

동가 자기 회로를 이용한 단상 유도형 동기 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구

하승형, 이지영, 홍정표, 남혁*, 강규홍**
창원대학교 전기공학과, LG전자(주)*, 모터넷(주)**

A Study on Inductance calculation of Line start Synchronous Reluctance Motor using Equivalent Magnetic Circuit Method

Seung-Hyoung Ha, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Hyuk Nam*, Gyu-Hong Kang**
Changwon National University, LG Electronics*, Motor-net*

Abstract - The inductance is an important parameter in order to analyze steady state of LSRM (Line-start Synchronous Reluctance Motor). If FEM(Finite Element Method) is used to compute the parameter according to the change of flux barriers and conductor bars, less analysis time is required. Therefore, this paper adopts equivalent magnetic circuit method to simply calculates inductance, and the result is verified by comparing with the results by FEM.

1. 서 론

단상 유도형 동기 릴럭턴스 전동기(Line-start Synchronous Reluctance Motor, LSRM)는 기동 시에는 2차측 도체바에 의해 유도기동이 되고, 정상운전 시에는 자속 장벽에 의해 만들어지는 d-q축 인덕턴스 차이에 의해 동기속도로 운전되므로 회전자의 도체바와 자속 장벽에 영향을 받는 인덕턴스는 LSRM의 특성에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 전동기 초기 설계 시 도체바와 자속장벽의 변화에 따라 유한 요소 해석을 이용한 특성 해석을 수행한다면, 많은 모델링과 해석시간을 필요로 하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 LSRM 초기 설계 시, 도체바의 개수와 형상 및 자속 장벽의 개수에 영향을 받는 인덕턴스를 산정하기 위해 등가자기회로법을 이용하였다. 이는 해석 시간이 짧을 뿐 아니라, 복잡한 전처리 작업을 수행해야하는 유한요소 해석법 대신, 주요 설계 변수부분을 퍼미언스에 의해 함수화하여 사용할 수 있으므로 설계 변수의 변화에 따른 파라미터 산정을 빠르게 진행할 수 있다.

본 논문에서는 이상의 접근법을 검토하기 위하여, 복잡한 구조의 LSRM에 대한 인덕턴스 산정을 직접적으로 보이는 대신, 이를 간략화 시킨 모델을 이용하여 접근 방법을 먼저 쉽게 설명하고, 해석 결과의 신뢰성을 검토하기 위해 유한요소 해석과 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1 자기회로 해석 이론

동가 자기 회로를 이용한 자계 회로의 해석은 기본적으로 전기회로의 음의 법칙과 동일한 이론을 가진다. 식(1)은 전기회로의 음의 법칙을 나타내고 있으며, 식(2)는 이와 대응되는 자기회로의 방정식을 나타내고 있다. 식(2)를 이용해서 자속을 식(3)과 같이 자기저항의 역수인 퍼미언스와 기자력으로 나타낼 수 있다.

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

$$F = \Phi \cdot R_m \quad (2)$$

$$\Phi = P \cdot F \quad (3)$$

위의 식(1), (2), (3)에서 V , I , R , F , Φ , R_m , P 는 전위, 전류, 저항, 기자력, 자속, 자기저항, 퍼미언스를 나타내고 있다. 그림 1은 등가자기회로의 구조이다.

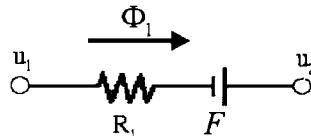


그림 1. 등가자기회로

그림 1에서 u_1 , u_2 는 node에서 자기 포텐셜을 나타내며, 식(4)와 같은 노드 방정식으로 자속을 구할 수 있다. 그리고 자로의 단면적으로부터 자로의 자속밀도를 계산할 수 있다.

$$\Phi_i = P_i \cdot (U_i - U_2 \pm F) \quad (4)$$

$$\sum_i \Phi_i = 0 \quad (5)$$

$$[P] \{U\} = \{F\} \quad (6)$$

해석할 모델의 각 절점에서 자속의 연속조건인 식(5)을 적용해서 각 절점에서의 방정식을 수립하고 이를 바탕으로 식(6)의 시스템 매트릭스를 구성한다. 그리고 영 자위를 갖는 경계조건을 적용시켜서 각 요소의 자위를 계산함으로써 각 절점의 자속량을 산정 할 수 있다.

