

스위치드 릴럭턴스 모터의 고성능 속도제어에 관한 연구

**송병섭 · *윤용호 · *최우석 · *김준호 · *원충연

*성균관대학교

High performance Speed control of Switched Reluctance Motor

*Song Byeang Seab · Yoon Yong Ho · Choi Woo Suck · Kim Jun Ho · Won Chung-Yuen
SungKyunKwan University

ABSTRACT

Advantages of switched reluctance motor(SRM) drives make it an attractive candidate for replacing adjustable speed ac and dc drives in both industrial and consumer applications. Furthermore, a simple, low cost and robust SRM drive can be efficiently operated in the hostile environment of an automobile.

In this paper, novel topology for fast response of various load is proposed. Proposed topology adapts anti-windup PI controller at increasing speed reference and activate braking mode at decreasing speed and forward load.

Experiental results show that proposed topology have fast response characteristics at increasing and decreasing speed reference.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터는 강인성, 기기 제작의 저 비용, 그리고 높은 효율성 때문에 적용범위도 확대되고 있을 뿐만 아니라, 특히 속도제어 및 토크 제어 등 상당한 연구개발이 진행되어 왔다.

일반적으로 부하에 따라서는 정방향 토크 만으로 속도 제어가 가능하지만 관성이 큰 부하 또는 부하가 반대로 작용하는 경우에는 braking 동작을 하여야만 속도 제어가 가능하게 된다.

본 논문에서는 제어용 SRM의 속도응답 특성을 개선하기 위하여 4상한 동작 제어를 통해 감속시 및 역토크 부하가 걸릴 경우의 응답특성을 개선하고자 한다. 속도 응답특성을 좋게 하기 위해 anti-windup PI제어기를 사용하였고, 속도 error와 anti-windup PI제어기를 통해 나온 제어량을 비교하여 적당한 시점에서 braking 동작 신호를 발생하

게 하였다. 또한 braking 동작시에도 anti-windup PI제어기에 의해 제어되도록 하였다.

시스템 구성은 80c196kc를 사용하여 증분형 엔코더에서 나온 펄스로 속도를 계산하고, 엔코더 신호와 EPROM에 저장된 data를 이용해 회전자 위치를 알아낼 수 있도록 하였다. 컨버터는 비대칭 브리지 컨버터를 사용하여 히스테리시스 전류제어로 토크 리플을 저감 하였다.^{[1][2]}

2. 본 론

2.1 SRM의 동작 원리^[1]

그림 1과 2에 SRM의 구조와 인덕턴스 및 토크 발생 구간을 나타내었다.

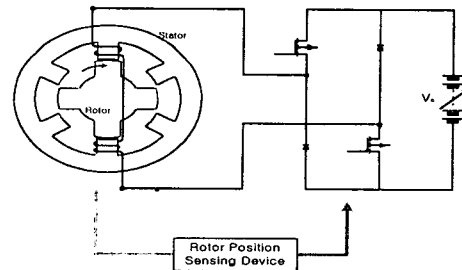


그림 1 SRM의 구조 및 구동 시스템
Fig. 1 Structure of SRM and Drive system

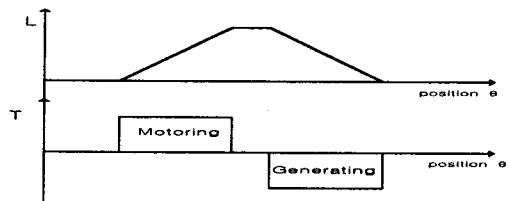


그림 2 SRM의 인덕턴스와 토크 발생
Fig. 2 Inductance and Torque generation of SRM

그림 2에서 인덕턴스의 증가 구간에서는 정토크가 발생되지만 감소 구간에서는 역 토크(braking

동작) 즉 발전 동작을 하게 된다. 이와같이 일반 다른 모터와는 달리 전류의 방향에는 상관없이 인덕턴스의 증가·감소에 따라 토크 방향이 달라지게 된다.

