

퍼미언스 방법을 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정

Inductance Calculation in a Switched Reluctance Motor using Permeance Method

이 치 우*
(Cheewoo Lee)

Abstract - Torque is proportional to the rate of change of inductance in a switched reluctance motor (SRM), and hence, phase inductance is an important parameter in determining the behavior of an SRM. Therefore, the accurate prediction of inductance with respect to rotor position makes a significant contribution to designing an SRM and its analytical approach is not straightforward due to nonlinear flux distribution. Although several different approaches using a finite element analysis (FEA) or curve-fitting tool have been employed to compute phase inductance [2-5], they are not suitable for a simple design procedure because the FEA necessitates a large amount of time in both modeling and solving with complexity for every motor design, and the curve-fitting requires the data of flux linkage from either an experimental test or an FEA simulation. In this paper, phase inductance is predicted by means of a permeance method, and the proposed approach is analytically verified in terms of the accuracy of estimated inductance compared to inductance obtained by FEA.

Key Words : Inductance estimation, Permeance method, Switched reluctance motor

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor 또는 SRM)는 다른 교류 전동기나 영구자석형 전동기와 달리 회전자에 권선이나 영구자석이 없고 고정자 자극에 집중권을 가진 저 비용과 간단한 자기 구조가 특징이므로 가변속 전동기 분야에서 우수한 경쟁자 위치에 있다. 또한 스위치드 릴럭턴스 전동기 드라이브는 적용분야나 상수에 따라 전력스위치 숫자를 조절할 수 있어 그 적용에 있어서 경제적이고 상권선에 전력스위치 소자에 직렬로 연결되어 있어 직류전원 양단에 단락으로 인한 전력스위치 소손이 없는 장점도 가지고 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기는 산업용 및 가정용의 여러 분야에서 적용이 검토되고 있으며, 최근에는 저가의 중소형 전동기 분야에서도 활발히 연구되고 있다.

이런 스위치드 릴럭턴스 전동기를 분석하거나 설계할 때 고려해야 하는 중요한 인자 중 하나가 상권선의 인덕턴스이며, 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화율은 토크 발생에 직접 비례하므로 해당 전동기의 성능을 예측할 때는 인덕턴스 계산의 정확도가 요구되어 진다. 하지만 유한요소법 또는 곡선적합법(curve-fitting)과 같은 방법에 의한 인덕턴스 계산의 경우 전동기의 초기 모델링이 복잡하고 해석과 계산과정에서 많은 시간이 요구되어 복잡한 전자계 구조에서 치수 수정을 동반한 빠른 설계 초기화에는 적합하지 않다 [2-5]. 본 논문에서는 유한요소법에 비해 상대적으로 간단한 퍼미언스 법을 사용하여 인덕턴스를 예측한다. 이때, 적용

대상인 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자의 극 수가 많아서 자속의 경로가 복잡하고 그로 인해 인덕턴스의 정확한 근사가 쉽지 않은 구조를 선택하며, 퍼미언스 방법에 의해 예측된 인덕턴스가 어떻게 정확도를 확보하는지를 수치적으로 보여주고, 그 결과를 유한요소법과 비교함으로써 본 논문의 이론적 근거를 제시한다.

2. 대상 SRM의 자기적 구조 및 자속 튜브

그림 1(a)는 2상 E-코어 SRM[7]의 자기적 구조를 보여주고 있다. 고정자 코어에서 4개의 작은 자극에만 집중권으로 코일이 감겨져 있고, 코일이 감겨져 있는 자극 사이에 있는 큰 공통 자극(common pole)에는 권선이 없다. 이때, 2개의 작은 자극 사이에 있는 공통 자극의 자기적 구조가 알파벳 E 모양과 유사하다. 그림 1(a)는 A상 고정자 자극 S7a와 S7b에 완전히 정렬된 위치에 있는 두 회전자 자극을 보여주고 있다. 이 회전자 위치에서 B상 고정자 자극 S8a와 S8b에는 회전자 자극들이 정렬되어 있지 않은데 이것은 반시계 방향으로 회전을 할 때 다음 토크를 발생시킬 수 있는 위치이다. E-코어 SRM의 모든 고정자 자극은 대칭이고 자속 통로도 대칭이기 때문에 방사방향의 힘은 균형을 이룬다. 그리고 그림 1(b)는 일체형 E-코어 SRM의 퍼미언스 노드 점들을 보여주고 있다.

