

Full-pitched winding SRM에서의 相互 및 自己 인덕턴스의 산정에 관한 연구

백승규^{*}, 이치우^{*}, 정태욱^{*}, 이일천^{**}, 황영문^{*}

* 부산대학교, ** 동명전문대학

Study on Calculation of Mutual and Self-inductance in SRM with Full-pitched winding

Seung-Kyu Baik^{*}, Chi-Woo Lee^{*}, Tae-Uk Jung^{*}, Il-Chun Lee^{**}, Young-Moon Hwang

* Pusan Nat'l University, ** Dongmyoung Junior College

Abstract - A SRM develops its torque according to the inductance variation as the rotor position and the phase current. The variation of the inductance and the phase current plays an important role in output characteristics. Predicting and calculating the inductance is invaluable in the study of SRM.

This paper suggests the estimation method of inductance as variation of phase current and rotor position considering magnetic saturation of motor core. This method is also applied to full-pitched winding SRM.

1. 서 론

SRM은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스의 변화와 전류에 의해 토크가 발생하게 된다. 이 때 자기회로가 높은 포화영역에서 동작되므로 인덕턴스가 기자력과 회전자의 위치각에 따라 비선형적으로 변화하여 운전특성의 해석이 어렵다.

그리므로, 전동기의 전자구조의 다양한 설계정수와 운전상태에 따른 동작특성의 해석과 예측을 위해 자기포화를 고려한 인덕턴스의 해석이 우선적으로 이루어져야 한다.

본 연구에서는 자기포화에 따른 인덕턴스를 산정하기 위해 공극과 철심을 통한 각 자로에서의 기자력에 따른 퍼미언스를 구하여 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스를 산정하고자 한다. 이러한 인덕턴스의 산정방법을 소음과 맥동토오크의 저감 등을 위해 연구되고 있는 전절권의 권선형태를 갖는 full-pitched winding SRM[1]에 적용하여 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 산정하였다.

2. 공극에서의 퍼미언스 산정

공극부분의 투자율은 기자력에 무관하게 항상 일정하므로 공극자로의 퍼미언스는 단지 회전자 위치각의 변화에 따른 고정자극과 회전자극의 상호위치 관계에 따라 달라진다. Full-pitched winding SRM에서 한 상이 여자되었을 때 공극을 통하는 자로를 분류하고 그 각각에 대한 퍼미언스(permeance)를 산정하고자 한다[2,3].

본 연구에서 공극에서의 퍼미언스 산정에 있어서 기준으로 한

6/4 SRM의 근사화된 자로는 그림 1과 같으며, 공극부분의 번호는 분류된 각각의 자로를 나타낸다.

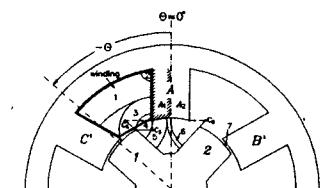


그림 1. 공극부분에서의 자로

그림 1에서와 같이 고정자극을 2등분하여 고정자극 A의 반쪽면 A₁에서 형성되는 자로를 7 가지로 분류하였고, 고정자극의 측면에서 고정자의 계절을 통하는 누설자로 2는 자제구조상 무시하여도 별다른 영향은 없을 것이다.

그림 1에서 A₁ 부분에서 형성되는 누설자로 1을 제외한 각 경로에서의 퍼미언스를 $\mathcal{P}_3, \mathcal{P}_4, \mathcal{P}_5, \mathcal{P}_6, \mathcal{P}_7$ 이라고 하면, 이 부분의 전체 퍼미언스 \mathcal{P}_{A1} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathcal{P}_{A1}(\theta) = \sum_{j=3,4,5,6,7} \mathcal{P}_j(\theta) \quad (1)$$

그리고, 고정자극 A₂ 부분에서의 퍼미언스 \mathcal{P}_{A2} 는 A₁ 부분에서의 퍼미언스가 회전자 극절의 각도로써 동일한 상태가 반복되므로 그 주기성과 대칭성에 의해 고정자극 A의 전체 퍼미언스는 다음과 같이 쓸 수 있다..

$$\mathcal{P}_A(\theta) = \sum_{j=3,4,5,6,7} [\mathcal{P}_j(\theta) + \mathcal{P}_j(90^\circ - \theta)] \quad (2)$$

고정자극 B와 C에 의한 퍼미언스 \mathcal{P}_B 와 \mathcal{P}_C 도 전동기의 기하학적 구조에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathcal{P}_B(\theta) = \sum_{j=3,4,5,6,7} [\mathcal{P}_j(\theta + 30^\circ) + \mathcal{P}_j(60^\circ - \theta)] \quad (3)$$

$$\mathcal{P}_C(\theta) = \sum_{j=3,4,5,6,7} [\mathcal{P}_j(\theta + 60^\circ) + \mathcal{P}_j(30^\circ - \theta)] \quad (4)$$

따라서, 회전자의 위치각에 따른 공극부분의 전체 퍼미언스는 각 고정자극에서의 퍼미언스와 누설자로 1의 퍼미언스에 의해 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\mathcal{P}_T = \frac{1}{2} (\mathcal{P}_A + \mathcal{P}_B + \mathcal{P}_C) + 2\mathcal{P}_1 \quad (5)$$

그림 1에서 분류한 각각의 자로별 퍼미언스는 문헌 [3]과 같은 방법에 의해 산정하였다.

