ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 1, pp. 48~53, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.1.048

영구자석의 불가역 감자 현상을 고려한 BLDC 전동기의 회전자 자속 장벽 설계

The Rotor Barrier Design of the BLDC Motor Consider that Irreversible Demagnetization of Permanent Magnets

김 철 민* · 조 규 원* · 김 규 탁†
(Cheol-Min Kim · Gyu-Won Cho · Gyu-Tak Kim)

Abstract - Generally, the usage motor in the vehicle is exposed to highly ambient temperature and large vibration according to repeatedly starting and stopping during very short time. So, in this paper, the rotor shape design was performed to improve demagnetization endurance by considering starting current of Brushless DC Motor (BLDCM) through Finite Element Method(FEM). As a result, the end of Permanent Magnet (PM) in the basic model was occurring a partial irreversible demagnetization by starting current. To solve this problem, the installing flux barrier was limited to flux line on the core. Accordingly, demagnetization endurance and operating characteristics were improved.

Key Words : BLDC motor, Demagnetization analysis, Barrier design, Improved operating characteristics

1. 서 론

BLDC 전동기는 DC전동기의 장점인 큰 기동 토크는 물론 정속주행 시 안정적인 특성을 유지하지만, 브러쉬가 없는 관계로 브러쉬에서 발생되는 섬락, 잡음이 없고 고속운전이 가능하다. 그러나, IPM type 전동기는 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 회전자 내부 일정 부위에 자속이 집중되어 포화가 발생하고, 높은 자속밀도로 인하여 코깅 토크가 표면 부착형 영구자석 전동기보다 크다는 단점이 있다. 이로 인하여 전동기 운전 시 진동과 소음이 크게 발생하게 된다[1]. 따라서, 코깅 토크 및 토크 리플 저감을 위한 방법으로 고정자 형상 변화, 자속 장벽 설치, 보조 슬롯 설치, 전류 상승 시간인 절환 구간 조절 등의 많은 방법들이 제안되어 사용되고 있다[2]. 또한, BLDC 구동은 기동 시 큰 전류는 물론 높은 온도 상승이 예상되기 때문에 전장품용 BLDC 모터는 영구자석의 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 기동 시의 외부 자계에 대한 감자내력 향상이 고려된 설계가 요구된다[3]. 따라서, 본 논문에서는 외부 구동회로를 고려한 유한요소해석을 이용하여 과도 상태에서 의 기동 전류를 산정하여 BLDC 모터의 감자해석에 적용하였다. 또한, 감자내력을 향상시키기 위하여 회전자에 자속 장벽을 설치하는 방법을 채택하였으며, 자속 장벽 설치에 따른 코깅 토크 저감 및 토크 리플 감소 특성을 고찰하였다. 즉, 실험 계획법을 이용하여 회전자 자속 장벽의 설계 변수에 따른 구동 특성 및 감자해석을 수행하여 자속 장벽이 구동 및 감자 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

* Dept. Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea
† Corresponding Author : Dept. Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea
E-mail : gtkim@changwon.ac.kr
Received : August 13, 2013; Accepted : December 12, 2013

2. 본 론

2.1 해석 모델

기본 모델의 형상을 그림 1에 나타내었으며, 모델의 제원을 표 1에 요약하여 나타내었다. 본 모델은 차량 내부에 사용되는 전장품용 전동기로써 고온과 진동에 항상 노출되어 있으므로 이를 고려하여 설계 되어야 한다[4].

