

## 단상 스위치드 릴럭턴스 모터에 설치된 영구자석 기동장치의 디텐트 토크

김준호<sup>1</sup>, 이승민<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> (주) LS산전 EV전력제어 Solution팀

<sup>2</sup> 충남대학교 전기전자통신공학교육과

### Detent Torque of Parking Magnet Starting Device Installed in the Single-Phase Switched Reluctance Motor

Jun-Ho Kim<sup>1</sup> and Seung-Min Lee<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> EV Power Control Solution Team, LS Industrial Systems Co., Ltd, Cheongju 361-720, Korea

<sup>2</sup> Electric, Electronics and Communication Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received March 29, 2010; Revised April 12, 2010; Accepted April 21, 2010)

**Abstract:** The single-phase switched reluctance motor(SRM) generates the positive torque in the restricted section. So, it can not started by itself and the torque ripple is heavier than poly-phase. For self-starting and fixing rotating direction, the rotor should be placed at the rising inductance slope when stationary. The parking permanent magnet locates the rotor in the fixed position, which can be started by it-self. It is very simple and cost effective but has some drawbacks. It affects the rotor during the operation, so the characteristics of motor, such as a torque, speed, and ripple are changed to go bad. This paper presents the detent torque of parking magnet starting device through the finite element analysis and experiments. The finite element analysis is performed at incremental rotor positions over one detent torque cycle for any one pole. The prototype, fabricated in the previous research, is used for the experiments. The inductance, instant torque, and detent torque are calculated using the terminal voltage and phase current. Finally, the finite element analysis result and the experiment result are compared for analysis and validity.

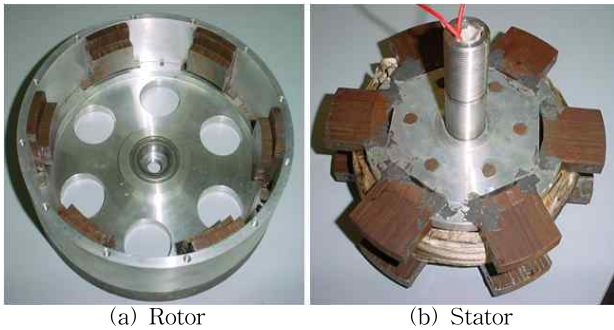
**Keywords:** Detent torque, Parking magnet, Single-phase, Starting device, Switched reluctance motor

#### 1. 서 론

단상 스위치드 릴럭턴스 모터는 구조가 간단하고 튼튼할 뿐만 아니라, 구동 장치도 1개 또는 2개의 스위칭 소자만이 필요로 하기 때문에 경제성이 뛰어나다. 이런 뛰어난 경제성으로 가정용 전자제품이나 산업현장에서 쓰이는 팬 구동용 전동기에 응용이 가능하다 [1]. 그러나 토크 리플과 스스로 기동을 못하는

치명적인 단점을 가지고 있다. 기동 문제를 해결하기 위해서는 기동할 때 회전자를 기동이 가능한 지점에 위치시키는 기동장치가 필요하다 [2,3]. 영구자석 기동장치, 공극의 차이를 이용한 기동장치, 자기 포화를 활용한 기동장치, 보조 권선을 활용한 기동장치, 계단형 회전자 구조를 이용한 기동장치 등 단상 스위치드 릴럭턴스 모터를 위한 다양한 기동장치가 제시되었다 [4]. 그러나 이런 모든 기동장치들은 각각 단점을 가지고 있다. 가장 보편적으로 사용되는 영구자석 기동

a. Corresponding author; zbus@cnu.ac.kr



(a) Rotor (b) Stator

Fig. 1. Fabricated prototype. (a) rotor and (b) stator.