자기등가 회로(magnetic equivalent circuit, MEC)는 설계 최적화를 위해 전동기 성능을 예측하는데 있어 유용하다. 그림 2는 관심대상의 통로를 싸고 있는 자속 튜브를 보여주고 있으며, 이때 자속 튜브는 길이, 단면적 그리고 재료의 투자율에 의해 결정될 수 있다. 이러한 자속 튜브는 자기 등가회로에서 가장 기본이 되는 요소이고, 식 (1)과 (2)에서와 같이 대응되는 자기저항(reluctance) R_{o-1} 이나 퍼미언스

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungshung University

E-mail : cwlee1014@ks.ac.kr

Received : September 29, 2012; Accepted : November 15, 2012

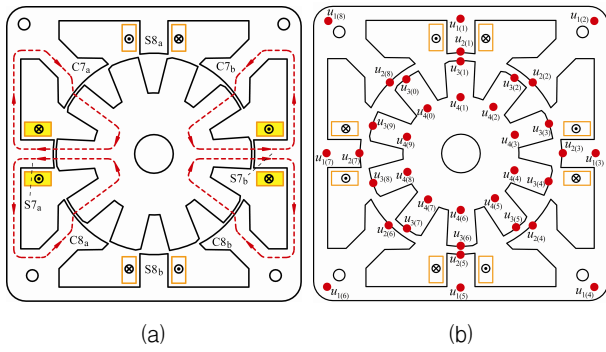


그림 1 2상 E-core SRM
(a) 자기적 구조, (b) 퍼미언스 노드

Fig. 1 Two-phase E-core SRMs
(a) magnetic structure, (b) permeance nodes

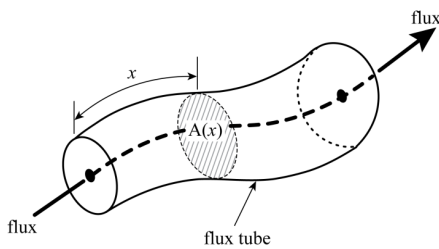


그림 2 자기 등가회로에서의 자속 튜브
Fig. 2 Flux tube in a magnetic equivalent circuit

(permeance) P_{o-l} 과 직접적으로 연관됨을 알 수 있다.[1]

$$R_{o-l} = \int_o^l \frac{1}{\mu(x) \cdot A(x)} dx \quad (1)$$

$$P_{o-l} = \frac{1}{R_{o-l}} = \int_o^l \mu(x) \cdot A(x) dx \quad (2)$$

여기서 $\mu(x)$ 는 재료의 투자율이고 $A(x)$ 는 튜브의 단면적이다.

3. 퍼미언스 법에 의한 인덕턴스 산정

식 (1)의 퍼미언스에서 알 수 있듯이 자속 튜브는 그 단면적과 투자율에 의해서 결정되므로 전동기에서 발생하는 퍼미언스는 크게 2가지로 구분될 수 있고, 그 퍼미언스는 자속 튜브의 치수적 비선형 또는 투자율의 비선형 특징에 기인한다. 고정자와 회전자 코어를 형성하는 철판에서는 투자율의 비선형만을 고려하면 그림 1(b)의 퍼미언스 노드에서 발생하는 각각의 자속 튜브를 쉽게 계산할 수 있다. 하지만 공극에서는 투자율이 일정한 반면 회전자가 돌면서 발생하는 자속 튜브의 단면적 치수가 비선형적으로 변하기 때문에 자속 튜브의 퍼미언스를 계산하기가 용이하지 않을 뿐만 아니라 회전자 위치에 따라 다양한 형태의 자속 튜브가 생길 수 있다. 그림 3은 공극에서 발생하는 다양한 자속 튜브를 보여주었고 있으며, 이러한 자속 튜브들은 크게 4가지 타입으로 구분될 수 있다.[6]

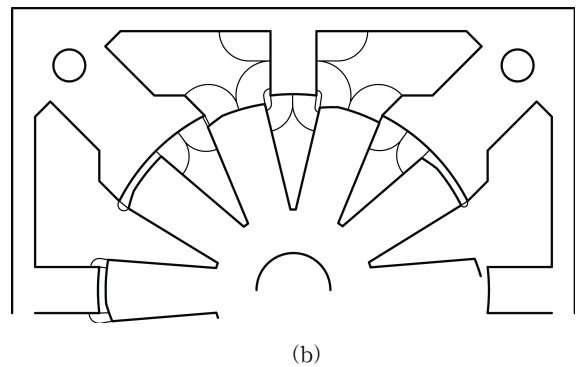
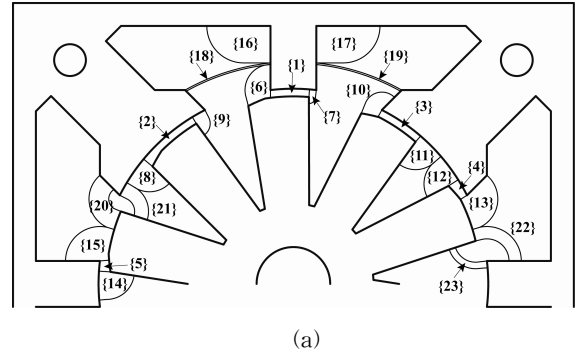


