반도체디스플레이기술학회지 제14권 제3호(2015년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 3. September 2015.

무급유식 공기압축기 구동을 위한 영구자석 동기 모터의 센서리스 속도제어

김민호 · 양 오† · 김윤현*
청주대학교 전자공학과, †청주대학교 반도체공학과, *한밭대학교 전기공학과

Sensor-less Speed Control of PMSM for Driving Oil-free Air Compressor

Min Ho Kin, Oh Yang†and Youn Hyun Kim*
Electronics Engineering of Cheongju University
†Semiconductor Engineering of Cheongju University,
*Department of Electric Engineering of Hanbat National University

ABSTRACT

This paper suggests the sensor-less speed control of PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) without the position sensor of oil-free air compressor. It estimated d and q axis back electro motive force using Back-EMF (Electro motive Force) observer to control sensor-less speed of PMSM. Also it used the method that tracks the information of rotor position and speed using PLL (Phase Locked Loop) based on estimated d and q axis Back-EMF. The sensor-less speed control of PMSM for oil air compressor application is carried out with the introduced rotor position and speed tracking method. In this paper, the experimental characterization of the sensor-less drive is provided to verify the accuracy of the estimated position and the performance of sensor-less control is analyzed by results obtained from the experiment. Moreover, the potential of PMSM sensor-less drive in industrial application such as compressor drive is also examined.

Key Words : Oil-free Air Compressor, PMSM, Sensor-less control, Observer, Back-EMF

1. 서 론

환경문제가 사회적인 문제로 확대되고 환경에 대한 관심이 점차 늘어가고 있는 시점에서, 산업분야에서도 쓰레기 배출량을 줄이고(Reduce) 재활용(Recycle) 재사용(Reuse)을 늘리는 3R의 대책으로 폐기물을 배출하지 않는 인프라 설비를 구축하는 등 친환경적인 산업 개발을 추구 하고 있다. 또한 전반적으로 산업에서도 보다 청정도 높은 압축공기의 필요성이 요구되고 있는 시점에서 공기 압축기는 오일 식에서 무급유식으로의 전환이 증가하고 있는 상황이다. 따라서 오일을 대체하여 물을 사용한 무급유식 공기 압축기의 시장이 점차 확대 될 것으로 예상 되고, 이러한 상황에서 무급유식 공기압축기의 전력 절감과 효율 향상에 대한 연구도 중요시 되고 있다. 최근에는 무급유식 공기압축기에 인버터를 탑재하여 공기량을 실시간으로 확인하여 토출량을 조절하는 방법이 제안되고 있으며 이 방법에 의해 구동 모터의 저 용량화도 가능하다. 또한 영구 자석 동기 모터(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)을 사용할 경우 유도전동기와는 다르게 회전자의 전력손실이나 슬립이 발생하지 않으며, 모터 효율이 5% 이상 향상하는 등의 전력 절감과 효율 향상의 결과를 얻을 수 있다.

그러나 PMSM를 제어하기 위해서는 회전자의 속도 및 위치 정보를 필요로 한다. 회전자의 정보는 리졸버, 홀 센서, 증분형 엔코더와 같은 위치 센서를 이용하여 검출하는 것이 일반적이고 쉬운 제어방법이다[1]. 공기압축기의 특성상 주변 설치 환경에 민감하고, 모터 축 관성을 증대 시킬 수 있으며, 센서 자재의 높은 가격 때문에 전체 시스템 가격을 증가시키는 문제점을 가지고 있는 위치 센서를 설치하여 사용 하기가 어렵다[2-3]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 속도 및 위치 측정 센서가 없이 회전자의 정보를 실시간으로 연산 가능한 다양한 센서리스 알고리즘이 제안되었으며 많

†E-mail : ohyang@cju.ac.kr

은 연구가 이루어 지고 있다[4-6]. 무급유식 공기 압축기의 PMSM구동을 위치센서가 없는 상태(Sensor-less)로 제어가 필수적이다[7]. 따라서, 본 논문에서는 상태 관측기를 사용하여 d축, q축의 역기전력를 추정하여 추정한 역기전력을 기반으로 회전자의 위치 및 속도 정보를 추종하고자 한다. 또한 추종한 회전자의 위치 정보를 이용하여 PMSM을 센서리스 구동하고 이를 무급유식 공기압축기에 결합하여 여러 실험을 통해 성능 결과를 분석하여 PMSM의 센서리스 속도제어가 산업 적용 가능함을 확인 하고자 한다.

