

# 단상 모터에서 센서리스 제어와 재 시작 전략

박재용, 하정익  
서울대학교

## Sensorless Control of Single-Phase PM Motor drive and Restart Strategy

Jaeyong Park, Jung-Ik Ha  
Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 위치 센서 없이 단상 모터를 운전하는 방법을 제안한다. 제안하는 센서리스 방식은 PM flux 추정기와 PLL 옵저버를 이용하여 구현된다. 이를 통해 홀 센서로 인한 조립상의 문제와 부피 증가 문제를 해결 할 수 있다. 또한 효율적인 운전을 위하여 0 속도가 아닌 파워가 다시 들어올 때 모터를 다시 구동하는 재 시작 전략 또한 제안한다. 이 방식은 위치 센서가 존재 하지 않기 때문에 재 시작시의 각도를 구하기 위한 0 전류 제어와 함께 전압의 zero crossing을 이용한다.

### 1. 서 론

팬이나 펌프와 같은 작은 파워와 작은 시작 토크를 요구하는 분야에서는 모터 사이즈를 줄일 수 있고, 간단한 구조를 가진다는 장점으로 인해 단상 영구자석 모터가 널리 사용되고 있다. 일반적으로 단상 영구자석 모터의 위치 정보를 측정 하기 위해 한 개의 홀 센서가 사용된다. 하지만 홀 센서는 조립상의 문제를 발생 시킬 수 있으며, 전동기의 축 방향 부피를 증가 시키는 등의 문제점이 존재한다. 따라서 홀 센서를 제거한 단상 센서리스 방식이 필요하다.

3상 영구자석 전동기에서 위치 센서를 제거 하기 위한 방법은 지난 수년간 많이 연구되어 온 반면에 단상 영구자석 전동기의 센서리스를 위한 연구는 거의 진행 되어 지지 않았다. 단상 영구자석 전동기에서 센서리스 제어를 위한 한가지 방식이 참고문헌 1<sup>[1]</sup>에서 제안되었다. 이 방식에서는 권선 시간 공유 방식을 통해 역기전력을 측정하는 것을 기반으로 센서리스 제어를 한다. 해당 구조는 단순하게 구현 할 수 있다는 장점이 있지만 속도 제어와, 토크 리플 측면에서 좋지 않기 때문에 본 논문에서는 flux 추정을 기반으로 각을 추정하는 방식을 제안한다.

한편 청소기 팬 모터와 같은 특정 상용 application에서는 모터가 정지상태가 되기까지 기다린 후 재 시작 하는 것이 아닌 파워가 다시 공급되자마자 원래의 높은 속도로 동작 하도록 하는 flying 재 시작 동작이 요구 된다.<sup>[2]</sup> 일반적으로 측정된 위치 정보를 이용하면 재 시작 구동을 쉽게 할 수 있지만 제안하는 단상 영구자석 센서리스 제어에서는 위치 센서가 존재 하지 않기 때문에 재 시작 시의 위치를 알지 못해 일반적인 재 시작 방법의 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 단상 영구자석 센서리스 제어의 새로운 재 시작 알고리즘 또한 제안한다. 제안 하는 내용은 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

### 2. 단상 센서리스 제어와 재 시작 전략

#### 2.1 단상 시스템 기본 제어 구조

본 논문에서는 그림 1과 같이 보조권선이 없는 표면부착형 영구자석 전동기(SPM) 대상으로 한다. 이러한 단상 전동기는 그림 2와 같이 b, c상 권선이 개방되어 있는 3상 SPMM과 물리적으로 동일 한 구조를 갖고 있다고 볼 수 있다. 따라서 정지좌표계 d, q축 전류는 식 (1)과 같이 나타내어 진다.

$$\begin{bmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\pi/3 & \cos 4\pi/3 \\ 0 & \sin 2\pi/3 & \sin 4\pi/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} I_{as} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

정지좌표계에서 회전 속도와 동기 되어 전압과 전류가 맥동하지만 기본과 성분은 dc값과 회전자 각으로 나타낼 수 있다. d, q축 전류는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ds}^s = I_{dsc} \cos \theta_r + I_{dss} \sin \theta_r, \quad (2)$$

$$I_{qs}^s = I_{qsc} \cos \theta_r + I_{qss} \sin \theta_r$$

여기서 'c'와 's'는 코사인파와 사인 성분을 나타낸다. Q축 전류는 보조권선 없는 단상 시스템에서는 0이기 때문에 식 (3)과 같다.