그림 3 공극 주변의 자속 튜브
(a) 여자된 자극에 회전자 중첩이 있는 경우
(b) 여자된 자극에 회전자 중첩이 없는 경우

Fig. 3 Flux tubes in air gap, (a) with overlap between stator and rotor poles, (b) without overlap between stator and rotor poles

그림 3(a)의 회전자 위치에서 나타나는 총 23개의 자속 튜브 중에서 {1}~{5}는 고정자와 회전자 자극사이의 중첩된 영역에서 형성되는 자속 튜브로서 중첩 퍼미언스라 하고, {6}~{15}는 고정자와 회전자 자극사이의 중첩영역 바로 옆에서 생기는 자속 튜브로서 누설 퍼미언스이며, {16}~{19}는 슬롯 퍼미언스로서 그 영향이 너무 적으므로 본 연구에서는 무시한다. 마지막으로 {20}~{23}은 고정자와 회전자 자극사이에서 중첩이 전혀 없는 경우로서 자극간 퍼미언스라고 명명된다.

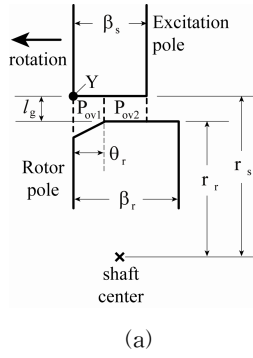
3.1 중첩 퍼미언스

그림 4(a)는 여자된 고정자 자극의 중첩 퍼미언스를 나타내고 있다. 중첩 합성 퍼미언스는 식 (3), (4), (5)에서 주어진 P_{ov1} 과 P_{ov2} 의 합으로 계산된다.

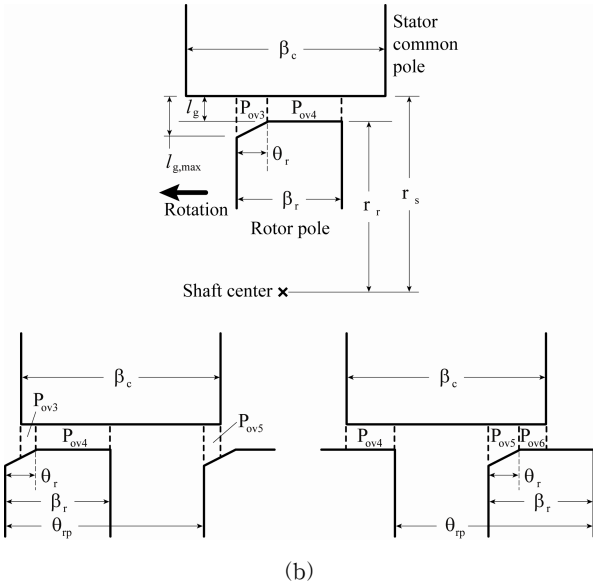
$$0 \leq \theta \leq \theta_r; \quad (3)$$

$$P_{ov1}(\theta) = \frac{\theta_r - \theta}{\theta_r} P_{ov1,max}$$

$$P_{ov2}(\theta) = \frac{\beta_s - \theta_r + \theta}{\beta_s} P_{ov2,max}$$



(a)



(b)

그림 4 중첩 퍼미언스

(a) 여자된 자극 주변, (b) 공통 자극 주변

Fig. 4 Overlap permeance around

(a) an excitation pole, (b) a common pole

$$\theta_r \leq \theta \leq \theta_r + \beta_s; \tag{4}$$

$$P_{ov1}(\theta) = 0, P_{ov2}(\theta) = \frac{\beta_r - \theta}{\beta_s} P_{ov2,max}$$

$$\theta \geq \theta_r + \beta_s; \tag{5}$$

$$P_{ov1}(\theta) = P_{ov2}(\theta) = 0$$

여기서

$$P_{ov1,max} = \frac{\mu_0 l \theta_r}{0.5(l_g + l_{g1}(\theta))} \frac{r_s + r_r}{2}, P_{ov2,max} = \frac{\mu_0 l \beta_s}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$l_{g1}(\theta) = -(l_{g,max} - l_g) \frac{\theta}{\theta_r} + l_{g,max} \quad (0 \leq \theta \leq \theta_r)$$

이때 $l_{g1}(\theta)$ 은 Y에서 회전자 자극 표면까지의 거리이다.

