

가변 링크전압에 의한 센서리스 PMSM의 저속운전 성능개선

論 文

49B-10-10

Improved Performance of Sensorless PMSM in Low Speed Range Using Variable Link Voltage

李 東 熙* · 權 營 顏**

(Dong-Hee Lee · Young-Ahn Kwon)

Abstract - Sensorless PMSM is much studied for the industrial applications and home appliances because a mechanical sensor reduces reliability and increases cost. Most of sensorless algorithms are based on motor equations, and so the magnitude of phase voltage and current should be exactly obtained. However, the inverter output voltage applied to PMSM has relatively large error in the low speed range, and a relatively poor response is shown in the low speed range. This paper investigates the improved performance of sensorless PMSM in the low speed range. This paper proposes the error reduction of inverter output voltage which is realized through the variable link voltage. The proposed algorithm is verified through simulation and experiment.

Key Words : PMSM, Sensorless control, SVPWM, Variable link voltage, Low speed range

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 전력밀도와 고 정밀 제어 특성으로 많은 산업현장과 가전기기에 광범위하게 응용되고 있으며 최근에는 위치 및 속도 센서를 사용하지 않는 센서리스 방식의 연구가 많이 이루어지고 있다. 대부분의 센서리스 제어는 전동기의 방정식과 권선 전압 및 전류 정보를 근거로 속도와 위치를 추정하게 된다[1-3]. 그리고, PMSM의 센서리스 운전은 역기전력이 큰 고속 운전영역에서는 전동기 단자의 물리량에 대한 정보가 비교적 정확하고 지령전압이 높아서 전동기 파라미터의 영향이 작고 인버터 출력전압의 오차에 의한 영향이 상대적으로 작게 나타나므로 고성능의 운전이 가능하다. 그러나 역기전력이 작아지는 저속 운전 영역에서는 전동기 파라미터의 영향 외에 지령전압이 작아서 인버터 출력전압의 오차의 영향이 크게 작용하므로 상대적으로 저하된 운전성능을 나타낸다. 근래에 저속영역에서 성능개선을 위한 여러 방식이 연구되었으며 이들 방식은 주로 전동기 파라미터의 영향을 감소하는 연구이다[1,2].

본 논문은 센서리스 PMSM의 저속 운전 영역에서의 성능개선에 관한 연구로서 센서리스 운전성능에 영향을 미치는 인버터의 출력전압 오차의 원인을 분석하고 이 오차가 감소되도록 하는 가변 링크전압 방식을 제안한다. 종래의 고정된 링크전압을 사용하는 인버터에서는 지령전압이 매우 낮은 저속운전영역인 경우에 유효전압벡터의 인가시간이 매우 작아서 상대적으로 출력전압 오차가 증가하게 된다. 이

에 대한 대책으로서 본 논문에서는 저속 운전영역에서 링크전압을 감소시키고 고속 운전영역에서는 링크전압을 상승하는 가변 링크전압 인버터 방식을 적용한다. 이에 의해, 저속 운전영역에서 발생하는 낮은 지령전압의 경우에도 유효전압 벡터 인가시간이 작지 않게 되므로 인가시간의 오차로 인한 영향이 감소되고 따라서 인버터 출력전압의 오차가 감소되며 운전성능이 개선된다. 또한 스위칭 소자의 턴-온, 턴-오프 시간을 고려한 데드타임의 영향과 스위칭 소자의 전압강하로 인한 전압왜곡을 유효전압벡터의 인가시간에 직접 보상하는 방식을 적용하여 정밀한 인버터 출력전압이 발생되도록 한다. 본 방식으로 구성된 센서리스 PMSM 구동시스템은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

2. 가변 링크전압 구조의 SVPWM 인버터

전압형 PWM 인버터의 출력전압 오차는 지령전압에 대한 링크전압의 비율 V_{ref}^*/V_{dc} , 지령전압의 주파수에 대한 스위칭 주파수의 비, 샘플링 시간 내에서 인가되는 스위칭 펄스의 정밀도에 따라 결정된다. 예를 들어, 전압형 PWM 인버터의 링크전압이 1/100의 분해능으로 스위칭 가능하다고 가정하면 링크전압의 크기가 300V인 경우, 오차 크기는 3V에 해당한다. 이 오차 크기는 PMSM이 고속으로 운전되는 경우에 역기전력이 크고 지령전압이 크므로 큰 영향을 주지 않지만 PMSM이 저속으로 운전되는 경우에 지령전압이 작으므로 큰 영향을 주게 된다.