2. PMSM의 Sensor-less 속도 제어

2.1. 제어기 구성

Fig. 1은 PMSM의 회전자 정보를 추정하여, 센서리스로 PMSM을 구동하기 위한 전체 속도제어기의 블록도 (Block diagram) 이다. 스위칭 구동방법은3상 min-max 벡터 제어를 사용하였으며, 전류제어와 속도제어는 PI 제어기를 사용하였다[8]. 정지좌표계의 역기전력 상태 관측기를 통해, d축 q축의 역기전력을 추정하며, PLL을 이용하여 위치와 속도를 추종한다. 또한, 외란 관측기 (Disturbance Observer)를 사용하여 추정 속도를 보정하여 PMSM의 센서리스 속도 제어의 안정도를 높였다.

2.2. 기동 상태 안정화

정지좌표계의 역기전력 상태 관측기를 통해 d축, q축의 역기전력을 추정하여 회전자의 위치정보를 얻기 위해서는 모터에서 V_{dss}, V_{qss}, I_{dss}, I_{qss}와 모터 파라미터(parameter)와 같은 변수 값을 알아야 한다. 그러나 모터의 초기에는 이러한 정보를 알 수가 없으므로 정확한 회전자의 위치를 알고 모터를 구동 할 수가 없다. 따라서 회전자의 위치를 모르는 상태에서 저속으로 직입기동을 하여 모터의 V_{dss}, V_{qss}, I_{dss}, I_{qss}와 모터 파라미터의 값을 측정하여 회전자의 위치와 속도를 추종하고 추정한 위치와 속도로 센서리스 구동을 할 수 있도록 초기기동 패턴을 만들었다. 초기기동의 패턴은 처음 3초간은 모터의 정렬을 하고, 이후 2초간 100 RPM까지 직입 가속을 한다. 또한 1초간 속도를 유지하고 그 동안 얻은 정보로 회전자 정보를 추정한다. 이후 추정한 회전자 정보를 가지고 센서리스 구동을 하며, 속도 리플을 관측하며 센서리스의 성공여부를 판단하여, 센서리스가 되었다고 판단하면 목표 속도까지 속도제어를 하도록 구성하였다. Fig. 2는 이러한 초기기동의 패턴을 나타내고 있다. 여기서 α는 리플 오차를 측정할 때, 오차 범위내의 속도 리플을 2초간 유지 했을 시에 안전하게 센서리스 제어가 되고 있음을 판단하기 때문에 판단이 완료되기까지의 2초 이상의 시간을 의미한다.