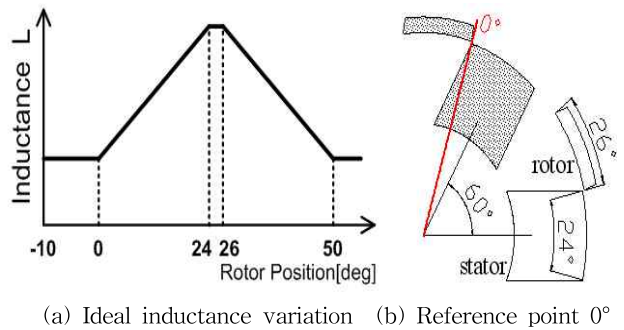
장치는 운전 중에도 영향을 미쳐 토크 리플을 증가시킨다 [5]. 다른 기동장치도 구조 복잡, 회전자 또는 고정자의 비대칭에 따른 토크의 불균형, 불충분한 기동토크에 따른 적용 부하의 제한, 효율 감소 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 단상 스위치드 릴럭턴스 모터에 설치된 영구자석 기동장치의 디텐트 토크를 구하였다. 디텐트 토크는 유한요소 해석과 실험을 통하여 각각 구하였다. 유한요소 해석은 한 극의 디텐트 토크 주기 동안 회전자의 위치를 변화시켜 가면서 실시하였다. 선행 연구에서 제작한 시작기를 포함한 실험장치를 제작하여 단자전압과 상전류를 측정하여 자화곡선을 계산하였다. 그리고 자화곡선과 가상 작업법(virtual work method)을 이용하여 디텐트 토크를 구하였다 [6]. 마지막으로 유한요소 해석과 실험을 통해 얻은 결과를 비교하여 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 최적화 설계에 대한 토대를 제공하였다.

## 2. 실험

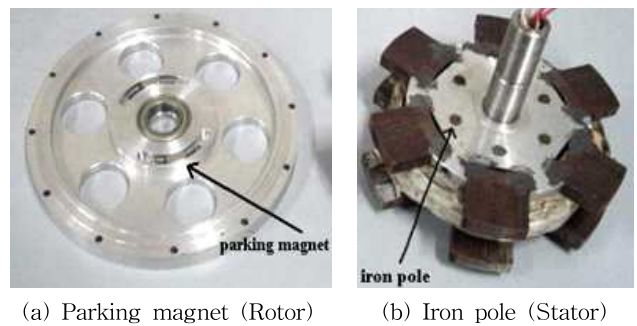
단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 시작기는 실링팬 또는 환풍기의 구동용으로 제작되었다 [7]. 시작기는 60° 간격으로 배치된 각각 6개의 고정자 극과 회전자 극이 있으며, 회전자 극호의 크기는 26°, 고정자 극호의 크기는 24°이다. 고정자 극은 단상여자 권선에 의해 동시에 여자된다. 그림 1은 제작된 시작기를 나타낸 것이다.

회전자 극과 고정자 극이 서로 접하기 시작하는 지점을 0°라고 가정하면, 시작기의 이상적인 인덕턴스 파형은 그림 2(a)와 같다. 그림 2(b)는 기본위치 0°를 나타낸 것이다.



(a) Ideal inductance variation (b) Reference point 0°

Fig. 2. Ideal inductance variation of starting device.



(a) Parking magnet (Rotor) (b) Iron pole (Stator)

Fig. 3. The parking magnet starting device of the prototype.

그림 3은 시작기에 설치된 영구자석 기동장치를 나타낸 것이다. 영구자석 기동장치는 회전자의 상부에 설치되어 고정자에 삽입된 쇠기둥과 서로 작용한다. 따라서 회전자는 정지할 때 항상 기동이 가능한 위치에서 정지하게 된다.

### 2.1 유한요소 해석에 의한 디텐트 토크

기동 위치를 그림 2(a)의 10°로 설정하고 유한요소 해석을 -20° ~ 40° 사이에서 회전자를 1°씩 증가시키면서 실시하였다. 프로그램은 Maxwell 3D V11.1을 사용하였다. 그림 4(a)는 회전자가 기동위치에 정지해 있는 3D 해석 모델을 나타낸 것이다. 그림 4(b)는 영구자석 정지장치의 2D 설계 모델을 나타낸 것이다.

