

직류링크전류를 기반으로 한 SRM 3상전류 추정법

金住辰[†], 金泰雄[†], 崔載昊^{**}

3-Phase Current Estimation of SRM Based on DC-Link Current

Ju-Jin Kim, Tae-Woong Kim and Jae-Ho Choi

요 약

본 논문에서는 직류링크전류를 기반으로 SRM의 상전류를 추정하였고 이를 이용한 SRM에 대한 속도제어법을 제안하였다. 또한 직류링크전류검출회로를 제안하여 전류검출분해능을 높일 수 있었으며 오프셋에 의한 영향을 최소화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 상전류정보를 이용한 SRM 구동방식과 직류링크전류정보를 이용한 SRM 구동방식을 실제실험을 통하여 비교함으로써 본 논문에서 제안한 상전류추정알고리즘과 이에 관련된 직류링크전류 검출회로에 대한 유효성이 검증되었고 직류링크전류를 이용한 SRM 속도제어시스템은 속도응답이 3상전류정보를 이용한 시스템만큼 빠른 응답특성이 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes the SRM drive system, which accurately estimates the phase currents from the DC-link current to drive SRM instead of detecting the three-phase currents. In addition, the detecting circuit of DC-link current is also proposed to increase the resolution and decrease the off-set influence. Comparing with the general drive system based on the phase current, it is verified through the experiments that the proposed SRM drive system based on the DC-link current has the good performance in steady-state response of the speed control. Using the DC-link current, all of the 3-phase currents can be easily estimated for driving the SRM.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Estimation, DC-link current, Phase-current, Off-set

1. 서 론

1950년대 중반 이후 스위치드릴럭턴스전동기(SRM, Switched Reluctance Motor)에 대한 연구 개발을 꾸준히 진행해 온 SRDL사(Switched Reluctance Drive Ltd.)의 Lawrenson은 1980년대 체계화된 연구결과를 발표하면서 응용연구 및 실용화가 본격적으로 시작되었고 초기의 전동기 구동시스템, 제어방식, 구동방식 등에 대한 연구에

서 최근에는 고효율, 저소음화, 적용성 및 센서리스화에 관한 연구분야가 많은 관심을 끌며 활발하게 진행되고 있다^[1-3,6,7].

SRM은 돌극형 회전자로 순수한 릴럭턴스 성분만으로 토크를 발생하는 모터로 구조가 매우 간단하여 제작비를 절감할 수 있고 다양한 산업 응용분야에 사용할 수 있으며 고효율 유도전동기보다 더 높은 고효율을 낼 수 있다^[1].

SRM을 제어하기 위해서는 각 상의 순차적인 스위칭패턴에 따라 필요한 토크를 발생시키며 이를 위해서는 위치 및 속도정보, 그리고 각 상의 전류정보가 필요하게 된다^[1-3,6,7]. 여기에 있어서 SRM 고정자에 대한 상의 수가 증가할수록 각 상에 대한 전류정보를 검출하기 위해서는 전류센서의 수도 증가시킬 필요가 있다. 따라서 전

[†]교신저자 : 정회원, 경상대 제어계측공학과 조교수
E-mail : kimtw@gnu.ac.kr

^{*}정회원, (주)다원시스 기업연구소 주임

^{**}정회원, 충북대 전기전자컴퓨터공학부 교수

접수일자 : 2006. 1. 4 1차 심사 : 2006. 2. 6
2차 심사 : 2006. 2. 17 심사완료 : 2006. 5. 5

류센서의 수가 증가함에 따라 전체적인 제어시스템 가격이 높아지기 때문에 전류센서레스화 혹은 전류센서의 수를 최소화 시킬 필요가 있다^[2,3].

