

## 가변속도 구동용 SRM의 최적운전을 위한 스위칭각 산정

최경호\*, 김남훈\*\*, 김민회\*\*, 백원식\*\*\*, 김동희\*\*\*, 황돈하\*\*\*\*

\*경북전문대학, \*\*영남이공대학, \*\*\*영남대학교, \*\*\*\*한국전기연구원,

### A Computing Switching Angle for Optimal Operation of SRM with Variable Speed Operation

Kyeong-Ho Choi\*, Nam-Hun Kim\*\*, Min-Huei Kim\*\*, Won-Sik Baik\*\*\*, Dong-Hee Kim\*\*\*, Don-Ha Hwang\*\*\*\*,

\*Kyungbuk College, \*\*Yeungnam College of Sci. & Tech., \*\*\*Yeungnam University, \*\*\*\*KERI

#### ABSTRACT

This paper presents a proper switching angle calculation method of Switched Reluctance Motor (SRM) for drill. The characteristic of SRM drive is very related to the scheduling of commutation angle and current waveforms. Therefore, a selection method of switching turn-on and turn-off angle is suggested for adaptational operation of SRM with varied rotor speed and load. Simulation and experimental results are presented for the validation of proposed method.

#### 1. 서 론

최근 산업에 응용되는 전동기 구동방식은 간접구동방식에서 직접구동방식으로 전환되는 추세에 힘입어 이에 대응되는 새로운 전동기에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 산업용 드릴에 적용되는 전동기의 경우 대상물의 재질이나 특성에 따라 속도를 다르게 하여야 하므로 과거에는 벨트나 기어를 사용하여 속도제어와 부하변동에 적응하는 시스템으로 구성되었으나, 최근에는 이러한 부가적인 기계장치 없이 직접 구동하는 방식으로 전환됨에 따라 작업공간의 확보와 속도가변을 위한 벨트 전환 등의 작업을 피할 수 있게 되었다.

견고성과 경제성 측면에서 많은 장점을 지닌 스위치드 릴럭턴스 전동기는 이러한 직접구동방식에 적합한 전동기 중의 하나로 고려되고 있다. SRM은 가변 릴럭턴스형 전동기로서, 스위칭 시점이나 전류의 파형에 따라 운전특성이 많이 좌우되므로, 최적운전을 위해서는 가변속도나 가변부하에 따른 적합한 제어기법이 요구된다<sup>[1]-[3]</sup>. 본 논문에서는 3단 속도로 운전되는 드릴용 SRM의 최적 운전을

위하여, 히스테리시스 전류 제어방식에 의하여 제어된 전류에 의해 발생하는 토크의 리플이 최소인 시점에서 턴오프 각을 결정한 후, 부하를 일정하게 두고 평균전류가 최소인 적정 턴온 각을 시뮬레이션을 통하여 결정할 수 있는 적정 스위칭 각 산정에 관한 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 히스테리시스 전류제어 모드로 수행한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

#### 2. SRM의 구조, 토크발생 및 제어

그림 1은 본 연구 및 실험에 사용된 SRM으로 고정자 /회전자가 6/4극의 돌극형으로 이루어진 3상 300[V], 750[W], 3000[rpm]의 정격을 가진 전동기로서 회전자 극호각 32°, 고정자 극호각 30°의 구조를 이루고 있으며, 기타 기계적인 치수는 그림에서 보여주고 있다.

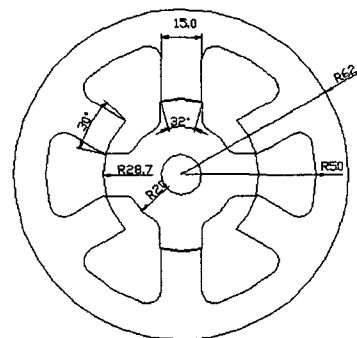


그림 1 SRM의 구조

Fig. 1 Structure of SRM

SRM 제어는 상권선에 인가되는 전압파형과 스위칭 신호 및 전류 파형에 따른다. 일반적인 운전 및 에너지 변환 등을 고려할 때 여자사의 상전류는 평탄한 형상이 적합하다. 이러한 전류값은 적절한

스위칭 각도의 조정 또는 전류제한을 위한 상전류 초핑에 의해 제어된다. 전류제어방식으로는 기준 전류값과 캐환된 순시 전류값을 비교하여 이에 따라 온-오프 하는 히스테리시스 전류제어가 가장 일반적인 방법이다. 이 경우 각 상에 흐르는 전류를 평활하게 흘려줄 수가 있기 때문에 토크 리플을 저감시킬 수 있는 장점이 있다.

