

차량용 스위치드 리럭턴스 전동기의 속도 제어에 관한 연구

윤용호* · 송봉철* · 송병섭* · 최준혁* · 원충연*
성균관대학교*

Speed Control of a Switched Reluctance Motor for Vehicle

Yong-Ho Yun · Bong-Chul Song · Byeang-Seab Song · Jun-hyuk Choi · Chung-Yuen Won
Sung Kyun Kwan University

ABSTRACT

Switched Reluctance Motors(SRM) are a promising candidated automotive drives of the next generations. The successful commercialization of SRM drives in automobiles depends highly on the developments of SRM design and control techniques. This paper describes the control issues of SRMs, ranging from drive system structure, rotor position sensing and torque control. Both simulation studies and test re-sults are presented for a 160W SRM drive for automotive application.

못한 자동차용 모터부품 업체는 가격 면에서 국제경쟁력을 상실하게 될 것이다.

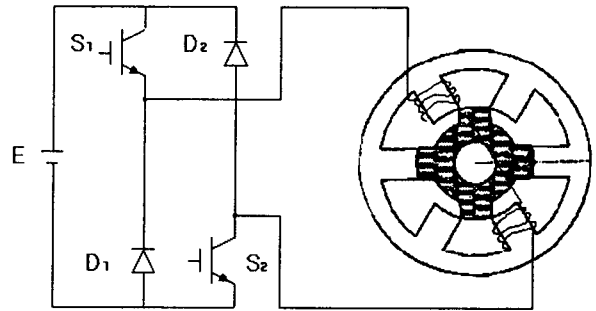


그림 1 사용된 SRM의 기본 구조

1. 서 론

국내에서는 아직 차량용으로 SRM의 적용은 시도 되지 못하고 있다. 1990년 이후 일부 학계와 연구소 등에서 SRM에 대한 많은 관심을 갖고 구동회로를 중심으로 연구를 수행중이나 SRM의 설계 및 최적 제어기술의 핵심부분의 기술축적이 부족한 실정이다.

일부 가전업체에서는 가전기기 (세탁기, 냉장고, 진공청소기)에의 적용을 위하여 시제품을 제작한바 있다. 국외적으로는 1990년대에 SRM의 연구와 개발이 활발해져 진동소음 특성개선을 위한 스위칭전원 컨버터 구성 다양한 제어방식의 적용 등의 드라이버 제어 기술에 많은 발전이 있었다.

그에 따른 차량용 SRM의 응용사례들이 상업화에 이르는 다양한 제품들을 개발하였다.

보통 자동차 한 대당 최대 20개의 전동기가 필요한데 SRM의 특성(구조적 견인성, 내열성, 유지보수성, 고효율밀도)이 자동차의 환경에 가장 적합하고 경제성이 있다.

그러므로 현재 사용되고 있는 영구자석 DC전동기 및 브러시리스 직류전동기를 대체하기 위한 차량용 SRM 및 드라이버개발이 절실히 필요하며 이에 대응하지

따라서 본 논문에서는 라디에이터 Cooling Fan용, 점화용 Starter, 오일펌프 및 냉각순환용의 SRM용 드라이버를 제작하여 실험 및 시뮬레이션을 거쳐 타당성을 검증하였고 실용화에 문제점으로 지적되고 있는 토크 리플을 저감하기 위해 히스테리시스 전류제어방식을 사용하였다.[4]

또한 경제성을 가진 구동 시스템을 설계하기 위해서 고가의 절대 엔코더에 비해 저렴한 증분형 엔코더를 사용하였으며, 80C196KC를 이용하여 저 가격 시스템에 PI 제어 시스템을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 구조 및 동작원리

본 논문에서 사용한 고정자 극수가 6개, 회전자 극수가 4개인 3상 6/4극 SRM이며, 고정자와 회전자가 모두 돌극형 구조로, 고정자에는 권선이 감겨져 있으나 회전자에는 권선이나 영구자석이 없는 구조를 적용한 구조로 되어 있다.[1-2] SRM은 고정자 권선을 여자 시킬 때 가장 가까운 회전자극이 고정자와의

쇄교자속이 최대가 되도록 하는 방향, 즉 자기저항이 최소가 되려는 방향으로 회전하려는 전자석의 원리를 이용한 전동기로 순차적으로 스위칭 하여 여자 되는 고정자상을 바꿔 줌으로써 회전자가 지속적으로 회전하게 된다. 또한 이러한 고정자 여자순서에 따라 정·역의 회전방향을 결정할 수 있다.[1-2]

고정자와 회전자의 상대적인 위치에 따라 자기회로의 릴럭턴스가 변하게 되며, 고정자와 회전자의 두 극이 일직선상에 있을 때 자기저항은 최소값을 가진다. 즉 SRM은 자기저항이 최소가 되는 시점에서 다음 여자 시킬 상을 스위칭 하여 구동력을 얻는다.

