

# 센서리스 위치오차보상기능을 가지고 있는 공기압축기 구동용 영구자석 동기모터의 센서리스 속도제어

김윤현<sup>1</sup>, 김솔<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한밭대학교 전기공학과, <sup>2</sup>유한대학교 전기공학과

## Sensorless Speed Control of PMSM for Driving Air Compressor with Position Error Compensator

Youn-Hyun Kim<sup>1</sup>, Sol Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Hanbat University

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Yuhan University

**요약** 본 논문은 무급유식 공기 압축기가 널리 확산됨에 따라 영구자석형 동기 모터를 이용한 고효율 공기 압축기의 센서리스 제어에 관한 논문이다. 공기 압축기는 특성상 위치 센서를 설치하기 어려운 문제를 가지고 있다. 영구자석형 동기모터를 가변속 제어하기 위해서는 회전자의 위치를 파악하기 위한 위치센서가 필수적이다. 따라서 영구자석형 동기모터를 압축기에 활용하기 위해서는 센서리스제어가 필수적이다. 센서리스제어 방식으로 널리 사용되고 있는 역기전력을 통한 위치추정방식은 정지좌표계의 사용으로 인한 위상지연으로 인한 위치오차가 발생하게 되거나, 동기좌표계의 사용으로 인한 과도상태에서 추정역기전력이 오차를 포함하여 발산의 문제 등이 발생하는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 회전자 추적 관측기를 사용하여 위치와 속도를 추정하고 외란 관측기를 통하여 속도의 리플을 저감시키는 방안을 제시하였다. 프리스케일사의 MPU를 이용하여 실험장치를 구성하고 구현실험을 통하여 제안한 알고리즘의 타당성을 검토하였다. 일정 시점에서 위치오차를 강제로 주더라도 위치보정 값이 위치오차 값을 찾아가며 추정위치가 실제 벡터 위치로 수렴해감을 검증하였다.

**Abstract** The sensorless control of high efficiency air compressors using a permanent magnet type synchronous motor as an oil-free air compressor is quite common. However, due to the nature of the air compressor, it is difficult to install a position sensor. In order to control the permanent magnet type synchronous motor at variable speed, the inclusion of a position sensor to grasp the position of the rotor is essential. Therefore, in order to achieve sensorless control, it is essential to use a permanent magnet type synchronous motor in the compressor. The position estimation method based on the back electromotive force, which is widely used as the sensorless control method, has a limitation in that position errors occur due either to the phase delay caused by the use of a stationary coordinate system or to the estimated back electromotive force in the transient state caused by the use of a synchronous coordinate system. Therefore, in this paper, we propose a method of estimating the position and velocity using a rotation angle tracking observer and reducing the speed ripple through a disturbance observer. An experimental apparatus was constructed using Freescale's MPU and the feasibility of the proposed algorithm was examined. It was confirmed that even if a position error occurs at a certain point in time, the position correction value converges to the actual vector position when the position error value is found.

**Keywords** : Back-EMF, Observer, Oil-free Air Compressor, PMSM, Sensorless control

\*Corresponding Author : Sol Kim(Yuhan Univ.)

Tel: +82-2-2610-0733 email: slamsol@yuhan.ac.kr

Received December 18, 2017

Revised February 28, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

## 1. 서론

무급유식 공기압축기는 내부에 윤활을 필요로 하지 않기 때문에 압축 공기 중에 유분이 포함 되지 않고 깨끗한 공기를 얻을 수 있는 공기압축기로 친환경적인 산업 개발을 추구하는 사회적 분위기에 맞추어 공기 압축기는 오일식에서 무급유식으로의 전환이 증가하고 있다. 또한 간단한 유지 보수, 저진동, 고안전성, 고수명 및 에너지 절감형 그리고 인체에 무해하다는 장점으로 식품 음료와 섬유, 반도체 분야 등 친환경 제조분야에 오일을 대체하여 물을 사용한 무급유식 공기 압축기의 시장이 점차 확대 되고 있으며, 이러한 상황에서 무급유식 공기 압축기의 전력 절감과 효율 향상에 대한 연구도 중요시 되고 있다.

