論文 11-3-12

코어없는 축방향 영구자석형 전동기에 관한 연구

朴鍾贊†, 崔海龍*, 崔圭夏**

A Study on AFPM(Axial Flux Permanent Magnet)Motor without Stator Corer

Jong-Chan Park, Hae-Ryong Choi and Gyu-Ha Choe

요 약

최근 가전 및 자동차시스템의 전동화에 따라 고효율 전동기에 대한 관심이 고조되고 있다. 따라서 본 논문에서는 고속구동시 고효율구동이 가능한 코어없는 AFPM전동기의 운전특성에 대해서 기술하고 설계관점에서의 그 전기적 특징에 대해서 논의한다. 특히 전동기 특성에 큰 영향을 미치는 역기전력 및 공극에서의 자계특성을 보이고 또한 인덕턴스특성에 따른 제어특성에 대해서도 시뮬레이션 및 실험을 통해 고찰한다.
회로망법을 기초로한 전동기설계결과와 출력특성실험결과의 비교검토를 통해 토크-속도 및 효율운전특성을 확인하였으며 제어특성을 확인한다. 아울러 코어가 없어짐에 따라 생길 수 있는 진동 및 소음특성에 대해서도 평가한다.

ABSTRACT

Recently with the motorizing of electric home appliances and car systems, there is increasing interest in high efficiency electric motors. Thus, the present study described the operating characteristics of coreless AFPM motor that is highly efficient in high speed driving, and discussed its electric characteristics from the perspective of design. In particular, we examined back electromotive force and the magnetic field characteristic in slits, which have significant effects on the characteristic of the motor, and conducted simulation and experiment on control characteristic according to inductance characteristic.
This study analyzed torque speed and efficient operation characteristic as well as control characteristic through comparing the result of motor design with the result of output characteristic experiment based on the electric network method. Furthermore, we evaluated vibration and noise that may occur due to the absence of core.

Key Words : AFPM(Axial Flux Permanent Magent) Motor, high efficiency, Coreless, BEMF

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 등 에너지문제가 심각해짐에 따라 가전용 및 차량시스템의 고효율화에 대한 관심이 증가하고 있다.

따라서 전동기를 액츄에이터로 하는 전동화된 시스템으로 급속히 변모하고 있으며 여기서 핵심적인 기술은 전동기 효율의 극대화를 위한 설계기술과 이를 최적화하기 위한 제어기술에 있다고 볼 수 있다[1,2]. 동력원으로서의 전동기는 대형화하고 있는 실정이며 또한 그 성능에 대한 사양도 점차 높은 품질을 요구하고 있다. 현재 검토되고 있는 전동기로는 대표적으로 영구자석형 동기전동기가 있는데 기본적으로 전동기의 샤프트를 기준으로 수직방향의 자속에 근거하여 회전력

†교신저자 : 정회원, 건국대 전기공학과 박사과정
E-mail : pjc1230@konkuk.ac.kr
*정회원, 현대기아자동차 연구개발본부 선임연구원
**정회원, 건국대 전기공학과 교수
접수일자 : 2006. 4. 12 1차 심사 : 2006. 5. 9
심사완료 : 2006. 5. 17

이 발생하게 된다. 전동기의 최적설계를 위한 여러가지의 설계법이 개발되어 적용되고 있지만 양산까지 고려할 때 최선의 것을 선택하는 일은 쉽지 않은 작업이 될 것이다. 그만큼 전동기에 요구되는 사양은 까다롭고 적용되기까지의 많은 문제점을 앉고 있는 것이다. 모터는 가장 가볍고 작은 사이즈에서 가장 큰 출력을 얻기 위해 설계되지만 이 모든 조건을 완벽히 갖추는 모터의 선택은 불가능하기 때문이다[3].

따라서 본 논문에서는 고속고효율운전이 가능한 코어없는 AFPM전동기의 특성에 대해 고찰하고 기존모터와의 특성비교를 통해 장단점을 분석하고자 한다.

