

## 스위치드 릴럭턴스 전동기의 적응운전방식에 관한 연구

이 치우\*, 오석규\*, 이일천\*\*, 황영문\*

\*부산대학교, \*\*동명전문대

### An Adaptive Operation Scheme of Switched Reluctance Motor

Chee-Woo Lee\*, Seok-Gyu Oh\*, Ill-Chun Lee\*\*, Young-Moon Hwang\*

\* Pusan National University, \*\* Dong Myung Junior College

**Abstract** - The intrinsic simplicity, ruggedness, and simple power electronic drive requirement of a switched reluctance motor (SRM) make it a viable use for many commercial adjustable speed applications. However, higher torque ripple is one of the few disadvantages of the SRM drives. This paper describes the robust control scheme that permits the phase torque flattened by adaptive reference model.

#### 1. 서 론

SRM은 간단하면서 견고한 드라이브와 자기적 구조를 가지므로 가변속 용용분야에서 많이 이용되고 있다. 그러나 타 전동기에 비해 토오크 리플이 큰 단점이 있어 SRM의 운전성능을 저하시킨다.

SRM 드라이브 시스템의 토오크는 식(1)과 같이 스위칭 기자력 전류의 자승과 회전자 위치각에 따른 가변인덕턴스의 변화율에 비례한다.

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

토오크 발생구간에서 가변인덕턴스의 변화율은 포화현상으로 인해 상당히 비선형적인 변화를 보이며 동시에 기자력 전류의 과정이 가변하여 토오크 리플과 속도변동을 유발하게 된다.

SRM 드라이브에서의 평활 토오크는 주어진 인가전압의 전형적인 속도-토오크 특성 (이는 직류직 권전동기와 유사한 수하특성을 갖는다) 범위에서만 가능할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 전동기의 속도-토오크 특성에 대해 기준 모델을 설정하여 부하증감에 따른 속도-토오크 특성이 설정된 범위에서 적용하여 운전함으로써 토오크 리플을 최소화하고자 한다.

#### 2. 토오크 리플의 발생원인

SRM 드라이브에서의 토오크는 여자된 자기회로

에서 자기 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 작용한다. 이때 각 상의 동작과정에서 전압방정식은 식(2)와 같다.

$$v = r \cdot i(\theta) + L(i, \theta) \frac{di(\theta)}{d\theta} \cdot \omega + i(\theta) \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \cdot \omega \quad (2)$$

여기서, 첫째항은 각 권선의 저항에 의한 전압강하, 둘째항은 리액턴스 전압강하 및 셋째항은 속도역기전력이다.

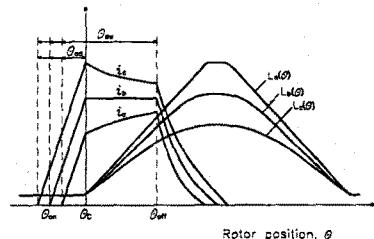


그림 1. 부하에 따른 인덕턴스 변화와 전류파형

토오크 발생구간에서 전류  $i(\theta)$ 의 순시값은 동작상태에 따라 그림 1에서 보는 바와 같이 다양하게 변화하며 가변인덕턴스의 변화율은 그림 2에서와 같이 local saturation 및 bulk saturation으로 인해

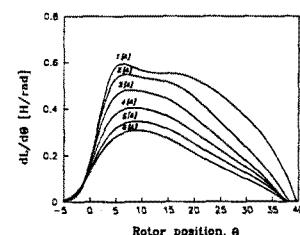


그림 2. VRM의  $dL(i, \theta)/d\theta$  프로필

토오크 발생구간의 후단에서 낮아지는 등 백동분을 갖게 되며 이는 토오크 리플의 원인이 되므로 이에 대한 보상이 필요하다.

### 3. 토오크 리플 저감제어

본 연구에서는 토오크 리플이 최소화되는 속도-토오크의 적응기준모델에 의하여 폐루프 제어함으로써 SRM 드라이브를 운전제어하고 부차적으로 인가진압의 정밀제어에 의하여 드라이브 시스템을 안정화하는 운전방식을 채택하고자 한다.

#### 3.1 속도 및 도통각 제어

속도특성의 안정화를 위하여 기준속도에 대해 전동기의 속도를 피드백한다. 이때 전동기의 속도감지는 간단한 슬롯 디스크에 의하여 펄스신호로 검출하며 동시에 기준속도 역시 펄스신호로 처리한다. 전동기의 속도신호는  $F_M/V$  컨버터터에 의해 DC 신호로 피드백하고 기준 속도신호는  $V/F_R$  컨버터터로 형성시키되,  $F_M/V$ 와  $V/F_R$  컨버터터는 바이어스 전압을 조정하여 주파수/전압의 변환정수를 다르게 한다.