최근에는 고효율 공기압축기의 개발을 위해 가변속 전동기를 채용하여 최적 운전에 의해 운전효율을 향상하는 것이 필수적으로 되고 있으며 전동기의 가변속 구동을 위해서는 전동기와 인버터 조합에 의한 가변속 제어가 일반적이다[1]. 또한 가변속용 구동전동기를 기존 유도전동기에서 영구자석 동기모터(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)로 전환하는 추세로 모터 효율 자체만으로도 5% 이상 향상하는 등의 전력절감과 효율 향상의 결과를 얻을 수 있다. PMSM의 정밀 토크 제어와 가변속 제어를 위해서는 회전자 자속위치 및 속도 정보를 필요로 하며, 이 정보는 위치 센서를 기반으로 검출하고 있다[2]. 그러나 공기압축기의 특성상 위치 센서를 설치하여 사용하기가 어려워, 속도 및 위치추정 센서가 없이 가변속제어가 가능한 센서리스 제어 알고리즘이 제안되고 있고, 무급유식 공기 압축기의 PMSM 구동도 센서리스 제어가 필수적이다[3].

영구자석 동기모터의 센서리스제어는 전동기의 전압 방정식을 기반으로 하는 수학적 모델을 이용하여 역기전력 또는 자속을 직접 추정하거나 관측기를 사용하여 추정하고, 추정된 역기전력으로부터 회전자 위치 및 속도를 추정하는 것이 일반적이다[4]. 영구자석 동기모터의 전압방정식은 정지좌표계 모델과 동기좌표계 모델로 표현할 수 있으며 정지좌표계 모델을 사용하는 경우 역기전력으로부터 회전자 위치정보를 직접적으로 얻을 수 있으나 저역통과필터 등의 영향으로 역기전력 추정기의 위상지연으로 인해 속도가 증가할수록 실제 역기전력과 추정 역기전력 사이의 위상차가 증가하여 회전자 추정 위

치의 오차가 증가하게 되는 문제점이 있다[5]. 동기좌표계 모델의 경우 정상상태에서 추정 역기전력이 직류성분이 되기 때문에 추정기의 위상지연 문제가 발생되지 않으나 과도상태에서 추정 역기전력이 추정 속도의 오차만큼 비례하는 오차가 포함되어 발산의 문제 등 센서리스 제어 성능을 저하하는 단점이 있다[6].

따라서 본 논문에서는 정지좌표계와 동기좌표계의 상태관측기의 각 장단점을 서로 보완할 수 있는  $d$ 축,  $q$ 축의 역기전력 추정기반의 PMSM 가변속 센서리스 제어를 제안하고자 한다. 또한 추정된 역기전력을 기반으로 ATO(Angle Tracking Observer)를 사용하여 위치와 속도를 추정하였으며, 회전자의 위치 및 속도 정보를 추출할 경우 속도리플의 저감을 위해서 외관측기를 사용하였다. 본 연구에서 제안된 센서리스 제어이론은 무급유식 공기압축기에 적용하였으며, 여러 실험을 통해 성능 결과를 분석하여 제안한 PMSM의 센서리스 속도제어가 공기압축기 응용이 가능함을 확인 하고자 한다.

## 2. PMSM의 센서리스 속도 제어

### 2.1 정지좌표계 상태관측기와 ATO를 이용한 위치, 속도 추정

Fig. 1은 정지좌표계모델 상태관측기 기반과 ATO를 이용하여 속도와 위치를 추정하는 과정을 나타낸 블록 다이어그램이다. 역기전력 관측기를 통하여  $\hat{E}_{ds}$ ,  $\hat{E}_{qs}$ 를 추정하고 추정된  $\hat{E}_{ds}$ ,  $\hat{E}_{qs}$ 을 ATO PLL에 적용하여 속도와 위치를 추종한다. Fig. 1의 역기전력 관측기는 비돌극형 영구자석 동기모터의 전압방정식에 의해  $dq$ 축 정지좌표계에서의 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

