

Winding Function 이론을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 특성 해석

(Torque Characteristics Analysis of Synchronous Reluctance Motor
by Winding Function Theory)

우경일*

(Kyung-II Woo)

Abstract

In this paper, torque characteristics analysis of Synchronous Reluctance Motor with the cylindrical rotor type by winding function theory(WFT) is described. The stator is same as one of the induction motor. From the d-axis, q-axis flux density distribution, to calculate self and mutual inductances needed to calculate the torque of the machine by using winding function theory the new equivalent geometry of rotor was proposed. D-axis, q-axis flux densities, self inductance and torque characteristics were obtained. From the comparison with results of finite element analysis the proposed method was verified.

Key Words : Equivalent Model, Finite Element Analysis, Synchronous Reluctance Motor,
Winding Function Theory

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기는 회전자 돌극 구조에 의한 릴럭턴스 토크가 발생하는 전동기로서 회전자에 영구 자석이나 권선이 없어 구조가 간단하다. 고정자 권선은 일반적인 3상 정현파 분포를 가지므로 기존 교류전동기의 고정자를 그대로 이용할 수 있어 경제적이다. 또한, 정현파 회전자계에 의한 정현파 전류가 인가되

어 정현적으로 회전하는 공극 기자력을 발생시킴으로써 스위치드 릴럭턴스 전동기에 비해 토크 맥동 및 소음 등을 줄일 수 있어 유연한 토크특성 및 정속 운전이 가능하다. 영구자석을 사용하지 않기 때문에 IPMSM보다는 효율이 낮으나, 유도기에 비해서 높은 효율과 역률을 가지며 제작비용이 저렴한 장점이 있어 최근 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 해석을 위해서 수치해석법인 유한요소 해석이 많이 사용되고 있다. 유한요소 해석의 장점은 특성 해석의 결과가 실험 결과와 비슷하다는 것이지만 그에 비해 시간이 많이 소요된다는 단점이 있어 유한요소 해석을 대신할 특성 해석 방법에 대한 연구가 필요하다.

* 주저자 : 부경대학교 전기공학과
Tel : 051-629-6321, Fax : 051-629-6305
E-mail : cogging@pknu.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 14일
1차심사 : 2011년 3월 16일, 2차심사 : 2011년 5월 24일
심사완료 : 2011년 5월 31일

최근 전동기 특성 해석을 위해 WFT(Winding Function Theory)을 이용한 특성 해석 방법이 연구되고 있다. WFT를 이용한 유도전동기 특성 해석 및 고장 진단에 대한 연구도 발표되었으며[4-5], 돌극형 구조를 갖는 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 개선을 위한 d, q축 인덕턴스의 차와 비를 개선하는 논문[6] 및 토크 리플 감소를 위해 스큐를 고려한 특성 해석 기법도 발표되었다. 그러나 WFT를 이용한 자속장벽을 갖는 원통형 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 해석에 대한 논문은 아직 미진한 실정이다.

본 논문에서는 WFT를 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 특성 해석에 대하여 서술하였다. 돌극형 회전자보다 Ld, Lq차와 비의 특성이 좋은 자속장벽을 갖는 원통형 회전자를 사용하였고 WFT로 토크 특성을 해석하기 위하여 새로운 등가 회전자 모델을 제시하였다. 그리고 WFT에 의한 토크 특성 결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성을 검토하였다.

2. Winding Function Theory

2.1 해석모델

그림 1은 본 논문에서 사용된 해석 모델이다. 고정자는 일반적인 3상 정현분포를 가지며, 회전자는 자속장벽의 개수가 4개인 원통형 회전자를 사용하였다. 표 1은 해석모델의 제원을 나타낸다.

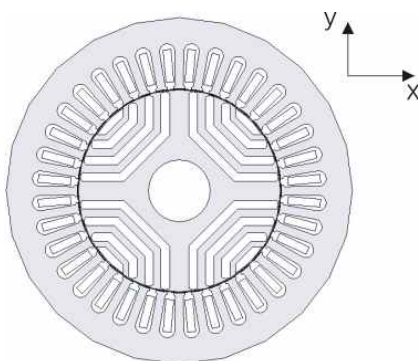


그림 1. 해석모델
Fig. 1 Analysis model

표 1. 해석 모델의 제원
Table 1. Specification of an analysis model

전원 전압	220/380 [V]
전원 주파수	60 [Hz]
극수	4
고정자 길이	70 [mm]
고정자 슬롯 수	36 개
고정자 내경 반지름	41.25 [mm]
공극 길이	0.35 [mm]
공극 반지름	41.075 [mm]
고정자 1상당 저항	5.81413 [Ω]
회전자 외경 반지름	40.9 [mm]