2.2 해석 대상 및 해석 모델

아래 그림 2(a)는 도체바 34개 자속장벽은 3개를 가지는 LSRM의 1/4모델을 나타내고 있으며, M과 A는 주권선과 보조권선을 표현한 것이다. 그림2(b)는 이 LSRM을 등가자기회로로 표현한 것이다. R_{airgap} , R_{bar} , $R_{barriers}$ 는 공극자기저항, 도체바 자기저항, 자속장벽 자기저항을 표현한 것이고 기자력은 NI로 각 치 부분에 인가하였다. 그림 3(a)는 복잡한 LSRM의 구조를 간단하게 표현한 구조로 고정자 부분은 권선을 감을 수 있도록 치 슬롯 구조로 되어 있으며, 회전자 부분은 유도기와 같은 구조로 도체바가 삽입된 형태를 나타내고 있다. 이 모델에서 자속 장벽은 해석 모델을 간단히 하기 위해 생략 하였다.

2.2.1 해석 대상 적용

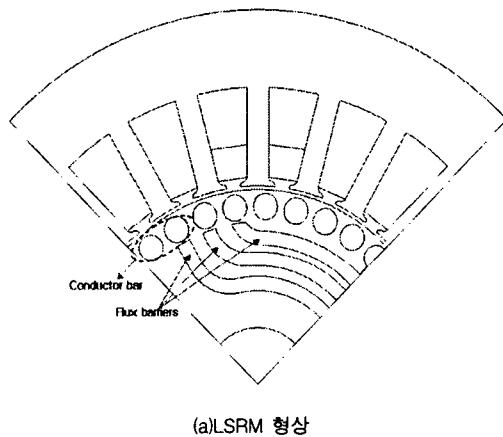
해석 대상을 등가자기회로로 표현하고 해석하기 위해서는 먼저 해석 모델의 자속 경로를 파악해야한다. 그런

후 경로에 있는 요소의 자기저항과 구동함수를 이용하여 자기 회로를 구성해야 한다. 그리고 각 절점에서 자속의 연속 조건을 이용하여 전압 방정식을 만들어 시스템 매트릭스를 구성하고 이 매트릭스를 풀어서 각 절점에서의 자위를 구한다. 그런 후 자위를 식(4)에 대입함으로써 각 절점에서의 자속량을 계산할 수 있다.

그림 3(b)는 해석 대상을 등가자기회로로 표현한 것으로 계산의 편의를 위해 자속 경로에 있는 요소의 자기저항을 퍼미언스로 표현하였고 구동함수는 고정자 권선에 의한 기자력을 치 부분에 인가하였다. 그리고 각 퍼미언스 사이의 절점에 번호를 부여하여 등가자기 회로를 완성하였다. 그림 3(b)의 등가자기회로에서는 슬롯부분의 누설자속과 Fringing 자속은 고려하지 않았다. 그림 3(b)에서 치 부분의 퍼미언스는 9~15번까지이고 공극부분은 18~24번까지 번호를 부여하였다.

2.3 해석 결과 비교

등가자기회로를 이용한 결과와 유한요소해석결과를 비교하기 위해서 공극부분과 치부분의 자속밀도를 비교하였다. 그리고 그 자속밀도로 단면적을 고려해 자속을 구하고 인더턴스를 계산하여 비교하였다.



