

Hybrid Stepping Motor의 포화를 고려한 퍼미언스 산정 및 특성해석

우 준 근, 임 기 채, 홍 정 표, 김 규 탁
 창원대학교 전기공학과

The Permeance Estimation and Characteristic Analysis of the Hybrid Stepping Motors Considering the Saturation

Joon-Keun Woo, Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, and Kyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - The paper proposes the characteristic analysis method to consider the saturation of teeth and poles in the hybrid stepping motors.

The proposed method is based on the equivalent magnetic circuit coupling with the finite element analysis. The equivalent magnetic circuit is used to analysis the characteristics of the hybrid stepping motors. And the FE analysis is used to compute the non-linear parameters included the equivalent magnetic circuit in the hybrid stepping motors.

Simulation and experiment results show that the proposed technique is compared with the classical method.

1. 서 론

하이브리드 스텝핑 모터(hybrid stepping motor)는 제어용 액추에이터로서 일반 사무기기 및 공장 자동화기에 적용되어 산업 전반에 걸쳐 많이 사용되고 있다 [1,2]. 다른 종류의 모터에 비하여 체적당 토크가 크고 오픈 루프 제어가 가능하여 구동 드라이버와 제어부가 간단해진다.

반면, 하이브리드 스텝핑 모터는 다른 기기와 비교할 때 구조가 미세하고 복잡하다 [2]. 전자기적인 측면에서 볼 때, 축방향과 방사방향의 적교하는 자로틀 형성하는 3차원적인 구조를 하고 있다. 이러한 구조적인 특징으로 인하여 특성 해석시 2차원 해석을 적용하기 어렵게 된다 [3]. 그러므로, 하이브리드 스텝핑 모터는 특성 해석을 위하여 3차원 유한 요소법을 행하는 경우가 많다. 그러나 3차원 유한요소해석의 경우, 해석 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있다. 뿐만 아니라 구조적으로 작은 공극과 치에 의해 생긴 미세한 돌극 구조를 해석하기 위해서는 공극에 대한 정밀해석이 이루어져야 한다. 특히 하이브리드 스텝핑 모터의 경우, 고정자와 회전자의 치부근에서의 포화현상이 나타나게 되므로 이러한 현상을 충분히 고려할 수 있는 해석 기술이 이루어져야 한다.

모터의 특성해석을 행하는 방법중 기기의 특성에 따라 여러 가지 방법이 있지만 특히 등가자기회로법과 유한요소해석이 가장 많이 이용된다. 등가자기회로법은 모터의 자속 경로에 따라 회로 방정식을 구성하여 특성 해석을 행하는 방법으로 정확성은 떨어지지만 빠른 계산시간과 선제적이 특성 해석을 예측하는데 유리하므로 초기 설계시 많이 이용되는 방법이다.

유한요소해석은 해석 결과의 정확도가 아주 높은 수치해석기법이다. 그러나, 등가자기회로법에 비하여 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 특히 3차원 해석의 경우는 해석 정도에 비하여 계산시간이 너무 오래 걸린다.

본 논문에서는 하이브리드 스텝핑 모터의 특성 해석을 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저, 하이브리드 스텝핑 모터의 특징인 작은 공극부와 고정자/회전자

치에서의 포화 특성과 퍼미언스 산정을 위하여, 공극과 치만 모델링해서 2차원 유한요소해석을 이용하여 퍼미언스를 도출하였다. 도출된 퍼미언스를 파라미터로 하여 하이브리드 스텝핑 모터의 등가자기회로를 구성하여 특성 해석을 실시하였다. 또한, 기자력 강하에 따른 치포화 특성을 고려하기 위하여 각 기자력 변화에 따라, 치에서의 퍼미언스의 변화를 보간 함수화 하였다. 이 함수를 등가자기회로의 등가 파라미터로 구성하여 특성 해석을 행하였다. 마지막으로, 실험을 통하여 본 프로세스를 검증하였다. 그림 1은 5상 하이브리드 스텝핑 모터의 구조를 보여주고 있다.

