

영구자석이 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석

장석명, 박지훈, 최장영, 성호경*
 충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원*

Characteristic analysis of switched reluctance motor including permanent magnet

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper deals with characteristic analysis of switched reluctance motor including permanent magnet. First, we calculated flux density of switched reluctance motor according to position. Second, analyzed normal force and horizontal force from flux density of machine according to position. Also, analysis result compares with data that is derived through a finite element analysis (FEA), and proved validity.

의 턴-온 구간 혹은 대 전류를 인가하기 위한 앞선 각에서의 턴-온 구간에서 발생하는 토크리플에 대하여 영구자석으로 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 영구자석의 재질과 위치, 크기에 따른 수직력 크기를 해석하여 스위치드 릴럭턴스 전동기에서 발생하는 토크리플의 감소형태를 확인하고자 한다. 본 논문에서 사용된 해석 방법은 공간고조파법을 이용한 수학적 해석 방법이며, 해석결과와 타당성을 위해 유한요소해석과 비교 검증하였다.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. SRM의 구동 원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로써 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수에 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 경적 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. 그러나 SRM은 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다.[1] 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기를 산업 분야에 널리 이용하기 위해서는 저 토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하고, 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일은 중요한 요소로 작용한다. 인덕턴스 프로파일은 최소인 구간과 상수 구간 그리고 최대인 구간에서 전류의 턴-온 시점에 따라서 토크 리플의 발생을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 최소인 구간에서부터 상승구간 전에서 턴-온하고 최대인 구간에서 턴-오프를 통한 소호를 통해 전류를 회생하는 방법이 사용된다.[2]

본 논문에서는 영구자석이 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 해석하고자 한다. 일반적인 스위치드 릴럭턴스 전동기의 경우 스위칭에 의한 동작을 한다. 이때 인덕턴스 프로파일에 의한 턴-온 시점등에 의해 토크 리플의 크기가 결정된다. 영구자석이 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 경우 일반적인 인덕턴스 프로파일상

2. 수학적 해석 방법에 의한 특성 해석

그림 1(a)는 수학적 해석을 위하여 축방향으로 펼쳐놓은 6/4극 SRM을 보여주고 있으며, 사양은 표 1과 같다.

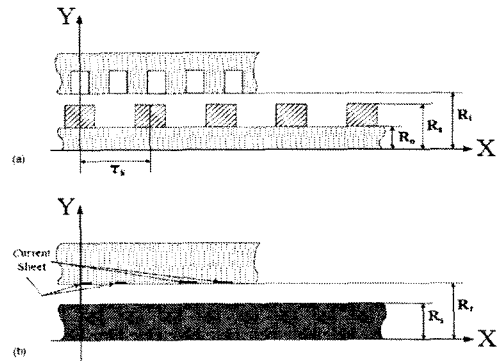


그림 1. SRM (a)해석모델의 구조와 (b)해석을 위한 단순화 모델

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 자계특성식

스위치드 릴럭턴스 전동기의 코일에 의한 자계특성식은 식(1)의 코일에 의한 전류밀도로부터 계산할 수 있다.

$$J_n(x) = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{2N_i}{b_0} e^{-jk_n x} \quad (1)$$

여기서, N 은 극당 턴수, i 는 부하 전류, b_0 는 슬롯 개구간 폭이며, $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 n 은 고조파 차수이다. 식(1)과 맥스웰 방정식을 이용하여 식(2)와 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

여기서, A_{zn} 은 자기 벡터퍼텐셜 A 의 z 성분이고, 전류밀도와 같은 방향 성분을 갖는다. 식(2)의 해와 자기 벡터퍼텐셜의 정의로부터 식(3)의 자체특성식을 얻을 수 있다.

$$B_{zn} = k_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\tanh k_n R_s \cosh k_n Y - \sinh k_n Y)}{k_n (\sinh k_n R_t - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_t)} \right\} e^{-jk_n x} \quad (3.a)$$

$$B_{yn} = jk_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\sinh k_n Y - \cosh k_n Y)}{k_n (\sinh k_n R_t - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_t)} \right\} e^{-jk_n x} \quad (3.b)$$

식(3)의 자체특성식을 이용하여 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 주어져 있다.[2]

2.2 영구자석에 의한 자체특성식

영구자석의 자체특성을 해석하기 위한 자화분포는 식(4)와 같다.

$$M = M_{yn} e^{-jk_n x} \quad (4)$$

여기서 M_{yn} 은 자화의 수직성분이다.