### 3. 적정 스위칭 각의 선정

#### 3.1 적정 턴오프각 결정

적정 턴오프 각을 결정하기 위하여 회전수와 부하를 일정하게 두고 턴오프 각을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하여 토크 리플의 변화에 따른 특성을 고찰하였다. 턴오프 각을 크게 함에 따라 상여자의 공백에 따른 토크 뚱이 감소하였으나, 일정시점이 지날 경우 인덕턴스 감소시점에서 전류가 나타나게 되고, 이에 따라 부토크가 발생됨을 확인할 수 있었다. 드릴용 전동기 회전수 정격으로 많이 적용되는 1000, 2000, 3000[rpm]에서 토크 0.5, 1, 1.5, 2[Nm]의 경우에 턴오프 각을 변화시키면서 부토크가 발생하지 않는 시점까지의 적정 턴오프 각을 선정한다. 스위칭 각은 인덕턴스가 상승하는 시점을 0도로 하고 1상의 주기를 90도로 하였을 경우의 각도를 나타내고 있다.

그림 2는 1000[rpm], 1[Nm]에서 턴오프 각을 어드밴스각 9도로 일정하게 적용하고 턴오프 각을 17, 21, 25도로 변화시켰을 경우의 한 상의 전류와 인덕턴스를 나타내고 있다. 그림 3, 4, 5는 각각 턴오프 각이 17, 21, 25도일 경우의 토크 파형을 나타내었다. 그림 2로부터 턴오프 각을 크게 함에 따라 전류 소호시간이 길어짐을 확인할 수 있었다. 그림 3에서는 턴오프 각을 너무 앞당김에 따라 토크 뚱이 현저히 나타났으며, 그림 4의 경우에는 적절한 턴오프 각을 적용함에 따라 토크뚱이 줄어들고 최대 토크와 최소 토크의 차이도 줄어들음을 확인할 수 있었다. 그림 5의 경우에는 25도의 턴오프 각을 적용한 경우의 토크 파형으로써, 초기에는 두 상의 토크 중첩으로 출력 토크가 상승하였다가, 이후 역토크의 영향으로 감소함을 알 수 있었다. 그림 6은 드웰 각을 30도로 일정하게 두고 부토크가 발생하지 않은 스위칭 각에서 회전수와 부하를 각각 1000[rpm], 0.5, 1, 1.5, 2[Nm]으로 변화시킬 때 토크리플과 턴오프 각의 관계를 나타내었다. 토크 리플은 평균값에 대한 최대값으로 하였다. 그림 7은 부하와 회전수 변화에 따라 드웰각 일정제어 방식(24도~34도)으로 얻어진 결과들 중에서 부토크가 발생되지 않으면서 최소의 토크리플을 가지는 적정 턴오프 각을 선정하여 나타내었다.

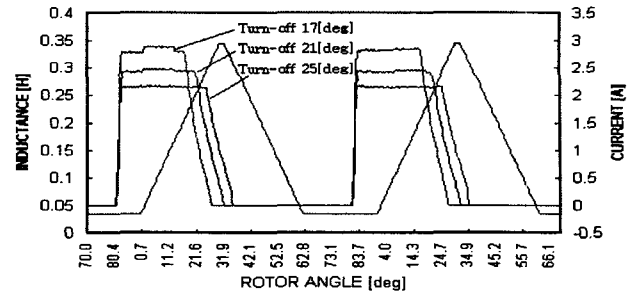


그림 2 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류파형 (턴오프 17°, 21°, 25°)

Fig. 2 Current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 17°, 21°, 25°)

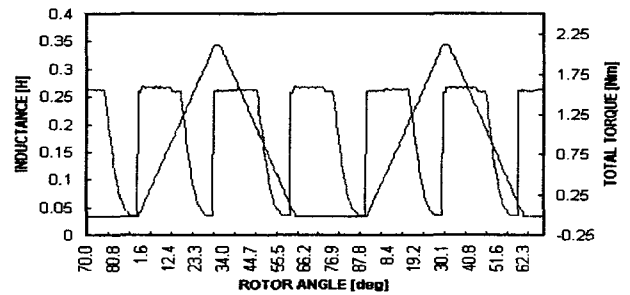


그림 3 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체 토크 파형(턴오프 17°)

