

자기동가회로를 이용한 LSRM 인덕턴스 프로파일 산정 및 실험

장석명, 박지훈, 최장영, 조한욱, 유대준, 성호경*

충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원*

Inductance profile calculate and experiment of LSRM using magnetic equivalent circuit method

S.M. Jang, J.H. Park, J.Y. Choi, H.W. Cho, D.J. You, H.K. 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 magnetic equivalent circuit method. Magnetic equivalent circuit method of this paper used method of reference[3][4], but this method used modification on account difference of design specification. Also, analysis result compares with data that is derived through an experiment, and proved validity.

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 부분에 만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 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 여자시킴으로서 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, 보수의 필요성이 적으며, 유도 전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적 당 토크, 효율 및 퀸비터의 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 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 상승 구간 그리고 최대인 구간에서 전류의 텐-온 시점에 따라서 토크 리플의 발생을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 최소인 구간에서부터 상승구간 전에서 텐-온하고 최대인 구간에서 텐-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 퍼미언스를 이용한

자기동가회로법을 사용하였으며[3][4], 단상에 대한 상당수와 입력전류를 통하여 가동자와 고정자 간의 정렬과 비정렬 위치에 대한 인덕턴스 계산을 수행하였다. 논문에서 제시한 수학적 해석은 실험 결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

표 1 해석 모델 설계 사양

항 목		사 양
가동자	치 폭(w_{tp})	25 [mm]
	치 높이(h_{tp})	50 [mm]
	슬롯 폭(w_{ts})	25 [mm]
	슬롯 높이(h_{ts})	50 [mm]
	극 호(b_t)	0.524
고정자	치 폭(w_{sp})	32 [mm]
	치 높이(h_{sp})	25 [mm]
	슬롯 폭(w_{ss})	43 [mm]
	슬롯 높이(h_{ss})	25 [mm]
	극 호(b_s)	0.670
스택 길이(L_w)		205 [mm]
공극 길이(l_g)		5 [mm]

2. 퍼미언스를 이용한 인덕턴스 계산

2.1 정렬 위치에서의 퍼미언스

해석에 사용된 LSRM은 6/4극의 형태이며, 6극인 가동자에 권선이 시행된 모델이다. 표 1은 해석에 사용된 모델의 사양을 보여주고 있다. 그림 1은 가동자와 고정자가 정렬위치에 있을 때 공극퍼미언스의 요소를 보여주고 있다.

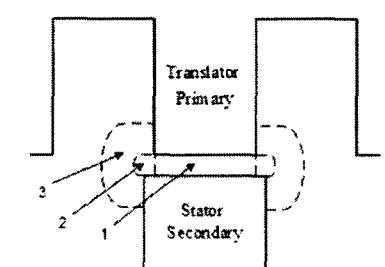


그림 1 정렬 위치의 퍼미언스

요소 1은 공극을 통해 직접 영향을 미치는 성분이고, 요소 2와 3은 공극의 길이에 비례하여 고정자에 영향을 미치는 반원기둥과 반고리모양의 성분이다.

$$P = \frac{\mu A}{l} \quad (1)$$

식(1)은 퍼미언스를 구하는 공식으로, 퍼미언스는 단면적과 투자율에 비례하고 길이에 반비례하는 특성을 가지고 있다. 단면적은 가동자와 고정자 간의 지면에 수직인 직사각형의 넓이이고 길이는 공극 길이이다. 각 요소에 대한 퍼미언스는 식(2)~(8)로 계산할 수 있다.

$$P_{g1} = \mu_0 \frac{L_w \cdot (w_{sp} + w_{ip}) / 2}{l_g} = \mu_0 L_w \left(\frac{w_{sp} + w_{ip}}{2 \cdot l_g} \right) \quad (2)$$

$$P_{g2} = \mu_0 \left(\frac{L_w \cdot 0.322 l_g}{1.22 l_g} \right) = 0.268 \cdot \mu_0 L_w \quad (3)$$

$$P_{g31} = 0.318 \cdot \mu_0 L_w \cdot \ln(1 + \frac{2t_0}{l_g}) \quad (4)$$

$$P_{g32} = \mu_0 \frac{L_w t_0}{f_0} \quad (5)$$

$$P_{g3} = \frac{P_{g31} + P_{g32}}{P_{g31} + P_{g32}} \quad (6)$$

$$P_{g4} = 0.268 \cdot \mu_0 \left(\frac{w_{sp} + w_{ip}}{2} \right) = 0.314 \cdot \mu_0 (w_{sp} + w_{ip}) \quad (7)$$

$$P_{g5} = 0.318 \cdot \mu_0 \left(\frac{w_{sp} + w_{ip}}{2} \right) \cdot \ln(1 + \frac{2t_0}{l_g}) \\ = 0.159 \cdot \mu_0 (w_{sp} + w_{ip}) \cdot \ln(1 + \frac{2t_0}{l_g}) \quad (8)$$

