

개선된 Quasi-3D FEM을 통한 AFPM 전동기의 해석

The Improved Quasi-3D FE Analysis on the AFPM Motor

우 동 균*
(Dong-Kyun Woo)

Abstract - In the quasi-3D finite element(FE) analysis, the overall characteristics of axial flux permanent magnet(AFPM) motor could be composed of each computation region. However, A drawback of quasi-3D FEM is not to consider the end effect on the stack end. To address this problem, an improved quasi-3D FE analysis which considers the end effect of the AFPM motor was proposed. From results the 3D FE analysis, the validity of the proposed method is verified.

Key Words : Axial flux permanent magnet motor, End effect, FEM, Improved quasi-3D FEM, Quasi-3D FEM.

1. 서 론

영구자석 전동기는 자속이 공극을 지나는 방향에 따라 radial flux permanent magnet(RFPM) 전동기와 axial flux permanent magnet(AFPM) 전동기로 구분할 수 있다[1].

전동기의 가장 일반적인 형태는 RFPM 전동기로서, 영구자석으로부터 발생하는 주 자속(main flux)의 방향이 방사(radial)방향을 따라 분포한다[2]. 반면, AFPM 전동기는 영구자석으로부터 발생하는 주 자속의 방향이 축 방향(axial direction)을 따라 분포한다.

한편, 수치해석 기반의 상용 소프트웨어의 개발로 인해, finite element method(FEM)을 이용한 전기기기의 해석 및 설계가 이루어져 왔다[2]. FEM은 철심의 자기포화와 같은 비선형 특성을 고려하기 때문에 해석의 정확성을 보장하지만, 기하학적 구조가 3차원적인 전기기기의 해석에 있어 계산시간이 많이 걸리는 단점이 존재한다.

AFPM 전동기는 3차원 적인 구조에 의해 해석 및 설계에 있어 3D FEM이 반드시 필요하다[3]. 하지만, 계산 시간이 많이 걸리는 3D FEM이 AFPM 전동기의 초기 설계 단계부터 최적 설계 단계까지 적용되는 것은 매우 비효율적이다. 따라서, 이러한 문제를 해결하고자 AFPM 전동기의 설계에 등가자기회로법, quasi-3D FEM등이 적용되어[4]-[7].

Quasi-3D FEM은 AFPM 전동기를 독립된 n개의 계산영역으로 분할하여, 단부효과가 없는 2차원 선형전동기가 방사방향을 따라 연속적으로 연결된 것처럼 고려하여 해석한다. 하지만 quasi-3D FEM은 AFPM 전동기의 적층 끝단에서 단부효과를 고려할 수 없기 때문에 해석의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따

라서 본 논문은 개선된 quasi-3D FEM을 통해 AFPM 전동기의 단부효과를 고려하고자 한다.

2. AFPM 전동기에서의 Quasi-3D FEM

그림 1은 3차원적인 기하학적 구조를 갖는 AFPM 전동기를, quasi-3D FEM에서 사용될 2차원적인 기하학적 구조로 변환하는 방법을 나타낸다. AFPM 전동기로부터 분할된 각각의 영역을 해석한 뒤, 계산된 영역으로부터의 결과 값들을 조립해 AFPM 전동기의 전체적인 성능을 구성하게 되는데 이러한 방법을 가리켜 quasi-3D FEM 혹은 quasi-3D 모델링이라고 한다[4]-[7].

