

SRM 고정자와 회전자 중첩에 따른 인덕턴스 계산

최 경호*, 백 원식*, 김 동희*, 김 민희**
 영남대학교*, 영남이공대학**

Calculating Inductance of Switched Reluctance Motors
 with overlapping poles of rotor and stator

Kyeong-Ho Choi*, Won-Sik Back*, Dong-Hee Kim*, Min-Huei Kim**
 *Yeungnam University, **Yeungnam College of Science & Technology

Abstract - This paper presents a calculating method for inductance of the Switched Reluctance Motor(SRM) for torque characteristics and driving by analytical model. The approaches for calculating inductance have taken vary from detailed finite element analysis(FEA) and Fitting method in magnetization curves using complex nonlinear magnetic circuit models. But those methods have not satisfactory approach for machine performance calculations, because of having a long time and remodeling for analyses, therefore thus an alternative approach is required. So it is suggested simply calculating method of the inductance based on designed data of machinery by analytical model in unaligned and aligned rotor. In order to prove the calculating, there are compare with analytical FEM, direct measurement, this method, and simulation. The compared result is shown to obtain good accuracy.

터 정렬까지 계산하였으며, 고정자 권선의 앤드턴 효과를 무시한 2차원으로 해석하였다. 구조는 사각형 구조로 간이화하여 나타내었으며, 그림 1은 해석을 위한 6/4극 SRM 구조를 나타내고 있다. 그림 2는 쇄교자속을 계산하기 위한 간략화된 구조를 보여주고 있다. 쇄교자속 계산은 암페어의 법칙을 사용하여 회전자 요크와 고정자 요크가 겹치기 시작한 상태에서 두 부분으로 나누어서 계산하였다. 즉, 프린팅 현상에 의해 발생하는 쇄교자속 λ_f 와, 회전자와 고정자 두극에 직접적으로 쇄교되는 λ_m 을 각각 계산하여 전체 자속을 구하였다. 그림 2에서 n_{ser} 은 한 상에서 직렬회로수, N_p 는 권선의 턴수, l_{stk} 는 철심장의 길이, B_f 와 B_m 은 각각 공극과 철심에서 자속 밀도를 나타내고 있다. 그림 2와 같이 고정자와 회전자의 요크가 겹쳤을 때, 폐경로의 자속을 암페어 법칙을 적용하여 식(1)과 (2)를 얻을 수 있다 [4][5].

1. 서 론

SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조로 되어 있으며, 각기 다른 갯수의 극을 가진다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하지 않는 간단한 구조를 가지는 것이 SRM의 가장 큰 특징으로 볼 수 있다. 이러한 구조적 장점으로 인한 제작비용 절감의 효과와 기능상의 우수성으로 인하여 전반적인 산업 분야에서 응용이 기대되고 있다. 최근에는 보다 효과적인 SRM의 적용을 위하여 전동기의 최적 설계 및 제어를 위해서 FEM 해석에서부터 복잡한 비선형 자기회로 해석에 이르기까지 다양한 방법이 시도되고 있다. 그러나 FEM을 이용한 방법은 상당한 시간적 소요와 모델 변형에 따른 재해석이 수행되어야 한다. 또한 자화곡선을 해석하기 위한 피팅계수법도 정확한 자화특성을 얻기 위해서 FEM 해석이나 실제 측정으로 얻은 인덕턴스나 쇄교자속을 필요로 한다[1][2][3].

본 연구에서는 SRM의 인덕턴스를 전동기 설계시 얻어지는 치수만으로 간단하게 산정 할 수 있는 모델과 계산 방법을 제시하였다. 따라서 FEM해석으로 인한 시간의 절약과 직접 측정으로 인한 번거로움을 피하였다. 제시된 방법은 SRM의 각상이 독립적이므로 회전자의 위치와 권선전류에 의해서 자속이 쇄교되는 기본 원리를 이용하여, 회전자와 고정자가 겹치는 시점에서 정렬상태까지의 자기회로 분석을 통하여 인덕턴스 변화를 계산하는 방법이다. 계산된 결과와 특성 해석법을 검증하기 위하여 FEM을 이용하여 얻은 결과와 측정된 결과를 비교 분석하였다. 또한 SRM의 구조를 간이화하여 구한 인덕턴스와 FEM 해석에 의해 얻어진 결과를 각각 활용하였을때의 전류파형을 비교하여 제시된 방식의 실용성을 입증하였다.