2.2 SRM의 정·역 운전 및 braking 동작

그림 3에 회전 방향에 따른 스위칭 순서를 나타내었다.

정방향 운전시 θ 가 증가함에 따라 각상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서 스위칭을 해주게 되면 정토크가 발행하게 되고, 감소하는 구간에서 순차적으로 스위칭을 하게 되면 역토크가 연속적으로 작용하게 된다.

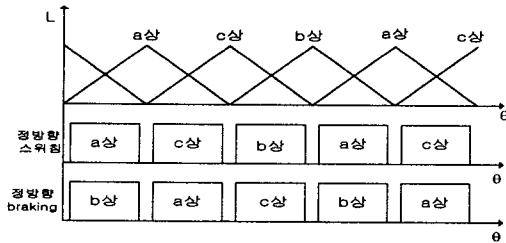


그림 3 인덕턴스에 따른 여자상 순서
Fig. 3 Commutation Signal of forward starting and forward braking

정방향 스위칭 순서 : a --> c --> b --> a --> c
정방향 braking : b --> a --> c --> b --> a

또한 역방향 운전시에도 같은 방법으로 스위칭 순서를 정할수 있게 된다.

이러한 스위칭 패턴은 위치 정보를 갖고 있는 EPROM에 제어 신호를 통해 선택 할 수 있게 구성함으로써 쉽게 구현 할 수 있다.

스위칭 패턴을 비교해 보면 정방향 braking 동작 스위칭과 역방향 정토크 스위칭이 연결되어 사용됨을 알 수 있는데, 이것은 braking 동작이 필요 이상으로 작용했을 때 역방향으로 회전하는 현상이 발생할 수도 있다는 것을 알수 있다. 그러므로 제어 신호는 신속하게 모드를 바꿀 수 있도록 구성되어야 한다.

2.3 SRM의 토크 발생과 발전원리^[1]

정토크 영역 수식과 braking 동작 영역에서의 토크 식은 인덕턴스의 기울기가 반대이므로 수식 또한 다르게 해석되어야 할 것이다.

SRM의 전압방정식은

$$V = Ri(\theta) + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$= Ri(\theta) + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{d\theta}\omega$$

여기서 첫째 항은 고정자 권선의 저항에 의한 성분이고, 둘째 항은 자기회로에 축적되어지는 에너지의 변환성분이며, 셋째 항이 기계적 에너지로 변환되는 성분이다. 이 때의 토크 식을 구하기 위하여 Coenergy W_c 의 개념을 도입하면

$$W_c = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \cdot L(\theta) \quad (2)$$

여기서, $i(\theta)$: 상권선의 전류, $L(\theta)$: 인덕턴스로 나타낼 수 있고, 또한 수식 (2)는

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

로 표현될 수 있다. 여기서 SRM의 발생 토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.^[1] 즉 인덕턴스의 기울기가 (+)일 때는 정토크, (-)일 때는 부토크가 발생함을 수식적으로 알 수가 있다.

(1)식에서 3번째 항은 정방향 정토크 발생시 역기전력을 발생하여 전류를 감소시키는 방향으로 전압을 발생 시키지만 braking 동작시에는 인덕턴스의 기울기가 (-)이므로 전류를 증가시키는 방향으로 역기전력이 작용하여 발전기로 동작됨을 알 수가 있다.

그림 4와 그림 5, 6은 정토크 동작과 braking 동작시 전류파형을 도식화하여 나타내었다.

