

# 초고속 PMSM 센서리스 속도제어시의 기동정지방법

이진우\*, 바이사, 류지수  
두원공과대학\*, 서호전기(주)

## Starting and Stopping Method for the Sensorless Speed Control of a Super-High Speed PMSM

Jin Woo Lee\*, BAYASGALAN D, Ji Su Ryu  
Doowon Technical College\*, SEOHO Electric Co., Ltd.

### ABSTRACT

This paper suggests a new starting and stopping method appropriate for the sensorless PMSM drive with air bearings. The proposed method based on the sensorless control algorithm of PMSM uses additional d axis current control to cope with the limitation of the adopted back emf based sensorless algorithm in the low speed region. The experimental results show that the proposed method drives appropriately the PMSM with air bearings.

### 1. 서 론

최근 효율 좋은 영구자석 동기전동기에 공기베어링을 적용한 초고속 전동기 구동장치가 개발되고 있다. 공기베어링은 기동시 기저속도 이상으로 가능한 빨리 가속하여 높은 속도에서 운전하는 것이 바람직하며, 설계된 방향으로 회전시키는 것이 요구된다. 초고속 전동기의 경우 센서를 장착하는 것이 용이하지 않기 때문에 보통 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 제어 방법을 채택하고 있다. 기존의 역기전력을 이용한 센서리스 제어방법<sup>[1]</sup>을 적용한 연구에서는 역기전력이 낮은 저속에서의 센서리스 제어 알고리즘의 특성을 보완하기 위하여 기동시 안정적인 센서리스 제어가 가능한 역기전력이 확보되는 속도로 미리 정한 전류/주파수 패턴을 이용한 개루프 제어방법을 채택하여 가속한다. 그리고 일정 속도 이상에서 센서리스 제어에 의한 페루프 제어로 전환하여 운전하며, 제어모드 전환시의 제어 불연속성에 따른 문제를 완화하는 방법을 채택하고 있다.<sup>[2],[3]</sup>

본 논문에서는 공기베어링의 특성을 고려하여 기저속도로 빠르게 가속하고, 기존 방식에서의 기동시 개루프 제어방법 사용에 따른 제어모드 전환을 피하기 위하여 기동초기부터 역기전력을 이용한 센서리스 제어방법으로 기동하며, 저속에서의 센서리스 제어 알고리즘의 성능을 보완하기 위하여 저속분 전류 지령치를 이용하는 방법을 제안한다. 그리고 정지후 재기동시 공기베어링의 역회전을 피하기 위하여 항상 일정한 위치에 정지시키기 위하여 정지시 저속에서 저속분 전류를 이용하여 정지하는 전기각을 일정하게 제어하는 방법을 제안한다. 그리고 실험결과를 통하여 제안한 방법의 타당성을 보이고자 한다.

### 2. PMSM 센서리스 제어시의 기동정지방법

#### 1.1 동기좌표계의 PMSM 모델

동기속도로 회전하는 회전자 좌표계에서 나타낸 PMSM의 전압방정식과 토크식은 각각 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_s i_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_s i_{ds} + \omega_e \lambda_{pm} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{pm} i_{qs} \quad (3)$$

여기서  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ ,  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  는 각각 d축과 q축의 전압과 전류이며,  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $\lambda_{pm}$ ,  $\omega_e$  는 각각 고정자 저항과 인덕턴스, 그리고 영구자석에 의한 쇠교자속과 동기속도이다.  $T_e$ ,  $P$  는 각각 전동기의 발생토크와 전동기의 극수이다.