2. 인덕턴스 계산

2.1 인덕턴스 계산을 위한 방정식

인덕턴스 계산은 고정자와 회전자가 중첩이 일어나는 시점부

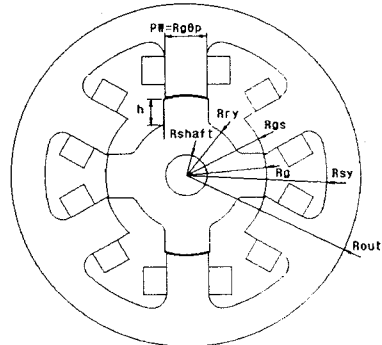


그림 1 해석을 위한 SRM 모델

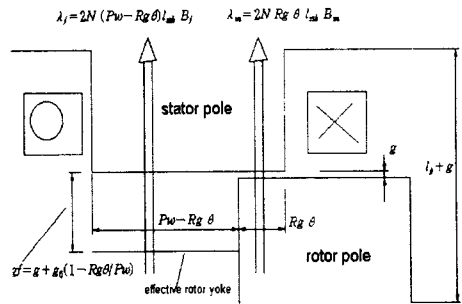


그림 2 고정자와 회전자가 겹칠 때 자속쇄교

$$H_{Fe,m} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,m} \cdot 2 \cdot g = 2N_p \cdot I_p \quad (1)$$

$$H_{Fe,f} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,f} \cdot 2 \cdot gf = 2N_p \cdot I_p \quad (2)$$

여기서, $H_{Fe,m}$ 은 코어에서 자계의 세기, $H_{g,m}$ 은 공극에서 자계의 세기이며, l_p 는 회전자와 고정자의 전체 길이, g 는 여격, I_p 는 상전류를 나타낸다.

주 자속밀도를 구하기 위해서는 주어진 일정한 폴의 단면적에 대한 밀도인므로 공극에서의 자속밀도와 철심의 자속밀도는 같다고 볼 수 있다. 마찬가지로 풀린정현상에 의한 자속밀도를 구할 때도 같은 방법이 적용된다. B와 H의 관계는 매질의 특성에 의해서 정해진다. 공극에서의 주자속밀도 B_m 은 식 (3)으로, 요크에서 주자속 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_m = \mu_0 H_{g,m} \quad (3)$$

$$B_m = \frac{\mu H_{Fe,m}}{1 + \frac{\mu H_{Fe,m}}{B_{sat}}} + \mu_0 H_{Fe,m} \quad (4)$$

여기서, μ 와 B_{sat} 는 매질에 의해서 결정되어지는 상수이다. 식(3)은 $H_{g,m} = B_m/\mu_0$ 이므로, 식(1)에 대입하면 식(5)와 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 다시 식(6)을 식(4)에 대입하면 식 (7)과 같이 B_m 을 나타낼 수 있으며, B_m 을 풀면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{Fe,m} \cdot l_p + \frac{B_m}{\mu_0} g = N_p I_p \quad (5)$$

$$H_{Fe,m} = \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{\mu \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right)}{1 + \frac{\mu \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right)}{B_{sat}}} + \mu_0 \left(\frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \right) \quad (7)$$

$$B_m(\theta, I_p) = \frac{\mu_0 N_p}{2(1 + \frac{g}{l_p})} \left[(1 + \frac{2g}{l_p}) I_p + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} \right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} I_p + I_p^2} \right] \quad (8)$$

여기서, $l_{m1} = l_p + (\mu_r + 1)g$, $l_{m2} = l_p - (\mu_r + 1)g$ 그림 2에서 나타낸 쇄교자속을 구하기 위한 두 식 $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} \cdot B_f$, $\lambda_m = 2N \cdot Rg \cdot \theta \cdot l_{stk} \cdot B_m$ 은 B field를 구함으로써 얻어질 수 있다. 권선의 병렬회로수 n_{ser} 을 고려하여 쇄교자속을 구하면 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_m(\theta, I_p) = \lambda_0 \frac{Rg\theta}{(1 + \frac{g}{l_p})g} \left[\left(1 + \frac{2g}{l_p}\right) \frac{I_p}{n_{par}} + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} \right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_p}{n_{par}} + \left(\frac{I_p}{n_{par}} \right)^2} \right] \quad (9)$$