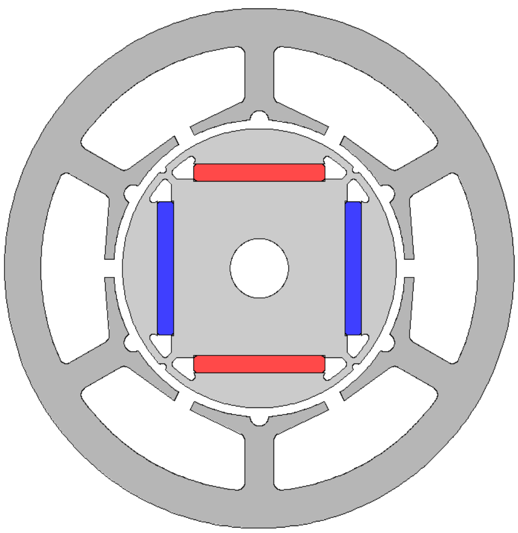


그림 1 해석 모델의 코어 형상
Fig. 1 Core shape of analyzed model

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analyzed model

Item	Specification
Rated speed[rpm]	3,200
Rated torque[Nm]	0.55
Rated current[A]	13.5
Poles/Slots	4/6
Air-gap length[mm]	1.2
Winding type	Concentrated winding
PM material	N33SH
Core material	50PN1300
Stack length [mm]	41
Stator diameter [mm]	70
Phase Resistance [Ω]	0.15 (25℃)

2.2 기본 모델의 감자 특성 해석

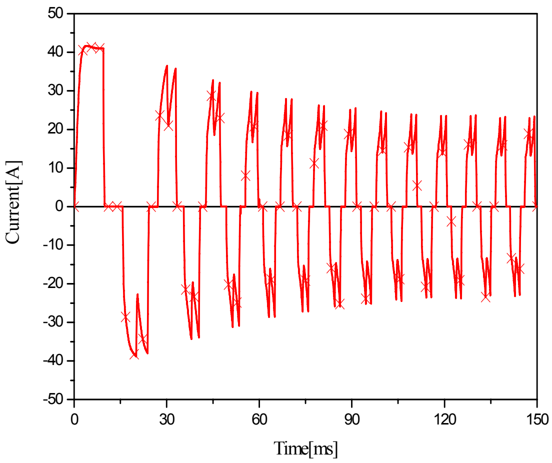


그림 2 해석 모델의 기동 전류

Fig. 2 Starting current of analyzed model

외부 자계를 발생시키는 최대 전류는 기동 전류, 단락 전류, 제어기 최대 전류 등 의미 있는 전류로 선택하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 그림 2와 같이 유한요소해석을 통한 기동 전류를 선택하였고, 기동 전류는 42[A]이다[5].

그림 3에서 영구자석의 자속밀도 변곡점(Knee point)가 존재하게 되는데, 자속밀도 변곡점은 영구자석 제작사에서 제공하는 B-H Curve를 통해서 선정할 수 있다. 그림 3에서 동작점(P1)에서는 외부 자계에 의해서 순간적으로 자속밀도 값이 감소하지만 외부 자계가 소멸되면 잔류자속밀도(Br)는 기존의 Br값으로 복원하게 되고, 이를 가역 감자라고 한다. 하지만 기동 전류 또는 단락 전류와 같은 큰 전류가 인가되면 큰 자계에 의해서 동작점(P2)에서 동작하게 되면 영구자석은 자속밀도 변곡점 보다 낮은 자속밀도를 가지게 되고, 외부 자계가 소멸되어도 영구자석은 기존의 Br값으로 복원되지 않고, 기존의 Br값보다 낮은 Br' 로 복귀하게 되는데, 이를 불가역 감자라고 한다. 따라서 전동기의 성능을 유지하기 위해서는 고장 상태가 고려된 전동기의 설계가 필요하다[6].

본 연구에서는 N33SH NdFeB 영구자석을 사용하였고, 기동 전류가 인가된 상태에서 영구자석의 감자내력은 유한요소해석을 통하여 고찰한다. 불가역 감자의 평가 여부는 유한요소해석을 통해 영구자석의 최소자속밀도를 계산하였을때 최소 자속밀도가 자속밀도 변곡점 0.28[T]보다 낮은 레벨일 때 불가역 감자가 발생한다고 정의한다.