교류전동기의 전류센서레스기법 및 전류센서의 수를 최소화하기 위한 기법으로서는 다음과 같다. 전자의 기본개념은 모터모델식을 이용하여 상전류를 추정하는 방법이고 후자의 기본개념은 직류링크전류와 PWM패턴의 정보를 기반으로 하여 상전류를 추정하는 방법이다. 전자의 추정방식은 거의 모든 교류전동기에 적용되어 왔지만^[4], 후자의 추정방식은 대부분 IM이나 PMSM에만 적용하여 상전류를 추정하고 있으며 SRM에는 이에 대한 기법을 적용한 참고논문은 거의 없다^[5]. 그리고 전자와 같은 전류센서레스추정방식은 모터모델식을 기반으로 하기 때문에 모터파라미터에 의존하기 때문에 강인성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 전류센서의 최소화 기법을 통하여 상전류의 추정정밀도를 향상시키고 모터파라미터에 강인성을 지닐 필요가 있어 직류링크전류를 기반으로 한 상전류추정기법이 현재 활발히 연구/개발되고 있는 추세에 있다.

본 논문에서는 각 상의 모든 전류정보를 검출하지 않고 직류링크회로에 설치한 전류센서를 통해 검출된 직류링크 전류정보와 엔코더의 위치정보를 기반으로 하여 각 상의 전류를 추정할 수 있도록 고안하였고 각 상의 전류정보를 이용한 것과 같이 동등한 전류제어성능을 발휘할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다^[2,3]. 직류링크 전류정보를 기반으로 한 SRM의 3상전류 추정알고리즘의 유효성을 dSPACE 제어시스템으로 구성된 실험장치를 통해 검증한다.

2. SRM의 전압·전류 및 토크 방정식

그림 1은 SRM의 자기회로를 여자시킬 때에 1상에 대한 등가회로를 보여주며 이에 대한 전압·전류 방정식은 식(1)과 같이 된다^[1].

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= Ri + \frac{d\lambda}{dt} = Ri + \frac{dL(\theta)i}{dt} \\
 &= Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{d\theta}\omega
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 V_{dc} : 직류링크전압, λ : 쇄교자속, R : 권선저항, $L(\theta)$: 자기인덕턴스, i : 상전류

식(2)와 같은 co-energy W_c 의 개념을 도입한 후, 회전자 위치에 대한 W_c 의 편미분을 통하여 식(3)과 같은 SRM의 토크방정식을 구할 수 있다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^i L(\theta, i)idi = \frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \tag{2}$$

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \cdot i^2 \tag{3}$$

여기서 SRM 발생토크는 전류제곱에 비례하고 위치에 대한 인덕턴스의 기울기에 따라 토크의 부호가 달라지기 때문에 회전방향에 대하여 역방향 토크인 역토크가 발생하는 회전자의 위치가 존재한다.

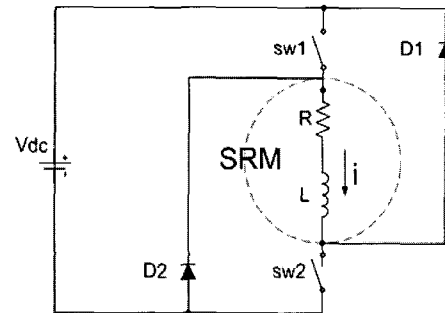


그림 1 SRM의 상당 등가회로(비대칭 브릿지 컨버터)
Fig. 1 Per-phase equivalent circuit of SRM

3. SRM 3상전류의 추정알고리즘 및 직류링크 전류검출회로의 제안

“SRM 구동에 있어서 임의의 한 상(여기서는 a상으로 설정)에 전류가 흐를 수 있도록 스위칭동작을 하는 동안에 다른 상에 대해서는 전류가 전혀 흐르지 않는다.” 라고 가정한다면, 스위치가 턴온시에는 직류링크 회로에 흐르는 직류전류 i_{dc} 는 그림 2(a) 및 3(a)에 보여주듯이 a상 전류와 동일한 방향으로 흐르게 되어 다음과 같은 관계식을 만족하게 된다.

$$i_{dc} = i_a \tag{4}$$

또한 스위치가 턴오프시에는 직류링크회로에 흐르는 직류전류 i_{dc} 는 그림 2(b)에서 보여주듯이 a상전류와 반대방향으로 흐르게 되지만 제안한 직류전류검출회로를 이용하면 그림 3(b)에 보여주듯이 식 (4)와 같이 동