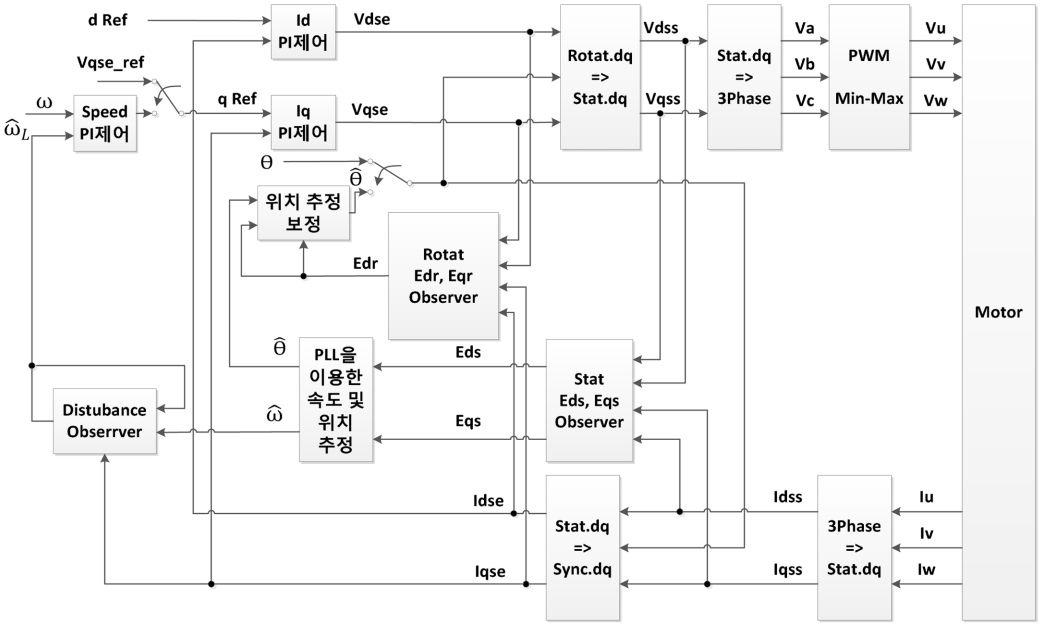


Fig. 1. Block diagram of sensor-less speed control system for PMSM.

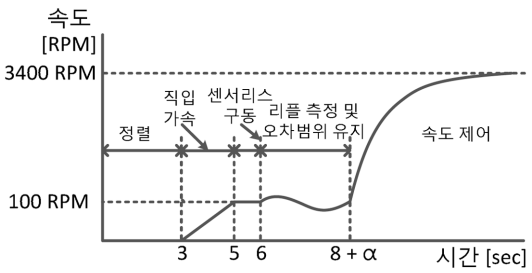


Fig. 2. Start-up control pattern for PMSM.

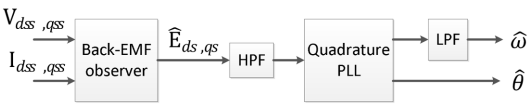


Fig. 3. Block diagram of EST Ed, Eq observer.

2.3. 상태 관측기를 이용한 $\hat{E}_{ds}$, $\hat{E}_{qs}$ 추정과 PLL을 통한 위치 및 속도 추정

Fig. 3은 속도와 위치를 추정하는 과정을 블록 다이어그램으로 나타낸 그림이다. 역기전력 관측기를 통하여 $\hat{E}_{ds}$, $\hat{E}_{qs}$ 를 추정하고 추정한 $\hat{E}_{ds}$, $\hat{E}_{qs}$ 을 PLL에 적용하여 속도와 위치를 추종한다. Fig. 3의 역기전력 관측기는 모터의 연속적 시간 모델을 라플라스 식에 의해 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$V_{dss,qss} = R_s I_{dss,qss} + sL_{ss} I_{dss,qss} + E_{ds,qs} \tag{1}$$

식 (1)에서 V_{dss}, V_{qss}는 정지좌표계 전압이고, I_{dss}, I_{qss}는 정지좌표계의 전류, E_{ds}, E_{qs}는 역기전력에 해당한다. R_s와 L_{ss}는 각각 고정자 저항과 동기 인덕턴스에 해당한다. 또한 역기전력의 역학 방정식에서 모터의 전기속도 ω_{me}이 천천히 변화하는 경우에는 모터의 역기전력에 의해 식 (2)와 같이 근사화 된다.

$$sE_{d,q} = j\omega_{me} E_{d,q} \tag{2}$$

식 (1)을 고려하여 피드백 값으로 측정된 전류를 사용하여 모터의 전류와 역기전력을 상태로 하는 루엔버거 관측기(Luenberger observer)를 이용하여 역기전력을 추정 할 수 있다. 역기전력 상태 관측기의 식은 식 (3)과 식(4)에 나타내었다.

$$s\hat{I}_{dss,qss} = \frac{1}{\hat{L}_{ss}}(V_{dss,qss} - \hat{R}_s \hat{I}_{dss,qss} - \hat{E}_{ds,qs}) + K_1(I_{dss,qss} - \hat{I}_{dss,qss}) \tag{3}$$

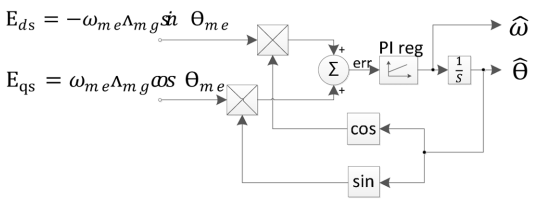


Fig. 4. Block diagram of EST theta using PLL.

