

## 자기회로의 비선형성을 고려한 SRM의 운전 특성 해석

최경호\*, 백원식\*\*, 김동희\*\*, 김민희\*\*\*  
 \*경북전문대학, \*\*영남대학교, \*\*\*영남이공대학

### A Operation Characteristic Analysis of SRM with Nonlinear Magnetic Circuit Effect

Kyeong-Ho Choi\*, Won-Sik Baik\*\*, Dong-Hee Kim\*\*, Min-Huei Kim\*\*\*  
 \*Kyungbuk College, \*\*Yeungnam University, \*\*\*Yeungnam College of Sci. & Tech.

#### ABSTRACT

This Paper analysis variable characteristics of inductance profiles and basic magnetic fields for Switched Reluctance Motors(SRM). The varying Inductance and flux linkage on operating control condition are very important for developing control algorithm and SRM accurate drive system. Therefore, we have analytical model for varying inductance and flux linkage with simulation and experimental method, and to find an analytical expression for the SRM coenergy. There are shown some good results that comparison of simulated and analytical inductance, flux linkage and current waves.

#### 1. 서론

Switched Reluctance Motor (SRM)는 비교적 간단한 자기적 성질의 고정자와 회전자가 돌극형 구조를 가지는 것이다[1]. SRM의 특징으로는 제작 및 유지보수가 용이하며, 넓은 운전영역에서 효율이 높고, 회전자의 위치각에 따라 인덕턴스와 전류의 변화에 의해 토크를 발생하며, 다른 전동기와는 달리 자기 회로가 높은 영역에서 동작되므로 인덕턴스가 기자력과 회전자의 위치각에 따라 비선형적으로 변화한다. 운전특성으로는 크게 점호각과 구간을 토크에 따라 제어하는 방법과 전류를 초평하여 속도를 제어하는 방법이 있다. 최근 이러한 특성을 정밀전동기 제어 시스템에 이용하기 위한 제어 알고리즘 개발이 활발히 이루어지고 있다[1]. 최적의 제어 알고리즘과 시스템을 개발하기 위해서는 SRM의 특성을 먼저 분석하여 결과를 예측 할 수 있는 전동기의 적절한 특성자료가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 산업용 정밀제어 시스템에 적용하기 위하여 실험용으로 개발 제작된 1[hp] SRM의 실제 운전특성을 파악하기 위한 연구로, 자기 포화를 고려한 인덕턴스의 변화상태를 해석하였으

며, 발생 토크에 직접적으로 영향을 가져오는 회전자의 각 변화에 따른 인덕턴스 및 전류변화 상태를 측정하여 이 결과를 시뮬레이션 값과 비교하여 적정성을 검증하였다. 또한 전동기의 부하 가변시 전류변화, 인덕턴스 변화, 쇄교자속 및 Coenergy의 변화 상태를 검토하였다.

#### 2. SRM의 모델링 및 해석

##### 2.1 SRM의 모델링

그림 1은 연구 및 실험용으로 제작된 SRM의 형상으로서 고정자/회전자가 6/4극으로 이루어진 3상 300[V], 750[W], 3000[rpm]의 정격을 가지는 전동기의 구조이며, 표 1은 제작된 전동기의 제원이다.

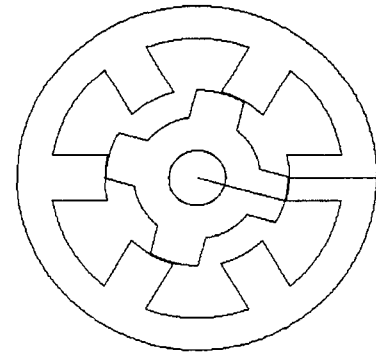


그림 1 6/4극 SRM의 구조  
 Fig. 1 Structure of 6/4 SRM

표 1 전동기의 제원  
 Table 1 Specification of SRM (단위 mm)

명칭	치수	명칭	치수
축경	75	고정자 외부 반경	46
회전자 외부 반경	200	고정자 내부 반경	58
회전자 내부 반경	287	회전자 극호	30.
회전자 극호	32.	극수	6
극수	4	공극	0.3
상수	3	Steel	S-18
철심장 길이	57	슬롯단면적	410mm <sup>2</sup>

## 2.2 인덕턴스 측정

SRM의 인덕턴스 측정은 상용주파수에서 AC전압을 인가하여 식(1)에 의하여 계산한다[2]. 전류를 0~2.4[A]까지 0.4[A] 스텝과 정렬상태에서 비정렬 상태까지 회전자를 4도 단위로 이동시키면서 측정하였다.

