

A Computing Switching Angle for Adaptive Operation of SRM for Drill

崔景好* · 金男燮** · 白元植*** · 金東熙[§] · 盧采均^{§§} · 金玟會^{§§§} · 黃敦夏[#]
 (Kyeong-Ho Choi · Nam-Hun Kim · Won-sik Baik · Dong-Hee Kim · Chae-Gyun Ro · Min-Huei Kim · Don-Ha Hwang)

Abstract - This paper presents a calculating method of switching angle for adaptive switched reluctance motor (SRM) drive of a drill. The operation of the SRM is completely characterized by the flux linked by one phase winding which depends only on the current in that same phase winding and the rotor position. An efficiently adaptive SRM drive is possible on appropriately scheduling the commutation angles with accurate rotor position, supplied current value and speed information. An adaptive SRM drive with reduction torque ripple should be controlled by an optimized phase current control along with rotor position. Therefore, we are suggested a computing method of switching turn-on and off angles for adaptationally SRM operation with varied rotor speed and load. To probe the computing method, we have some simulation and experiment, it is shown a good result that can be computing the optimized switching angles for an electric drill motor.

Key Words : SRM, Advance angel, Adaptive turn-on and off angle

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 적용하는 시스템으로 구성되었으나, 최근에는 이러한 부가적인 기계장치 없이 직접 구동하는 방식으로 전환됨에 따라 작업공간의 확보와 속도가변을 위한 벨트전환 등의 번거러움을 피할 수 있게 되었다. 이러한 다양한 산업분야의 적용을 위하여 경제성과 견고성을 고려하여 연구개발 중에 있는 전동기 중의 하나인 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM, Switched Reluctance Motor)를 들 수 있다. SRM의 구조는 고정자와 회전자 모두가 돌극 형태로 각기 다른 갯수의 극을 가지며, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영

구자석도 존재하지 않는 간단한 구조가 SRM의 가장 큰 특징으로 볼 수 있다. 이러한 구조적 장점으로 인한 제작비용 절감의 효과와 기능상의 우수성으로 인하여 차세대의 전동기로서 관심이 집중되고 있다. 제어방식의 연구에서도 최적인 전과 동시에 보다 안정화된 특성을 얻기 위해 여러가지 제어 방법들이 연구되어 발표되고 있으며, SRM의 특성상 회전자 위치정보를 외부 엔코더나 리졸버 등을 통해서 얻는 방식에서 최근에는 센서리스 제어방식으로도 활발히 연구되고 있다. 이러한 다양한 SRM 제어방식에서 무엇보다 우선적으로 선행되어야 할 것은 가변속도나 가변부하에 대해 최적의 운전 조건을 갖는 어드벤스 각을 결정하는 것이다[1]-[3].

최적운전을 위한 스위칭 각을 구하기 위하여, 기존의 방식에서는 반복적인 실험을 통하여 적정 각을 찾아 데이터를 프로그래밍하여 부하의 가변에 따라 적절하게 대응할 수 있도록 제어하는 방법으로 설계되어 많은 실험적 시행오차가 요구되었다. 이에 따라 본 연구에서는 3단 속도로 운전되는 드릴용 SRM의 최적 운전을 위하여, 히스테리시스 전류 제어방식에 의하여 제어된 전류에 의해 발생되는 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.

* 正 會 員 : 嶺南大 大學院 電氣科 博士課程修了
 ** 正 會 員 : 嶺南大 大學院 電氣科 博士課程
 *** 正 會 員 : 嶺南大 大學院 電氣科 碩士課程
 § 正 會 員 : 嶺南大 電氣電子工學部 教授 工博
 §§ 正 會 員 : 嶺南大 電氣電子工學部 教授 工博
 §§§ 正 會 員 : 嶺南理工大學 電氣科 教授 工博
 # 正 會 員 : 韓國 電氣 研究原, 先任研究員
 接手日字 : 2001年 7月 5日
 最終完了 : 2001年 10月 30日

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.

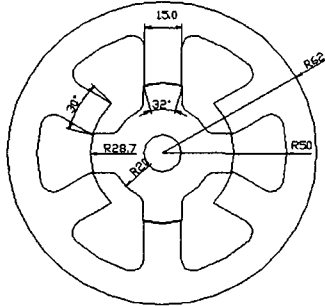


그림 1 SRM의 구조
Fig. 1 Structure of SRM

SRM의 토크는 그림 2에서 나타낸 것과 같이 인덕턴스가 상승하는 구간에서 발생되며, 상전류의 방향과는 무관하고 인덕턴스의 기울기에 따라서 토크의 부호가 달라질 수 있다. 그림 2는 이중 돌극형 SRM의 전형적인 인덕턴스 프로파일과 이상적인 전류파형과 전압파형 및 토크 파형을 보여주고 있다.