2. AFPM 전동기

2.1 AFPM 전동기의 구조 및 특성

그림 1의 코어 없는 AFPM 전동기는 높은 효율과 우수한 고속운전 특성을 목적으로 설계되며 이러한 장점으로 구동시스템의 경우에 있어 시동기와 발전기용으로 적용될 수 있으며 특히 직경방향이 큰 관계로 시동특성이 우수한 장점을 갖는다. 무엇보다도 저속운전시 코깅 토크가 작게 발생되므로 부드러운 시동(Soft Starting)이 가능하다. 그러나 고정자에 코어가 없기 때문에 전류제어에 의한 자속의 제어가 상대적으로 어려운 문제를 앉고 있으므로 정출력을 내는 응용분야(Fan등)에 적합한 전동기이다[4,5]. 본 논문에서는 코어없는 모터를 설계하는데 있어 전자기적인 관계로부터 공극유효자속의 분포특성을 제시하였고 이를 통하여 고효율의 모터특성을 얻을 수 있다.

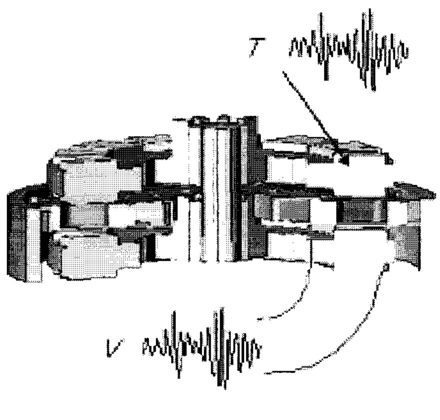


그림 1 코어없는 AFPM 전동기의 구조
Fig. 1 Configuration of AFPM motor without core

그림 2는 순수한 정현파 특성을 갖는 AFPM전동기의 상당 역기전력 파형이다. 전기각에 따라 발생하는 이상적인 특성을 보이며 고정자에 의한 전기자 반작용이 거의 무시할만한 수준임을 알 수 있다. 모터의 전기설계에 있어 요구되는 가정은 아래와 같다.

1) 사다리꼴 자석이 최대 자석 면적설계가 가능하나 저비용설계를 고려하여 사각자석을 이용한다.

2) 희토류자석(Nd-Fe-B)은 잔류자속밀도가 일반적으로 상온에서 굴곡점이 없다.

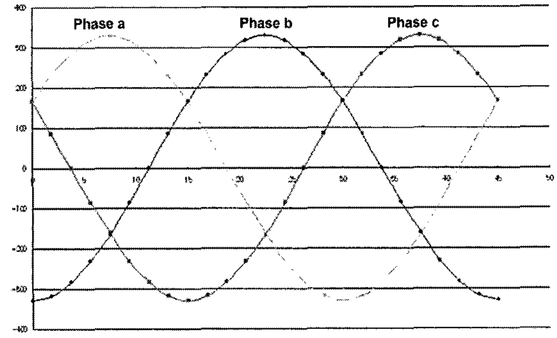


그림 2 AFPM 전동기의 역기전력 특성
Fig. 2 BEMF plot of AFPM motor without core

3. AFPM 전동기의 기본방정식

3.1 등가방정식

AFPM전동기의 제어를 위해 전동기의 전기적인 매개변수에 대해 고찰한다. 전동기의 동작특성에 영향을 미치는 중요한 변수는 인덕턴스와 자속이다. 인덕턴스와 자속의 크기 그리고 위상은 전동기를 구분하는 기본적인 변수이다. AFPM전동기는 회전자의 회전에 따라 전동기의 인덕턴스와 자속은 크기와 위상의 함수로 정의되며 이 기본식으로부터 전동기의 전기자전압을 얻을 수 있다. 결국 전동기를 구동하는 인가전압과 전동기의 내부변수와의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L_u &= L_a + l_a - L_{as}\cos 2\theta \\ L_v &= L_a + l_a - L_{as}\cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ L_w &= L_a + l_a - L_{as}\cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \phi_{fu} &= \phi_f \cos\theta \\ \phi_{fv} &= \phi_f \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \phi_{fw} &= \phi_f \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \tag{2}$$

위로부터 AFPM의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_u & pM_{uv} & pM_{wu} \\ pM_{uv} & R_a + pL_v & pM_{vw} \\ pM_{wu} & pM_{vw} & R_a + pL_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega\phi_f \sin\theta \\ \omega\phi_f \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \omega\phi_f \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

공극이 일정하다는 가정하에서 영상분전압이 존재할 경우의 전압방정식에 대한 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 4\pi/3) \\ \cos\theta_r & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 θ_r은 회전자의 회전각

