

회전자부의 자속장벽 설치를 통한 IPM type BLDC 전동기 코깅 토크 저감에 대한 연구

윤근영¹, 양병렬³, 류세현^{1,2}, 권병일¹
¹한양대학교, ²전자부품연구원, ³삼성전자

Reducing Cogging Torque in Interior Permanent Magnet type BLDC motor by Flux barriers in the rotor

Keun-young Yun¹, Byoung-yull Yang³, Se-hyun Rhyu^{1,2}, Byung-il Kwon¹
¹Hanyang University, ²Korea Electronics Technology Institute, ³Samsung Electronics

Abstract - Several techniques have been adopted in motor design of interior permanent magnet (IPM) type brushless DC (BLDC) motor to minimize cogging torque. IPM type motor has better ability in the centralization of flux than surface-mounted permanent magnet (SPM) type BLDC motor. So, the structure of IPM type BLDC motor has high saliency ratios that produce additional torque. However, this structure has a significant cogging torque that generates both vibration and noise. This paper describes new technique of the flux barriers design for reduction of cogging torque of IPM type BLDC motor. To reduce the cogging torque, flux barriers are applied in the rotor. Changing the number of barrier, the cogging torque is analyzed by finite element method(FEM).

류밀도를 유지하기 위하여 권선방법이 분포권으로 되어 있다. 다음의 표 1은 초기모델의 설계사양을 나타낸다.

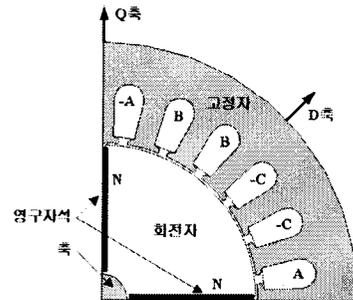


그림 1. IPM type BLDC 전동기(초기모델)

1. 서 론

최근에 고 에너지적의 영구자석의 개발로 영구자석을 사용하는 전동기에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 특히, 고속, 고휘력 특성에 유리한 구조적 특성을 갖는 IPM type BLDC 전동기는 전동차량을 포함한 산업 및 가전 기기 분야로의 활용이 높아지고 있다[2]-[3]. 그러나, IPM type BLDC 전동기는 자기회로상의 불평형적 자기 저항의 차에 의하여 다른 전동기에 비하여 매우 큰 코깅(cogging) 토크를 갖는다. 이러한 코깅 토크는 전동기의 운전시 소음 및 진동을 유발하는 요인으로 작용함으로, 전동기의 설계시 코깅 토크의 저감 방안이 필요하다.

본 논문은 IPM type BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 연구의 일환으로써, 공극 자속밀도를 정현적으로 만들어 주기 위한 자속 장벽의 설계 방법을 제안하고, 2차원 유한요소해석을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

2. 자속장벽의 위치설계

2.1 IPM type BLDC 전동기

영구자석이 회전자 내부에 매입된 형태의 IPM type BLDC 전동기는 d축과 q축 자속의 경로가 다르기 때문에 자기저항의 차가 크게 발생되는 구조를 갖는다. 즉, 회전자에 존재하는 자기저항 차에 의한 돌극성으로 인하여 인덕턴스의 차이가 발생됨으로 자기적 토크 이외에 추가적인 토크턴스 토크가 발생되는 구조적 장점을 가지게 되며 회전자의 구조적 형태로 인해 고속회전에 유리하고 기계적인 구조가 견고한 특성을 갖게 된다.

그림 1은 본 논문의 연구대상 초기모델로서 저전압, 대전류의 입력조건을 갖는 IPM type BLDC 전동기의 단면도를 나타낸다. 그림 1에서처럼 초기모델은 4극수를 가지며, 입력특성을 고려하여 고정자 권선에서 적정 전

표 1. IPM type BLDC 전동기의 설계사양

구분	사양	구분	사양
입력전압	직류24[V]	극 수	4[poles]
정격속도	3,000[rpm]	병렬회로수	4[parallel]
공극길이	0.5[mm]	상당직렬턴수	16[turns]
상 수	3[phases]	영구자석	Nd소결[Br=1.0T]

2.2 공극부의 자속밀도

초기모델에서 고정자의 권선사양이 분포권이므로 고정자의 전류에 의한 자속의 형태가 정현적이 된다. 따라서 영구자석에 의한 자속분포 역시 정현적일 때 소음과 진동면에서 상당히 유리한 토크를 발생시킬 수가 있다.