$$I_{qsc} = 0, I_{qss} = 0. \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 이용하여 평균 토크 값은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{e,avg} = -\frac{3P}{16}(2\lambda_f) \cdot (I_{dss} - I_{qsc}) = -\frac{3P}{8}\lambda_f I_{dss} \quad (4)$$

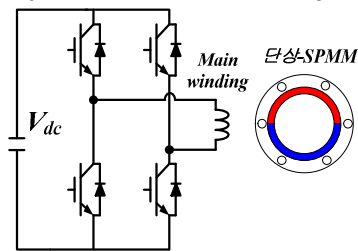


그림 1 H-bridge 인버터로 동작하는 단상 SPMM

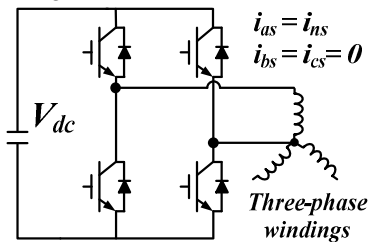


그림 2 단상 SPMM의 Alternative 구조

단상 시스템에서의 센서리스 속도제어 구조는 그림 3와 같다. 전류 지령 생성기에서는 식 (4)을 이용하여  $I_{dss}$  전류 지령값을 얻는다. 이때 효율적인 운전을 하기 위하여  $I_{dsc}$ 값은 0으로 고정된 값을 사용한다. 위치 센서가 존재 하지 않기 때문에 자속 추정기를 이용하여 각도 위치를 추정한다.

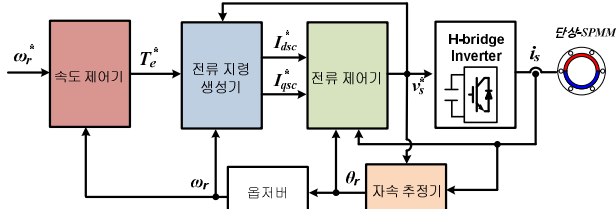


그림 3 단상 시스템에서의 센서리스 블록다이어그램

## 2.2 자속 추정기를 이용한 각 추정 방식

단상 영구자석 시스템에서 위치 각 정보는 영구자석의 자속 값을 이용하여 얻을 수 있다. 영구 자석의 자속 값은 회전자 각이 0° 일 때 가장 크고 180° 일 때 가장 작다. 따라서 영구자석의 자속은 식 (5)와 같이 코사인 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\psi_{PM} = \psi_k \cos \theta_r \quad (5)$$

영구자석의 자속을 얻기 위해서 자속 추정기를 사용하며 그 구조는 그림 4와 같다. 자속 추정기는 측정된 전류 값과 전류제어기의 출력 전압 값을 이용하며 식 (6)를 기반으로 동작한다.

$$\psi_{PM} = \int (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s - V_{comp}) dt - L_s i_{ds}^s \quad (6)$$

$$V_{comp} = (K_p + K_i / s) \cdot \psi$$

여기서  $\psi$ 는 전체 자속이며  $\psi_{PM}$ 은 영구자석의 자속 값이다. 이때, 자속 값을 추정하기 위해서 단순 전압 값을 적분 하게 되면 출력 값에 DC-offset 에러가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이를 보상 하기 위해서 PI제어기를 이용하였다. 얻어진 자속 값을 all-pass 필터 값을 취하게 되면 식 (7)과 같은 회전자각에 대한 사인 값을 얻을 수 있다

$$\psi_{PM\_all} = -\psi_k \sin \theta_r \quad (7)$$

식 (5)와 (7)에 대해서 arctan 함수를 취함으로써 회전자 각  $\theta_r$  값을 얻을 수 있다.