한편, AFPM 전동기는 그림 2와 같이 방사방향을 따라 구조가 확장되는 형태를 갖는다[8]. AFPM 전동기에서 권선을 감는 공

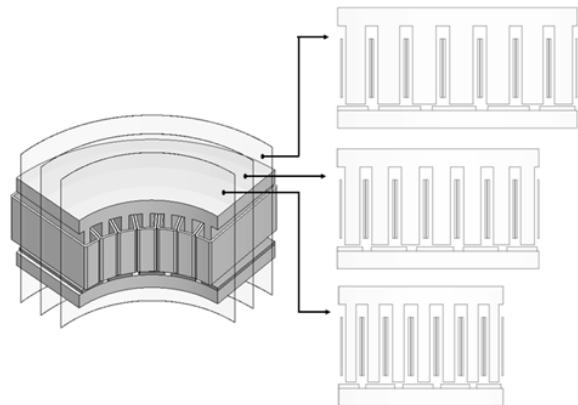


그림 1 AFPM 전동기를 quasi-3D FEM에서 사용될 2차원적인 기하학적 구조로 변환하는 방법

Fig. 1 Method of transforming to a 2D geometry which can be used in quasi-3D FEM

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

E-mail : wdkiyun@yu.ac.kr

Received : September 21, 2015; Accepted : March 25, 2016

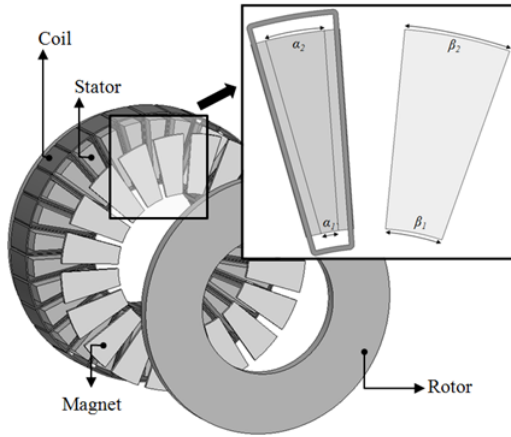


그림 2 AFPM 전동기
Fig. 2 AFPM motor

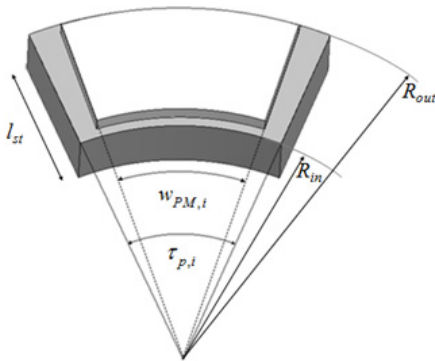


그림 3 AFPM 전동기
Fig. 3 AFPM motor

간을 최대한 활용하기 위해 슬롯을 평행한 형태로 만들게 되면, 고정자 내경과 외경에서의 슬롯피치(slot pitch)에 대한 극호각(pole arc)의 비율 값이 일정하지 않게 된다[9],[10].

또한, 고정자 내경에서의 치(teeth) 길이에 대한 영구자석의 극호각의 비율 값이, 고정자 외경에서의 치 길이에 대한 영구자석의 극호각의 비율 값이 서로 다르게 된다. 이러한 부분은 고정자 내/외경에서의 누설자속이나 포화도에 대해 영향을 미치게 된다. 따라서 quasi-3D FEM에서 전동기의 평균반경(average radius)을 기준으로 한 계산영역을 대표 영역으로 AFPM 전동기를 해석하는 방법은 계산의 정확성을 떨어뜨리게 된다[5]. 이러한 접근 방법은 AFPM 전동기의 방사방향을 따라 전동기 내에서의 포화도가 균등하거나 혹은 극 호각에 대한 극피치의 비율 값(pole arc to pole pitch ratio)이 고정자의 반경에 따라 일정하다면 전동기의 성능을 예측하는데 있어 신뢰 할 수 있다. 가령, 극 호각에 대한 극피치의 비율 값이 고정자의 반경에 따라 변화한다면, 추정된 역기전압 파형의 기본파 성분이 달라질 수 있기 때문에 오차를 가져올 수 있다. 더욱이, 고정자 권선의 사양을 결정하는데 있어 이러한 특성은 요구하는 역기전압 크기와 THD를 얻기 위해 반드시 고려해야 할 사항이 된다.