그림 4(b)는 회전자 위치에 따른 고정자 공통 자극 주변의 중첩 퍼미언스를 나타내고 있다. 이때, 중첩 합성 퍼미언스는 식 (6)과 같이 $P_{ov3,max}$ 와 $P_{ov4,max}$ 의 합으로 계산된다.

$$P_{ov,c}(\theta) = P_{ov3}(\theta) + P_{ov4}(\theta) + P_{ov5}(\theta) + P_{ov6}(\theta) \tag{6}$$

$$\therefore P_{ov,c}(\theta) = P_{ov3,max} + P_{ov4,max}$$

여기서

$$P_{ov3,max} = \frac{\mu_0 l \theta_r}{0.5(l_g + l_{g,max})} \frac{r_s + r_r}{2}, P_{ov4,max} = \frac{\mu_0 l \beta_s}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

3.2 여자된 고정자 자극 주변의 누설 퍼미언스

누설 퍼미언스는 회전자 위치와 상관없이 항상 일정한 한계선을 넘지 못 하는데, 이를 그림 5에서 나타내고 있다. 고정자와 회전자의 관점에서 각각 표시한 한계선을 계수 $\theta_{s,lm}$ 과 $\theta_{r,lm}$ 으로 구분되고, 아래 식 (7)과 같이 고정자와 회전자의 자극 주기 및 자극의 극호각에 의해 결정되어 진다.

$$\theta_{sp} = \frac{2\pi}{P_s}, \theta_{s,lm} = \frac{\theta_{sp} - (\beta_s + \beta_c)}{4} \tag{7}$$

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r}, \theta_{r,lm} = \frac{\theta_{rp} - \beta_r}{2}$$

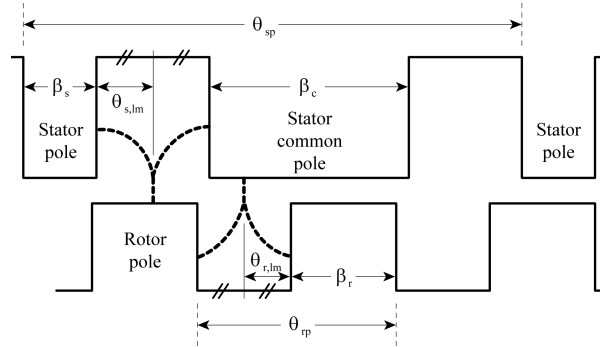


그림 5 고정자와 회전자 자극 사이의 중요한 각도

Fig. 5 Critical angles between stator and rotor poles

그림 6은 여자된 고정자 자극의 왼쪽에서 형성되는 누설 퍼미언스를 보여주고 있으며, 합성 누설 퍼미언스는 전기회로의 컨덕턴스와 같은 방법으로 식 (8)과 같이 3개의 퍼미언스 P_{fr1} , P_{fr2} , P_{fr3} 를 합성하면 된다.

$$\frac{1}{P_{FR}} = \frac{1}{P_{fr1} + P_{fr2}} + \frac{1}{P_{fr3}} \therefore P_{FR} = \frac{P_{fr1}P_{fr3} + P_{fr2}P_{fr3}}{P_{fr1} + P_{fr2} + P_{fr3}} \tag{8}$$

그리고 퍼미언스 P_{fr1} 과 P_{fr2} 는 중첩 퍼미언스와 같은 방법으로 유도하면 되고, 회전자 위치에 따른 각 퍼미언스의 변화는 아래에서 식 (9), (10)에서 주어진다.

$$P_{fr1} = \frac{\theta}{\theta_r} P_{fr1,max} \quad (0 \leq \theta \leq \theta_r) \tag{9}$$

$$= P_{fr1,max} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_{s,lm})$$

$$= \frac{\theta_r - (\theta - \theta_{s,lm})}{\theta_r} P_{fr1,max} \quad (\theta_{s,lm} \leq \theta \leq \theta_{s,lm} + \theta_r)$$

$$= 0 \quad (\theta_{s,lm} + \theta_r \leq \theta \leq \beta_r)$$

$$P_{fr2} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \theta_r) \tag{10}$$

$$= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{s,lm}} P_{fr2,max} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_{s,lm} + \theta_r)$$

$$= P_{fr2,max} \quad (\theta_{s,lm} + \theta_r \leq \theta \leq \beta_r)$$

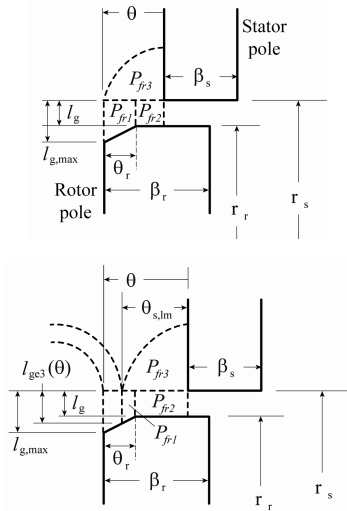


그림 6 여자된 자극 왼쪽의 누설 퍼미언스
 Fig. 6 Fringing permeance on the left side of an excitation pole