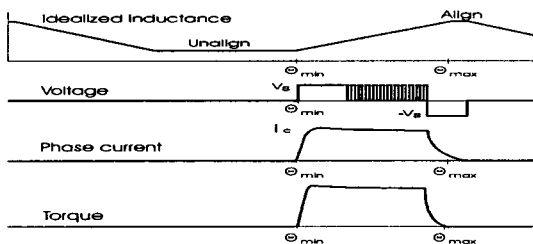


그림 2 SRM의 이상적인 인덕턴스 프로파일과 전압, 전류, 토크 파형
Fig. 2 Idealized inductance profile and voltage, current, torque waveforms of SRM

2.1 SRM 제어

SRM 제어는 상권선에 인가되는 전압파형과 스위칭 신호 및 전류 파형에 따른다. 일반적인 운전 및 에너지 변환 등을 고려할 때 여자시의 상전류는 평탄한 형상이 적합하다. 이러한 전류값은 적절한 스위칭 각도의 조정 또는 전류제한을 위한 상전류 초평에 의해 제어된다. 전류제어방식으로는 기준 전류값과 전류검출기를 통하여 케환된 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[4]. 스위칭 각을 제어하는 방법으로는 턴 오프를 일정하게 하여 토크 각을 일정하게 하는 방법과 드웰 각을 일정하게 하는 제어방식으로 나눌 수 있다.

2.1.1 토크 각도 일정 제어 방식

토크는 인덕턴스가 상승하는 구간에서만 발생되므로, 토크 각도 스위치가 도통되어 있는 인덕턴스 상승구간이라고 할 수 있다. 이 제어 방식은 부하의 증감에 관계없이 토크 각도를 일정하게 제어하여 유효토크를 얻는 방식이다. 자기 포화가 없는 선형적 조건에서는 소호되는 전류가 부토크의 영향이 미치지 않는 범위까지 최대한 크게 하는 것이 좋으며, 토크 리플을 적게 하면서 최대의 출력을 얻을 수 있다. 그림 3은 토크 각 일정 제어 방식을 나타낸 그림으로서, 부하에 따라 평탄한 전류를 만들기 위하여 어드밴스 각도를 적절하게 조절하고 턴오프 각을 부하에 관계없이 일정한 시점에서 적용시키는 제어방식이다. 따라서 부하전류가 증가하면 포화점이 앞당겨져 스위치가 오프 되기 이전의 포화점에서 전류 상승이 이루어지며, 포화로 인해 상승된 전류분은 철손을 증가시키고, 전류를 소호 하는데 시간이 길어짐으로 부토크를 유발할 수 있다. 이러한 부토크는 소음과 효율 저하를 가져오며, 운전을 불안정하게 할 수 있다[5].

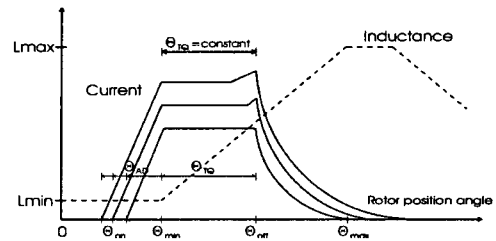


그림 3 토크 각 일정 제어 방식
Fig. 3 Constant torque angle control scheme.

2.1.2 드웰각 일정 제어 방식

토크 발생구간에서 부하 전류가 크고 고정자와 회전자의 중첩이 커짐에 따라 포화가 심화되어서 전류의 상승이 발생한다면 효율저하를 가져오므로 포화점의 직전에 스위치를 오프하는 것이 좋다. 부하 전류가 커짐에 따라 포화점은 앞당겨 지게 되므로 평탄전류형상을 만들기 위해 부하에 따라서 어드밴스각을 조정함과 동시에, 포화영역에서의 전류상승을 억제하기 위해 토크 각을 작게 조정하면 효율이 더 향상되는 효과를 갖는다. 드웰각 일정제어 방식은 그림 4에서 나타내었으며, 부하전류에 따른 어드밴스 각의 증가폭과 토크 각의 감소 폭을 일정하게 함으로써 드웰 각을 일정하게 제어하는 방식이다[5].