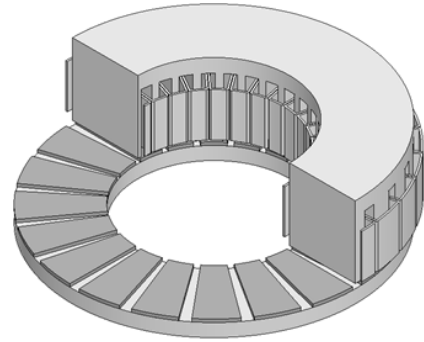


그림 4 해석모델
Fig. 4 Analysis model

Quasi-3D FEM에서 전동기의 평균반경을 기준으로 해석하는 방법의 또 하나의 문제점은 철손(iron loss)을 고려하는 경우에 발생한다. 이러한 문제점은 고정자 내경과 외경에서의 치 길이에 대한 영구자석 극호각의 비율 값이 서로 다른 점으로 인하여, 치 자속밀도의 최대값이 고정자의 내경과 외경에서 발생하기 때문이다.

이 부분은 영구자석의 형상과 관련이 있으며, 또한 극 호각에 대한 극피치의 비율 값과 관련이 있다. 이런 경우에는, 철손이 자속밀도에 대한 비선형 함수이기 때문에, AFPM 전동기를 여러 개의 독립된 계산 영역에 대해 철손을 계산하는 것과 같이 quasi-3D FEM의 계산 영역을 분리할 필요가 있다.

따라서, quasi-3D FEM을 AFPM 전동기에 효과적으로 적용하기 위해서는 전동기의 전반적인 자속밀도 분포를 고려하여 충분한 양의 독립된 계산 영역으로 분할해야 한다. 이것은 반경 방향에 따라 영구자석의 형상이 변하거나 치의 두께가 변하는 부분과 함께 영구자석의 스쿠(skew)를 고려할 수 있는 장점이 있다.

비록 AFPM 전동기가 근본적으로 3차원적인 문제이긴 하나 적층방향으로 흐르는 자속이 없다는 것을 가정할 때, 기본적인 파라미터 값들이 전동기의 반경과 관련하여 선형적으로 변화하고, 계산 값들이 전반적으로 전동기의 반경에 독립적이라면 각각의 계산 영역으로 부터의 결과 값들을 종합하는 것으로부터 AFPM 전동기의 전체적인 성능을 얻을 수 있다. 그림 3은 quasi-3D FEM에서 사용되는 설계변수를 나타낸다. Quasi-3D FEM에서 적층길이 l_{st} 는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$l_{st} = R_{out} - R_{in} \tag{1}$$

여기서 R_{out} 은 고정자 바깥쪽 반경, R_{in} 은 고정자의 안쪽 반경이다. i 번째 계산 영역에 대한 평균 반경 $R_{ave,i}$ 는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$R_{ave,i} = R_{out} - i \frac{l_{st}}{N+1}, \quad (1 \leq n \leq N) \tag{2}$$

여기서 N 은 전체 계산 영역의 개수이다. 역기전압의 계산과 같은 기본적인 해석의 경우에는 적은 개수의 계산 영역으로도 충분하지만, 철손 해석과 같은 비선형 특성을 고려하는 경우나 영구

자석의 스큐가 적용되는 경우에는 필요에 따라 계산 영역의 개수를 증가시켜야 한다. 각각의 계산 영역에 대한 극피치는 다음과 같다.

$$\tau_{p,i} = \frac{2\pi R_{ave,i}}{P} \quad (3)$$

여기서 P는 극 수를 의미한다. 각각의 계산영역에 대한 영구자석의 길이 $w_{PM,i}$ 는 극 호각에 대한 극피치의 비율 값이 일정하면 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있지만, 그렇지 않은 경우나 혹은 영구자석의 형상이 복잡한 경우에는 각각의 계산영역에서 따로 계산해야 한다. 식 (1)부터 식 (3)을 이용하여 AFPM 전동기를 quasi-3D FEM을 위한 특정한 개수의 계산 영역으로 분리 할 수 있다.

3. AFPM 전동기에서의 Quasi-3D FEM

AFPM 전동기는 quasi-3D 모델링의 관점에서 볼 때 단부효과가 없는 여러 개의 선형기가 방사방향을 따라 연속적으로 연결된 것처럼 볼 수 있다. 즉, quasi-3D FEM은 AFPM 전동기의 내경과 외경에 해당하는 적층 끝단에서 단부효과를 고려할 수 없기 때문에 해석의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 개선된 quasi-3D FEM을 통해 AFPM 전동기의 단부효과를 고려하고자 한다.