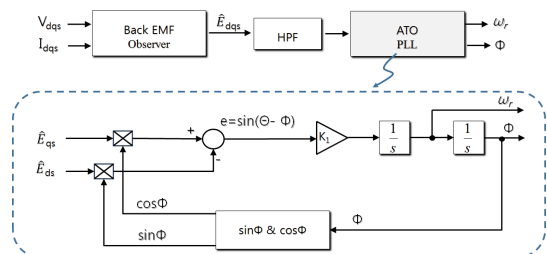


Fig. 1. Block diagram of  $\hat{E}_d$ ,  $\hat{E}_q$  observer & Block Diagram of Simplified ATO

$$V_{dqs} = R_s I_{dqs} + L_s \frac{d}{dt} I_{dqs} + E_{dqs} \quad (1)$$

식 (1)에서  $V_{dqs}$ ,  $I_{dqs}$ ,  $E_{dqs}$ 는 각각 정지좌표계 전압, 전류, 그리고 고정자권선에 쇄교된 자속에 의해 유도된 역기전력에 해당한다.  $R_s$ 와  $L_s$ 는 각각 고정자 저항과 동기 인덕턴스에 해당한다. 또한 역기전력의 역학 방정식에서 모터의 속도  $\omega_m$ 이 천천히 변화하는 경우에는 모터의 역기전력에 의해 식 (2)와 같이 근사화 된다.

$$\frac{d}{dt} E_{dqs} = j\omega_m E_{dqs} \quad (2)$$

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

$$\frac{d}{dt} \hat{I}_{dqs} = \frac{1}{L_s} (V_{dqs} - \hat{R}_s \hat{I}_{dqs} - \hat{E}_{dqs}) + K_1 (I_{dqs} - \hat{I}_{dqs}) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{E}_{dqs} = j\tilde{\omega}_m \hat{E}_{dqs} + K_2 (I_{dqs} - \hat{I}_{dqs}) \quad (4)$$

여기서  $K_1$ 과  $K_2$ 는 게인 상수이고,  $\hat{I}_{dqs}$ ,  $\hat{E}_{dqs}$ 는 각각 전류와 역기전력의 추정상태 값이고 저항과 인덕턴스 추정치는 실제 값과 동일한 것으로 고려하여 파라미터 변동의 영향은 본 논문에서는 고려하지 않았다. 식 (4)의 속도항은  $\tilde{\omega}_m = \hat{\omega}_m$ 과 같이 추정속도로 대입하면 노이즈와 동적안정도에 약하므로  $\tilde{\omega}_m = 0$ 으로 대체하여 식 (5)와 같이 표현하여 적용하였다[5].

$$\frac{d}{dt} \hat{E}_{dqs} = K_2 (I_{dqs} - \hat{I}_{dqs}) \quad (5)$$

속도와 위치정보의 추출 전에 역기전력의 추정 값은 Fig. 1과 같이 직류 성분의 제거를 위해 HPF (High Pass Filter)가 필요로 하다. 그러나 이 HPF는 위치의 추정과정에서 차단주파수 설정 값에 의해 속도에 따른 다른 위

상오차를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 위의 오차를 필터의 영향을 덜 받는 동기좌표계 상태관측기로 보상하고자 한다.

Fig. 1에서는 또한 ATO PLL을 이용하여 속도와 위치를 추정하는 알고리즘을 보여주고 있다. 여기서  $\hat{E}_{qs}$ 는  $E_s \sin\theta$ ,  $\hat{E}_{ds}$ 는  $E_s \cos\theta$ 의 형태를 갖고 기존에서는 tangent 법에 의해  $\theta$ 를 계산하나 이 방법은 정밀도를 위해 많은 lookup table이 요구되며 90도 근처에서는 탄젠트가 무한대에 근접하므로 오차가 더 증가할 소지가 있다. 따라서 본 논문에서는 ATO PLL을 이용하여 특정의 lookup table이 없이 안정되게 위치를 정밀하게 추정할 수 있다. ATO PLL은 추종하고자 하는 위치  $\hat{\theta}$ 의  $\sin\hat{\theta}$ ,  $\cos\hat{\theta}$ 를 각  $\hat{E}_{qs}$ 와  $\hat{E}_{ds}$ 에 곱하고 빼주면 삼각함수의 공식을 사용하여 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = E[sin\theta\cos\hat{\theta} - \cos\theta\sin\hat{\theta}] = E\sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (6)$$

따라서 추정하고자 하는 위치  $\hat{\theta}$ 가 실제 위치  $\theta$ 와 일치하면  $e$ 는 0이 되므로 식 (6)의  $e$ 가 0이 되도록 추정위치  $\hat{\theta}$ 를 반복적으로 수렴하도록 추정한다.

Fig. 2는 ATO PLL의 위치 추정 과정을 나타낸 플로차트를 나타낸다.