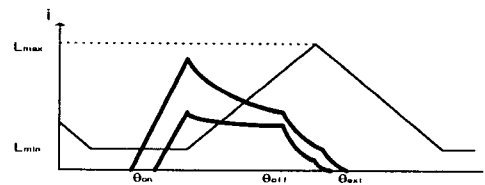


그림 4 정토크 발생시 전류파형
Fig. 4 Current waveform of forward torque

그림 5와 6은 소호각에 따른 발전전류의 파형을 보여주고 있는데 그림 5는 충분한 여자 전류를 공급받은 경우로써 큰 전류가 회생되는 것을 보이는 반면에 그림 6은 적은 여자전류로 인해 작은 전류만이 회생되고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 발전되는 전류양은 소호각으로부터 결정되는 것을 알 수 있다.^[3]

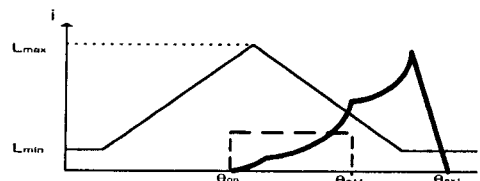


그림 5 a braking(역토크)동작시 전류파형
Fig. 5 Current waveform of braking mode (overexcitation)

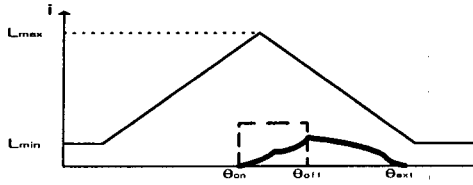


그림 6 braking(역토크)동작시 전류파형
Fig. 6 Current waveform of braking mode (underexcitation)

2.4 제어기 구성

anti-windup PI 제어기는 적분항의 wind-up 현상을 피하는 방법중의 하나로 많이 이용하고 있고, 출력이 제한되지 않는 경우에는 PI제어기와 동일한 동작을 하게 되고, 출력이 제한되는 경우 제어기의 출력(v)과 실제로 인가된 출력(u)사이의 오차가 궤환되어 적분항을 감소시킨다.

그림 7은 본 논문에서 이용된 anti-windup PI 제어기에 braking 모드 신호발생의 블록도를 나타낸다.^[2]

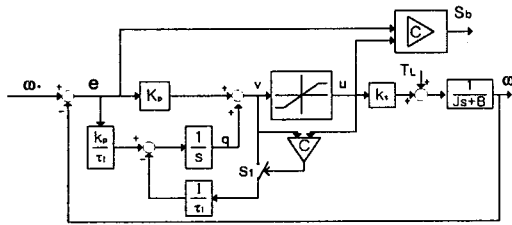


그림 7 anti-windup 제어기 블록도
Fig. 7 Block diagram of anti-windup PI controller

위 제어기 블록도에서 적분기 출력의 상태변수 \dot{q} 는 다음과 같다.

$$\dot{q} = \begin{cases} \frac{k_p}{\tau_I} e & \text{if } u = v \\ \frac{k_p}{\tau_I} e - \frac{1}{\tau_I} v & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (4)$$

만일 속도 명령이나 큰 부하가 걸렸을 때 제어기는 포화영역으로 들어가게 되고, $\frac{1}{\tau_I} v$ 항이 적분기를 빠르게 영으로 만들어 주게 되어 windup되는 것을 방지하게 된다.

또한 제어기의 출력 u와 속도 error를 이용해 braking 동작신호 S_b 를 발생하도록 구성하였다.

2.5 시뮬레이션

시뮬레이션은 PSIM을 이용하여 그림 8과 같이 구성하여 하였다.