그림 1은 인버터 스위칭 소자가 이상적이라는 가정에서 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) 인버터 출력전압 오차와 한 샘플링 구간을 분주하여 스위칭 신호를 결정하는 해상도 주파수 크기 및 V_{ref}^*/V_{dc} 의 관계를 나타낸다. 그림 1은 샘플링 시간이 100 μ s인 경우로서 지령전압 V_{ref}^* 는 공간벡터 전압의 크기를 나타내며 출력전압 오차는

* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

** 準 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 9月 8日

最終完了 : 2000年 10月 11日

지령전압 한 주기 동안의 평균 절대치오차를 나타낸다. 정상 운전영역에서 구동되는 인버터의 출력전압은 오차가 매우 작지만 V_{ref}^*/V_{dc} 가 작아지는 저전압 운전영역에서는 출력전압의 오차가 급격히 증가함을 보이고 있다. 그리고, 해상도 주파수가 커지면 전압해상도가 증가되어 오차가 감소되지만 회로구현에 제약이 가진다.

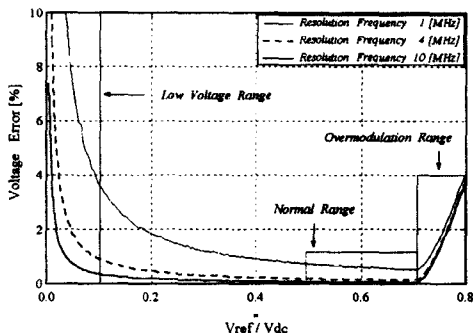


그림 1 인버터의 출력전압 오차
Fig. 1 Output voltage error of inverter

본 논문에서는 출력전압의 오차가 그림 1의 정상영역에 위치하도록 하는 가변 링크전압 구조의 인버터를 사용하여 저속영역에서 운전성능을 개선하는 방식을 제안한다. 저속 운전영역에서 V_{ref}^*/V_{dc} 를 적절히 제어하여 유효 전압벡터 인가시간을 증가시키면 출력전압의 오차를 크게 감소시킬 수 있다. 또한, SVPWM 인버터의 출력전압은 스위칭 소자의 단락을 방지하기 위한 데드타임과 스위칭 소자의 전압강하로 인하여 왜곡된다. 이러한 출력전압의 왜형 및 오차를 보상하기 위하여 본 논문에서는 유효 전압벡터의 인가시간을 직접 보상의 방식을 적용한다.

본 연구에서 구성한 가변 링크전압 구동 시스템은 그림 2와 같다. 링크전압을 제어하기 위해 초퍼를 사용하였으며 링크전압의 크기는 PI제어기를 거쳐 결정된다. 그리고 출력전압과 전류의 리플을 감소하기 위하여 인덕터와 콘덴서를 직·병렬로 연결하였다.