3. 철심에서의 퍼미언스 산정

철심을 통하는 자로의 퍼미언스는 기자력에 따른 자기포화를 신중히 고려해야 하며, 이때 자기포화를 고려하여 철심에서의 퍼미언스를 산정함에 있어서 다음과 같은 가정을 하기로 한다.

- 1) 철심에서의 자속은 그 단면적에 균일하게 분포한다.
- 2) 철심에서의 국부적인 자기포화는 고려하지 않는다.
- 3) 자로길이는 자로 단면적의 중심에 대한 길이로 설정한다.

3.1 자기인덕턴스의 산정

Full-pitched winding SRM에서 한 상의 권선이 여자된 경우에 각각의 고정자극을 통과하는 자로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

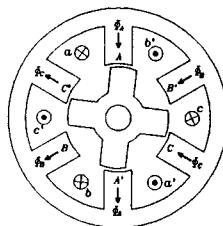


그림 2. a상 여자시 각 고정자극에서의 자속

자로의 전체자속을 Φ_T 라고 하면 각각의 고정자극을 통해 흐르는 자속은 회전자 위치각에 따른 공극의 퍼미언스에 의해 다음과 같이 분배된다.

$$\Phi_T = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C \quad (6)$$

여기서, Φ_A : 자극 A를 통과하는 자속

Φ_B : 자극 B를 통과하는 자속

Φ_C : 자극 C를 통과하는 자속

그리고, 위와 같이 분배된 각각의 자속량과 방향을 고려하여 구한 철심자로 각 부분의 자속 B_j (여기서, j 는 자로 각 부분에 해당한다.)와 자로단면적 A_j 에 의해 철심 각 부분의 자속밀도 B_j 는

$$B_j = \frac{\Phi_j}{A_j} \quad (7)$$

와 같이 된다.

이와 같이 철심 각 부분의 자속밀도 B_j 가 구해지면 철심의 B-H 특성곡선에 의해 자계강도 H_j 와 투자율 μ_j 를 구할 수 있다. 그러므로 철심자로 각 부분의 퍼미언스 \mathcal{P}_j 는 다음과 같이 산정할 수 있다.[4]

$$\mathcal{P}_j = \frac{\mu_j \cdot A_j}{l_j} \quad (8)$$

여기서, μ_j : 철심자로 각 부분의 투자율

A_j : 철심 각 부분의 자로단면적

l_j : 철심자로 각 부분의 자로길이

그리고, 이 때의 여자전류 i 는 철심과 공극부분의 합성퍼미언스와 주어진 자속에 의해 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$i = \Phi \cdot (1/\mathcal{P}_c + 1/\mathcal{P}_g) / N \quad (9)$$

여기서, \mathcal{P}_c : 철심자로에서의 합성퍼미언스

\mathcal{P}_g : 공극자로의 합성퍼미언스

N : 고정자 상의 권선단수

이때 전체 자기회로의 자기인덕턴스는

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{i} \quad (10)$$

로서 산정할 수 있으며, 동일한 방법에 의해 각각의 고정자극에 대한 자기인덕턴스도 산정할 수 있다.

3.2 상호인덕턴스의 산정

상호 인덕턴스는 한 상의 권선이 여자되었을 경우 생기는 자속이 다른 상권선과 쇄교하는 자속량과 그 방향에 따라 결정된다. 그림 2에서 a 상이 여자되었을 경우의 a상과 b상간의 상호인덕턴스 M_{ab} 를 고려해 보기로 한다.

그림 2에서 a 상이 여자되었을 때 각 고정자극에 흐르는 자속 중에서 고정자극 A에 흐르는 자속은 b 상의 권선에 대해 정방향으로 쇄교하고, 고정자극 B와 C에 흐르는 자속은 부방향으로 쇄교한다. 그러므로, 상호인덕턴스 $M_{ab}(i, \theta)$ 는 각 고정자극에서의 자속에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\begin{aligned} M_{ab}(i, \theta) &= N \cdot \Phi_{ab}(\theta) / i \\ &= N \cdot [\Phi_A(\theta) - \Phi_B(\theta) - \Phi_C(\theta)] / i \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, Φ_{ab} 는 a 상에 의해 발생하는 자속 중 b 상과 쇄교되는 자속이다.

전동기의 기하학적 대칭성을 이용하여 M_{bc} 와 M_{ca} 는 각각 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$M_{bc}(i, \theta) = M_{ab}(i, \theta + 30^\circ) \quad (12)$$

$$M_{ca}(i, \theta) = M_{ab}(i, \theta + 60^\circ) \quad (13)$$

4. 시뮬레이션 및 고찰

표 1은 본 연구에서 인덕턴스산정에 활용된 전동기의 재원을 보여주고 있다.