2.2 Winding Function

WFT은 전동기에 감겨있는 권선의 형태를 고려해서 기자력의 파형을 구한 후 전동기의 토크 계산 시 필요한 인덕턴스를 계산하는 방법이다. 단 자성체의 투자율은 무한대라고 가정하고 포화는 무시한다. 동기형 릴럭턴스 전동기의 상호 및 자기 인덕턴스 수식은 식 (1) 및 (2)와 같다[7].

$$L_{AB} = \mu_0 r l \int_0^{2\pi} N_A(\phi) N_B(\phi) g^{-1}(\phi - \theta) d\phi \quad (1)$$

$$L_{AA} = \mu_0 r l \int_0^{2\pi} N_A^2(\phi) g^{-1}(\phi - \theta) d\phi \quad (2)$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, r 은 회전자 반지름, l 은 축방향 길이. $N_A(\phi)$ 는 ϕ 에 대하여 나타내어지는 A상의 winding function(ϕ 는 x축에서 시작하는 각도), $N_B(\phi)$ 는 ϕ 에 대하여 나타내어지는 B상의 winding function, inverse air-gap function인 $g^{-1}(\phi - \theta)$ 은 회전자의 회전 각도 θ 에 따른 자속 경로의 변화를 나타내는 함수이다.

위 수식에서도 알 수 있듯이 인덕턴스 계산에 있어서 각 상의 winding function과 inverse air-gap function의 계산이 중요함을 알 수 있다. 그림 2는 A상의 전기각에 따른 winding function을 나타낸다.

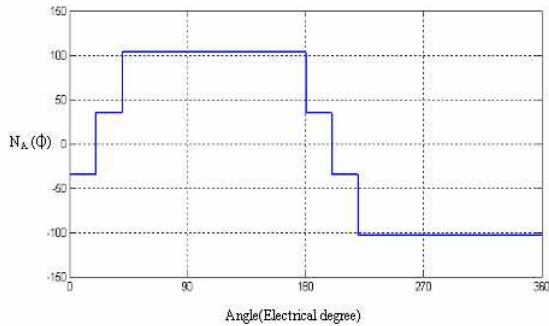


그림 2. A상의 winding function
Fig. 2. Winding function of a-phase

2.3 회전자 등가모델

인덕턴스 계산에서 필요한 inverse air-gap function은 자성체 내에서 발생하는 자속의 경로에 대한 함수이며 식 (3)로 나타낸다.

$$g^{-1}(\phi - \theta) = \frac{1}{E_s(\phi) + E_r(\phi - \theta)} \quad (3)$$

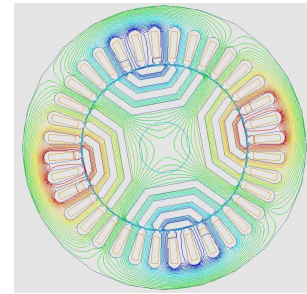
여기서 $E_s(\phi)$ 는 고정자 자속 경로, $E_r(\phi - \theta)$ 는 회전자의 회전에 따른 회전자의 자속경로이다.

자성체의 투자율을 무한대로 보고 있기 때문에 공기에 대한 자속의 경로만 계산하면 되므로 고정자 슬롯과 회전자의 형상에 의존하게 된다. 고정자 및 회전자에 대한 자속 경로를 계산하기 위해서 먼저 유한요소 해석을 이용하여 그림 3 (a)와 (b)와 같은 해석 모델에 대한 d, q축 자속 분포를 계산하였다.

