

연자성 분말을 이용한 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계

황홍식, 이치우
부산대학교

Design of a High Speed Switched Reluctance Motor with Soft Magnetic Composite Core

Hongsik Hwang, Cheewoo Lee
Pusan National University

Abstract - 본 논문은 고속 전동기의 효율 개선을 위한 재료로서 많은 관심을 받고 있는 연자성 분말(Soft Magnetic Composite, SMC)을 적용한 고속 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계 및 SMC 재질이 효율 특성에 미치는 영향 분석에 대한 연구이다. 고속 전동기의 효율 개선을 위한 재료로서 많은 관심을 받고 있는 SMC는 자체적으로 등방성을 띠며, 절연 코팅이 되어 있는 철 분말들로 구성되어 있어 높은 주파수에서 전기 강판 대비 높은 전기 저항으로 와전류 손실을 최소화 할 수 있으며 분말을 압분하여 형상을 만들기 때문에 자유로운 3차원 설계 및 제작이 용이하고 제조 시 재료 소비의 절감과 재활용이 가능한 장점이 있다. 그러나 전기 강판 대비 낮은 비투자율, 낮은 기계적 강도, 저주파 대역에서 높은 철손 특성의 단점을 가지고 있어 SMC를 이용한 전자계 구조 설계 시 낮은 비투자율 특성과 뛰어난 와전류 손실 저감 특성 사이의 균형을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 전기 강판을 사용하는 일반적인 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기와 비교를 통해 SMC 재질 적용이 정적 토크 및 효율 특성에 미치는 영향을 비교 분석하여 설계를 진행하였다.

1. 서 론

최근 고속 회전기 시스템은 소형화, 비용 절감 및 고효율 특성을 피할 수 있는 장점이 있어 가전제품 및 산업용으로 많은 관심을 받는 분야중 하나이다. 기존 고속회전기 시스템의 동력원으로 구조적으로 견고하고 유지보수가 쉬운 유도전동기가 많이 사용되어 왔으나 운전 시 입력되는 고주파수로 인한 동손과 철손 증가로 효율저감 문제를 개선하는데 많은 어려움이 있다. 이를 대체하기 위한 동력원으로 직류 전동기와 영구자석 교류전동기 등이 있으나 고속에서 브러시 사용의 어려움과 영구자석의 소자현상 및 기계적 파괴 등이 문제시 되고 있다. 반면, 영구자석과 권선이 없는 회전자를 가지는 스위치드 릴럭턴스 전동기는 간단하고 견고한 구조를 가지며 다양한 상 조합과 극 조합이 가능한 장점 때문에 고속 회전기의 동력원으로 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 본 논문에서는 동작 주파수가 낮아 철손에 유리한 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기를 채택하여 연구를 진행 하였다.

전동기의 철손은 동작 주파수에 비례하는 히스테리시스 손실과 동작 주파수 자속에 비례하는 와전류 손실이 있다. 고속 운전 시 와전류 손실이 모터 손실에서 차지하는 비중이 급격히 증가하므로 효율 향상을 위해서는 와전류 손실 저감이 반드시 동반되어야 한다. 일반적으로 와전류 손실을 줄이기 위해 얇은 전기 강판을 적용하여 전기 저항을 증가시키는 방법을 사용하고 있으나 이는 재료비 상승을 초래하고 전기 강판의 타발 작업성을 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 시장에서 상용중인 가장 얇은 전기 강판을 이미 사용한 경우 더 이상의 대안이 없으므로 고속에서 고효율 운전이 가능한 근본적인 아이디어 도출이 절실한 상황이다. 이러한 시대적 흐름 때문에 연자성 분말(Soft Magnetic Composite, SMC)을 접목한 연구가 최근 들어 많은 관심을 받고 있다[2, 3].

연자성 재질은 자체적으로 등방성을 띠며, 절연 코팅이 되어 있는 철 분말들로 구성되어 있어 높은 주파수에서 전기 강판 대비 높은 전기 저항으로 와전류 손실을 최소화 할 수 있으며 분말을 압분 하여 형상을 만들기 때문에 자유로운 3차원 설계 및 제작이 용이하고 제조 시 재료 소비의 절감과 재활용이 가능한 장점이 있다. 그러나 전기 강판 대비 낮은 비투자율, 낮은 기계적 강도, 저주파 대역에서 높은 철손 특성의 단점을 가지고 있어 연자성 분말을 이용한 고속 전동기 설계 시 낮은 비투자율 특성과 뛰어난 와전류 손실 저감 특성 사이의 균형을 고려할 필요가 있다.