지금,  $V/F_R$  및  $F_M/V$  컨버터터의 변환식은

$$\begin{aligned} v_R &= -k_R f_R + v_{bR} \\ v_M &= -k_M f_M + v_{bM} \end{aligned} \quad (3)$$

이므로 이들을 결합시키면 다음과 같은 주파수 조건에서 동작하게 된다.

$$f_R = f_M = \frac{1}{k_M - k_R} (v_{bM} - v_{bR}) \quad (4)$$

그리하여 두 컨버터터의 바이어스 전압제어에 의하여 SRM 드라이브의 스위칭 주파수 및 속도를 조정할 수 있게 된다.

여기서  $k_R$ ,  $k_M$ 은  $V/F_R$  및  $F_M/V$ 의 변환정수이고  $v_{bR}$  및  $v_{bM}$ 은 각각의 바이어스 전압이다.

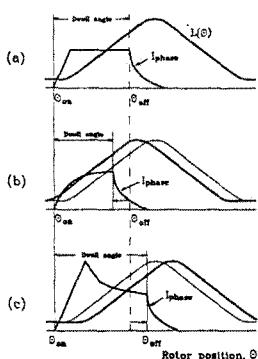


그림 3. 부하변동에 따른 도통각의 동적 제어

- (a) 평형상태의 한 운전조건
- (b) 부하가 줄어든 경우
- (c) 부하가 증가된 경우

돌극형의 자극을 갖는 전동기에서는 부하토오크가 증감하면 상차각의 증감이 생기게 되고 이것의

정현값에 비례하는 토오크출력이 속도성 있게 대응하게 된다.

본 논문에서는 두 컨버터터의 어긋나는 위상차에 이러한 원리를 도입하여, SRM 드라이브에서 부하토오크가 증감하면 별도의 연산장치없이 전류의 도통각을 증감시키고 동시에 순시 전류의 자승에 비례하는 효과적인 토오크출력을 갖게하여 전동기의 동특성을 향상시킬 수 있게 하였다.[1]

그림 3은 일정속도에서 부하토오크의 변동에 따라 도통각이 가변하여 안정한 운전속도를 유지하는 제어 개념도를 보여주고 있다.

그림 3(a)는 부하토오크와 발생토오크가 평형을 이루고 있는 한 상태를 나타내고 있다. 이때 부하토오크가 감소하면 발생토오크가 부하토오크보다 더 커져 순간적으로 회전자는 가속된다. 그림 3(b)에서와 같이 회전자속도가 빨라진 만큼 회전자 위치센서로부터 나오는 펄스신호는 상대적으로 앞당겨서 발생하여 도통각이 줄어들고 전류의 크기가 작아지며 발생토오크도 감소한다. 그리하여 발생토오크와 부하토오크가 평형을 이루는 도통각에서 동작하게 되고 회전자 속도는 여전히 기준속도와 같게 된다. 반대로 부하토오크가 증가된 경우는 그림 3(c)에서 설명된다.

#### 3.2 속도-토오크 특성의 적응 모델화

식(2)의 전압방정식에서 임피던스 전압강하 성분에 대한 적응기준모델의 보상분으로는 부하전류의 평균치  $I_L$ 의 변환치를  $V/F_R$ 에 피드백시키고, 속도역기전력 성분에 대한 적응기준모델의 보상분으로는 도통각의 변환치를 전동기 속도피드백  $F_M/V$ 에 귀환시켜 그들의 바이어스 전압을 조정한다. 이

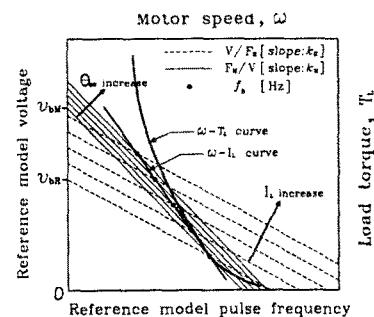


그림 4. 토오크 리플 저감을 위한 적응기준모델

때식(4)는 다음의 식(5)와 같은 모델 관계식을 갖게 된다.

$$f_0 = \frac{1}{k_M - k_R} [ - (v_{bR} + k_I I_L) + (v_{bM} + k_{DW} \theta_{DW}) ] \quad (5)$$

여기서  $f_0$ 는 시스템이 안정된 상태일 때 전동기 속도펄스의 주파수이고,  $k_I$ 는 부하전류  $I_L$ 의 귀환

계수이며,  $k_{DW}$ 는 도통각  $\theta_{DW}$ 의 귀환보상계수이다.

여기서, 부하전류의 귀환정수  $k_I$  및 도통각의 귀환계수  $k_{DW}$ 를 조정하여 토오크 리플이 최소화되는 적응기준모델을 구성하면 그림 4와 같다.

