

자속 장벽에 의한 IPMSM의 온도 상승 억제 효과

조을규, 조광진, 김규탁
창원대학교

Temperature Rising Suppression Effect of IPMSM by the Flux Barrier

Eul-Gyu Jo, Kwang-Jin Cho, Gyu-Tak kim
Changwon National University

Abstract - 영구자석 전동기(PMSM)의 온도 상승은 권선 저항 증가에 의한 동손 증가와 회로류 계열 영구자석의 성능 저하, 고온 불가역감자 등의 원인이 되기 때문에 전동기의 성능이 저하되고 수명이 단축된다. 따라서 본 논문에서는 영구자석의 온도 상승 억제를 위하여 자속 장벽을 설치하고, 이를 열 등가회로망으로 열 해석을 수행하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기는 영구자석과 전기자 전류에 의한 마그네틱 토크 성분과 릴럭턴스 토크 성분을 함께 가지므로 단위 체적 당 높은 토크를 얻을 수 있다[1]. 매입형 영구자석 전동기의 운전 특성상 고속 영역에서 큰 철손이 발생하고, 고 출력밀도에 의한 큰 동손의 발생이 불가피 하다. 이러한 열원의 발생은 전동기의 온도를 상승시키는 단점이 있다[2]. 영구자석 전동기(PMSM)의 온도 상승은 권선 저항 증가에 의한 동손 증가와 회로류 계열 영구자석의 성능 저하, 고온 불가역감자 등의 원인이 되기 때문에 전동기의 성능이 저하되고 수명이 단축된다. IPMSM에서 자속 장벽은 코깅 토크 저감에 의한 토크리플 저감 및 영구자석 모서리 끝단의 감자 내력 증가를 위하여 회전자에 설치된다[3-4]. 본 논문에서는 영구자석의 온도 상승 억제 측면에서의 자속 장벽 효과를 고찰해보았다. 회전자에 자속 장벽을 설치한 후, 열 등가회로망을 구성하여 열 해석을 수행하였다.

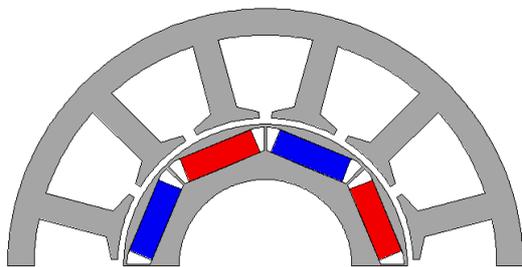
2. 본 론

2.1 해석 모델

본 논문에 사용된 전동기는 600[W]급 IPMSM이다. 정격 속도 3000[rpm]에서 1.91[Nm]의 정격 토크를 내며 이때의 정격 전류는 24[A]이다. 전동기의 형상은 그림 1, 그림 2에 나타내었다.

〈표 1〉 해석 모델의 제원

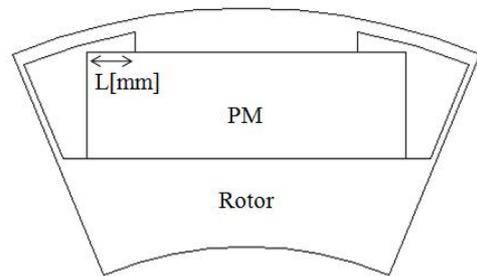
Item항목	Specification사양
Material(stator & rotor)	50PN1300
Rated Torque[Nm]	1.91
Rated Speed[rpm]	3000
Rated Current[A]	24
Pole / Slot	8 / 12
Br[T]	1.3
Stack Length[mm]	45
Stator Diameter[mm]	83.6



〈그림 1〉 해석 모델 형상

2.2 자속 장벽 선정

기본 모델의 회전자에 자속 장벽 설치를 수행하였다. 설계 변수를 그림 2에 나타내었다. 코깅 토크가 가장 낮은 설계 변수가 2[mm]인 경우를 선정하여 열 등가회로망으로 구성하여 열 해석을 수행하였다.



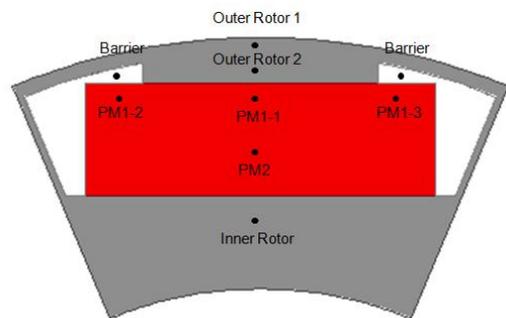
〈그림 2〉 자속 장벽의 설계 변수

〈표 2〉 설계 변수에 따른 코깅 토크 및 역기전력

설계 변수 L[mm]	코깅토크(peak-peak)[mNm]	역기전력 [Vrms]
0	565	9.1
0.5	481	9.2
1	378	9.25
1.5	258	9.24
2	183	9.2
2.5	225	9.14
3	256	9.1

2.3 열 등가회로 구성

전동기의 열 등가회로를 구성하기 위해서는 먼저 전동기의 각 부분을 적당한 제어체적으로 분할하여야 한다. 본 논문에서는 프레임, 고정자 요크, 고정자 치, 권선, 엔드 권선, 공극, 회전자 외측, 자속 장벽, 영구자석, 회전자 내측, 샤프트, 엔드캡 내부 공기에 절점을 할당하였다.