일하게 얻어지게 된다. 따라서 식 (4)에서 보여주듯이 스위치의 턴온 및 턴오프 상태와 무관하게 항상 직류링크회로의 전류를 통하여 a상의 전류를 추정하기 위해서는 다음과 같은 식을 이용하면 된다.

$$\hat{i}_a = i_{dc} \quad (5)$$

여기서 \hat{i}_a 는 a상 추정전류

상기의 관계식은 a상 추정전류 이외의 다른 상에 대한 추정전류에 대해서도 동일하게 적용될 수 있으며, 회전자 위치정보와 함께 직류링크 전류정보로부터 a상, b상, c상에 대한 추정전류는 식(6)~(8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{i}_a = F(\hat{i}_{dc}, \theta_a) \quad (6)$$

$$\hat{i}_b = F(\hat{i}_{dc}, \theta_b) \quad (7)$$

$$\hat{i}_c = F(\hat{i}_{dc}, \theta_c) \quad (8)$$

여기서 $F()$ 는 상전류 추정함수, \hat{i}_b , \hat{i}_c 는 각각 b상, c상에 대한 추정전류이고, θ_a , θ_b , θ_c 는 각각 a상, b상, c상의 전류를 추정하기 위한 회전자 위치영역을 나타낸다.

따라서 3상 SRM에 대한 각 상전류의 추정은 본 논문에서 제안하였듯이 SRM 회전자 위치와 직류링크 전류정보로부터 손쉽게 계산할 수 있다.

본 논문에서 제안한 직류링크전류를 기반으로 한 3상 전류추정기법은 그림 2에서 보여준 기존 직류전류검출회로를 사용한다면 스위치의 온/오프에 따라 직류링크 전류가 양방향으로 흘러 소프트웨어적으로 절대 값 계산이 필요하며 음의 전류도 검출되기 때문에 A/D컨버터의 분해능이 1/2배 줄어든다. 또한 검출된 양방향 직류링크전류에 오프셋 성분이 포함 되어 있어 소프트웨어적으로 절대 값을 계산하여 3상전류를 추정한다면 오프셋 성분에 의해 추정된 3상전류에 불평형이 발생하여 SRM전류제어시스템을 불안정하게 만들고 또한 토크리플을 최소화하는 데에도 악영향을 끼친다^[2]. 이를 개선하기 위해 그림 3과 같이 직류링크회로에 정류 다이오드를 이용한 새로운 직류전류검출회로를 제안한다. 본 검출회로는 직류전류가 한쪽 방향으로만 흐르도록 구성하였고 단방향 직류전류만 검출하기 때문에 오프셋에 의한 불균형 문제점을 최소화 할 수 있으며

또한 음의 전류를 검출할 필요가 없기 때문에 그림 2의 기존 직류전류검출회로보다 A/D컨버터의 분해능을 2배정도 높일 수 있는 장점을 가지고 있다.

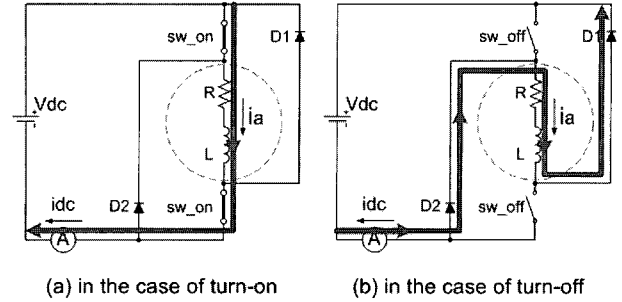


그림 2 기존 직류전류검출회로에서의 스위치상태에 따른 상전류와 직류링크전류와의 관계; (a) 스위치 턴온상태 (b) 스위치 턴오프상태

Fig. 2 Relationship between phase and DC-link current on switch condition in the general DC-link current detecting circuit; (a) switch-on (b) switch-off