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V_{ac}}{I_{ac}}\right)^2 - R^2} \quad (1)$$

여기서, f는 주파수, Vac 와 Iac는 입력전압 및 전류, R는 권선저항이다.

## 2.3 FEM에 의한 해석

SRM의 운전특성을 고려하여 인덕턴스의 해석을 전류 최대치까지 올려서 FEM으로 해석하였으며, 해석은 FLUX-2D를 활용하였고, 각각의 회전자를 1도씩 이동 시켜 정렬에서 비정렬위치까지 수행하였다[3]. 그림 2는 회전각과 전류변화에 따른 인덕턴스 변화를 나타내었으며, 그림 3은 전류가 일정할 때 회전자에 대한 인덕턴스 변화를, 그림 4는 회전각이 일정할 때 전류에 따른 쇠교자속을 나타낸다.

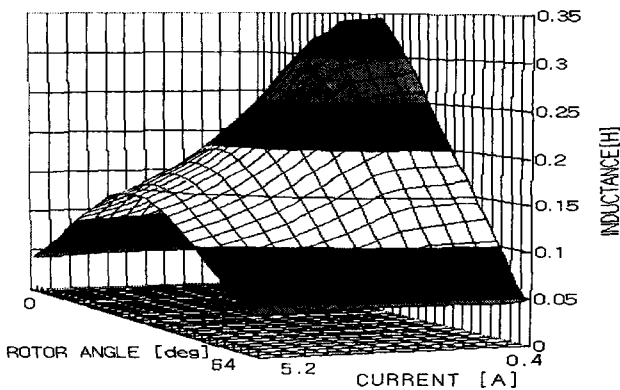


그림 2 회전각과 전류변화에 따른 인덕턴스 변화  
Fig. 2 Various inductance with varied rotor angle and current

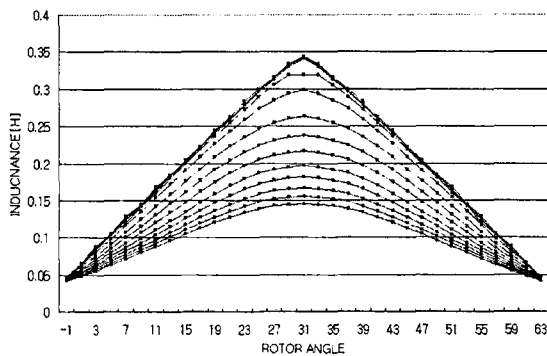


그림 3 회전에 따른 인덕턴스 변화  
Fig. 3 Various inductance with rotor angle

## 2.4 측정치와 해석값의 비교

그림 5에서 보여준 것처럼 인덕턴스의 실측치와 해석치가 거의 일치함을 알 수 있었다. 실제 전류의 피크치는 5[A] 이상이 되나 전동기 권선의 소손을 방지하기 위하여 여기서는 두가지 경우에만 측정하였다.