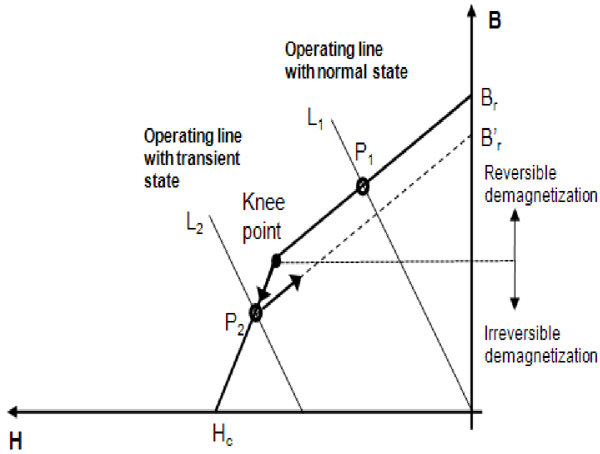


그림 3 N33SH 영구자석의 B-H Curve

Fig. 3 B-H Curve of N33SH type PMs

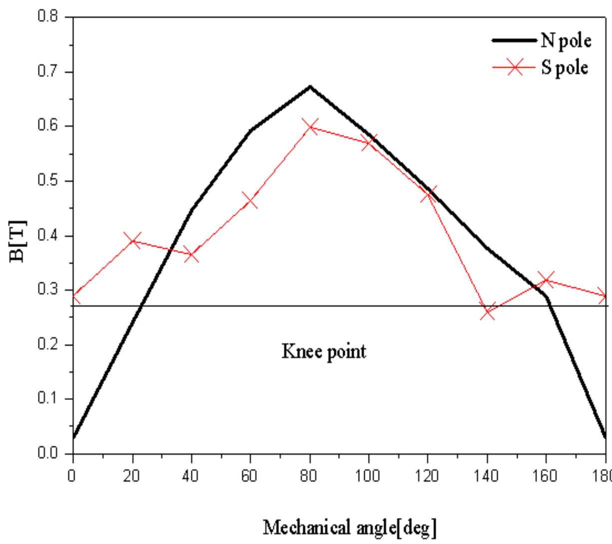


그림 4 기본 모델의 최소 자속밀도

Fig. 4 The minimum magnetic flux density of basic model

그림 4는 기본 모델에 기동 전류가 인가되었을 때 회전자의 위치 0°와 180°에서 불가역 감자가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이때 최소 자속밀도가 자속밀도 변곡점 0.28[T]보다 낮은 0.028[T]로 계산되었다.

그림 5는 기본 모델에 기동 전류 인가된 상태의 자속 분포도이다. 기동 전류가 인가된 상태에서 Rib 부분이 포화됨에 따라 외부 자계는 Rib에서 가장 가까운 영구자석의 양 끝단을 통하여 흐르게 된다. 이에 따라 영구자석의 양 끝단에 국부적인 불가역 감자 현상을 초래하였다. 감자해석을

통하여 외부 자계는 영구자석 전체에 영향을 주는 것이 아니라 국부적으로 영구자석에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다[7].

