

자기회로법을 이용한 동기리럭턴스전동기 해석

홍정표\*, 서정호\*, 주수원\*, 한성진\*, 강도현\*\*  
\* 동아대학교, \*\* 한국전기연구원

Analysis of a synchronous reluctance motor using a magnetic circuit method

J.P Hong\*, J.H Seo\*, S.W Joo\*, S.C Hahn\*, D.H Kang\*\*

\* Dept. of Electrical Eng. Dong-A Univ., \*\* Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper presents the analysis of the rotor of a synchronous reluctance motor(RSM) using the magnetic circuit that is attained from the flux path. In order to design the rotor of RSM, the magnetic circuit method can determine results of motor characteristics more quickly than when using to the finite element method. Here, the proposed magnetic circuit method for designing the rotor is verified by comparing results when using finite element method.

있을 때의 생성되는 자기회로에 대해서만 다를 것이다.

1. 서 론

동기리럭턴스전동기는 구조적으로 견고하고 다른 형태의 교류전동기에 비해 제조비용이 적으며, 특히 회전자에 권선이 존재하지 않으므로 인버터 구동일 경우 제어가 용이하다. 하지만 만약 돌극비,  $L_d/L_q$ 가 크지 않다면 토크 밀도와 역률 그리고 효율이 낮게 나타난다. 동기리럭턴스전동기는 회전자에 따라 절편형, 자속장벽형, 축방향성 축형으로 구분되며, 고정자는 유도기나 동기기와 같은 형태를 가진다. 대부분 전동기 설계시 주안점은 견고하고 간단한 구조의 전동기로서 높은 토크밀도와 효율 그리고 역률을 갖는 것이다. 따라서 동기 리럭턴스 전동기로 이런 조건을 만족하기 위해서는 직축과 횡축의 인덕턴스비,  $L_d/L_q$ 의 최대비를 구하는 것이며, 선행적으로 정확한 인덕턴스값을 얻기 위해서 설계모델에 대한 해석기법에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

절편형과 자속장벽을 가지는 회전자는  $L_d/L_q$ 의 비가 약 6-7 정도이며, 축방향 성층형 회전자는 9-12 정도의 비를 가진다[1]. 따라서 본 논문에서는 가장 큰 인덕턴스비를 가지는 축방향 성층형 회전자에 대하여 해석기법을 적용하기로 한다.

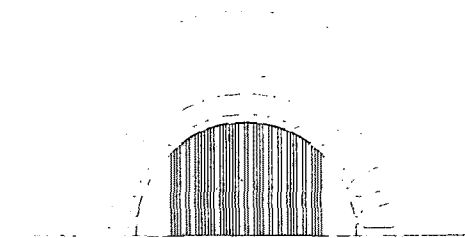
2. 이 론

2.1 축방향 성층형 회전자

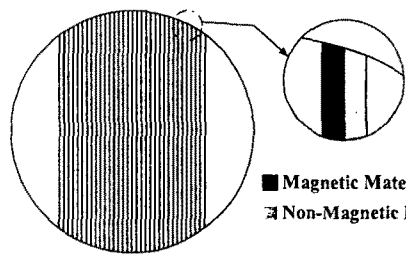
축방향 성층형 회전자는 자기층과 비자기층으로 이루어져 있으며, 자기층은 슬롯치 폭치의 1/10 이 적당하며 비자기층은 자기층의 1/2 로 한다[5]. 단, 그림 1은 개념적인 설명일 뿐 정밀한 설계를 위한 것은 아니다.

회전자의 직축방향으로 기자력을 인가되었을 경우 자속은 성층된 자성체 경로를 따라 지나고, 이때의 자속량이 최대가 되므로 해서 인덕턴스 역시 최대가 된다.

주자속의 경로에 대한 직축의 자기회로의 구성은 간단한 방법으로 얻어지므로 본 논문에서는 생략하기로 한다. 따라서 본 논문에서는 자속이 회전자에 횡축방향으로 발생하



(a)



■ Magnetic Material  
▣ Non-Magnetic Material

(b)

그림 1 SRM 형상 (a) 단면도 (b) 회전자

고정자 권선의 자속축에 회전자의 횡축이 놓여졌을 경우 자속은 회전자 횡축의 큰 리럭턴스 때문에 자속량이 제한되며 자속량을 예측함에 있어 어려움이 있다. 따라서 자속의 경로를 예측하고 회전자에 대한 수학적인 모델링을 통해 자속량을 산정할 수 있다. [2]에서 자속의 흐름을 지그재그라 가정하고 자기회로를 구성하였으나 FEM 해석결과 바람직하지 못한 것으로 판단된다.

