

AFPM 전동기의 오버행 효과에 관한 연구

Overhang Effect on the Axial Flux Permanent Magnet Motor

우 동 균*
(Dong-Kyun Woo)

Abstract - In this paper, the overhang structure was applied to the axial flux permanent magnet (AFPM) motor. This paper describes the overhang effect in the AFPM motor. Moreover, the overhang effect was analyzed according to the different overhang length and an optimal overhang structure was proposed. Finally, the proposed structure was applied to design, analysis and experiment of prototype motors. Through the comparison between 3D finite element analysis results and experimental ones, the validity of proposed structure is clarified.

Key Words : Axial flux permanent magnet motor, optimal design, overhang effect, overhang structure.

1. 서 론

영구자석 전동기는 영구자석이 회전자에 부착되는 구조에 따라 SPM (surface-mounted permanent magnet) 전동기와 IPM (interior permanent magnet) 전동기로 구분할 수 있고[1],[2], 자속이 공극을 지나는 방향에 따라 radial flux permanent magnet(RFPM) 전동기와 axial flux permanent magnet(AFPM) 전동기로 구분할 수 있다[3].

RFPM 전동기에서는 고정자의 축 방향 길이보다 회전자의 축 방향 길이가 긴 오버행 구조를 통해 오버행 효과를 얻을 수 있다. AFPM 전동기에서는 고정자의 방사(radial)방향 길이보다 회전자의 방사방향 길이가 긴 구조를 통해, 오버행 효과를 얻을 수 있다. 전동기의 설계방법으로는 등가자기 회로법으로 구현하는 집중정수법이나 finite element(FE) 해석을 이용하는 분포정수법으로 나눌 수 있다. 오버행 구조를 고려한 기존의 연구방법으로는 대부분 FE 해석을 이용해 왔다[3]. 등가자기 회로법을 통해 오버행 구조를 고려하는 경우 FE 해석에 비해 해석시간이 빠른 장점이 있는 반면, FE 해석에 비해 결과의 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다. 2D FE 해석은 모델링과 계산시간의 측면에서 3D FE 해석보다 빠른 장점이 있다. 하지만 3차원적인 구조의 오버행 효과를 정확하게 분석하기 위해서는 3D FE 해석이 반드시 필요하다.

한편, 오버행 구조를 적용한 영구자석 전동기의 연구는 RFPM 전동기를 중심으로 이루어져 왔다[4]-[9]. 본 논문에서는 RFPM 전동기에 적용되어 왔던 오버행 구조를 AFPM 전동기에 적용함으로써, 전자기적 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보고 최적의 성능을 발휘할 수 있는 오버행 구조를 제시하고자 한다.

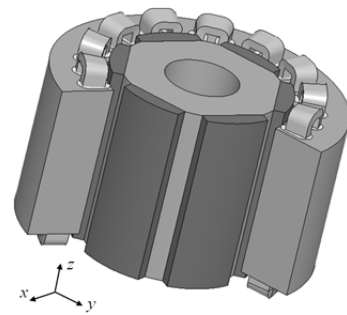


그림 1 오버행 구조를 갖는 RFPM 전동기
Fig. 1 RFPM motor with overhang structure

2. AFPM 전동기에서의 Quasi-3D FEM

RFPM 전동기에서는 그림 1과 같이 고정자의 축 방향 길이보다 회전자의 축 방향 길이가 긴 구조를 통해, 적층 끝단에서의 누설자속에 의한 손실을 보상하며 공극자속을 증가시킴으로써 오버행 효과를 얻을 수 있고, AFPM 전동기에서는 고정자의 방사(radial)방향 길이보다 회전자의 방사 방향 길이가 긴 구조를 통해 공극자속을 증가시킴으로써 오버행 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 AFPM 전동기에 대해 동일한 자석량을 기준으로 회전자의 내/외경 방향에 따라 각각 다르게 오버행 길이를 적용할 때 전동기의 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 한다. 그림 2는 해석 모델을 나타낸다. 그림 2(a)의 model 1은 오버행 구조가 없는 AFPM 전동기이다. 그림 2(b)의 model 2와 그림 2(c)의 model 3은 동일한 자석량을 사용하였으며, model 2는 회전자의 내/외경 방향으로 오버행 구조가 적용된 AFPM 전동기이고, model 3은 회전자의 외경 방향으로만 오버행 구조가 적용된 AFPM 전동기이다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Eng. Yeungnam University, Korea