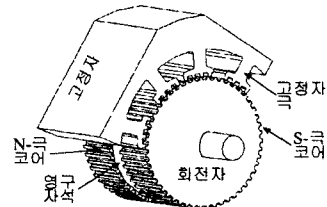


그림 1. 하이브리드 스텝핑 모터의 구조

2. 본 론

2.1 등가자기회로

하이브리드 스텝핑 모터는 두 개의 수직된 자속을 발생시킨다. 하나는 영구자석에서 나온 축방향 자속이고 다른 하나는 권선 기자력에 의한 방사방향 자속이다. 그림 2는 하이브리드 스텝핑 모터의 횡단면도를 보여주고 있다. 영구자석을 중심으로 양쪽에 철심이 적층되어 있는 구조를 하고 있으며, 철심은 각각 작은 치로 구성되어 있다. 그리고 전면의 철심과 후면의 철심의 치는 전기각으로 90° 어긋나 있는 형태를 취하고 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 영구자석에서 나온 자속은 철심까지 축방향으로 향하지만, 회전자 철심에서는 방사방향으로 경로를 형성하여 고정자 축으로 이동한다.

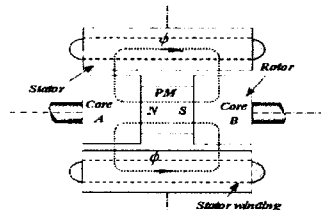


그림 2. 하이브리드 스텝핑 모터의 측면도

그림 2의 자속의 경로를 바탕으로 하이브리드 스텝핑 모터의 등가자기회로를 구성할 수 있다. 회전자 철심부

에서 방사방향으로 자로를 형성할 때 권선 기자력에 따라 자로가 나뉘지게 되므로 회로 구성시 병렬 회로를 구성하게 된다. 그림 3은 5상 하이브리드 스텝핑 모터의 등가자기회로를 보여주고 있다.

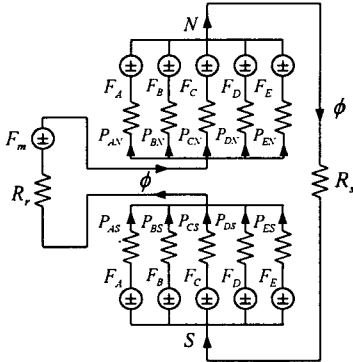


그림 3. 하이브리드 스텝핑 모터의 등가자기회로

그림 3의 등가자기회로는 그림 1과 그림 2의 하이브리드 스텝핑 모터의 5개 고정자 극만을 등가자기회로로 구성하였다. 이것은 하이브리드 스텝핑 모터가 대칭적인 구조를 가지고 있기 때문이다[1]. 그림 3에서 F_m 은 영구자석의 기자력을 나타내고 $F_A \sim F_E$ 는 각 권선의 기자력을 나타낸다. R_r 은 영구자석을 포함한 회전자 자기저항을 나타내고, R_s 은 고정자의 자기저항을 나타낸다. $P_{AN} \sim P_{EN}$ 과 $P_{AS} \sim P_{ES}$ 는 공극에서의 퍼미언스를 나타낸다.

2.2. 유한요소법을 적용한 퍼미언스 계산

등가자기회로법은 특성 해석시, 간단하고 융통성 있게 적용할 수 있는 방법이다. 그러나, 대부분의 파라미터가 비선형 특성이나 복잡한 기하학적 구조에 영향을 받고 있으므로 이를 정확히 묘사하여 기기의 운전특성을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 이러한 측면에서 유한요소해석은 기기의 운전, 특성 뿐만 아니라 파라미터 추출에도 가장 많이 사용되는 수치해석적 기법이다[4].

본 논문에서는 퍼미언스를 계산하기 위하여 자기 스칼라 포텐셜에 기반을 둔 유한요소해석을 이용하였다.

식 (1)은 자기 스칼라 계에서의 지배방정식을 나타낸 것이다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 자기 스칼라 포텐셜을 의미한다.

유한요소법을 고정자/회전자의 한 치퍼치에 적용한 치/공극 모델에 적용함으로써, 전기각 θ_e 에서의 공극 퍼미언스는 식 (2)과 같이 구할 수 있다.

$$W_s = \frac{1}{2} F_g^2 P_g(\theta_e) \quad (2)$$

여기서, W_s 는 공극에 저장된 에너지이고, F_g 는 공극의 기자력을 의미한다. θ_e 는 전기각으로써 회전자 치 수 N_r 과 기계각 θ_m 의 곱으로 나타난다.

공극 퍼미언스의 형태는 식 (3)과 같이 푸리에 급수의 형태로 나타낸다.

$$P = P_0 + \sum_{i=1}^{\infty} P_i \cos(\theta_e + \varphi) \quad (3)$$

여기서, P_0 과 P_i 는 퍼미언스 계수를 나타내고, i 는 고

조파 차수를 나타낸다. 그리고 φ 는 고정자와 회전자 치 사이의 위상차를 나타낸다.