2.2 해석 모델링 조건

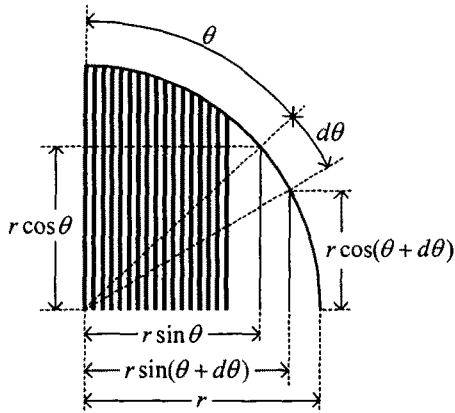
고정자의 3상 권선이 이상적으로 분포되어 있다고 하면 다음과 같이 직축과 횡축의 성분으로 정현적인 전류 분포를 표현할 수 있다.

$$I(\theta) = i_d \cos \theta - i_q \sin \theta \tag{1}$$

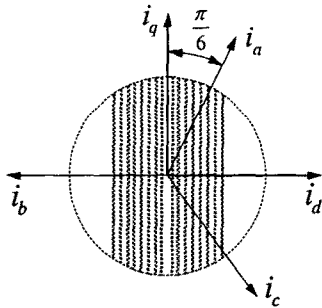
여기서,  $\theta$ 는 회전자의 직축을 중심으로 한 회전자의 원주에 따른 면전류값을 변화시키는 변수 각이다. 이는 그림 2를 통해 쉽게 이해할 수 있으며, 권선의 분포는 그림 2(a)에 나타나 있다. 본 논문에서 제안하는 자기회로법 검증에 필요한 FEM 해석을 위하여 그림 2(a)와 같이 고정자의 권선을 분포시킨 것이고, 이에 따라 회전자의 특정 위치를 정하여 해석하기로 한다.

회전자의 성층방향이 상하로 대칭이 되도록 놓은 것은 FEM을 통해 횡축의 쇄교자속을 계산할 때 자속의 흐름

을 더욱 세밀하고 전체적으로 관측할 수 있기 때문이다. 위와 같은 이유로 특정한 상태로 고정자와 회전자를 배치하였을 경우, 고정자의 권선분포에 따라 위상이  $\pi/6$  일 때 회전자의 직축과 고정자의 횡축이 동축위에 놓이게 된다. 따라서 FEM 해석시 교류 위상을  $\pi/6$  으로 가정하여 해석하면 회전자의 횡축으로 자속을 발생시킬 수 있다.



(a)



(b)

그림 2 회전자에 대한 고정자권선 분포도

## 2.2 SRM의 수학적 모델

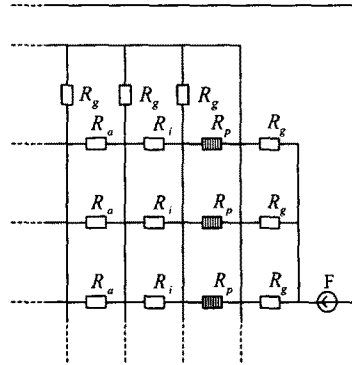
SRM의 수학적 표현을 위해서 그림2(a)에 대한 자기회로로 그림 3과 같은 회로를 구성할 수 있다. 그림 3에 표현된 리액턴스의 기본식은 다음과 같다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (2)$$

위의 식에 의해서 자속의 이동 경로에 따라 동기리액턴스 전동기를 세부적으로 나누어 각 영역을 리액턴스 요소로 표현할 수 있다. 세분된 리액턴스는 크게 공극 리액턴스와 극측면 리액턴스 그리고 성층 리액턴스로 나눌 수 있다.

특히 극측면 리액턴스는 비자성체로 이루어 있으므로 리액턴스를 극대화시킨다. 하지만 횡축 인덕턴스를 감소시키기 위해서 이를 필요이상으로 증가하면 직축 인덕턴스 감소의 원인이 될 수도 있다. 극측면 리액턴스 계산식에서 자로의 길이방향은 회전자의 횡축과 평행한 방향이 되며 단면은 회전자의 축길기와 원주길기의 적으로 구해진다. 이를 변위각  $d\theta$ 에 대한 극측면의 리액턴스를

표현하면 식(3)과 같다.



$R_p$  : Pole side     $R_i$  : Magnetic Material  
 $R_g$  : Airgap     $R_s$  : Non-magnetic Material

그림 3 회전자의 수학적 모델

$$R_p = \frac{r(\sin(\theta + d\theta) - \sin\theta)}{\mu \cdot r d\theta \cdot L} \quad (3)$$

또한, 축방향으로 성층된 회전자부분은 변위각  $d\theta$ 에 대하여 리액턴스값은 두 개의 값으로 유도된다. 하나는 자성체에 대한 리액턴스값이고 다른 하나는 비자성체에 대한 것이다. 이 값은 식(4)와 식(5)와 같이 유사식으로 구해진다.

$$R_i = \frac{n \cdot l_i}{\mu(\cos\theta - \cos(\theta + d\theta))} \quad (4)$$

$$R_a = \frac{n \cdot l_a}{\mu(\cos\theta - \cos(\theta + d\theta))} \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 성층수이며,  $l_i$ ,  $l_a$ 은 각각 자성체와 비자성체의 두께이다.