E-mail : wdkyun@yu.ac.kr

Received : September 16, 2015; Accepted : March 28, 2016

3. AFPM 전동기의 오버행 길이 최적화

AFPM 전동기는 고정자의 방사방향 길이보다 회전자 방사방향 길이가 긴 구조를 통해, 오버행 구조를 얻게 된다. AFPM 전동기는 회전자의 내/외경 방향에서의 포화도와 누설자속에 대한 영향이 다르기 때문에, 오버행 길이를 내/외경 방향에 대해 다르게 적용할 수 있다. 이러한 특성은 AFPM 전동기의 권선을 감는 공간을 최대로 하기 위해, 반경 방향에 따라 슬롯이 일정하도록 설계하는 것으로부터 비롯된다. 즉, 슬롯 피치에 대한 극호각의 비율이 반경 방향을 따라 일정하지 않기 때문에 AFPM 전동기의 반경에 따른 누설자속 및 포화도가 달라진다.

본 논문에서는 AFPM 전동기의 오버행길이 최적화를 위해 Climb method를 사용하였다[10],[11]. 그림 3은 설계 변수를 나타내고, 표 1은 시험용 전동기의 기본 설계 사양을 나타낸다. 본 논문에서는 최고속도에서의 출력 값이 요구 출력의 25(%)가 넘도록 목적함수 값을 설정하였고, 다른 주요한 특성들은 제한 조건으로 고려하였다.

먼저, 모델 3가 최고속도에서의 출력 값이 목적함수 값을 만족하도록 최적의 오버행 길이를 결정하였다. 그리고 오버행 길이를 회전자 내/외경 방향으로 적용한 모델 2가 목적함수 값을 만족하는 오버행 길이를 찾도록 하였다. 모델 3이 목적함수 값을 만족하는 조건은 오버행 길이 12가 5(mm)일 때 출력이 6283.2(W)였다. 모델 3에서 오버행 구조에 의한 모델 1에 비해 증가된 자석량을 바탕으로 모델 2에 적용하여 최적의 오버행 길이 11과 12의 조합을 찾도록 하였다.

최적화 결과로부터, 최고속도에서의 출력 값들이 서로 비슷하다면, 토크리플이 낮은 값을 선택하도록 하였다. 토크리플은 전동기 설계 시 특별한 요구 제한치가 없으며, 실제로 정격토크의 어느 범위까지 낮추어야 하는지에 대한 기준을 마련하기 어렵다. 다만, 토크리플이 지나치게 크면 전동기의 기동을 어렵게 하고 소음과 진동의 원인이 될 수 있기 때문에[1], 토크리플은 첨두치간(peak to peak)의 차이를 기준으로 평균토크의 10(%)이하로 제한하였다.

