이때 F 는 MMF를 의미한다.

AC상의 공극에서의 토오크를 구하기 위하여 식(19)에 대하여 편미분하면 다음의 토오크 식을 구할수 있다.

$$T_{AC} = \frac{P_m F_m F_A}{P_z} \frac{\partial (P_A - P_C)}{\partial \theta} - \frac{F_A^2 (P_A - P_C)}{P_z} \frac{\partial (P_A - P_C)}{\partial \theta} - \frac{F_A F_B}{P_z} \left[(P_A - P_C) \frac{\partial (P_B - P_D)}{\partial \theta} + (P_B - P_D) \frac{\partial (P_A - P_C)}{\partial \theta} \right] + \frac{F_A^2}{2} \frac{\partial (P_A + P_C)}{\partial \theta} \quad (20)$$

마찬가지 방법으로 BD 상의 토오크를 구할수 있다. 식(20) 첫번째항은 권선의 MMF와 영구자석 고정자의 상호작용에 의한 토오크로써 이는 기본 주파수, 제3고조파, 제5고조파... 등의 홀수 주파수 성분만을 갖는다. 그런데 두번째 항과 네번째항은 권선의 MMF만에 의한 V.R TYPE의 토오크로 제2 고조파 제4 고조파... 등의 짝수항의 고조파만 주로 갖는다. 그리고 세번째항은 각상의 MMF들의 상호 작용에 의한 토오크 항으로 한상여차에는 나타나지 않는다. 또한 두상여차의 경우에도 서로 상쇄되어 실제로 나타나지 않는다. 또 하나의 토오크 발생원으로 영구자석 회전자 만에 의한 DETENT 토오크는 다음과 같다.

$$T_D = \frac{P_m F_m^2}{2 P_z} \frac{\partial (P_A + P_B + P_C + P_D)}{\partial \theta} \quad (21)$$

이는 제4고조파, 제8고조파...만 갖는다. 이상과 같이 각 상의 토오크 및 영구자석에 의한 토오크를 살펴보았다. 회전자 축에 나타나는 구동 토오크는 이들 각 토오크의 합이다.

$$T = (T_{AC} + T_{BD} + T_D) Z_r \cdot Z_s \cdot L \cdot \frac{\# \text{ of Poles}}{\# \text{ of Phase}} \quad (22)$$

여기서 Z_r : 회전자의 TEETH 수

Z_s : 극 당 고정자 TEETH 수

L : 회전자 길이

4. 시뮬레이션 및 결론

이상의 과정을 계산기 시뮬레이션을 통하여 분석 검토한다.

시뮬레이션 프로그램을 살펴보면 그림 5의 흐름선도와 같다. 먼저 모터 구조에 대한 데이터를 입력한 후에 모터의 코어에 대한 자기회로 행하며 스텝모터의 등가 회로로 및 감자극선으로 부터 영구자석에 대한 자기적인 해석을 하며 앞서 설명한 구조적 오차를 고려한 공극에서의 PERMEANCE를 구한다. 이들로 부터 공극에서의 자속의 세기를 계산하고 이를 이용하여 회전자 위치에 따른 토오크를 계산한다. 토오크의 최대치 또는 최소치가 되는 위치와 값을 구하고 토오크가 영이 되는 DETENT 위치를 구하여 이를 평가 수단으로 이용하였다.

다시 이러한 토오크 값을 FOURIER변환하여 이의 각각 성분을 비교 검토 하였다.

주로 FDD 용인 스텝각이 1.8도이며 UNIFILAR 권선인 하이브리드 스텝 모터에 대한 설계 데이터를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과를 비교해 볼때 앞서 열거한 네가지의 구조적 오차 중 첫번째의 STACK 이 어긋난 경우에는 DETENT 위치의 오차를 가져 올 뿐만아니라 여자되는 상에 따라 HOLDING 토오크의 값이 달랐다. 또한 회전자가 원이 아닌 경우에는 회전자의 위치 및 여자된 상에 따라 HOLDING 토오크의 값이 달라졌으나 DETENT 위치에는 큰 영향을 미치지 않았다. 다음으로 회전자의 중심이 일치 하지 않는 경우 역시 HOLDING 토오크에 큰 영향을 미쳤다. 마지막으로 고정자 극이 어긋난 경우에는 여자 상에 따라 HOLDING 토오크 및 DETENT 위치에 큰 영향을 미쳤다.

