2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2011. 7. 20 - 22

고밀도화 페라이트 자석을 이용한 매입형 영구자석 동기기의 특성 해석

임영훈*, 황선익*,장석명*
충남대학교*

Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines using Thin Type Ferrite Magnet

Young-Hun Im*, Seon-Ik Hwang*, Seok-Myeong Jang
Chungnam National University*

Abstract - 고성능과 고효율 전동기인 매입형 영구자석 동기기에 사용되고 있는 희토류계 영구자석은 높은 가격과 수급 문제로 인해 최근 이슈화 되고 있다. 희토류계 영구자석을 대체하여 페라이트 영구자석을 적용할 수 있지만 낮은 잔류자속밀도로 인해 고출력을 얻을 수 없다는 문제점이 있다. 그러나 최근 높은 잔류자속밀도를 가진 고밀도화 페라이트 자석이 출시되면서 이를 적용한 매입형 영구자석 동기기의 특성을 해석할 필요성을 가지게 되었다. 본 논문에서는 고밀도화 페라이트 자석을 이용한 매입형 영구자석 동기기의 특성 해석을 하였다. 특히 영구자석의 재질 변경으로 인해 동기기의 토크와 토크 리플의 변화를 비교하고 코깅 토크에 의한 변화도 비교하였다. 또한 매입형 회전자 내에 영구자석의 형상을 1층 및 3층으로 적용하여 구조에 따른 해석을 통해 특성을 비교함으로서 고밀도화 페라이트 자석의 효율적인 적용을 얻기 위한 회전자 구조를 선택하고자 한다. 또한 이를 통해 고밀도화 페라이트 자석의 적용 가능성을 예측하고자 한다.

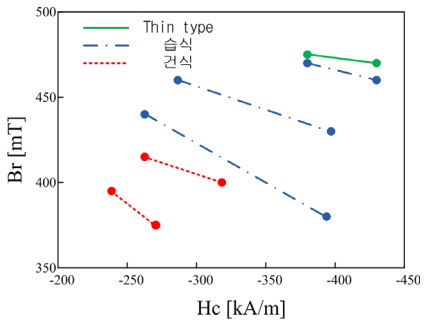
1. 서 론

동기전동기는 다른 교류 전동기에 비해 역률, 효율이 상대적으로 높다. 운전시에 역률이 높기에 교류 전동기 중에서 가장 고급스러운 전동기라 말할 수 있다. 이러한 이유로 최근 친환경 하이브리드시스템용 전동기로 많이 사용되고 있다. 하이브리드 시스템용 전동기는 기존 내연기관 및 하이브리드자동차의 추진 장치인 엔진을 대체하여 배터리에서 발생된 전기를 이용하여 회전토크로 변화하여 구동력을 발생시키는 구동 장치이다. 여기에 사용되는 하이브리드 시스템용 전동기 중 영구자석형 동기기는 95% 이상의 높은 효율과 고속 운전 및 제어의 장점으로 인해 하이브리드 시스템에 적용되고 있으나 높은 제조가격과 고자력 영구자석인 희토류계 자석의 수급 문제 등의 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이런 단점을 극복하고자 희토류계 자석을 대체하여 최근 제조기술 발달로 인해 출시된 고밀도화된 페라이트 자석을 영구자석 동기기에 적용하여 제조가격을 낮추고 자석의 수급 문제를 해결하고자 한다. 잔류자속 밀도가 475mT이고 보자력이 340kA/m인 고밀도화 페라이트 자석을 영구자석 동기기에 적용하여 동기기의 특성 해석을 하고 이를 통해 고밀도화 페라이트 자석의 적용 가능성을 예측하려 한다. [1]~[3]