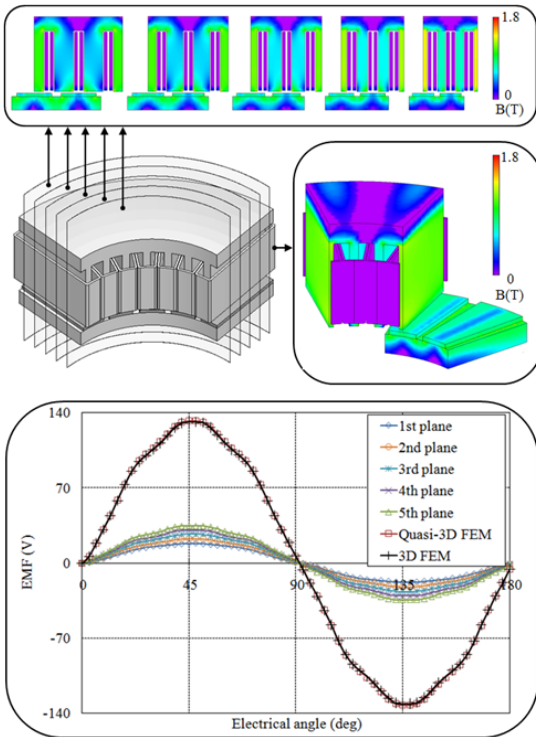


그림 5 EMF 해석결과 비교.
Fig. 5 Comparison results on EMF

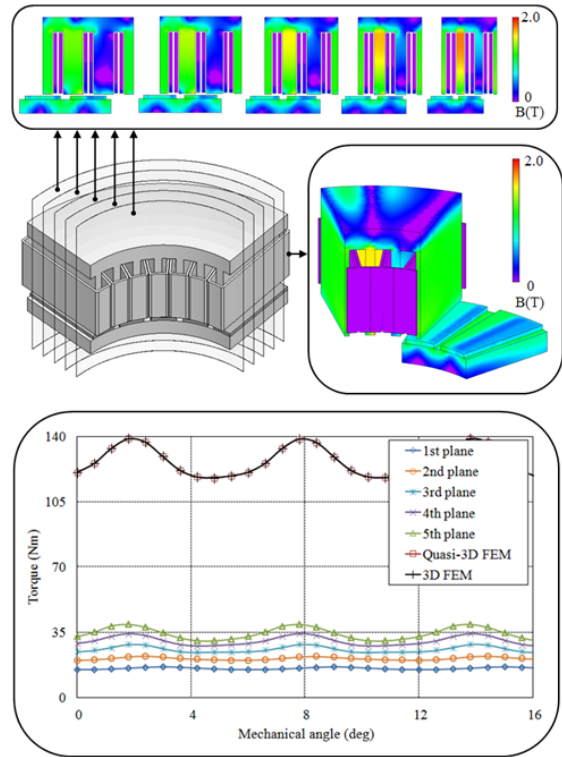


그림 6 토크 해석결과 비교.
Fig. 6 Comparison results on torque

AFPM 전동기는 적층 끝단에서 방사방향에 대한 단부효과가 두드러진다. 본 논문에서는 식 (5)로 주어지는 보정함수 $C(r)$ 를 이용하여 적층 끝단에서의 단부효과를 고려하고, 이를 이용하여 영구자석을 새롭게 모델링함으로써, 기존의 quasi-3D FEM이 단부효과를 고려하지 못한 문제점을 해결하고자 한다.

$$G(r) = \frac{1}{\pi} [\tan^{-1}\{2(r - R_i)\tan(\beta\pi/2)\} - \tan^{-1}\{2(r - R_o)\tan(\beta\pi/2)\}] \quad (4)$$

$$C(r) = G(r)/\max(G(r)) \quad (5)$$

여기서 R_i 와 R_o 는 각각 고정자의 안쪽/바깥쪽 반경이고, $R_i \leq r \leq R_o$ 이다. β 는 영구자석 내/외경에서 단부효과를 나타내는 변수로서 자속밀도 값의 감소에 따른 기울기를 결정한다. 식 (4)의 왼쪽 항은 AFPM 전동기의 내경에서의 단부효과를, 오른쪽 항은 외경에서의 단부효과를 나타내는 부분이다.