(a)LSRM 형상

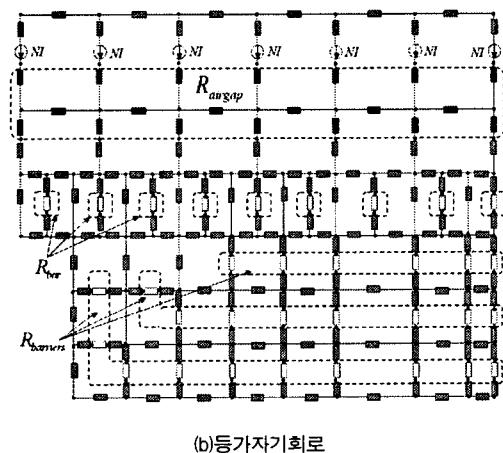


그림 2. LSRM 모델의 형상

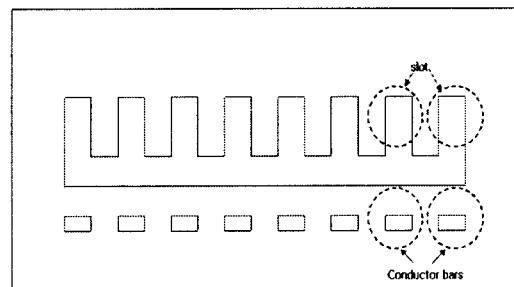
A. 자속 밀도 비교

그림 3(b)와 같이 등가 자기 회로를 완성한 후 시스템 매트릭스를 계산하여 유한요소를 이용해 구한 공극부분의 자속밀도와 치부분의 자속밀도 값을 비교해 보았다. 그림 4(a)와 그림 5(a)는 등가 자기 회로를 이용하여 공극 부분의 자속 밀도 값과 치 부분의 자속밀도를 구한 것이다. x축은 퍼미언스 번호이고 y축은 각 퍼미언스의 자속밀도 값을 나타내고 있다. 그림 4(b)와 그림 5(b)는 유한요소를 이용하여 공극 부분의 자속밀도 값과 치부분의 자속밀도를 구한 것이다. x축은 모델의 치수를 나타내며, y축은 자속밀도를 나타내고 있다.

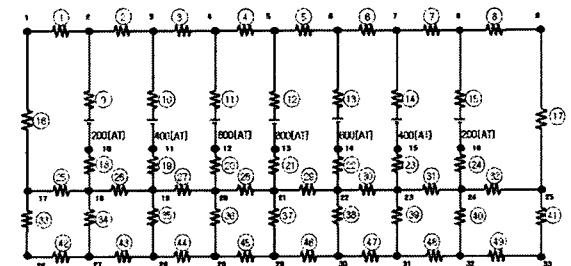
표 1에서 유한요소해석을 한 결과를 100%로 했을 때 등가자기회로를 이용한 결과가 공극부분에서는 99.9%이고 치부분에서는 100.2%로 거의 유사한 것을 알 수가 있다. 등가 자기회로는 슬롯누설을 고려하지 않았기 때문에 공극부분의 총 자속밀도와 치부분의 총 자속 밀도가 같았고, 유한요소해석을 이용한 결과에서는 슬롯누설 때문에 치부분의 총 자속밀도가 공극부분보다 작게 나온 것을 알 수 있었다.

표 1. 그림4, 5의 총 자속밀도비교

	Total airgap fluxdensity	Total teeth fluxdensity	단위
등가자기회로	1.9528(99.9%)	1.9528(100.2%)	[Wb/m ²]
유한요소해석	1.9542(100%)	1.9493(100%)	[Wb/m ²]



(a)간략화한 형상



(b)등가자기회로

그림 3. 간략화 시킨 해석 모델의 형상

B. 인덕턴스 비교

동가자기회로를 이용하여 인덕턴스를 구하기 위해서 치부분의 자속, 치부분의 기자력, 인가전류를 식(7)에 대입하여 인덕턴스를 구하였다.

유한요소해석을 이용하여 인덕턴스를 구하기 위해서 각 코일에 쇄교하는 자속량을 구하고 그 쇄교자속을 식(8)에 대입하여 인덕턴스를 구하였다.

$$L = \frac{Ni\Phi}{i^2} = \frac{F \times \Phi}{i^2} \quad (7)$$

$$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\lambda}{i} \quad (8)$$

유한요소해석으로부터 산정한 코일에 쇄교하는 자속량은 표 2와 같고 이를 중첩하여 식(8)을 이용하여 계산한 인덕턴스와 동가자기회로를 이용하여 인덕턴스를 계산한 결과를 표 3에서 비교했을 때 거의 같은 것을 확인 할 수 있었다.

해석시간은 표 4에서 비교했을 때 자속량을 산정하는데 걸리는 시간은 유한요소해석을 이용한 경우가 등가자기회로를 이용한 경우보다 30배 더 길게 나타났다. 또한 해석모델의 치수가 달라질 경우 유한요소해석은 다시 모델링을 하여 요소분할을 해석해야하지만 등가자기회로는 형상의 치수에 대한 퍼미언스만 계산하면 되므로 유한요소해석에 비해 시간을 많이 줄일 수 있다.

