

전기자동차 용 전동식 컴프레서를 위한 스위치드 릴럭턴스 모터의 센서리스 제어

(Sensorless control of Switched Reluctance Motor for Electric AC Compressors of
Electrical Vehicles)

전용희* · 김재혁**

(Yong-hee Jeon · Jaehyuck Kim)

Abstract

This paper discusses study of sensorless control of a variable speed switched reluctance motor (SRM) for electric AC compressors on electrical vehicles. A typical SRM drive requires a position sensor such as an encoder or hall sensor to measure the angular rotor position. However, harsh environment in electrical AC compressors for electric vehicles makes it difficult to use the position sensor in their motor drive system. Therefore, a sensorless control scheme for electric compressor motors utilizing magnetic characteristics of SRM with respect to position angle and phase current is proposed. The overall variable speed SRM drive with position sensorless control scheme has been modeled using Matlab/Simulink software and closed loop current control simulation is presented to validate the proposed sensorless drive control.

Key Words : Sensorless Control, Switched Reluctance Motor, Variable Speed Drive,
Electric Ac Compressor

1. 서 론

원유가격 상승과 환경오염으로 인한 문제가 국제적

이슈로 대두되면서 전기자동차의 양산차 연구개발이 점차 확대되는 추세이다. 전기자동차에서는 내연기관이 사라지면서 엔진의 구동축과 벨트로 연결되어 동작되던 기존 기계식 컴프레서를 더 이상 사용할 수 없음에 따라 엔진 동력 대신 배터리 전원을 사용하는 전동기를 이용한 컴프레서를 적용해야 한다.

전동식 컴프레서는 엔진구동식과 비교해 다양한 장점을 가지고 있다. 엔진식과 비교해 부피가 작아지고 효율도 증가하여 에너지를 절감을 얻을 수 있으며 전동기로 컴프레서를 구동하기 때문에 주행속도와 상관없이 공회전영역과 저속영역에서 냉방 성능이 기존의

* 주저자 : (주)동부로봇, 연구원
** 교신저자 : 원광대학교 전기공학과 부교수
* Main author : Dongbu Robot R&D Center
** Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering, Wonkwang University
Tel : 063-850-6733, Fax : 063-850-6745
E-mail : jaehkim@wku.ac.kr
접수일자 : 2014년 6월 10일
1차심사 : 2014년 6월 20일, 2차심사 : 2014년 7월 22일
심사완료 : 2014년 8월 23일

내연기관보다 우수한 장점이 있다[1-2]. 현재 PMSM을 이용한 전동식 컴프레서가 선행 개발되어 상용화되었으나 최근 전동기에 들어가는 영구자석의 주재료인 희토류 광물의 가격이 급등하고 수출을 규제하는 등 공급의 불안정으로 인해 이를 대체할 전동기의 개발이 요구된다.

Switched Reluctance Motor(SRM)은 영구자석을 사용하지 않는 돌극형 전동기로서 기계적 구조가 간단하고, 경제성과 효율성이 높은 장점이 있으나 구동시 회전자 위치 검출을 위해 엔코더나 홀센서와 같은 위치 센서를 필요로 한다. 이는 전체 드라이브 가격을 상승시키고 진동 및 충격, 온도 등의 환경적 제약을 갖는다[3]. 컴프레서에 적용될 전동기 내부에는 냉매가 흐르고, 고온 고압의 센서를 사용하기 어려운 환경이기 때문에 센서리스 제어 방식이 필수적이다.

센서리스 제어에 관한 연구는 상승 인덕턴스(incremental inductance)에 의한 방법[4], 상전압/전류를 이용한 관측기 설계에 의한 방법[5-6], 자속/전류/회전자 위치에 대한 자기특성 데이터를 사용한 제어방법[7-8], 코일에 전류를 주입하는 방법[9]등 다양한 방법으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 가장 널리 쓰이는 자속 추정 법을 이용하여 센서리스 제어를 적용한다. 이를 검증하기 위하여 SRM의 비선형특성을 고려해 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 가능성을 살펴보았다.

2. 전동식 컴프레서 구동용 SRM

SRM의 고정자 자속은 전류크기와 회전자의 위치에 따라 비선형적 자기특성을 갖는다. 그림 1에서 맨 위의 그래프는 회전자가 고정자와 정렬된 위치($\theta_{aligned}$)에서의 자기특성곡선이며 맨 아래의 그래프는 회전자가 고정자와 비정렬 위치($\theta_{unaligned}$)에서 자기특성 곡선을 보여주고 있다.