식 (3)에서 K_1은 게인 상수이고, $\hat{I}_{dss,qss}$ 는 추정 상태 전류이다.

$$s\hat{E}_{ds,qs} = j\tilde{\omega}_{me}\hat{E}_{ds,qs} + K_2(I_{dss,qss} - \hat{I}_{dss,qss}) \tag{4}$$

식 (4)에서 K_2 는 게인 상수이고, $\hat{E}_{ds,qs}$ 는 추정 상태 역기전력이다[9].

Fig. 4는 PLL을 이용하여 속도와 위치를 추정하는 알고리즘이다. $\hat{E}_{ds,qs}$ 는 –sin과 cos의 형태를 갖는다. 추종하고자 하는 $\hat{\theta}$의 sin, cos과 삼각함수의 공식을 사용하여 추정 오차를 찾는다.

$$\sin\theta_{me}\cos\hat{\theta} - \cos\theta_{me}\sin\hat{\theta} = \sin(\theta_{me} - \hat{\theta}) \tag{5}$$

식 (5)에서 이렇게 추정오차를 찾고 이 오차를 0이 될 수 있도록 속도($\hat{\omega}$)와 위치($\hat{\theta}$)를 반복하여 추정한다[10].

2.4. 외란 관측기를 이용한 속도 리플 보상

본 논문의 센서리스 제어기의 추정 속도는 속도리플이 증가하는 문제점이 발생하여 리플을 감소시키는 방안으로 외란 관측기를 구성하여 속도제어기 성능을 향상하였다. 외란 관측기를 구성하기 위한 상태방정식은 식 (6) 과 같다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{T}_d\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-k_1\left(-\frac{1}{J}\right) & \\ -k_2 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\omega}\\ \hat{T}_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}k_1\\ k_2\end{bmatrix}(\omega - \hat{\omega}) + \begin{bmatrix}\frac{1}{J}\\ 0\end{bmatrix} \tag{6}$$

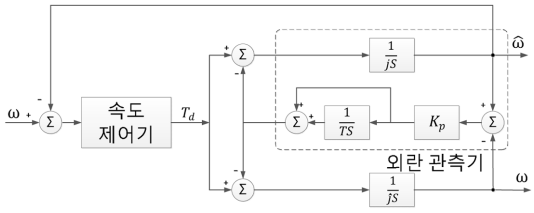


Fig. 5. Block Diagram of Disturbance Observer Speed Controller.

여기서 w는 동기 모터의속도, Td는 외란토크, J는 회전체의 관성, T는 구동토크이고, $\hat{\omega}$는 추정속도, $\hat{T}_d$는 추정외란이다.

식 (6)을 기반으로 외란 관측기 속도제어기의 블록도는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 일반적인 속도 제어기에 외란 관측기를 사용하여 속도의 외란과 추정 리플을 최소화 시켰다. 외란 관측기를 사용한 속도제어기를 적용하여 속도제어의 안정성을 높였다.

3. 실험 결과 및 고찰

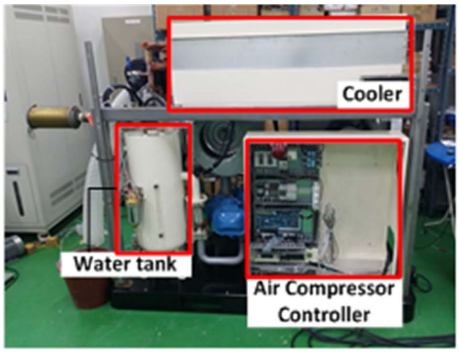
3.1. 공기 압축기 결합 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘을 확인하기 위해 Fig. 6(a)에서 보여주는 국내 공기압축기 회사의 제품인 i-14000 Inverter Oil Free Air Compressor를 사용하였다. Fig. 6(a)의 무급유식 공기 압축기는 오일을 대신하여 물을 사용하는 무급유식 공기 압축기이다. 이 공기 압축기에 Fig. 6(b)와 같이 6극 60마력(Hp)의 PMSM을 결합하였다. 사용한 PMSM의 사양을 Table 1에 나타내었으며, PMSM을 제어한 인버터의 제어보드는 FreeScale사의 MPU인 MK60FX512VLQ15를 사용하여 구성하였다. Fig. 6(c) 는 본 논문을 위해 설계하여 자체 제작한 인버터를 보여준다.