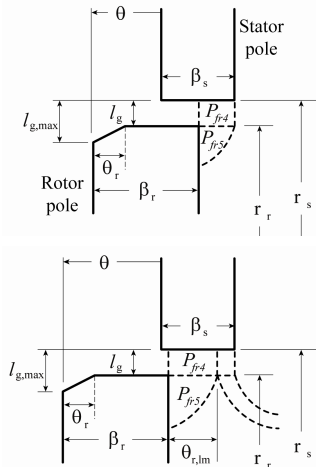


그림 7 여자된 자극 오른쪽의 누설 퍼미언스
 Fig. 7 Fringing permeance on the right side of an excitation pole

반면 퍼미언스 P_{fr3} 는 회전자 위치에 관계없이 식 (11)과 같이 일정한 값을 유지한다.

$$P_{fr3} = \frac{\mu_0 A_{fr3}}{l_{fr3}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} \quad (11)$$

여기서

$$P_{fr1,max} = \frac{\mu_0 l \theta_r}{0.5(l_{g,fr1}(\theta))} \frac{r_s + r_r}{2}, P_{fr2,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{s,lm} r_s + r_r}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$l_{g,fr1}(\theta) = l_{g,max} + l_g(\theta) \quad (0 \leq \theta \leq \theta_r)$$

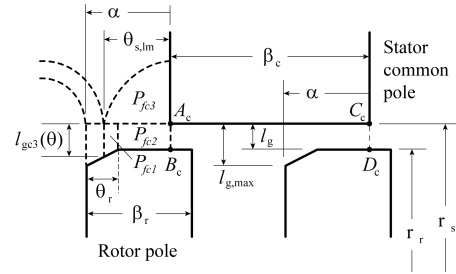
$$= l_{g,max} + l_g(\theta_r) \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_{s,lm})$$

$$= l_g + l_{g3}(\theta) \quad (\theta \geq \theta_{s,lm})$$

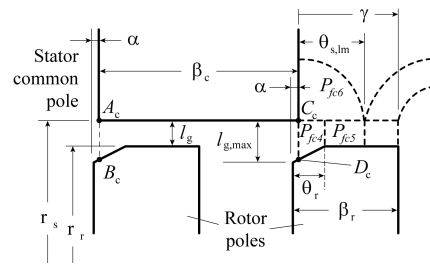
$$l_{g1}(\theta) = -(l_{g,max} - l_g) \frac{\theta}{\theta_r} + l_{g,max}$$

$$l_{g3}(\theta) = -\frac{(l_{g,max} - l_g)(\theta - \theta_{s,lm})}{\theta_r} + l_{g,max}$$

$$A_{fr3} = \theta r_s l, l_{fr3} = \frac{\theta r_s}{2} \frac{\pi}{2}$$



(a)



(b)

그림 8 공통 자극 주변의 누설 퍼미언스
 (a) 왼쪽 위치, (b) 오른쪽 위치

Fig. 8 Fringing permeance, (a) on the left side of a common pole, (b) on the right side

그림 7은 여자된 고정자 자극의 오른쪽에서 형성되는 누설 퍼미언스를 나타내고 있다. 이 경우 전체 누설 퍼미언스는 식 (12)에서처럼 2개의 퍼미언스 요소 P_{fr4} , P_{fr5} 를 합성하면 되고 각각의 요소는 식 (13), (14)에서 회전자 위치별로 구체화되어 있다.

$$\frac{1}{P_{fr,e2}} = \frac{1}{P_{fr4}} + \frac{1}{P_{fr5}} \therefore P_{fr,e2} = \frac{P_{fr4} P_{fr5}}{P_{fr4} + P_{fr5}} \quad (12)$$

$$P_{fr4} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \theta_r)$$

$$= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{r,lm}} P_{fr4,max} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_{r,lm} + \theta_r)$$

$$= P_{fr4,max} \quad (\theta_{r,lm} + \theta_r \leq \theta \leq \beta_r)$$

$$P_{fr5} = \frac{\mu_0 A_{fr5}}{l_{fr5}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} \quad (14)$$

여기서

$$P_{fr4,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{r,lm} r_s + r_r}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$A_{fr5} = (\theta - \theta_r) r_r l, l_{fr5} = \frac{(\theta - \theta_r) r_r}{2} \frac{\pi}{2} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_{r,lm} + \theta_r)$$

$$A_{fr5} = \theta_{r,lm} r_r l, l_{fr5} = \frac{\theta_{r,lm} r_r}{2} \frac{\pi}{2} \quad (\theta_{r,lm} + \theta_r \leq \theta \leq \beta_r)$$

3.3 공통 자극 주변의 누설 퍼미언스

앞 절에서는 여자된 고정자 자극 주변에서 형성되는 자속 튜브에 상응하는 누설 퍼미언스에 대해 수치적으로 근사화 하였다. 유사한 형태의 누설 자속이 공통 자극 근방에서 나타나는데 그림 8은 공통 자극 주변의 누설 퍼미언스를 보여 준다. 그림 8(a), (b)는 공통 자극의 왼쪽과 오른쪽에서 각각 발생하는 누설 자속의 경우이며, 누설 퍼미언스의 합성 과정은 상기의 여자된 고정자 자극의 경우와 흡사하다. 식 (15), (16), (17), (18)에서는 공통 자극의 왼쪽 누설 퍼미언스를 유도했고, 또 다른 회전자 위치에서 발생하는 공통 자극의 오른쪽 누설 퍼미언스는 식 (19), (20), (21), (22)에서 수치적으로 근사화 되었다.

