

양축면식 평판형 영구 자석 동기 전동기의 오버행 효과에 관한 연구

조원영, 이인재, 김병국, 김태현, 활동원, 조윤현, 전연도*
동아대학교, *한국 전기연구원

The Study of Overhang Effect of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Motor with a Double sided Airgap

WonYoung JO, InJae LEE, ByungKuk KIM, TaeHyun KIM, DongWon HWANG, YunHyun CHO, YonDo CHUN*
DongA University, *Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The permanent magnet(PM) overhang effect has been generally used to enhance the linkage flux in the motor. In this paper, we quantitatively investigate the PM overhang effect in the new type axial flux permanent magnet (AFPM) motor with a double-sided airgap. The motor performances such as linkage flux, back electromotive force (EMF), magnetic force, etc. were analyzed according to the variation of the overhang angle. From the results, we can select the proper overhang angle of PM which improves the performance of the AFPM motor.

전동기내의 다양한 오버행 각도에 따라 전동기 구동 시 역기진력이나 기자력, 누설 자속 등 전동기 특성에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다. 여기서는 보다 정확한 자계 해석을 위해 3D FEM을 사용하였다.

1. 서 론

기존의 원통형 영구 자석 브러시리스 전동기 및 동기 전동기는 회전자와 고정자 코어가 축방향으로 적층되어 축을 기준으로 방사형으로 자계가 형성된다. 따라서 출력을 증가시키기 위해서는 축방향 길이를 증가시킬 수 밖에 없고 증가량에 한계를 가지게 된다. 또한 직경이 크고, 길이가 짧은 경우에도 단위 체적당 토크가 발생하는 회전자 표면의 유효 단면적이 작으므로 고 토크를 발생할 수 있으며, 효율이 낮은 단점이 있다.

반면에 기존의 전동기 구조와 달리 축방향의 평판형 요크에 영구자석을 장착한 회전자와 축방향의 평판형 요크와 반경 방향으로 적층된 코어를 갖는 고정자 구조의 형태로 되어 있는 이 전동기를 평판형 영구자석 브러시리스 전동기 및 동기 전동기(이하 평판형 전동기라 함)는 자속의 축방향 성분을 이용하므로 전동기의 직경이 크고, 길이가 짧은 경우에 단위 체적당 발생 토크가 크고, 용량에 비해 전동기 체적을 많이 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 평판형 전동기의 구조는 요구되는 전동기의 용량에 따라 회전자 및 고정자를 축방향으로 다층으로 구성할 수 있으므로, 회전자와 고정자를 용량에 따라 멀티 형으로 구성하여 단위 체적 당 고 토크를 발생할 수 있는 멀티 전동기의 제작이 가능한 구조가 특징이다.

본 전동기의 고정자 코어 구조의 특징은 기존 평판형 전동기의 롤링 형태 치 구조와는 달리 치 코어와 평판 적층 코어, 고정 프레임으로 나누어지며, 코어 조립은 평판형의 적층 코어에 치 코어를 삽입하고, 치 코어 둘레에 고정 프레임으로 고정시키는 구조로 되어 있다. 따라서 기존의 롤링 구조의 코어가 제작 상 어려운데 반해, 본 논문에서 제안한 평판형 전동기는 결합식 고정자 구조에 의한 상품화 가치가 있다고 사료된다.

본 논문에서는 일반적으로 고정자 코어의 길이보다 긴 영구자석의 오버행 구조가 전동기에 미치는 영향에 대해 알아본다. 오버행은 보통 전동기내의 누설자속을 수반하게 되는데, 이러한 오버행 효과에 대한 연구는 원통형이나 직선형 브러시리스 영구 자석 전동기에 관하여 주로 이루어져 왔다[1~3]. 그러나 평판형 전동기의 오버행 효과에 대한 연구는 극히 드물다. 따라서 본 논문은 평판형