그림 2는 초기모델의 공극 자속밀도 파형을 나타낸다.

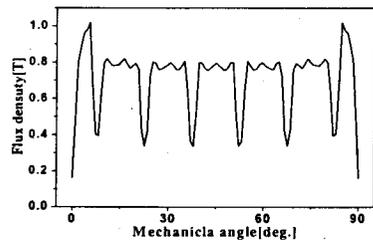


그림 2. 초기모델의 공극 자속밀도 분포

그림 2에서 자속밀도 분포는 구형적 파형이고, 분포파형의 양 끝단에서 자속밀도 값이 치솟는 부분이 존재한다. 이와 같은 분포파형은 전동기의 동작에 있어 소음과 진동의 원인이 될 수 있다. 따라서 회전자의 표면에 자속장벽(flux barrier)을 설치함으로써 영구자석에서 발생

되는 자속의 흐름을 조절하여, 공극에서 자속밀도의 분포가 정현적이 되도록 한다.

2.3 코깅 토크 저감을 위한 자속장벽의 위치설계

그림 1에서 회전자의 d축을 기준으로 q축방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 하여, 공극 자속밀도의 분포가 정현적으로 나타나도록 회전자의 표면에 자속장벽을 설치한다.

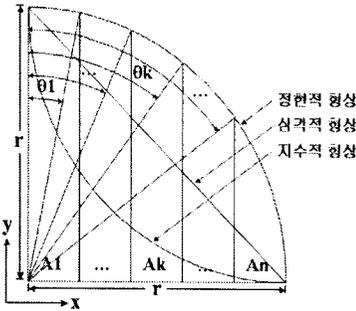


그림 2. 형상에 따른 면적 분할도

자속장벽을 설치하기 위하여 임의의 형상의 밀변을 균등하게 분할하여 전체 면적에 대한 각 요소의 면적비를 구한 후에 면적비를 영구자석 또는 회전자의 호에 적용하여 자속장벽의 위치를 결정한다.

우선 면적비를 구하는 형상은 그림 2에서처럼 양변의 길이가 r인 정현적, 삼각적, 지수적 형상을 대상으로 하고, 밀변을 1개에서 n개까지 균등하게 분할하여 전체 면적에 따른 각각의 면적비를 계산한다. 형상에 따른 면적비를 구하기 위하여 적용된 면적식은 다음과 같다.

정현적 형상의 면적식

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

삼각적 형상의 면적식

$$A_k = \int_{r_n^{(k-1)}}^{r_n^k} (-x+r) dx = \left[-\frac{x^2}{2} + rx \right]_{r_n^{(k-1)}}^{r_n^k} \quad (2)$$

지수적 형상의 면적식

$$A_{k=(n+1)-k} = \frac{r^2}{4n} \int_{\theta_{k-1}}^{\theta_k} r^2 \cos^2 \theta = r^2 \left[\frac{1}{2} \theta + \frac{\sin 2\theta}{4} \right]_{\theta_{k-1}}^{\theta_k} \quad (3)$$

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

여기서, r은 밀변의 길이, n은 밀변의 균등분할 개수, k는 k번째 면적을 의미하며 θ 는 전체면 y축을 기준으로 하였을 경우, 구하고자 하는 k번째 면적의 y축까지의 각을 의미한다.

정현적, 삼각적, 지수적인 각각의 형상에 대한 면적식 (1)~(3)에 의해 면적비는 표 2~4와 같다. 그러나 제작상의 어려움과 자속장벽 설치에 따른 회전자에서의 자속포화를 고려하여 설치 개수의 제한이 발생되며, 1/4모델 회전자에서 자속장벽의 최대 설치개수를 6개로 제한한다.

