

냉각 팬 구동을 위한 SPMSM의 센서리스 제어

Sensorless control of a SPMSM for driving cooling fans

김 상 훈* 김 지 민**
Kim, Sang-Hoon Kim, Ji-Min

Abstract

Recently, PMSMs(Permanent Magnet Synchronous Motors) have become increasingly popular in various high-performance motor drive applications. However, the high-performance drive of PMSMs needs a position sensor such as a resolver, which increases not only the price of the system but also reduces the system reliability.

This paper is on the implementation of sensorless control of a SPMSM, which drives a fan for cooling in appliances. In this paper, the rotor position for high-performance drive of a SPMSM is derived from back electromotive force (EMF) information proportional to the rotor speed. Also, the initial rotor position information for start-up is estimated from a saturation phenomenon of inductance. The validity of the proposed sensorless drives was confirmed by the experiment on the SPMSM drive systems for cooling fans of refrigerators and laptop computers.

키워드 : 표면 부착형 영구자석 동기 전동기, 센서리스 제어, 초기위치추정
Keywords : SPMSM, Sensorless control, Initial rotor position estimation

1. 서론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 효율, 출력/토크 밀도, 속응성 등의 여러 성능이 유도 전동기나 직류 전동기에 비해 우수하기 때문에 고성능 특성이 요구되는 여러 전동기 구동분야에서 그 사용이 크게 증가하고 있다. 이러한 영구자석 동기 전동기는 벡터 제어(Vector Control) 기법을 통해 출력 토크를 순시적으로 제어할 수 있는데, 이때 필요한 회전자의 위치 정보를 위해 절대형 엔코더(Absolute Encoder) 또는 레졸버(Resolver) 등의 위치 센서(Position Sensor)가 사용된다. 그러나 이

러한 위치 센서는 진동이나 충격에 취약하고 신호 처리를 위한 인터페이스로 인해 시스템이 복잡해지며 노이즈의 영향을 받기 쉬워 신뢰성이 떨어지는 여러 문제점을 가진다. 더욱이 저가의 소형 전동기 구동 시스템에서 센서는 시스템의 가격을 크게 증가시키게 되므로 사용하기 어렵다.

따라서 이를 해결하기 위해 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어(Sensorless Control)의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 센서리스 제어는 크게 전동기의 수학적 모델을 통해 추정하는 방식과 자기적인 돌극성(Magnetic Saliency) 등과 같은 비이상적 특성(Secondary Effects)을 통해 추정하는 방식으로 나뉜다[1].

본 논문에선 냉장고와 노트북 컴퓨터의 냉각을 위한 팬(Fan) 구동용으로 사용되는 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)

* 강원대학교 전기전자공학부 교수
** 강원대학교 전기전자공학부 대학원, 석사과정, 교신저자

의 센서리스 제어 방법을 제안하고 실제로 구현하였다. 저가의 소형 전동기 구동 시스템에 적합한 간단한 구현을 위해 역기전력 정보를 기반으로 하는 센서리스 방식을 적용하였다. 또한 기동시에 필요한 회전자 위치 초기 위치는 고정자 인덕턴스의 포화현상을 통해 추정을 하고 강제여자를 통해 초기 위치를 확립하였다. 전동기를 기동시킨 후에는 동기 운전을 통해 가속을 하고 충분한 역기전력 정보가 이용 가능한 특정 속도 이상에서 센서리스 벡터 제어로 전환하였다. 구현된 센서리스 알고리즘은 냉장고와 울트라 노트북 컴퓨터의 냉각 팬을 위한 두 SPMSM 구동 시스템에 대한 실험을 통해 입증하였다.

2. 센서리스 제어 기법

영구자석 동기 전동기의 순시 토크를 제어하기 위한 벡터 제어에는 3상 교류 전류를 직접적으로 제어하지 않고, 그림 1에 보이는바와 같이 90° 위상차를 갖는 d와 q축 직류 전류로 변환하여 제어한다. 이때 d와 q축 전류가 각각 독립적으로 자속과 토크를 제어하게 하기 위해서는 그들 값이 직류로 표현되는 동기 좌표계로 변환할 필요가 있다. 동기 좌표계의 좌표변환에 필요한 회전자 자속각 θ_r 은 SPMSM과 같이 회전자가 영구자석인 동기 전동기의 경우 회전자의 위치가 된다. 통상적으로 이러한 회전자의 위치정보는 절대형 엔코더 또는 레졸버 등의 위치 센서를 통해 얻지만, 센서리스 제어에서는 이러한 센서를 사용하지 않고 추정을 통해 얻는다.