회전자와 고정자의 비정렬 위치에서의 상전류와 쇄교자속은 매우 선형적인 관계를 나타내지만 회전자가 이동하여 고정자와 정렬위치에 가까울수록 자기포화가 일어나 상전류와 쇄교자속의 관계는 점차 비선형적인 관계를 나타낸다. 센서리스 제어를 적용시킬 전

동식 컴프레서와 구동용 SRM의 사양을 각각 표 1과 표 2에 나타내었다.

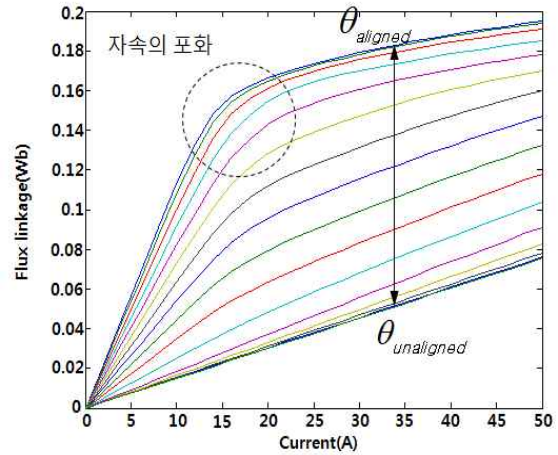


그림 1. SRM의 여자전류와 변화에 따른 쇄교자속 곡선
Fig. 1. Flux linkages of SRM w.r.t phase currents

표 1. 시제품 SRM의 사양
Table 1. Specification of a prototype SRM

Specification	Value	Unit
Rated Output Power	3.5	kW
Rated Current	25	Arms
DC Link Voltage	290	Vrms
Rated Speed	7,500	rpm
Rated Torque	4.5	N · m
Efficiency	85	%
Stator Outer Dimension	86	mm

표 2. 컴프레서의 부하특성
Table 2. Load characteristic of Compressor

Speed (rpm)	Load Torque (3.5kW)
5,000	1.377
6,000	1.567
7,500	1.724

3. 자속추정법을 이용한 센서리스 제어

그림 2는 자속의 추정과 이를 통해 위치를 계산하는 방법을[5-6] 나타내고 있는데 이를 이용한 회전자 위치 추정 방법에 대한 설명은 다음과 같다. 스위치가 턴-온 되면 전류와 전압을 주기적인 간격으로 측정하고 동시에 추정 자속(λ_{est})의 계산을 시작한다. 계산된 추정 자속 값은 매시간 턴-오프 각도의 정보를 갖는 참조 자속(λ_{ref}) 값과 비교되고 참조 자속과의 차가 0이 되어 턴-오프되기 전까지 계속 증가한다. 추정 자속 값이 참조 자속보다 크거나 같게 되면 그 시점에 해당 상을 턴-오프해야 함을 알 수 있다.

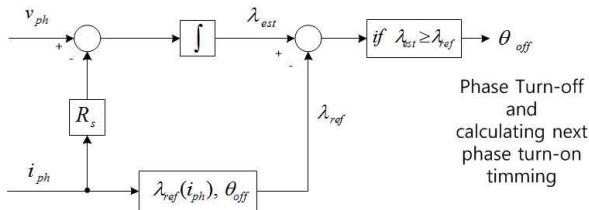


그림 2. 턴-오프 각의 결정
Fig. 2. Determination of turn-off angle

Look-up 테이블로 구성된 전동기의 참조 자속은 FEA특성 해석을 통해 그림 1과 같은 전류와 회전자 위치에 대한 자기 특성으로부터 얻을 수 있고 추정 자속은 다음 SRM의 전압 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$v_{ph} = R_s \cdot i_{ph} + \frac{d\lambda_{ph}}{dt} \quad (1)$$

$$\lambda_{ph} = \int (v_{ph} - R_s i_{ph}) dt \quad (2)$$

여기서 R_s , λ_{ph} , v_{ph} , i_{ph} 는 각각 권선 저항, 쇄교자속, 상전압, 상전류이다.

자속 추정법은 저속에서부터 고속까지 넓은 속도 범위에서 사용 가능하고 비교적 정확히 위치를 추정할 수 있는 장점이 있지만 정렬위치 근처에서 측정 전류의 작은 에러가 자속 추정 시 큰 오차를 가져오는 단점이 있다[7].

4. SRM의 속도 제어 시스템

그림 3은 앞서 설명한 자속 추정의 센서리스 제어 루프를 포함한 SRM의 전체 속도 제어 시스템을 나타낸다. 전류제어와 속도제어는 각각 PI제어기를 사용하여 구성하였다.