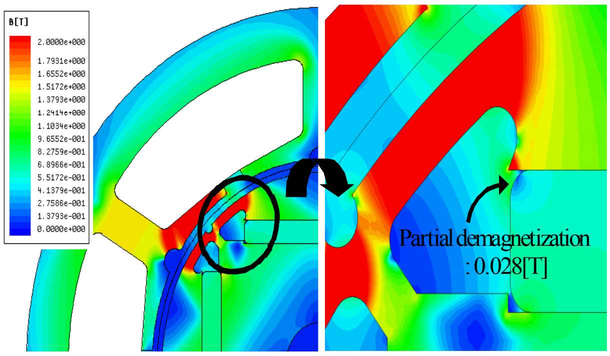


그림 5 기본 모델의 자속밀도 분포도

Fig. 5 The magnetic flux density of basic model

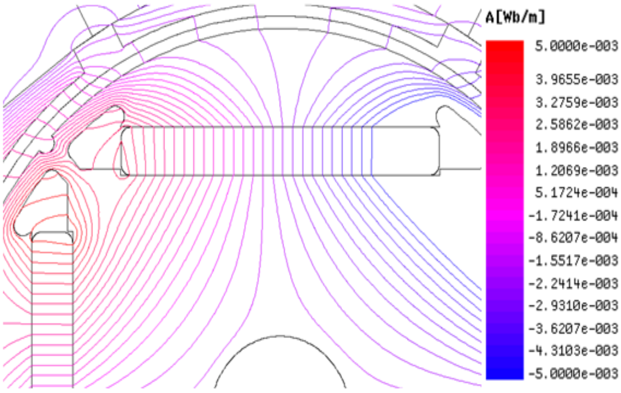


그림 6 기본 모델의 자속선도

Fig. 6 The magnetic flux line of basic model

2.3 감자내력 향상을 위한 자속 장벽 설계

영구자석의 국부적 불가역 감자는 역기전력 감소 및 파형의 왜곡을 발생시켜 모터의 성능을 저하시킨다. 따라서 기동 시의 외부 자계에 대한 감자내력향상이 고려된 설계가 요구된다. 외부 자계에 대한 감자내력을 향상시키는 방법으로 영구자석의 두께를 증가시키는 방법이 있지만 이는 상승을 유발하므로 그림 7과 같이 영구자석의 두께를 유지하면서 영구자석 양 끝단에 국부적인 불가역 감자로 부터 감자내력을 향상시킬 수 있는 회전자 자속 장벽을 설계하였다[8]. 본 논문에서 제안된 모델은 기계적인 강도와 포화를 고려하여 Rib을 1[mm]로 고정하였고, 설계 변수(w_d)는 영구자석의 주 자로를 형성하는 d축 자로의 길이다. 최적 설계는 실험 계획법을 이용하여 수행하였다[2].

제안된 모델의 설계 변수에 따른 구동 특성을 비교하였을 때 설계 변수 13[mm]에서 코깅 토크와 토크 리플은 각각 22[mNm]와 16%로 최소로 계산되어 구동 특성이 가장 양호하였다.

