

회전자 자속장벽 설계에 의한 영구자석 매입형 BLDC 전동기 코깅 토크 저감 연구

論 文
55B-10-1

Reducing Cogging Torque by Flux-Barrier in Interior Permanent Magnet BLDC Motor

尹 勤 榮[†] · 梁 炳 烈^{*} · 權 炳 一^{**}
(Keun-Young Yun · Byoung-Yull Yang · Byung-Il Kwon)

Abstract - For high efficiency and easy speed control of brushless DC (BLDC) motor, the demand of BLDC motor is increasing. Especially demand of interior permanent magnet (IPM) BLDC with high efficiency and high power in electric motion vehicle is increasing. However, IPM BLDC basically has a high cogging torque that results from the interaction of permanent magnet magnetomotive force (MMF) harmonics and air-gap permeance harmonics due to slotting. This cogging torque generates vibration and acoustic noises during the driving of motor. Thus reduction of the cogging torque has to be considered in IPM BLDC motor design by analytical methods.

This paper proposes the cogging torque reduction method for IPM BLDC motor. For reduction of cogging torque of IPM BLDC motor, this paper describes new technique of the flux barriers design. The proposed method uses sinusoidal form of flux density to reduce the cogging torque. To make the sinusoidal air-gap flux density, flux barriers are applied in the rotor and flux barriers that installed in the rotor produce the sinusoidal form of flux density. Changing the number of flux barrier, the cogging torque is analyzed by finite element method. Also characteristics of designed model by the proposed method are analyzed by finite element method.

Key Words : IPM, BLDC, Flux-Barrier, 매입형, 자속장벽

1. 서 론

높은 출력밀도를 갖는 저소음 특성의 Brushless DC(BLDC) 전동기는 고에너지적의 영구자석 개발과 더불어 고효율 및 제어방법의 용이성으로 인하여 오늘날 여러 분야에서 응용범위가 넓어지고 있으며, 수요 또한 증대되고 있다 [1]. BLDC 전동기는 크게 회전자 표면에 영구자석을 부착하는 표면부착형(Surface mounted Permanent Magnet) BLDC 전동기와 회전자 내부에 영구자석을 삽입하는 매입형(Interior Permanent Magnet) BLDC 전동기로 구분할 수 있다. 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기와 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 기하학적인 차이뿐만 아니라, 전동기의 동작 특성 및 전동기 응용분야에서 차이를 나타낸다. 특히 고속회전 및 고출력으로 사용할 경우 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기보다는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 사용하는 것이 효율 및 전동기의 안전성면에서 우수하다[2][3]. 그러나 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 회전자 내부의 일정 부위에 자속이 밀집되어 포화되고, 높은 자속밀도에 의

하여 코깅 토크가 표면부착형 전동기와 비교하여 크다는 단점을 가지고 있다. 이러한 코깅 토크는 전동기의 운전 시 진동 및 소음 발생의 주요한 원인이 된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 극당 영구자석의 길이에 변화를 주거나 자석의 끝단 형상을 가공하는 방법 또는 영구자석의 위치 변경등의 방법으로 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크 저감에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4]-[6].

본 논문은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 연구의 일환으로써, 공극 자속밀도를 정현적으로 만들어 주기 위한 자속장벽(Flux-barrier)의 설계 방법을 제안한다. 자속장벽 위치 및 간격을 설계할 때, 면적비의 관계를 고려하여 설계함으로써 영구자석에서 발생하는 자속의 경로를 고르게 분포하도록 하여 코깅 토크를 줄이고, 토크 리플을 저감함으로써 전동기의 맥동을 줄이고자 한다. 자속 장벽 설치에 따른 전동기의 특성해석은 유효요소 해석을 통하여 확인한다.