그림 5는 유한요소 해석으로 얻은 영구자석 기동장치의 디텐트 토크이다. 디텐트 토크는 -20°, 10°, 40°에서 최소이고, 3°, 17°에서 최대임을 알 수 있다. + 디텐트 토크는 시작기의 토크를 증가시키고, - 토크는

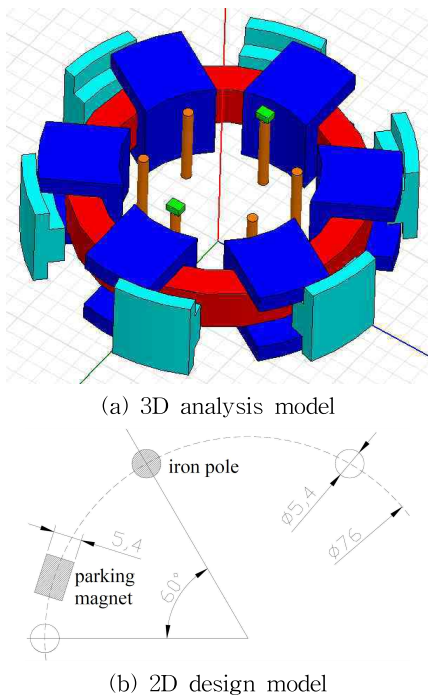


Fig. 4. Analysis model.

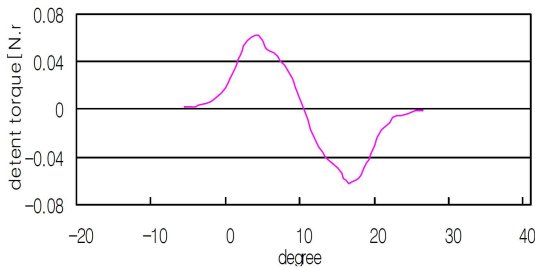


Fig. 5. Detent torque of parking magnet.

시작의 토크를 감소시켜 설계 모델의 토크 특성을 변화시키고 토크 리플을 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

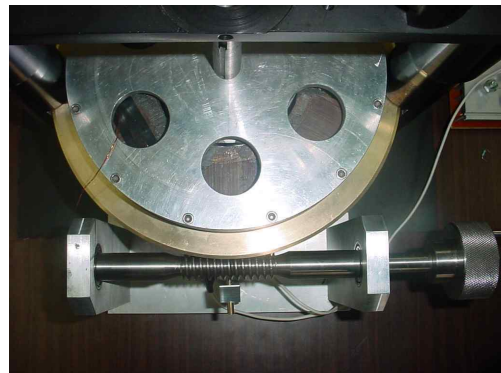
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자화곡선의 측정

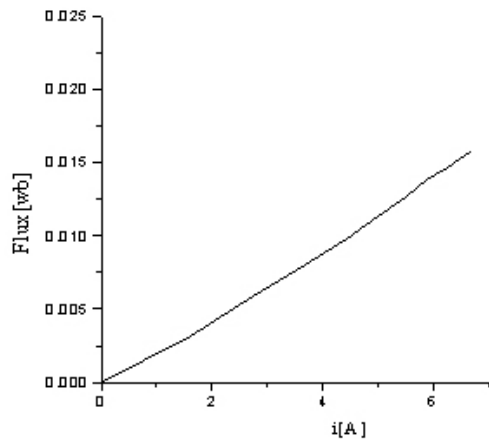
시작기의 자화곡선 측정을 위한 실험 장치는 그림 6 과 같이 시작기, 2대의 직류 전원 공급장치, 직류 전동기, 그리고 계측 장비로 구성되어 있다. 시작기에 DC 6 A를 인가한 상태에서 실험 장치의 상부에 설치된



Fig. 6. Experiment apparatus for measurement of magnetization curve.



(a) Experiment apparatus for measurement of flux linkage at the unaligned position



(b) Flux linkage at the unaligned position

Fig. 7. Experiment apparatus for measurement of flux linkage at the unaligned position.

직류 전동기로 시작기를 180 rpm으로 회전시킨다. 이때 발생하는 단자전압  $v$  와 상전류  $i$ 를 측정한다. 권선 저항  $R$ 은 여자 전류에 의한 열로 변화하지만 이 실험에서는 이를 무시하고 일정하다고 가정하였다.