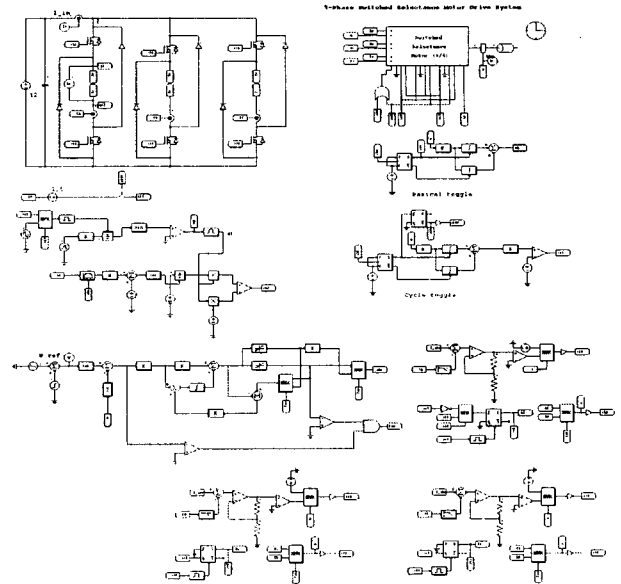


그림 8 시뮬레이션 전체 구성도

그림 9, 10, 11은 PI 제어기, anti-windup 제어기, anti-windup + braking제어를 했을 때의 속도, 전류등의 파형을 비교하였다.

일반 PI제어기인 경우 속도 증가시 overshoot가 발생하고 감속시에도 overshoot와 긴 시간을 필요로 한다. 그러나 anti-windup PI제어기인 경우 속도 증가시에는 overshoot없이 속도를 따라감을 볼 수 있지만 감속시 PI보다는 빠르지만 부하에 따라 약간의 시간이 걸리는 것을 볼 수 있다.

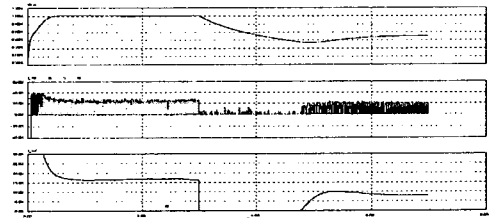


그림 9 일반 PI 제어기
Fig. 9 Conventional PI Controller

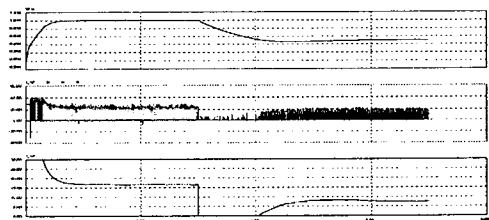


그림 10 anti-windup 제어기
Fig. 10 anti-windup Controller

그림 11은 제안된 사상한 동작 시스템으로 구성했을 때의 응답 파형으로 속도 증가시에는 anti-windup PI 제어기와 같은 특성을 볼 수 있고, 감속시에는 braking 동작을 하여 빠른 감속과 기준 속도에 속응하는 것을 볼 수 있다.

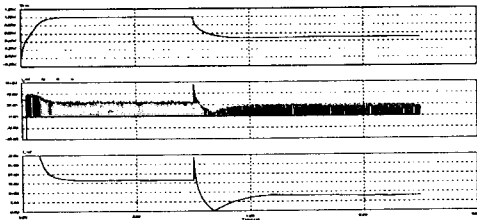


그림 11 anti-windup 제어기 + braking 제어
Fig. 11 Anti-windup Controller with Braking mode

2.6 실험

본 논문의 실험은 12V, 250W 6/4pole SRM을 이용하여, 80c196kc로 제어부를 구성하였고, 비대칭 브리지 컨버터를 이용해 히스테리시스 전류제어를 하였다.

그림 12는 전체 시스템 구성을 보여준다.