2. 자속장벽의 위치설계 및 특성해석

2.1 영구자석 매입형 BLDC 전동기 구조 및 사양

영구자석이 회전자 안에 삽입된 형태의 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 d축과 q축의 자속경로가 다르기 때문에, d

† 교신저자, 正會員 : Atechsolution 技術研究所 主任研究員
E-mail : khito@lycos.co.kr

* 正會員 : Samsung DA研究所 選任研究員

** 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 24日

最終完了 : 2006年 9月 24日

축과 q축의 자기저항의 차가 발생하는 구조를 지니게 된다. 이러한 구조는 영구자석을 통과하지 않는 d축 자로에 비해 q축 자로의 전기자 반작용 자속에 의한 릴럭턴스가 더 크게 된다. 따라서 d축과 q축자로의 릴럭턴스 차이에 의해 인덕턴스의 차이가 발생을 하게 되어, 자석 토크 이외에 추가적인 릴럭턴스 토크가 발생하는 구조적 장점을 가지게 된다. 또한 회전자의 구조적 형태로 인해 고속회전에 유리하고 기계적인 구조가 견고한 특성을 갖게 되어 고속 및 고출력 특성을 유지하기 위한 전동기로서의 활용도가 높다[7].

그림 1은 연구대상 초기모델로서, 직류 24[V]의 입력전압에 따라 저전압, 대전류의 입력조건을 갖는 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 단면도를 나타낸다. 그림 1에서처럼 초기모델은 4극수를 가지며, 고정자 권선에서 적정 전류밀도를 유지하기 위하여 병렬회로수를 선정하였다. 표 1은 초기모델의 설계사양을 나타낸다.

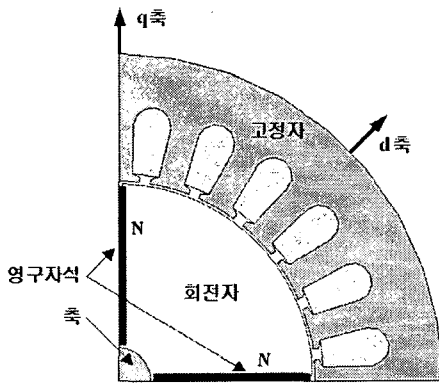


그림 1 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 구조
Fig. 1 The cross-section of IPM BLDC motor

표 1 영구자석 매입형 BLDC 전동기 사양
Table 1 The specification of IPM BLDC motor

항목	사양	항목	사양
입력 전압	직류 24[V]	공극길이	0.5[mm]
정격 출력	600[W]	병렬회로수	4[Parallel]
정격 속도	3,000[rpm]	공극길이	0.5[mm]
상 수	3[Phases]	영구자석	Nd소결[Br=1.2T]

2.2 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크 특성

해석대상 전동기의 고정자부에서 권선사양이 분포권을 이루고 있기 때문에, 고정자의 전류에 의한 자속의 형태가 정현적이 된다. 따라서 영구자석에 의한 자속의 분포 역시 정현적이어서 소음과 진동면에서 상당히 유리한 일정 토크를 발생시킬 수가 있다. 그림 2는 초기모델의 공극 자속밀도 분포파형이다.

그림 2에서 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 초기 자속

밀도 분포는 정현적이 아닌 구형적 파형으로 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 또한 분포파형의 양 끝단에서 값이 치솟는 부분이 존재를 하는데 이와 같은 자속밀도 파형은 전동기의 동작에 있어, 소음과 진동의 원인이 되어 전동기의 동작에 불리한 영향을 줄 수가 있다. 따라서 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 영구자석에 의한 구형적 분포의 자속밀도 파형을 정현적으로 만들어주기 위하여, 회전자의 표면에 공극으로 이루어진 자속장벽의 설치를 제안한다. 자속장벽은 영구자석에 의해 발생하는 자속의 흐름을 조절하여, 공극에서 자속밀도의 분포를 정현적으로 만들어 줌으로써 코깅 토크가 저감되도록 한다.