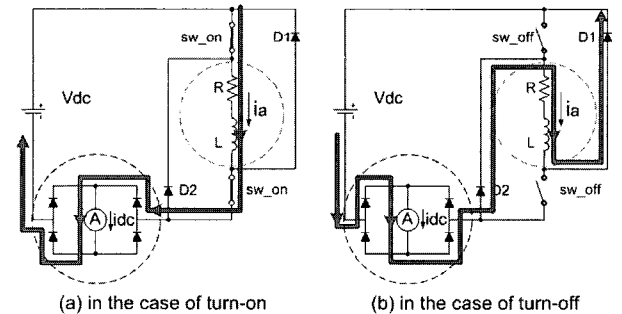


그림 3 제안한 직류전류검출회로에서의 스위치상태에 따른 상전류와 직류링크전류와의 관계; (a) 스위치 턴온상태 (b) 스위치 턴오프상태

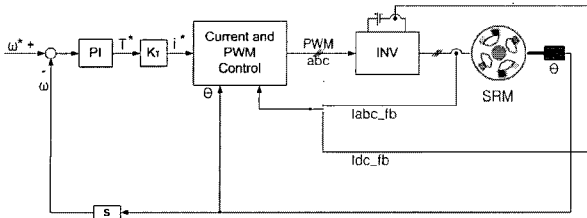
Fig. 3 Relationship between phase and DC-link current on switch condition in the proposed DC-link current detecting circuit; (a) switch-on (b) switch-off

4. 시스템 구성

4.1 실험 시스템 구성

본 논문에서는 dSPACE DS1104 제어시스템장치를 이용하여 속도제어시스템을 구성하였고 이를 이용한 SRM의 전체적인 속도제어시스템은 그림 4와 같이 이루어져 있으며 제어시스템장치의 사양은 표 1에 보여 준다. 스위치의 온/오프 제어에는 advance angle과 dwell angle을 조정하는 동적인 도통각 제어방법을 사

용하였으며, 구동회로로는 SRM 구동에 많이 쓰이는 비대칭 브릿지 컨버터를 제작하여 SRM을 구동하였고 부하로는 유도전동기를 이용하였다. 그림 5는 제작한 실험장치를 보여주며 SRM 구동을 위해 필요한 위치 정보는 유도전동기에 부착된 엔코더로부터 얻어 사용하였다. 표 2는 SRM 및 실험장치의 사양을 보여준다.



ref) labc_fb : feedback phase currents
Idc_fb : feedback dc-link currents

그림 4 SRM의 전체적인 속도제어시스템 블록도
Fig. 4 Overall Block diagram of SRM speed control system for experiments

표 1 제어시스템장치의 사양(dSPACE DS1104)
Table 1 Spec of control system(dSPACE DS1104)

item	contents
main processor	MPC8240(PowerPC 603e core)/250MHz
slave DSP subsystem	TI DSP TMS320F240 for single/three phase PWM generation
memory	32MB SDRAM
A/D	- 4 A/D (16-bit, 2us sampling time) - 4 A/D (12-bit, 800ns sampling time)
D/A	- 8 D/A (16-bit)

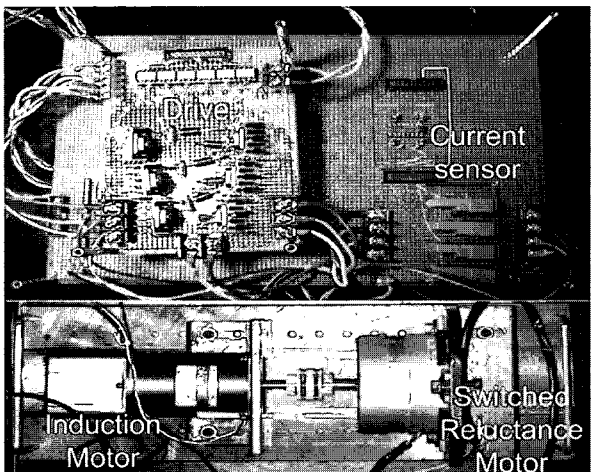


그림 5 실험 장치; (상)구동시스템, (하)SRM 및 부하
Fig. 5 Experimental system for SRM; (top) drive system (bottom) SRM and load system