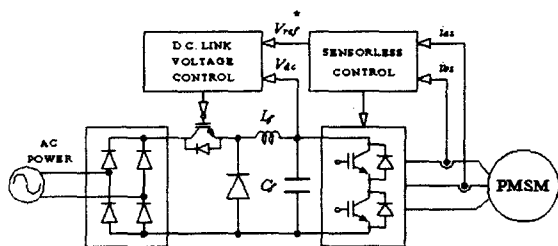


그림 2 가변 링크전압 구동시스템
Fig. 2 Variable link voltage drive system

3. 센서리스 속도제어

본 논문에서는 센서리스 속도제어 방식으로서 상태관측기에 의한 방식을 적용한다. 상태관측기에 의한 센서리스 제어방식은 잘 알려져 있는 방식으로서 전 속도영역에서 비교적 양호한 성능을 나타내는 방식이다[3]. 본 논문에서 사용

한 축소차수 상태관측기는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{w}} = F\hat{w} + Dy + Gr \quad (1)$$

단, $\hat{w} = \hat{z} - Ly$, $\hat{z} = [\hat{E}_{\alpha s}, \hat{E}_{\beta s}]^T$ 역기전력 추정치

$r = [V_{\alpha s}, V_{\beta s}]^T$ 상전압, $y = [i_{\alpha s}, i_{\beta s}]^T$ 상전류

$$F = A_{22} - LA_{12}, \quad G = B_2 - LB_1,$$

$$D = FL + A_{21} - LA_{11}, \quad L = \text{관측기 이득},$$

$$A_{11} = -(R_s/L_s)I, \quad A_{12} = -(1/L_s)I,$$

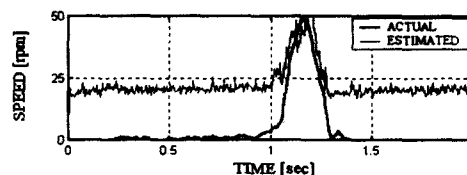
$$A_{21} = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \omega_r J,$$

$$B_1 = (1/L_s)I, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

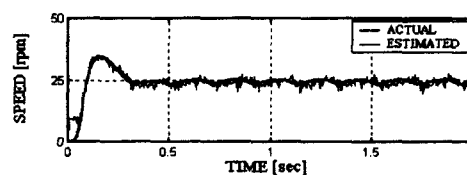
4. 시뮬레이션

시뮬레이션 및 실험에 사용된 구동시스템은 그림 2와 같고 PMSM의 정격전력 및 속도는 600W, 1000rpm이다.

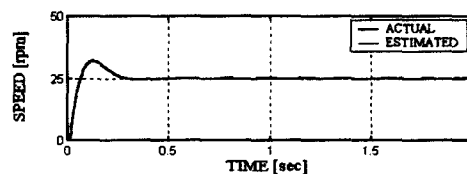
그림 3은 센서리스 PMSM에서 링크전압을 300V, 100V, 그리고 제안된 방식에 의해 결정된 링크전압을 인가한 경우의 지령속도 25rpm에 대한 속도 응답의 시뮬레이션 결과이다. 저속에서 즉, 낮은 지령전압에서 높은 링크전압을 인가하였을 경우에는 인버터의 출력전압 오차 등으로 인하여 정상적인 운전이 이루어지지 않지만 가변 링크 전압을 사용하여 V_{ref}^*/V_{dc} 를 증가시키게 되면 출력오차가 감소되므로 추정정도 및 속도응답이 크게 개선된다.



(a) $V_{dc} = 300V$ 고정



(b) $V_{dc} = 100V$ 고정



(c) 제시된 방식에 따른 V_{dc} 가변

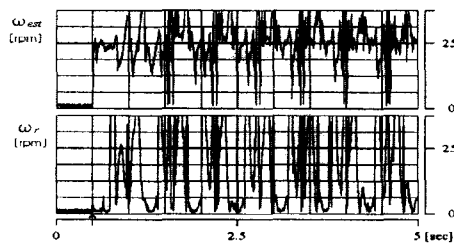
그림 3 센서리스 PMSM의 속도 응답

Fig. 3 Speed responses of sensorless PMSM

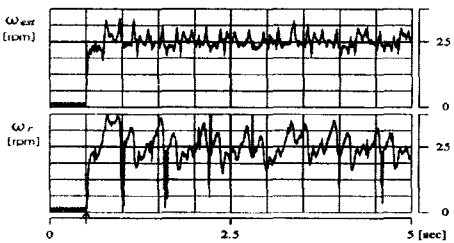
5. 실험 결과 및 검토

본 방식을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 구동시스템을 제작하고 실험을 수행하였다. 제어부는 i80586 마이크로프로세서 시스템으로 구현하였다.