Fig. 3 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 17°)

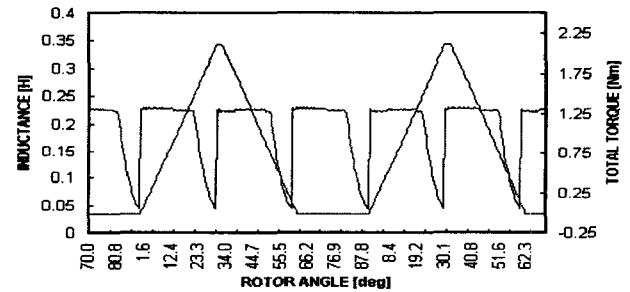


그림 4 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체토크 파형(턴오프 21°)

Fig. 4 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 21°)

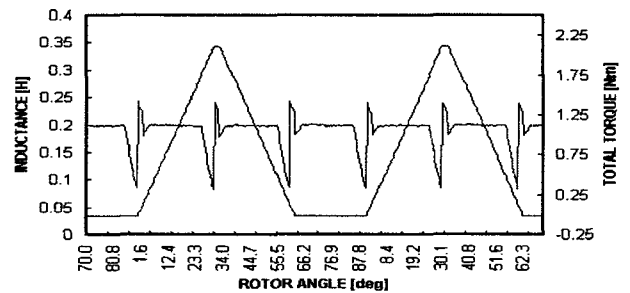


그림 5 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체 토크 파형(턴오프 25°)

Fig. 5 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 25°)

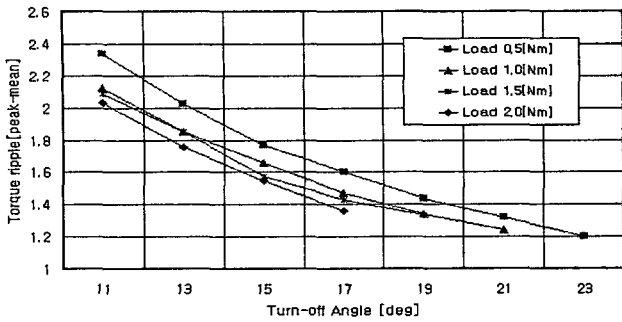


그림 6 턴오프각 변화에 따른 토크리플  
Fig. 6 Torque ripple with varying turn-off angle

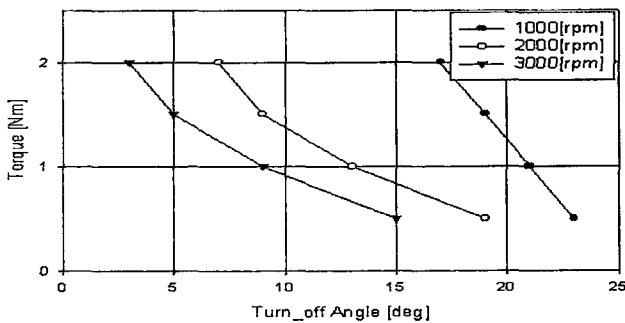


그림 7 회전수 및 부하 변화에 따른 적정 턴오프 각  
Fig. 7 Adaptive turn-off angle at varying speed and load

### 3.2 적정 턴온각 결정

적정 턴온각 결정은 앞서 선정된 적정 턴오프각을 이용하여 토크 파형이 변화하지 않으면서 평균전류가 최소인 시점에서 턴온각을 선정하였다.

그림 8에는 1000[rpm], 1[Nm], 턴오프 각 21도에서 턴온각을 어드밴스 0, 3, 10도를 적용하였을 경우의 전류파형을 나타내고 있고, 그림 9는 그에 따른 토크 파형을 나타내고 있다. 어드밴스각이 3도와 10도에서는 전류변화에 따른 토크 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나, 그림 8에서처럼 0도의 턴온각을 적용한 경우는 인덕턴스가 상승하기 이전에 부하에 따른 적정전류가 확립되지 못함에 따라 인덕턴스 상승시점에서 전류가 증가하였고, 그에 따른 토크 증가를 그림 9로부터 확인할 수 있었다. 턴온각은 각각 어드밴스각을 3도와 10도를 적용하였을 경우에는, 모두가 인덕턴스 상승시점 이전에 적정전류가 확립되어 토크 파형이 변화하지 않음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 턴온각이 너무 늦어져 전류상승 및 토크 상승을 가져오는 스위칭 시점을 제외하고 토크 변화가 없는 턴온각을 우선 선정하여 회전수 1000[rpm]에서 부하 0.5, 1, 1.5, 2[Nm]의 경우의 턴온각 변화에 따른 평균전류를 그림 10에 나타내었다. 그림 11에는 회전수와 부하에 따라 선정된 적정 턴

온각을 나타내었다.