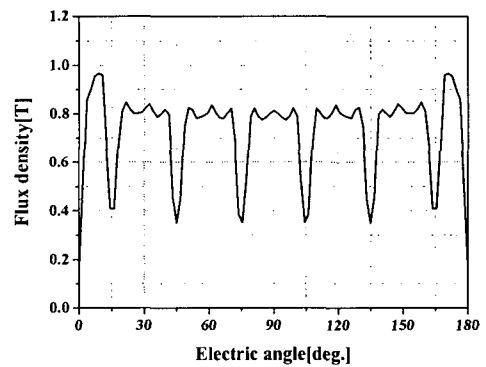


그림 2 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 공극 자속밀도
Fig. 2 The air-gap flux density of IPM BLDC motor

2.3 코깅 토크 저감을 위한 자속장벽의 위치설계

영구자석 매입형 BLDC 전동기의 회전자 표면에 자속장벽을 설치하여 d축을 기준으로 q축의 영구자석쪽으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 만들어 줌으로써, 공극에서의 자속밀도 분포를 정현적으로 만들어 줄 수가 있다. 이 때 회전자 표면에 설치되는 자속장벽은 영구자석에 의해 발생하는 자속량을 차등적으로 회전자 표면에 흐르게 함으로써, 공극에서의 자속밀도의 파형이 정현적이 되도록 한다.

본 논문에서는 자속장벽의 위치설계를 위하여 지수적 형상에 따른 면적비를 이용한다. 우선 지수적 형상의 면적비를 구한 후에 이것을 영구자석의 길이 또는 회전자 호의 길이에 적용하여 각각의 면적비에 따른 위치를 설계한다. 그 후 설계된 위치에 따라 회전자의 표면과 영구자석 사이에 자속장벽을 설치하게 된다. 면적비를 통하여 자속장벽의 위치를 결정하는 것은 자속장벽에 의하여 차등으로 발생하는 자속량을 회전자 표면에 흐르게 하거나(방법[1]) 또는 동일한 영구자석의 자속량을 서로 다른 길이의 회전자 표면에 흐르게 함으로써(방법[2]) 공극에서의 정현적 자속밀도 파형을 얻을 수 있다. 또한 지수적 형상의 면적비를 적용하는 것은 분할 개수에 따라 면적비의 차가 상대적으로 크기 때문에 자속장벽을 설치할 경우, 보다 정현적인 자속밀도 파형을 얻을 수 있기 때문이다.

그림 3은 면적비 산출을 위해 필요한 지수적 형상을 나타낸다. 그림 3에서처럼 양변의 길이가 r인 지수적 형상을 대상으로 하였으며 또한 밀변을 1개에서 n개까지 균등하게 분

할하였을 경우 전체 면적에 따른 각각의 면적비를 산출하여, 회전자 표면에서 자속장벽의 위치를 결정하게 된다.

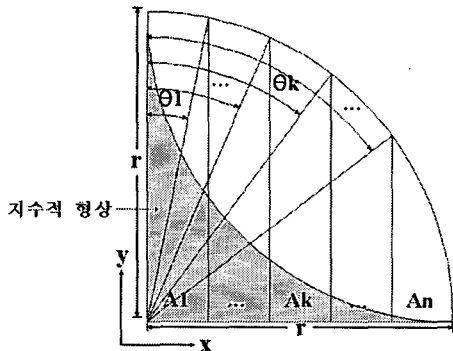


그림 3 지수적 형상에 따른 면적 분할도
Fig. 3 Area-division according to exponential shape

면적비를 구하기 위하여 적용된 지수적 형상의 면적식은 다음과 같다.

$$A_{k'=(n+1)-k} = \frac{r^2}{4n} - \int_{\theta_{k-1}}^{\theta_k} r^2 \cos^2 \theta = r^2 \left[\frac{1}{2} \theta + \frac{\sin 2\theta}{4} \right]_{\theta_{k-1}}^{\theta_k} \quad (1)$$

($k' = n, n-1, \dots, 2, 1$)

그림 3과 면적식 (1)에서 r은 밀변의 길이, n은 밀변의 균등분할 개수, A_k는 K번째 면적을 의미하며 θ는 전체 형상의 y축을 기준으로 하였을 경우, 면적비를 구하는 K번째 면적의 y축까지의 각을 의미한다. 또한 회전자부의 크기와 설치되는 자속장벽 폭의 길이에 따라 설치할 수 있는 개수의 제한이 있기 때문에 회전자의 1/4모델에서 자속장벽의 설치 개수를 최대 6개까지로 정한다.

예를 들어 자속장벽의 설치 개수가 6개일 경우(회전자 1/4모델) 한쪽 영구자석을 기준으로 하여 3개의 자속장벽이 설치되는 것이므로 균등 분할의 개수는 4(=n)가 되며, 면적식(1)에 따라 자속장벽 설치를 위한 각 면적비는 표 2와 같다.