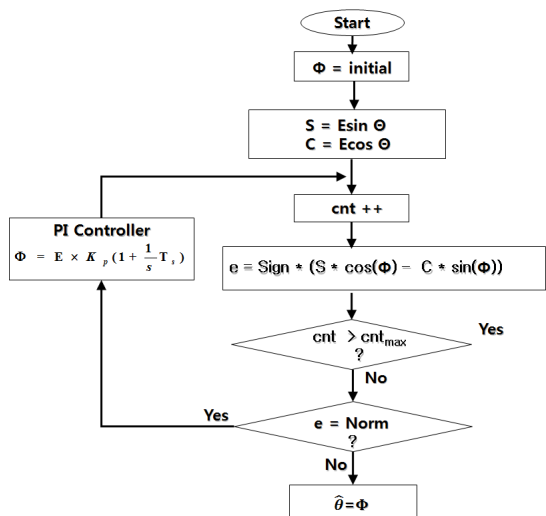


Fig. 2. Flow Chart of applied ATO

## 2.2 동기좌표계 상태방정식을 통한 위치, 속도 오차 보상

정현과 역기전력 파형을 가진 비돌극형 PMSM의 전압방정식을 기반으로  $dq$ 축 동기좌표계로 역기전력 상태 관측기를 나타내면 다음 식 (7)~(10)과 같이 된다.

$$L \frac{d}{dt} \hat{I}_{de} = -R \hat{I}_{de} + \omega_m L \hat{I}_{qe} + V_{de} - \hat{E}_{de} + K_{d1} (I_{de} - \hat{I}_{de}) \quad (7)$$

$$L \frac{d}{dt} \hat{I}_{qe} = -R \hat{I}_{qe} - \omega_m L \hat{I}_{de} + V_{qe} - \hat{E}_{qe} + K_{q1} (I_{qe} - \hat{I}_{qe}) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{E}_{de} = K_{d2} (I_{de} - \hat{I}_{de}) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{E}_{qe} = K_{q2} (I_{qe} - \hat{I}_{qe}) \quad (10)$$

여기서  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{q1}$ ,  $K_{q2}$ 는 관측기 게인이고,  $\hat{I}_{de}$ ,  $\hat{I}_{qe}$ 는 각각  $dq$ 축 추정 상태 전류,  $\hat{E}_{de}$ ,  $\hat{E}_{qe}$ 는 각각  $dq$ 축 추정 상태 역기전력이다. 이때 위상 벡터가 실제 벡터에 맞으면  $\hat{E}_{de}$ 는 0이 되고  $\hat{E}_{qe}$ 는 최대가 되므로  $\hat{E}_{de}$ 가 0이 되도록 위치를 추정하는 방법을 구현하였다. 식 (9), (10)는 정지좌표계와 마찬가지로 모터의 속도  $\omega_m$ 이 천천히 변화하는 경우를 고려하여 표현하였으며 속도 변동이 심한 경우 동기좌표계에서는 위치 추정이 수렴하지 않고 발산하는 현상이 발생하기 쉽다. 그러나 동기좌표계에서 추정한 위치는 동기좌표계이므로 전류, 역기전력 등 물리량은 dc값으로 표현된다. 따라서 펄스 등의 영향으로 발생하는 위상 지연 현상은 나타나지 않아 정지좌표계에서 추정한 위치를 기본으로 정지좌표계에서 발생한 위치 오차를 동기좌표계 상태관측기의 추정 값으로 보상하는 방법을 제시하였다.

## 2.3 외란 관측기를 이용한 속도리플 보상

본 논문의 센서리스 제어기의 추정 속도는 속도리플이 증가하는 문제점이 발생하여 외란 관측기를 구성하여 속도제어기 성능을 향상시켰다. 외란 관측기를 구성하기 위한 상태방정식은 아래 식 (11), (12)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{w} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{o1} & (-\frac{1}{J}) \\ -k_{o2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{w} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{o1} \\ k_{o2} \end{bmatrix} (w - \hat{w}) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (11)$$

$$y = [1 \ 0] x = w \quad (12)$$

여기서  $w$ 는 속도,  $T_d$ 는 외란추력,  $J$ 는 회전체의 관성 모멘트,  $T_e$ 는 구동토크이고,  $\hat{w}$ 는 추정속도,  $\hat{T}_d$ 는 추정 외란이다. 위 식을 기반으로 외란 관측기 속도제어기의 블록도는 Fig. 3과 같이 구성하였다. 일반적인 속도 제어기에 외란 관측기를 사용하여 추정 속도의 리플을 최소화 시켰으며 외란 관측기를 사용한 속도제어기를 적용하여 속도제어의 안정성을 높였다.