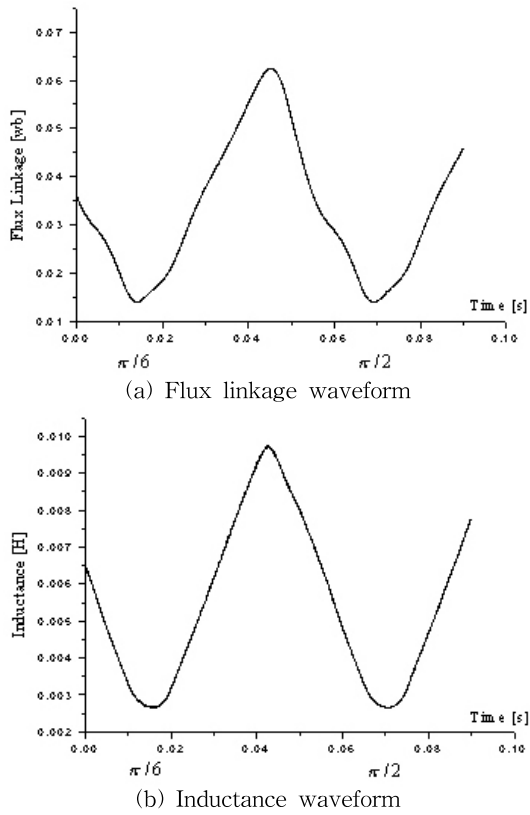


Fig. 8. Flux linkage waveform and inductance waveform.

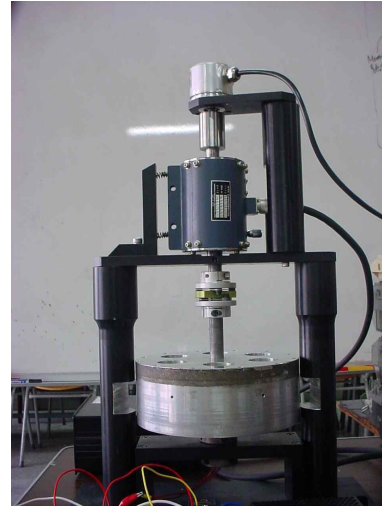
$$v = R + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$\Phi = \int (v - Ri) dt + \Phi_0 \quad (2)$$

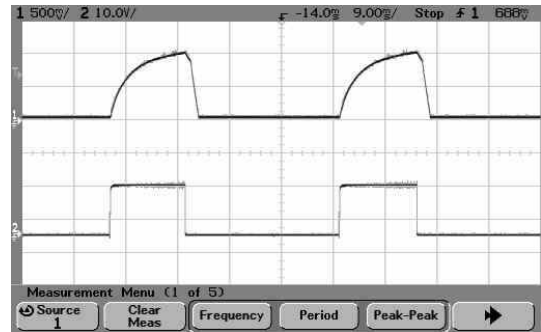
식 (1)은 스위치드 릴럭턴스 모터의 전압 방정식이다. 식 (2)는 식 (1)을 적분하여 쇄교자속  $\Phi$ 에 대하여 정리한 것이다 [8].  $\Phi_0$ 는 적분이 시작되는 쇄교자속의 초기 값이다. 식 (2)의 적분이 비정렬 위치에서부터 시작된다고 가정하면,  $\Phi_0$ 는 비정렬 위치에서의 쇄교자속 값이 된다.

그림 7(a)에서 보는 것처럼 회전자를 비정렬 위치에 고정시킨 상태에서 고정자 권선을 여자시키면서 단자전압과 상전류를 측정한다. 측정된 결과를 식(2)에 대입하여 계산하면 그림 7(b)와 같이 여자 전류에 따른 비정렬 위치에서의 쇄교자속을 얻을 수 있다. 그림 7(b)에서  $\Phi_0$ 는 0.014048 wb임을 확인할 수 있다.

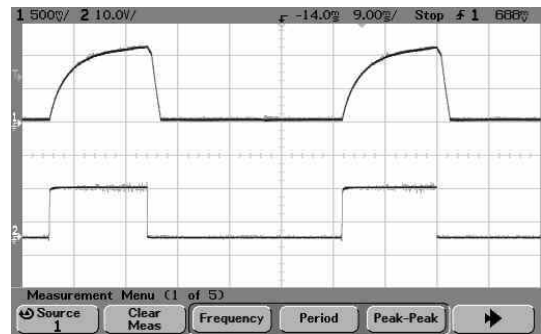
그림 8(a)는 시작기의 쇄교자속 파형이고, 그림 8(b)는 쇄교자속 파형과  $L = \Phi/i$ 를 이용하여 계산한 인덕턴스 파형이다.