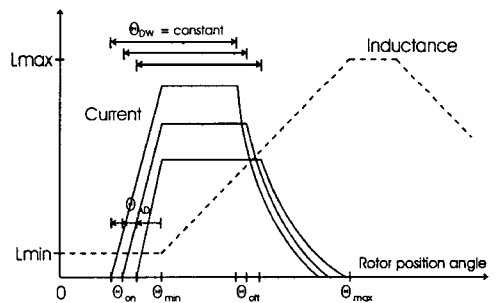


그림 4 드웰각 일정 제어 방식
Fig. 4 Constant dwell angle control scheme

3. 시뮬레이션 및 결과

3.1 토크방정식

SRM의 쇠교자속에 대한 전압방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$V = r \cdot i + \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

여기서, V는 DC링크전압, r은 상의 권선저항, i는 상전류이다. 전동기 속도가 일정하다고 가정하고 $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ 로 나타내면 식(1)은 식(2)로 표시되며, 여기서, L(θ , i)는 자기인덕턴스이다.

$$V = ri + \omega \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (2)$$

전기적인 순시입력을 에너지 흐름으로 나타내면 식 (3)으로 나타낼 수 있으며, 첫째항은 권선에서 소비되는 전력이고, 두번째항은 자기에너지로 축적된 에너지이며, 세번째항은 기계적인 출력을 나타낸다.

$$Vi = ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (3)$$

일반적으로 자기 포화를 무시하면 co-energy와 발생 토크는 다음 식(4)와 (5)로 되며, 이때 전동기의 출력 토크는 식(6)으로, 운동방정식은 식(7)로 표시된다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^i L(\theta) idt = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (4)$$

$$T = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

$$T_{out} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-30)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-60)}{d\theta} \quad (6)$$

$$T_M = \frac{dw(\theta)}{dt} J_m + B_m \omega + T_L \quad (7)$$

여기서, J_m 은 전동기 관성 모멘트, B_m 은 전동기의 점성 마찰 계수, T_L 은 부하 토크이다.

표 1은 본 연구에 사용된 전동기의 제원을 나타내고 있다.

표 1 전동기의 제원

Table 1 Specification of SRM

| 명칭 | 치수 | 명칭 | 치수 |
|-----------|-----------------------|-----------|-----------|
| 출력 | 750[W] | 회전수 | 3000[rpm] |
| 상수 | 3상 | 전압 | 300[V] |
| 회전자 외부 반경 | 20[mm] | 고정자 외부 반경 | 46[mm] |
| 회전자 내부 반경 | 28.7[mm] | 고정자 내부 반경 | 58[mm] |
| 회전자 극호 | 32° | 고정자 극호 | 30° |
| 회전자 극수 | 4 | 고정자 극수 | 6 |
| 철심장 길이 | 57 [mm] | 공극 | 0.3[mm] |
| 슬롯단면적 | 410[mm ²] | Steel | S-18 |

그림 5는 SRM의 동특성을 얻기 위하여 적용된 인덕턴스로 회전자의 각도를 1도씩 변화시켜 정렬에서 비정렬까지 이동시킬 때 전류변화에 따른 인덕턴스 변화량을 보여주고 있으며, 해석은 FEM을 적용하였다[7].