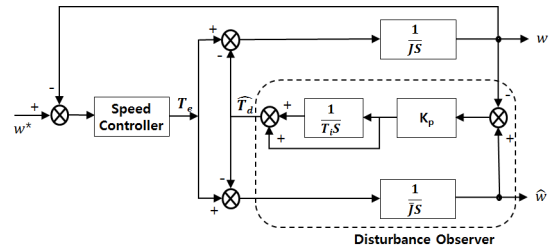


Fig. 3. Block Diagram of Disturbance Observer Speed Controller

## 2.4 전체제어기 구성

Fig. 4는 본 논문에서 제시한 PMSM의 센서리스제어의 전체 속도제어기의 블록도이다. 정지좌표계상의 전류와 전압 지령치를 기반으로 정지좌표계의 역기전력 상태 관측기를 통해,  $d$ 축  $q$ 축의 역기전력을 추정하여, ATO PLL을 이용하여 위치와 속도를 추종하였으며 그림과 같이 이 값을 동기좌표계의 역기전력 상태 관측기를 이용하여 오차를 보상한 새로운 최종 위치  $\hat{\theta}$ 를 추정하였다. 위치정보로 PMSM의 벡터 제어 구동을 하였으며, 전류 제어와 속도제어는 PI 제어기를 사용하였다. 또한, 외란 관측기를 사용하여 추정 속도를 보정하여 PMSM의 센서리스 속도 제어의 안정도를 높였다.

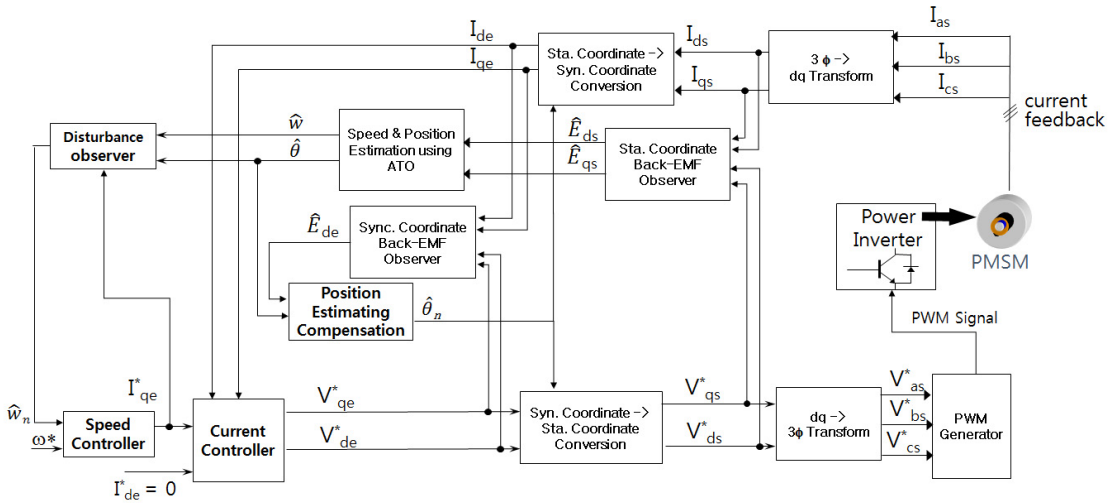


Fig. 4. Block diagram of sensor-less speed control system for PMSM

### 3. 결론실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험장치의 구성

본 논문에서 제안한 알고리즘을 확인하기 위해 Fig. 5(a)에서와 같이 국내 공기압축기 회사의 제품인 i-14000 Inverter Oil Free Air Compressor를 사용하였다. Fig. 5(a)의 무급유식 공기 압축기는 오일을 대신하여 물을 사용하는 무급유식 공기 압축기와 이 공기 압축기에 결합하여 속도 구동을 하는 6극 60마력(HP)의 PMSM를 Fig. 5(b)에 보여주었다. 또한 Fig. 5(c)는 본 논문의 센서리스 제어를 담당하는 구동인버터로 제어보드는 FreeScale사의 MPU인 MK60FX512VLQ15를 사용하여 구성하였다.