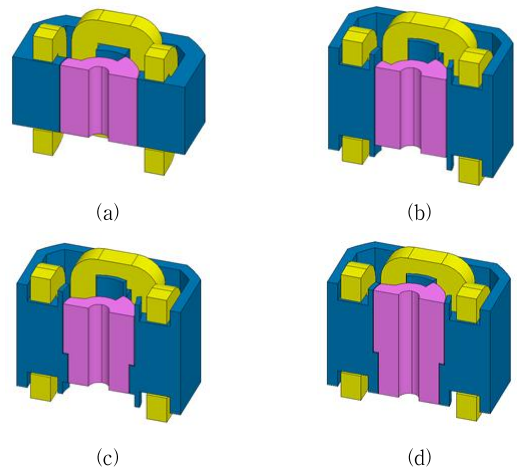
본 논문에서는 전기 강판을 사용하는 일반적인 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기를 기존 모델로 하여 정적 토크 특성 비교를 통해 3차원 구조를 갖는 스위치드 릴럭턴스 전동기를 설계하였으며, 동적 효율 특성 비교를 통해 SMC 재질 적용이 효율에 미치는 영향의 비교 분석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 SMC를 이용한 3차원 전자계 구조 설계

본 논문에서 설계할 고속 전동기는 4개의 고정자 자극과 2개의 회전자 자극을 가지는 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기로서 정적 속도 70,000rpm에서 정격 출력 1kW를 목표로 한다.

그림 1은 특성 분석에 사용된 4가지 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기의 3차원 형상 구조 단면을 나타낸다. 그림 1(a)는 SMC를 적용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 비교대상으로 선정된 일반적인 구조의 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기이며, 그림 1(b)~(d)는 본 연구에서 SMC를 적용하여 3차원 구조로 재설계한 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기들을 보여 주며, 각 전동기들의 치수적인 사양은 표 1에 나타내었다.



〈그림 1〉 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기의 3차원 형상 구조 단면 (a)base, (b)ver.0.1, (c)ver.0.2, (d)ver.0.3

〈표 1〉 설계 비교

항목	단위	내용			
설계 버전	-	base	ver.0.1	ver.0.2	ver.0.3
고정자 외경	mm	70	64.85	64.85	64.85
고정자 자극 적층 길이	mm	25	25	25	25
권선 공간	mm ²	55.38	55.38	55.38	55.38
xy 단면적	mm ²	3258.1	2695.7	2695.7	2695.7
총 부피	mm ³	46318	40818	40763	42968

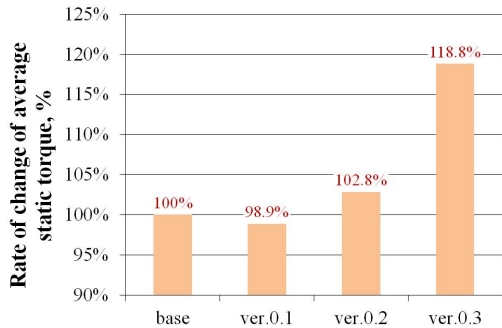
그림 1(b)는 표 1의 ver.0.1에 해당되는 1차 설계안으로 적층 길이 방향으로 base 모델과 동일한 고정자 자극을 가진다. 반면 SMC의 3차원 구조 설계 용이성을 이용하여 고정자 자극 끝단의 높이를 고정자 요크 높이까지 키우고, 요크의 자속 통로 단면적을 base 모델과 같아지도록 요크 두께를 줄이는 한편 높이를 고정자 자극 적층 길이 보다 증가 시켜 전동기가 차지하는 부피가 감소하도록 설계를 하였다. 이때, base 모델과 동일한 권선 공간을 유지하였으며 같은 단면적의 회전자 자속 통로를 가지도록 회전자 적층 길이를 변경하였다. 이와 같이 설계 변경을 할 경우 권선의 고정자 절연을 위한 별도의 구조물이 필요 없어 재료비 절감을 기대 할 수 있으며 SMC를 이용한 3차원 설계를 통해 동일한 전자계 특성을 가지면서 고정자 최외각 길이를 축소 할 수 있는 장점이

있다. 그림 1(c)는 표 1의 ver.0.2에 해당되는 2차 설계안으로 ver.0.1의 공극 부분에서 고정자 자극과 회전자 자극의 일부를 중첩하여 축 방향 자속 통로를 추가하여 공극에서 자속 통로의 단면적을 넓히고, 토크 특성 개선을 유도한 설계안이다. 여기서 공극 중심 부분에서 중첩하면 단면적이 넓어져 더 큰 자속 통로를 만들 수 있으나 조립성과 양산성이 떨어진다. 3차 설계안인 그림 1(d)의 ver.0.3은 SMC의 낮은 비투자율 특성을 고려하여 고정자 자극 끝단 길이 방향 상층분까지 회전자 자극을 늘리고, 공극 단면적을 최대한 증가시켜 토크 특성을 극대화하는 설계이다.

2.2 정적(static) 토크 성능 비교

3차원 구조 설계가 가능한 SMC의 장점을 살린 3가지 모델들의 정적 토크 특성을 확인하기 위해서는 base 모델과의 비교가 반드시 시행되어야 한다. 이때, base 모델과 동일한 권선 수와 전류에서 시뮬레이션을 실시하였으며, 3차원 구조가 갖는 토크 특성을 재질의 변화를 배제하고 비교하기 위해서 모든 설계의 재질을 base 모델과 같은 전기 강판을 사용하였다.

그림 2는 이와 같은 시뮬레이션 조건에서의 평균 정적 토크를 base 모델과 비교한 것이다. ver.0.1의 경우 3차원 설계과정에서 base 모델과 동등 수준의 릴럭턴스를 유지하였기 때문에 동등 수준의 정적 토크 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. ver.0.2와 ver.0.3의 경우 고정자와 회전자의 중첩구간과 회전자 적층 길이증가를 통해 공극 릴럭턴스를 개선을 하였기 때문에 각각 2.8%와 18.8%의 평균 토크의 증가를 확인할 수 있다. 본 논문에서는 SMC의 낮은 비투자율 특성을 고려하여 토크 특성이 가장 좋은 ver.0.3을 이용하여 연구를 진행 하였다.



〈그림 2〉 동일 재질 조건에서의 평균 정적 토크 비교

전기 강판에서 SMC로 재질을 변경할 경우 토크 특성 변화를 확인하기 위해서 ver.0.3의 고정자와 회전자의 재질 조합을 다르게 하여 시뮬레이션을 진행하였으며 표 2에 그 결과를 요약하였다. ver.0.3의 고정자와 회전자가 모두 전기 강판일 경우 base 모델대비 18.8%의 평균 토크 상승을 기대 할 수 있지만, 모두 SMC를 사용할 경우 17.3%의 토크 감소가 일어난다. 동일한 ver.0.3의 전자계 구조에서 전기 강판을 SMC로 재질만 변경하였기 때문에 토크 감소 원인은 SMC 재질의 낮은 비투자율 특성과 직접 관계됨을 알 수 있다. 전기강판 고정자와 SMC 회전자를 조합 할 경우 고정자 대비 회전자의 작은 부피 때문에 13.5% 토크 상승을 기대 할 수 있다. 그러나 SMC의 낮은 기계적 강도 특성은 70,000rpm 구동에 제약이 따르므로 SMC 고정자와 전기 강판 회전자 조합을 채택하였다. 결론적으로 고정자의 재질을 전기 강판에서 SMC로 바꾸면 base 모델 대비 33.3% 낮은 토크 특성을 가지게 되어 효율에 악영향을 미치지만 동시에 SMC 재질의 뛰어난 와전류 손실 저감 특성은 효율 향상에 기여를 하므로 동적 특성 성능 비교를 통해 나쁜 토크 특성과 와전류 손실 저감 사이에서의 균형을 확인할 필요가 있다.

〈표 2〉 재질 변경에 따른 평균 정적 토크 비교

설계 버전	base	ver.0.3				
		고정자	회전자	전기 강판	SMC	
정적 토크	Nm	0.1738	0.2064	0.1972	0.1486	0.1438
평균	%	100.0%	118.8%	113.5%	85.5%	82.7%

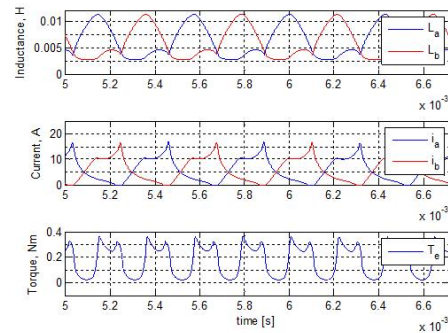
2.3 동적 성능 비교

SMC 재질 특성을 이용해 3차원 설계된 ver.0.3과 base 모델의 동적 성능 비교를 위해 70,000rpm에서의 단일 펄스(single pulse) 동작 시 같은 출력에 대한 동특성 시뮬레이션 결과를 표 3에 요약하였다. base 모델의 고정자 및 회전자와 ver.0.3의 회전자에 사용된 전기 강판은

0.35mm 두께의 35PN270을 적용하였다. 표 3으로부터 ver.0.3의 고정자를 SMC 재질로 변경하여 떨어진 토크 특성 때문에 base 모델과 동일 출력을 만들기 위해선 더 큰 전류가 필요한 것을 확인할 수 있다. 따라서 ver.0.3의 경우 base 모델보다 동손이 8.9W 증가한 것을 알 수 있다. 반면, 고주파 대역에서 뛰어난 와전류 손실 감소 특성을 가지는 SMC로 인해 base 모델보다 철손은 7.4W 줄어든 것을 알 수 있다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 ver.0.3의 경우 SMC의 낮은 비투자율 특성으로 인한 토크 특성 감소분을 뛰어난 와전류 손실 특성으로 보상을 하여 base 모델과 동일 출력에서 동등 효율 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

〈표 3〉 70,000rpm에서 예측된 동적 특성 비교

항목	단위	내용	
설계 버전	-	base	ver.0.3
	고정자	35PN270	SMC
회전자	-	35PN270	35PN270
상 전류	Arms	4.073	6.125
속도	rpm	70,000	70,000
토크	Nm	0.141	0.142
동손	W	39.7	48.6
철손	W	72.6	65.2
출력	W	1032.1	1041.6
효율	%	88.6	88.6



〈그림 3〉 ver.0.3의 동특성 시뮬레이션 파형

3. 결 론

본 논문에서는 고속 전동기의 효율 개선을 위한 재료로써 대두되고 있는 SMC 재질을 고정자에 적용한 70,000rpm의 고속 구동이 가능한 1kW급 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계 및 SMC에 적용에 따른 특성 변화를 비교 분석하였다. SMC의 자유로운 3차원 설계 이점을 살려 시스템에서 전동기가 차지하는 면적과 부피를 base 모델 대비 각각 17.3%와 7.2%를 줄일 수 있었다. 정적 토크 특성에서는 적용된 재질이 전기 강판일 경우 18.8%의 평균 토크 상승이 가능하였으나, SMC 고정자를 사용할 경우 낮은 비투자율 특성으로 인해 13.5%의 평균 토크의 감소가 있어 동적 성능에서 동손이 증가하였다. 반면, SMC의 장점인 낮은 와전류 손실 특성 때문에 base 모델 대비 철손이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 ver.0.3에서 SMC의 단점인 낮은 비투자율 특성을 장점인 와전류 손실 특성으로 보상하여 base 모델과 동등 수준인 88.6%의 효율 특성을 보이는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과로부터 SMC를 적용하여 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기의 효율을 개선하기 위해서는 3차원 설계를 이용하여 낮은 비투자율 특성을 극복하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] R. Krishnam, Switched Reluctance Motor Drives. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
- [2] C. Henaux, B. Nogaede, and D. Harribey, "A New Concept of Modular Permanent Magnet and Soft Magnetic Compound Motor Dedicated to Widespread Application," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 6, pp. 2035-2043, Jun. 2012.
- [3] Takeo Ishikawa, Kazutoshi Takahashi, Quang Viet Ho, Michio Matsunami, and Nobuyuki Kurita, "Analysis of Novel Brushless DC Motors Made of Soft Magnetic Composite Core," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no 2, pp. 971-974, Feb. 2012.