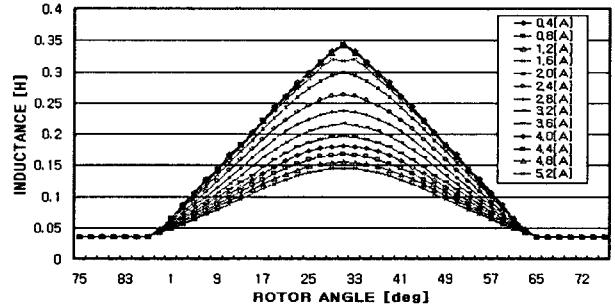


그림 5 회전각과 전류변화에 따른 인덕턴스 변화

Fig. 5 Various inductance with varied rotor position angle and current

3.2 적정 턴오프 각 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 상 여자의 공백에 따른 토크 덩이 감소하였으나, 일정 시점이 지날 경우 인덕턴스 감소시점에서 전류가 나타나게 되고, 이에 따라 부토크가 발생됨을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션은 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. 시뮬레이션은 인덕턴스가 상승하는 시점을 0도로 하고 1상의 주기를 90도로 하였을 경우의 각도를 나타내고 있다. 그림 6은 1000[rpm], 1[Nm]에서 턴은 각을 어드밴스각 9도로 일정하게 적용하고 턴오프 각을 17, 21, 25도로 변화시켰을 경우의 한 상의 전류와 인덕턴스를 나타내고 있다. 그림 7, 8, 9는 각각 턴오프 각이 17, 21, 25도일 경우의 한 상의 토크 파형과 3상 출력 토크 파형을 나타내었다. 그림 6으로부터 턴오프 각을 크게 함에 따라 전류 소호시간이 길어짐을 확인할 수 있었다. 그림 7에서는 턴오프 각을 너무 앞당김에 따라 토크 덩이 현저히 나타났으며, 그림 8의 경우에는 적절한 턴오프 각을 적용함에 따라 토크덩이 줄어들고 최대 토크와 최소 토크의 차이도 줄어들음을 확인할 수 있었다. 그림 9의 경우에는 25도의 턴오프 각을 적용한 경우의 토크 파형으로써, 초기에는 두 상의 토크 중첩으로 출력 토크가 상승하였다가, 이후 역토크의 영향으로 감소함을 알 수 있었다. 그림 10은 드웰 각을 30도로 일정하게 두고 부토크가 발생하지 않는 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 11은 부하와 회전수 변화에 따라 드웰각 일정제어 방식(24도~34도)으로 얻어진 결과들 중에서 부토크가 발생되지 않으면서 최소의 토크리플을 가지는 적정 턴오프 각을 선정하여 나타내었다.

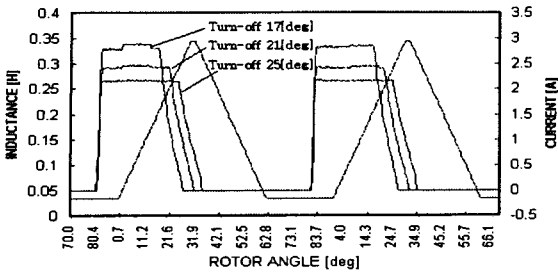


그림 6 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류파형(턴오프 17°, 21°, 25°)
 Fig. 6 Current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 17°, 21°, 25°)

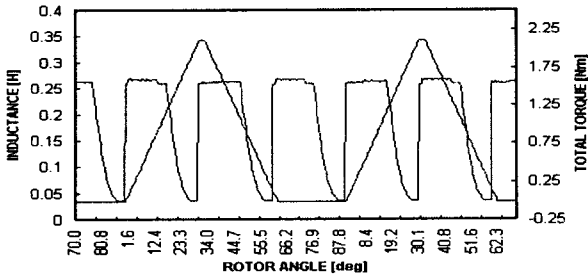


그림 7 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체토크 파형(턴오프 17°)
 Fig. 7 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 17°)

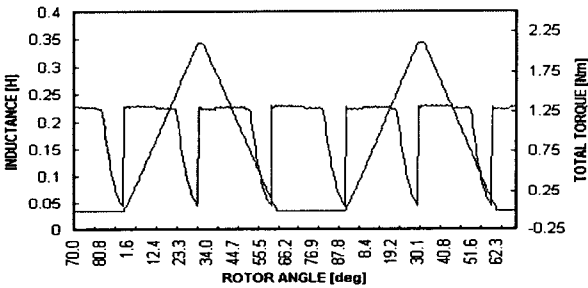


그림 8 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체토크 파형(턴오프 21°)
 Fig. 8 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 21°)

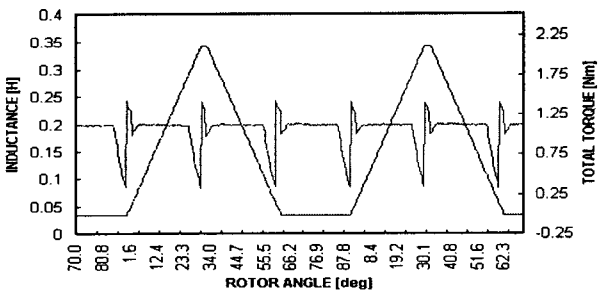


그림 9 1000[rpm], 1[Nm]에서 전체 토크 파형(턴오프 25°)
 Fig. 9 Total torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-off 25°)