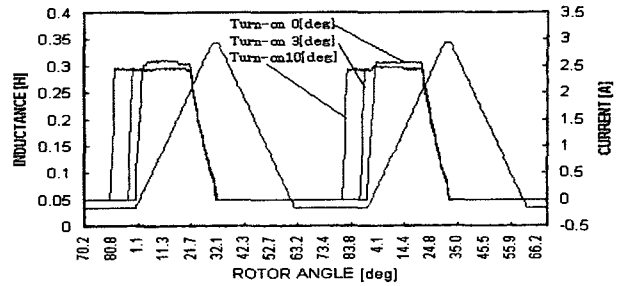


그림 8 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 파형 (턴온 0,3,10°)  
Fig. 8 Current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on 0,3,10)

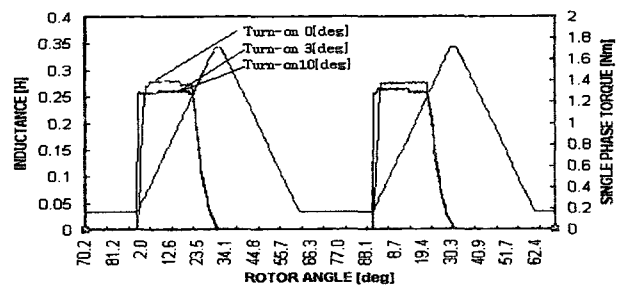


그림 9 1000[rpm], 1[Nm]에서 토크 파형 (턴온 0°,3°,10°)  
Fig. 9 Torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on 0°,3°,10°)

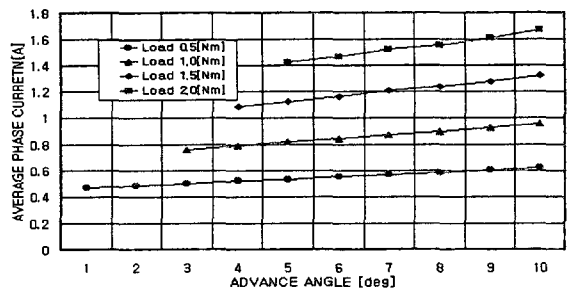


그림 10 1000[rpm]에서 부하별 턴온각에 따른 평균 전류값  
Fig. 10 Average current with varying advance angle and load at 1000[rpm]

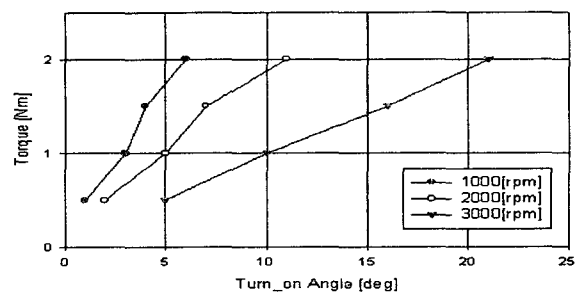


그림 11 회전수 및 부하에 따른 적정 턴온각  
Fig. 11 Adaptive turn-on angle at varying speed and load

### 3.3 시뮬레이션 결과 검토

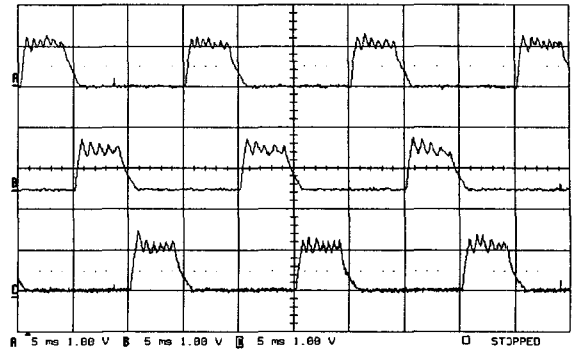
최적운전을 위한 적정 턴오프 각의 결정은 턴오프 스위칭시간 지연으로 발생하는 부토크 영역과 앞선 스위칭 시간으로 발생하는 토크 딥 현상을 고려하여 최소 토크 리플인 각을 선정하였다. 또한 적정 턴온 각 결정은 앞서 선정된 적정 턴오프 각을 이용하여 토크 파형이 변하지 않으면서 평균전류가 최소인 시점에서 턴온각을 선정하였다. 표 2는 각각 부하 0.5, 1, 1.5, 2[Nm], 회전수 1000, 2000, 3000[rpm]에서 SRM의 최적의 운전을 위해 구해진 적정 스위칭 각을 나타내고 있다.