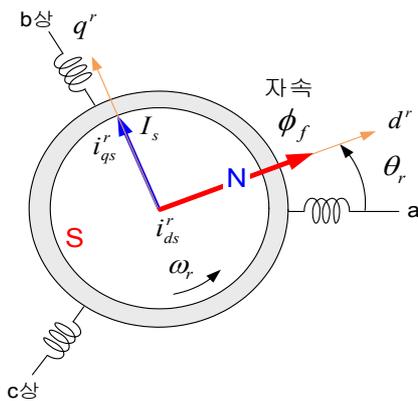


그림 1. SPMSM의 벡터 제어

2.1 회전자 자속각 및 속도 추정

회전자의 자속각을 추정하는 방식은 크게 수학적 모델을 이용하는 방식과 비이상적인 특성을 이용하는 방법으로 나뉜다. 본 논문에선 저가의 센

서리스 시스템 구현을 위해 역기전력을 기반으로 하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 비록 저속 운전시 우수한 출력토크 특성을 얻기 힘들지만 비교적 간단히 구현 가능하므로 팬 구동과 같이 저속 운전시 큰 토크를 필요로 하지 않는 시스템에 적용하기 유리하다. 이러한 역기전력을 기반으로 하는 센서리스 제어의 구현 방법은 다음과 같다.

회전자의 위치, 즉 자속각 θ_r 과 회전자 쇄교 자속과의 관계가 그림 2에 보인다. 이로부터 회전자 자속각은 정지 좌표계의 d-q축에서 표현된 회전자 쇄교 자속 $\lambda_{dr}^s, \lambda_{qr}^s$ 을 통해 다음과 같이 계산할 수 있음을 알 수 있다[2].

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qr}^s}{\lambda_{dr}^s} \right) \quad (1)$$

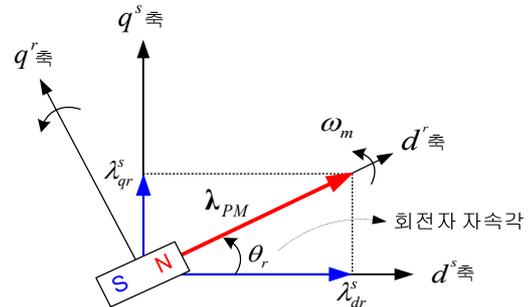


그림 2. 쇄교 자속과 자속각

회전자의 쇄교 자속은 고정자 전압 방정식을 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다. 정지 좌표계의 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} \quad (2)$$

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} \quad (3)$$

이로부터 고정자 쇄교 자속 $\lambda_{ds}^s, \lambda_{qs}^s$ 는 다음과 같이 추정이 가능하다.

$$\lambda_{ds}^s = \int (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \quad (4)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt \quad (5)$$

위 식으로부터 고정자 쇄교 자속을 계산하기 위해서는 전동기의 전압과 전류 정보가 필요하다. 전동기의 전압은 인버터로부터 PWM 형태로 주어지

기 때문에 측정하기 어려우므로 통상적으로 출력 전압의 지령치를 이용한다. 이 경우 회로의 단락방지를 위해 주어지는 데드 타임(Dead Time)과 스위칭 반도체 소자의 전압강하와 같은 인버터의 비이상적인 특성을 보상하여 지령 전압과 인버터의 실제 출력전압을 같게 할 필요가 있다. 전압과는 달리 전동기의 전류는 센서를 통해 직접 측정하여 얻는다. 측정된 전류에 오프셋(Offset)이 포함된 경우 쇄교 자속의 계산을 위한 식 (4)와 (5)의 계산식 적분 값이 포화될 수 있다. 따라서 이러한 오프셋을 제거하기 위해 고역 통과 필터를 거친 후 적분을 할 필요가 있다. 고역 통과 필터와 적분의 두 과정은 통상적으로 1차 저역 통과 필터 하나로 구현된다.

정지 좌표계의 고정자 쇄교 자속식은 고정자 전류에 의한 쇄교 자속과 회전자 영구자석에 의한 쇄교 자속의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda_{ds}^s = L_s i_{ds}^s + \Phi_f \cos\theta_r \quad (6)$$

$$\lambda_{qs}^s = L_s i_{qs}^s + \Phi_f \sin\theta_r \quad (7)$$

식 (4)와 (5)로부터 얻어진 고정자의 쇄교 자속을 식 (6)과 (7)에 각각 대입하면 자속각 계산에 필요한 회전자 쇄교 자속을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{dr}^s = \lambda_{ds}^s - L_s i_{ds}^s \quad (8)$$

$$\lambda_{qr}^s = \lambda_{qs}^s - L_s i_{qs}^s \quad (9)$$

속도 제어와 전류 제어에 있어 필요한 속도 ω_m 정보는 추정된 자속각의 미분을 통해 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\theta_r}{dt} \quad (10)$$

여기서 P 는 극수이다.