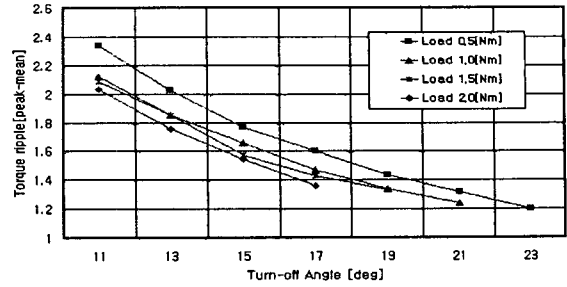


그림 10 턴오프각 변화에 따른 토크리플
 Fig. 10 Torque ripple with varying turn-off angle

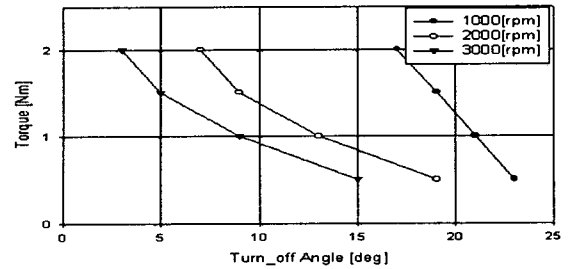


그림 11 회전수 및 부하 변화에 따른 적정 턴오프 각
 Fig. 11 Adaptive turn-off angle at varying speed and load

3.3 적정 턴오프 각 결정

적정 턴오프 각 결정은 앞서 선정된 적정 턴오프 각을 이용하여 토크 파형이 변화하지 않으면서 평균전류가 최소인 시점에서 턴오프 각을 선정하였다. 그림 12에는 1000[rpm], 1[Nm], 턴오프 각 21도에서 턴오프 각을 어드밴스 0, 3, 10도를 적용하였을 경우의 전류파형을 나타내고 있다. 그림 13은 그에 따른 토크 파형을 나타내었다. 각각 어드밴스각이 3도와 10도에서는 전류변화에 따른 토크 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나, 그림 12에서 처럼 0도의 턴오프 각을 적용한 경우는 인덕턴스가 상승하기 이전에 부하에 따른 적정전류가 확립되지 못함에 따라 인덕턴스 상승시점에서 전류가 증가하였고, 그에 따른 토크 증가를 그림 13으로부터 확인할 수 있었다. 턴오프 각을 각각 어드밴스각을 3도와 10도를 적용하였을 경우에는, 모두가 인덕턴스 상승시점 이전에 적정전류가 확립되어 토크 파형이 변하지 않음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 턴오프 각이 너무 늦어져 전류상승 및 토크 상승을 가져오는 스위칭 시점을 제외하고 토크 변화가 없는 턴오프 각을 우선 선정하여 회전수 1000[rpm]에서 부하 0.5, 1, 1.5, 2[Nm]의 경우의 턴오프 각 변화에 따른 평균전류를 그림 14에서 나타내었다. 그림 15에는 회전수와 부하에 따른 시뮬레이션 결과를 통해 선정된 적정 턴오프 각을 나타내었다.

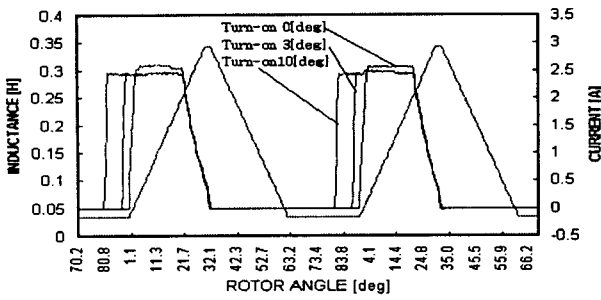


그림 12 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 파형(턴온 0°, 3°, 10°)
 Fig. 12 Current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm](Turn-on 0°, 3°, 10°)

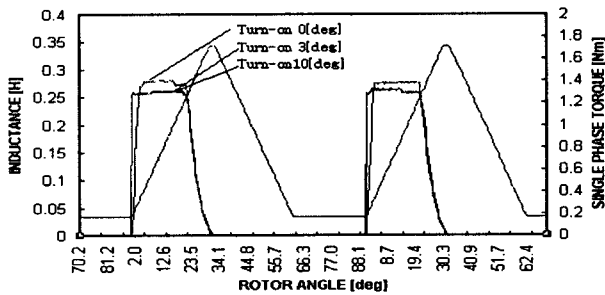


그림 13 1000[rpm], 1[Nm]에서 토크 파형(턴온(advance angle 0°, 3°, 10°))
 Fig. 13 Torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm](Turn-on (advance angle 0°, 3°, 10°))