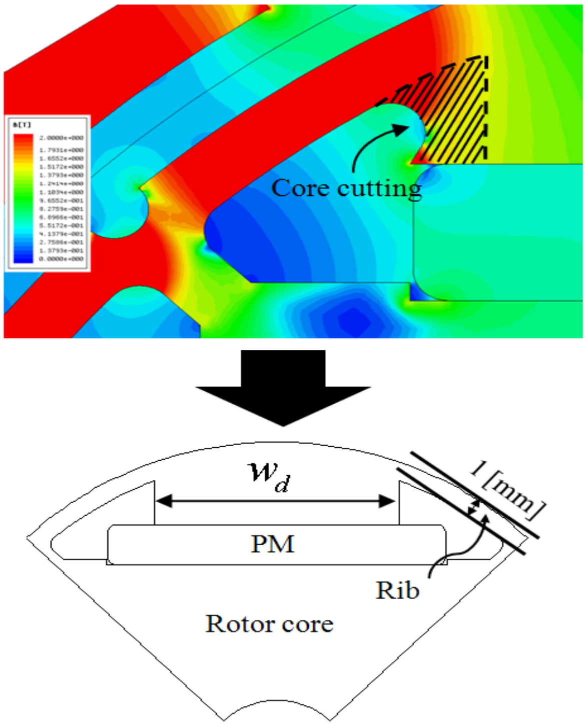


그림 7 제안된 모델의 설계 변수

Fig. 7 design parameters of proposed model

2.3.1 설계 변수에 따른 구동 특성 해석

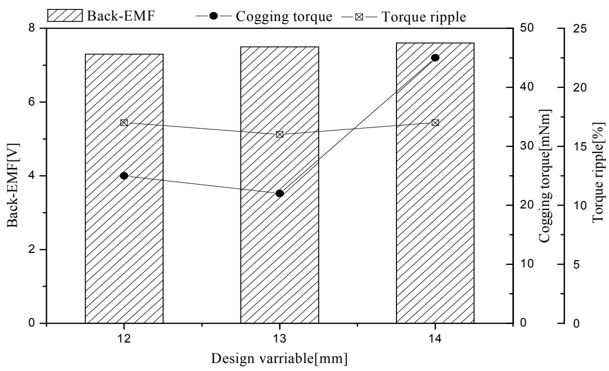


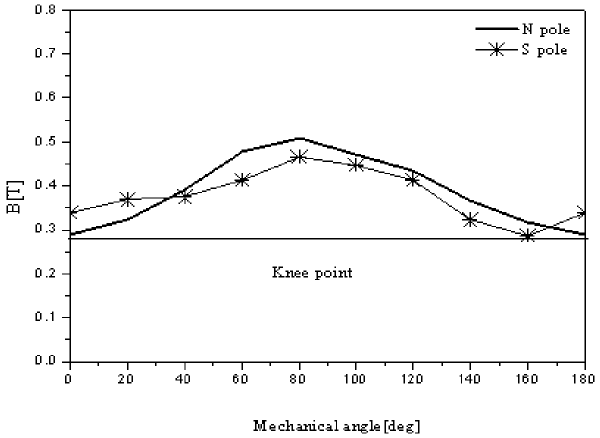
그림 8 설계 변수에 따른 구동 특성

Fig. 8 Operating characteristics according to design parameters

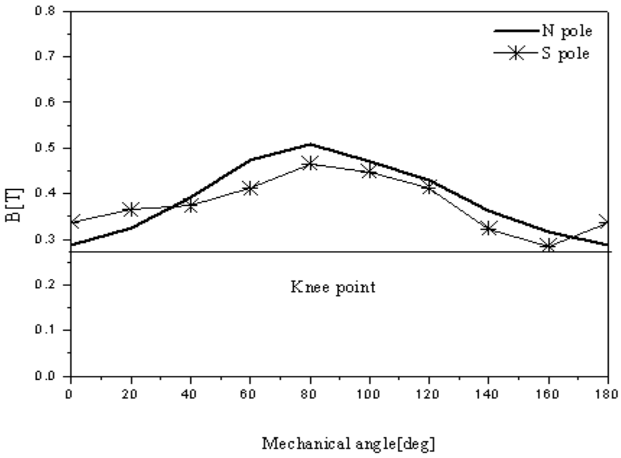
2.3.2 설계 변수에 따른 영구자석의 감자 해석

그림 9에서 설계 변수에 따른 감자 해석결과, 최소 자속밀도는 자속밀도 변곡점 보다 크다. 설계 변수 14[mm]에서는 최대 감자각 0°와 180°에서 최소 자속밀도가 0.28[T]로써 감자내력의 여유가 다소 불충분 하였다. 하지만 설계 변수 12, 13[mm]는 최대 감자각 0°와 180°에서의 최소 자속밀도가 0.29[T]로 불가역 감자 현상이 발생되지 않으면서 자속밀도 변곡점 0.28[T]보다 감자내력의 여유가 있음을 확인하였다. 본 모델에서는 설계 변수에 따른 구동 특성 및 감자해

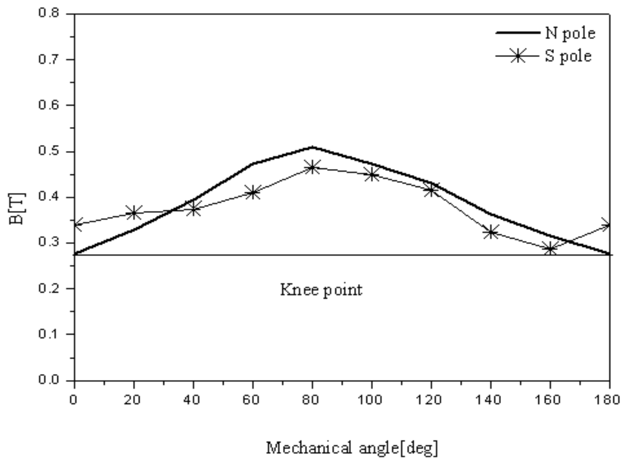
석의 비교 분석하였을때 감자내력과 구동 특성이 가장 양호한 설계 변수 13[mm] 모델을 제안한다.