### 3.3 인가전압 조정에 의한 운전특성의 안정화

SRM의 속도-토오크 특성의 적응 모델화에 의해서도 다소간의 토오크 리플은 남는다. 이는 그림 2에서 보는 바와 같은 가변인덕턴스의 변화율  $dL(\theta, i)/d\theta$ 에 기인하는 것과 이로 인한 고조파의 속도변동율로 인하여 유발된다.

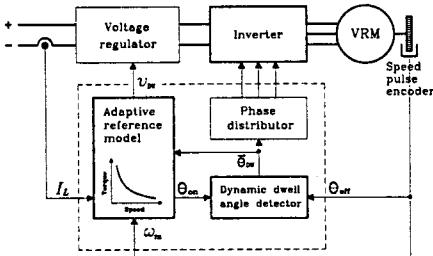


그림 5. 토오크 리플 저감을 위한 제어 구성도

본 연구에서 제시하는 제어방식에서는 도통각을 감지함으로써 출력변수  $v_{DW}$ 에 의하여 인가전압을 조정한다. 그림 5는 운전안정도를 향상시키고 토오크 리플을 저감시키는 제어 구성도이다.

## 4. 실험결과 및 고찰

토오크 리플 저감을 위한 적용 운전방식은 3 상, 6/4 SRM, 1.5 [hp], 220 [v]에서 행하여졌다. 속도 펄스 엔코더는 12 슬롯의 디스크로서 1 회전당 12 펄스를 출력한다.

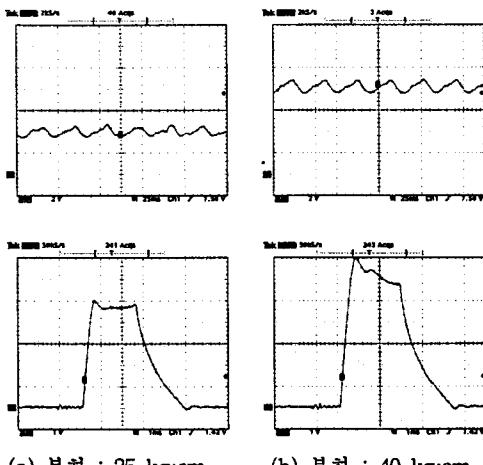


그림 6. 전형적인 SRM에서 부하변동에 따른 토오크 리플(위)과 전류파형(아래)

그림 6은 적응기준모델을 적용하지 않을 때의 전형적인 SRM 드라이브의 전류파형 및 토오크 리플 특성이며, 이때도 토오크 리플이 가장 적은 속도 및 인가전압으로 조정한 경우이다.

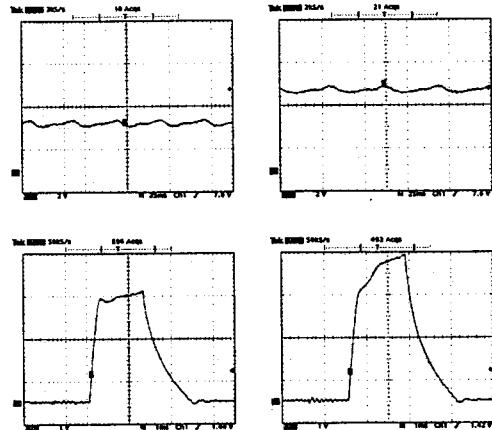


그림 7. 적응모델을 이용한 경우 부하변동에 따른 토오크 리플(위)과 전류파형(아래)

그림 7은 그림 6의 테스트 상태에서 적응 모델제어를 적용한 경우이며 토오크 리플이 효과적으로 감소되었음을 알 수 있다. 이때 토오크 발생구간에서 전류파형은 구간초기에서부터 부하의 증감에도 불구하고 상승하는 파형을 유지하였으며 이는 VRM에서 가변인덕턴스의 변화율이 bulk saturation에 의하여 비선형적으로 감소하는 것을 보상해주는 효과를 갖게 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 SRM 드라이브 시스템에서의 제어변수에 의한 다변한 특성을 조정함에 있어 시스템의 고유한 속도-토오크 특성에 맞게 적응제어함으로써 가장 취약적인 특성 중 하나인 토오크 리플의 발생을 최소한으로 개선할 수 있었다. 여기에 장인한 속도 제어기능을 내포함으로써 안정한 운전을 할 수 있게 되었다.

## (참 고 문 헌)

- [1] S.G. Oh, J.W. Ahn and Y.M. Hwang ; "A Novel Control Scheme for Low Cost SRM Drive" Proc. of IEEE ISIE '95, Athens, vol.1, pp.279-283, July 10-14, 1995.
- [2] I. Husain and M. Ehsani ; "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control" IEEE Trans. on PE, vol.11, no.1, pp.83-88, Jan. 1996