$$P_{g6} = 0.076 \cdot \mu_0 I_g \quad (9)$$

$$P_{g7} = 0.25 \cdot \mu_0 t_0 \quad (10)$$

여기서, 식(1), (2), (3)은 그림 1에 나타낸 요소에 대한 퍼미언스를 계산한 것이고, 식(7)~(10)은 그림 1의 위치에서 단부의 퍼미언스를 계산한 것으로 요소 4와 5는 그림 1의 가동자와 고정자 사이에서 지면의 위, 아래를 지나는 반원기둥과 반고리모양의 성분이고, 요소 6과 7은 가동자와 고정자의 네 모서리에서 발생하는 구형사분면 모양의 요소이다.

2.2 비정렬 위치에서의 퍼미언스

그림 2는 가동자와 고정자가 비정렬위치일 때, 퍼미언스의 요소를 보여주고 있다. 요소 1은 가동자와 고정자 사이에서 직접 영향을 주는 원기둥모양의 성분이고, 요소 2, 3, 4는 정렬위치와 같이 가동자와 고정자간 지면에 수직한 모양의 반원기둥과 반고리모양의 성분이다. 요소 5는 가동자에서 발생한 자속이 고정자가 아닌 다른 상에 영향을 주는 요소이다.

식(11)~(15)은 그림 2의 요소에 대한 퍼미언스를 계산한 것이다. R.Krishnan은 논문과 저서에서 3-D 퍼미언스를 도입하여 자기등가회로에 대한 인덕턴스를 계산하였다. 사용된 모델은 본 논문에서 제시한 모델과 달리 공극의 길이가 1mm이고, 스택 길이가 50mm이므로 비정

렬위치에서 단부에 대한 퍼미언스 계산을 수행하였지만, 본 논문에서 같은 방법으로 인덕턴스를 계산하였을 때 오차가 발생하였다. 이것은 해석에 사용된 모델이 표 1과 같은 사양을 가지고 있기 때문에 공극에서 누설이 발생하므로, 단부에 대한 퍼미언스 계산을 배제하였다.

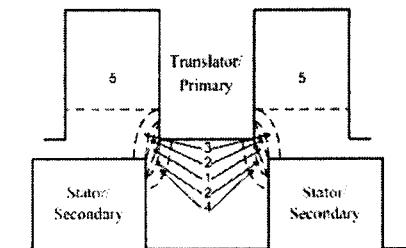


그림 2 비정렬 위치의 퍼미언스

$$P_{g1} = \mu_0 \frac{L_w \cdot t_s / \sqrt{2}}{\sqrt{2} d_7} = \mu_0 L_w \cdot \frac{t_s}{2 d_7} \quad (11)$$

$$P_{g2} = \mu_0 \left(\frac{0.285 \cdot d_7^2 L_w}{1.462 \cdot d_7} \right) = 0.134 \cdot \mu_0 L_w \quad (12)$$

$$P_{g3} = \frac{\mu_0 L_w \cdot \ln(\frac{d_7 + d_8}{d_7})}{\pi/2} = 0.637 \cdot \mu_0 L_w \cdot \ln(1 + \frac{d_8}{d_7}) \quad (13)$$

$$P_{g4} = \frac{\mu_0 L_w \cdot \ln(\frac{d_7 + d_9}{d_7})}{\pi/2} = 0.637 \cdot \mu_0 L_w \cdot \ln(1 + \frac{d_9}{d_7}) \quad (14)$$

$$P_{g5} = \mu_0 \frac{L_w \cdot (h_s - t_s - d_8)}{w_{ss}} = \mu_0 L_w \cdot \frac{(h_s - t_s - d_8)}{w_{ss}} \quad (15)$$

2.3 인덕턴스 계산

퍼미언스로부터 인덕턴스를 계산하기 위해서는 식(16)의 관계가 사용된다.

$$\Phi = \frac{N \cdot i}{R}$$

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{i} = \frac{N^2}{R} = N^2 \cdot P \quad (16)$$

여기서, N 은 상당 턴 수이며, R 은 자기저항, Φ 은 자속을 의미한다. 식(16)을 이용하여 가동자와 고정자가 정렬과 비정렬위치일 때 인덕턴스를 계산하면, 식(17), (18)과 같다.