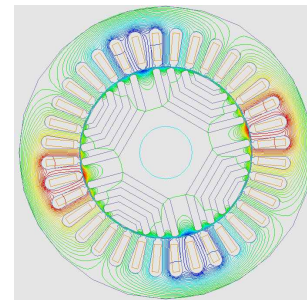
그림 3의 고정자 부분의 자속분포를 이용하여 그림 4와 같이 고정자 슬롯에서의 자속 분포를 나타낼 수 있으며 자속 경로는 식 (4)로 계산한다.

$$E_s(\phi) = \begin{cases} g + \frac{\pi}{2} R\phi & \text{for } 0 \leq R\phi \leq h_o \\ g + \frac{\pi}{2} R\phi + \gamma(R\phi - h_o) & \text{for } h_o \leq R\phi \leq \tau/2 \end{cases} \quad (4)$$

그림 3으로부터 알 수 있듯이 돌극형 회전자와는 달리 회전자의 자속 장벽에 의하여 d, q축 자속분포가 다르므로 자속경로를 계산하는 것이 매우 까다로우며 알 수 있다. D축 자속분포에서는 자속 장벽을 주위로



(a) D축



(b) Q축

그림 3. 자속분포
Fig. 3. Flux distribution

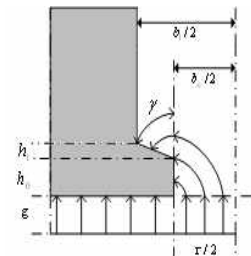


그림 4. 고정자 슬롯에서의 자속분포
Fig. 4. Flux distribution at a stator slot

자속이 잘 지나감을 알 수 있지만, q축 자속 장벽에 의하여 자속이 잘 지나가지 못한다. 이것을 바탕으로 회전자의 1/4 사분면에 해당된 자속 장벽을 그림 5와 같이 직선으로 펼쳐 놓은 후 d, q축 자속 분포를 이용하여 그림의 아래 부분과 같은 모델을 고려하였다. 자속이 잘 지나가지 못하는 가운데 부분에서는 자속경로를 짧게 하기 위하여 공기부분을 크게 하였고 양쪽으로 갈수록 공기 부분을 적게 하였다. 그림 6은 회전형으로 나타낸 회전자 등가모델(1/4분면)을 나타내며 그림 7은 회전자가 고정되어 있는 $\theta = 0$ 경우 식 (3)을

이용해서 계산한 inverse air-gap function의 파형을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 공기가 많은 부분에서의 크기가 줄어 든 것을 확인할 수 있다.

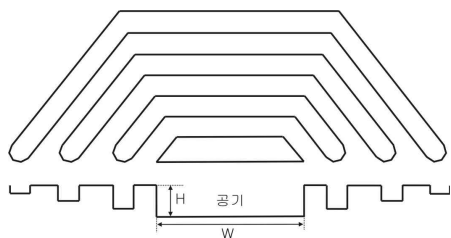


그림 5. 회전자의 자속경로를 계산하기 위한 모델
Fig. 5. Equivalent model for a flux path of a rotor

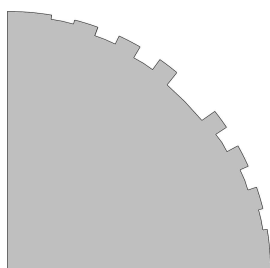


그림 6. 회전자 등가모델(1/4 사분면)
Fig. 6. Equivalent rotor model(1/4 quadrant)

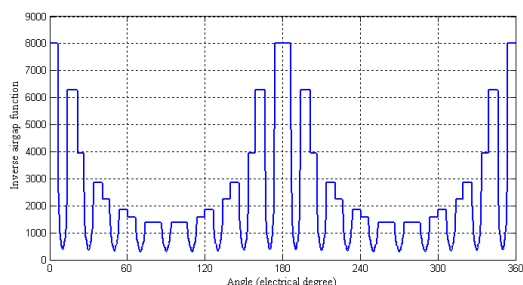


그림 7. Inverse air-gap function 파형
Fig. 7. Distribution of inverse air-gap function

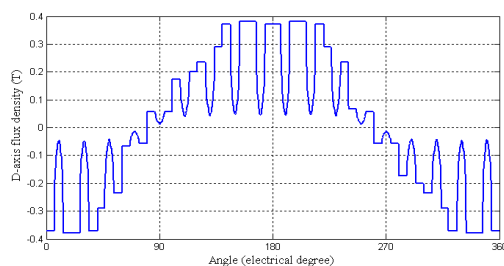
3. 특성 해석

동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 해석을 위하여 그림 5 등가모델의 높이(H)와 넓이(W)를 변화시키면서 WFT를 이용하여 특성을 해석하였고 특성 해석 결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 먼저 A상 권선 전류에 따른 공극에서의 자속밀도를 구하여 유한요소