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 평판형 전동기의 구조 및 사양

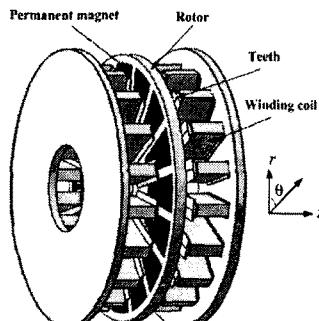


그림 1. 평판형 전동기의 형상

표 1. 평판형 전동기 해석 모델 사양

	Power	15[kW]
	Voltage	380[V]
Rated	Current	4 × 5.87[A]
	Speed	1800[rpm]
	Torque	79.6[Nm]
Stator	Slot number	18
	Material	S45C
Rotor	Pole number	16
	Material	S45C
Winding	Turns/coil	90[turns]
	Conductor	φ1.2[mm]
	Diameter	1.28[T](20°)
Magnet	Material	NdFeB
	Coercivity	970[kA/m]
Air-gap		2[mm]
Winding connection		4-Y
Overhang angle		0~9[deg]

기존의 평판형 전동기는 일반적으로 코어리스 전동기로서 고정자 슬롯에 자심이 없는 구조로 그 크기가 소형이며, 코킹 토크를 최소로 요구하는 가전제품용이나 사

무기기용으로 주로 개발되었다. 자심이 있는 경우에도 톤링한 규소강판을 절단한 고정자 코어의 형태로 제작상 어려움이 많다.

반면에 본 논문에서 제안한 평판형 전동기는 코어의 구성이 기존의 평판형 전동기와는 달리 치 코어와 평판 적층 코어 및 고정 프레임으로 나누어지며, 코어 조립은 평판 적층 코어에 치 코어를 삽입하고, 고정자 프레임에 의해 장착되는 구조로 되어 있다. 고정자 코어는 돌극형 구조의 슬롯 코어로 적층되어 있으며, 회전자는 고정자 양면에 마주보는 영구 자석과 고정 프레임으로 구성되어 있는 양측면식 내전 평판형 전동기라 할 수 있다. 이 평판형 전동기의 구조는 그림 1과 같고, 주요 사양은 표 1에서 나타난다.

2.2 평판형 전동기의 특성식

평판형 전동기의 고정자에 흐르는 전류와 미소 영구 자석에 의해 회전자에 작용하는 힘은 플레밍의 원론 법칙으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_d = K_t N_1 I B_{mg} (D_{out}^2 - D_{in}^2) = K_t \times \text{Cross Section Area} \quad (1)$$

위의 식으로부터 적층 길이에 비례하는 원통형 전동기의 토크식과는 달리 평판형 전동기에서는 내경과 외경의 길이에 따라 토크가 결정됨을 알 수 있다.

영구 자석 한 극당 넓이에 의해 발생하는 공극 내 자속과 상당 고정자 전기자 권선에 의한 상당 역기전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_f = a_i \frac{\pi}{p} B_{mg} \int_{D_{in}/2}^{D_{out}/2} r dr = 0.125 a_i \frac{\pi}{p} B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2)$$

$$e_f = k_{ul} N_1 \frac{d\psi_f}{dt} = 2\pi f k_{ul} N_1 \Phi_f \cos(\omega t) \quad (3)$$

식(2), 식(3)으로부터 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e_f(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (4)$$

여기서,

- N_1 : 상당 권선수
- I : 입력 전류
- B_{mg} : 공극 자속 밀도
- D_{in} : 내경, 외경
- D_{out} : 공극 내 정현파 자계에 대한 계수
- a_i : 공극 내 정현파 자계에 대한 계수
- K_{ul} : 권선 계수
- p : 극수
- k_d : D_{in}/D_{out}

2.3 해석 모델

본 연구에서는 그림 2에서 보인 바와 같이 슬롯 뜻에 대한 영구 자석의 오버행 각도에 따라 오버행 효과가 전동기 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 여기서는 오버행 각도 θ_{ov} 의 값을 $0^\circ, 1.5^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ 로 변화시킨다.

며, 그에 따른 특성을 살펴보았다.