표 2 SRM 및 실험장치 사양

Table 2 Spec of SRM and test equipments

rated power	80 W
rated voltage	220 V
rated speed	850rpm
pole number of (stator / rotor)	12 (3상) / 8
encoder resolution	3600
DC-link voltage	50V

4.2 실험 결과 및 검토

지령속도를 0rpm에서 300rpm으로 스텝인가하였을 때에 대한 응답속도 파형을 그림 6에 보여준다.

그림 7과 8은 300rpm의 지령속도로 정상상태로 운전하였을 때의 속도, 3상전류 및 직류링크전류에 대한 파형을 보여준다. 여기서 그림 6의 경우는 3상 전류정보를 귀환하여 제어하였을 때의 실험파형이고 그림 8의 경우는 본 논문에서 제안한 3상전류 추정알고리즘을 적용하였을 때의 실험파형이다. 그림 6~8의 실험 결과를 통해 제안한 3상전류 추정법이 기존의 3상 전류정보를 이용한 것과 거의 동일한 속도응답특성(동적 및 정상상태 응답)을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

본 결과를 통해 본 논문에서 제안한 추정알고리즘은 SRM의 상수(3, 4, 5...)에 관계없이 한 개의 직류링크 전류용 센서와 엔코더를 이용하여 임의의 상의 수인 모든 상전류를 추정할 수 있다고 판단된다.

정격전압을 공급할 수 있는 직류전원장치의 부재로 인해 현재 가지고 있는 낮은 직류전원장치(50V)로 실험하였고 추후에 정격전압을 인가할 수 있는 직류전원장치를 구입하여 실험을 추가적으로 수행할 예정이다.

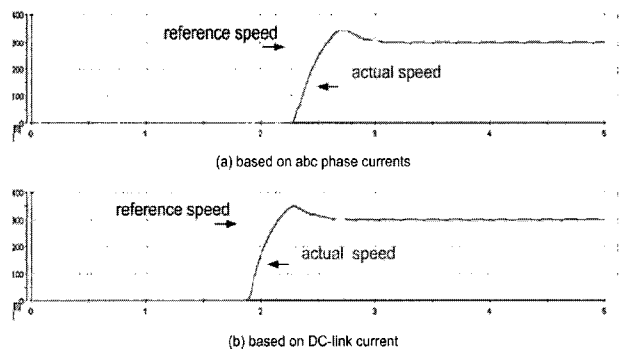


그림 6 지령속도(300rpm) 스텝인가시의 응답속도 파형
Fig. 6 speed response to step change of reference speed(0rpm to 300rpm step change);
(a) based on phase current (b) based on DC-link current

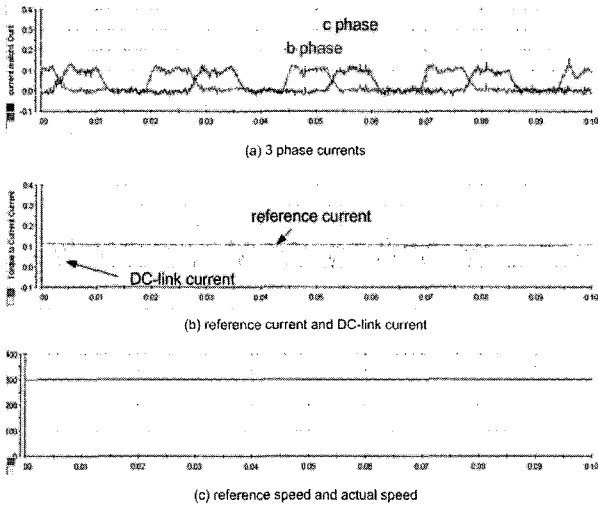


그림 7 정상상태(300rpm)에서의 속도, 3상전류, 직류링크 전류파형 (3상 전류정보를 이용한 경우)
 Fig. 7 Experimental results at 300rpm steady state operation (based on phase current information)

