

## 스위치드 릴럭턴스 전동기의 출력 속도-토크 특성을 위한 동특성 시뮬레이션

장석명, 유대준, 조한욱  
충남대학교

### Dynamic Simulation for Speed-Torque Characteristics of SRM

Seok-Myeong Jang, Dae-Joon You, Han-Wook Cho  
Chungnam National University

**Abstract** - Industrial interest in switched reluctance motor (SRM) drives has varied since 1850s. This has been primarily due to the emerging markets for variable speed drives in consumer and industrial products, such as home appliances, air conditioning, hand tools, fans, pump motor, etc. However, SRM has been plagued with the acoustic noise and vibration problem by input power of fixed section. Therefore, This paper offers operating characteristics by dynamic simulation through the generalization of inductance profile and estimation of inductance according to current. the control methode are applied from DSP(digital signal processor) with voltage reference and position detection.

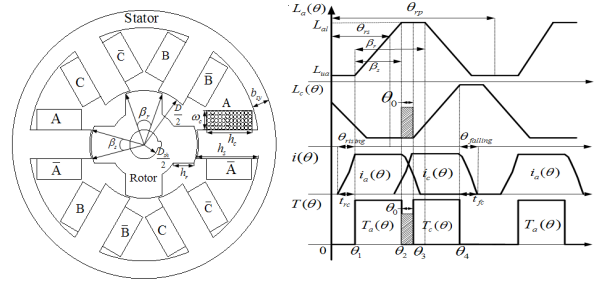


그림. 1 6/4 극을 갖는 SRM

그림. 2 일반적인 SRM의 인덕턴스 프로파일에 따른 구동특성

### 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고, 가격이 저렴하며 토크/관성의 비가 크기 때문에 출력밀도가 우수하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 구동원리상 일정 형태를 가지지 않는 펄스 형태의 상 토크 파형에 의해 토크 리플이 크다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 토크 리플은 소음, 진동의 원인이 되므로 전동기의 효율 및 적용 분야에 있어서 많은 제약을 가지고 있다[1]. 그러므로, 본 논문은 인덕턴스 프로파일의 일반화와 전류에 따른 인덕턴스의 변화를 고려한 SRM의 동특성 시뮬레이션을 통한 구동시 속도-토크 특성을 제공한다.

스위치드 릴럭턴스 전동기의 동작원리는 전류가 고정자의 한 권선에 흐르면, 토크는 회전자가 여자된 고정자의 극에 정렬하는 방향으로 발생되며 발생 토크의 방향은 고정자 여자 상에 대한 회전자 위치에 의해 결정되고, 전류방향과는 무관하다. 또한 연속적인 토크는 회전자 위치에 대해 고정자 각상을 순차적으로 여자하면서 발생한다. 그림. 1은 3상 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자와 가동자의 기하학적인 구조를 보여주고 있다. 가동자의 경우 4극으로 가동자 극호에 따라 스위칭의 턴온과 턴오프 각이 결정된다. 그림.2는 위치에 따른 인덕턴스에 있어서 스위칭된 전압에 의한 전류 파형과 그에 따른 토크를 제시하고 있다. 여기서 토크 리플의 저감을 위하여 고정자와 가동자의 극호는 전류 수를 증가하기 위한 시간에 의해 최적의 상태가 얻어져야 하며 정토크를 얻기 위한 전기적 회로 정수와 부토크를 피하기 위한 전류 소호의 충분한 시간을 가져야 한다. 따라서, 제작된 SRM에 대해 전압 지령 가변속 제어기로부터 무부하시 속도-토크 특성을 얻기 위한 동특성 시뮬레이션을 제시한다.

### 2. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 동특성 시뮬레이션

#### 2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기

그림.2에 있어서 SRM의 설계 조건은 다음의 가정에 의해 제시된다[2].

- 가정: 1. self-starting requirements
- 2. shape of static torque Vs. rotor position

위 가정을 만족하기 위한 노력으로 그림.2로 부터 식(1)을 제시한다.

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 = \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) \leq 0 \quad (1.1)$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \theta_{rs} = \beta_s = \frac{\theta_{rp}}{q} = \frac{4\pi}{p_r p_s} \quad (1.2)$$

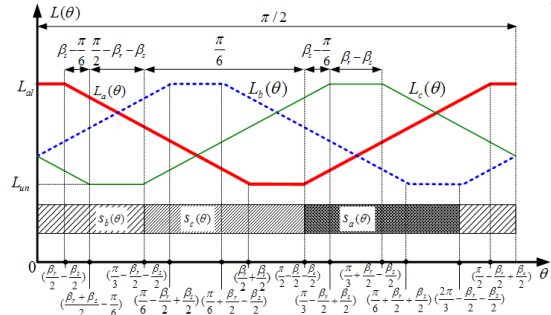


그림 3. 일반화된 인덕턴스 프로파일

$$\min[\beta_s] = \frac{4\pi}{p_r p_s}, \quad \beta_r \geq \beta_s \quad (1.3)$$

여기서,  $p_r = 4, p_s = 6$  일때,  $\beta_s \geq 30$ 보다는 커야 하며, 부 토크와 효율을 고려한 회전자 극호는 고정자 극호보다 커야 한다.