여기서, $\lambda_0 = n_{ser} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_p}{2} \cdot l_{stk} \cdot s_{if}$, s_{if} 는 코어의 점적률을 나타내며, θ 는 고정자 코어와 회전자 코어가 겹치기 시작하는 부분을 0° 로 하였다. 프린징 현상에 의한 쇄교자속 $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} B_f$ 은 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\lambda_f(\theta, I_p) = \lambda_0 \frac{Pw - Rg\theta}{g_f} \left[\left(1 + \frac{2g_f}{l_p}\right) \frac{I_p}{n_{par}} + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} \right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_p}{n_{par}} + \left(\frac{I_p}{n_{par}} \right)^2} \right] \quad (10)$$

여기서 $l_{p2} = l_p - (\mu_r - 1)g_f$
 $g_f(\theta) = g + g_0 \left(1 + \frac{Rg\theta}{Pw}\right)$, $l_{m1} = l_p + (\mu_r + 1)g_f$.

$$g_0 = \frac{n_{ser}}{n_{par}} \mu_0 N_p^2 \frac{l_{stk} \cdot s_{if} \cdot Pw}{L_{po}} - g \text{이다.}$$

따라서 전체 SRM의 쇄교 자속은 주 자속과 풀린정 현상에 의한 자속의 합으로 식(11)(12)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_\phi(\theta, I_p) = \lambda_m(\theta, I_p) + \lambda_f(\theta, I_p) \quad (11)$$

$$L_\phi(\theta, I_p) = \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_p)}{\partial I_p} = \frac{\partial \lambda_m(\theta, I_p)}{\partial I_p} + \frac{\partial \lambda_f(\theta, I_p)}{\partial I_p} \quad (12)$$

2.2 FEM에 의한 인덕턴스 계산

SRM의 운전특성을 고려하여 인덕턴스의 계산은 전류를 0.4[A]에서 5.2[A]까지 0.4 스텝으로 설정하였다[6]. 자체해석은 상용프로그램을 이용하였으며, 각각의 회전자를 1도씩 이동 시켜 비정렬에서 정렬까지 수행하였다. 그림 4는 회전자의 회전각에 따른 각각의 전류에서 인덕턴스의 파형을 나타내고 있다.

2.3 결과 비교

2.3.1 인덕턴스

그림 3은 상기 수식에서 계산된 인덕턴스를 나타내고 있으며, 전류 0.4~5.2[A]까지 변화시킬 때, 회전자의 회전각도에 대한 계산결과이다. 그림 4는 동일 전동기의 구조로 FEM해석에 의해 얻어진 결과이며 그림 5는 측정에 의해 얻어진 결과를 나타내고 있다. 그림 6은 계산과 해석 및 측정된 경우 전류에 따른 인덕턴스를 비교한 것을 보여준다.

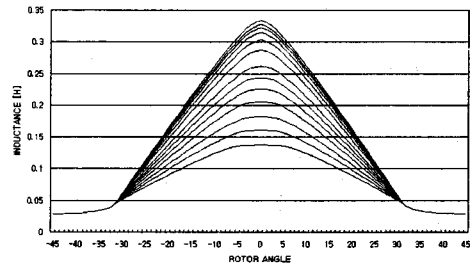


그림 3 인덕턴스 계산결과

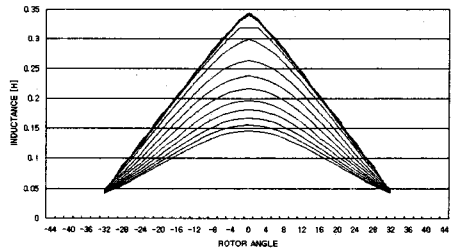


그림 4 FEM으로 해석으로 구한 인덕턴스

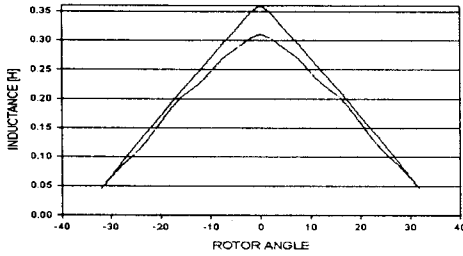


그림 5 인덕턴스 측정치

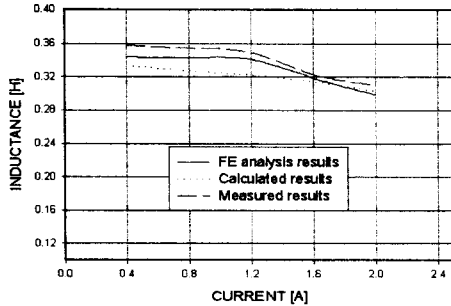
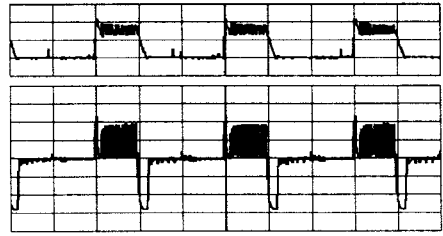