퍼미언스 계수는 유한요소해석으로부터 얻어진 회전자의 위치 이동에 따른 퍼미언스 곡선의 공간 고조파 분포의 형태로 나타난다. 그리고 회전자 위치에 따른 퍼미언스의 변화는 등가자기회로에 적용되어 기기의 운전 특성을 추정하는데 이용된다.

2.3. 특성해석

그림 3의 등가자기회로를 풀면 기기의 각 경로를 통과하는 자속을 구할 수 있다. 여기서 구한 자속 ϕ 를 가상 변위의 원리에 적용하여 토크를 계산할 수 있다. 발생 토크는 자속 ϕ 가 일정할 때 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T = \frac{\partial W_s}{\partial \theta_m} \quad (4)$$

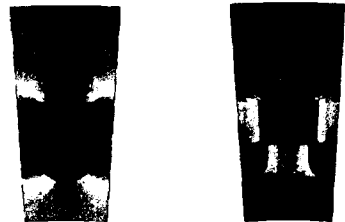
이것은 자속이 일정할 때 회전자의 위치에 따른 퍼미언스의 변화량과 기자력의 관계에 의해서 식 (5)과 같이 나타난다.

$$T = -\frac{1}{2} N_r F_a^2 \frac{\partial P(\theta_e)}{\partial \theta_e} \quad (5)$$

여기서 T 는 정토크, F_a 는 공급 기자력, 그리고 P 는 퍼미언스를 나타낸다.

등가자기회로에 적용되는 파라미터의 비선형성을 무시하는 경우 정토크는 공극 퍼미언스의 변화량과 고정자와 회전자의 철심부의 자기저항을 등가적으로 고려하여 쉽게 구할 수 있다. 이 경우 하이브리드 스텝핑 모터의 정토크 특성중의 하나인 홀딩 토크(holding torque)가 실험치 보다 1.5배에서 2배정도 높게 나타난다. 그러므로 하이브리드 스텝핑 모터의 토크 특성을 정확히 예측하기 위해서는 치에서의 포화등 비선형 특성을 고려한 파라미터의 산정이 중요하다.

그림 4는 고정자/회전자의 치가 서로 배열 되었을 때와 어긋났을 때의 유한요소해석 결과를 보여주고 있다.



(a) 치와 치배열 (b) 치와 공극배열

그림 4. 치/공극 모델의 유한요소해석

그림 4에서 알 수 있듯이 치와 치가 어긋나 있을 때는 퍼미언스가 작지만 치와 치가 서로 배열되었을 때는 치에서의 포화 현상에 의해서 공극 퍼미언스 보다 더 작게 나타난다. 그리고, 공극의 기자력의 변화에 따라서 퍼미언스의 특성이 달라지게 된다. 그러므로, 등가자기회로에 치의 포화현상을 적용시키기 위해서는 기자력 변화에 따른 퍼미언스의 변화를 함수화 하여 적용해야 한다. 그림 5는 기자력 변화에 따른 치에서의 퍼미언스의 변화를 보여주고 있다. 공급된 기자력이 커질수록 치에서의 퍼미언스가 포화됨을 보여주고 있다.

그러므로 기기의 정토크 특성을 정확히 예측하기 위해서는 이러한 기자력 변화에 따른 치의 퍼미언스의 변화 특성을 보간 함수화 하여 등가자기회로에 적용하여 등가회로를 해석해야 한다.

그림 6은 이러한 퍼미언스의 포화 특성을 고려한 특성 해석 프로세서를 보여주고 있다. 비선형 특성을 충분

히 고려하기 위하여 기자력 변화에 따른 퍼미언스의 변화를 반복적으로 해석함으로써 특성해석의 정확도를 높이는 과정을 추가하였다.

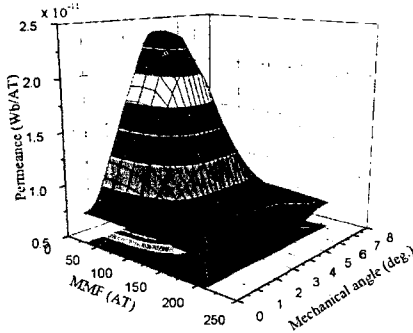


그림 5. 기자력 변화에 따른 퍼미언스의 변화 특성

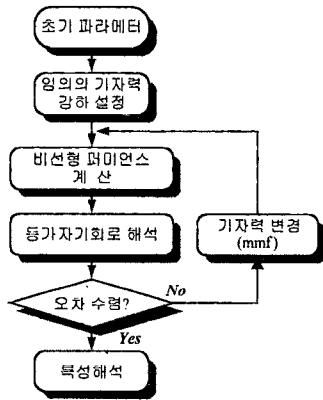


그림 6. 개선된 특성 해석 프로세스

2.4. 해석 및 실험 결과

표 1은 실험에 사용된 5상 하이브리드 스텝핑 모터의 사양을 나타내고 있다.