표 2. 코일에 쇄교하는 자속

Coil Number	쇄교자속[wb]
1	0.391
2	0.343
3	0.245
4	9.84×10^{-2}

표 3. 회로 전체 인덕턴스

	인덕턴스[H]
등가자기회로	0.1076
유한요소해석	0.1077

표 4. 해석시간

	해석시간(sec)
등가자기회로	0.1
유한요소해석	3

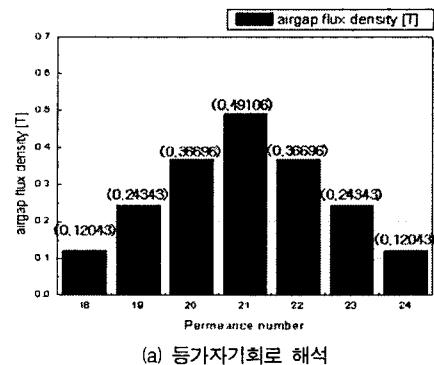
3. 결 론

본 논문에서는 LSRM의 초기 설계시 도체바와 자속장벽과 같은 설계변수에 따라 인덕턴스를 빠르게 산정하기 위해서 등가자기회로를 이용하는 방법에 대하여 검토해 보았다. 해석모델은 LSRM모델을 간단히 표현한 것으로 실제 모델과는 차이가 있지만 등가자기회로를 이용하여 인덕턴스를 산정 하는 것이 유한요소를 이용하여 인덕턴스를 산정하는 것과 거의 오차가 없음을 확인 할 수 있었다. 그리고 해석시간에 있어서도 등가자기회로를 이용했을 때가 유한요소해석을 이용했을 때보다 훨씬 적은 시간으로 자속량을 산정할 수 있었다.

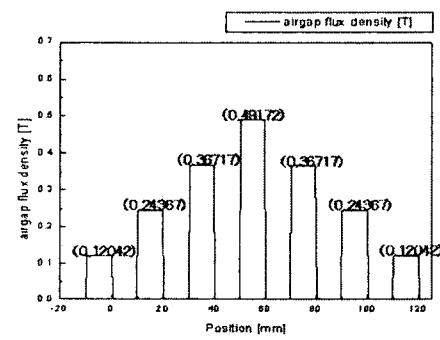
[참 고 문 헌]

- [1] Jarmo Perho, "Reluctance Network for Analysis Induction Machines", *Electrical Engineering Series No.110*, Helsinki University of Technology, December, 2002
- [2] C.B.Rasmussen, E. Ritchie, "A Magnetic Equivalent Circuit Approach for Predicting PM Motor Performance," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.10-17, October, 1997

[3] 남혁, 홍정표, 엄재부, 정태욱, "Line-start SynRM의 기동 특성 개선을 위한 자기회로 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.711-713, 2003

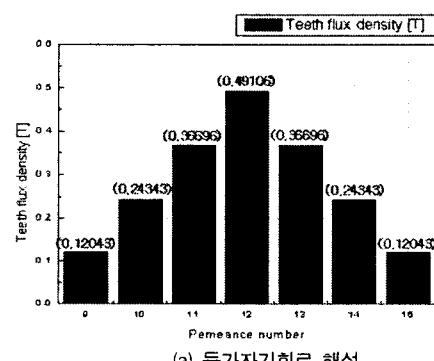


(a) 등가자기회로 해석

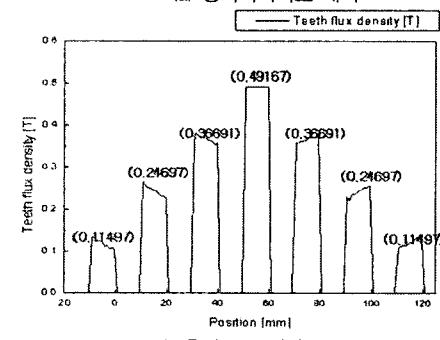


(b) 유한요소해석

그림 4. 공극 자속밀도 비교



(a) 등가자기회로 해석



(b) 유한요소 해석

그림 5. 치 자속밀도 비교