

해석적 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 산정

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

The calculation of inductance profile for linear switched reluctance motor by analytical method

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi, Ho-Kyung Sung\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, KIMM\*

**Abstract** - This paper deals with inductance profile of linear switched reluctance motor. Inductance profile of LSRM calculate at align and unalign position using analytical method. Analytical method of this paper used space harmonics method, Also, analysis result compares with data that is derived through an experiment, and proved validity.

수학적 해석은 실험 결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. LSRM의 인덕턴스 계산

2.1 구조 및 해석 모델

그림 1(a)는 권선이 시행된 6극의 가동자와 4극의 고정자로 구성된 LSRM을 보여주고 있으며, 사양은 표 1과 같다.

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 영구 자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시키므로서 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당 권선에 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, 보수의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 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 산업분야에 널리 이용하기 위해서는 저토크 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 상승 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 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기(LSRM)의 가동자와 고정자 간의 정렬과 비정렬의 위치에 따른 인덕턴스 프로파일을 수학적으로 해석하였다. 논문에서 사용된 수학적 해석 방법은 공간 고조파법을 사용하였으며[3][4], 단상에 대한 상당 턴 수와 입력전류를 통하여 가동자와 고정자 간의 정렬과 비정렬 위치에 대한 인덕턴스 계산을 수행하였다. 논문에서 제시한

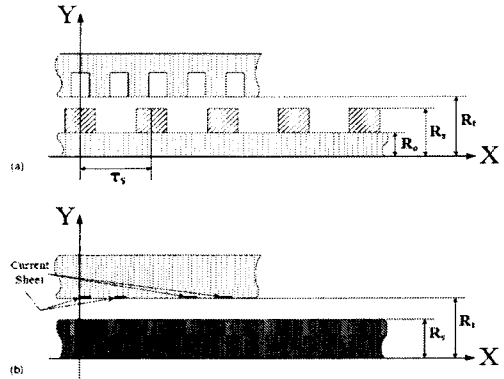


그림 1 LSRM (a)해석모델의 구조와 (b)해석을 위한 단순화 모델

표 1 설계 사양

| 항 목   |       | 사 양      |
|-------|-------|----------|
| 가동자   | 치 폭   | 25 [mm]  |
|       | 치 높이  | 50 [mm]  |
|       | 슬롯 폭  | 25 [mm]  |
|       | 슬롯 높이 | 50 [mm]  |
|       | 극 호   | 0.524    |
| 고정자   | 치 폭   | 32 [mm]  |
|       | 치 높이  | 25 [mm]  |
|       | 슬롯 폭  | 43 [mm]  |
|       | 슬롯 높이 | 25 [mm]  |
|       | 극 호   | 0.670    |
| 스택 길이 |       | 205 [mm] |
| 공극 길이 |       | 5 [mm]   |

그림 1(b)는 그림 1(a)에서 제시된 LSRM의 단면을 해석을 위해 단순화한 것으로, 전류분포가  $R_s$ 에 시트전류로 분포해 있다고 가정한다.

## 2.2 코일에 의한 자기특성식

가동자 코일의 전류 분포는 식 (1)로 표현된다.

$$J_n(x) = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{zn} e^{-jk_n x} \quad (1)$$

여기서  $J_{zn}$ 은 전류밀도 푸리에 계수로 식 (2)로 주어진다.  $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며  $n$ 은 고조파 차수이다.

$$J_{zn} = \frac{2N_i}{b_0} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 극당 턴수,  $i$ 는 부하 전류,  $b_0$ 는 슬롯 개구간 폭이다. 한편, 맥스웰 방정식으로부터 식 (3)이 도입된다.

$$\nabla \times H = J \quad (3)$$

또, 자기 벡터퍼텐셜은 식(4)로 정의된다.

$$\nabla \times A = B \quad (4)$$

식 (1), (3) 그리고 식 (4)에 의해 식 (5)와 같은 지배방정식이 유도된다.

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

여기서  $A_{zn}$ 은 자기 벡터퍼텐셜  $A$ 의  $z$  성분이고, 전류밀도와 같은 방향 성분을 갖는다.

식 (5)의 해와 식 (4)의 자기 벡터퍼텐셜의 정의로부터 식 (6)의 자기특성식을 얻을 수 있다.

$$B_{xn} = k_n \{ \alpha \cosh k_n Y + \beta \sinh k_n Y \} e^{-jk_n x} \quad (6,a)$$

$$B_{yn} = jk_n \{ \alpha \sinh k_n Y + \beta \cosh k_n Y \} e^{-jk_n x} \quad (6,b)$$

$A$ 상에 의한 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 식 (7)으로 주어진다.

$$Y = R_t \quad B_{xn} = -\mu_0 J_n \quad (7,a)$$

$$Y = R_s \quad B_{xn} = 0 \quad (7,b)$$

식 (6)과 식(7)을 이용하여  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$\alpha = -\beta \tanh k_n R_s \quad (8,a)$$

$$\beta = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad (8,b)$$

$$\Delta = -\frac{\mu_0}{k_n} J_n \quad (8,c)$$

$$\Gamma = \sinh k_n R_t - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_t \quad (8,d)$$

## 2.3 2D 비퍼미언스 함수를 이용한 고정자 슬롯팅 고려

LSRM의 2차측인 고정자는 돌극구조이기 때문에 시트전류인 1차측에 대해 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 슬롯팅을 고려하였으며, 2D 퍼미언스 함수는 식 (9)와 같다.