이 변환식은 회전자의 위치에 따라 표현되는 고정자에서의 전압을 표현하게 되며 AFPM전동기에 유기되는 전압과 전류의 합이 0이라고 가정하여 영상분을 고려하지 않으면 좌표 변환식을 거쳐 d-q축 좌표계에서의 전압방정식을 표현할 수 있으며 AFPM의 전압방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}\phi_f \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 v_d, v_q: 전기자전압의 d-q축 성분

i_d, i_q: 전기자전류의 d-q축 성분

$L_d = l_a + \frac{3}{2}(L_a - L_{as})$: d축의 자기인덕턴스 성분

$L_q = l_a + \frac{3}{2}(L_a + L_{as})$: q축의 자기인덕턴스 성분

이렇게 얻어진 전압방정식에 기계적인 토크를 수식으로 정리하면 전동기의 전기적특성과 기계적특성에 대한 관계성을 확인할 수 있으며 이를 위한 토크방정식은 다음과 같다.

$$T = P_n\{\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\}$$

$$= P_n\left\{\phi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2}(L_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta\right\} \quad (6)$$

$$= T_m + T_{reluctance}$$

여기서 $T_m = P_n \phi_a i_q = P_n \phi_a I_a \cos\beta$

$$T_{reluctance} = P_n (L_d - L_q) i_d i_q = P_n (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (7)$$

AFPM전동기의 회전자 구조는 segment 자석을 회전자 요크에 삽입하게 되며 다소의 리럭턴스 토크성분이 발생하게 된다. 그러나 실제로 그 양은 크지 않아서 설계 시 이를 무시하여도 무방하며 실제 설계 에는 d축 인덕턴스성분과 q축 인덕턴스 성분을 동일한 것으로 고려하였다.

그러나 코어가 있는 AFPM전동기의 경우 코어의 설계 및 전동기운전조건에 따라 손실이 발생하게 되고 이는 모터의 효율특성 및 제어특성에 영향을 주게 된다.

3.2 자석의 형상에 따른 역기전력 검토

본 논문의 설계과정에서는 공정상의 문제를 들어 자석의 형상을 사각형으로 가정하고 설계를 수행하였다. 그러나 실제로 한가지 문제가 되는 것은 자석의 형상을 원으로 할 것인가 직사각형 혹은 사다리꼴등으로 할 것인가 하는 문제이다. 전동기의 자속밀도는 자석의 형태에 따라 달라진다. 그러나 자석의 두께와 상하측의 면적이 비슷하면 큰 차이는 없다고 볼 수 있다. 가장 큰 차이점은 자석이 회전할 때 코일과의 상대적인 위치에 의해서 역기전력의 파형이 어떤 형상이 되는가에 달려있다. 자석의 모양에 따른 차이를 알아내는 방법은 자석을 돌려가면서 그때 그 때 코일과 겹치는 부분, 즉 자석의 자속 내에 놓이는 부분의 면적을 가지고 상대적인 역기전력을 구할 수 있다. 이러한 작업은 실제 전동기를 가지고 하지 않아도 simulation을 통해 확인할 수 있다.

원형자석과 사각자석의 경우를 각각 비교할 경우 두가지 모두 다 거의 정현적인 모양을 보이게 되나 일부분을 확대해 보면 약간의 차이가 발생한다. 이때 통전각은 30에서 420도이다. 그림 3과 같은 직육면체 형태의 자석이 존재할 때 z축 방향에서의 자속밀도 B_z는 다음과 같다.

$$B_z(z) = \frac{B_r}{\pi}\left(\tan^{-1}\frac{ab}{z\sqrt{a^2+b^2+z^2}} - \tan^{-1}\frac{ab}{(z+H_3)\sqrt{a^2+b^2+(z+H_3)^2}}\right) \quad (8)$$

여기서 B_r:자석의 residual inductance

식 (8)에 의한 결과가 그림 4에 나타나며 공극에서 나타나는 표면 자속 밀도를 자석 N극에 의한 효과와 S극에 의한 효과로 구분하고 그 합성값을 표시한 곡선이다. 그래프 x축 영역은 자석과 자석사이의 공극 중에서 권선이 차지하고 있는 부분만을 표기한 것이다.