현재의 센서리스 제어는 초기 기동이 문제로 대두되고 있다. 초기 기동을 위한 초기 위치 추정을 위해서는 고조파 삽입법, 돌극 구조의 정보 등이 필요로 하나 본 논문에서는 초기 기동을 고려하지 않고 정상속도에서의 센서리스의 안정화에 연구의 목적을 두었으며, 따라서 초기 기동은 지속적으로 직입기동을 하여 모터의  $V_{dss}$ ,  $V_{qss}$ ,  $I_{dss}$ ,  $I_{qss}$ 와 모터 파라미터의 값을 측정하여 회전자 위치와 속도를 추측하고 추정된 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.

다. 이후 추정된 회전자 정보를 가지고 센서리스 구동을 하며, 속도리플을 관측하며 센서리스의 성공여부를 판단하여, 센서리스가 되었다고 판단하면 목표 속도까지 속도제어를 하도록 구성하였다.

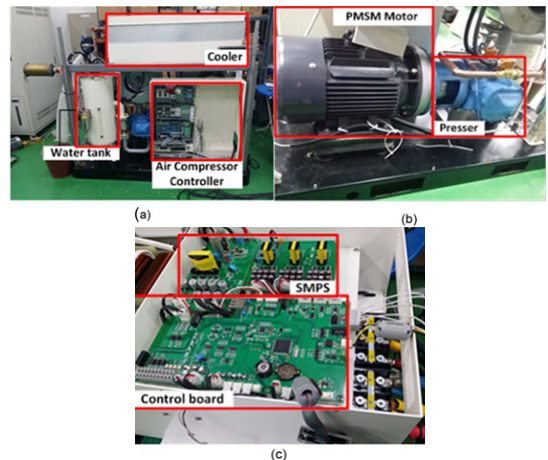


Fig. 5. Experimental Setup (a) Air compressor used in the experiment, (b) PMSM used in the experiment, (c) Inverter used in the experiment.

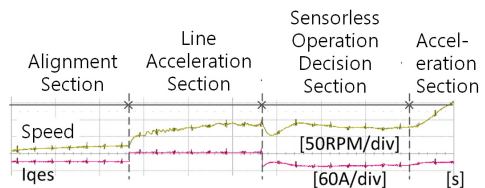


Fig. 6. Start-up control for PMSM.

Fig. 6은 초기기동의 패턴에 맞추어 모터가 기동한 결과를 확인 한 내용이다. 처음 3초간은 모터를 정렬시키고 100 RPM까지 직입가속을 거쳐 센서리스 결과판단 이후 목표 속도까지 가속하는 결과를 보여주고 있다. 직입가속 직후 센서리스속도제어로 제어시스템이 교체되는 구간에서는 추종된 회전자 정보를 이용하여 모터를 벡터제어하기 때문에 모터를 구동하기 위한 토크의 크기가 줄어드는 형태를 관찰 할 수 있다. 또한, 순간적으로 감소한 전류량으로 인해 속도 또한 감소하였으나, 속도 제어기에 의해 목표 속도까지 속도와 토크의 크기가 증가하는 과정을 실험을 통해 관찰 할 수 있었다.

### 3.2 PMSM 센서리스 속도 제어 실험결과

Fig. 7은 정지좌표계상에서 상태관측기를 이용하여 추정된  $d, q$  축 역기전력 파형과 이  $d, q$  축 역기전력을 기반으로 하여 ATO PLL Tracking에 의해 추정한 위치파형  $\hat{\theta}$  및 실제 측정된  $\theta$ 와 비교 결과를 보여주고 있다.

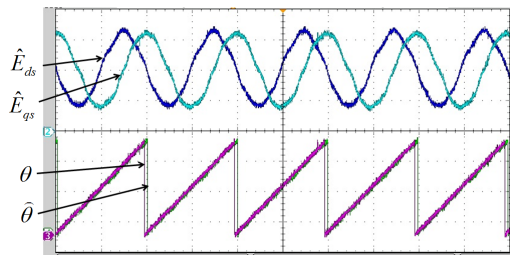


Fig. 7.  $\hat{E}_{ds}$ ,  $\hat{E}_{qs}$ , estimation theta( $\hat{\theta}$ ) and real theta( $\theta$ ) at 1000 RPM.