$$\eta(x, y) = \begin{cases} A_0 [1 - \beta(y) - \beta(y) \cos \frac{\pi}{0.8b_0} y] & \text{for } 0 \leq y \leq 0.8b_0 \\ A_0 & \text{for } 0.8b_0 \leq y \leq \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $A_0 = \mu_0/g'$ 이고,  $g'$ 는 카터계수를 고려한 공극 길이이다.  $\beta(y)$ 는 수직 방향의 변화에 따른 2D 퍼미언스의 변화를 고려한 것이다.  $\beta(y)$ 는 식 (10)으로 정의된다.

$$\beta(y) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{b_0}{2g'} \right)^2 (1 + \nu^2)}} \right] \quad (10)$$

식 (10)에서  $\nu$ 는 식 (11)로부터 얻어진다.

$$y \frac{\pi}{z_0} = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\sqrt{a^2 + \nu^2} + \nu}{\sqrt{a^2 + \nu^2} - \nu} \right] + \frac{2g'}{b_0} \arctan \frac{2g'}{b_0} \frac{\nu}{\sqrt{a^2 + \nu^2}} \quad (11)$$

여기서  $a^2 = 1 + (2g'/b_0)^2$ 이고,  $y = r - R_s + g'$ 이다. 식 (9)로부터 2D 비퍼미언스 함수가 얻어진다.

$$\bar{\eta}(x, y) = \frac{\eta(x, y)}{A_0} \quad (12)$$

식 (12)를 푸리에 급수로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$\bar{\eta}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\eta}_n(y) \cos(2k_n(x + x_0)) \quad (13)$$

여기서  $x_0$ 는 코일 피치에 의해 결정되는 상수이다.

## 2.4 해석적 방법에 의한 인덕턴스 계산

LSRM의 정렬과 비정렬 위치에 따른 인덕턴스를 계산하기 위해 본 논문에서는 시트전류가 분포한 1차측과 2D 비퍼미언스 함수를 고려한 2차측을 해석적인 방법을 이용하여 해석하였다. 또한 인덕턴스를 계산하기 위해 식 (14)를 사용하였다.

$$\lambda = Li = N\phi$$

$$\phi = BA$$

$$L = \frac{NBA}{i} \quad (14)$$

여기서  $A$ 는 단면적이다.

### 3. 해석결과와 타당성 검증

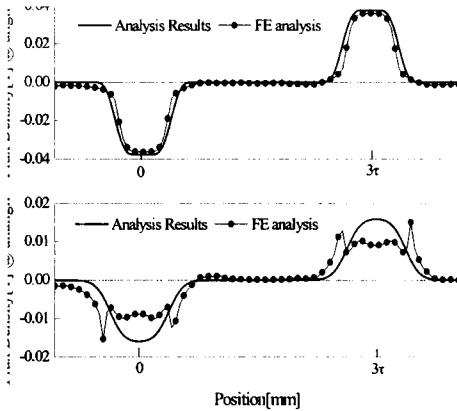


그림 2 해석결과와 유한요소결과와의 자속밀도 비교

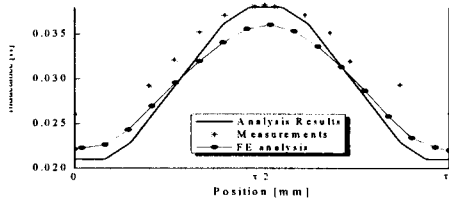


그림 3 인덕턴스 결과 비교

그림 2는 해석결과와 유한요소결과와의 자속밀도를 비교한 그래프이다. 1차속의 시트전류와 2차속의 슬롯팅 효과를 고려한 본 논문의 해석적 방법이 유한요소결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 3은 해석결과와 유한요소결과 그리고 측정된 인덕턴스 값을 비교한 그래프이다. 정렬위치에서 해석결과와 측정된 인덕턴스 값이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 비정렬위치에서는 해석결과는 유한요소결과와 비슷하지만 측정 결과와는 인덕턴스 값이 약 17% 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이것은 측정의 경우 누설이 존재하지만 해석결과와 유한요소결과는 그렇지 않기 때문이다.

### 4. 결 론

LSRM은 SRM과 같이 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 또한 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며, 구동장치의 구조가 간단하여 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. 하지만 SRM은 고정자와 회전자 이 중 둘극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 SRM을 산업분야에 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.

본 논문에서는 LSRM의 해석모델을 제시하였으며, 시트전류인 1차속, 비퍼미언스 함수를 이용한 2차속 그리고 맥스웰 방정식에 의한 지배방정식을 세우고 자체특성식을 도출하였다. 또한 자체특성식에 경계조건을 대입하여 자속밀도를 계산하였고, 자속밀도로부터 인덕턴스 값을 계산하였다. 해석결과는 실험 및 유한요소해석결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 권정기, 조한욱, 박지훈, 성호경, 김봉섭, "유한요소법을 이용한 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계," 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.80~82, 2004
- [2] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001
- [3] 장석명, 최장영, 조한욱, 양현섭, 이성호, "BLDC 전동기의 자체분포 part II : 전기자 반작용 자계," 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.37~39, 2004
- [4] 장석명, 서정출, 최장영, 이성호, 정상섭, "Slot/Slotless 고정자를 갖는 Tubular형 LOA의 자체특성 비교," 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.68~70, 2004