$$\frac{1}{P_{fr,e1}} = \frac{1}{P_{fc1} + P_{fc2}} + \frac{1}{P_{fc3}} \quad (15)$$

$$\therefore P_{fr,e1} = \frac{P_{fc1}P_{fc3} + P_{fc2}P_{fc3}}{P_{fc1} + P_{fc2} + P_{fc3}}$$

$$P_{fc1} = \frac{\alpha}{\theta_r} P_{fc1,max} (0 \leq \alpha \leq \theta_r) \quad (16)$$

$$= P_{fc1,max} (\theta_r \leq \alpha \leq \theta_{s,lm})$$

$$= \frac{\theta_r - (\alpha - \theta_{s,lm})}{\theta_r} P_{fc1,max} (\theta_{s,lm} \leq \alpha \leq \theta_{s,lm} + \theta_r)$$

$$= 0 (\theta_{s,lm} + \theta_r \leq \alpha \leq \beta_r)$$

$$P_{fc2} = 0 (0 \leq \alpha \leq \theta_r) \quad (17)$$

$$= \frac{\alpha - \theta_r}{\theta_{s,lm}} P_{fc2,max} (\theta_r \leq \alpha \leq \theta_{s,lm} + \theta_r)$$

$$= P_{fc2,max} (\theta_{s,lm} + \theta_r \leq \alpha \leq \beta_r)$$

$$P_{fc3} = \frac{\mu_0 A_{fc3}}{l_{fc3}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} \quad (18)$$

여기서

$$P_{fc1,max} = \frac{\mu_0 l \theta_r}{0.5(l_{g,max} + l_{g,fc1}(\alpha))} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$P_{fc2,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{s,lm}}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$l_{g,fc1}(\alpha) = l_{g,c1}(\alpha) (0 \leq \alpha \leq \theta_{s,lm})$$

$$= l_{g,c3}(\alpha) (\alpha \geq \theta_{s,lm})$$

$$l_{g,c1}(\alpha) = -(l_{g,max} - l_g) \frac{\alpha}{\theta_r} + l_{g,max}$$

$$l_{g,c3}(\alpha) = -\frac{(l_{g,max} - l_g)(\alpha - \theta_{s,lm})}{\theta_r} + l_{g,max}$$

$$A_{fc3} = \alpha r_s l, l_{fc3} = \frac{\alpha r_s}{2} \frac{\pi}{2} (0 \leq \alpha \leq \theta_{s,lm})$$

$$A_{fc3} = \theta_{s,lm} r_s l, l_{fc3} = \frac{\theta_{s,lm} r_s}{2} \frac{\pi}{2} (\theta_{s,lm} \leq \alpha \leq \beta_r)$$

여기서부터 공통 자극의 오른쪽에서 형성되는 누설 퍼미언스의 수치적 표현을 세부적으로 제시한다.

$$\frac{1}{P_{fr,e2}} = \frac{1}{P_{fc4} + P_{fc5}} + \frac{1}{P_{fc6}} \quad (19)$$

$$\therefore P_{fr,e2} = \frac{P_{fc4}P_{fc6} + P_{fc5}P_{fc6}}{P_{fc4} + P_{fc5} + P_{fc6}}$$

$$P_{fc4} = 0 (0 \leq \gamma \leq \beta_r - \theta_r) \quad (20)$$

$$= \frac{\theta_r - (\beta_r - \gamma)}{\theta_r} P_{fc4,max} (\beta_r - \theta_r \leq \gamma \leq \beta_r)$$

$$P_{fc5} = \frac{\gamma}{\theta_{s,lm}} P_{fc5,max} (0 \leq \gamma \leq \theta_{s,lm}) \quad (21)$$

$$= P_{fc5,max} (\theta_{s,lm} \leq \gamma \leq \beta_r - \theta_r)$$

$$= \frac{(\beta_r - \gamma) + \theta_{s,lm} - \theta_r}{\theta_{s,lm}} P_{fc5,max} (\beta_r - \theta_r \leq \gamma \leq \beta_r)$$

$$P_{fr6} = \frac{\mu_0 A_{fr6}}{l_{fr6}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} \quad (22)$$