(a) w_d=12[mm]



(b) w_d=13[mm]



(c) w_d=14[mm]

그림 9 설계 변수에 따른 최소 자속밀도

Fig. 9 The minimum magnetic flux density according to design parameter

2.4 제안된 모델의 감자내력 분석

그림 9(b)에서 제안된 모델에 기동 전류가 인가되었을 때 회전자의 위치마다 최소 자속밀도를 계산한 결과로 기본 모델과 달리 자속밀도 변곡점 보다 높은 최소 자속밀도 레벨을 가진다. 제안된 모델은 전체 회전각에서의 최소 자속밀도가 0.29[T]이상으로 계산되었고, 그림 10에서 제안된 모델의 기동 전류 인가 시 자속 분포도를 나타내었다. 기본 모델에서 영구자석의 양 끝단에 국부적 불가역 감자가 발생되었던 것과 달리 제안된 모델에서는 영구자석의 양 끝단에 충분한 자속 장벽이 설치되어 영구자석의 양 끝단에 국부적 불가역 감자 현상은 발생하지 않았다. 자속 장벽 설치에 따른 제안된 모델의 구동 특성과 기본 모델의 구동 특성에 대한 비교,분석은 그림 12에서 나타내었다.

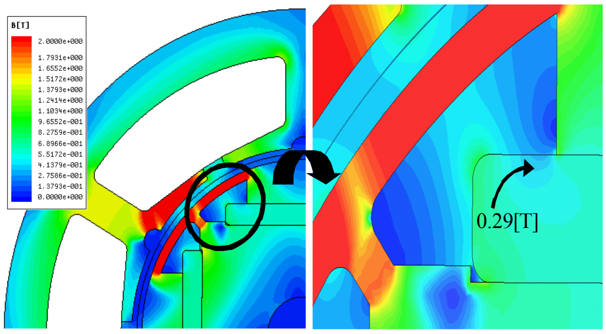


그림 10 제안된 모델의 자속밀도 분포도

Fig. 10 The magnetic flux density of proposed model

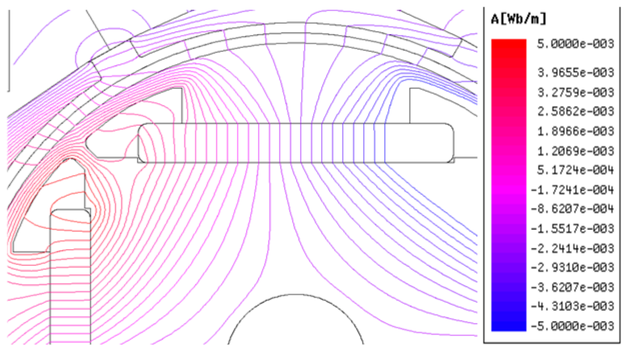


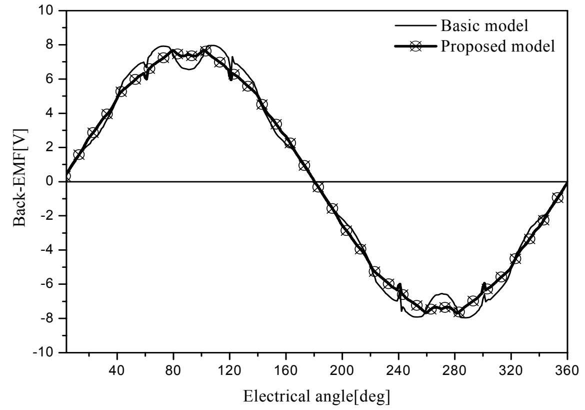
그림 11 제안된 모델의 자속선도

Fig. 11 The magnetic flux line of proposed model

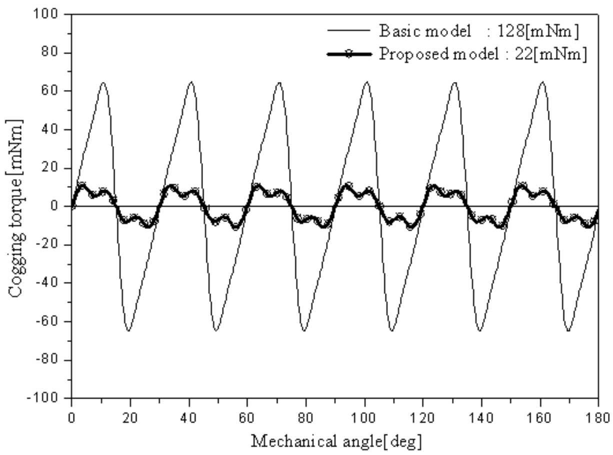
2.5 제안된 모델과 기본 모델의 구동 특성 해석

그림 12(a)에서 제안된 모델의 역기전력은 자속 장벽 설치에 의해 d축을 기준으로 q축의 영구자석 방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 만들어 줌으로써 영구자석에서 발생하는 자속량을 차등적으로 회전자 표면에 흐르게 하여 정현적인 분포를 유지시킨다[9]. 따라서 영구자석과 슬롯의 상호작용에 의해 발생되는 코깅 토크는 그림 12(b)와 같이 기본 모델에 비하여 제안된 모델의 코깅 토크가 83% 저감되었다. 하지만 BLDCM은 인가되는 전류가 구형파이므로 비교적

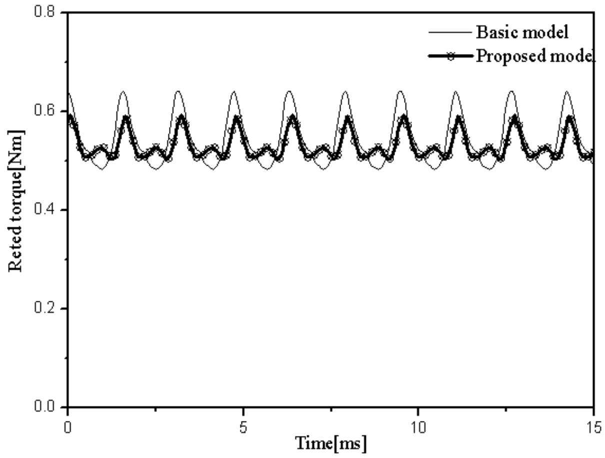
정현적인 역기전력을 가지는 제안된 모델의 토크 리플 감소율은 코깅 토크 감소율에 비하여 낮게 계산되었다[10]. 제안된 모델의 토크 리플은 그림 12(c)와 같이 16%로 계산되었다.



(a) 무부하 역기전력



(b) 코깅 토크



(c) 구동 토크

그림 12 구동 특성 해석