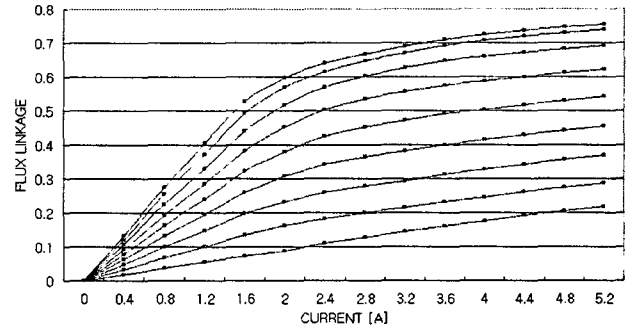


그림 4 회전각과 전류에 따른 쇠교자속  
Fig. 4 Flux linkage versus rotor angle and current

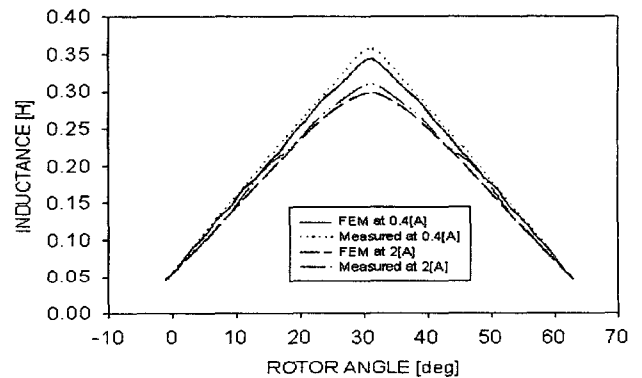


그림 5 인덕턴스 측정치와 해석치 비교  
Fig. 5 Comparison of measured and analytical inductance

## 3. 시뮬레이션 및 고찰

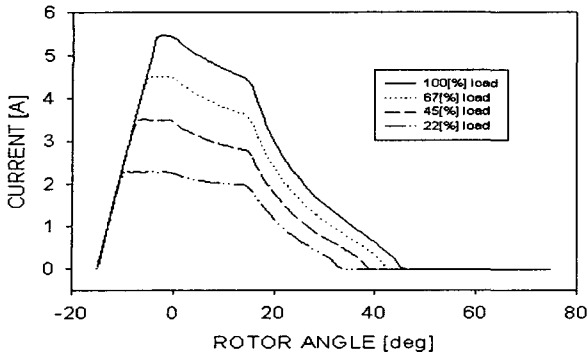
SRM의 전압 및 토크 방정식을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 토크 계산을 위해 활용된 인덕턴스는 해석을 통해 얻어진 결과를 적용하였다.

스위칭 시점은 Turn\_on 각을 -15°, Turn\_off각은 15°로 일정하게 두고 정격, 67%부하, 45%부하, 22%부하에서 각각 시뮬레이션 하였다. 그림 6의 (a)는 회전자 각도에 따른 전류파형, (b)는 전류에 변화에 따른 자속쇄교 및 Co-energy변화, (c)는 회전자 각도에 따른 인덕턴스 변화량을 보여준다. 그림 7은 정격에서 회전자 각도변화에 따른 인덕턴스 변화로서 시뮬레이션 값과 FEM 해석치를 비교하고 있다. 시뮬레이션은 히스테리시스 전류제어방식의 경우에 대해서 수행하였다.

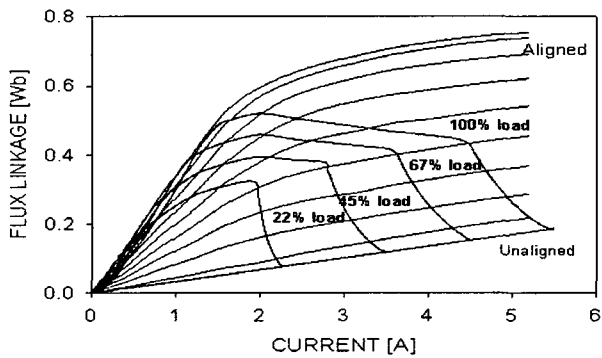
## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 실험결과

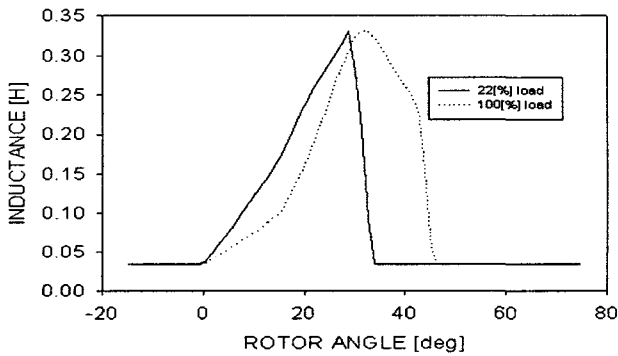
시뮬레이션을 통해 얻어진 결과의 비교를 위해 실험을 수행하였다. 시스템은 기본적인 정류회로와 비대칭 브리지 컨버터, 그리고 히스테리시스 전류 제어기 및 전류 (commutation) 제어기로 구성되어 있다. 그림 8~11은 시뮬레이션과 실제 측정에서 얻어진 전류파형의 비교를 보여 주고 있다. 그림 8은 부하율 10[%]에서 1,000[rpm]일 때 시뮬레이션에 의하여 얻어진 전류파형이며, 그림 9는 실측 전류파형이다. 그림 10은 부하율 20[%]에서 2,000[rpm]의 시뮬레이션에 의한 전류파형이며, 그림 11은 실측파형을 보여주고 있다.