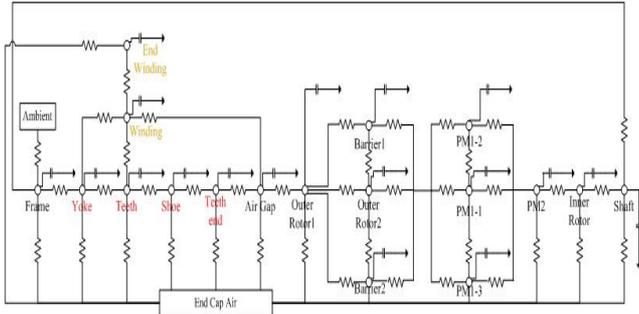


〈그림 3〉 세분화한 회전자

회전자는 영구자석 온도계산의 정밀도를 높이기 위하여 그림 3과 같이 세분화하였다. 자속 장벽의 온도를 계산하기 위하여 회전자 외측부분을 2개로 분할하였다. 영구자석은 모서리 끝단에서 국

부적인 불가역값자가 발생하고 자속 장벽으로부터 열전달이 되므로 하나의 영구자석을 4개로 분할하여 온도 분포를 확인하였다.

열 등가회로의 구성은 그림 4와 같다. 전도 및 대류 열 저항 산정, 열원 계산 등은 열 등가회로망을 이용한 IPMSM의 온도특성 해석에 관한 연구”를 참고하였다[5].



〈그림 4〉 해석 모델의 열 등가회로

전도에 의한 열 저항은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{cond} = \frac{l}{kA} \quad (1)$$

식 (1)에서 k 는 열전도 계수이고 A 는 전도에 의한 열전달이 발생하는 면적, l 은 전도가 발생하는 두 물질간의 거리를 의미한다. 재료의 열전도 계수는 고유 물성치이므로 알려져 있는 재료의 값을 사용하였다.

대류에 의한 열 저항은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (2)$$

위 식에서 h 는 대류열전달계수이고, A 는 대류가 일어나는 면적을 의미한다. 따라서 대류에 의한 열저항을 계산하기 위해서는 대류열전달계수 산정이 필요하다.

공극에서는 고정자와 회전자의 상대적인 회전 운동에 의해 대류 열전달이 발생한다. 공극에서의 대류열전달계수는 식 (3)와 같이 누셀트 수(Nusselt number)와 공극 길이, 공기의 열전도도로 표현된다[6].

$$h = \frac{N_N \cdot k_{air}}{l_g} \quad (3)$$

그리고 누셀트 수는 레이놀드 수(Reynolds number)와 프란틀 수(Prandtl number)에 의해 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

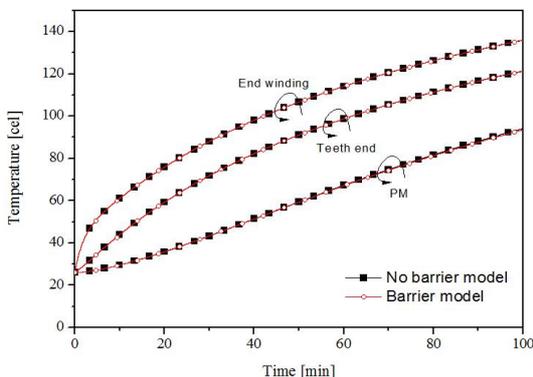
$$N_N \begin{cases} = 2.2 & (N_{T_s} \leq 41.1) \\ = 0.23 N_{T_s}^{0.63} N_{Pr}^{0.23} & (N_{T_s} \geq 41.1) \end{cases} \quad (4)$$

전동기의 고정자, 회전자 및 고정자 권선의 축 방향으로 전달되는 열과 엔드 권선의 열은 엔드캡 대기를 통해 하우징으로 전달된다. 엔드캡 내기의 대류열전달계수는 식 (5)으로 계산된다.

$$h = 15.5 \times (0.29v + 1) \quad (5)$$

식 (5)에서 v 는 팬의 속도이며, 본 논문에서 사용된 전동기의 경우 팬이 없으므로 $v = 0$ 을 사용하였다.