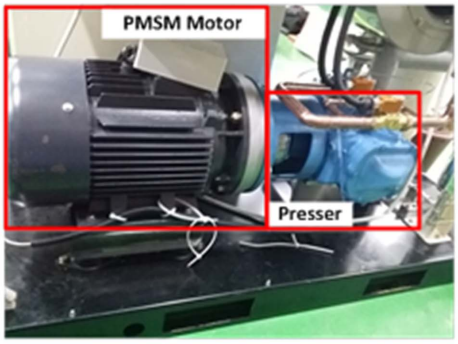
Fig. 7은 역기전력 관측자를 사용하여 추정한 $\hat{E}_{ds}$, $\hat{E}_{qs}$를 보여주고 있다. 또한 Fig. 8은 PLL을 이용하여 추정한 $\hat{\theta}$와 실제 측정한 θ를 비교한 파형이다. 1000RPM에서 약 7도의 추정 위치의 오차가 있었지만, 모터의 속도 제어에는 큰 영향을 주지 않는 오차범위 내의 오차로 $\hat{E}_{ds}$, $\hat{E}_{qs}$의 추정과 위치 추종을 잘하고 있음을 확인 할 수 있다.

3.2. 기동 상태 안정화

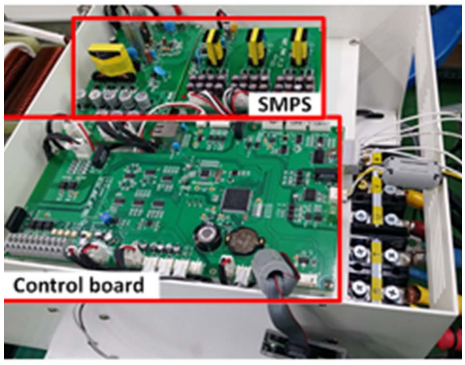
Fig. 9는 초기기동의 패턴에 맞추어 모터가 기동한 결과를 확인 한 내용이다. 처음 3초간은 모터를 정렬시키고 100 RPM까지 직입가속을 거쳐 센서리스 결과 판단 이후 목표 속도까지 가속하는 결과를 보여주고 있다. 직입가속 직후 센서리스속도제어로 제어시스템이 교체되는 구간에서는 추종된 회전자 정보를 이용하여 모터를 구동하기 때문에 모터를 구동하기 위한 토크의 크기가 줄어드는 형태를 관찰 할 수 있다. 또한, 순간적으로 감소한 전류량으로 인해 속도 또한 감소하였으나, 속도제어기에 의해 목표 속도까지 속도와 토크의 크기가 증가하는 과정을 실험을 통해 관찰 할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. (a) Air compressor used in the experiment, (b) PMSM used in the experiment, (c) Inverter used in the experiment.

Table 1. Specification of PMSM.

제조사	MITSUBISHI
모델번호	MM-DF45K34E2-S3
Input	3AC, 335V, 95A
Output	45kW (60HP)
정격 속도	3800r/min

Fig. 7. $\hat{E}_{ds}$,$\hat{E}_{qs}$ at 1000 RPM.

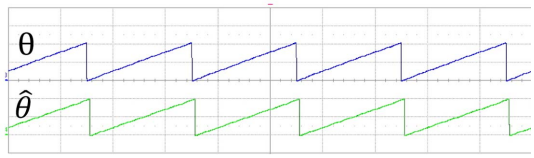


Fig. 8. EST theta and Ref theta at 1000 RPM.

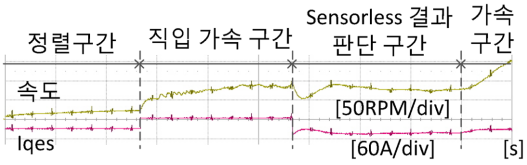


Fig. 9. Start-up control for PMSM.