그림.3은 동특성을 위한 일반화된 인덕턴스 프로파일로서 스위칭 각은  $\beta_s$ 의 선정에 따라서 결정되어지며,  $\beta_r$ 의 증가에 따라 전류가 소호되는 구간이 확보되므로 토크리플이 적은 SRM의 특성을 얻을 수 있다. 그림.3의 일반화된 프로파일은 식 (2)의 조건에 의해 얻어진다.

$$\pi/6 \leq \beta_s \leq \beta_r < \pi/3 \quad (2)$$

식 (3)은 SRM의 전압방정식으로 턴온 구간에 있어서 전류인가에 따른 권선의 DC link 전압의 강하와 역기전력으로 표현되어지며, 턴 오프구간에 있어서, 역기전력에 의한 다이오드 도통에 따라 전류에 의한 DC link 전압과의 회로 방정식이 얻어진다[2].

$$V_{DC} = R\dot{i} + \frac{d\lambda(\theta)}{dt} = R\dot{i} + L(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega i \quad (3-1)$$

$$-V_{DC} = R\dot{i} + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (3-2)$$

여기서,  $\lambda(\theta) = L(\theta)i_s$ ,  $\theta = \omega t$ 이며, 토크 방정식은 식 (4)와 같이 얻어진다.

$$T_e = \frac{dW_e}{d\theta} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (4)$$

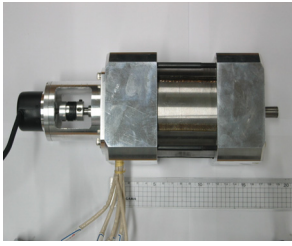


그림 4. 제작된 SRM

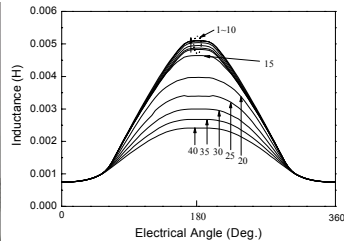


그림 5. 전류에 따른 인덕턴스 프로파일

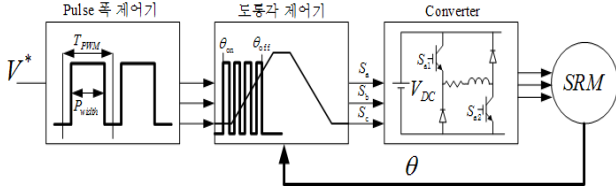


그림 6. 전압 지령 가변속 제어기

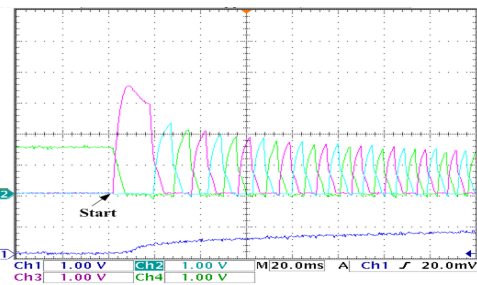


그림 7. 전압 지령에 따른 전류 파형 (2.6178(A)/div)

## 2.2 스위치드 릴럭턴스 전동기의 동특성 시뮬레이션

그림.4는 제작된 SRM을 보여주고 있다. 여기서 가동자의 극호는 33(Deg.)이며, 고정자의 극호는 30(Deg.)로서 권선의 상 저항은 1.4(Ω)과 그림.5와 같은 전류에 따른 인덕턴스 프로파일을 갖는다. 인덕턴스 프로파일의 경우 그림.6은 제작된 SRM의 구동 특성을 얻기 위한 전압 지령 가변속 제어기를 나타낸다[1]. 여기서 DC link 전압 48(V)에 대해 PWM을 이용한 전압지령의 가변이 가능하며, 인덕턴스 프로파일의 예측에 의한 동통각 제어는 SRM에 부착된 엔코더에 의한 위치 검출에 의해 이루어진다. 따라서 48(V)에 대한 Duty ratio는 식 (5)와 같이 얻어지며, 턴 온과 턴 오프의 advance 각은 식(6)과 같이 결정하였다.

$$D = \frac{P_{width}}{T_{pwm}} = \frac{V_{ref}}{V_{DC}} \quad (5)$$

$$t_{onad} = 5(Deg.), \quad t_{offad} = 15(Deg.) \quad (6)$$

그림.7은 무부하시 전압 지령 가변속 제어에 의한 전류 파형을 제시하고 있다.

