

저가형 엔코더를 이용한 저속 전기자동차용 SRM의 스위칭각 제어

이상훈 *박성준 **안진우 임현호 ***김철우
KT전기(주). *동명대. **경성대. ***부산대

A Switching Angle Control of SRM for Low Speed Electric Vehicle Using Low-cost

Sang-Hun Lee, * Sung-Jun Park, ** Jin-Woo Ahn, Heon-Ho Lim, *** Cheul-U Kim
KT Electric .Ltd. Co. *Tongmyung College, **Kyung Sung Univ, ***Pusan Nat'l Univ.

Abstract - 본 연구에서는 홀소자를 이용한 저가형 엔코더와 제어를 제안하고 이를 통한 연속적인 회전자 위치추정을 통해 최적의 스위칭 온/오프시점을 결정함으로써 저속 전기자동차 구동용 SRM의 기동특성과 주행 성능을 실험을 통해 확인하였다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 고효율, 고속운전, 간단한 전자기적 구조, 그리고 용이한 가변속 제어 등의 장점을 가지고 있어 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 그 실용적 가치가 한층 더 높아지고 있으나 전자기적 구조설계의 최적화, 제어장치와의 결합성, 제어방식의 향상, 소음 진동과 맥동토크의 최소화 등 몇가지 해결해야 할 문제점이 있다. 특히, SRM은 이중돌극형 자기적 구조를 가지고 있고 펄스형 전원에 의해 구동됨으로 제어장치와의 결합성을 재고하고 운전특성을 향상시킬 수 있는 제어방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

이와 함께 최근 자동차 배출가스에 의한 공해문제와 주저지를 중심으로 한 근거리 이동수단으로서의 전기 자동차에 대한 관심이 대두되면서 차량 구동원으로서의 SRM의 실험적 접근과 상용화에 대한 평가가 국내외적으로 이루어지고 있다. 특히 SRM은 일반적인 전동기에 비하여 전자기구가 간단하고 고효율성, 경제성, 시스템 제어성의 강인성, 우수한 견인특성, 우수한 동차속도 영역, 짧은 end-turn, 높은 출력/중량비, 토오크/관성비와 같은 장점을 가지고 있기 때문에 그 실용적 가치가 높다. 또한 SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하기 때문에 고속 운전이 가능한 장점을 가진다. 반면에 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 하기 위해서는 회전자 위치에 대한 정보가 필연적으로 요구된다. 일반적으로 회전자의 위치검출은 증분형 및 절대치형 엔코더나 레졸버등을 사용하기 때문에 비용상승의 부담을 갖게 된다.

따라서 본 연구에서는 Hall IC를 이용한 120도형 저가형 엔코더와 제어를 사용하여 연속적인 회전자 위치추정을 하게 된다. 그리고 이를 통해 최적의 스위칭 on/off 시점을 결정함으로써 저속 전기자동차 구동용 SRM의 속도에 따른 구동 특성을 실험을 통해 고찰하였다. 또한 제한한 제어방식은 엔코더 및 제어기의 저가격화와 더불어 구동시스템의 안정화를 구현함으로써 차량 구동원으로서의 SRM의 실용화 가능성을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작 원리

SRM은 돌극형 자기구조를 가지며 단방향 여자방식으로 구동된다. 고정자 상권선에 여자 에너지를 인가했을 때 자기구조에 의해 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 구동 토오크가 발생하며 순차적이고 적절한 상여자를 통해 연속적인 회전력을 얻기 위해 스위칭 인버터가 필요하다. SRM의 각 상에서 발생한 토오크는 식 (1)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

SRM에서 릴럭턴스 토크를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient type)으로 하여 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 스위치-온 시점과 스위치-오프 시점에서 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다[2,3].

2.2. 일반적인 SRM 인버터의 스위칭 모드 해석

SRM제어용 인버터로 가장 많이 사용되고 있는 비대칭 브릿지 인버터의 동작모드의 그림 1에 나타내었다. 이 인버터는 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지며 크게 3단계의 동작모드를 가진다.

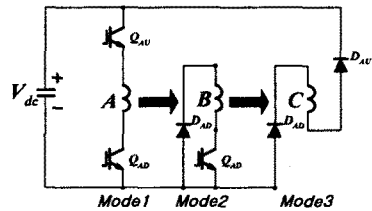


그림 1 비대칭 브릿지 인버터의 동작모드
Fig. 1 Operation mode of asymmetric bridge converter

모드 1은 두 스위치를 모두 턴 온 시켜 DC 전원 전압 (V_{dc})을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다. 모드 2는 전류제어기에 사용되는 모드로 단방향 전류제어기 권선에 흐르고 있을 전류를 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 한다. 모드 3은 두 스위치를 모두 턴 오프하여 권선전류가 두 다이오드를 통해서 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다. 이 때 해당 상의 인덕턴스가 음의 기울기(negative slope)를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키거나 아주 적은 양이 되도록 해야 한다. 그렇지 않으면 부(negative)토크를 발생시키게 되어 전동기의 평균 토크가 줄어들게 되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다. SRM의 스위칭각 제어에는 모드 1의 영역에 의해 출력토크는 영역의 제곱에 비례하는 특성으로 이 영역의 크기로 출력을 제어하는 것이 보통이다. 따라서 모드 1 영역에 따른 출력특성을 고려해 볼 필요성이 있다.