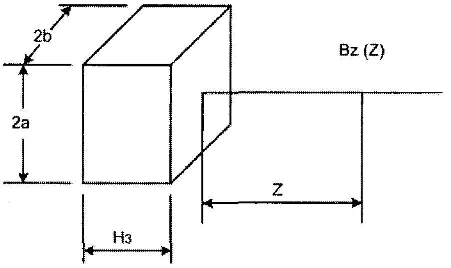


그림 3 직육면체 형태의 자석 치수
Fig. 3 Dimension of magnet with rectangular shape

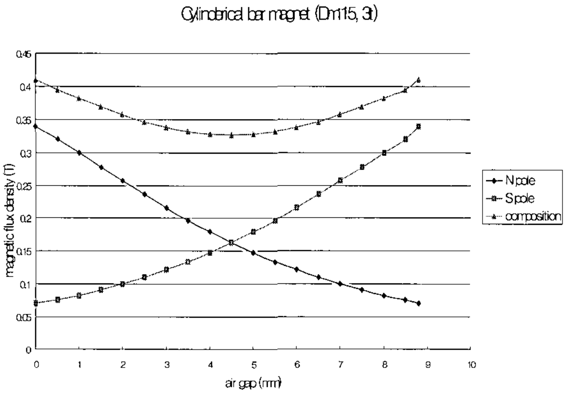


그림 4 공극의 위치에 따른 자속밀도 분포
Fig. 4 Distribution of flux density in airgap

4. 시뮬레이션

본 장에서는 전동기의 운전영역을 확인하기 위해 몇 가지의 디지털 프로그램을 이용하여 AFPM전동기의 설계 및 제어특성을 확인한다. 선형시스템의 수치해석을 위해 널리 사용되고 있는 Matlab의 윈도우 버전인 GUI를 이용하여 AFPM 전동기의 구상설계 프로그램을 작성하였고 이를 통해 구동전동기 전자기적인 특성의 확인과 기구적인 사이즈의 윤곽을 규정한다. 이렇게 얻어진 전동기 모델을 가지고 운전특성을 확인하기 위해 전기회로 프로그램을 이용하여 구동특성 및 제어특성을 확인하고자 한다. 또한 전기회로 전문 소프트웨어인 PSIM(Power Simulation)을 사용하며 알고리즘의 검증을 위하여 이용하여 AFPM 전동기의 설계 및 제어 특성의 시뮬레이션을 수행하였다. 4.1절에서는 AFPM 전동기의 설계 시뮬레이션 결과를 4.2절에서는 AFPM 전동기의 유한요소해석 결과를 보인다.

4.1 설계 시뮬레이션

표 1은 코어 없는 AFPM전동기의 각 요소설계와 기본적인 출력특성을 확인하기 위해 모터설계조건을 입력하는 테이블이다.

표 1 코어 없는 AFPM전동기 사양
Table 1 Specification of AFPM motor without core

내용	단위	특성값
정격출력	[W]	165
정격토크	[Nm]	0.5
정격회전수	[rpm]	3150
정격전류	[A]	0.7
최대속도	[rpm]	3500
첨두 상전류	[A]	1.2
냉각방식		강제공냉식
자석		Nd-Fe-B
제어방식		120도 구형파 구동

앞에서 기술한 AFPM전동기의 기본전압방정식과 인버터의 모델로부터 구동시스템에 대한 전기적인 모델을 구할 수 있다. 가정한 데로 d축의 인덕턴스와 q축의 인덕턴스가 같다는 전제로 전동기의 전압방정식이 얻어졌으며 아래와 같이 AFPM 전동기에 대한 수학적 모델을 PSIM이 가지고 있는 수학모델을 통해 얻을 수 있다. 여기서 정의되는 것은 전동기속도와 역기전력의 관계에서 구해지는 역기전력 상수 그리고 전동기의 전기기계적출력 그리고 회전자의 벡터와 동기되는 홀신호등이다. 3상구조를 기본으로 하였기 때문에 동기신호의 경우 120도 평형조건으로 회전하게 된다.