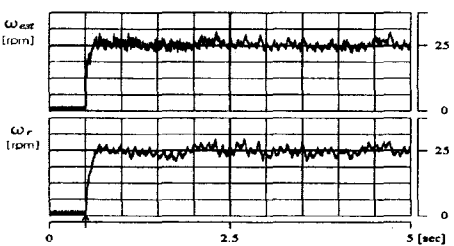
그림 4는 그림 3과 같이 링크전압을 300V, 100V, 그리고 제안된 방식에 의해 결정된 링크전압을 인가한 경우의 지령 속도 25rpm에 대한 추정속도 및 실제속도 응답의 실험 결과이다. 링크전압이 큰 경우에는 출력전압 오차, 슬롯의 영향, 비정현적인 분포 등이 상승 작용하여 맥동이 크게 나타나며 본 방식을 적용한 가변 링크전압의 경우에는 출력전압 오차의 감소로 시뮬레이션 결과와 같이 저속영역에서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.



(a) $V_{dc} = 300V$ 고정



(b) $V_{dc} = 100V$ 고정



(c) 제시된 방식에 따른 V_{dc} 가변

그림 4 센서리스 PMSM의 속도응답 실험결과
Fig. 4 Experimental speed responses of sensorless PMSM

그림 5는 부하변동시에 본 방식을 적용한 속도응답 및 상전류 파형의 실험결과이다. 결과에서 나타난 바와 같이 저속영역에서 부하변동시에도 양호한 속도응답을 나타낸다.

6. 결론

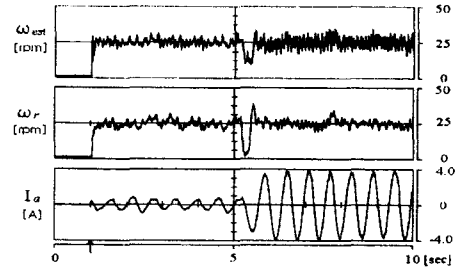


그림 5 부하 변동시의 속도응답 및 상전류 파형 실험결과 (0→4Nm)

Fig. 5 Experimental speed response and phase current waveform in load variation

본 논문은 저속운전영역에서의 센서리스 PMSM의 성능개선에 관한 연구로서 센서리스 운전성능에 영향을 미치는 인버터의 출력전압 오차의 원인을 분석하고 이 오차가 감소되도록 하는 가변 링크전압 방식을 제안하였다. 저속 운전영역에서 링크전압을 감소시킴으로써 낮은 지령전압의 경우에도 유효전압벡터 인가시간이 작지 않게 되므로 인가시간의 오차로 인한 영향이 감소되고 따라서 인버터 출력전압의 오차가 감소되며 운전성능이 개선된다. 본 방식을 적용한 시뮬레이션 및 실험결과에서 나타난 바와 같이 센서리스 PMSM의 저속 운전 영역에서 속도응답이 크게 개선되었다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소의 학술연구 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

[1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996.
 [2] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Univ. Press, 1998.
 [3] J. Solsona, M. I. Valla and C. Muravchik, "A Nonlinear Reduced Order Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 4, pp. 492-497, 1996.

저 자 소 개



이 동 희 (李 東 熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대
전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기
공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기
공학과 박사과정

Tel : 051-510-3086

E-mail : dhlee5@hyowon.pusan.ac.kr



권 영 안 (權 營 顏)

1955년 8월 29일생. 1978년 서울대 공대 전
기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공
학과 졸업(공학). 1991년 스위스 취리히공
대(ETH) 객원교수. 현재 부산대 공대 전
기공학과 교수

Tel : 051-510-2372, 3086, Fax : 051-513-0212

E-mail : yakwon@hyowon.cc.pusan.ac.kr