표 2 회전수 및 부하 따른 적정 턴온 각과 턴오프 각  
Table 2 Adaptive turn-on and turn-off angle at varying speed and load

부하 [Nm]	1000[rpm]		2000[rpm]		3000[rpm]	
	Turn-on (Advance angle)	Turn-off	Turn-on (Advance angle)	Turn-off	Turn-on (Advance angle)	Turn-off
0.5	1	23	2	19	5	15
1	3	21	5	13	10	9
1.5	4	19	7	9	16	5
2	5	17	11	7	21	3

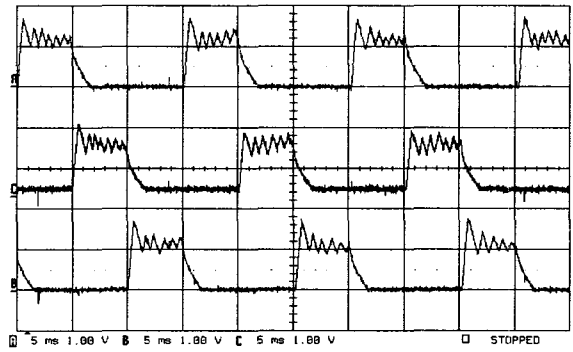
### 4. 실험 및 고찰

제시된 방법의 검증을 위하여 비대칭 브리지 컨버터와 TMS320F240 DSP를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 12와 13은 1000[rpm]에서 부하토크를 1[Nm], 턴오프 각은 21도로 일정하게 두고, 턴온 각을 각각 어드밴스각 3도와 10도로 했을 때 측정된 3상의 전류 파형을 나타내었으며, 그림 14와 15는 2000[rpm], 1[Nm]에서 적정 턴온 각 5도와 적정 턴오프 각 13도를 적용한 경우와 적정 각이 아닌 턴온 10도 턴오프 13도에서 실험한 3상의 전류 파형을 보여주고 있다. 전류 파형 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 평균 전류값은 3도에서 턴온 하였을 때 보다 10도에서 턴온 하였을 때가 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 전류인가 시점이 빨라짐으로 인하여 나타나는 전류는 손실로 나타남을 알 수 있다. 그림 16은 실험을 통해서 얻어진 결과로서 각각 1000[rpm] 및 2000[rpm]에서 부하를 0.5, 1[Nm]로 하였을 때 턴온 각 변화에 따른 효율을 보여주고 있다.



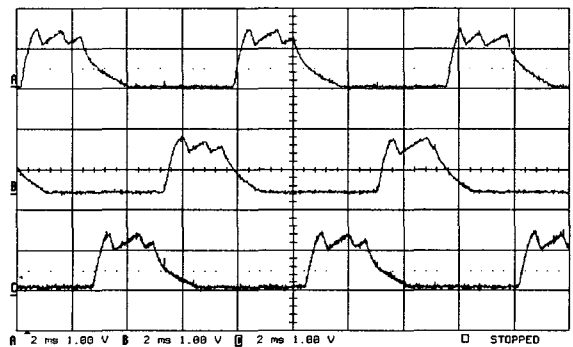
(x=5ms/div, y=2.2A/div), (1000[rpm])

그림 12 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형 (턴온 (어드밴스각 3°), 턴오프 (21°))  
Fig. 12 Experimental current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 3°), Turn-off (21°))



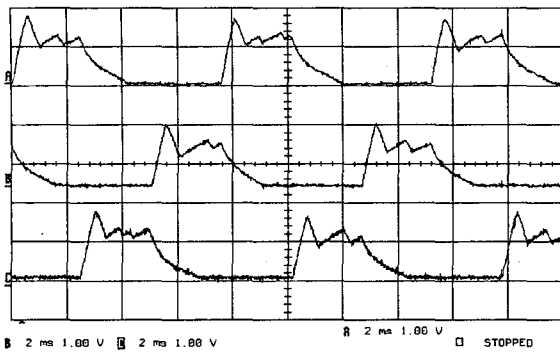
(x=5ms/div, y=2.2A/div), (1000[rpm])