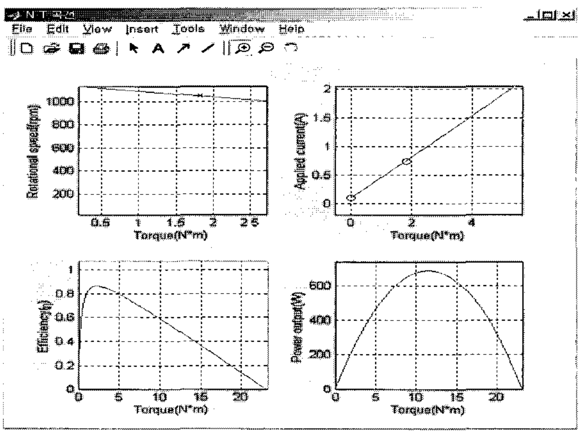


그림 5 일반화된 출력특성
Fig. 5 Normalized output characteristics

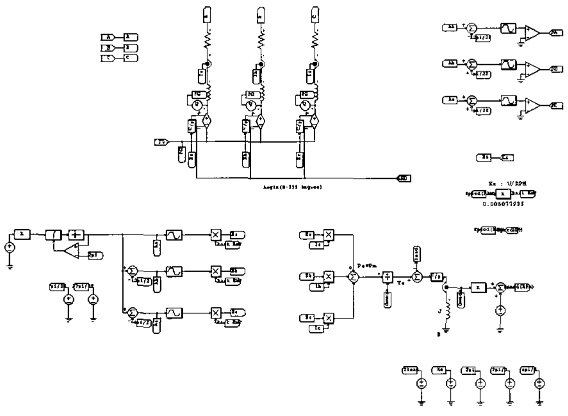


그림 6 DLL을 이용한 3상 AFPM모터 모델링
Fig. 6 Three phase AFPM motor's model using DLL

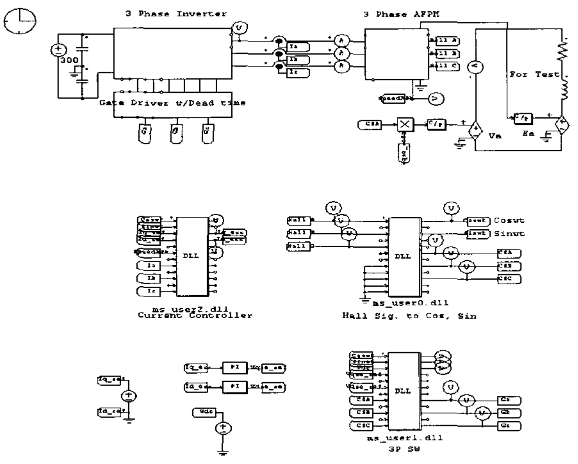


그림 7 DLL을 이용한 3상 AFPM모터 구동시스템
Fig. 7 Overall system of 3-phase AFPM motor using DLL

그림 6은 AFPM전동기를 구동하기 위한 제어시스템으로 앞에서 얻어진 AFPM전동기의 모델을 기본으로 구동을 위한 인버터부 그리고 d-q변환과 벡터변조를 위한 제어부로 구성되며, 그림 7은 AFPM전동기의 구동시스템이다. 전술한데로 제어기의 경우 직류제어개념을 적용하기 위해 축변환관계와 벡터변조 일반식을 소프트웨어적으로 구현해야 하는데 PSIM의 C언어 링크기능을 이용하여 쉽게 구현할 수 있었다. 본 기능을 이용하여 상업적으로 제공되는 다양한 라이브러리와 제어기 설계자에 의해 구현된 프로그램이 쉽게 링크되었으며 다양한 조건의 시뮬레이션과 그 결과의 표현이 매우 쉽게 해결되었다.

그림 8(위에서부터 구동시 상전압, 상전류, 인버터 입력전압, 입력전류 파형)은 코어 없는 AFPM전동기의 구동파형으로서 홀신호를 엔코더 신호로 이용하여 제어를 수행하였다. AFPM전동기의 코어의 유무에 따른 전류파형의 변화를 확인할 수 있으며 자기인덕턴스의 값이 코어를 갖는 전동기에 비해 상대적으로 매우 적은값을 갖게되므로 전류의 상승기울기가 매우 급한 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 갑작스런 전류의 변화는 토크리플이 상대적으로 커질 수 있음을 나타내며 고정자의 스트레스가 커질 수 있음을 해석적으로 확인할 수 있다.

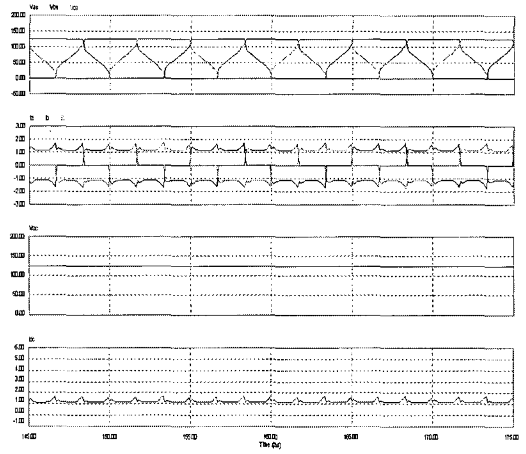


그림 8 코어없는 AFPM전동기의 구동파형
Fig. 8 Operating waveform of AFPM motor without core

그림 9(위에서부터 구동시 상전압, 상전류, 인버터 입력전압, 입력전류, 파형)는 같은 축방향의 전동기에 철심을 넣은 구조에 대한 구동특성을 보여준다. 예상할 수 있는바와 같이 전류의 파형이 일반적인 코어전동기와 유사한 것을 확인할 수 있으며 전기적인 특성이 다른 형의 전동기들과 유사함을 예상할 수 있다.