#### 1.2 센서리스 제어시의 기동정지방법

PMSM의 벡터제어를 위해서는 회전자 영구자석의 자극위치에 따른 양의 d축 위치가 필요하며, 역기전력을 이용한 센서리스 제어방법에서는 전동기의 모델식을 이용하여 d축의 위치를 추정하지만 역기전력이 낮은 저속에서는 위치 추정이 어려운 특징을 갖고 있다.<sup>[1] [3]</sup> 한편, 정지한 전동기를 기동하기 위해서는 초기 자극위치가 필요한데, PMSM의 경우에는 고정자에 직류전류를 인가하면 자극위치에 따른 q축 전류성분이 나타나고, 식 (3)에 의한 토크가 발생하여 전동기가 회전하여 이상적인 전동기의 경우에는 발생토크가 영, 즉 q축 전류가 영이 되는 d축에 정렬하게 되지만 마찰, 부하가 존재하는 실제적인 경우에는 d축 부근에 정지하게 된다. 이렇게 정지하는 경우에는 초기 자극위치에 따라 정지한 d축이 양의 d축과의 위상차가 0° 또는 180°가 될 수 있으며, 이 위상차를 고려하지 않고 q축 전류를 인가하면 전동기는 정방향 또는 역방향 토크를 발생하기 때문에 회전방향이 달라질 수 있다.

기동 초기의 PMSM의 정지위치를 안정하게 항상 양의 d축이 되도록 하기 위해서는 직류전류를 인가하는 것이 아니라 먼저 서서히 회전하는 전류벡터를 전기각 회전각도로 360°까지 인가하고, 이후에는 일정시간 직류전류를 인가하는 방법을 사용한다. 이렇게 하여 기동초기 양의 d축을 추정된 후 양의 q축 전류를 인가하고 센서리스 제어 알고리즘에 의한 제어를 통하

여 전동기를 가속한다. 그러나 역기전력을 이용한 센서리스 알고리즘의 저속 성능을 보완하기 위하여 양의 d축 전류를 인가하는 방법을 사용하면 센서리스 제어 알고리즘에 의한 d축 추정각의 오차에 따른 영향을 완화할 수 있기 때문에 안정한 기동이 가능하다. 기저속도 이상으로 가속이 되면 속도제어기가 시작되며 속도제어기의 부드러운 천이를 위하여 사용하는 PI 속도제어기의 적분기 초기값을 제어모드 전환시 가속시의 q축 전류로 초기화한다. 이와 같은 기동방법을 사용하면 빠르고 안정한 기동이 가능하고, 속도제어기의 초기치만 고려하면 속도제어기 모드로의 천이가 간단하며 부드럽게 이루어진다.

한편 공기베어링의 경우에는 설계 수명을 보장하기 위하여 설계한 회전방향으로만 회전 운전을 하여야 한다. 그러나 기동 초기에 양의 d축을 모르는 상태에서 위와 같은 방법으로 기동을 하게 되면 양의 d축을 찾는 과정에서 역회전 할 수 있으며, 역회전이 반복되면 베어링 수명을 단축하게 된다. 따라서 가능하면 역회전을 줄이기 위해서 처음 초기 기동시는 어쩔 수 없지만 재기동시는 역회전을 피하는 것이 필요하다. 이를 위하여 전동기를 정지하는 경우에 일정한 운전패턴으로 정지하여 정지 위치를 기동 초기의 양의 d축 위치에 정지하도록 하여야 한다. 이를 위하여 정지시 일정 최저속도까지는 센서리스 속도제어를 하고, 저속에서는 양의 d축 전류를 인가하여 센서리스 제어의 제어성능을 보완하며, 최저속도 이하에서는 정해진 전류/주파수 패턴을 이용하여 감속 정지하고, 정지시의 제어각이 영이 되도록 하여 양의 d축 위치에 정지시킨다. 이렇게 정지한 상태에서 재기동시는 일정 직류를 인가하여 기동하는 방법을 사용한다. 이와 같은 운전방법을 사용함으로써 공기베어링의 역회전을 최소화 하도록 한다.

### 3. 60,000rpm PMSM 모터 드라이브 실험 결과

실험에서는 상용인버터를 사용하였으며, 인버터에 사용된 제어기는 TI사의 150MHz TMS320F28335 DSP이며, 실험용 전동기의 사양은 표 1과 같고 전동기에 속도센서가 장착되어 있지 않다. 그림 1은 제안한 방법에 따른 기저속도인 7,000rpm으로 기동하는 경우에 대한 실험 파형으로 초기에 제안한 방법에 의한 양의 d축을 찾은 후 안정하게 기동하는 것을 알 수 있다. 그림 2는 제안한 방법에 의하여 정지하는 경우의 파형으로 정지 마지막 구간에서 직류전류가 인가되며 양의 d축에 정지함을 알 수 있다.