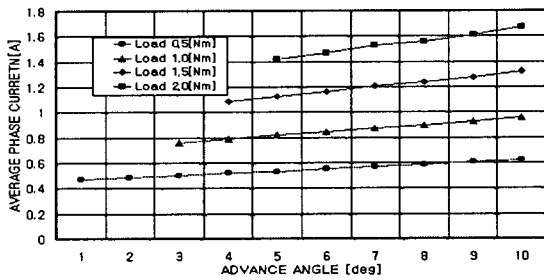


그림 14 1000[rpm]에서 부하별 턴온각에 따른 평균 전류값
 Fig. 14 Average current with varying advance angle and load at 1000[rpm]

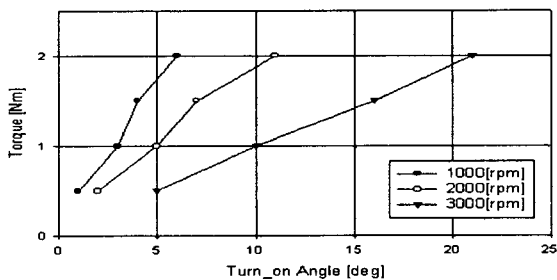


그림 15 회전수 및 부하에 따른 적정 턴온각
 Fig. 15 Adaptive turn-on angle at varying speed and load

3.4 시뮬레이션 결과검토

최적운전을 위한 적정 턴오프 각의 결정은 턴오프 스위칭 시간 지연으로 발생하는 부토크 영역과 앞서 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 평균 전류가 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 결과

4.1 실험 장치 구성

그림 16은 제시된 방법의 검증을 위하여 구성된 제어시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다. 컨버터는 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였다. Commutation logic controller는 두가지 용도로 사용하고 있으며, 초기에는 SRM A상과 어느 한 회전자극을 일치시키기 위해 사용하고, 초기구동 후에는 회전자 위치각에 따라서 여자시퀀스를 결정한다. 속도 제어기는 PI, 전류제어기는 2-level Hysteresis 제어기를 사용하고 있으며, Encoder로부터 속도와 각도를 얻어 각 제어기에서 제시된 표2에 따라 적정 턴온 각과 턴오프 각을 결정하여 제어 되도록 구성하였다[8].

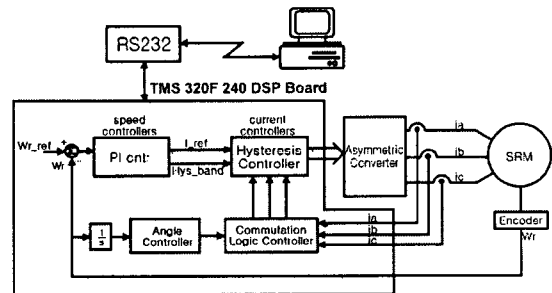
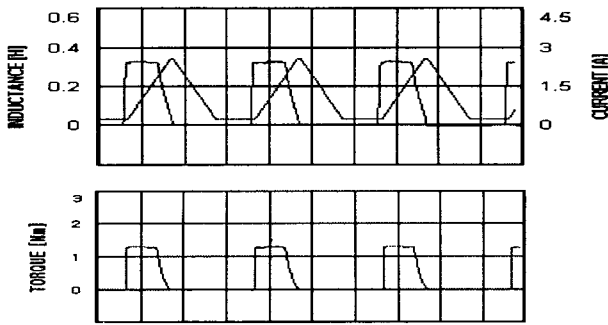


그림 16. 제어시스템의 블록 다이어그램
 Fig. 16 Block diagram of the control system

4.2 전류 파형 및 효율 비교

그림 17은 1000[rpm], 1[Nm]에서 적정 턴온 각 3도와 적정 턴오프 각 21도를 적용하여 시뮬레이션 한 전류 파형 및 토크 파형을 보여주고 있다. 그림 18은 적정 턴온 각이 아닌 10도의 어드밴스 각과 적정 턴오프 각 21도에서의 전류