(a) Experiment apparatus for measurement of exciting current



(b) Exciting current without parking magnet



(c) Exciting current with parking magnet

Fig. 9. Experiment apparatus for measurement of exciting current without parking magnet and with parking magnet.

### 3.2 디텐트 토크의 계산

그림 9(a)는 여자 전류를 측정하기 위한 실험 장치이다. 회전자 위치는 실험 장치의 상부에 설치된 업

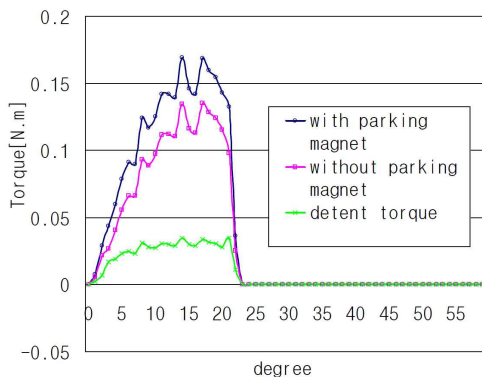


Fig. 10. Instant torque and detent torque of parking magnet.

설루트 엔코더로 감지하고, DSP는 위치 정보를 받아서 지정된 위치에서 스위칭 소자를 On/Off한다. 이 실험에서는  $0^\circ \sim 20^\circ$  구간에서 여자 전류 를 인가하였다. 그림 9(b), 9(c)는 영구자석의 유무에 따른 여자 전류의 파형을 나타낸 것이다.

그림 8(b)의 인덕턴스 파형과 그림 9(b), 9(c)의 여자 전류 파형, 그리고 식 (3)을 이용하면 시작기의 순간 토크를 계산할 수 있다. 영구자석 기동장치는 회전자에 부하처럼 작용을 한다. 따라서 그림 10에서 보는 것처럼 영구자석 기동장치가 설치된 경우의 순간 토크가 설치되지 않은 경우보다 크게된다. 그리고 두 순간 토크의 차이가 디텐트 토크가 된다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

#### 4. 결 론

단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 시작기에 설치된

영구자석 기동장치의 디텐트 토크를 유한요소 해석과 실험을 통하여 구하였다. 해석에 의한 디텐트 토크는 사인파와 유사한 파형을 보였다. 하지만 실험을 통해 얻은 디텐트 토크는 구형파와 비슷한 형태의 파형이다. 이처럼 두 결과가 다른 이유는 유한요소 해석에서는 회전축 방향으로 작용하는 영구자석의 디텐트 포스에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 또한 실험에서는 회전 관성에 의해 순간적인 변화가 불가능하여 즉각적인 순간 토크를 구할 수 없기 때문이다. 본 논문에서 얻은 결과는 향후 진행될 영구자석 기동장치의 최적 설계와 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 최적 설계에 기초 자료로 많은 도움이 될 것이다.

#### REFERENCES

- [1] J.-Y. Lim, Y.-C. Jung, S.-Y. Kim, and J.-C. Kim, *ISIE2001* **2**, 1393 (2001).
- [2] H. R. Bolton and D. A. G. Pedder, *IEE Conf Publ.* **179**, 88 (1987).
- [3] C. C. Chan, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **IE-34**, 95 (1987).
- [4] J. E. Fletcher, A. Helal, and B. W. Williams, *IEEE Trans. Energy Convers.* **21**, 848 (2006).
- [5] J.-H. Kim, E.-W. Lee, and J.-H. Lee, *IEEE Trans. Magn.* **43**, 1741 (2007).
- [6] R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns, and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **32**, 569 (1996).
- [7] J. H. Lee, Y. W. Oh, and E. W. Lee, *The Transactions of KIEE* **48B**, 316 (1999).
- [8] T. J. E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control* (Magma Physics Publishing and Clarendon Press-Oxford, Oxford, 1993) p. 189.