2.2 SRM의 토크 발생

SRM의 전압방정식은

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

V : DC링크전압 λ :쇄교자속 r :상의 권선저항 I:상 전류

식 (1)의 두 번째 자속쇄교에 관한 미분항은

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

로 쓸 수 있다 $L(\theta, i)$:자기 인덕턴스

전동기 속도가 일정하다고 가정하여 식 (2)의 $\frac{d\theta}{dt}$ 를 ω 로 둘 때

$$V = r i + \omega \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i + L(\theta) i \frac{di}{dt} \quad (3)$$

과 같이 된다. 또한 식 (3)을 순시입력으로 나타내면

$$V i = r i^2 + \omega \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 + L(\theta) i^2 \frac{di}{dt} \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 식 (4)의 각항은 저항에서 발생하는 손실과 자계에 저장된 에너지의 미분값과 기계적으로 출력의 항으로 구분될 수 있다. 이 때의 토크 식을 구하기 위하여 Coenergy W_c 의 개념을 도입하면

$$W_c = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \cdot L(\theta) \quad (5)$$

여기서, $i(\theta)$: 상권선의 전류, $L(\theta)$: 인덕턴스로 나타낼 수 있고, 발생 토크는 coenergy를 위치각 θ 로 미분한 값으로 식 (6)과 같다.

$$T = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (6)$$

로 표현될 수 있다. 식 (5)을 식 (6)에 대입하여 발생 토크는 식 (7)과 같다.

$$T_{total} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{dL} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-30^\circ)}{dL} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-60^\circ)}{dL} \quad (7)$$

여기서 SRM의 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 그림 2.는 회전자 위치에 따른 토크 발생과정을 보여준다.

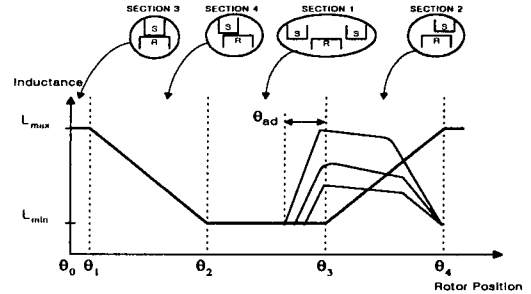


그림 2 회전자 위치에 따른 토크 발생과정

토크 발생구간인 인덕턴스의 가변 구간에서 인덕턴스의 변화량이 일정하고, 전류변화가 없는 Flat-top 전류를 갖게 조정하면 전류의 변화량(di/dt)이 0이 되어 토크의 리플성분을 줄일 수 있게 되고 일정속도로 운전할 수 있다.[2]

2.3 히스테리시스 전류 제어기

이 제어기는 각상의 전류 오차가 크기에 근거하여 전동기에 인가될 전압을 결정하는 일종의 뱅뱅 제어기이다. 그림 (3)에 한 상에 대한 히스테리시스 제어기의 블록 다이어그램을 보인다. 각 상 전류의 오차가 정해진 허용 오차 범위폭 즉, 히스테리시스 폭 내에 있도록 각 상의 전원과 부하 사이의 스위칭소자의 온, 오프 상태를 제어한다. 히스테리시스 제어기는 구조가 간단하고, 실현이 용이하며, 과도 응답 특성이 우수한 장점이 있다. 그러나, 인버터의 스위칭 주파수가 히스테리시스 폭, 직류 링크 전압, 전동기 정수 및 동작점에 따라 크게 변하는 단점을 지닌다. 따라서 스위칭 주파수로 인한 소자의 열파괴를 방지하기 위해 히스테리시스 폭을 충분히 크게 설정해야 하는데 이것은 정상 상태의 전류 리플을 증가시키는 요인이 된다. 따라서 히스테리시스 제어기는 스위칭 주파수가 동작점에 따라 크게 변화하므로 대용량 전류 제어기로는 부적합하고 저가 실현을 위한 고주파 스위칭 인버터 시스템에 적합하다.[7]

SRM의 토크는 식 (7)에서 알 수 있듯이 전류의 제곱에 비례하므로 전류를 일정(Flat-Top)하게 유지하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 SRM의 가변속 구동을 위하여 실제 전류를 피드백 받아 계산된 제어량과 비교하여 전압을 초핑하는 히스테리시스 전류제어를 적용하였다. 전류센서(CT : Current Transformer)로부터 얻어진 실제 전류(I_{real})와 80C196KC에서 계산된 제어량(I_{ref}) 사이의 오차(error)가 OP-amp 반전단자의 입력으로 가해지고, 다시 OP-amp의 출력은 저항으로 분압되어

저 비반전 단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다. 이렇게 실제 전류, 제어량 사이의 오차 값과 밴드의 비교를 통해 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하도록 구성되어 있다.[1]