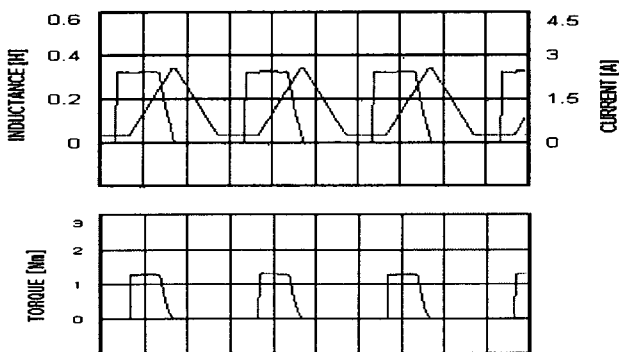
및 토크 파형을 보여주고 있다. 그림 19와 20은 1000[rpm]에서 부하토크를 1[Nm], 턴오프 각은 21도로 일정하게 두고, 턴온 각을 각각 어드밴스각 3도와 10도로 했을 때 측정된 세상의 전류 파형을 나타내었으며, 그림 21과 22는 2000[rpm]에서 부하토크를 1[Nm], 턴오프 각은 13도로 일정하게 두고, 턴온 각을 각각 어드밴스각 5도와 10도로 했을 때 시뮬레이션한 전류 파형과 토크 파형을 나타내었다. 그림 23, 24는 2000[rpm], 1[Nm]에서 적정 턴온 각 5도와 적정 턴오프 각 13도를 적용한 경우와 적정 각이 아닌 턴온 10도 턴오프 13도에서 실험한 세상의 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 25는 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, (1000[rpm])

그림 17 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 및 토크 파형 시뮬레이션 결과 (턴온(어드밴스 3°), 턴오프(21°))

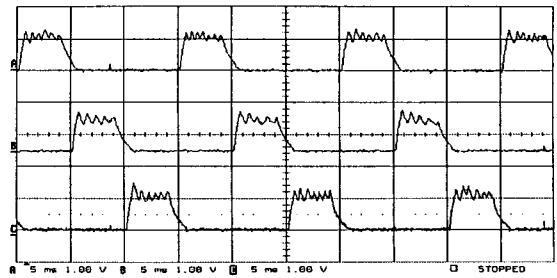
Fig. 17 Simulation results of current and torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm](Turn-on (advance angle 3°), Turn-off(21°))



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

그림 18 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 및 토크 파형 시뮬레이션 결과 (턴온(어드밴스각 10°), 턴오프 (21°))

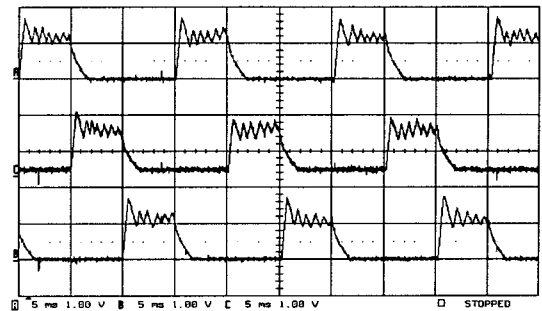
Fig. 18 Simulation results of current and torque waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on(advance angle 10°), Turn-off(21°))



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

그림 19 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형(턴온(어드밴스각 3°), 턴오프 (21°))

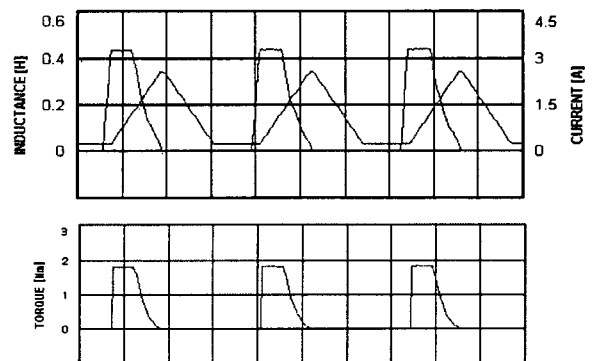
Fig. 19 Experimental current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on(advance angle 3°), Turn-off(21°))



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

그림 20 1000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형(턴온(어드밴스각 10°), 턴오프 (21°))

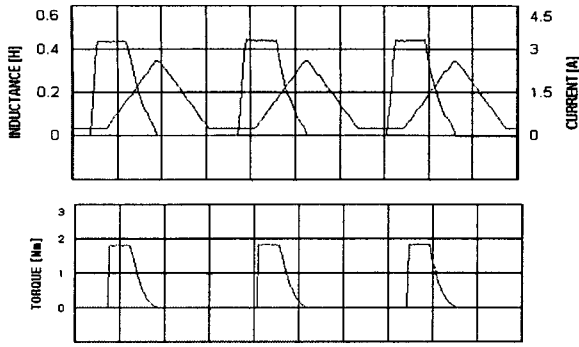
Fig. 20 Experimental current waveforms at 1000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 10°), Turn-off (21°))