표 2 지수적 형상의 면적비
Table 2 Area-ratio about exponential shape [%]

	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4
4등분할	63.70	26.20	8.88	1.22
3등분할	75.14	21.93	2.92	
2등분할	89.89	10.11		

2.4 자속장벽의 설치에 따른 특성해석

지수적 형상에 따른 면적비를 영구자석의 길이(방법[1]) 또는 회전자 호의 길이(방법[2])에 대하여 적용하여 회전자

표면에서 자속장벽을 설치 한 후에 전체적인 자속밀도의 분포 및 코깅 토오크에 대한 특성해석을 유한요소법을 이용하여 수행한다.

2.4.1 영구자석의 길이에 대한 면적비 적용: 방법[1]

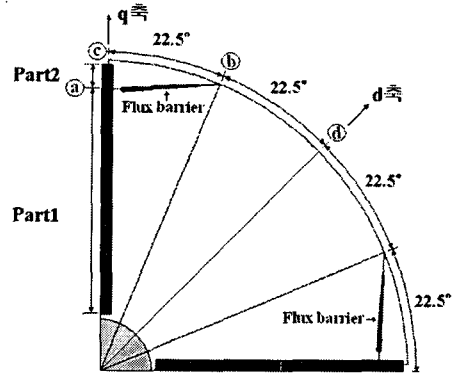


그림 4 영구자석 전체 길이에 면적비를 적용(방법[1])
Fig. 4 Area-ratio application in the length of permanent magnet(method[1])

방법[1]은 영구자석의 길이에 비례하여 발생하는 자속량을 자속장벽으로 인해 동일한 길이로 나뉜 회전자 표면에 흐르게 함으로써, d축을 기준으로 하여 q축 방향으로 갈수록 회전자 표면의 단위면적당 흐르는 자속량을 작아지게 하여 공극에서 발생하는 자속밀도의 분포가 정현적이 되도록 하는 방법이다.

그림 4는 그림 3의 지수적 형상을 2등분한 후, 산출된 면적비를 방법[1]에 적용하여 자속장벽을 설치한 회전자 단면을 나타낸다. 지수적 형상을 2등분하였을 경우 면적비는 표 2에서처럼 89.89[%], 10.11[%]를 갖게 된다. 각각의 면적비를 영구자석의 길이에 적용을 하면 영구자석의 길이는 면적비에 비례하여 각각 Part1과 Part2로 나뉠 수가 있고, ㉑지점은 Part1과 Part2의 경계지점이 된다. 그리고 회전자의 호의 길이를 동일한 각도로 분할을 하였을 경우, 분할된 부분의 경계지점은 ㉒지점이 되는데 분할의 경계지점이 되는 ㉑지점과 ㉒지점 사이에 공극으로 이루어진 자속장벽을 설치하게 된다.

자속장벽에 의해 Part1과 Part2의 서로 다른 길이에 비례하여 발생하는 자속량은 동일하게 나뉜 회전자 표면 ㉑-㉒, ㉒-㉓ 사이에 흐르게 되므로 d축을 기준으로 하여 공극에서의 자속밀도가 높아지게 되며, q축방향으로 갈수록 자속밀도는 작아지게 되어 공극에서의 자속밀도 분포가 정현적이 된다. 또한 형상을 2등분한 면적비를 가지고 영구자석을 분할하였기 때문에 그림 4에서처럼 전동기의 1/4모델에 있어 자속장벽의 설치개수는 2개가 되며, 설치된 자속장벽의 두께는 0.3[mm]로 선정하였다.

자속장벽의 두께는 자속장벽의 두께에 따른 평균토오크 및 출력을 비교하여 선정을 하였다. 그림 5와 표 3은 서로 다른 두께의 0.3[mm]와 0.5[mm] 자속장벽을 동일한 면적비(그림 4의 조건)를 적용하여 설치하였을 경우의 토오크 파형 및 출력의 변화값을 나타내고 있다. 그림 5와 표 3에서

처럼 자속장벽의 두께가 0.3[mm]일 경우 평균토크 및 출력변화에서 유리하며 자속장벽의 두께가 작은 것이 회전자 기계적 강도에 있어서도 상대적으로 유리하기 때문에 자속장벽의 두께를 0.3[mm]를 선정하였다.