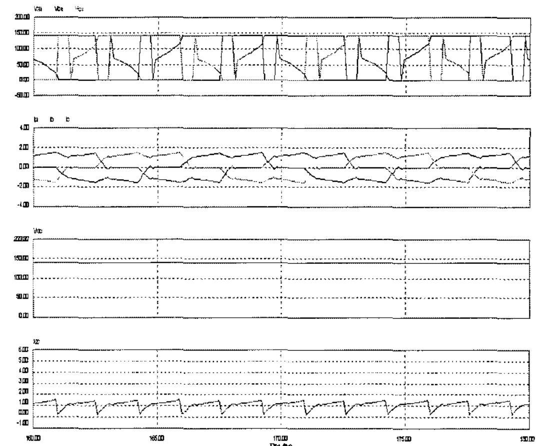


그림 9 코어를 갖는 AFPM전동기의 구동파형
Fig. 9 Operating waveform of AFPM motor with core

4.2 유한요소 해석결과

그림 10은 축방향으로 분포하는 자속분포를 유한요소법을 이용하여 분석한 결과를 나타내고 있다. 상하 대칭으로 놓여진 영구자석과 요크부의 자속분포를 확인할 수 있다. 식 (1)~(8)을 통해 구해진 공극에서의 자기에너지 분포가 그림 11을 통해 확인되며 자석의 에너지에 의존적임을 확인할 수 있으며 그림 12는 공극자속의 축방향분포를 3차원으로 나타내었다.

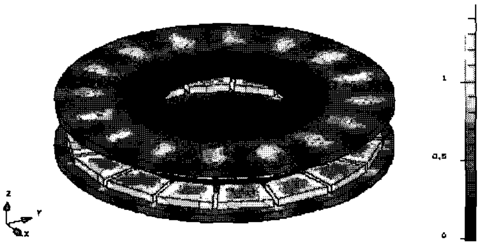


그림 10 AFPM전동기의 자속분포
Fig. 10 Flux distribution of AFPM motor

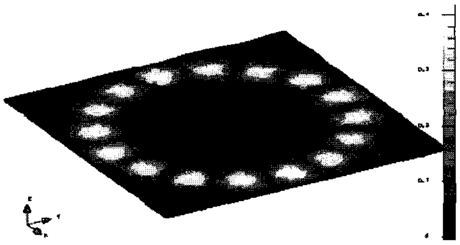


그림 11 공극자속분포
Fig. 11 Airgap flux distribution

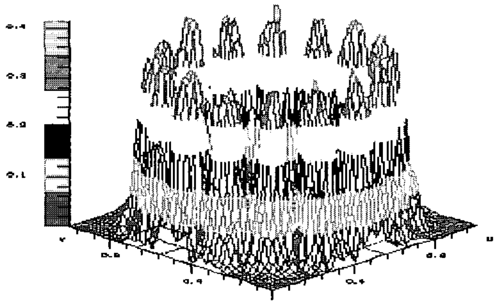


그림 12 공극자속분포(3D)
Fig. 12 Airgap flux-distribution(3D)

5. 실 험

코어없는 AFPM전동기는 코어에 의한 비선형적인 자속의 왜형이 일어나지 않으므로 역기전력의 형상이 거의 정현파에 가까운 것을 그림 13을 통하여 알 수 있다. 이것을 실제로 시제작품의 역기전력파형을 통해 확인할 수 있으며 특히 일정속도에서의 주파수분석을 통해 고조파성분의 함유에 대한 정보를 확인할 수 있다. 일반적으로 BLDC전동기 구동 시 사용하는 120도 전류방식을 적용할 경우 전류파형을 통해 이렇게 작은 인덕턴스의 영향을 확인할 수 있다. (그림 15) 토크가 작게 걸리는 상황에서는 전류리플에 의한 진동특성이 미미하나 토크가 증가함에 따라 진동/소음에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 정격 조건에서 전류 맥동에 의한 진동/소음 발생이 그림 16,17에서와 같이 특정 주파수에서 현저히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 아래 표 2는 본 실험에 사용된 코어없는 AFPM전동기의 사양을 나타낸다.