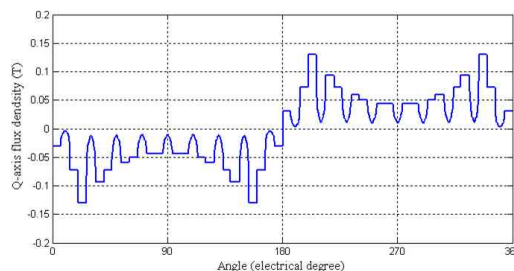
해석 결과와 비교하였다. 공극의 자속밀도는 winding function $N_A(\phi)$ 와 Inverse air-gap function $g^{-1}(\phi-\theta)$ 를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_A(\theta) = \mu_0 g^{-1}(\phi-\theta) N_A(\phi) i_A \quad (5)$$

그림 8은 WFT를 이용해서 구한 d, q축의 공극 자속 밀도를 나타내며 그림 9는 유한요소법을 이용해서 구한 d, q축 공극자속 밀도를 나타낸다. D축의 공극자속 밀도의 크기는 각각 비슷하게 발생하지만 WFT의 자속밀도의 크기가 130[°]와 230[°] 부근에서는 낮게 발생함을 알 수 있다. 이것은 등가모델에서 치의 높이 변화에 따른 것으로 생각된다.



(a) D축 공극 자속밀도

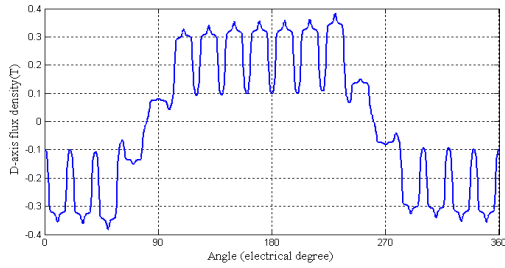


(b) Q축 공극 자속밀도

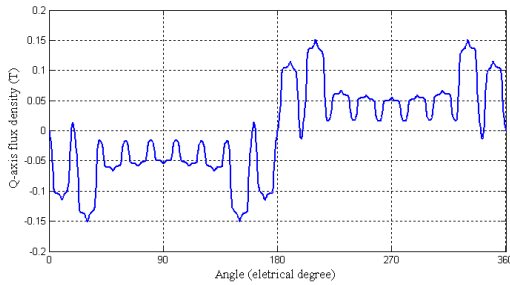
그림 8. 공극자속밀도(WFT)
Fig. 8. Air-gap flux density(WFT)

그림 10 (a)와 (b)는 각각 WFT와 유한요소법에 의한 A상의 자기 인덕턴스 프로파일을 보여준다. WFT에 의한 인덕턴스 최대값이 7[%] 정도 크게 발생하지만 인덕턴스 파형이 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

Winding Function 이론을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 특성 해석

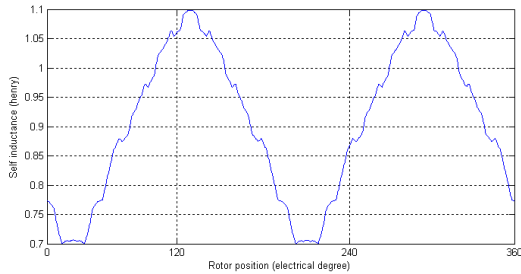


(a) D축 공극 자속밀도

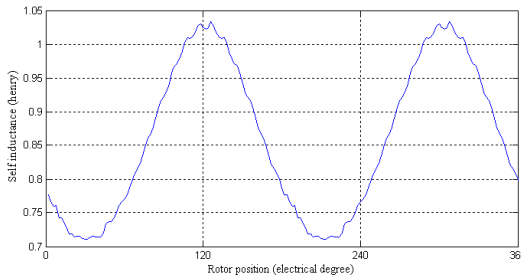


(b) Q축 공극 자속밀도

그림 9. 공극자속밀도(유한요소법)
Fig. 9. Air-gap flux density(FEM)



(a) WFT



(b) 유한요소법

그림 10. 인덕턴스 프로파일
Fig. 10. Inductance profile

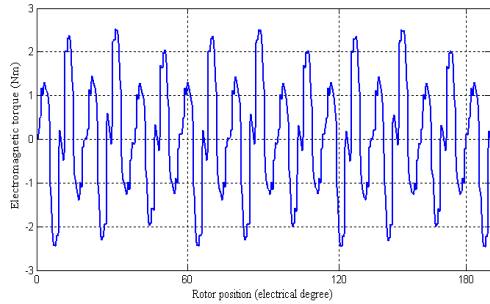
동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 특성을 나타내는 수식은 다음과 같다.