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

그림 21 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 및 토크 파형 시뮬레이션 결과(턴온(어드밴스각 5°), 턴오프 (13°))

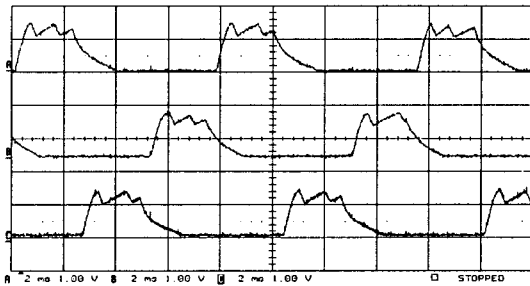
Fig. 21 Simulation results of current and torque waveforms at 2000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on(advance angle 5°), Turn-off(13°))



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

그림 22 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 및 토크 파형 시뮬레이션 결과(턴온(어드밴스각 10°), 턴오프 (13°))

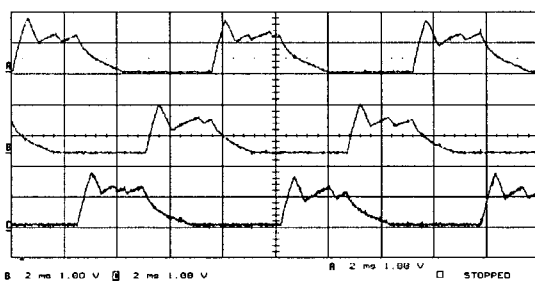
Fig. 22 Simulation results of current and torque waveforms at 2000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 10°), Turn-off(13°))



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

그림 23 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형(턴온(어드밴스각 5°), 턴오프 (13°))

Fig. 23 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 24 2000[rpm], 1[Nm]에서 전류 실험 파형(턴온(어드밴스각 10°), 턴오프 (13°))

Fig. 24 Experimental current waveforms at 2000[rpm] and 1[Nm] (Turn-on (advance angle 10°), Turn-off(13°))

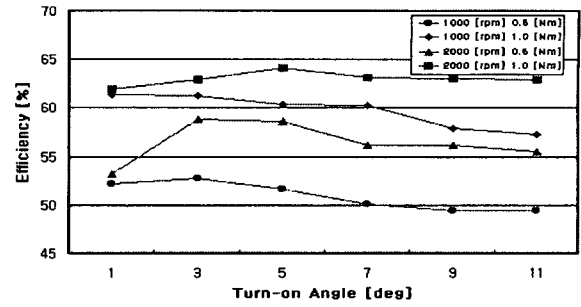


그림 25 1000, 2000[rpm]에서 턴온각에 따른 효율변화

Fig. 25 Efficiency verses turn-on angle at 1000, 2000[rpm]

5. 결 론

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 발생되는 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 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [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

저 자 소 개



최 경 호 (崔景好)
1967년 4월 28일 생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과졸업(석사). 1995년 1월~2000년 1월 주(효성) 전동기부 근무. 2000. 2 동 대학원 박사수료
Tel : 053-650-9263



김 남 훈 (金男勳)
1973년 6월 12일 생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 영남대 박사과정
Tel : 053-650-9263
E-mail : cop1288@yahoo.com



백 원 식 (白元植)
1970년 10월 20일 생. 1996년 계명대 수학과 졸업. 2000년 9월~2001년 현재 영남대 공대 전기공학과 석사과정
Tel : 053-650-9263



김 동 희 (金東熙)
1950년 11월 20일 생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 현재 영남대 공대 전기·전자공학부 교수.



노 채 균 (盧采均)
1938년 10월 7일 생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학박). 1982~1983년 미국 쉐넬러 주립대 교환교수. 현재 영남대 공대 전기·정보공학부 교수.



김 민 회 (金玟會)
1953년 7월 23일 생. 1974년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년 3월~현재 영남이공대 전기전자계열 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대(낙스빌) 전기공학과. 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수 논문상수상. 당학회편집위원
Tel : 053-650-9263, Fax : 053-624-4736
E-mail : mhkim@ync.ac.kr



황 돈 하 (黃敦夏)
1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1993년~현재 한국전기연구원, Mechatronics 연구그룹 선임연구원,
Tel : 055-280-1544, Fax : 055-280-1547,
E-mail : dhhwang@keri.re.kr