

영구자석 감자를 고려한 사마륨 코발트(Sm₂Co₁₇) 자석을 이용한 도시철도차량 견인용 IPMSM의 설계

박문수*, 홍현석*, 최대준*, 함상환**, 이 주*
한양대*, 경일대학교**

Design of IPMSM considering demagnetization using Sm₂Co₁₇ for urban railway traction application

Moon-soo Park*, Hyun-seok Hong*, Tae-jun Choi*, Sang-hwan Ham**, Ju Lee*
Hanyang University*, Kyungil University**

Abstract - 본 논문은 210kW급 도시철도차량 견인용 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 온도포화를 고려할 경우 사마륨 코발트 영구자석(Sm₂Co₁₇) 사용의 타당성을 검증하는 논문이다. 기존에 설계되고 있는 Nd 자석과 사마륨 코발트 자석을 비교하고 각각의 자석을 사용한 IPMSM의 특성을 비교한다. 온도 시험은 영구자석 감자를 대비하여 사마륨 코발트 자석을 사용하였고, 전동기 각 상 권선의 온도와 고정자 철심의 온도변화를 시간에 따라 측정하여 전동기의 포화온도를 예측 하였다. 이를 바탕으로 전폐형 공랭식 도시철도차량 견인용 IPMSM의 설계모델을 제안한다.

1. 서 론

세계적으로 에너지 절약에 대한 관심이 높아지면서 현재 국내 도시철도 기관에서는 철도 차량의 견인용 전동기를 기존에 사용하는 IM (Induction Motor)에서 효율이 더 높은 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 교체하기 위한 노력이 진행 중이다. 그런데 철도차량 견인용 전동기는 일반적으로 대차의 차축에 설치하므로 공기중에 먼지 또는 이물질이 많다. 그렇기 때문에 이물질이 전동기 내부로 유입되는 것을 막을 수 있는 구조 설계가 필요하다. 그 중 하나로 전동기의 하우징을 전폐형 구조로 설계하는 방법이 있다. [1]

일반적으로 IPMSM에는 상온에서 자속 밀도가 상당히 높다고 알려진 희토류 Nd 자석을 사용하는데, 철도차량 견인용 전동기와 같은 고용량의 전동기는 온도가 많이 올라가므로 고온에 의한 영구자석의 불가역 감자를 고려해야한다. 게다가 전폐형 구조의 특성상 열의 순환이 어려우므로 온도 상승에 대한 대비가 필요하다. 또한 희토류 계열의 자석은 온도가 증가할수록 잔류자속밀도와 보자력이 감소하는 특성이 있다. [2] 일반적인 Nd자석의 경우 약 180℃에서 감자가 일어나기 시작하기 때문에 본 논문에서는 회전자의 영구자석을 열 감자에 강한 사마륨 코발트 자석(Sm₂Co₁₇)을 사용하여 분석하였다. 사마륨 코발트를 사용하여 설계한 전동기와 Nd 자석을 사용하여 설계한 전동기를 비교 분석 하여 210[kW]급 철도차량 견인용 전동기에 사마륨 코발트 자석을 사용하는 것에 대한 타당성을 제안한다. 본 논문에서 실험에 사용되고 있는 전동기는 최종 전동기를 설계하기 전 성능 평가를 위해 제작된 전동기이다. 또한 본 논문에서 제안하는 시험평가 및 결과는 추후 제작될 210[kW]급 도시철도차량 견인용 공랭식 전폐형 전동기 설계를 위한 자료 수집을 위해 진행 된 것으로 정적입력이 아닌 추정 값을 입력하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM 사양

본 논문에 사용되는 전동기는 210kW급 IPMSM으로 기존 도시철도차량에 사용되는 IM의 대체용으로 설계한 모델이다. <표 1>에 IPMSM 전동기의 설계 파라미터 값이 나타나있다.