여기서

$$P_{fc4,max} = \frac{\mu_0 l \theta_r}{0.5(l_g + l_{g,c2}(\alpha))} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$P_{fc5,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{s,lm}}{l_g} \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$l_{g,c2}(\alpha) = -(l_{g,max} - l_g) \frac{\alpha}{\theta_r} + l_{g,max}$$

$$A_{fc6} = \gamma r_s l, l_{fc6} = \frac{\gamma r_s}{2} \frac{\pi}{2} (0 \leq \gamma \leq \theta_{s,lm})$$

$$A_{fc6} = \theta_{s,lm} r_s l, l_{fc6} = \frac{\theta_{s,lm} r_s}{2} \frac{\pi}{2} (\theta_{s,lm} \leq \gamma \leq \beta_r)$$

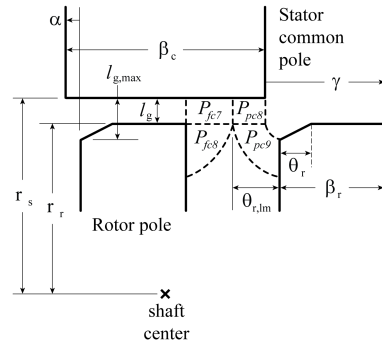


그림 9 인접한 회전자 자극 사이에서 발생하는 공통 자극의 누설 퍼미언스

Fig. 9 Fringing permeance between adjacent rotor poles around a common pole

그림 9는 인접한 회전자 자극 사이에서 발생하는 공통 자극 주변의 누설 퍼미언스를 나타내고 있다. 이 경우 전체 누설 퍼미언스는 식 (23), (24)에서처럼 2개의 퍼미언스 요소를 합성하면 되고 각각의 요소는 식 (25), (26), (27), (28)에서 자세히 표시되어 있다.

$$\frac{1}{P_{fr,e3}} = \frac{1}{P_{fc7}} + \frac{1}{P_{fc8}} \therefore P_{fr,e3} = \frac{P_{fc7}P_{fc8}}{P_{fc7} + P_{fc8}} \quad (23)$$

$$\frac{1}{P_{fr,e4}} = \frac{1}{P_{fc9}} + \frac{1}{P_{fc10}} \therefore P_{fr,e4} = \frac{P_{fc9}P_{fc10}}{P_{fc9} + P_{fc10}} \quad (24)$$

$$P_{fc7} = P_{fc7,max} (0 \leq \alpha \leq \beta_r) \quad (25)$$

$$P_{fc8} = \frac{\mu_0 A_{fc8}}{l_{fc8}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} (0 \leq \alpha \leq \beta_r) \quad (26)$$

$$P_{fc9} = P_{fc9,max} (0 \leq \gamma \leq \beta_r) \quad (27)$$

$$P_{fc10} = \frac{\mu_0 A_{fc10}}{l_{fc10}} = \frac{4\mu_0 l}{\pi} (0 \leq \gamma \leq \beta_r) \quad (28)$$

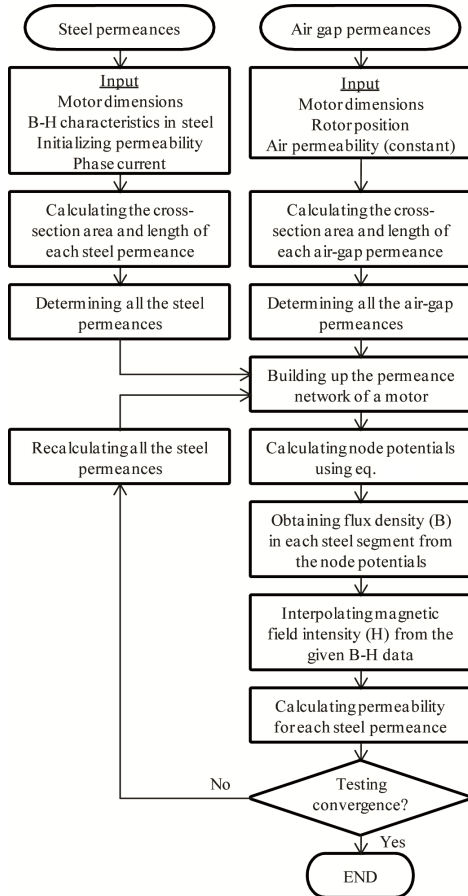


그림 10 퍼미언스 계산을 위한 플로차트
 Fig. 10 Flowchart for permeance calculation

여기서

$$P_{fe7,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{r,lm} r_s + r_r}{l_g}, P_{fe9,max} = \frac{\mu_0 l \theta_{r,lm} r_s + r_r}{l_g}$$

$$A_{fe8} = \theta_{r,lm} r_r l, l_{fe8} = \frac{\theta_{r,lm} r_r}{2} \frac{\pi}{2}$$

$$A_{fe10} = \theta_{r,lm} r_r l, l_{fe10} = \frac{\theta_{r,lm} r_r}{2} \frac{\pi}{2}$$