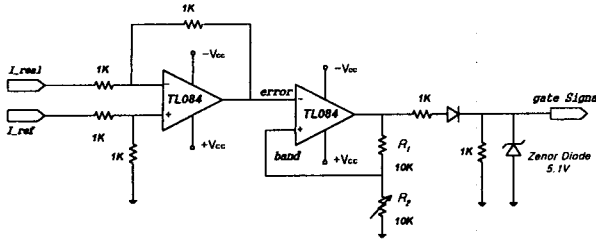


그림 3 히스테리시스 전류제어기

2.4 시뮬레이션

본 논문에서는 SRM의 입력측 DC링크 전압의 맥동과 비대칭 브리지 컨버터에서 스위치 및 다이오드의 손실을 무시하며 자기포화가 없다는 가정으로 하였다.

시뮬레이션은 C언어로 프로그램을 작성하였으며, 미분방정식의 해를 구하기 위해 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

그림 4~6은 속도 가변(1000rpm→1500rpm)시 속도 파형과 정상상태(1000rpm)에서의 전류 파형과 상전압 파형을 보여주고 있고 그림 7은 2000rpm→1500rpm시 속도 파형을 나타내고 있다.

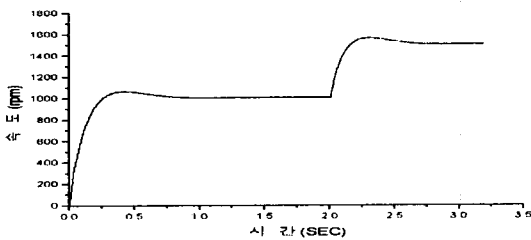


그림 4 속도 파형(1000rpm→ 1500rpm)

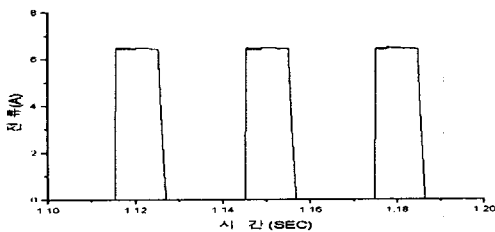


그림 5 전류 파형 (1000rpm)

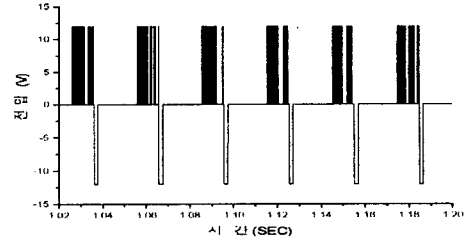


그림 6 상전압 파형

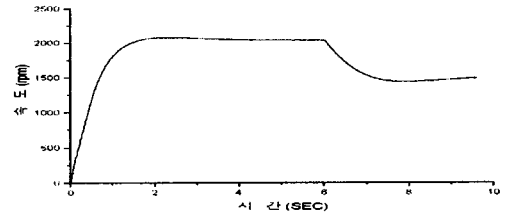


그림 7 속도 파형(2000rpm→ 1500rpm)

2.5 실험 결과

표 1 실험에 사용된 모터상수

상 수	3 [상]
출 력	160 [W]
최 대 속 도	2200 [rpm]
고 정 자 속 도	6 [극]
회 전 자 극 수	4 [극]
권 선 저 항	0.04166[Ω/상]
최 대 인덕턴스	2.232[mH]
최 소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호(β_s)	30°
회전자 극호(β_r)	32°

그림 8은 전체 실험 장치 구성도로서 전원회로부에서 입력 전원은 차량용 Battery(12V), 컨버터는 효율 및 제어 성능이 우수한 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였다. 제어회로부에서 속도 제어를 위해서 PI 제어기, 초기 기동을 위해 80C196KC의 PORT1을 사용하였다.

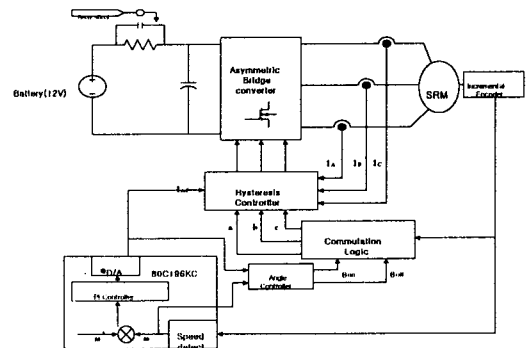


그림 8 실험장치 구성도

그림 9.은 1000rpm에서의 3상 히스테리시스 전류 파형을 나타내고, 그림 10.는 상전압 파형을 나타낸다.