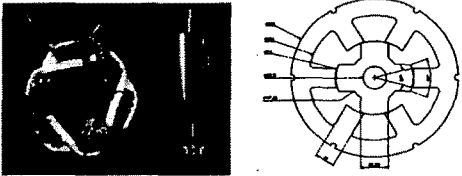
2.3. 시스템 구성

본 연구에서 개발하고자하는 LSV용 SRM 사양은 표1과 같다. SRM의 설계를 위한 치수의 선정 및 설계 변수조정에 따른 영향을 검토하기 위해서 SRM의 설계보조를 위한 소프트웨어인 PC-SRD를 이용하여 설계의 정확성을 고려하였다.

표 1. LSV용 SRM의 설계사양
Table 1. Specification of SRM for LSV

출력	3.2 [Kw]	회전자 극수	4
사용전압	72[V]	회전자 극호	42
토크	7.6[Nm]	공극	0.25
정격속도	4000[rpm]	상당저항	0.01[ohm]
고정자 극수	6	최소인덕턴스	0.419[mH]
고정자 극호	29	최대인덕턴스	3.368[mH]

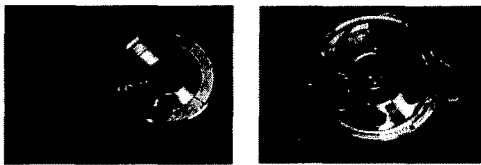
그림 2는 개발 전동기의 고정자와 회전자의 구성을 나타낸다. 그림 2(a)는 제작된 6/4 SRM의 조립전 사진이며 그림 2(b)는 피실험 SRM의 단면도를 나타낸다.



(a) 고정자와 회전자 (b) 단면도
(a) stator & rotor (b) cross-sectional view

그림 2. 고정자와 회전자의 구성
Fig 2. Configuration of stator and rotor

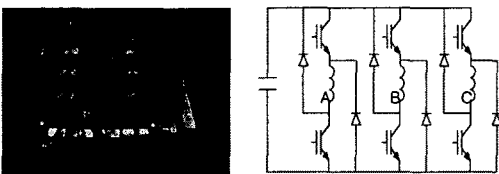
그림 3은 피실험 전동기의 위치검출을 위한 엔코더의 구성을 나타낸다. 위치검출을 위해 고정자 축상에 8극 자기 디스크를 취부하였으며 3개의 Hall IC를 통해 해당 위치정보를 추정하게 된다. 이로 인해 기계각 1회전시 전기각4회전에 해당하는 위치정보를 얻을 수 있다.



(a) 8극 자석 원판 (b) Hall IC 기판
(a) 8 pole magnetic disk (b) Hall IC PCB

그림 3. 홀 IC를 이용한 엔코더 구성
Fig 3. Configuration of encoder using a hall IC

그림 4는 제작된 전동기를 구동하기 위한 인버터의 구성으로서 기존의 비대칭 브릿지 구조를 사용하고 있다.



(a) SRM구동용 인버터 (b) 회로구성
(a) Inverter for SRM driving (b) Circuit Config.

그림 4. SRM 구동용 인버터 구성
Fig 4. Configuration of Inverter for SRM driving

그림 5는 피시험기의 구동을 위해 사용한 전체 시스템을 나타낸다. TI사의 F241프로세서를 사용하였으며 위치각 추정을 위해 캡처 인터럽트와 타이머 인터럽트를 각각 이용하였다. 또한 기동과 고속영역에서의 원활한 운전을 위해 각도 예약 기법을 통한 스위칭각을 제어하여 최적의 스위칭 on/off 각을 결정하였다.

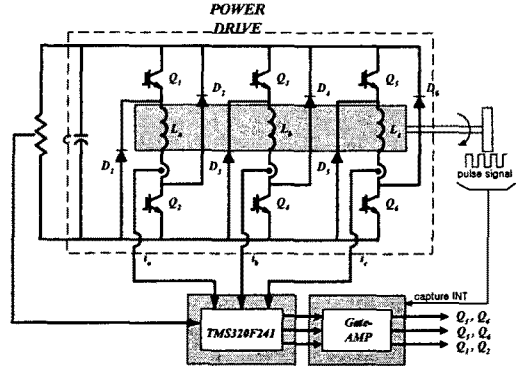


그림 5. 전체 제어기 구성
Fig 5. Configuration of overall controller

2.3. 실험

상술한 내용에 대한 검증을 위해 제시한 제어시스템을 이용하여 그에 대한 실험을 행하였다. 그림 6은 400[rpm]의 속도로 전동기가 회전할 때 제작한 엔코더의 Hall IC의 출력신호와 이를 캡처인터럽트를 통해 추정된 위상각을 D/A 출력 카드를 통해 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 Hall IC출력신호에 따른 추정 위상각이 선형적이며 이를 통해 양호한 추정이 이루어짐을 알 수 있다.