퍼미언스법을 적용하면 식(3), (4), (5)는 다음과 같이 적분식으로 정리 할 수 있다.

$$Y_p = \int_0^{\pi/2} \frac{\mu \cdot r d\theta \cdot L}{r(\sin(\theta + d\theta) - \sin\theta)} \quad (6)$$

$$Y_i = \int_0^{\pi/2} \frac{\mu(\cos\theta - \cos(\theta + d\theta))}{n \cdot l_i} \quad (7)$$

$$Y_a = \int_0^{\pi/2} \frac{\mu(\cos\theta - \cos(\theta + d\theta))}{n \cdot l_a} \quad (8)$$

위의 식들로부터 그림 3에 해당하는 각 요소의 값들을 구해낼 수 있다. 단, 자기회로법을 이용하기위해서 재질의 특성을 선형적이라 가정하기로 한다.

## 3. 결 과

유도된 식들을 이용하여 그림 3의 회로를 구성하여 회로를 해석하면 지로를 지나는 자속량을 구해낼 수 있다.

횡축자속량(자기회로법)

0.225 mWb

제시한 자기회로법을 검증하기 위하여 FEM 해석을 이용하여 자속총량을 예측하였다. 그림 4 을 통해 자속이 회전자와 횡축방향으로 가로지는 것을 볼 수 있다. 또한 성층된 회전자부분에서는 자속이 쉽게 비자성체부분을 통과하지 못하고 성층을 따라 상하로 이동하며 회전자의 성층을 지남을 알 수 있다.

그림 5 의 그래프는 직축과 횡축 여자시 공극에서의 자위를 보여준다. 이를 통해 자속량을 구해낼 수 있으며 그 값은 다음과 같다.

횡축자속양(FEM) 0.23 mWb

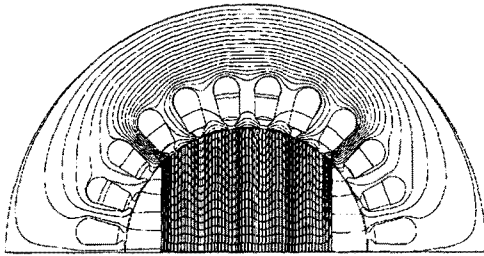


그림 4 SRM의 횡축자속

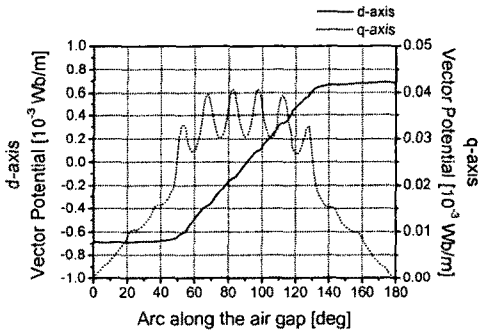


그림 5 FEM을 통한 공극에서의 자위

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자기회로법을 이용하여 동기리턴스전 동기 해석을 하였다. 동기리턴스 전동기의 토크는 직축과 횡축의 인덕턴스차로 인한 에너지변화로 발생하므로 직축과 횡축의 인덕턴스를 산출하는 것이 가장 중요하다. 직축의 인덕턴스는 고정자에서 발생한 자속이 회전자의 성층한 방향으로 회전자를 지나므로 쉽게 산출할 수 있으나 자속이 회전자의 성층방향과 직교하여 발생할 때는 자속의 경로를 파악하여 적절한 자기회로 파라미터를 산정이 필요하였다. 본 논문에서는 직축 인덕턴스 산출은 생략하여 횡축 인덕턴스만을 산정하였다. 횡축 인덕턴스 산정은 해석모델에 대한 자기회로를 구성하여 가능하였다. 그 결과 본 논문에서 제시한 자기회로법에 의한 인덕턴스 산정은 FEM 결과와 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 자기회로법을 이용한 해석시 재질의 비투자율 산정에 따라 해석결과가 달라지므로 비선형 재질을 고려한 방법에 대한 연구가 더욱 이루어져야 할 것으로 사료하며, 보다 정확한 값을 얻기 위해서 슬롯치의 형상과 회전자의 전체 성층넓이와의 관계 그리고 횡축여자시 누설성분에 대한 보상계수에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] I. Boldea, Z.X. Fu, S.A. Nasar, "Performance Evaluation of Axially-Laminated Anisotropic(ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors", Record of IEEE-IAS, part I, pp. 212-218, 1992
- [2] P. P. Ciufo, D. Platt, B. S. P. Perera, "Magnetic Circuit of a Synchronous Reluctance Motor", Proceedings of the Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), September 1994.
- [3] F. N Isaac, A. A. Arkadan, A. El-Antably, "Characterization of Axially Laminated Anisotropic Rotor Synchronous Reluctance Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.3 September 1999.
- [4] James M. Kokernak, David A. Torrey, "Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched-Reluctance Machine", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.36, NO.2,MARCH 2000.
- [5] Takayoshi Matsuo, Thomas A Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.9, No.2, June 1994.
- [6] Don Platt, "Reluctance Motor with Strong Rotor Anisotropy", IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.28, NO.3,MAY/JUNE 1992.
- [7] Vernon B. Honsinger, "The Inductance  $L_d$  and  $L_q$  of Reluctance Machines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS 90, NO.1, JANUARY/FEBRUARY 1971.
- [8] I.Marongiu, A. Vagati, "Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine", Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp.238-243, 1991.
- [9] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD 1996.