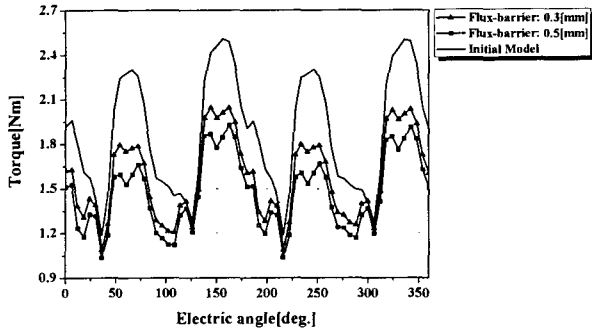


그림 5 자속장벽 두께에 따른 토크 리플
Fig. 5 Torque-ripple according to thickness of Flux-barrier

표 3 자속장벽 두께에 따른 출력의 변화
Table 3 Output-power according to thickness of Flux-barrier

	Initial Model	Flux-barrier: b2, 0.3[mm]	Flux-barrier: b2, 0.5[mm]
평균 토크 [Nm]	1.88	1.58	1.47
저감율 [%]	-	15.97	21.83
출력 [W]	591.13	496.51	461.88

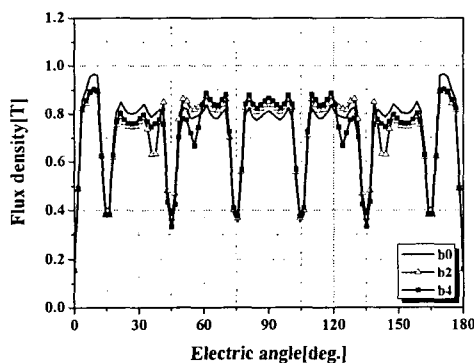


그림 6 방법[1]에 의한 자속밀도 분포파형 비교
Fig. 6 Flux density by method[1]

그림 6은 지수적 형상을 2~3등분하였을 경우 얻어지는 면적비를 방법[1]에 적용하여 자속장벽을 설치하였을 경우, 설치개수에 따른 자속밀도 파형변화를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있듯이 초기모델에 비하여 자속장벽을 설치하였을 때 자속밀도 파형이 정현적으로 나타남을 알 수 있다. 또한

그림 7과 표 4는 코깅 토크의 파형 및 평균값을 나타내는데 표 4의 결과값을 통하여 회전자의 1/4 모델에서 자속장벽을 2개 설치하였을 경우 설치 전보다 코깅 토크가 약 9.91[%] 감소됨을 알 수 있다.(그림 6과 7에서 b는 자속장벽을 의미하며, 숫자는 1/4모델에서 자속장벽의 설치개수를 나타낸다.)

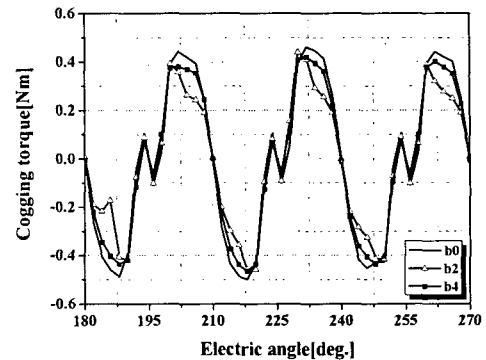


그림 7 방법[1]에 의한 코깅 토크 파형 비교
Fig. 7 Cogging torque by method[1]

표 4 방법[1]에 의한 코깅 토크(Peak to peak)[Nm]
Table 4 Analysis result of cogging torque by method[1]

자속장벽	b0	b2	b4
코깅 토크 [Nm]	0.928	0.836	0.845

2.4.2 회전자 호에 대한 면적비 적용: 방법[2]