표 2 설계 사양
Table 2 Design Specification

내용	특성값(코어없는)
극수	12
상수	3
코일수	9
권선의 온도상승	60
권선재료	0.4[mm]
회전자 Plate 재질	S45C
축재질	S45C
축수	깊은홈 볼 베어링

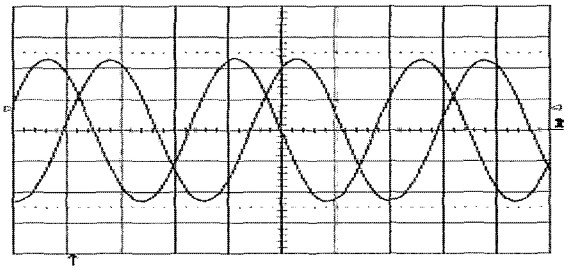


그림 13 상 역기전력(I)(50V/div)
Fig. 13 Phase BEMF(II)(50V/div)

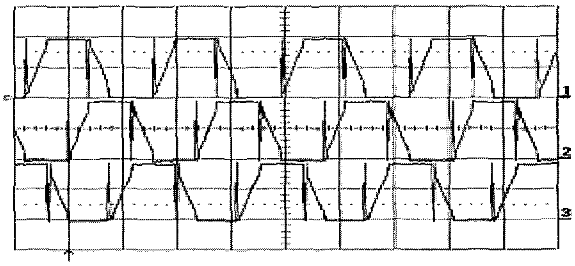


그림 14 단자전압(Coreless)(100V/div)
Fig. 14 Terminal voltage(Coreless)(100V/div)

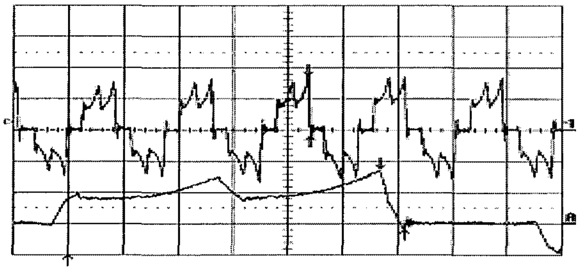


그림 15 구형파 구동시 모터 상전류(Coreless)(1A/div)
Fig. 15 Phase current(Coreless)(1A/div)

AFPM전동기의 소음특성은 코어의 유무에 따라 다소 다른 양태를 나타내며 코어가 있는 경우가 없는 경우에 비해 주파수가 낮고 소음크기가 상대적으로 낮아지게 된다. 또한 전기적인 관점에서 일반구동의 경우와 정현파구동의 경우에 차이가 발생하게 되는데 이러한 차이는 전류의 변화율이 전동기의 진동과 소음에 어떻게 영향을 미치게 되는가에 달려있다. 그림 16~17은 코어 없는 AFPM전동기의 진동 및 소음특성에 대한 FFT분석 결과를 보이며 가속도 센서에 의해 각각 x, y, z축 성분으로 구분됨을 알 수 있다. 진동 및 소음 주파수는 전동기의 구동 주파수와 일치하여 토크리플이 진동 소음의 원인임을 확인할 수 있었다.

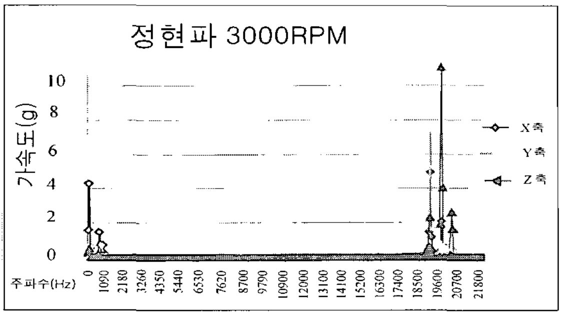


그림 16 진동특성
Fig. 16 Vibration of AFPM motor without core

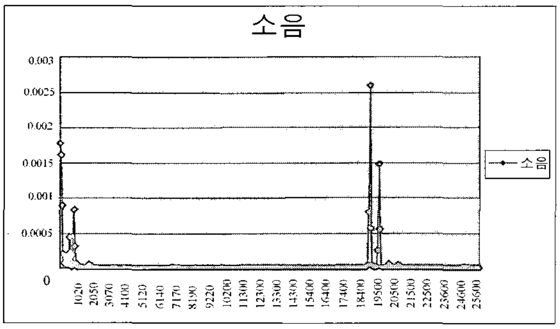


그림 17 부하 소음
Fig. 17 Load acoustic noise of AFPM motor without core

6. 결 론

본 논문에서는 이와 같이 영구자석을 이용하면서도 특히 축방향의 자속을 갖는 AFPM전동기에 대해서 연구를 수행하였다.