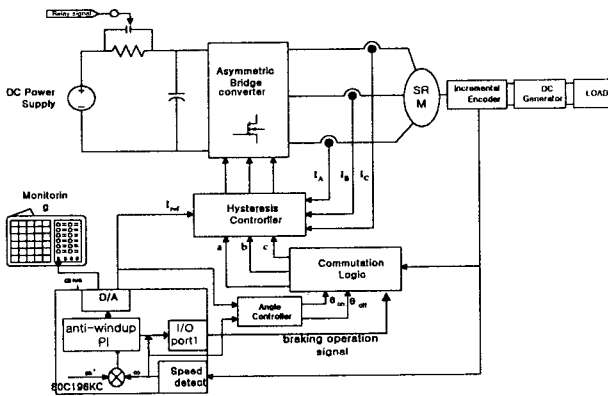


그림 12 전체 시스템 구성
Fig. 12 Set-up of SRM driving system

그림 13, 14, 15에 사용된 부하는 관성이 큰 부하를 이용하여 실험 하였고, 그림 14에서 감속시 reference가 zero임에도 부하 관성에 의해 약 2.5s가 걸리는데 비해 그림 15에서는 braking 동작에 의해 빠른 응답시간(1.5s)을 보여주고 있다. 또한 braking 동작 영역에서는 그림 5와 6과 같은 전류파형이 나타나는 것을 볼 수가 있다.

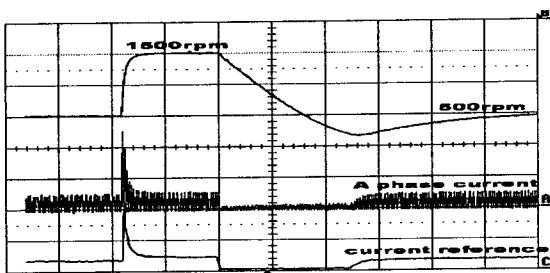


그림 13 일반 PI 제어기를 사용 했을 때
(2s/div. 10A/div)

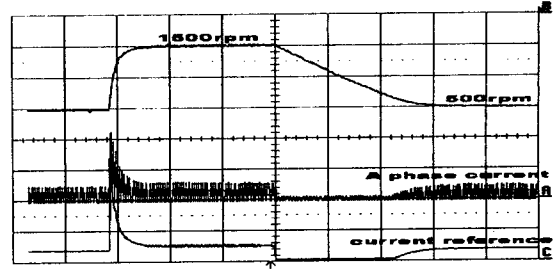


그림 14 anti-windup PI 제어기를 사용했을 때
(1s/div. 10A/div)

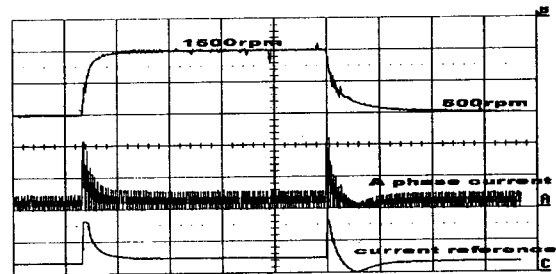


그림 15 anti-windup 제어기에 braking 동작을 첨가 했을 때 (1s/div. 10A/div)

3. 결 론

본 논문에서 사용한 anti-windup PI제어기에 braking 동작을 포함하여 구성한 시뮬레이션과 실험을 통한 파형에서 같은 결과 속도 증가와 감속시에 빠르고 안정된 속도 파형을 얻을 수 있었다. SRM은 다른 모터에 비해 간단한 구조를 갖고 있고, 간단한 제어방법으로 4상한 동작을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 저가형 제어기와 기존의 시스템에 약간의 수정과 위치 data를 수정함으로써 4상한 동작을 구현할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Oxfjord University press, 1993.
- [2] Hwi-Beom Shin, "New Antiwindup PI Controller for Variable-Speed Motor Drives," IEEE Trans. Ind. Vol. 45, No. 3. June 1998.
- [3] 전형우, 김영조, 김영석 "PID제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력전압 제어," 전력전자 학술대회 논문집 p. 701~704, 2000,
- [4] 엄기명, "차량용 SRM의 가변속 구동을 위한 퍼지 제어기 설계" 성균관대 석사학위논문, 2000.
- [5] M.Stiebler, S. Gotovac, "A Switched-Reluctance Servo Drive"
- [6] Yang Haiqing, Sanjib K. Panda, "Performance Comparison of Sliding Mode Control with PI Control for For-quadrant Operation of Switched Reluctance Motors"