3.4 인덕턴스 예측

본 연구에서 인덕턴스 산정의 대상으로 선정된 E-코어 SRM은 고정자와 회전자의 극수가 많아서 자속의 경로가 복잡하고 그로 인해 인덕턴스의 정확한 근사가 쉽지 않은 구조이다. 제안된 방법을 사용하여 각 위치의 퍼미언스를 계산하는 과정이 그림 10에서 플로차트로 소개되고 있다. 4개로 구분된 퍼미언스 타입 중에서 중첩 퍼미언스와 누설 퍼미언스에 대해서는 회전자 위치에 따른 수치적 근사가 완성되었다. 자극간 퍼미언스는 누설 퍼미언스의 확장이므로 그 관계식은 누설 퍼미언스를 그대로 활용하면 된다. 앞서 언급했듯이 본 연구에서는 슬롯 퍼미언스는 무시한다. 퍼미언스 방법에 의해 예측된 인덕턴스는 유한요소법에 의한 결과와 비교함으로써 그 정확도를 검증코자 한다. 그림 11에서는 두 가지 방법에 의해 4A, 6A, 8A에서 산정된 인덕턴스를 비교하고 있으며, 유한요소법 대비 퍼미언스 법에 의한

인덕턴스는 회전자 비정렬 위치에서 9.2%, 회전자 정렬 위치에서 3.8%의 오차를 각각 보인다. 철판의 산포에 따른 최대 오차가 대략 10%인 점을 감안하면 [7] 제안된 방법에 의한 인덕턴스 산정이 이론적으로 검증되었다고 볼 수 있다.

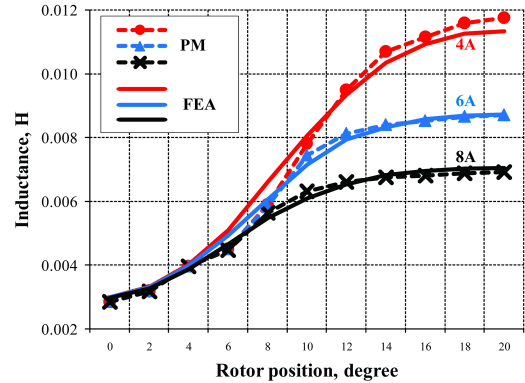


그림 11 퍼미언스 법과 유한요소법에 의해 산정된 인덕턴스 비교
 Fig. 11 Inductance estimated in permeance method (PM) and finite element analysis (FEA)

4. 결 론

상권선에 쇄교되는 자속의 양 또는 그에 상응하는 인덕턴스는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 결정하는 중요한 인자이다. 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 정확하게 예측하는 것은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계에서 큰 비중을 차지하며, 특히, E-코어 SRM의 경우 자속 분포의 복잡한 비선형성 때문에 인덕턴스 예측이 더욱 까다롭다. 본 연구에서는 고정자와 회전자의 자극 수가 많아서 자속의 경로가 복잡한 E-코어 SRM을 대상으로 퍼미언스 방법을 적용하여 인덕턴스를 예측하였고 그 정확도가 유한요소법 대비 회전자 비정렬 위치와 정렬 위치에서 각각 9.2%, 3.8%의 오차를 갖는다는 것을 확인했다. 따라서 퍼미언스 방법에 의한 인덕턴스 산정의 이론적 타당성을 입증하였고, 또한, 이 방법은 기존의 유한요소법과 달리 장시간의 복잡한 모델이 불필요하며, 그 적용이 쉽고 간단하여 스위치드 릴럭턴스 전동기의 빠른 설계 초기화 및 최적화에 적합한 방법이라 판단된다.

References

[1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC, 2001.
 [2] D. A. Torrey and J. H. Lang, "Modeling a nonlinear variable reluctance motor drive," Proc. Inst. Elect. Eng., pt. B, vol. 137, pp. 314-326, 1990.
 [3] T. J. E. Miller 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.
 [4] 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.

- [5] M. Stiebler and K. Liu, "An analytical model of switched reluctance machines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, pp. 1100-1105, Dec. 1999.
- [6] James M. Kokernak and David A. Torrey, "Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched-Reluctance Machine", IEEE Trans. on Magnetics, vol.36, no.2, pp. 500-507, Mar. 2000.
- [7] Cheewoo Lee and R. Krishnan, "New Designs of a Two-Phase E-Core Switched Reluctance Machine by Optimizing the Magnetic Structure for a Specific Application: Concept, Design, and Analysis", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 45, No. 5, pp 1804-1814, Sept./Oct. 2009.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경성대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음

저 자 소 개



이 치 우 (李 致 雨)

1972년 10월 14일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 부산대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2010년 Virginia Tech 전기공학과 대학원 졸업(박사). 1998~2003년 LG Electronics 선임연구원. 2010.01~2010.05 Ramu Inc (USA) senior engineer, 2010.07~2011.02 삼성전기 중앙연구소 책임연구원. 2011.03~현재 경성대학교 전기공학과 조교수.