그림에서 역기전력 파형은 고조파를 포함하고 있어 고조파율을 감소시키기 위해 필터를 사용함에 따라 추정 위치가 실제 위치와 지연에 의한 위상 오차가 존재함을 확인하였다. 그림은 1000RPM에서 시험하여 약 7도의 추정 위치의 오차가 있었지만, 모터의 속도 제어에는 발산은 일어나지 않는 오차범위 이지만 속도가 증가하면 오차는 증가하고 벡터각의 불일치로 발생 토크에 손실이 발생하여 성능 저하의 요인으로 작용할 수 있다.

Fig. 8과 9는 정지좌표계상에서 상태관측기를 이용한 센서리스 제어 구현 속도제어 파형을 나타낸다. Fig. 8은 스텝 속도 1,000[rpm]…… 지령으로 PI제어를 1[msec] 주기로 수행하여 gain을 조정할 시험파형으로 추정 위치 기반으로 하는 센서리스 벡터제어와 속도제어가 원활히

동작함을 알 수 있다. Fig. 9는 본 논문의 응용 부하인 공기압축기에 적용한 센서리스 속도제어 파형으로 시험 파형에서 처음은 정렬모드로 0도에 정렬시킨 후 50[A] 전류제어로 기동운전을 200[rpm]까지 서서히 속도를 증가시켰으며 200[rpm]에서 일정시간동안 속도제어로 운전된 다음 ramp 함수로 1,000[rpm]까지 증가한 후 정속 구간을 거쳐 감속되도록 속도pattern을 주어 속도제어를 수행하였다. 시험파형에서 전 구간에 걸쳐 속도제어가 잘 수행됨을 알 수 있었으며 가속구간에서 토크전류가 증가하고 감속구간에 제동토크로 인해 전류가 감소함을 확인할 수 있었다.

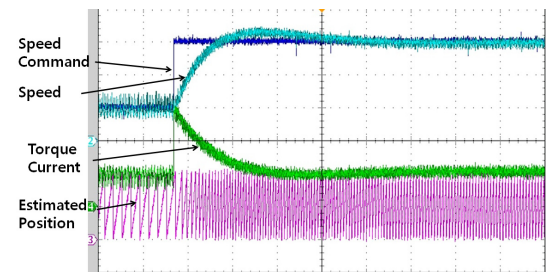


Fig. 8. Step response.

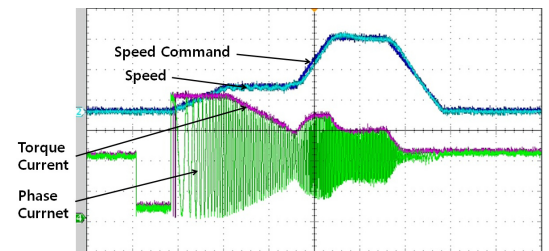


Fig. 9. Speed control of the air compressor.

Fig. 10은 외란 관측기 실험 파형으로 토크 전류가 외란부하의 영향으로 리플이 발생하며 이 리플의 형태는 추정외란과 같은 모양을 띄고 있음을 확인하였다. 따라서 외란관측기 기반으로 속도를 새로 추정, 보상하였으며, Fig. 11은 100 RPM에서 추종 속도의 리플과 외란 관측기를 사용하여 보상한 속도리플에 대한 실험 결과이다. 추종된 속도는 낮은 속도에서 리플이 가장 컸으며, 속도리플의 저감효과를 보여주기 위해 100 RPM에서 실험을 수행하였으며 외란 관측기를 사용하여 속도리플의 저감을 확인할 수 있었다.

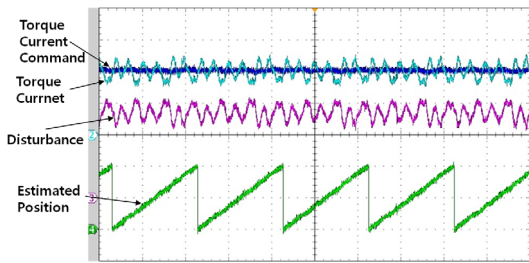


Fig. 10. Experimental result of the disturbance observer.