식 (4)를 바탕으로 생성된 보정함수를 통해, 적층 끝단에서의 영구자석 높이를 결정하게 된다. 이때 영구자석의 중간 위치에서의 보정함수 값을 기준으로, 회전자의 위치에 따른 보정함수 값으로 영구자석의 높이가 결정된다. 하지만, 식 (4)는 β 값에 따라 영구자석의 중간 위치에서의 보정함수 값이 변하기 때문에, 이 값을 1로 고정시키기 위해 식 (4)를 식 (4)의 크기로 나누어 줌으로써 식 (5)를 얻게 된다.

표 1 AFPM 전동기의 기본 사양

Table 1 Specification of AFPM motor

극 수	20
슬롯 수	30
고정자 외경 / 내경 / 높이 (mm)	280 / 150 / 71
회전자 외경 / 내경 / 높이 (mm)	280 / 150 / 16

표 1은 그림 4의 해석 모델에 관한 사양을 나타낸다. 그림 5와 그림 6은 제안된 quasi-3D FEM 결과와 3D FEM 사이의 역기전압과 토크를 비교한 결과이다. 무부하 해석과 부하해석에서 제안된 방법과 3D FEM 결과 사이의 오차가 3[%] 이내로, 제안된 quasi-3D FEM이 3차원적인 구조를 갖는 AFPM 전동기의 단부효과를 정확히 반영하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 AFPM 전동기의 해석과 설계에 적용되어 왔던 quasi-3D FEM이 단부효과를 고려할 수 없는 문제점을 해결하고자 하였다. 공극자속 분포와 관련된 보정함수를 이용하여 단부효과를 갖는 적층 끝단에서의 영구자석을 새롭게 모델링함으로써, 기존의 quasi-3D FEM이 단부효과를 고려하지 못한 문제점을 해결하였다. 무부하 해석과 부하해석에서 제안된 방법과 3D FEM 결과를 비교함으로써, 제안된 quasi-3D FEM이 AFPM 전동기의 단부효과를 정확히 반영하고 있음을 확인 할 수 있었다.

References

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

[2] 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.

[3] J. F. Gieras, and M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology-Design and Applications" New York, 1997.

[4] R. Qu, and T. A. Lipo, "Analysis and modeling of air-gap and zigzag leakage fluxes in a surface-mounted permanent-magnet machine," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 1, pp. 121-127, Jan. 2004.

[5] G. Cvetkovski, L. Petkovska, M. Cundev, and S. Gair, "Quasi 3D FEM in function of an optimization analysis of a PM disk motor," in Proc. Int. Conf. Electrical Machines, Helsinki, Finland, vol. 4, pp. 1871-1875, Aug. 2000.

[6] C. B. Rasmussen, and E. Ritchie, "A magnetic equivalent circuit approach for predicting PM motor performance," in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, pp. 10-17, 1997.

[7] J. Perho, "Reluctance network for analysing induction machines," Ph.D. dissertation, Dept. elect. Eng., Helsinki Univ. Technol., Helsinki, Finland, 2002.

[8] D. K. Woo, D. K. Lim, and H. K. Jung, "Rotor design strategy of interior permanent magnet synchronous motor for fuel cell electric vehicle," IJAEM, vol. 40, no. 1, pp. 51-66, Sep. 2012.

[9] D. K. Lim, D. K. Woo, I. W. Kim, J. S. Ro, and H. K. Jung, "Cogging Torque Minimization of a Dual-Type Axial-Flux Permanent Magnet Motor Using a Novel Optimization Algorithm," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 9, pp. 5106 - 5111, Sep. 2013.

[10] D. K. Woo, I. W. Kim, D. K. Lim, J. S. Ro, and H. K. Jung, "Cogging Torque Optimization of Axial Flux Permanent Magnet Motor," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 5, pp. 2189-2192, May. 2013.

저 자 소 개



우 동 균 (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