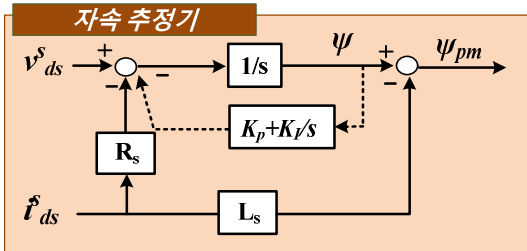


그림 4 자속 추정기 블록다이어그램

## 2.3 재 시작 전략

파워가 다시 들어오고 스위치 on이 시작 되면 먼저 0 전류 제어를 시작한다. 0전류 제어하면서 자속 추정기를 통해 각도를 추정 하고 싶지만 all-pass 필터를 적용 하기 위해서는 각 속도 값( $\omega_r$ )이 필요하다. 따라서 역기전력 전압이 zero crossing 하는 지점 간의 시간  $t_{zc}$ 를 구하고 이를 이용하여 식 (8)와 같이 각 속도를 계산한다.

$$\omega_{rpm\_zc} = 30 / t_{zc} \quad (8)$$

식 (8)의 값을 이용하여 all-pass 필터를 통과 시킨 값을 구하고 재 시작시의 각도를 추정 할 수 있다.

## 2.4 실험결과

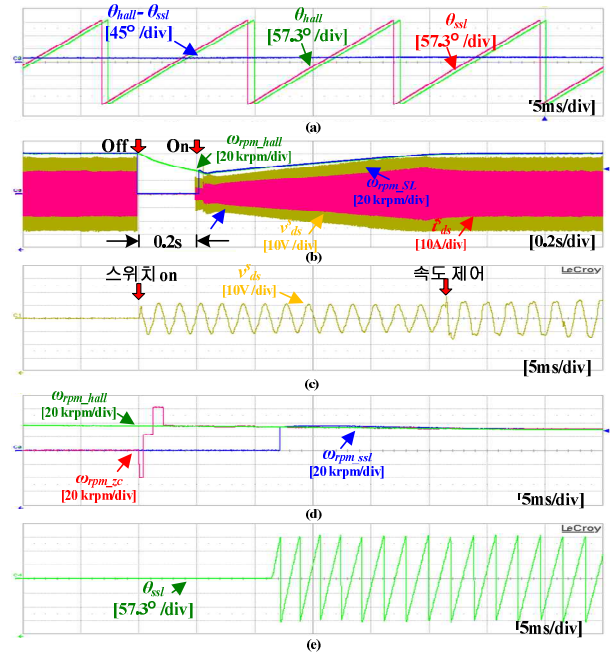


그림 5 실험 결과

그림 (a)은 홀 센서각도와 센서리스 각도를 보여준다. 각 오차가 5°이내로 센서리스 동작이 잘 되고 있음을 알 수 있다. 그림 (b)은 재 시작 알고리즘에 대한 그림이다. 스위치를 off한후 0.2초 후에 다시 on한 상황이며 모터를 0 속도 도달 하기 전에 곧바로 다시 재 시작하여 동작이 잘 되고 있음을 확인 할 수 있다. 그림 (c),(d),(e)은 그림 (b)의 on시작 점의 확대 파형이다. 스위치가 on되자마자 0전류 제어를 통해 역기전력 전압 값을 구하고 이를 통해 zero crossing 속도를 얻는 것을 확인 할 수 있다. 이 값을 이용해 자속 추정기 알고리즘을 실행하여 추정 각도를 구하고 속도제어 알고리즘까지 동작이 잘 됨을 확인 할 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 위치 센서 없이 단상 모터를 운전하는 방법과 재 시작 알고리즘을 제안하였다. 홀 센서의 제거를 통해 제품의 공정 신뢰도를 높이며 전체 부피를 줄일 수 있고, 가격을 절감할 수 있다는 장점을 얻을 수 있다. 또한 위치 센서 부재로 인한 재 시작의 어려움을 새로운 알고리즘을 제안함으로써 flying 재 시작을 가능 하도록 하였다. 제안하는 방법들은 실험을 통해 입증되었다.

## 참고 문헌

- [1] W. Wang, Z. Wu, W. Jin, and J. Ying, "Sensorless control technology for single phase BLDCM based on the winding time-sharing method," in *Proc. Ind. Electron. Soc.*, Nov. 005, pp. 1732-1736.
- [2] Kibok Lee, Sara A., and Srdjan M. Lukic, "Universal Restart Strategy for High-Inertia Scalar-Controlled PMSM Drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4001-4009, 2016.