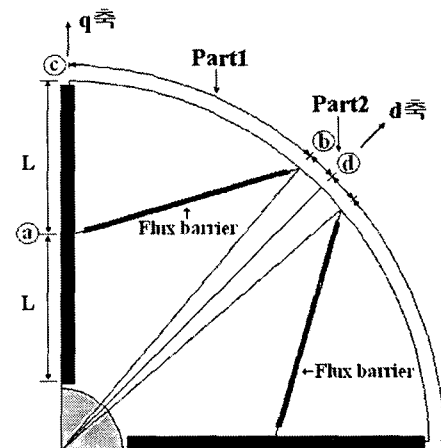


그림 8 회전자의 호 길이에 면적비를 적용(방법[2])
Fig. 8 Area-ratio application in the length of arc(method[2])

방법[2]는 방법[1]과는 달리 영구자석의 일정한 길이에 비례하여 발생하는 자속량을 자속장벽으로 인해 면적비로 분할된 회전자 호의 표면에 흐르게 함으로써, 단위면적당 발생

되는 자속밀도의 분포가 정현적이 되도록 하는 방법이다.

그림 8은 그림 4의 조건과 동일하게, 지수적 형상의 면적비를 방법[2]에 적용하여 자속장벽을 설치한 회전자를 나타낸다. 면적비인 89.89[%], 10.11[%]를 d축과 q축 사이의 회전자 호 길이에 적용을 하게 되면, 그림 8에서처럼 Part1과 Part2로 각각 나뉠 수가 있고 ⑥지점은 Part1과 Part2의 경계지점이 된다. 그리고 영구자석의 길이를 동일한 길이로 분할을 하였을 경우, 분할된 각 부분의 경계지점은 ④지점이 되는데 각각의 경계지점이 되는 ④지점과 ⑥지점 사이에 방법[1]처럼 자속장벽을 설치하게 된다.

방법[2]는 동일한 길이에 비례하여 발생하는 자속량이 자속장벽에 의해 서로 다른 길이의 회전자 표면 ③-⑥, ⑥-④ 사이에 흐르게 되고, 표면 ③-⑥보다 상대적으로 길이가 작은 표면 ⑥-④에서 보다 높은 자속밀도가 발생되게 된다. 이 때 d축을 기준으로 하여 q축방향으로 갈수록 자속밀도는 작아지게 되어 공극에서의 자속밀도 분포가 정현적이 된다.

그림 9는 표 2의 지수적 형상의 면적비를 방법[2]에 적용하여 자속장벽을 설치하였을 경우, 설치개수에 따른 자속밀도 파형변화를 나타낸다. 그림 9를 통하여 자속장벽을 설치하였을 때 초기모델보다 정현적인 자속밀도 파형이 나타남을 확인할 수 있다. 또한 그림 10과 표 5는 코깅 토오크의 파형 및 평균값을 나타낸다.(그림 9와 10에서 b는 자속장벽을 의미하며, 숫자는 1/4모델에서 자속장벽의 설치개수를 나타낸다.)

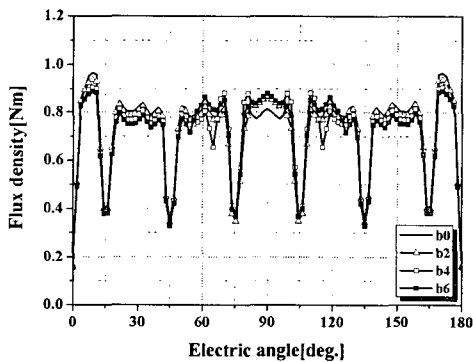


그림 9 방법[2]에 의한 자속밀도 분포파형 비교
Fig. 9 Flux density by method[2]

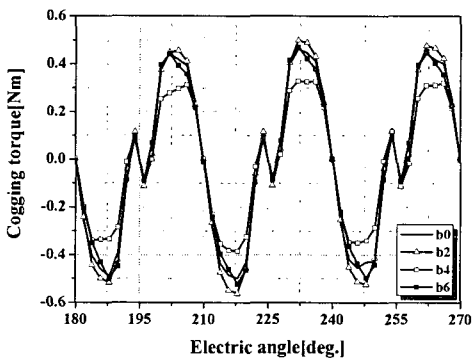


그림 10 방법[2]에 의한 코깅 토오크 파형 비교
Fig. 10 Cogging torque by method[2]

방법[1]을 이용하여 자속장벽을 설치한 표 4와 방법[2]에 의하여 자속장벽을 설치한 표 5에서 자속장벽의 최대 설치개수가 다르게 나타나는 것은 방법[1]이 영구자석의 길이를 면적비에 의해 분할하는 것이기 때문에, q축에 가까운 영구자석의 끝부분에서 자속장벽의 설치가 어렵기 때문이다. 따라서 방법[1]을 적용하여 자속장벽을 설치할 경우 자속장벽의 설치개수에 제한이 있음을 확인 할 수 있다.