(a) 전류파형



(b) 쇄교자속



(c) 인덕턴스 파형

그림 6 히스테리시스 전류방식  
Fig. 6 Hysteresis current control method

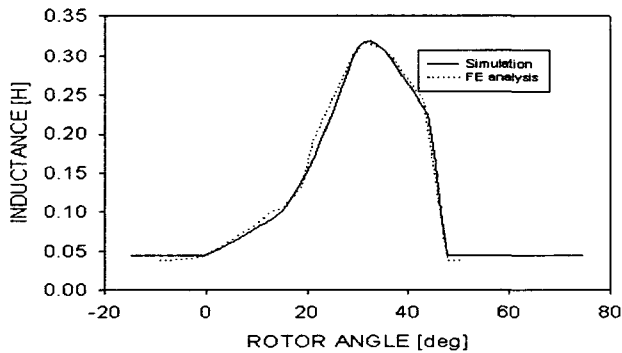


그림 7 인덕턴스 파형 비교  
Fig. 7 Comparison of inductance profile

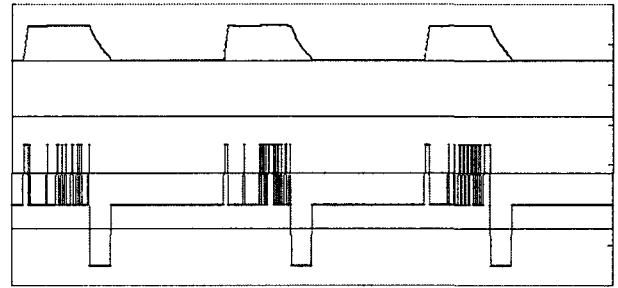
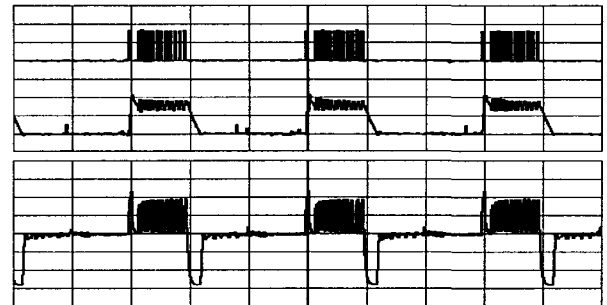


그림 8 시뮬레이션에 의한 전압과 전류파형  
Fig. 8 Simulated phase voltage and current wave



(X=0.5ms/div, Y=2.5V/div, 2A/div, 150V/div)  
그림 9 측정된 게이트 신호와 상전압 및 상전류 파형  
Fig. 9 Measured gate signal, phase voltage and current wave at 1,000[rpm]

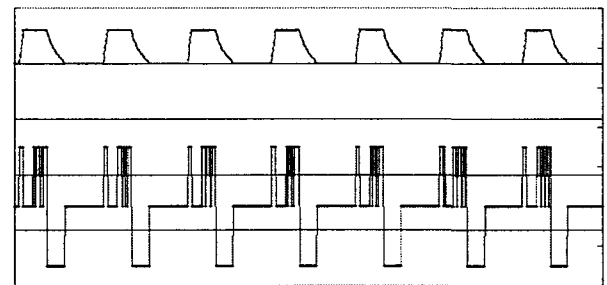


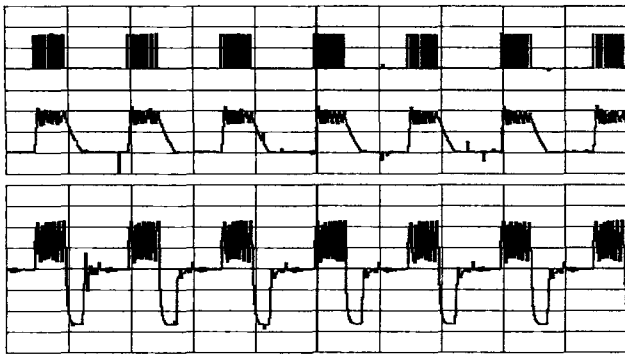
그림 10 시뮬레이션에 의한 전압과 전류파형  
Fig. 10 Simulated phase voltage and current wave