$$T_{em} = \frac{1}{2} [I]^t \left[\frac{L(\theta)}{d\theta} \right] [I] \quad (6)$$

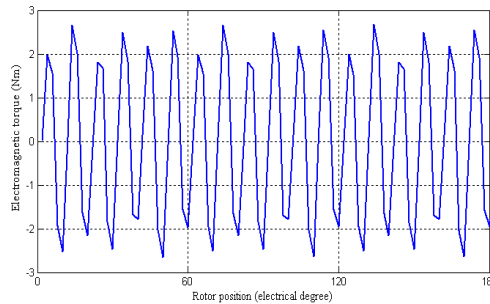
여기서 $[I]$ 는 식 (7)과 같은 전류 매트릭스이고 $[I]^t$ 는 전치 매트릭스이다. 그리고 $L(\theta)$ 는 식 (8)과 같은 회전자 위치에 따른 인덕턴스 매트릭스이다.

$$[I] = \begin{pmatrix} i_a(\theta) \\ i_b(\theta) \\ i_c(\theta) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$[L] = \begin{pmatrix} L_a(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ab}(\theta) & L_b(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ac}(\theta) & L_{bc}(\theta) & L_c(\theta) \end{pmatrix} \quad (8)$$



(a) WFT



(b) 유한요소법

그림 11. 토크특성
Fig. 11. Torque characteristic

그림 11은 회전자 위치에 따른 토크 특성을 보여주며 (a)는 WFT에 의한 토크 특성이고 (b)는 유한요소

법에 의한 토크 특성이다. 토크 특성에 사용된 계산 시간에 있어 WFT는 2분이 소요되었으며 유한요소법은 2시간이 소요되었다. 최대값의 차이가 약 0.2[Nm] 정도 나지만 두 토크 특성이 비슷하게 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 WFT를 이용하여 원통형 회전자를 갖는 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크 특성 해석을 수행하였다. D축 및 q축 자속분포를 이용하여 토크 계산에 필요한 인덕턴스를 계산하기 위해 회전자 해석적 등가 모델을 제시하였다. WFT와 유한요소법을 통해 얻은 공극자속밀도, 자기 인덕턴스 프로파일 그리고 토크 결과를 통해 제안한 방법의 타당성을 확인하였다. 해석 결과 및 해석에 소요되는 시간 비교를 통하여 WFT가 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 해석 및 설계에 유용하게 사용되리라 생각된다. 향후 제안된 등가모델의 변화가 특성해석에 미치는 영향의 고찰과 WFT를 이용한 특성 계산에 있어 포화를 고려하여 좀 더 정확한 특성 해석이 될 수 있도록 해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2008-029).

References

- [1] A. Vagati, T. A. Lipo, I. Boldea, T. Fukao, L. Malesani and T. J. E. Miller, "Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative," IEEE-IAS, pp.1.1-1.3,1994.
- [2] I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford, U.K.: Clarendon/Oxford,1996.
- [3] Heath Hofman, Seth R. Sanders, "High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses," IEEE Trans.on Ind.Vol.36, no.2, pp.531-539, 2000.
- [4] T. Lubin, T. hamiti, H. Razik and A. Rezzoug. "Comparison Between Finite-Element Analysis and Winding Function Theory for Inductances and Torque Calculation of a Synchronous Reluctance Machine," IEEE Trans.on.Magn., vol43, no.8, pp.3406-3410, Aug.2007.
- [5] T. Lubin, T. hamiti, and A. Rezzoug. "A Simple and Efficient Tool for Design Analysis of Synchronous Reluctance Motor," IEEE Trans. on Magn., vol 44, no.12, pp.4648-4652, Dec. 2008.
- [6] A. Chiba, F. Nakamura, T. Kukao and M. A. Rahman "Inductances of cageless reluctance-synchronous machines including third harmonic of airgap MMF ," IEEE Tans. on Ind. Appl., vol.27, no.1, pp. 44-51, Jan.-Feb. 1991.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudgoff, Analysis of Electric machinery. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.

◇ 저자소개 ◇



우경일(禹景一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 부교수.