표 2. 정현적 형상에 대한 면적비[%]

	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4
4등분	31.50	29.40	24.67	14.42
3등분	41.64	36.45	21.91	
2등분	60.90	39.10		

표 3. 삼각적 형상에 대한 면적비[%]

	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4
4등분	43.75	31.25	18.75	6.25
3등분	55.56	33.33	11.11	
2등분	75.00	25.00		

표 4. 지수적 형상에 대한 면적비[%]

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

3. 자속장벽 설치 및 특성해석

3.1 영구자석의 길이에 대한 면적비 적용: 방법[1]

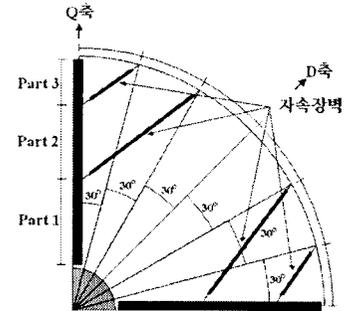


그림 4. 면적비를 영구자석의 전체길이에 적용

방법[1]은 영구자석의 길이에 비례하여 발생하는 자속량을, 자속장벽으로 인해 동일한 길이로 나눈 회전자 표면에 흐르게 함으로써, d축에서 q축으로 갈수록 회전자 표면에 대응해 단위면적당 흐르는 자속량을 작아지게 하여 공극에서 발생하는 자속밀도의 분포가 정현적이 되도록 하는 방법이다.

그림 4는 정현적 형상을 3등분한 경우의 면적비를 방법[1]에 적용하여, 영구자석을 분할한 지점과 회전자 호의 균등분할 지점 사이에 자속장벽을 설치한 회전자를 나타낸다. 이때 설치된 자속장벽의 두께는 공극길이를 고려하여 0.5[mm]로 선정한다.

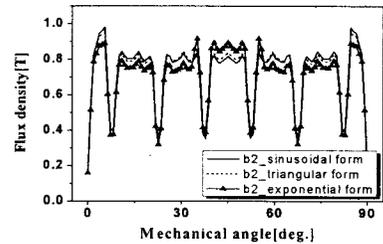


그림 5. 각각의 면적비를 이용한 자속장벽 설치시 자속밀도 분포파형 비교

그림 5는 방법[1]을 이용하여, 각각의 형상을 3등분한 면적비를 적용한 자속장벽을 설치할 경우 자속밀도 파형들을 나타낸다. 그림 5에서처럼 정현적, 삼각적 면적비를 적용하였을 경우보다 지수적 면적비를 적용하였을 경우에 공극에서 자속밀도 파형이 가장 정현적으로 나타남을 알 수 있다.(b는 자속장벽을 의미하며 숫자는 자속장벽의 개수를 나타낸다.) 따라서, 특성 해석 모델은 정현적, 삼각적 면적비를 제외하고, 지수적 면적비를 적용한 모델에 대하여 방법[1]과 방법[2]에 관한 연구를 수행한다. 그림 6은 지수적 면적비에 대한 자속장벽을 설치하였을 때, 설치개수에 따른 자속밀도 파형변화를 나타내며 표

6은 이때 발생하는 코깅 토크의 결과값을 나타낸다.

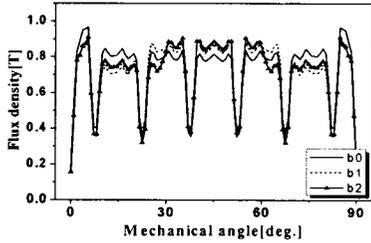


그림 6. 자속장벽 개수에 따른 공극 자속밀도 변화

표 5. 방법[1]에 의한 코깅 토크(peak to peak)[Nm]

	b0	b1	b2
지수적 면적비	0.93	0.63	0.73

3.2 회전자 호에 대한 면적비 적용: 방법[2]

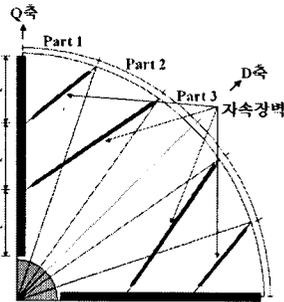


그림 7. 면적비를 회전자의 호 길이에 적용

방법[2]은 방법[1]과는 달리 영구자석의 일정한 길이에 비례하여 발생하는 자속량을 자속장벽으로 인하여 면적비로 분할된 회전자 호의 길이에 호르게 함으로써 단위 면적당 발생하는 자속밀도의 분포가 정현적이 되도록 하는 방법이다.