$$P_{ga} = P_{g1} + 2 \cdot (P_{g2} + P_{g3} + P_{g4} + P_{g5}) + 4 \cdot (P_{g6} + P_{g7})$$

$$L_a = N^2 \cdot P_{ga} = 40.7mH \quad (17)$$

$$P_{gu} = 2 \cdot (P_{g1} + P_{g3} + P_{g4}) + 4 \cdot P_{g2}$$

$$L_u = N^2 \cdot P = 32.2mH \quad (18)$$

3. 인덕턴스 특성 실험

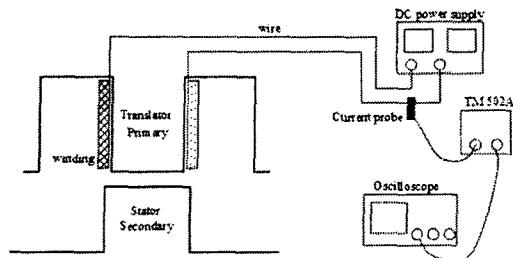


그림 3 인덕턴스 실험

그림 3은 해석 모델과 같은 설계 사양의 시작기로 실험을 통해 인덕턴스를 계산하기 위한 구성을 보여주고 있다. DC power supply를 통해 LSRM의 한상에 전원을 인가하면 current probe와 TM502A를 사용하여 전류의 크기를 전압의 크기로 변환하여 오실로스코프에 표시하게 되는 과정으로 실험을 진행하였다. 이때 current probe와 TM502A를 통해 얻어진 전류의 크기와 오실로스코프에 표시되는 전압의 크기의 기준은 TM502A를 통해 정할 수 있다. TM502A는 오실로스코프의 $10mV/DIV$ 에 대해 수 mA/DIV 부터 A/DIV 의 범위로 DC output을 조절할 수 있다. 본 논문에서는 실험의 정확성을 기하기 위해 전압에 대한 전류의 크기를 결정하고, 전력용 저항을 통해 $1A$ 를 흘렸을 때 current probe와 TM502A의 전류 크기를 오실로스코프에 표시하고 $1A$ 에 대한 전류의 크기를 $200mV$ 로 결정하였다.

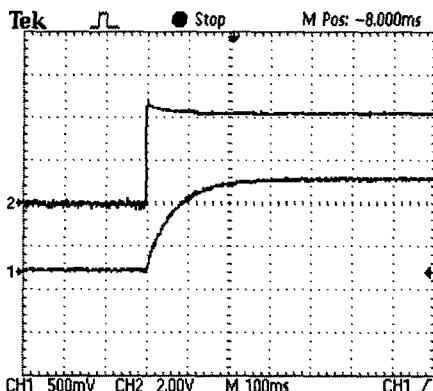


그림 4 LSRM의 전압, 전류 특성

그림 4는 실험을 통해 얻어진 LSRM의 전압, 전류 특성을 보여주고 있다. 그림에서 표시된 1은 전류파형이고 2는 전압파형이다. 1의 전류파형으로부터 정상상태의 크기에 대해 63.2%의 크기에 해당하는 시간을 확인하고, 전압을 바꾸어 가며 실험하였을 때 전압에 대한 전류의 크기로부터 저항의 크기를 확인할 수 있고, 또한 63.2%의 시간을 통해 시정수를 확인할 수 있다. 식(19)와 (20)은 실험을 통해 얻어진 결과로부터 가동자와 고정자가 정렬과 비정렬 위치일 때 인덕턴스를 계산한 것이다.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$L_a = \tau \cdot R = 62 \times 10^{-3} \times 0.72 = 44.64mH \quad (19)$$

$$L_u = \tau \cdot R = 46 \times 10^{-3} \times 0.72 = 33.12mH \quad (20)$$

4. 결 론

LSRM은 가동자와 고정자가 모두 돌극인 이중 돌극형 태의 구조로 가동자와 고정자에 권선을 시행할 수 있는 장점을 가지고 있지만, SRM의 문제가 되는 토크리플과 소음, 진동의 단점을 가지고 있다. 이러한 단점 중 토크리플은 위치에 대한 인덕턴스 프로파일로부터 턴-온과 턴-오프 시점을 조정하는 방법으로 개선할 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 LSRM의 토크리플이 개선된 구동을 하기위한 인덕턴스 계산을 자기동가회로를 이용한 방법으로 계산하였다. 또한 이 방법은 실험을 통해 증명하여 타당성을 입증하였다. 본 논문에서 사용된 자기동가회로는 R.Krishnan의 방법을 사용하였으며, 사용된 모델이 다른 설계 사양임을 감안하여 본 논문에 사용된 해석모델에 맞게 수식을 변경하여 사용하였다. 이러한 변경은 정확한 실험을 통해 크게 오차가 없는 해석임을 증명하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 조한숙, 박자훈, 성호경, 김봉섭, “유한 요소법을 이용한 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계”, 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp.80~82, 2004
- [2] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001
- [3] B.S.Lee, H.K.Bae, P.Vijayraghavan, R.Krishnan, “Design of a linear switched reluctance machine” IEEE Trans. Industry Applications, vol.36, no.6, NOV/DEC.2000
- [4] R.Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC press, 2001

표 2 위치에 따른 실험과 해석 결과 비교

	analysis	experimental
정렬	40.7 [mH]	44.64 [mH]
비정렬	32.2 [mH]	33.12 [mH]