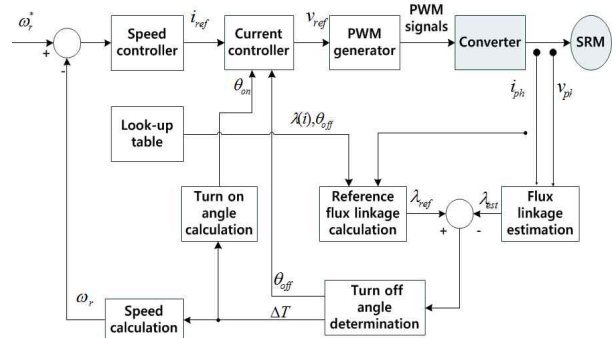


그림 3. 센서리스 속도제어 블록도
Fig. 3. Block diagram of position sensorless control system

여기서 $\Delta\theta$, ω_r , m , N_r , ΔT 는 각각 인접한 두 상의 턴-오프 각의 차이, 회전자의 회전속도, 상수, 회전자 극수, 인접한 두 상의 턴-오프 시간의 차이이다. 회전자의 회전 속도는 인접한 두 상의 턴-오프 신호의 시간 차이로 계산할 수 있다.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{m \cdot N_r} [rad] \quad (3)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi}{m \cdot N_r} \cdot \frac{1}{\Delta T} [rad/s] \quad (4)$$

선행각을 고려한 턴-온 시간은 다음의 식과 같다.

$$T_{on_N} = T_{off_{N-1}} + \frac{\Delta T_{N-1} \cdot (\Delta\theta + \theta_{com} - \theta_{adv.})}{\Delta\theta} [s] \quad (5)$$

그림 4에서 나타낸 바와 같이 T_{on_N} , $T_{off_{N-1}}$, ΔT_{N-1} 은 각각 N번째 사이클에서의 턴-온 시간, N-1사이클에서 측정된 턴-오프 시간, N-1사이클에서 측정된 인접한 두 상의 턴-오프시간차이다.

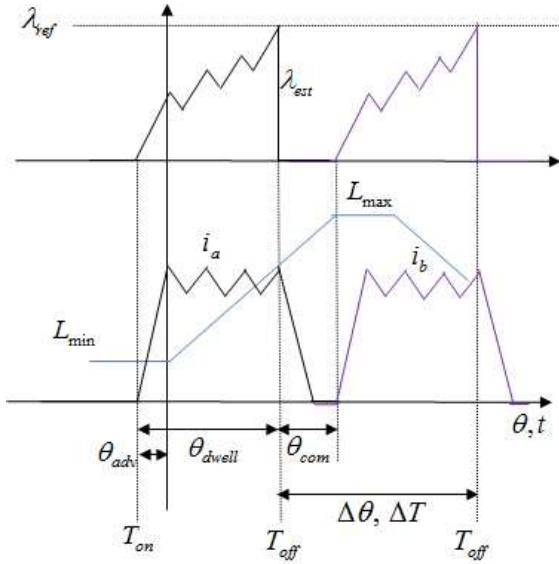


그림 4. 회전자 위치에 따른 인덕턴스와 쇠교좌속
Fig. 4. Inductance and flux linkage w.r.t rotor position

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 적용한 센서리스 제어의 타당성을 살피기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링하고 시뮬레이션 하였다. 속도, 전류제어기는 PI제어기를 이용하여 설계하였고 그림 5, 그림 6에서 SRM을 포함한 제어기 시스템이 Simulink에서 모델링 된 그림을 보여주고 있다.

그림 7, 그림 8, 그림 9는 본 논문에서 적용한 센서리스 SRM의 시뮬레이션 결과이다. 그림 7은 센서리스 제어를 위한 프로세스를 나타낸 그림으로 위에서부터 상전류, 추정자속, 참조자속, 추정자속의 에러, 턴-오프 신호를 나타내고 있다. 추정자속의 에러는 참조자속과 추정자속의 차이이며 추정자속 값이 참조자속 값을 넘어 에러 값이 0보다 작아지는 순간 턴-오프 동작을 수행하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 위에서부터 각각 출력전력, 발생한 토크, 부하토크를 나타낸 그래프다. 부하토크는 3.5kW 컴프레서 부하인 5,000rpm에서 $1.3N \cdot m$, 7,000rpm에서 $1.7N \cdot m$ 을 주었다. 그림 9는 빨간색선은 속도지령, 파란색 선은 속도응답을 나타낸다. $t=0$ 에서 5,000rpm의 속도지령을 주고,