참고 문헌

- 1) B.C. Kuo, U.Y. Huh; "Permeance models their applications to step motor design" Proc. 15th annual symposium on incremental motion control and devices, 1986, pp.351-369
- 2) B.C. Kuo, Y.J. Chen; " A nonlinear magnetic circuit model and its application to static holding torque prediction of hybrid step motors", Proc. of 13th annual symposium on incremental motion control and devices, 1984, pp.303-312

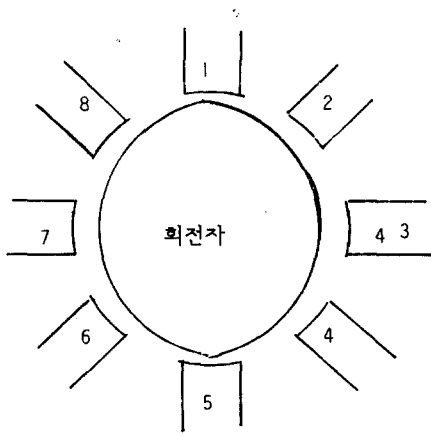


그림 1. 회전자가 원이 아닌 경우

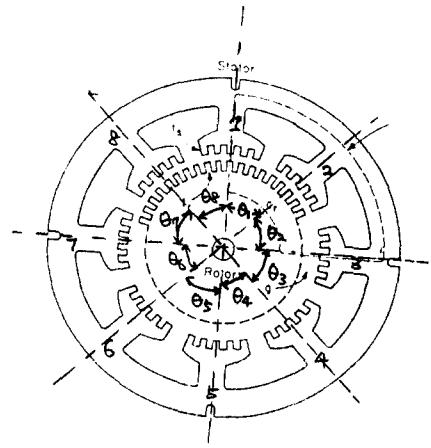


그림 3. 고정자 사잇각이 다른 경우

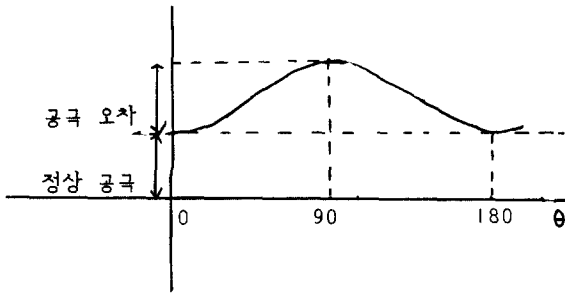


그림 2. 회전자가 원이 아닌 경우 공극의 변화.

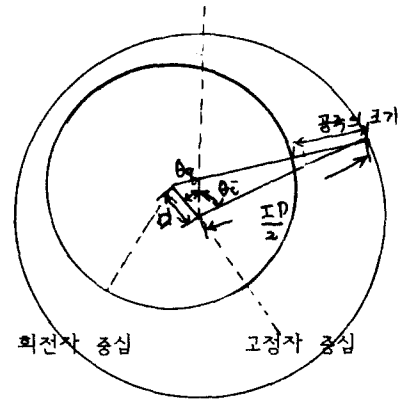


그림 4. 고정자와 회전자 중심이 일치 하지 않는 경우

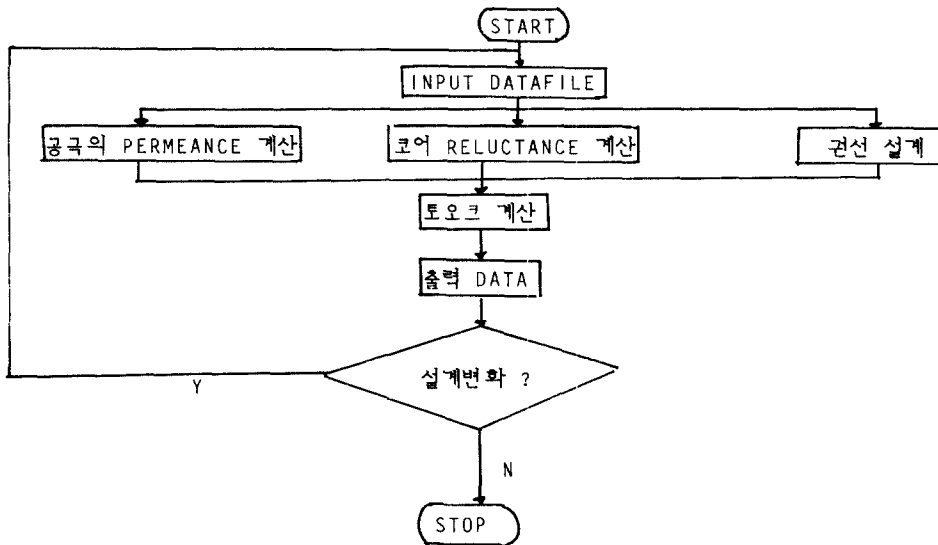


그림 5. 시뮬레이션 프로그램 흐름 선도.