그림 4는 AFPM 전동기의 최적화 과정을 나타낸다. 최적화 과정으로부터 도출된 해석 결과가 제한 사항을 넘지 못하는 경우에

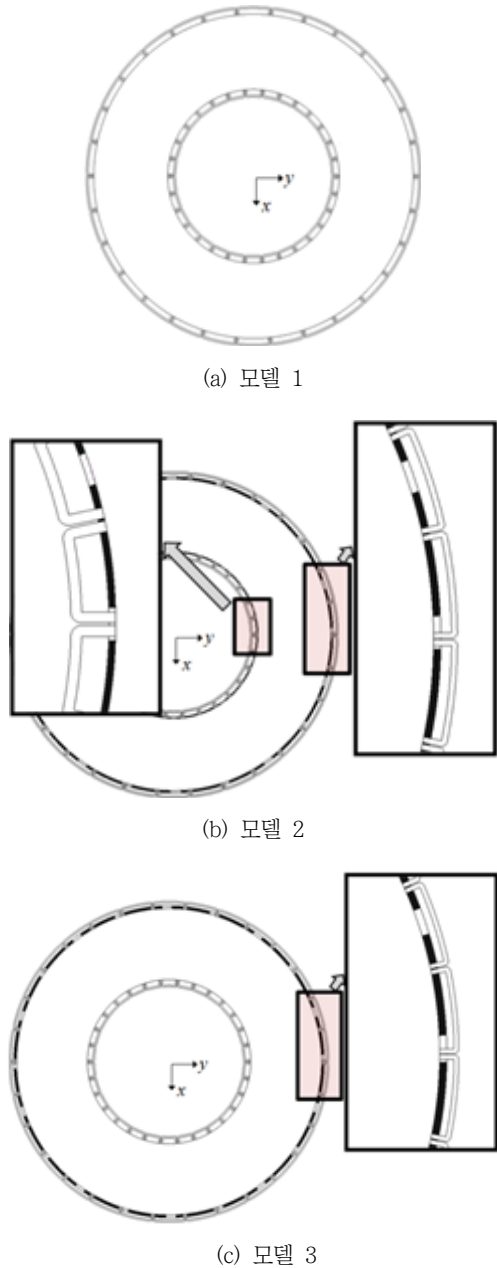


그림 2 해석모델
Fig. 2 Analysis model

표 1 AFPM 전동기의 기본 설계사양
Table 1 Specification of AFPM motor

정격 출력 (kW)	5
정격 토크 (Nm)	119
최고 속도 (r/min)	800
DC link 전압 (Vdc)	300
전기자 전류 (Apeak)	28

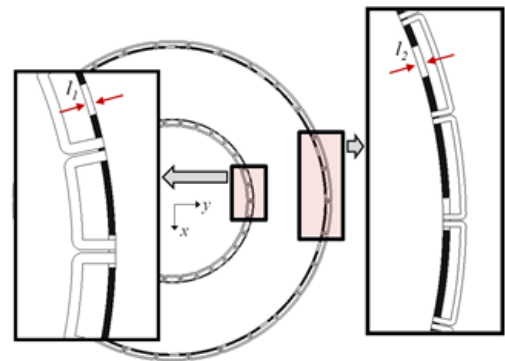


그림 3 설계변수
Fig. 3 Design variable

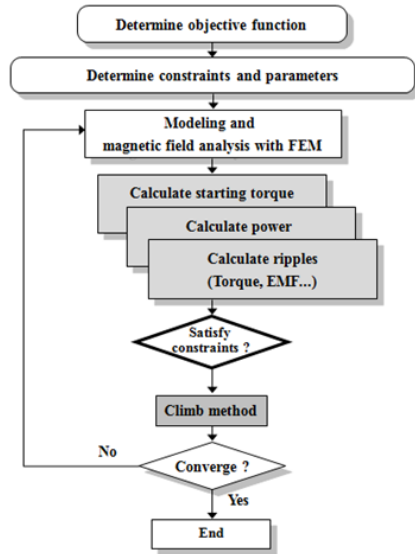


그림 4 AFPM 전동기의 최적화 과정
 Fig. 4 Optimization process of an AFPM motor

도 Climb method를 적용하게 된다. 일반적인 최적화 알고리즘에서는 해석 결과가 설계자가 지정한 요구사항을 넘지 못하면 적합도를 '0'으로 하여, 최적화 과정에 참여 할 수 없게 만든다[6]. 하지만, 제안된 설계과정에서는 종료 조건을 만족할 때까지 세대를 거듭하는 동안 얻어진 모든 정보들이 목적함수 대리 모델의 품질을 향상 시켜, 수렴 속도를 증가 시키도록 한다[10],[11].

표 2는 3개의 후보해에 대한 결과를 나타낸다. 후보해 2가 가장 높은 출력 값을 갖지만 토크 리플이 가장 높기 때문에, 후보해 3을 최종 해로서 선정하였다. 후보해 3은 정격토크에 비해 27.3(%) 증가된, 모델 1에 비해 4.1(%) 증가된, 모델 3에 비해 1.3(%) 증가된 출력을 나타내었다. 해석 결과들로부터 동일한 자석량을 사용하면서 고정자의 포화도를 고려하여 회전자에 내/외경 방향으로 오버행 구조를 적용한 모델 2의 결과가 가장 좋은 성능 향상을 나타낸 것을 볼 수 있다.