2.4 해석 결과



〈그림 5〉 자속 장벽 유무에 따른 전동기 온도 상승

그림 5는 자속 장벽 유무에 따른 전동기 온도 상승을 나타내고 있다. 자속 장벽 설치 후에 권선 끝부분의 온도와 고정자 치 끝단의 온도는 약 0.1[°C] 저감되었고 영구자석의 온도가 약 0.6[°C]저감 되었다. 영구자석의 끝단부의 온도 확인을 위하여 세분화하였다. 영구자석 중심의 온도와 끝단부의 온도는 약 1[°C]차이로 유사하였다.

2.5 해석 결과 고찰

자속 장벽에 의한 영구자석 온도 상승 억제 효과를 확인하기 위하여 임의로 자속 장벽의 두께를 크게 하여 열 해석을 재수행하였다. 하지만 자속 장벽의 크기를 증가시켜도 유사한 온도로 해석되었다.

$$T^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left(\sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_j - T_i) + u_i \right) + T^p \quad (6)$$

위 수식 (6)에서 C_i 는 절점에서의 열용량, R_{ij} 는 절점 i, j 사이의 열저항이며, u_i 는 i 절점에서 발생하는 열 발생량을 의미한다. T^p 는 현재 시간 증분에서의 온도이고 T^{p+1} 은 다음 시간 증분에서의 온도를 의미하며 Δt 는 시간 증분량을 나타낸다. 즉 수식 (6)을 각각의 절점에 대하여 열평형 방정식을 세운 후 이를 반복 수렴할 때까지 계산을 수행한다.

$$C = cpV \quad (7)$$

위 수식 (7)에서 C 는 열용량을 나타내며 c 는 비열, ρ 는 밀도이며 V 는 부피를 나타낸다. 철심의 재료 50PN1300의 밀도는 7700[kg/m³], 비열은 444[J/kg°C]를 사용하였고 공기의 밀도는 1.255[kg/m³], 비열은 1009[J/kg°C]를 사용하였다.

열용량은 수식 (7)로 계산되는데 철심의 열용량과 공기의 열용량을 비교해보면 공기의 열용량이 상대적으로 상당히 작다. 열용량이 작다는 것은 온도를 높이는 데 필요한 열량이 작으므로 온도 변화가 빠름을 의미한다. 자속 장벽의 두께가 커지면서 열저항이 증가하지만 자속 장벽의 열용량이 상당히 작기 때문에 회전자의 온도에 영향을 크게 받아서 영구자석 온도 상승 억제 역할을 하지 못하였다.

3. 결 론

영구자석의 온도 상승 억제를 위하여 먼저 회전자에 자속 장벽을 설치하였다. 코깅 토크가 가장 작은 모델을 선정하여 그 모델을 열 등가회로망으로 구성하고 열 해석을 수행하였다. 그 결과, 자속 장벽 유무에 따른 영구자석 온도 차이가 0.6[°C]로 크게 발생하지 않았고 영구자석 끝단부의 온도와 중심의 온도는 크게 차이나지 않았다. 자속 장벽의 크기가 너무 작아서 효과가 나타나지 않는다고 판단하여 자속 장벽의 크기를 임의로 크게 하여 전동기 온도 상승을 비교해보았지만 크기를 증가시켜도 유사한 온도로 해석이 되었다. 이러한 이유는 자속 장벽의 열용량이 철심의 열용량보다 상대적으로 작은 열용량에 의해 쉽게 온도가 상승하였고 이 결과로 영구자석 온도 상승 억제 역할을 하지 못하였다. 자속 장벽은 코깅 토크 저감에는 큰 영향을 주지만 영구자석 온도 상승 억제에는 효과가 없음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] Gyu-Hong Kang, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on AE, Vol. 45, No. 1, pp. 161~167, 2009
- [2] 임재원, 서장호, 이상엽, 정형교, "매입형 영구자석 전동기의 열 등가 회로 해석", 한국 철도 학회 2009년도 춘계 학술대회 논문집 특별 세미나, pp. 527~532, 2009
- [3] 양병렬, 윤근영, 권병일, "IPM type BLDC 전동기의 자속장벽 적용에 따른 코깅토크 저감", 2004년도 대한전기학회 EMECS 학회 추계학술대회 논문집, pp. 67~69, 2004
- [4] 이기덕, 이주, "건인용 IPMSM의 신뢰성 향상을 위한 형상 설계", 대한전기 학회논문지, Vol.64, No. 5, pp. 817~823, 2015
- [5] 계승현, "열 등가회로망을 이용한 IPMSM의 온도특성 해석에 관한 연구", 창원대학교 석사졸업논문, 2012년
- [6] S.K. Chowdhury, P.K Baski, "A simple lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design", Power Electronics, Drives and Energy Systems(PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on, pp 1-7, 2010