그림 7은 그림 4의 조건과 동일한 형상의 면적비 호의 길이에 적용하여 자속장벽을 설치한 회전자를 나타내며, 면적비로 나눈 호의 분할 지점과 영구자석을 균등분할 지점 사이에 자속장벽이 설치된 것을 볼 수 있다.

그림 8은 방법[2]에 의해 지수적 면적비를 이용하여 자속 장벽을 설치하였을 경우의 공극 자속밀도 파형변화를 나타내며 표 6은 이때 코깅 토크의 결과값이다.

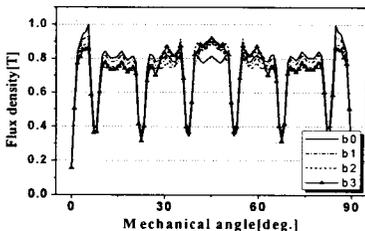


그림 8. 자속장벽 개수에 따른 공극 자속밀도 변화

표 6. 방법 [2]에 의한 코깅 토크(peak to peak)[Nm]

	b0	b1	b2	b3
지수적 면적비	0.93	1.01	0.52	0.93

표 6에서 코깅 토크 값이 자속장벽이 설치되지 않은 초기모델보다 크게 나타나는 것은 공극극의 자속장벽의 끝단사이의 거리와 고정자극의 슬롯 치폭과의 위치관계

때문이다. 방법[1]에서는 끝단사이의 거리가 치폭보다 크나 방법[2]에서는 자속장벽 끝단사이의 거리가 설치 개수에 따라 슬롯 치폭보다 좁아지기 때문에 추가적인 코깅 토크가 발생하여 초기모델의 값보다 큰 경우가 나타난다.

3.3 방법[1]과 방법[2]에 의한 특성비교

그림 9는 지수적 형상의 면적비를 이용하여 방법[1]과 방법[2]에 의한 자속장벽을 설치하였을 때, 공극 자속밀도 파형이 가장 정현적 분포가 나타나는 경우를 비교한 파형이다.

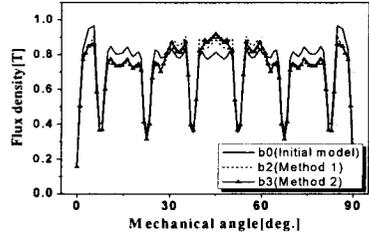


그림 9. 공극 자속밀도 파형의 비교

그림 9에서처럼 자속장벽의 설치를 통하여 공극 자속밀도 파형이 초기모델보다 정현적 분포에 가깝게 나타나며, 초기 자속밀도 분포파형의 양 끝단에서 자속밀도 값이 치솟는 부분 또한 감소함을 확인할 수 있다. 또한 그림 10은 방법[1]과 방법[2]에 의하여 발생하는 코깅 토크가 최소일 경우의 파형을 나타낸 것이다. 그림 10에서 방법[2]에 의해 자속장벽이 설치된 경우 초기모델에 비해 코깅 토크가 약 44.1[%] 감소되었다.

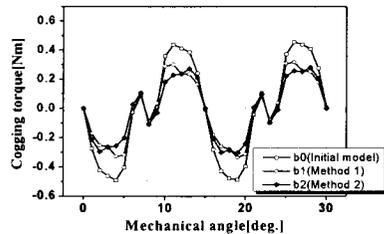


그림 10. 방법[1]과 방법[2]에 의한 코깅토크 비교

4. 결 론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 방법으로 공극에서 정현적 자속밀도 분포를 만들기 위하여, 회전자 호의 길이에 지수적인 형상의 면적비를 적용한 자속장벽의 설계방법을 제안하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 제안된 방법으로 설계된 모델의 자속밀도 분포가 초기모델에 비하여 정현적으로 나타났다으며 코깅 토크 역시 저감됨을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*, Clarendon press, Oxford, 1994
- [2] T.J.E Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford 1993
- [3] S.A.Nasar, I. Boldea, L.E.Unnewehr, *Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors*, CRC Press 1993
- [4] Thomas M. Johns, Wen L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, pp. 321-330, April 1996