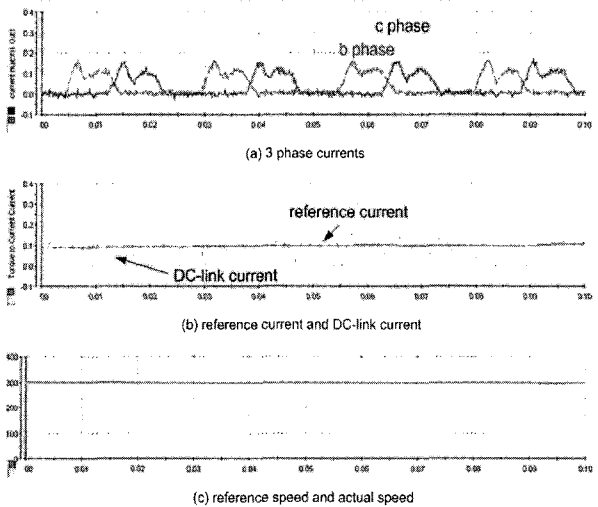


그림 8 정상상태(300rpm)에서의 속도, 3상전류, 직류링크 전류파형 (직류링크 전류정보를 이용한 경우)
 Fig. 8 Experimental results at 300rpm steady state operation (based on DC-link current information)

5. 결 론

본 논문에서는 SRM 고정자에 대한 상의 수에 관계 없이 직류링크 전류센서와 위치정보를 이용하여 3상의 전류정보를 추정할 수 있는 새로운 전류추정법과 직류 전류검출회로를 제안하였고 추정된 각 상의 전류정보

를 기반으로 하여 SRM에 대한 속도제어시스템을 실험을 통해 구현하였다. 실험을 통하여, 기존의 각 상 전류정보를 기반으로 한 SRM 속도제어의 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제안한 직류링크 전류정보를 기반으로 3상 전류추정 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, "스위치 릴럭턴스 전동기," 오성미디어.
- [2] 김주진, 김성곤, 이주환, 김태용, "DC-link 전류정보를 기반으로 한 새로운 SRM 구동시스템," 전력전자학회, pp.6-9, 2004년7월.
- [3] 김주진, "직류링크전류를 기반으로 한 SRM 속도제어시스템," 경상대학교, 석사논문, 2005.08.
- [4] K. Ohishi, Y. Nakamura, "High Performance Current Sensorless Speed Servo System of PM Motor Based on Current Estimation," Proc. of IEEE IAS, pp.1240-1246, 2001.
- [5] F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, U. Jaeger, P. Thøgersen, "Single Current Sensor Technique in the DC-link of Three-phase PWM-VS Inverters. A Review and the Ultimate solution," Proc. of IEEE IAS, pp.1241-1202, 1996.
- [6] 안진우, 오석규, 황영문, "SRM의 정밀속도 제어를 위한 순시스위칭각 제어방식," 전력전자학회 논문지, vol.2, no.3, pp.20-25, 1997.
- [7] 오석규, 최대안, 안진우, "SRM 드라이브의 운전성능 향상을 위한 스위칭각 특성에 관한 연구," 전력전자학회 논문지, vol.6, no.6, pp.506-513, 2001.

저 자 소 개



김주진(金住辰)

1980년 7월 26일생. 2003년 경상대 제어계측공학과 졸업. 2005년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2005년~현재 다원시스 기업연구소 주임.



김태웅(金泰雄)

1964년 12월 29일생. 1990년 충북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 일본 요코하마국립대학 졸업(공학박). 1996년~2001년 일본 야스가와전기 서보개발 담당. 2001년~2002년 올보대학 연구조교수. 2000년 IEEE/IES논문지우수논문상 수상. IEEE, IEEJ, 공학연구원 정회원. 2002년~현재 경상대 제어계측공학과 조교수.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년, 2003년~2004년 University of Toronto(Visiting Professor). 당 학회 부회장.