식(4)와 맥스웰 방정식을 이용하여 식(5)의 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

자기 벡터퍼텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$ 에 식(5)의 A_{zn} 을 이용하여 자체특성식을 구하면, 식(6)과 같다.

$$B_x^I = k_n [A^I e^{k_n y} - B^I e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.a)$$

$$B_x^{II} = k_n [A^{II} e^{k_n y} - B^{II} e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.b)$$

$$B_y^I = jk_n [A^I e^{k_n y} + B^I e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.c)$$

$$B_y^{II} = jk_n [A^{II} e^{k_n y} + B^{II} e^{-k_n y} - j\mu_0 M_{yn}/k_n] e^{-jk_n x} \quad (6.d)$$

여기서 위첨자 I, II 는 각각 공기영역과 영구자석영역을 의미한다. 자속밀도를 계산하기 위한 경계조건은 식(7)과 같다.

$$\begin{cases} y = 0 & B_x^{II} = 0 \\ y = h_m & B_x^I = B_x^{II}, B_y^I = B_y^{II} \\ y = h_m + g & B_x^I = B_x^{II}, B_y^I = B_y^{II} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, h_m 과 g 는 각각 영구자석과 공극의 높이이다.

3. 힘 특성 해석 결과

영구자석이 사용된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석은 영구자석이 사용됨으로 인하여 간단한 스위칭에 의하여 동작하는 스위치드 릴럭턴스 전동기에서 발생하는 토크리플의 감소여부를 확인하는데 있다. 따라서, 영구자석의 재질, 크기, 사용위치에 따라서 결과 값이 달라진다. 영구자석의 재질, 크기 등을 고려하기 위해서 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동을 인덕턴스 프로파일에서 최저인 지점에서 턴-온하여 최대인 지점에서 턴-오프하였을 때 각 상에 의한 토크리플은 그림 2와 같다. 그림 2는 표 1에서 제시한 해석 사양으로부터 각 상에 20[A]를 인가하여 얻어진 결과이다. 그림 2에서 발생한 토크리플을 감소시키기 위해서는 정확한 위치와 크기를 갖는 영구자석을 사용해야만 한다. 본 논문에서는 빠른 해석을 위하

여 토크리플을 감소시킬 수 있는 수직력으로부터 영구자석의 잔류자화밀도(Br)와 크기를 계산하였다. 해석된 자속밀도와 힘의 크기는 유한요소해석과 비교하여 타당성을 검증하였다.[4],[5]