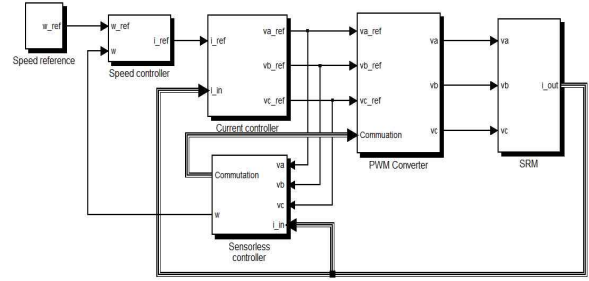


그림 5. Simulink를 이용한 SRM과 드라이브 시스템 모델
Fig. 5. Using the Simulink SRM and drive system model

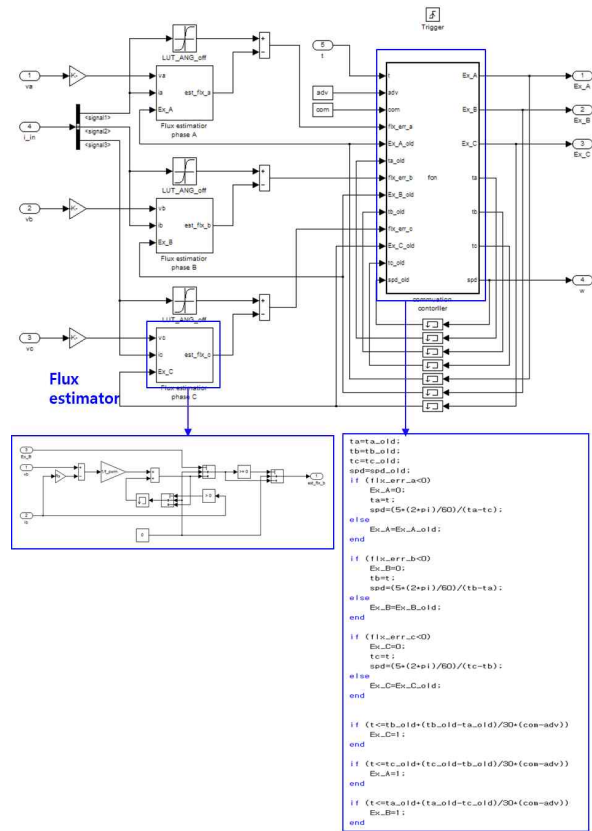


그림 6. 센서리스 제어를 위한 모델
Fig. 6. Model for sensorless control

$t=0.25$ 에서 7,500으로 지령을 변경하였을 속도제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다. 속도지령 5,000rpm에서는 약 1%의 오버슈트를 나타내고 0.15초에서 지령속도에 도달했다.

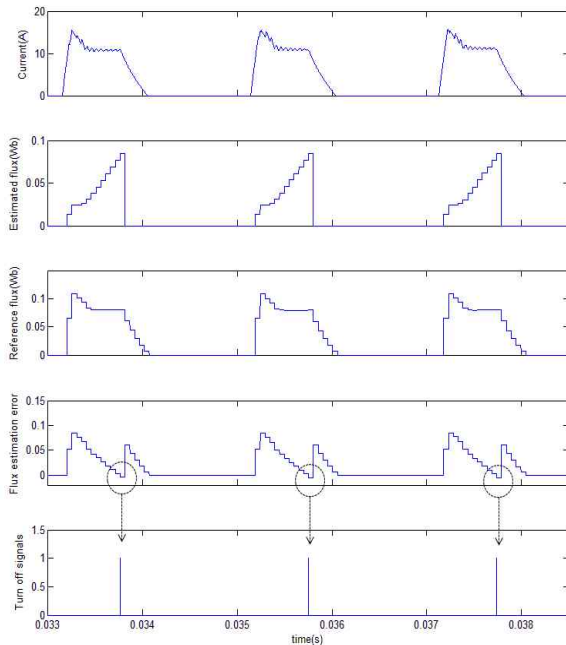


그림 7. 센서리스 제어의 위치추정 프로세스
Fig. 7. Position estimation of sensorless control process