표 2 최적화 결과

Table 2 Optimization results

	후보해 1	후보해 2	후보해 2
l1(mm)	0.5	1.6	2.0
l2(mm)	4.7	4.2	4.0
출력(W)	6283.2	6384.1	6366.9
토크(Nm)	75.0	76.2	76.0
토크리플(%)	11.2	11.8	9.2

4. AFPM 전동기의 제작 및 실험

그림 5는 시험용 AFPM 전동기를, 그림 6은 시험세트를 나타낸다. 모델 1의 역기전압 최대값은 214(V)였다. 모델 2의 역기전



(a) 고정자 (b) 회전자

그림 5 시험용 AFPM 전동기
 Fig. 5 Prototype AFPM motor

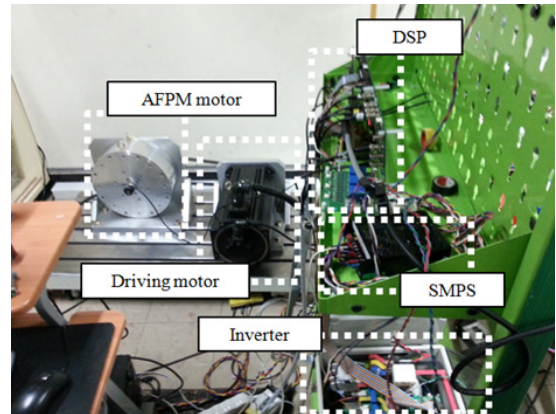


그림 6 실험세트
 Fig. 6 Test set

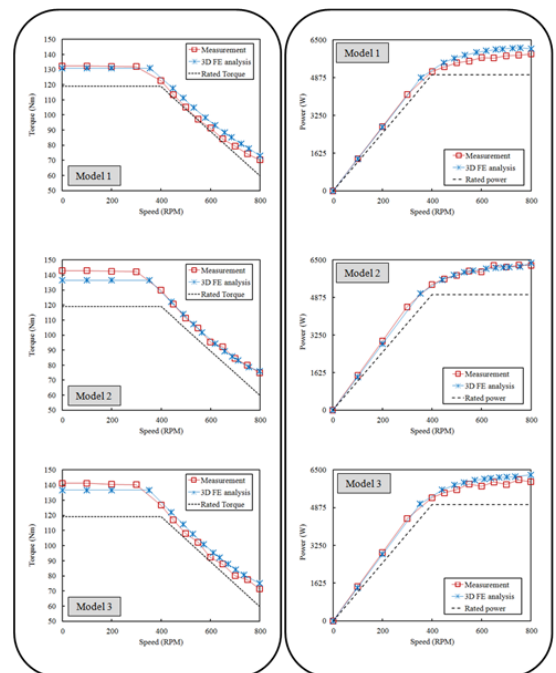


그림 7 실험 및 해석결과
 Fig. 7 Experiment and simulation results

압 최대값은 226(V)로써 모델 1에 비해 5.5(%) 증가하였다. 모델 3의 역기전압 최대값은 224(V)로써 모델 1에 비해 4.6(%) 증가하였다. 그림 7에서 모델 1의 기동 토크 값은 130.9(Nm)였다. 모델 2의 기동 토크 값은 136.6(Nm)로써 모델 1에 비해 4.3(%) 증가하였다.

모델 3의 기동 토크 값은 136.0(Nm)로써 모델 1에 비해 3.9(%) 증가하였다. 해석 결과들로부터 동일한 자석량을 사용하면서 고정자의 포화도를 고려하여 회전자 내/외경 방향으로 오버행 구조를 적용한 모델 2의 결과가 가장 좋은 성능 향상을 나타낸 것을 볼 수 있다.