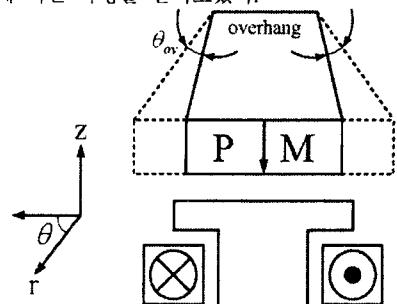


그림 2. 슬롯당 영구 자석 형상에 따른 오버행 구조

2.3 2차원 및 3차원 유한 요소법

기존의 원통형 전동기의 경우 계산 시간 단축 및 간단한 모델링 절차의 이점으로 2차원 해석이 주로 사용되고 있다. 그러나 2차원 해석의 경우 단면의 수직 방향으로 기하학적, 물리적 양이 일정하다는 조건이 필요하다. 본 논문에서의 해석 대상 전동기는 축방향으로 구조가 나열되어 있어 2차원 해석의 적용 대상이 될 수 없다. 따라서 평판형 전동기에 관한 해석 시 문제는 근본적으로 3차원 해석으로 해결할 수밖에 없다[4].

그림 3은 대상 전동기의 1/2 해석 모델 요소 분할도를 나타내며 전체 요소수 및 절점수는 각각 536125, 101108이다. 공극의 요소는 해석의 정밀성을 위하여 4중으로 분할하였으며, 토크 및 자기력 특성은 맥스웰 응용법을 적용하여 계산하였다. 평판형 전동기는 3상 PWM 인버터로 구동되고 있으므로, 동작특성을 정확히 파악하고 해석하기 위해서는 PWM 인버터의 스위칭, 구동회로의 전압방정식 및 환류다이오드 등을 고려하여야 하나 본 논문에서는 3차원 해석의 적용 시, 해석 모델을 각 상의 입력 전류가 5.87 A이고, 3상 전파방식으로 구동되는 정자계 문제로 보았다[4].

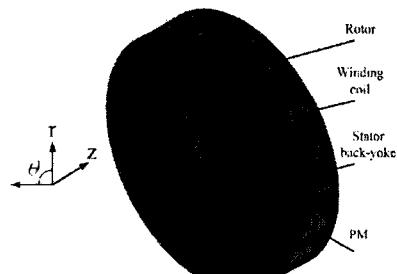


그림 3. 해석 모델의 요소 분할도(1/2모델)

3. 해석 및 실험 결과

3.1. 오버행 구조에 따른 특성

영구자석에 의한 오버행 효과를 정량적으로 알아보기 위해 전류를 인가하지 않은 상태의 오버행 각도에 따른 자속밀도 분포를 살펴보면 그림 4(a)와 같다. 그림 4(a)와 같이 오버행이 없는 구조에서는 내경, 외경 부분에서 자속의 프린팅 및 누설이 발생하며, 오버행 각도를 점차 늘렸을 경우 영구자석 오버행 부분에서 발생한 자속 일부가 고정자 코어로 쇄교 함으로써 공극 양단부에서 자속이 점차 증가함을 알 수 있다. 따라서 오버행 구조는 θ -방향 공극 양단에서의 자속 누설성분이 많은 경우 쇄교 자속을 증가시키기 위해 오버행 효과를 이용하면 효과적이라 할 수 있다. 그림 5는 오버행 각도에 따른 공

극 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 θ_{ov} 가 0° , 1.5° , 3° , 6° 일 때는 점차 쇄교 자속이 많아져 공극 양단에서의 자속 밀도가 높으나, 9° 일 때는 오히려 자속 밀도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 영구 자석의 표면 자속 밀도가 중앙 부분보다 양단 부분에서 더 크기 때문에 풀이된다. 따라서 쇄교 자속량과 누설 자속량으로 볼 때, 9° 의 오버행을 가지는 영구 자석이 가장 적합할 것으로 판단된다.

그림 6은 정상 상태 운전 시 회전자리의 속도가 무부하 1800rpm일 때 오버행 각도의 증가에 따른 각상의 역기 전력 특성을 나타낸 것이다. 오버행 각도에 따라 고정자리의 쇄교 자속량이 증가하므로 역기전력 크기도 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그림 7은 오버행 각도에 따른 코깅 토크 특성을 나타낸 것으로 오버행 효과는 코깅 토크 특성에 큰 영향을 미치지 않을 것임을 알 수 있다. 이로부터 토크 특성 또한 큰 변화가 없을 것임을 예측할 수 있다.