그림.8과 그림.9는 동특성 시뮬레이션을 위한 위치 검출에 따른 전압 지령과 인덕턴스 프로파일의 생성에 대해 보여주고 있다. 여기서, 인덕턴스 프로파일과 전압 지령은 그림.3의 일반화된 인덕턴스 프로파일의 의해 구현이 가능하며 결정된 가동자와 고정자의 극호에 따라서 구현된다. 그림.10~12는 동특성 시뮬레이션 결과로서, 전압 지령에 따른 상 전압과 3상전류 그리고 속도-토크 특성을 제시하고 있다. 그림.10의 경우 권선에 인가된 PWM 파형은 지령 전압 40(V)에 의해 얻어지며, 가동자의 속도와 고정자의 권선의 전류에 의한 역기전력에 의해 입력 전압이 감소된다. 또한, 스위칭 턴 오프 시 역기전력에 의한 전류의 소호는 다이오드의 환류에 의해 DC link전압의 역전압과 같음을 알 수 있다. 그림. 11의 전류 파형의 경우, 그림.7의 실험 파형과 일치함을 확인할 수 있으나 가동자의 관성과 속도 뎀핑값의 오차에 의해 전류 특성의 예측이 정확하게 일치하지 않음을 알 수 있다. 그림.12의 토크리플은 설계 시 계산된 인덕턴스 프로파일에 대해 스위칭 전압의 턴 온과 턴 오프에 의해 얻어지므로, 여분의 전류 상승 구간과 소호 구간에 대한 턴 온과 턴 오프의 변화에 따라 토크 리플은 감소될 수 있다.

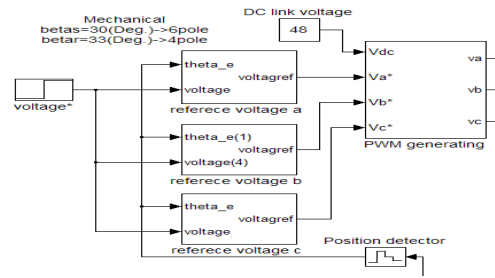


그림 8. 위치 검출에 의한 턴 온과 오프를 위한 전압 지령

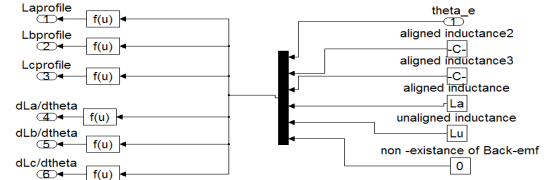


그림 9. 위치 검출에 의한 인덕턴스 프로파일과 토크 생성

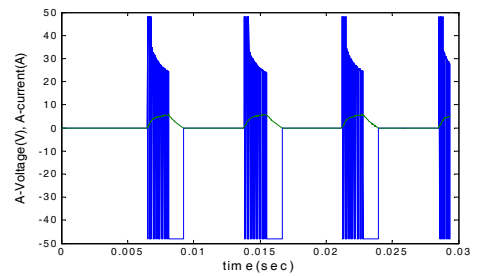


그림 10. 전압 스위칭에 따른 PWM 파형과 전류 파형

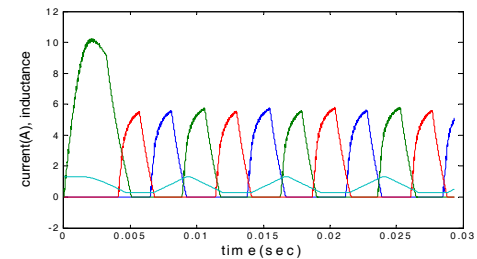


그림.11 인덕턴스 프로파일과 3상 전류

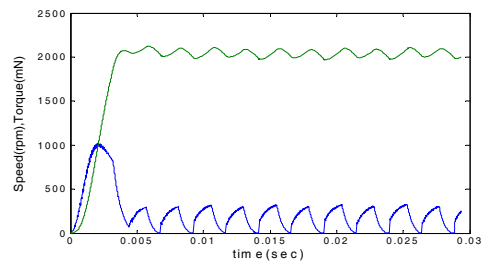


그림.12 전압 지령에 따른 속도-토크 특성

## 3. 결론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구동원리상 일정 형태를 가지지 않는 펄스형태의 상 토크 파형에 의해 토크 리플이 크다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 그러므로 요구조건(속도-토크)을 만족하기 위한 전류에 따른 토크와 속도에 따른 역기전력에 의해 설계가 이루어진다 할지라도, 동통각의 제어 또는 과도 특성에 의해 적용 범위가 결정될 수 있으며, 동특성 시뮬레이션을 통한 속도-토크 특성의 예측이 필요 요구되어진다.

## [참고 문헌]

[1] 김윤현, 김술, 최재학, 이주, "에너지 변환법에 의한 스위치드 릴럭턴스 모터의 토크 추정," 대한 전기학회 논문지, Vol. 50B, No. 8, 2001.  
[2] R. Krishnan "Switched Reluctance motor drives" CRC Press, 2001