2. 본 론

2.1 페라이트 영구자석 개요

페라이트 자석에 이어 희토류계 자석의 발명으로 고성능 소자의 실용화가 가능해져 영구자석 동기기는 고성능과 고효율 전동기로서 응용범위를 넓혀 가고 있다. 그 중 영구자석을 로터 내부에 매입한 매입형 영구자석 동기기는 회전기 내부에 영구자석을 매입하기에 자석의 형상과 배치를 자유롭게 설계할 수 있고 마그네트 토크와 더불어 릴럭턴스 토크도 이용되기에 고토크화가 가능하고 고효율의 가변속 범위가 넓은 전동기로 전기자동차 및 하이브리드 자동차용 전동기에 사용되고 있다. 여기에는 희토류 원소를 사용한 희토류 자석이 이용되고 있지만 희토류 원소는 산출국이 한정되어 있기 때문에 최근 산출량 및 국제 거래량이 제한되고 있다. 이로 인해 향후 하이브리드형 시스템 전동기의 보급 확대를 위해서는 영구자석의 안정적인 공급과 비용 저감을 도모할 수 있는 희토류 원소를 사용하지 않는 페라이트 자석의 이용이 요구되고 있다. 그러나 희토류 자석과 비교하면 페라이트 자석은 자력이 약하기 때문에 전동기가 고출력을 얻을 수 없다는 문제가 있다.[2] 최근 기존 페라이트 자석을 axial-gap type



<그림 1> 페라이트 자석 특성 분포

전동기에 적용하여 희토류 자석 전동기에 필적하는 출력을 내는 전동기가 개발되었지만 기존 페라이트 자석을 고밀도화 하여 기존 매입형 영구자석 동기기에 적용할 수 있다면 보다 효율적인 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

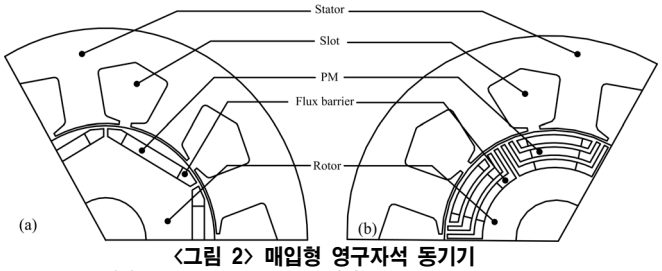
2.2 페라이트 영구자석 특성

그림 1은 최근 페라이트 자석의 재료 특성 분포를 나타낸다. 그림 1을 통해 현재 고밀도화된 페라이트 자석을 생산하고 있는 업체의 재료 개발 동향을 알 수 있다. 페라이트 자석은 제조방법에 따라 접착용 특수 파우더를 이용한 건식(Dry Process)과 물을 이용한 습식(Wet Process)으로 분류되며, 자기의 방향에 따라 등방성(Isotropic)과 이방성(Anisotropic)으로 나누어진다. 이방성은 등방성과는 달리 첨가물이 고온 합성된 강자성 재료로 등방성에 비해 자기특성이 월등하다. 그림 1에서는 이방성의 자기방향 재질만을 보여주고 있다. 건식 제조방법에 의한 잔류자속밀도는 370mT~420mT 사이에 분포 되며 이는 소형 전자기기에 주로 사용되고 있고, 습식 제조방법에 의한 잔류자속밀도는 380mT~460mT 사이로 분포되며 일반적인 전기 전동기 및 액츄에이터에 사용되고 있다. 최근 이방성 제조방법 중 하나인 Thin type으로 제조된 재료의 잔류자속밀도는 475mT까지 향상된 특성을 보이고 있고 소형화 전동기에 사용되면서 페라이트 자석을 고밀도화 시키고 있다. 본 논문에서는 잔류자속밀도가 475mT인 Thin type의 이방성 제조방법으로 제조된 재료를 선택하여 특성 해석을 하였다.