## 5. 결론

본 연구에서는 SRM의 동작특성을 연구하기 위한 중요한 인덕턴스의 산정 및 적용방법에 대해서 검토하였다. 전동기의 모델은 1[Hp], 3,000[rpm] 6/4극 전동기로 하였으며, 전동기의 정확한 특성을 연구하기 위해서 실제 인덕턴스를 측정과 해석을 통하여 구한 결과를 비교 검토하였다. 또한 전동기의 동특성을 얻기 위해 전압-토크 방정식을 적용하여 시뮬레이션을 한 인덕턴스의 이상적인 값과 실제의 특성 값을 비교하였다. 실제 실험에서 얻어진 결과 값과 비교하여 타당성이 입증되어 SRM 제어 시스템 개발에 있어 자료로 이용함이 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] T.J.E Miler, *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford University Press, 1993
- [2] S.S. Murthy, Bhim singh, Virendra Kumar Sharma "A Frequency Response Method to Estimate Inductance Profile of Switched Reluctance Motor ", IEEE, 1997
- [3] H.H.Moghbelli, G.E.Adams and R.G.hoft, " Prediction of the Instantaneous and steady state torque of the Switched Reluctance" IEEE, IAS. Val.1. 1988
- [4] 김건우, 원충연, 최경호의 "가변 히스테리시스 제어에 의한 SRM의 토크 리플 저감에 관한 연구" 대한전기학회 춘계학술대회. 1999
- [5] 차현록, 김현덕, 장도현의 "최대토크/효율 및 최소토크 오크 맥동의 스위칭각/전압에 의한 SRM운전", 전력전자 학회 논문지, vol.5. no.4. 2000. ppn309-317
- [6] Arthur Radun, "Analytical Calculation of the Switched Reluctance Motor's Unaligned Inductance". IEEE. Transactions on magnetics, vol 35. no.6. November 1999



(X=0.5ms/div, Y=2.5V/div, 2A/div, 150V/div)

그림 11 측정된 게이트 신호와 상전압 및 상전류 파형  
Fig. 11 Measured gate signal, phase voltage and current wave at 2,000[rpm]

## 4.2 결과검토

SRM의 시뮬레이션은 전동기가 회전하고 있을 때, 적용되는 실제의 인덕턴스를 인가하기 위해서 인덕턴스를 각각의 전류에서 해석하여 그 값을 적용하였다. 시뮬레이션 방정식은 전압, 토크 방정식으로 얻을 수 있었으며, 그 결과는 그림 8과 10에서 부하율 10[%], 1,000[rpm]과 20[%], 2,000[rpm]에서 보여주고 있으며, 시뮬레이션 결과는 그림 9와 11과 같이 측정된 전류파형과 유사함을 검증할 수 있었다. 또한 본 연구는 위와 같이 실제 인덕턴스를 적용했을 때 각 부하율에 따른 전류파형과 자속 쇄교 및 인덕턴스 변화를 구하였다. 그림 12는 이상적인 인덕턴스를 적용했을 때와, 실제 인덕턴스를 적용했을 때의 비교 파형을 보여주고 있다.

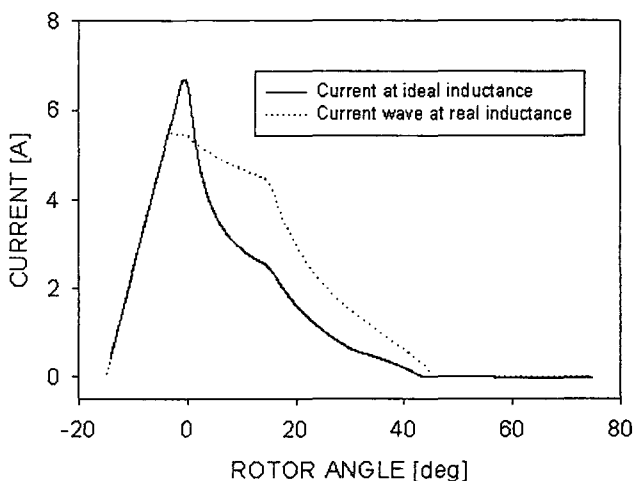


그림 12 이상적인 인덕턴스 적용시와 실제 인덕턴스 적용시 전류 파형 변화 비교

Fig. 12 Comparison of calculated current at ideal inductance and actual inductance