표 1. 인덕턴스산정에 활용된 전동기 재원

| | |
|--------------------|---------------|
| Stator/Rotor pole | 6/4 |
| Winding turns | 300 |
| Stator pole ang. | 30° |
| Rotor pole ang. | 30°, 35°, 40° |
| Stator outer dia. | 135.0 [mm] |
| Stator inside dia. | 66.5 [mm] |
| Rotor outer dia. | 65.8 [mm] |
| Air-gap length | 0.3 [mm] |
| Core length | 72.5 [mm] |

그림 3은 기준위치($\theta = 0^\circ$)에서 극호각의 설계조건에 대한 자기인덕턴스를 전류에 대해 산정한 결과를 보여주고 있다.

그림 3에서와 같이 포화가 되지 않은 경우의 자기인덕턴스는 회전자의 극호각에 따른 양자극간의 중첩각도에 비례적인 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고, 각각의 자기인덕턴스는 전류의 증가함에 따라 철심의 포화특성에 의해 감소함을 알 수 있다.

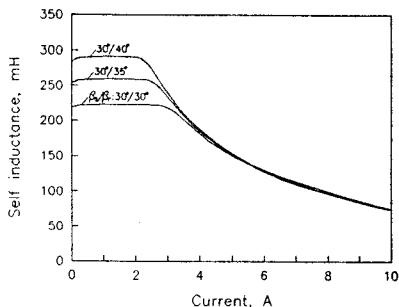


그림 3. 전류에 따른 자기인덕턴스의 변화 ($\theta=0^\circ$)

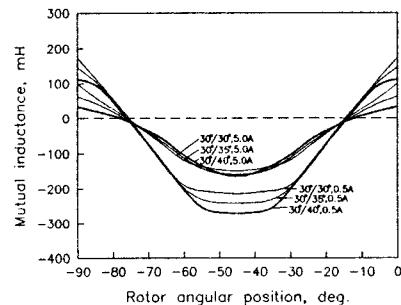


그림 5. 회전자 위치각에 따른 상호인덕턴스

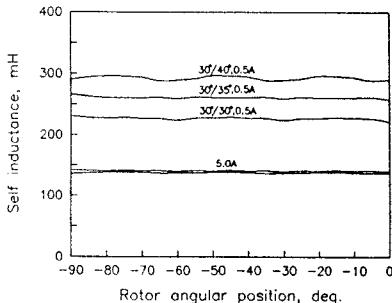


그림 4. 회전자 위치각에 따른 자기인덕턴스

그림 4에 이러한 자기인덕턴스의 산정결과를 회전자의 위치각에 대해 나타내었다. 위에서와 같이 6/4 SRM의 경우에 고정자와 회전자의 극호각이 30° 일 때는 자기인덕턴스가 거의 일정하며, 회전자의 극호각이 커짐에 따라 자기인덕턴스가 미소변동하게 되는데 이것은 공극부분의 퍼미언스가 조금씩 변화하기 때문에 발생되는 것으로 해석된다.

그림 5에는 a 상이 여자된 경우의 a, b 상간의 상호인덕턴스를 산정한 결과를 나타내었으며, 상호인덕턴스는 기준위치($\theta=0^\circ$)에서 정방향의 최대값을 갖고, $\theta = \alpha_r/2$ (α_r 은 회전자 극절의 각도)의 부근에서 부방향의 최대값을 갖게 된다. 이 때, 비포화 시에는 회전자의 극호각이 커짐에 따라 정방향의 상호인덕턴스가 감소하고 부방향의 상호인덕턴스가 증가하여 상호인덕턴스의 변화율이 거의 비슷하다. 그리고, 자기포화가 이루어짐에 따라 회전자의 극호각이 클수록 상호인덕턴스의 변화율은 감소하며 그 변화구간이 넓어짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 SRM의 동작특성과 설계기준의 해석에 있어서 매우 중요한 인덕턴스의 실제운전시의 자기포화를 고려한 산정방법을 제시하였다. 이러한 인덕턴스의 산정방법을 full-pitched winding SRM에 적용하여 자기인덕턴스를 구하고 이를 활용하여 각 상권선간의 상호인덕턴스를 산정하였다.

이러한 인덕턴스의 산정방법은 간단하고 용이하게 SRM의 제반특성의 해석에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후에는 이러한 산정방법을 여러가지 형태의 전동기에 적용하여 그 정확성을 더욱 높이고, 이를 활용하여 출력토크 및 에너지변환에 관한 특성을 해석하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] B.C.Mecrow, "Fully pitched winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements", Proc. IEE, Pt.B, Vol.140, No.1, pp.61-70, Jan. 1993.
- [2] J.Corda, J.M.Stephenson, "Analytical estimation of the minimum and maximum inductances of a double-salient motor", Proc. Int'l. Conf. on Stepping Motors and Systems, Leeds, pp.50-59, 1979.
- [3] 정태욱, 오석규, 황영문, "VRM의 Variable Inductance의 산정", 1996년도 춘계 전력전자연구회 논문집, pp.36-39.
- [4] A.E.Fitzgerald, "Electric machinery", McGraw-Hill 5th edition, pp.16-19.