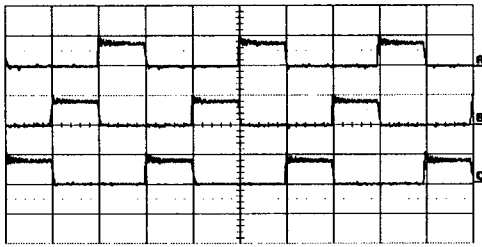


그림 9 1000rpm에서 3상 전류파형
(time=10ms/div, y=10A/div)

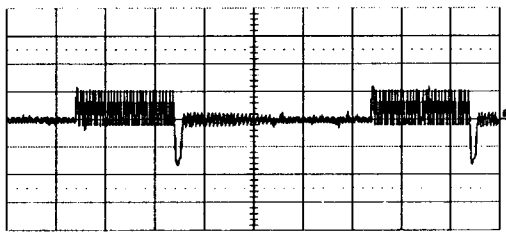


그림 10 1000rpm시 상전압 파형
(time= 10ms/div, y=10v/div)

그림 11.은 부하를 인가한 상태에서 속도 증가시 응답 파형이고, 그림 12.은 2000rpm에서 1500rpm으로 속도가 변시 파형을 나타내고 있다.

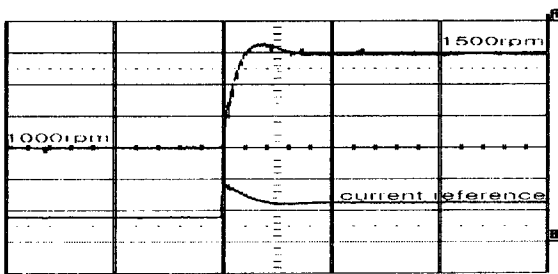


그림 11 속도 증가시 응답 파형(70W 부하)
(time=1s/div, y=500rpm/div)

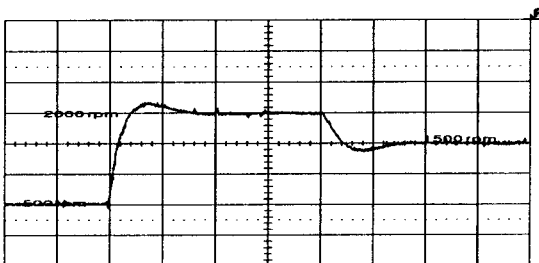


그림 12 속도파형 (2000rpm→ 1500rpm)
(time=2s/div, y=500rpm/div)

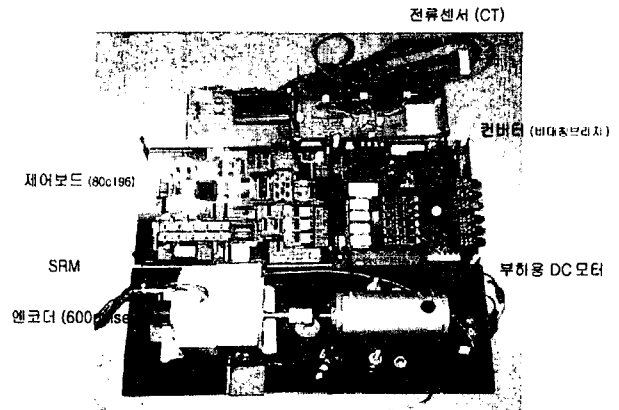


그림 13 전체 실험 세트

3. 결 론

본 논문에서는 160W급 차량용 스위치드 리럭턴스 전동기 가변속에 일반적인 PI제어기를 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 근사 증분형 엔코더와 카운터 회로에 의해 위치 정보를 검출하고 경제성이 있는 80C196KC로 속도제어를 하였다.
- 2) SRM 구동용 컨버터는 제어성능 및 효율 면에서 우수한 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였고 시스템 보호를 위해 과전류 보호 회로를 구성하여 시스템 안정성을 확보하였다.
- 3) 인덕턴스의 비선형 때문에 일어나는 맥동토크를 줄이기 위하여 히스테리시스 제어기를 사용하였고,PSIM 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. J. E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford University press, 1993.
- [2] Giuseppe S. Buja, Roberto Menis and Maria I Valla, "Variable Structure Control of an SRM Drive." IEEE Trans. on IE, vol. 40, No .1, Feb 1993.
- [3] K. Russa, I. Husain, ME. Elbuluk, "Torque - Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range", IEEE IAS pp. 668~671, March/April, 1998.
- [4] 엄기명, "차량용 스위치드 리럭턴스 전동기의 토크 리플 저감", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1120~1122, 2000.
- [5] S. Bolognani, M. Zigliotto, "Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive", IEEE IAS Annu. Meet. pp. 2049~2054, 1993.
- [6] 유 지운 "산업용 유도 전동기의 새로운 속도 제어 기술"
- [7] Bimal k. Bose "Power Electronics and Variable Frequency Drives" IEEE Press pp. 180~182.