Fig. 12 Operating characteristics analysis

표 2 구동 특성 비교

Table 2 The comparison of operating characteristics

Item	Basic model	Proposed model
Rated speed[rpm]	3,200	
Rated torque[Nm]	0.55	0.54
Torque ripple[%]	29	16
Phase resistance[Ohm]	0.26	
Iron loss[W]	11.01	11.05
Efficiency[%]	63.5	63.1

제안된 모델은 기본 모델과 비교하였을 때 구동 토크가 2% 감소되고, 철손이 0.4% 증가되어 효율이 0.4% 감소하였다. 그러나 코깅 토크가 83% 저감되고, 토크 리플이 13% 저감되었으므로 전반적인 구동 특성은 향상되었음을 알 수 있다. 이로써 제안된 모델은 기본 모델에 비하여 전반적인 구동 특성이 향상되었고, 감자내력은 크게 향상되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 BLDCM의 감자해석에 사용되는 기동 전류를 계산하였고, N33SH NdFeB 영구자석의 자속밀도 변곡점을 0.28[T]로 선정하였다. 이를 유한요소해석에 적용하여 철심과 영구자석을 비선형 처리하였고, 유한요소해석을 통하여 기본 모델의 감자내력을 확인하였다. 그 결과 기동 전류가 인가된 상태에서 Rib 부분이 포화됨에 따라 외부 자계는 Rib에서 가장 가까운 영구자석의 양 끝단을 통하여 흐르게 되어 회전자 위치 0°와 180°에서 영구자석 양 끝단에 국부적인 불가역 감자현상이 발생되었다. 따라서 본 논문에서는 영구자석 양 끝단의 감자내력을 향상시키기 위해 영구자석의 양 끝단에 충분한 자속 장벽을 설치하여 영구자석의 양 끝단을 보호하는 방법을 제안하였다. 그 결과, 제안된 모델에 기동 전류가 인가되었을 때 회전자의 위치마다 최소 자속밀도는 0.29[T]로 계산되었고, 기본 모델에서 영구자석의 양 끝단에 국부적인 불가역 감자가 발생되었던 것과 달리 제안된 모델에서는 양 끝단에 국부적 불가역 감자 현상이 발생되지 않았다. 또한, 제안된 모델은 기본 모델에 비하여 토크가 2% 감소되고, 철손이 0.4% 증가되어, 효율이 0.4% 감소하였으나, 제안된 모델의 역기전력은 자속 장벽 설치에 의해 정현적인 분포를 유지시킴에 따라 제안된 모델은 기본 모델에 비하여 코깅 토크가 83% 저감되고, 토크 리플이 13% 저감되었으므로 전반적인 구동 특성은 향상되었다. 본 연구에서 영구자석의 불가역 감자 현상을 고려한 회전자에 배리어를 설계함으로써 불가역 감자를 방지함은 물론 구동 특성이 향상되는 결과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