2.3 매입형 영구자석 동기기

2.3.1 매입형 영구자석 동기기 모델

그림 2는 6극 9슬롯의 고밀도화 페라이트 자석을 이용한 매입형 영구자석 동기기의 단면도를 나타내었다. 특성 해석 비교를



<그림 2> 매입형 영구자석 동기기
(a) 1층 영구자석 형상 (b) 3층 영구자석 형상

〈표 1〉 전동기 사양

항목	사양 [단위]
고정자 외경	100 [mm]
회전자 외경	54 [mm]
정격속도	6540 [rpm]
극수	6
슬롯수	9

위해 회전자내 영구자석의 형상이 1층인 동기기와 3층인 동기기를 선택하여 각각 그림 2의 (a),(b)로 나타내었다. 영구자석이 3층인 동기기는 전류가 커져도 자기포화의 영향을 1층인 동기기보다 크게 받지 않고 과부하에 강한 회전자 구성이고 d축 ,q축 인덕턴스의 차가 증가되지 않아 영구자석의 자속과 q축 인덕턴스 성분에 의한 자속을 최대한 유효하게 이용할 수 있는 회전자 구성이다. 또 자석 두께가 얇아지므로 전기자 전류에 의한 영구자석의 감자내력이 약해지기에 페라이트 자석을 사용하는 경우 유리한 면이 있다. 이를 통해 영구자석의 형상이 1층인 것과 3층인 것에 대한 특성 해석으로 고밀도화 페라이트 자석에 유리한 매입형 영구자석 형상을 선택하고자 한다. 그리고 표 1은 6극 9슬롯의 매입형 영구자석 동기기의 사양을 나타낸 것이다.[1]

2.3.2 매입형 영구자석 동기기 해석

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기기에 대해 유한요소법을 이용하여 특성에 대한 자계 해석을 실시하였다. 유한 요소법을 이용하여 자계해석을 할 경우 자속 밀도가 높은 부분이나 자속 밀도의 변화가 큰 부분을 정확히 계산할 수 있고, 회전자내의 영구자석 형상에 관계없이 정확한 계산을 할 수 있다는 특징이 있다. 이로 인해 회전자내의 복잡한 구조를 가진 영구자석 1층과 3층 구조인 동기기에 적합한 해석 방법이기에 유한요소법을 이용한 해석을 실시하였다.[1]

2.4 토크, 토크 리플 및 코깅 토크 특성

2.4.1 토크 리플 및 코깅 토크 개요

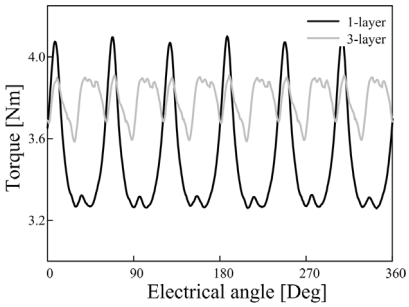
전류를 도통하지 않았을 때의 코깅토크와 전류를 도통하였을 때 통전시의 토크 리플을 계산하여 특성을 비교하였다. 영구자석의 형상이 1층과 3층에 대해 토크리플, 코깅토크 해석을 통해 매입형 영구자석의 노이즈 차이를 얻고자 하였다. 일반적으로 코깅토크는 회전자 위치에 따른 고정자와 회전자의 자기 흡인력의 작용에 의해 발생하고 토크리플은 전류에 따른 자속과 영구자석에 따른 자속과의 상호 작용에 의해 발생하므로 코깅토크와 토크리플은 영구자석의 재질 특성에 따라 변화하게 된다. 이는 진동 및 소음을 증대시키는 원인이 되기에 저감이 필요하게 된다.

2.4.2 토크, 토크 리플 및 코깅 토크 해석

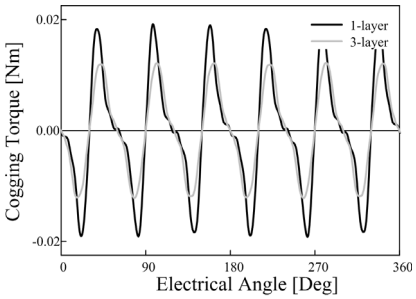
그림 3은 고밀도화 페라이트 자석을 사용하여 토크 및 토크리플을 본 그림이다. 영구자석이 3층인 모델의 경우 영구자석이 1층인 모델의 경우에 비해 토크의 값은 10% 증가를 하였고, 토크리플은 40% 이하로 감소를 하였다. 코깅토크의 경우는 그림 4에서 보여지는 바와 같이, 영구자석이 3층인 모델의 경우 영구자석이 1층인 모델의 경우에 비해 63%로 감소하였다. 이를 통해 고밀도화 페라이트 자석을 사용할 경우 영구자석이 3층인 모델에 적용해야 함을 알 수 있다.