표 5 방법[2]에 의한 코깅 토오크(Peak to peak)[Nm]
Table 5 Analysis result of cogging torque by method[2]

자속장벽	b0	b2	b4	b6
코깅 토오크 [Nm]	0.928	1.010	0.678	0.962

표 5에서 코깅 토오크 값이 자속장벽이 설치되지 않은 초기모델의 값보다 크게 나타나는 경우가 발생됨을 알 수 있다. 이것은 공극쪽 자속장벽의 끝단사이 거리와 고정자측의 슬롯 치폭과의 위치관계 때문인데 이것은 자속장벽을 면적비에 따라 설치하였을 경우, 자속장벽의 설치 개수가 늘어남에 따라 자속장벽의 끝방향이 하나의 슬롯 치폭 쪽으로 물리게 되기 때문이다. 이와 같이 자속장벽과 슬롯 치폭과의 상관관계에 의하여 코깅 토오크 값이 결정되어진다. 방법[1]에서는 끝단사이의 거리가 치폭보다 크나, 방법[2]에서는 자속장벽 끝단사이의 거리가 설치 개수에 따라 슬롯 치폭보다 좁아지기 때문에 추가적인 코깅 토오크가 발생하여 초기모델의 값보다 큰 경우가 나타나는 것이다. 표 5의 결과값을 통하여 회전자의 1/4모델에서 자속장벽을 4개 설치하였을 경우 코깅 토오크가 약 26.94[%]정도 저감됨을 알 수 있다.

2.5 방법[1]과 방법[2]에 의한 특성비교

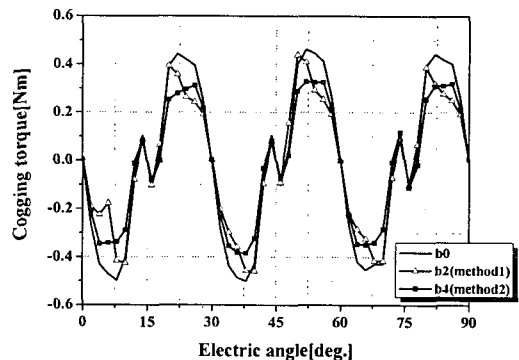


그림 11 방법[1]과 방법[2]에 의한 코깅 토오크 비교
Fig. 11 Characteristics of the cogging torque

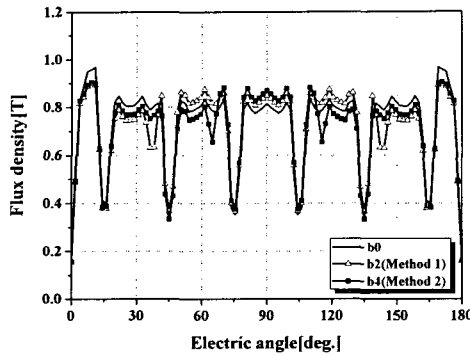


그림 12 공극 자속밀도 파형의 비교
 Fig. 12 The comparison of flux density in the air-gap

그림 11은 방법[1]과 방법[2]에 의하여 발생하는 코깅 토크가 최소일 경우의 파형을 나타낸 것이다. 그림 11에서 방법[2]에 의해 자속장벽이 설치된 경우, 초기모델에 비해 코깅 토크가 약 26.94[%] 감소되었음을 확인 할 수 있다.