<표 1> 전동기 파라미터

구 분	요 구 조 건		단 위	
DC link.	1500		V	
상 전류	220	155.5	Apeak	Arms
정격속도 / 최대속도	2400	6000	rpm	
토 크	835	334	Nm	
상저항	39.224		mΩ	
고정자 직경	435		mm	
회전자 직경	260		mm	
적층 길이	220		mm	

<표 2>는 Nd를 사용한 전동기와 사마륨 코발트 자석을 사용한 전동기를 전자장 해석 프로그램을 사용해 최적설계 한 후 비교한 결과이다.

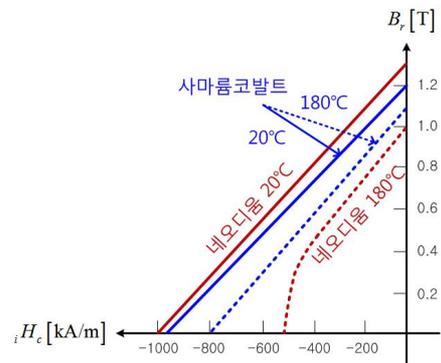
<표 2> Nd 자석과 사마륨 코발트 자석을 사용한 전동기의 성능 비교

항목	Nd(N38UH)	Sm ₂ Co ₁₇	단위
토크	860.8	850.7	Nm
철손	2847.6	2635.4	W
마그넷 손	46	56.4	W
공극출력	216.3	213.8	kW
효율	97.81	97.95	%

2.2 IPMSM 열 감자 해석

2.2.1 Nd 자석과 Sm₂Co₁₇ 자석의 온도에 따른 자속밀도

<그림 1>은 Nd 자석, 사마륨 코발트 자석의 20℃, 180℃에서의 감자 곡선을 나타낸 그림이다. 두 자석 모두 온도 상승에 따라 Br 값이 감소하지만 사마륨코발트에 비해 네오디움의 Br 값 하락 폭이 큰 것을 알 수 있다. 또한 온도 상승에 따라 네오디움 자석은 2 사분면에 무류점이 생기지만 사마륨 코발트의 경우 무류점이 없는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 상온에서의 Nd자석, 사마륨 코발트 자석의 감자곡선

2.2.2 Nd 자석과 Sm₂Co₁₇ 자석의 온도에 따른 자속밀도 비교

Nd 자석과 사마륨 코발트 자석의 Br 값은 온도에 따라 큰 차이를 보인다. 상온인 20℃ 근처에서는 Nd 자석이 사마륨 코발트 자석에 비해 더 큰 Br 값을 갖지만, 전동기의 최대 허용 포화온도로 볼 수 있는 약 180℃에서는 사마륨코발트 자석의 Br 값이 더 크다. 온도에 따른 Br 값은 아래의 식을 이용하여 계산하였다. 이때 N38UH의 온도계수는 -0.04 [%/℃], Sm₂Co₁₇의 온도계수는 -0.12 [%/℃]이다.

온도에 따른 Br 값 계산식

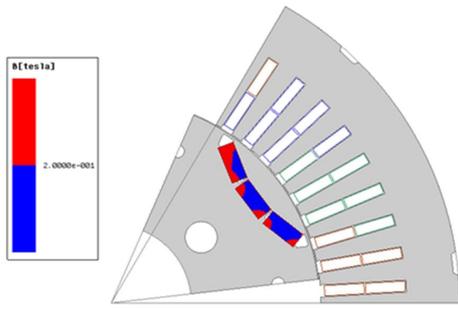
$$= B_r(\text{기준온도}) \times \{1 + (\text{동작온도} - \text{기준온도}) \times (\text{온도계수}/100)\}$$

<표 3> 온도에 따른 자속밀도 비교

온도	Nd(N38UH)	Sm ₂ Co ₁₇
20 ℃	1.22 [T]	1.12 [T]
120 ℃	1.0736 [T]	1.0752 [T]
180 ℃	0.98576 [T]	1.04832 [T]
200 ℃	0.95648 [T]	1.03936 [T]

2.2.2 Nd(N38UH)자석을 사용한 IPMSM 열 감자 해석

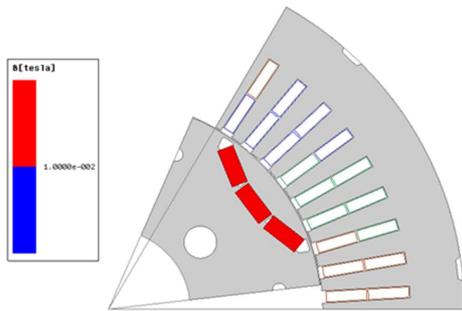
전동기의 내부 온도가 180℃라고 가정 하고 Nd 자석을 사용하여 설계 하였다. 180℃에서의 Br 값을 설정 하고 고정자 권선에 정격 전류를 인가하여 감자 해석을 한 결과 <그림 2>와 같이 자석이 상당히 많이 감자된 것을 확인 했다.



〈그림 2〉 Nd 자석의 감자 해석

2.2.3 Sm₂CO₁₇를 사용한 IPMSM 열 감자 해석

전동기의 내부 온도가 180℃라고 가정 하고 사마륨 코발트 자석을 사용하여 Nd 에서와 같은 방식으로 감자해석을 한 결과 <그림 3>과 같이 자석이 감자되지 않는 것을 확인했다. 180℃에서 사마륨 코발트 자석의 무릎점은 2사분면에 존재하지 않으므로 보자력 이하의 자계 하에 서는 감자되지 않는다.



〈그림 3〉 사마륨 코발트 자석의 감자 해석

2.3 IPMSM 온도 포화 시험

IPMSM의 내부 온도 측정을 위해 <그림 4>에 나타난 것과 같이 A상 권선, 고정자 철심, B상권선, C상권선에 직접 선을 연결 하였다. 연결된 선을 디지털 온도계에 연결하여 직접 온도를 측정하였다. 이 시험에서는 전동기의 입력전류를 정격전류인 220[Apeak] 가 아닌 190.7[Apeak]로 인가하였다. 전류 값(190.7[Apeak])은 손실이 모두 열로 전환된다고 가정하고, 현재 모델(전류밀도 5.7[Arms/mm²])에서 전류밀도 4[Arms/mm²]로 설계된 전동기를 정격 운전 할 때 와 같은 열이 발생하도록 전자장 해석 프로그램을 사용하여 추정한 값이다.

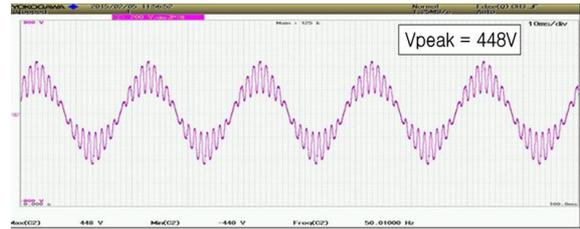


〈그림 4〉 온도포화시험

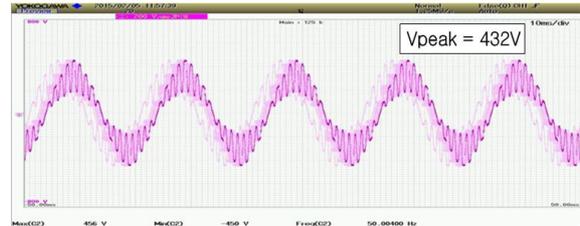
2.3.1 Sm₂CO₁₇ IPMSM의 무부하 역기전력

<그림 5>, <그림 6>은 온도포화 시험 전 약 20℃부근에서의 역기전력 파형과 약 180℃에서 운전 후 재측정 한 역기전력 파형이다. 시험 결과를 보면 시험 후 전동기의 온도 상승으로 인해 역기전력의 크기가 소폭 감소한 것을 확인 할 수 있다. 전동기의 온도가 상승 할 경우 영구자석의 자속량이 감소하는 것 뿐 아니라 자성체 강판에서의 인덕턴스 값도 영향을 받기 때문에 이 영향을 고려해야 하지만 본 논문에서는 고려하지 않았다. [3] 그림을 보면 시험 전 후의 역기전력 파형을 비교해 보면 역기전력의 크기가 감소한 것을 알 수 있다. 그러나 전동기 설계 시 영구자석의 Br 값을 약 180℃부근에서의 Br 값으로 설계 하였으므로

요구출력을 내기에 충분하며 불가역 감자의 우려가 없다.



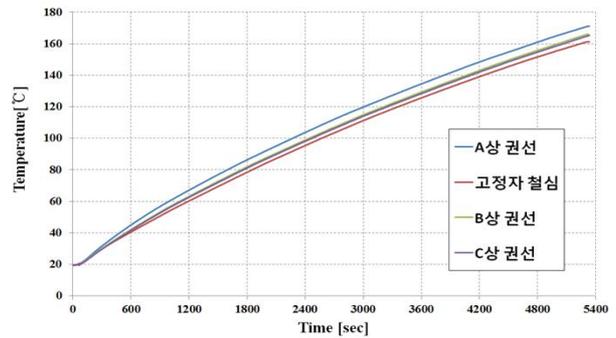
〈그림 5〉 시험 전 무부하 역기전력 (@1000rpm, 448Vrms)



〈그림 6〉 시험 후 무부하 역기전력 (@1000rpm, 432Vrms)

2.3.2 온도 특성

철도차량 견인용 전동기를 실차에 적용하기 위해서는 안정성 검증을 위해 온도포화시험이 필요하다. <그림 7>은 반폐형으로 설계된 전동기의 내부 팬 및 외부 냉각 구조 없이 시행한 온도 포화 곡선 그래프이다. 온도 상승이 가장 많은 A상 권선의 경우 1시간 시험 후 약 135℃, 1시간 30분 시험 후 약 170℃까지 상승하였다. 온도가 180℃ 근처까지 상승 하였으나 온도가 포화되지 않았고, 시간에 따라 더 증가 할 것으로 보인다. 그러므로 본 논문에서 시험 운전한 전동기는 반드시 냉각 구조가 필요하다.



〈그림 7〉 온도 포화 곡선 (전폐형)

3. 결 론

210kW급 도시철도차량 견인용 영구자석 전동기의 자석으로 Nd자석(N38UH)을 검토해 본 결과, Nd 자석은 고온 감자에 취약하므로 적합하지 않은 것을 확인했다. Nd 자석을 대신하여 사마륨 코발트 (Sm₂CO₁₇) 자석을 삽입하여 해석 해 본 결과 Nd 자석을 사용한 경우와 비교하여 거의 동등한 출력을 내며 고온 감자에 대해 강점을 보였다. 그러므로 210kW급 영구자석 전동기에 Nd 자석에 비해 사마륨 코발트 자석이 더 적합한 것을 확인 하였다. 그러나 영구자석의 감자와 상관없이 코일, 접착제 등 전동기의 절연 열화를 대비한 냉각 구조가 필요하다. IPMSM 특성 상 전폐형 구조가 필요하므로 전폐형인 동시에 전동기 냉각을 고려한 하우징 구조에 대한 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박찬배, "도시철도차량의 운행패턴을 고려한 견인용 IPMSM의 열특성 분석", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, No. 3, pp. 431-436, 2014
- [2] 조을규, "온도상승에 따른 IPMSM의 영구자석 감자를 고려한 형상설계", 2014년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, 2014
- [3] 강경호 "자기포화를 고려한 PMSM타입 전동기의 영구자석 평균온도 간접 추정 방법", 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2011