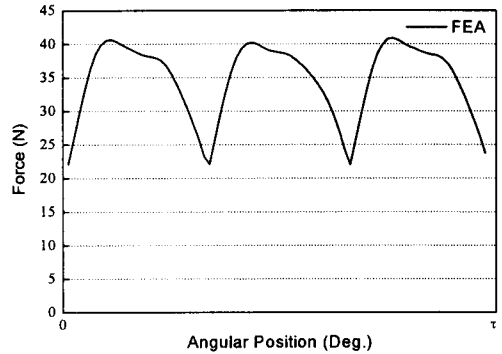


그림 2. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크리플

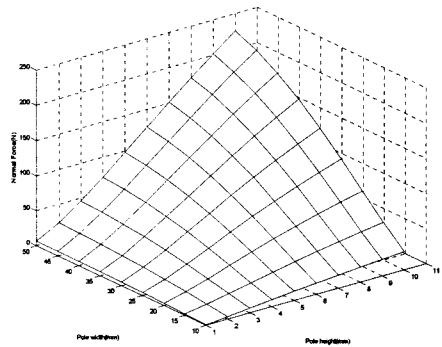


그림 3. Br=1.06인 영구자석의 수직력

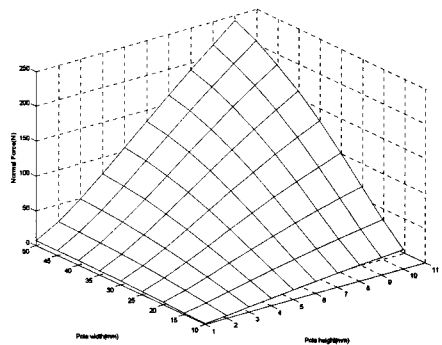


그림 4. Br=1.1인 영구자석의 수직력

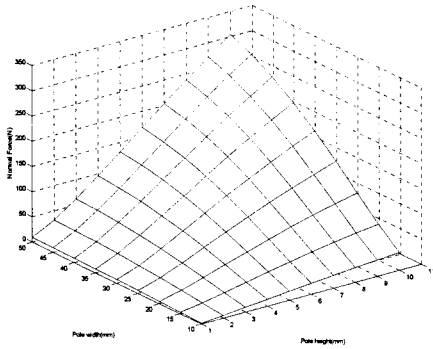


그림 5. Br=1.23인 영구자석의 수직력

그림 3~5는 영구자석 재질에 따른 영구자석의 극 피치와 극 높이로부터 해석된 수직력을 보여주고 있다. 그림 3은 Br이 1.06인 SmCo재질을 사용하였을 때의 결과이고, 그림 4는 Br이 1.1인 NdFeB30이며, 그림 5는 Br이 1.23인 NdFeB35를 사용하였을 때의 결과를 보여주고 있다. 해석된 결과를 이용하여 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크리플을 감소시킬 수 있는 크기의 영구자석재질과 두께 그리고 높이를 선택할 수 있으며, 가격과 포화여부도 포함되어 선택할 수 있다. 또한, 해석의 다양한 결과를 얻기 위하여 공극의 길이를 조절할 수도 있다.

4. 결 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자 상 권선에 전류를 인가하며, 각각의 전류는 위치에 의한 스위칭에 의하여 인가된다. 이러한 구동 과정에 의하여 불필요한 토크리플이 발생한다. 토크리플을 감소시키기 위한 다양한 방법이 모색되고 있으며, 가장 광범위하게 사용되는 것이 인덕턴스 프로파일링을 이용한 턴-온 지점과 턴-오프 지점을 조정하는 것이며, 이런 방법은 고도의 제어기술을 요한다. 본 논문에서는 하드웨어적으로 영구자석을 사용하여 토크리플이 발생할 수 있는 곳에 영구자석을 위치시켜 부족한 힘을 보충하는 방법을 사용하였으며, 영구자석의 재질 및 너비와 높이를 조절하여 원하는 힘의 크기를 해석하였다.

- [1] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [2] 장석명, 박지훈, 최장영, 성호경, "해석적 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 산정," 2005년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회, 2005, pp.254~256.
- [3] Byeong-Seok Lee, Han-Kyung Bae, P. Vijayragha van, R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol.36, no.6, Nov. 2000, pp.1571~1580.
- [4] 장석명, 박지훈, 최장영, "영구자석/전자석을 갖는 릴럭턴스 타입 기기의 전자기적 특성 해석," 2006년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회, 2006, pp.80~82.
- [5] 장석명, 박지훈, 최장영, 성호경, "리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고속 특성 해석," 2006년도 대한전기학회 하계학술대회, 2006, pp.903~904.

본 연구는 한국기계연구원 지정공모과제 지원에 의하여 수행된 과제임.

표 2. 6/4극 SRM의 해석 사양

항 목		사 양
회 전 자	치 폭	25 (mm)
	치 높이	50 (mm)
	극 간격	50 (mm)
	요크 높이	20 (mm)
	회전자 깊이	100 (mm)
고 정 자	치 폭	32 (mm)
	치 높이	25 (mm)
	극 간격	75 (mm)
	백아이언 높이	10 (mm)
	고정자 깊이	205 (mm)