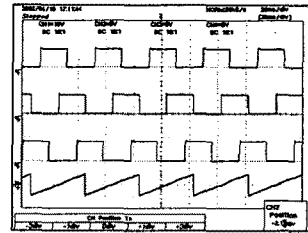


그림 6. 엔코더 출력신호(400[rpm])
Fig 6. Output signals of encoder(400[rpm])

본 연구에서는 피 시험 전동기를 구동하기 위해 사용한 인버터에서 각 상 게이팅 신호는 워턴 스위치의 경우는 해당 여자구간에서 단일 펄스형태의 신호를 인가해주고 아랫단 스위치는 토크 지령치에 비례한 PWM신호를 인가하여 해당 지령토크에 따른 상전류를 제어한다.

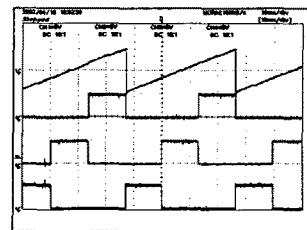


그림 7. 각상 스위칭 파형(위상 스위칭 신호)
Fig 7. Switching waveforms of each phase (upper switching signals)

그림7은 인버터의 각상의 윗 단에 인가되는 단일펄스에 의한 게이팅 신호를 나타낸 것이다. 위상각 한주기에 대하여 각상 게이팅 신호가 양호하게 인가되고 있음을 알 수 있다.

그림8은 해당 여자구간에서 인버터 한상의 윗단과 아랫단에 인가되는 단일 펄스열의 게이팅 신호와 PWM신호를 나타낸 것이다.

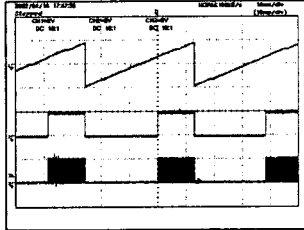


그림 8. 한 상 스위칭 파형
Fig 8. Switching waveforms of one phase

그림 9는 400[rpm]에서 피 시험 전동기를 구동한 경우 인버터 각 상에 인가되는 상전류 파형을 나타낸 것이다.

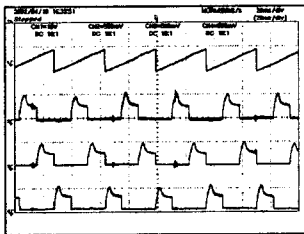


그림 9. 상전류파형과 각도(400[rpm])
Fig9. Waveforms of angle and phase current(400[rpm])

그림 10은 2500[rpm]에서 피 시험 전동기를 구동한 경우 인버터 각 상에 인가되는 상전류 파형을 나타낸 것이다.

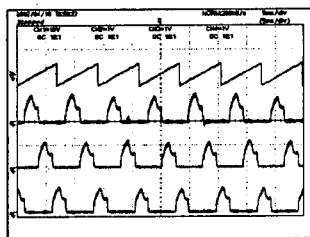


그림 10. 상전류파형과 각도(2500[rpm])
Fig10.Waveforms of angle and phase current(2500[rpm])

3. 결 론

본 연구에서는 저속 전기자동차 구동용 SRM 및 Hall IC를 이용한 저가형 엔코더와 제어기 개발에 관한 것이다. 상술한 실험을 통해 Hall IC출력으로부터 선형적인 위치추정이 가능하고 이를 바탕으로 해당 여자구간에서 속도에 따른 상여자가 양호하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. 향후 보다 고속의 영역에서 고정도의 스위칭각 제어가 가능한 제어기를 개발하여 실용성을 높인다면 안정한 구동시스템을 구성할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszesny and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Tr-IA*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.
- [3] J.C. Wu and C. Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", *IEEE Tr-IA*, vol. 31, no. 1, pp. 91-98, 1995.
- [4] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans : "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 28, no. 6, pp. 1250-1255, 1992.
- [5] Graham E.Dawson, Anthony R.Eastham and Jerzy Mizia:"Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results," *IEEE Trans. on IA*, Vol. 23, No. 3, pp. 532-537, 1987.
- [6] M. Moallerm: "Predicting Torque of Switched Reluctance Machine from Its Finite-Element Field Solution," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 5, no. 2, pp. 733-739, 1990.