세 가지 모델에 대해 부하해석 시 해석결과와 실험결과 사이의 오차가 존재하는 것을 확인 할 수 있었다. 실험결과에 대한 오차는 무부하 조건보다 부하해석 조건에서 더 큰 오차를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 고정자는 방사방향을 따라 적층이 고려되었지만, 회전자는 고정자의 재질(PN08)과 다른 재질(S45C)을 사용함으로써, 방사방향을 따라 적층이 고려되지 않은 통 솔리드 형태로 제작이 되었기 때문에, 부하해석 시 철심의 비선형적인 포화 특성이나 회전자 철심의 증가로 인하여 이해 성능의 차이를 가져온 것으로 추측해 볼 수 있다. 또 다른 오차의 원인으로는 시험용 세트가 벨트 구동방식에 의한 구동모터의 토크 값을 AFPM 전동기의 토크 값으로 계산하기 때문에 속도의 증가에 따른 벨트슬립에 의한 영향을 고려해 볼 수 있다. 마지막으로, 시험용 전동기의 고정자 슬롯은 분할코어 방식으로 제작되었다. 시뮬레이션에서는 분할 코어를 모델링 할 수 없기 때문에 분할코어에 의한 자속의 손실에 의한 영향으로 오차가 존재하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 AFPM 전동기에 대해 동일한 자석량을 기준으로 회전자의 내/외경 방향에 따라 오버행 길이를 다르게 적용할 때 전동기의 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 동일한 자석량을 기준으로 AFPM 전동기에 오버행 구조를 적용할 때, 고정자의 포화도를 고려하여 회전자의 내/외경 방향으로 오버행 구조를 적용한 경우가 회전자의 특정 방향으로 오버행 구조를 적용한 경우에 비해 좋은 성능 향상을 나타낸 것을 볼 수 있었다.

References

[1] Jang-Ho Seo, Sang-Yeop Kwak, Sang-Yong Jung, Cheol-Gyun Lee, Tae-Kyung Chung, and Hyun-Kyo Jung, "A Research on Iron Loss of IPMSM With a Fractional Number of Slot Per Pole," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 3, pp. 1824 - 1827, Mar. 2009.

[2] Jang-Ho Seo, Chang-Hwan Im, Sang-Yeop Kwak, Cheol-Gyun Lee, and Hyun-Kyo Jung, "An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Mimicking

Territorial Dispute Between Groups for Multimodal Function Optimization Problems," IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1046 - 1049, Jun. 2007.

[3] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines," Springer, 2008.

[4] Y. D. Chun, and S. Wakao, "Magnetic force characteristics according to the variation of asymmetric overhang ratio in brushless direct current motor," J. Appl. Phys., vol. 93, no. 10, pp. 8775-8777, May 2003.

[5] K. C. Kim, D. H. Koo, and J. Lee, "The study on the overhang coefficient for permanent magnet machine by experimental design method," IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2483-2485, Jun. 2007.

[6] K. C. Kim, and J. Lee, "Overhang effect analysis of permanent magnet machine according to the rotor types", in proc. 12th Biennial IEEE Conf. Electromagn. Field Comput., CEFC, 2006, USA, p. 414.

[7] Y. D. Chun, J. Lee, and S. Wakao, "Overhang effect analysis of brushless DC motor by 3-D equivalent magnetic circuit network method," IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1610-1613, May 2003.

[8] D. K. Woo, D. K. Lim, H. K. Yeo, J. S. Ro, and H. K. Jung, "A 2D finite element analysis for a permanent magnet synchronous motor taking an overhang effect into consideration," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 8, pp. 4894-4899, Aug. 2013.

[9] Han-Kyeol Yeo, Dong-Kyun Woo, Dong-Kuk Lim, Jong-Suk Ro, and Hyun-Kyo Jung, "Analysis of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Machine with Overhang Structure by Using a Novel Equivalent Magnetic Circuit Model," JEET, vol. 9, no. 6, pp. 1960 - 1966, Sep. 2014.

[10] D. K. Woo, J. H. Choi, M. Ali, and H. K. Jung, "A Novel Multimodal Optimization Algorithm Applied to Electromagnetic Optimization," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 6, pp. 1667-1673, Jun. 2011.

저 자 소 개



우 등균 (Dong-Kyun Woo)

2007년 연세대학교 전기전자공학부 학사 졸업. 2014년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 박사 졸업. 2014년 3월~2015년 2월 효성중공업. 2015년 3월~현재 영남대학교 전기공학과 조교수