3.3. 외란 관측자를 이용한 속도 리플보상

Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 각각 100 RPM과 500 RPM에서 추종 속도의 리플과 외란 관측기를 사용하여 보상한 속도 리플에 대한 실험 결과이다. 추종된 속도는 낮은 속도에서 리플이 가장 컸으며, 속도가 증가 될수록 리플이 낮아져 500 RPM이후에는 일정한 리플의 크기를 가졌다. 따라서 외란 관측기를 사용하여 낮은 RPM에서의 속도 리플을 줄였다. 따라서 낮은 속도에서 속도 리플 때문에 정확한 속도 추종이 어려워 속도 제어에서 안정감을 잃어 정밀도를 검증 할 수 없지만 속도가 증가 할수록 추종 속도가 증가함에 따라 안정감을 찾는다. 낮은 속도에서 안정감을 위하여 외란 관측기를 사용하였고 그 결과 Fig. 10(a), Fig. 10(b)에서 알 수 있듯이 외란 보상 속도가 안정적으로 작동함을 확인 할 수 있다.

3.4. PMSM 속도 제어

Fig. 11은 공기 압축기에 부착한 PMSM의 속도제어 결과를 보여주고 있다. 공기 압축기의 기동 지령에 맞추어 모터의 초기기동을 시작하고 초기기동 이후에 정상구동에 들어가면서 속도지령에 맞추어 속도제어와 전류제어가 이루어 지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 12의 (a), (b)는 3400RPM에서의 θ와 $\hat{\theta}$ 의 추정 오차를 보여주고 있으며, Table 2는 모터의 속도 별 추정

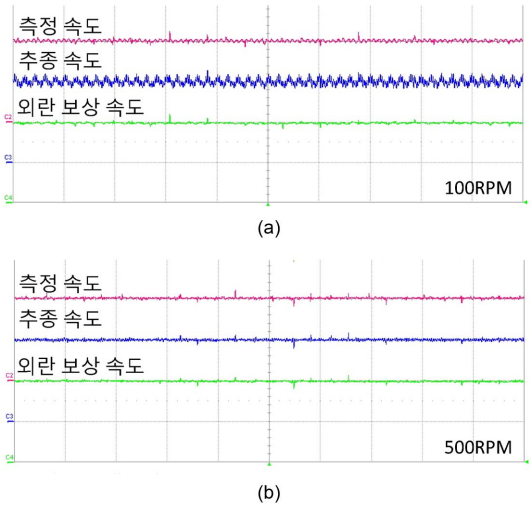


Fig. 10. (a) ripple enhancement of tracking speed at 100 RPM, (b) ripple enhancement of tracking speed at 500 RPM.

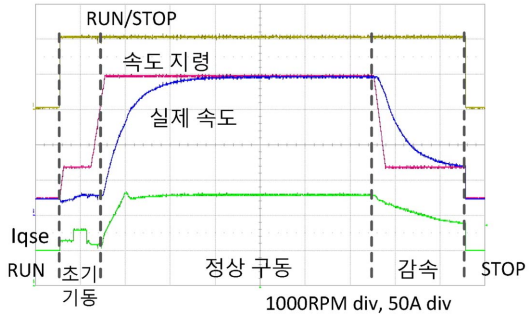


Fig. 11. Speed driving pattern for PMSM.

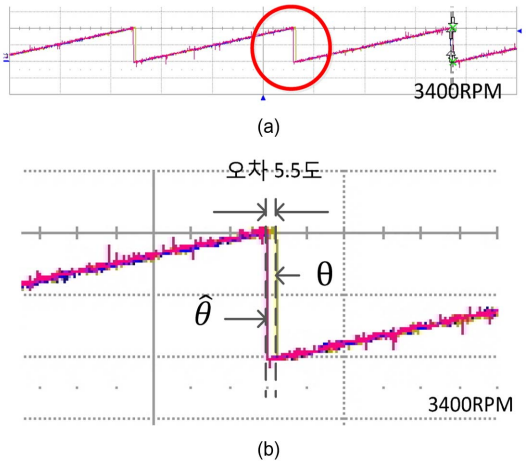


Fig. 12. (a) Error for EST theta and Ref theta, (b) enlargement for Error for EST theta and Ref theta.

Table 2. Error for EST theta and Ref theta of Speed case.