2.4.3 동기기의 회전자 구조에 따른 해석

표 2는 매입형 동기기의 회전자내 영구자석의 다양한 형상에 따른 토크 및 토크리플에 대한 해석 결과이다. 영구자석이 1층인 모델에 비해 영구자석이 3층인 모델의 토크, 토크리플과 코깅토크가 향상되었다. 추가로 영구자석이 3층인 모델 중에 영구자석의 두께를 1mm 증가한 경우와 영구자석 내 배리어를 모따기 한 모델의 특성을 표 2를 통해 알 수 있다. 영구자석의 두께를 증가한 모델 및 배리어를 모따기 한 모델은 영구자석이 3층인 모델과 토크는 유사함을 알 수 있다. 그러나 토크 리플은 자석의 두께를 증가한 모델이 4.4%, 배리어를 모따기 한 모델은 3% 증가함으로서 결국 영구자석이 3층인 모델이 토크 리플이 가장 최소의 값을 가짐을 알 수 있다. 이를 통해 고밀도화 페라이트 자석을 사용할 경우 영구자석이 3층인 모델이 동일한 토크에서 최소의 토크 리플의 특성을 나타냄을 알 수 있다.



〈그림 3〉 고밀도화 페라이트 자석의 토크 및 토크리플



〈그림 4〉 고밀도화 페라이트 자석의 코깅토크

〈표 2〉 1층인 모델과 3층 기본 모델 및 변형 모델의 토크 및 토크리플

	토크 [Nm]	토크리플 [Nm]
영구자석 1층	3.49	0.84
영구자석 3층	3.79	0.33
영구자석 3층의 자석 두께 증가	3.82	0.34
영구자석 3층의 배리어측 모따기	3.81	0.34

3. 결 론

고밀도화 페라이트 자석을 기존 희토류계 영구자석을 이용한 매입형 영구자석 동기기에 적용하여 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였다. 고밀도 페라이트 자석이 적용된 동기기는 영구자석의 형상이 1층인 경우와 3층인 경우로 선택하여 영구자석 재질의 변화에 따른 토크와 토크리플과 코깅토크 값을 비교하였다. 이때 영구자석이 1층인 경우보다 영구자석이 3층인 경우 토크는 10% 증가하였고 토크리플은 40% 개선됨을 알 수 있었다. 추가로 회전자내 영구자석의 다양한 형상에 따른 비교를 통해 영구자석의 두께 증가 및 배리어의 모따기 모델과 비교시 영구자석이 3층인 경우 동일한 토크에서 3~4%의 토크리플 증가폭을 가짐을 알 수 있었다. 이를 통해 다른 형상과 비교하여 영구자석이 3층인 모델이 동일한 토크에서 최소의 토크 리플 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 희토류계 영구자석을 사용한 동기기의 토크와 고밀도화 페라이트 영구자석을 사용한 동기기의 토크를 비교하면 희토류계 영구자석 동기기의 55% 정도 토크 값을 고밀도화 페라이트 영구자석을 사용한 동기기가 가지게 된다. 이는 희토류계 영구자석 동기기와 비교해서 여전히 낮은 토크 값을 얻게 되지만 토크 리플이 47% 개선됨으로서 고밀도화 페라이트 자석의 적용 가능성을 보였다. 결국 이를 통해 향후 고밀도화 페라이트 적용한 영구자석 동기기의 토크 값에 맞는 모델에 대해 적용 방향을 찾아야 할 필요성이 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 한양대학교 에너지변환연구실 譯,매입형 동기모터의 설계 및 제어, 인터비젼, 2007
[2] 大川光吉, “페라이트 磁石回轉機의 設計”, 동일출판사
[3] 장석명, 김관호, 최장영, 정상섭, “매입형 페라이트 영구자석 가동자를 갖는 직선형 왕복운동 전동기의 설계 및 해석” 2011년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp. 127-129, 2011