그림 6 인덕턴스 비교



(X=0.5ms/div, Y=2.5V/div, 2A/div, 150V/div)
(1,000[rpm])

그림 9 상전류 및 상전압 파형 측정

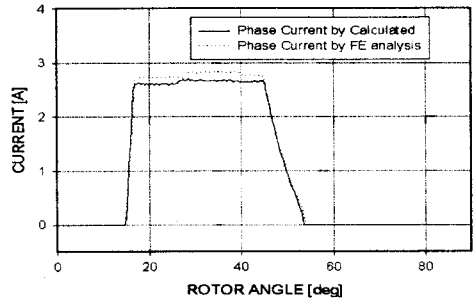


그림 10 1000[rpm]에서 상전류 파형 비교

2.3.2 전류, 전압

인덕턴스 변화에 따른 전동기의 동특성을 얻기 위한 시뮬레이션에서, 계산에 의해 구해진 인덕턴스와 FEM해석에 의해 구해진 인덕턴스를 회전자 위치의 위치에 따라 적용하였을 때 특성변화로서 스위칭각은 Turn_on 각은 -15° , Turn_off 각은 15° 로 일정하게 두고 회전수를 변화 시켜 얻어진 결과이다.[6][7] 그림 7은 1000[rpm]에서 토오크 1[Nm]일 때 계산에 의해 얻어진 결과를 대입했을 때의 전류, 전압파형을 나타내며, 그림 8은 FEM해석 결과로 얻어진 인덕턴스를 대입했을 때의 전류, 전압파형을 보여준다. 그림 9는 실험에 의해 얻어진 전류 전압 파형을 보여주고 있다.



그림 7 계산결과 대입시 전류, 전압파형(1000[rpm])

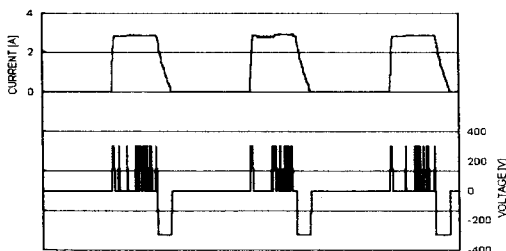


그림 8 FEM 해석결과 적용시 전류, 전압파형(1000[rpm])

3. 결 론

SRM은 각상이 독립적으로 여자 되며, 회전자 위치와 권선전류에 의해서만 자속이 쇄교되는 기본 원리를 이용하여 고정자와 회전자가 겹쳐질 때의 인덕턴스를 계산하여 보다 간편하게 전동기의 특성을 얻을 수 있었다. 또한 구해진 결과를 검증하기 위하여 1[Hp], 3,000[rpm], 6/4[P] 전동기를 모델로 하여 FEM 해석과 인덕턴스 측정 및 실험을 통하여 그 결과의 타당성을 검증하였다.

따라서 향후 새로운 모델의 SRM 개발이나 적용을 위하여 제시된 방법으로 인덕턴스를 산정하여 적용하면 시뮬레이션이나 운전특성을 보다 간단하고 신속하게 얻을 수 있으리라 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] D.A. Torrey and J.H. Lang, "Modeling a nonlinear variable reluctance motor drive," Proc. Inst. Elect. Eng., pt. B, vol. 137, pp. 414-326, 1990
- [2] T.J.E. Miler and McGilp, "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design," proc. Inst. Elect. Eng., pt. B, vol. 137, pp. 337-347, 1990
- [3] D.A. Torrey, "An experimentally verified variable reluctance machine model implemented in the saber circuit simulator," Electric Machines Power Syst., vol. 24, No.2, pp.199-209, Mar. 1996
- [4] Arthur Radun, "Analytically Computation the Flux Linked by a Switched Reluctance Motor Phase When the Stator and Rotor Poles Overlap". IEEE, vol., 36, No. 4, pp.1996-2003, July. 2000
- [5] Arthur Radun "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor", IEEE, vol., 31, No. 5, September /October 1995
- [6] G. E. Dawson, A.R. Eastham and J. Mizia " Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results" IEEE Transactions, Vol. IA-23, No. 3, May/June 1987, pp 532-537
- [7] 강도현, 문진형 "SRM 컨버터에서 자기동조 방식에 의한 토크오프 각의 결정", 전력전자학회 논문지 vol. 3, no. 4, Dec. 1998, pp. 418-425