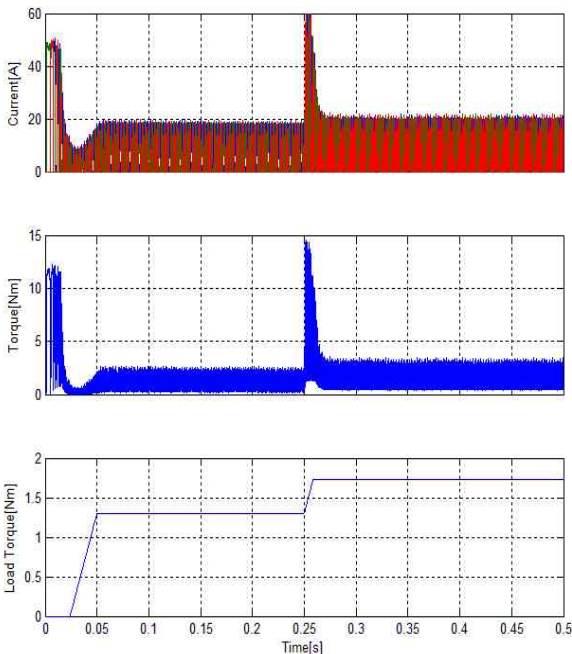


그림 8. 전류, 토크, 부하토크의 파형
Fig. 8. The waveform of the Load torque, torque, current

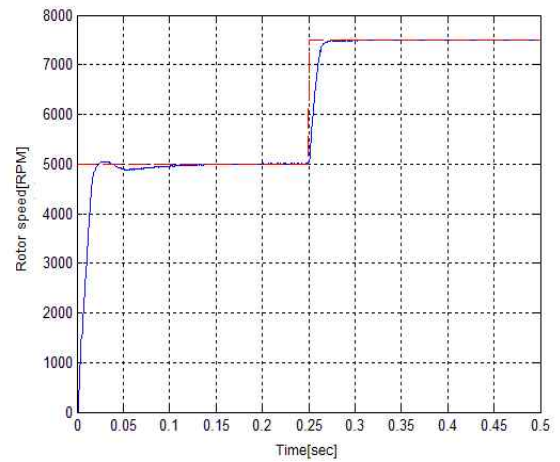


그림 9. 속도지령과 속도응답
Fig. 9. Speed reference and speed response

6. 결 론

본 연구에서는 전기자동차에 사용할 컴프레서 구동을 위한 SRM을 자속 추정법을 적용하여 센서리스 제어의 가능성을 살펴보았다. 비선형적 자기 특성을 고려하여 Simulink로 모델링하고 시뮬레이션 한 결과 적용한 센서리스 제어방식으로 속도 제어가 이루어짐을 검증할 수 있었다.

Acknowledgement

본 논문은 2012년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2012R1A1A1015767)을 받아 수행된 것임. 또한 본 과제는 전라북도 R&D지원사업의 지원(2013하A03)을 받아 수행된 것임.

References

- [1] Talley, Eugene, "Hybrid Air Conditioning Systems Overview" Spring2011 ICAIA Conference, 2011.
- [2] Hiroyuki Hotta, "Air Conditioning System for Hybrid Vehicle", Refrigeration, Vol. 83, No. 964 FEBRUARY 2008.
- [3] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CrPress, 2001.
- [4] S.K. Panda, and G.A.J. Amaratunga, "Analysis of the waveform detection technique for indirect rotor position sensing of switched reluctance motor drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 476-483, 1991.
- [5] I. Husain, S.Sodhi, and M. Ehsani, "A sliding mode

observer based controller for switched reluctance motor drives”, in Proc. IEEE-IAS Annu. Meeting, pp. 635-643, 1994.

- [6] Y.J. Zhan, C. C. Chan, and K. T. Chau, “A novel sliding-mode observer for indirect position sensing of switched reluctance motor drives”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 46, pp. 390-397, Apr. 1999.
- [7] J.P. Lyons, S. R. MacMinn, and M. A. Preston, “Flux/Current methods for SRM rotor position estimation”, Proc. IEEE-IAS’ 91, 1991.
- [8] Radim Visinka, “3-Phase SR Sensorless Motor Control using DSP56F80x”, Motorola, 2002.
- [9] S. R. MacMinn, W. J. Rzesos, P. M. Szczesny, and T. M. Jahns, “Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives,” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 6, pp. 1339-1344. Nov./Dec. 1992.

◇ 저자소개 ◇



전용희(田龍熙)

1985년 9월 25일생. 2011년 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2013년 원광대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 3월~현재 (주)동부로봇 연구연구소에서 근무.



김재혁(金宰赫)

1973년 4월 25일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 11월~2000년 6월 UL Korea, 엔지니어로 근무. 2004년 Univ. of Wisconsin-Madison 졸업(석사). 2010년 5월 Virginia Tech 졸업(박사). 2010년 1월~6월 Ramu Inc. Senior Engineer로 근무. 현재 원광대학교 전기공학과 부교수.