RPM	오차(°)	RPM	오차(°)
1000	−9.72	2400	−8.67
1200	−10.55	2600	−9.81
1400	−9.72	2800	4.88
1600	−8.56	3000	−5.36
1800	−9.72	3200	0
2000	−7.12	3400	5.57
2200	−7.27		

오차에 대해서 보여주고 있다. 이 오차는 토크의 약 1.5%의 손실이 예측되고, 그 원인으로 사용한 저역 통과 필터(Low Pass Filter)의 차단주파수에 따라 오차가 발생함이 보였으며, 모터 파라미터의 부정확성에 대한 오차로 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 상태 관측기를 사용하여, d축, q축의 역기전력를 추정하여 추정한 역기전력을 기반으로 회전자의 위치 및 속도 정보를 추종하였다. 또한 추종한 회전자의 정보를 활용하여 PMSM 센서리스 속도 제어기가 실제 산업 현장에서 활용이 가능한 결과를 낼 수 있는지에 대한 성능을 평가를 위해 최근 친환경 산업 개발로 영향력이 확대되고 있는 무급유식 공기압축기에 PMSM을 결합하여 최고 속력 3400RPM까지의 동작 패턴에 맞추어 PMSM을 구동 하여, 회전자 정보 추종과 속도 제어의 결과를 분석하였다. 본 논문에서 수행한 방법에 의해 추종된 회전자의 정보로 센서리스 구동 시 속도지령에 맞추어 속도제어가 원활히 운전되어 센서리스 제어의 가능성을 확인하였으며 실험으로부터 만족스러운 구동 결과를 도출하였다. 그러나 추종한 회전자 위치정보와 실제 모터의 회전자 정보에는 사용한 저역 통과 필터(Low Pass Filter)의 차단주파수와 모터의 파라미터의 부정확성에서 오는 오차가 발생하였다. 이 오차를 줄이기 위해서 속도 별 위상 보상값을 사용하는 등의 추가적인 연구를 진행하여 향후 추정 오차를 보상 하고자 한다.

참고문헌

1. Hee Jun Choi, Myung Joon Nam, Hag Wong Kim, Kwan Yuhl Cho, Byung Kuk Lim, “Rotor Position Estimation Algorithm of PM Synchronous Motor with Low Resolution Position Sensors”, 2015 Power Electronics Annual Conference, pp.213-214, July, 2015.
2. Mohamed Rashed, Peter F. A. MaxXonnel, A. Fraser Stronach, and Paul Acarnley, “Sensorless In direct-Rotor Field-Orientation Speed Control of Permanent Synchronous Motor With Stator-Resistance Estimation” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 54, No 3, June, 2007.
3. E. Urlep, G. Edelbaher and K. Jezemik, “Sensorless Control of PMSM Using Measurement of Phaes Voltage”, ieee isie 2005, pp. 20-30, June, 2005.
4. L. Xu, C. Wang, “Implementation and experimental investigation of sensorless control schemes for PMSM in super-high variable speed operation”. IEEE-IAS Annu. Meeting, Vol.1, pp.483-489, 1998.
5. Bon Ho Bae, Seung Ki Sul, Jeong Hyeck Kwon, Ji Seob Byeon, “Implementation of sensorless vector control for super high speed PMSM of turbo compressor”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.39, No.3, pp. 811-818, 2003.
6. L. Changsheng, M. Elbuluk, “A sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor”, IEEE IAS Annual Meeting, Vol.2, pp.1273-1278, Sept-Oct. 2001.
7. Ju-Beom Son, Hong-Ryel Kiim, Young-Soo Seo, Jang-Myung lee, “PMSM Sensorless Speed Control Using a High Speed Sliding Mode Observer”, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol. 16, No.3, pp. 256-263, March. 2010.
8. Min Ho Kim, Bon Ha Koo, Oh Yang, “Digital power IC design using VHDL and FPGA”, Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 27-32, December. 2013.
9. Silverio Bolognani, Sandro Calligaro, Roberto Petrella, “Design Issues and Estimation Errors Analysis of Back-EMF-Based Position and Speed Observer for SPM Synchronous Motor”, IEEE JOURNAL of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.2.No.2, pp.161-165, June, 2014.
10. Min Ho Kim, Oh Yang, “Sensorless Speed Control of PMSM using Stator Flux Estimation and PLL”, Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No.2, pp.35-40, June. 2015.

접수일: 2015년 8월 31일, 심사일: 2015년 9월 11일,
게재확정일: 2015년 9월 22일