References

[1] Hong-Seok Ko, and Kwang-Joon Kim, "Charac-terization of Noise and Vibration Source in Interior Permanent-Magnet Brushless DC motors", IEEE Trans. on Magn., vol. 40, no. 6, pp. 3482 ~ 3489, 2004.

[2] Kyoung-Won Park, Tae-Suk Jung, Gyu-Won Cho, Gyu-Tak Kim, "The displacement property by the radial force considering rotor shape of IPMSM (3)" proceedings of the KIEE EMECS Autumn Annual Conference 2012, pp. 220~223, 2012.

[3] J. M. Hong, D. S. Hyun, T. J. Kang, S. B. Lee, C. Kral, and A. Haumer, "Detection and Classification of Rotor Demagnetization and Eccentricity Faults for PM Synchronous Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 48, no. 3, pp. 923~932, May./Jun. 2012.

[4] Seung-Hyun Kye, Yong-Tae Kim, Gyu-Won Cho, Gyu-Tak Kim, "Thermal Analysis of IPMSM According to Current Vector Control Method (3)", proceedings of the KIEE EMECS Autumn Annual Conference 2012, pp. 208~211, 2012.

[5] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Analysis of Irreversible Magnet Demagnetization in Line-Start Motors Based on the Finite-Element Method", IEEE Trans. on Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1488~1491, May. 2003.

[6] Y. Zhilichev, "Analysis of Permanent Magnet Demagnetization Accounting for Minor B-H Curves", IEEE Trans. on Magn., vol. 44, no. 11, pp. 4285~4288, Nov. 2008.

[7] K. C. Kim, S. B. Lim, D. H. Koo, and J. Lee, "The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization", IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 10, pp. 3485~3487, Oct. 2006.

[8] Gyu-Won Cho, Seok-Hyeon Woo, Ki-Bong Jang, Gyu-Tak Kim, "A Study on the Demagnetization of Permanent Magnet due to the Barrier Shape of Vehicle Hydaulic Control Motor", proceedings of the KIEE EMECS Summer Annual Conference 2012, pp. 902~903, 2010.

[9] J.-Y. Lee, S.-H. Lee, G.-H. Lee, J.-P. Hong, and J. Hur, "Determination of arameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Magn., vol. 402, no. 4, Apr. 2006.

[10] G. H. Kang, Y. D. Son, G. T. Kim, and J. Hur, "A Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior-Type Permanent-Magnet Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 45, no. 1, pp. 161~167, Jan./Feb. 2009.

저 자 소 개

Cheol-Min Kim

He received B.S degree in electrical engineering from Changwon National university, Korea 2012. He is Currently Pursuing his M.S degree at Changwon National University.

Tel : 055-213-3640
Fax : 055-263-9956
E-mail : kimcheolmin@changwon.ac.kr

Gyu-Won Cho

He received B.S and M.S degree in electrical engineering from Changwon National University, Korea 2009, 2011 respectively. He is currently pursuing his Ph.D degree at Changwon National University.

Tel : 055-213-3640
Fax : 055-263-9956
E-mail : chogyuwon@changwon.ac.kr

Gyu-Tak Kim

He received B.S, M.S and Ph.D degree in electrical engineering from Hanyang University, Korea. He is presently a Professor of Changwon National University. His research interests are Electrical machine and FEM analysis.

Tel : 055-213-3635
Fax : 055-263-9956
E-mail : gtkim@changwon.ac.kr