표 1 7.5kW PMSM 모터의 사양  
Table 1 Specifications of 7.5kW PMSM Motor

정격출력	7.5kW	Rs	0.024Ω
최대속도	60,000rpm	Ls	0.135mH
극수	2극	정격자속	0.01358Wb

### 4. 결 론

본 논문에서는 공기베어링을 사용하는 60,000rpm 7.5kW PMSM 센서리스 제어시의 기동정지방법을 제안하고 실험을 통하여 제안한 방법에 의한 안정한 기동과 정지 및 재기동이 가능함을 보였다.

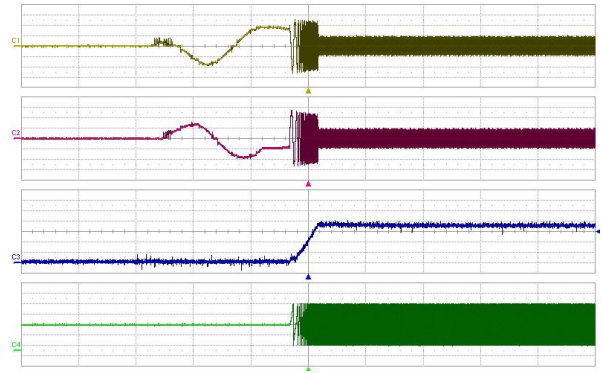


그림 1 제안한 기동방법에 따른 센서리스 제어 기동 파형 (C1:i<sub>as</sub>[10A/div], C2:i<sub>bs</sub>[10A/div], C3:ω<sub>rpm-est</sub>[2000rpm/div], C4:θ<sub>e-est</sub>[0.5πrad/div], time[1s/div])

Fig. 1 Waveforms of the sensorless control by the proposed starting method(C1:i<sub>as</sub> [10A/div], C2:i<sub>bs</sub> [10A/div], C3:ω<sub>rpm-est</sub> [2000rpm/div], C4:θ<sub>e-est</sub> [0.5πrad/div], time[1s/div])

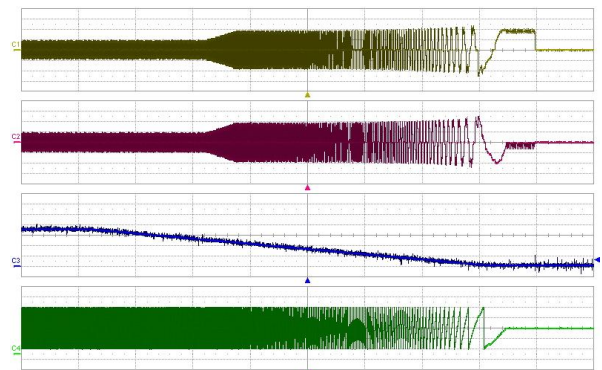


그림 2 제안한 정지방법에 따른 센서리스 제어 정지 파형 (C1:i<sub>as</sub>[10A/div], C2:i<sub>bs</sub>[10A/div], C3:ω<sub>rpm-est</sub>[2000rpm/div], C4:θ<sub>e-est</sub>[0.5πrad/div], time[1s/div])

Fig. 2 Waveforms of the sensorless control by the proposed stopping method(C1:i<sub>as</sub> [10A/div], C2:i<sub>bs</sub> [10A/div], C3:ω<sub>rpm-est</sub> [2000rpm/div], C4:θ<sub>e-est</sub> [0.5πrad/div], time[1s/div])

### 참 고 문 헌

- [1] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, pp. 300-308, April 1996.
- [2] B.H. Bae, S.K. Sul, J.H. Kwon, and J.S. Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super High Speed PMSM of Turbo Compressor", in IEEE IAS Conf. Rec., 2001, pp. 1203-1209.
- [3] A. Dianov, J.Y. Choi, K.W. Lee, and J.H. Lee, "Sensorless Vector Controlled Drive for Reciprocating Compressor", in Proc. IEEE PESC, 2007, pp.580-586.