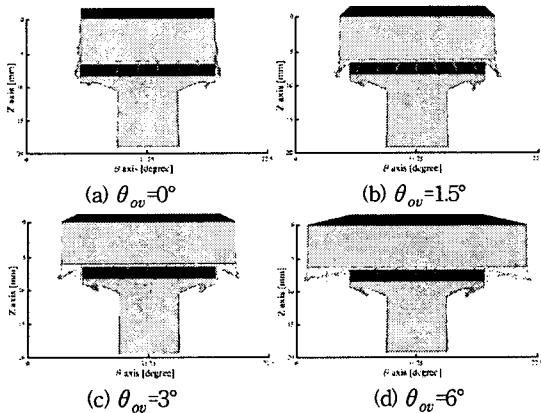


그림 4. 오버행 각도에 따른 자속밀도 벡터분포

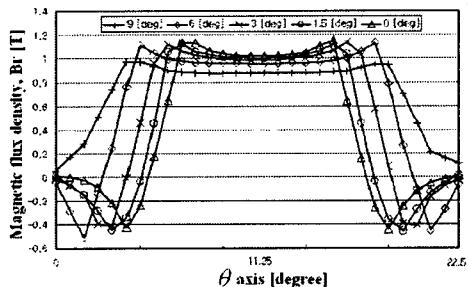


그림 5. 오버행에 따른 공극 자속밀도 분포($r=110\text{mm}$ 일 때)

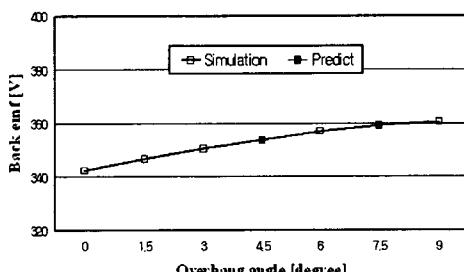


그림 6. 오버행에 따른 부부하 역기전력 특성

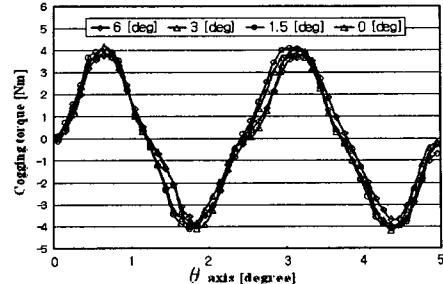


그림 7. 오버행에 따른 코깅 토크 특성

4. 결 론

본 논문에서는 오버행 구조를 갖는 양측면식 내전 영구자석 평판형 전동기를 대상으로 영구 자석의 오버행 효과가 전동기 특성에 미치는 영향에 대한 연구에 대하여 다루었다. 오버행의 효과적 해석을 위해 3차원 유한요소법을 사용하였고, 오버행 각도 변화에 따라 자속량, 역기전력, 자기력 등에 미치는 영향에 대해 검토해보았다. 해석 결과로부터 오버행 효과는 쇄교 자속을 증가시키며, 역기전력은 이에 비례함을 확인하였다. 또한 이로부터 오버행 각도를 6° 로 했을 경우에 특성이 가장 좋은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

평판형 전동기는 3상 PWM 인버터로 구동되므로, 보다 정확한 특성 해석을 위해서는 스위칭, 구동 회로 등이 고려되어야 하고, 이는 전동기 특성 실험과 비교해야 하는 등 이는 앞으로 지속적인 연구를 통해 보완해 나가야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발사업의 지원으로 수행된 논문임을 밝힙니다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Aydin, S. Husang, and T. A. Lipo, Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines, Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 1409-1416, 2001.
- [2] F. Caricchi, F. Crescimbini, O. Honorati, and E. Santini, Performance evaluation of an axial flux PM generator, Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 761-765, 1992.
- [3] M. Aydin, R. Qu and T. A. Lipo, Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM motors: alternating magnet pole-arcs in facing rotors, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Salt Lake City, 2003.
- [4] Y. D. Chun, Shinji Wakao, Ju Lee, Permanent magnet overhang effect on the characteristics in brushless DC motor, IEE Proc., 151B-4-3, pp. 229-236, 2004