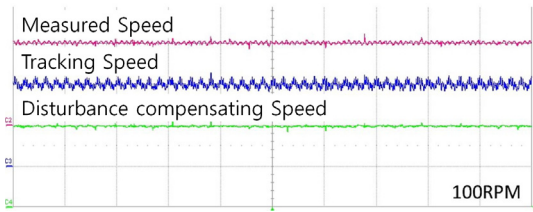


Fig. 11. Ripple enhancement of tracking speed at 100RPM.

Fig. 12는 회전좌표계상의  $d, q$ 축 역기전력 상태관측기를 이용한 센서리스 위치 추정 보정시험 파형이다. 위치보정 알고리즘은 위치가 정확하면  $d$ 축 역기전력이 0이 되나 오차가 존재하면  $d$ 축 역기전력이 0이 되지 않아 이 값을 위치보정 값으로 이용하여 위치를 보정하였다. 그림에서 실험을 위하여 일정 시점에서 위치오차를 강제로 주었을 때 위치보정 값이 위치오차 값을 찾아가며 추정위치가 실제 벡터 위치로 잘 수렴해감을 알 수 있어 정지좌표계상 상태관측기 센서리스 제어의 단점을 보완한 안정된 센서리스 제어를 구현할 수 있었다.

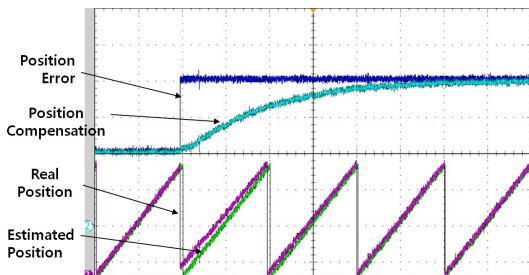


Fig. 12. Position compensation experiments based on EMF of rotational coordinate system

## 4. 결론

본 논문에서는 정지좌표계와 동기좌표계의 상태관측기의 각 장단점을 서로 보완할 수 있는  $d$ 축,  $q$ 축의 역기전력 추정기반의 PMSM 가변속 센서리스 제어를 제안하였다. 정지좌표계상의 전류와 전압 지령치를 기반으로 정지좌표계의 역기전력 상태 관측기를 통해,  $d$ 축  $q$ 축의 역기전력을 추정하여, ATO PLL을 이용하여 위치와 속도를 추종하였으며, 다시 이 값을 동기좌표계의 역기전력 상태 관측기를 이용하여 오차를 보정한 새로운 최종 위치  $\hat{\theta}$ 를 추정하였다. 위치정보로 PMSM의 벡터 제어 구동을 하였다. 또한, 센서리스 제어기의 추정 속도는 속도리플이 증가하는 문제점이 발생하여 외란 관측기를 구성하여 속도제어기 성능을 향상시켰다. Freescale사의 MPU를 이용하여 구동제어기를 구성하여 제안된 알고리즘을 검증한 결과 일정 시점에서 위치오차를 강제로 주더라도 위치보정 값이 위치오차 값을 찾아가며 추정위치가 실제 벡터 위치로 수렴해감을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] Moo-Yeon Lee, Jong-Phil Won, Dong-Yeon Lee, Chung-Won Cho, "Study on the Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System Using Inverter Scroll Compressor", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 12, no. 10 pp. 4308-4313, 2011. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.10.4308>
- [2] Yong-Seok Lee, Jun-Keun Ji, "Vector Control of SPMSM Using MATLAB/SIMULINK & dSPACE 1104 System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 9, no. 2 pp. 317-326, 2008. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.2.317>
- [3] 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 Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 811-818, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.810658>
- [4] K.-W. Lee, and J. Ha, "Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor", *Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 605-615, Jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.6113/JPE.2012.12.4.604>
- [5] S. Bolognani, and R. Petrella, R. Petrella, "Design Issue 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. 159-170, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2296974>

- [6] B. N-Mobaraken, F. M-Tabar, F-M Sargos, "Back EMF Estimation-Based Sensorless Control of PMSM: Robustness With Respect to Measurement Errors and Inverter Irregularities", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 485-494, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.889826>
- 

**김 윤 현**(Youn-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1999년 2월 : LG 산전연구소 책임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>  
전기기기, 전력전자

---

**김 솔**(Sol Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2005년 8월 : 전기 기기인력양성센터 수석연구원
- 2005년 9월 ~ 현재 : 유한대학교 전기공학과 교수

<관심분야>  
전기기기, 자동화설계