그림 13 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형 (턴온 (어드밴스각 10°), 턴오프 (21°))  
Fig. 13 Experimental current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 10°), Turn-off (21°))



(x=2ms/div, y=2.2A/div), (2000[rpm])

그림 14 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형 (턴온 (어드밴스각 5°), 턴오프 (13°))  
Fig. 14 Experimental current waveforms at 2000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 5°), Turn-off (13°))



(x=2ms/div, y=2.2A/div), (2000[rpm])

그림 15 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형  
(턴온 (어드밴스각 10°), 턴오프 (13°))

Fig. 15 Experimental current waveforms at  
2000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance  
angle 10°), Turn-off (13°))

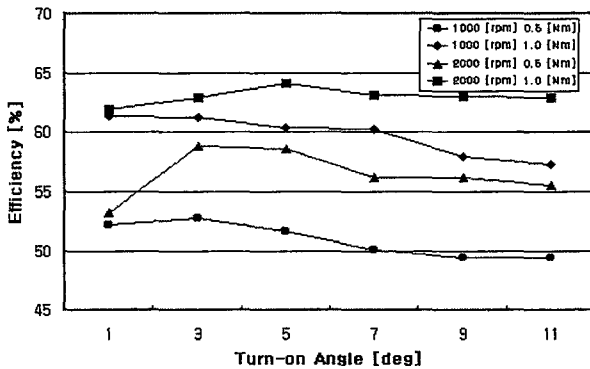


그림 16 1000, 2000[rpm]에서 턴온각에 따른 효율변화  
Fig. 16 Efficiency versus turn-on angle at 1000,  
2000[rpm]

## 5. 결론

SRM은 가변 부하나 속도에 따라 특성이 달라지므로 전동기의 최적운전을 위해서는 속도나 부하에 따라 적절한 스위칭 각의 제어를 필요로 한다. 기존의 방식에서는 반복적인 실험을 통하여 적정 각을 찾아 데이터를 프로그램화하여 제어시에 부하의 가변에 따라 적절하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 그러나 본 연구에서는 3단으로 운전되는 드릴용 SRM의 최적 운전을 위하여, 히스테리시스 전류 방식에 의하여 제어된 전류에 의해 발생하는 토크의 리플이 최소인 시점에서 턴오프 각을 결정한 후, 부하를 일정하게 두고 평균전류가 최소인 적정 턴온 각을 선정하는 적정 스위칭 각 산정에 관한 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 히스테리시스 전류제어 모드로 수행한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교 검토한 결과 거의 유사한 스위칭 패턴으로 진행되는 것을 알 수

있었다. 따라서, 본논문에서 제시된 방법은 실험이나 측정하는 방법을 수행하지 않고 최적으로 운전되는 스위칭 각을 구할 수 있으며, 제어 시스템에 적용 할 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] T.J.E Miller, *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford University Press, 1993
- [2] 황영문, 공관식, "SRM의 고효율 구동을 위한 가변 스위칭각도 조정방식에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 Vol. 44, No.1, pp.25-33, 1995
- [3] Kjaer, P.C., Nielsen, P., Andersen, L. and Blaabjerg, F. "A new energy optimizing control strategy for switched reluctance motors" IEEE Transactions, Vol. 31, Issue. 5, Sept.-Oct., pp. 1088-1095, 1995.
- [4] P.J.Lawrenson, J. M. Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N Fulton, "Variable Speed switched Reluctance Motors", IEE Proc, Vol. 127, No.4, Pt.B, pp. 253-265, July, 1980
- [5] D.A. Torrey, J. H. Lang, "Optimal-efficiency excitation of variable-reluctance motor drives" IEE Proc-B, Vol. 138, pp. 1-14, Jan., 1991
- [6] Nagel, N.J. and Lorenz, R.D " Modeling of a Saturated Switched Reluctance Motor Using an Operating Point Analysis and the Unsaturated Torque Equation" IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, pp. 714-722, May/June, 2000
- [7] G.E. Dawson, A.R. Eastham and J. Mizia " Switched Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite Element Analysis and Test Results" IEEE, Transactions, Vol. IA-23, No. 3, pp. 532-537, May/June, 1987
- [8] 김건우, 원충연, 최경호의 "가변 히스테리시스 제어에 의한 SRM의 토크 리플 저감에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, pp.2-2~2-6, 1999