그림 12는 코깅 토크가 최소일 경우의 공극 자속밀도 파형을 비교한 것이다. 그림 12에서처럼 방법[1]과 방법[2]에 의한 자속장벽을 설치할 경우, 코깅 토크의 저감과 더불어 공극 자속밀도 파형이 초기모델보다 정현적 분포에 가깝게 나타남을 확인하였으며 초기 자속밀도 분포파형의 양 끝단에서 자속밀도 값이 치솟는 부분 역시 저감됨을 알 수 있어, 자속장벽 설치를 통하여 소음과 진동측면에 유리한 공극 자속밀도 파형을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

또한 그림 11과 그림 12를 통하여 지수적 형상의 면적비를 회전자 호 길이에 적용하여 자속장벽을 설치한 방법[2]가 방법[1]보다 정현적인 공극 자속밀도 분포를 만들 수 있으며, 코깅 토크 역시 가장 크게 저감됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위하여 자속장벽의 설계를 제안하였다. 영구자석 전동기에 있어 코깅 토크의 저감은 출력 토크의 감소에 영향을 미친다. 그러나 자속장벽의 설치를 통하여, 출력 토크 맥동을 감소시킴으로써 소음과 진동측면에서의 문제점을 개선하고, 속도변동 및 위치제어에서의 악영향을 감소시킴으로써 모터의 성능을 향상시킬 수 있었다. 또한 지수적 형상의 면적비를 회전자 호의 길이(방법[2])에 적용하여 자속장벽을 설치하였을 경우, 600[W]급 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크가 설치 전보다 약 26.94[%] 저감되었고 토크 리플은 약 30.37[%]정도 저감됨을 확인할 수 있었다.

영구자석 매입형 BLDC 전동기에서 자속장벽의 설치에 코깅 토크를 저감시킬 수 있으나, 유한요소 해석결과 코깅 토크의 저감에 따라 출력 토크도 약 19.91[%]정도 저감

됨을 확인하였다. 따라서 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 향후 연구과제는 자속장벽에 의한 코깅 토크 저감에 있어 발생하는 출력 토크 저감에 관한 연구 및 자속장벽 설치시 회전자에서 발생할 수 있는 자속 포화에 의한 손실에 대한 연구 그리고, 자속장벽의 위치 최적설계에 대한 연구가 추후에 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이와 같은 추후 연구를 통하여 고출력 및 고속화에 적합하면서 소음과 진동 문제등에 민감한 산업 및 가전기기 분야에서 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 활용도가 더욱 높아지리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T.J.E Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Clarendon press, Oxford, 1994
- [2] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Mauro Zigliotto, "High-performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, pp. 1348-1355, September 2001
- [3] Kyung-Tae Kim, Kwang-Suk Kim, Sang-Moon Hwang, Tae-Jong Kim, Yoong-Ho Jung, "Comparison of magnetic forces for IPM and SPM motor with rotor eccentricity," IEEE Transactions on , Vol 37, pp3448-3451, Sept 2001
- [4] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, N. Schofield, D. Howe, "Reduction of Cogging Torque in Interior-Magnet Brushless Machines," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, pp. 3228-3240, September 2003
- [5] Dong-Hun Kim, Il-Han Park, Hoon-Ho Lee, Chang-Eob Kim, "Optimal Shape Design of Iron Core to Reduce Cogging Torque of IPM Motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, pp. 1456-1459, May 2003
- [6] Touzhu Li, Gordon Slemon, "Reduction of cogging torque in permanent magnet motors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, pp. 2901-293, November 1998
- [7] S.A. Nasar, I. Boldea, L.E.Unnewehr, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self-synchronous Motors," CRC press, 1993

저 자 소 개



윤근영 (尹勤榮)

1977년 9월 15일생. 2003년 한양대 전자컴퓨터공학부 졸업. 2005년 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사) 2005년~현재 Atechsolution 기술연구소 주임연구원.

Tel : 031-350-8174

Fax : 031-350-8190

E-mail : khito@lycos.co.kr



양병렬 (梁炳烈)

1973년 6월 21일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정, 삼성전자가전연구소 선임연구원.

Tel : 031-218-5178

Fax : 031-218-5196

E-mail : yangcom@hanmail.net



권병일 (權炳一)

1956년 2월 1일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원. 1991년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수.

Tel : 031-400-5165

Fax : 031-406-5073

E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr