

# 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 IPMSM의 센서리스 제어의 기동특성에 관한 연구

김상훈 정영석 권순재 김만고  
부경대학교

## A Study on Startup-Characteristic for Sensorless Control of IPMSM with Sliding Mode Observer

SangHun Kim, YoungSeok Jung, SoonJae Kwon, MarnGo Kim  
Pukyong National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 센서리스 제어의 기동특성에 관한 연구를 수행하였다. IPMSM의 센서리스 제어는 초기 구동시 회전자 위치를 알 수가 없으므로 Open-Loop 알고리즘을 이용하여 강제로 모터를 구동시킨다. 그러므로 Open-Loop에서 Closed-Loop로 제어되는 시점에서 부하의 상태에 따라 기동 특성에 문제점을 야기시킬 수 있다. 본 논문에서는 부하에 따라 기동 특성에서 야기되는 문제점과 해결책을 제시한다. 제시된 방법을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서론

SMO(Sliding Mode Observer)는 IPMSM의 역기전력을 이용한 위치 추정 알고리즘이기 때문에 저속영역이나 정지 상태에서는 위치정보를 얻을 수 없다. 때문에, Open-Loop 제어를 이용하여 일정속도로 초기 구동을 하게 된다. 기동 후 SMO에서 얻은 정보로 모터를 제어하기 위해 Close-Loop 제어로 전환하는 과정에서 부하에 따라 속도제어 양상이 달라지며 속도 응답이 불량해진다. 이는 기동시 부하를 고려하지 않고 필요 이상의 회전자계를 만들어주기 때문에 야기된다. 부하의 크기는 Open-Loop 제어시 SMO의 추정 위치와 제어 입력 위치의 오차로 추정 할 수 있으며, 회전자계의 크기는 q축전류크기를 제어함으로써 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Open-Loop 제어시 부하의 크기에 따른 전류제어를 함으로써 부하의 크기에 관계없이 기동응답이 양호하도록 제어한다. 기동 과도응답의 향상을 시뮬레이션을 통해 확인한다<sup>[1][2][4]</sup>.

### 2. IPMSM의 모델링

IPMSM은 d-q축(회전자의 위치를 정확히 알고 있을 경우의 기준 축)에서 다음과 같이 모델링 할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_d \\ \dot{v}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ wK_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

센서리스 제어에서는 정확한 회전자 위치를 알 수 없으므로 가상의  $\gamma$ - $\delta$ 축을 이용하며 식 (1)을 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_q & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3. 슬라이딩모드 관측기

슬라이딩 모드 관측기를 설계하기 위해 위에서 구한 IPMSM 모델 식을 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$L_d \begin{bmatrix} p i_\gamma \\ p i_\delta \end{bmatrix} = -R_a \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} + wL_q \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식으로부터 회전자 위치 정보가 포함된 역기전력을 얻을 수 있는 관측기는 다음과 같다.

$$L_d \begin{bmatrix} p \hat{i}_\gamma \\ p \hat{i}_\delta \end{bmatrix} = -R_a \begin{bmatrix} \hat{i}_\gamma \\ \hat{i}_\delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\gamma - i_\gamma) \\ \text{sign}(\hat{i}_\delta - i_\delta) \end{bmatrix} + \hat{w}L_q \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 4. 초기 구동

정지 상태에서 SMO는 회전자 위치를 검출 할 수 없으므로 임의의 회전 자계를 발생시켜 일정속도까지 가속시킨다. 일반적인 기동과정은 초기정렬, 회전자계생성, 입력위치와 SMO 추정위치 오차 보정의 3단계를 거치며, 이후 SMO를 이용한 속도제어로 전환된다. 본 논문에서는 q축 전류 벡터를 이용하여 회전자계를 생성하였으며 회전자계 생성 단계 중 부하의 상태를 추정하고 회전자계의 크기를 제어하는 단계가 추가된다. 따라서 다양한 부하조건에서 양호한 응답을 얻어 낼 수 있다.

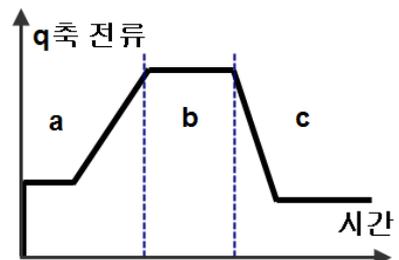


그림 1 초기 구동시 q축 전류

초기 구동시 각 단계는 위의 그림 1 으로 설명할 수 있다. 구간 (a)에서 강제정렬을 하고 구간 (b)에서 회전자계를 생성한다. 일반적인 구동 방법은 구간 (b)에서 Open-Loop 제어가 끝이 나지만 본 논문에서는 부하의 크기에 따라 q축 전류를 줄여주는 구간 (c)가 추가 되었다. 구간 (c)에서 q축 전류 크기 명령은 PI제어기를 통해 나온다. 이 PI제어기는 입력위치와 SMO 추정위치의 오차가 일정 범위 내에 들어오도록 q축 전류의 크기를 조절 한다.

### 5. 시뮬레이션

부하의 크기를 고려한 IPMSM 제어 블록 선도는 그림 2과 같이 간략하게 나타 낼 수 있다.

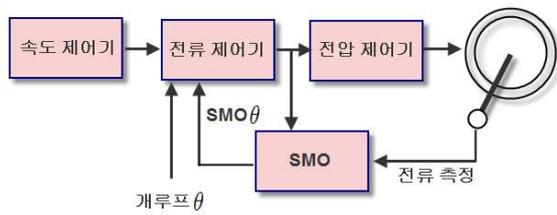
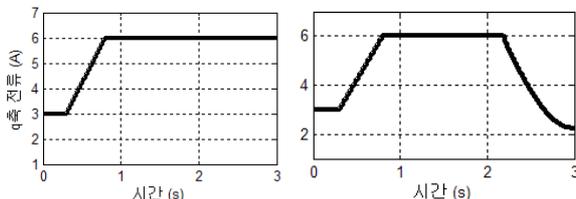


그림 2 블록 선도

본 논문에서 제안한 이론을 검증하기 위해 Matlab simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

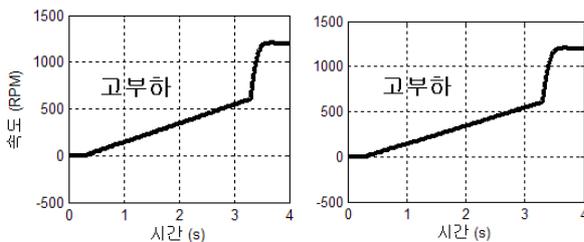
그림 3 은 일반적인 구동  $i_q$ (a) 와 부하를 고려한  $i_q$ (b) 의 파형을 나타낸다.



(a) 일반적인  $i_q$  제어 입력 (b) 제안된  $i_q$  제어 입력

그림 3 q축 전류

그림 4는 고부하시 일반적인 방법과 제안된 방법의 속도 응답을 나타낸다. 고부하시 응답특성이 양호하도록 제어기가 꾸며져 있으므로 제안된 q축전류 제어를 포함하지 않아도 양호한 결과를 확인 할 수 있다.

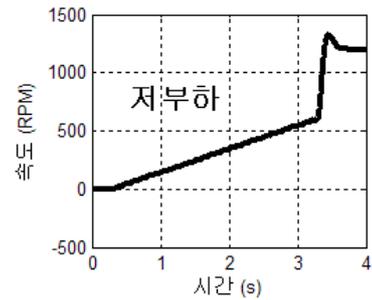


(a) 일반적인 방법 (b) 제안된 방법

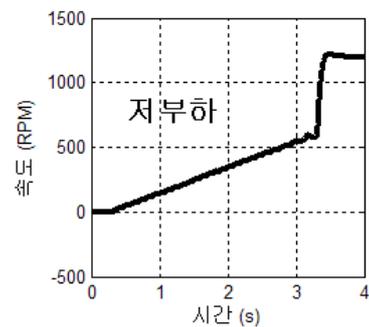
그림 4 고부하시 속도 제어

그림 5 은 저부하시 일반적인 방법과 제안된 방법의 속도 응답을 나타낸다. 일반적인 방법 5-(a)에서는 약 15%의 오버

슈트가 발생됨을 알 수 있지만 5-(b)의 개선된 전류제어의 속도 응답은 저부하 에서도 양호한 응답을 보장함을 확인 할 수 있다.



(a) 일반적인 방법



(b) 제안된 방법

그림 5 저부하시 속도 제어

### 6. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 IPMSM의 센서리스 제어의 기동특성에 대한 연구를 수행함으로써 속도제어 응답특성을 개선하였다. 고부하를 기준으로 선정된 제어기에 저부하 기동을 할 경우의 문제점을 확인하고, 부하의 크기에 따라 Open-Loop 제어시 회전자계의 크기를 조절하여 넓은 부하 영역에서 양호한 기동이 이루어지도록 제어기를 설계 하였다. 제안된 제어기의 성능은 시뮬레이션을 통해 확인 되었다.

이 논문은 부경대학교의 BK21연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] 한양대학교 에너지변환연구실, 매입자석 동기모터의 설계 및 제어, 인터뷰전, pp. 1-9, 2007.
- [2] 정동화, 전력전자 및 전동기 제어, 인터뷰전, pp. 395-396, 2007.
- [3] Y. S. Jung, "Sliding Mode Observer for Sensorless Control of IPMSM Drives", Proceedings of the JPE, Vol. 9, No. 1, pp. 117-123, 2009, January.
- [4] K. L. Kang, "슬라이딩 모드 관측기를 이용한 고속영역에서의 PMSM 센서리스 제어에 관한 연구", 대한전기학회, Vol. 53B, No. 1, pp. 30-36, 2004.