AFPM전동기의 원하는 출력을 얻기위해 회전자 자석의 설계를 수행하였고 이것을 통해 전동기가 출력을 위해 요구하는 자속을 계산할 수 있었다. 또한 고정자 코일의 선정을 통해 전동기의 시동토크 및 무부하특성에 대해서 설계할 수 있었다. 이러한 과정은 자기회로망법을 통해 수행되었다. 영구자석으로는 네오디움계의 자석을 사용하여 높은 에너지밀도를 효율적으로 이용하도록 하였으며 자석의 형상에 따른 자속분포에 대해서 기술하였다. 고정자의 코일은 공극의 효과를 가지고 있으므로 가급적이면 코일의 적층높이가 낮은 것이 자석의 에너지밀도를 극대화하는 방법이 될 것으로 사료되며 이것이 AFPM전동기가 갖는 고효율특성을 최대로 만드는 방법이 될 것임을 확인하였다.

역기전력의 파형에서 보이는데로 전동기의 코깅특성은 거의 이상적인 것으로 보이며 EPS(Electric Power Steering)등 저속의 고품위회전을 요구하는 시스템에서 뛰어난 성능을 갖을 것으로 사료된다. 특히 발전기에 대해서도 이상적인 발전특성을 기대할 수 있다. N-T특성을 검토한 결과 고속의 저토크 영역에서 매우 뛰어난 효율특성을 나타내며 이것은 코어 전동기와 구변되는 가장 특징적인 장점이다. 약계자 특성에서 제시한데로 위상각에 따른 전동기의 속도증감은 크지 않으며 이것은 공심코어의 사용에 기인한 것이다. 따라서 코어없는 AFPM전동기는 넓은 범위의 속도 토크특성을 요구하는 부하보다는 정출력을 요구하는 부하에 더욱 적합하며 특히 고속의 시스템에 적합하다.

향후에는 AFPM모터의 출력밀도의 최적화를 위한 설계가 요구되며 특히 코어의 형상설계에 대한 연구가 병행되어 이루어 져야 할 것이다.

이 논문은 2003년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

[1] G. Maggetto, J. Van Mierlo, "Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey" Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (ref. No. 2000/050), IEE

Seminar, Page(s): 1/1-111, 2000.

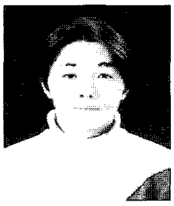
[2] I. Edward, S. Wahsh, M. A. Badr, "Analysis of PMSM drives for electric vehiclesl", SICE '98 Proceedings of the 37th SICE Annual Conference. International Session Papers, Volume: 2, Page(s) : 979-984, 29-31, Jul. 1998.

[3] R. Krishnan, P. Vijayraghavan, "Fast estimation and compensation of rotor flux linkage in permanent magnet synchronous machines",Industrial Electronics, ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on,Volume: 2, Page(s):661-666, 1999.

[4] T. D. Batzel, K. Y. Lee, "Starting method for sensorless operation of slotless permanent magnet synchronous machines",Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Volume: 2, Page(s) : 1243-1247, 1999.

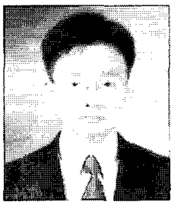
[5] Rong-Jie Wang, M. J. Kamper, K. Van der Westhuizen, J. F. Gieras, "Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-margnet generator",Magnetics, IEEE Transactions on Volume: 41, Issue 1, Part 1, Pasge(s) : 55-64, Jan. 2005.

저 자 소 개



박종찬(朴鍾贊)

1979년 5월 20일생. 2003년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2003~2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최해용(崔海龍)

1973년 2월 8일생. 1996년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 현대기아자동차 연구개발본부 선임연구원.

최규하(崔圭夏)

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 Post-Doc. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 2002년~2004년 건국대 교무처장. 현재 건국대 전기공학과 교수. 에너지전자 신기술연구센터 소장. 당 학회 부회장.