표 1. 실험에 사용된 모터의 사양

| Item | Value | Unit |
|-------------|-------|------|
| 상수 | 5 | |
| 정격 전류 | 0.75 | (A) |
| 정격 홀딩 토크 | 0.24 | (Nm) |
| 한 극당 턴수 | 53 | |
| 한 극당 고정자 치수 | 4 | |
| 회전자 치수 | 50 | |
| 공극 길이 | 0.05 | (mm) |

그림 7은 회전자 변위에 따른 정토크 특성을 실험치와 해석치를 비교하여 나타낸 그림이다. 개선된 해석 방법이 실험치와 근접함을 보여주고 있다.

그림 8은 입력 전류의 증가에 따른 홀딩 토크의 변화 특성을 나타낸 그림이다. 개선된 해석 방법이 포화 특성을 충분히 고려하고 있음을 보여주고 있다.

그림 9는 정토크 특성중 영구자석 기자력에 의한 코깅 토크 특성을 해석치와 실험치를 비교해 보았다.

3. 결 론

본 논문에서는 5상 하이브리드 스텝핑 모터의 특성 해석을 위하여 치의 포화 현상을 고려한 파라미터의 산

정과 이를 적용한 등가자기회로를 사용한 해석 기법을 제안하였다. 또한, 기자력 변화에 따른 퍼미언스의 변화를 함수화 하여 적용함으로써 해석의 정도를 높일 수 있었다.

제한된 해석 기법은 치/공극 모델링 및 해석이 좀더 정확히 이루어질 경우 설계 과정과 최적화 문제에 있어 쉽게 적용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. K. Jenkins, D Howe, "An Improved Design Procedure for Hybrid Stepper Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.26, pp.2553~2537, 1990
- [2] Kiyonobu Mizutani, Shigeo Hayashi, Nobuyusi, Matsui, "Modeling and Control of Hybrid Stepping Motors", In proc. of IEEE/IAS Annual Meeting, 1993
- [3] Nobuyuki Matsui, Makoto Nakamura, Takashi Kosaka, "Instntaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, pp.1176~1180, 1996.
- [4] Ping Zhou, John Gilmore, Zsolt Badics, Zoltan J. Cendes, "Finite Element Analysis of Induction Motors Based on Computing Detailed Equivalent Circuit Parameters", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.34, pp.3499~3502, 1998.

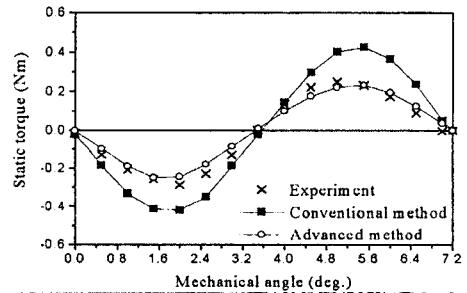


그림 7. 하이브리드 스텝핑 모터의 정토크 특성

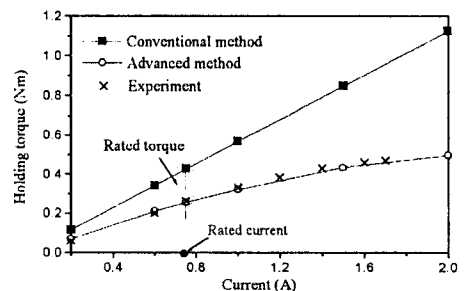


그림 8. 전류 변화에 따른 홀딩 토크 특성

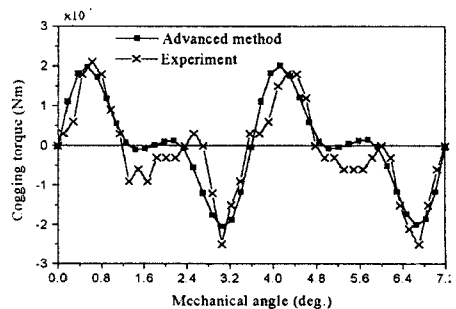


그림 9. 코깅 토크 특성