2.2 초기 위치 추정

전동기가 정지하고 있는 초기 상태에서는 역기 전력의 정보가 얻어지지 않으므로 앞의 방법으로는 회전자 자속의 위치를 알 수 없다. 따라서 고정자 철심의 포화현상을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하는 방법을 제안한다.

SPMSM의 고정자 쇄교 자속 λ_{phase} 는 영구자석에 의한 쇄교 자속 λ_{PM} 과 고정자 전류에 의한 $\lambda_{current}$ 의 합으로 표현되므로 쇄교 자속과 전류의 비로 표현되는 고정자 인덕턴스 L_s 는 다음과 같이

표현된다.

$$L_s = \frac{\lambda_{PM} + \lambda_{current}}{i_{phase}} = \frac{\lambda_{phase}}{i_{phase}} \quad (11)$$

SPMSM의 경우 매입형 영구자석 동기 전동기 (Interior Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)와는 달리 회전자에 물리적인 돌극성을 가지고 있지는 않지만 자기적인 돌극성에 의해 d-q축 인덕턴스가 다르게 나타날 수 있다. 즉, 회전자가 d축 좌표계에 존재하는 경우 회전자 자석에 의해 발생한 자속은 고정자 전류로 인한 쇄교 자속과 더해져 공극 자속의 밀도를 높이게 되어 철심이 포화된다. 이 경우 고정자 인덕턴스는 작아지게 된다. 이와 같이 고정자 인덕턴스 L_s 는 회전자의 위치에 따라 그림 3에 보듯이 $\cos 2\theta_r$ 로 변화하게 된다[3][4].

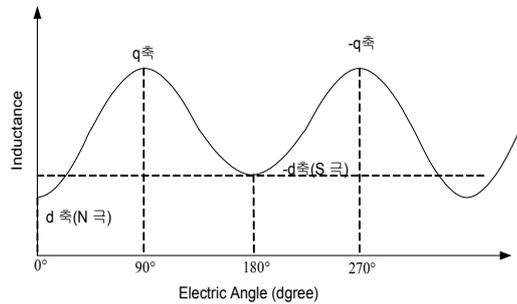


그림 3. 고정자 인덕턴스의 변화

회전자의 위치 즉, 좌표변환을 위한 d축은 포화로 인해 인덕턴스가 최소가 되어 전류가 많이 흐르게 되는 위치가 된다. 따라서 고정자의 여러 위치에 전압을 인가하여 이에 응답한 전류의 크기를 이용하여 초기위치를 추정할 수 있다. 이의 구현 방법은 다음과 같다.

3상 인버터에서 기본적으로 출력 가능한 유효전압 벡터는 6개($V_1 \sim V_6$)이며 그림 4와 같다.

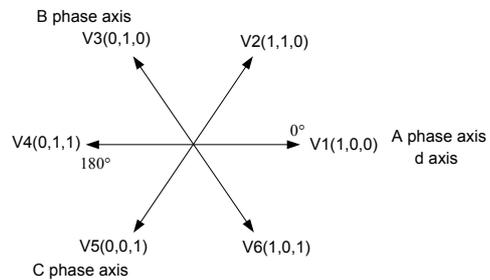


그림 4. 인버터 전압 벡터

이들 전압 벡터들에 대한 응답 전류는 전동기
 입력 측에서 측정하며 이때 측정 전류는 표 1에
 보이는바와 같이 구분된다.

표 1. 전압 벡터에 대한 측정 전류

Voltage Vector	Motor Current
V1	Ia
V2	-Ic
V3	Ib
V4	-Ia
V5	Ic
V6	-Ib

이러한 6개의 전압벡터를 인가한 후 각각의 응
 답 전류의 크기를 비교하게 되면 그림 5와 같이
 60° 내로 회전자 위치를 알 수 있게 된다. 그러나
 구역 판별만으로 회전자의 정확한 위치를 알 수
 없고, 인접 벡터와의 경계 부분에서 측정 오차가
 있을 수 있으므로 최종적으로 강제 여자를 통해
 회전자 위치를 확립한다. 강제 여자의 경우 위치
 확립시에 약간의 회전을 하게 되는데, 역회전을 방
 지하기 위해 회전 방향과 동일하게 회전 방향의
 인접 전압벡터를 인가하도록 한다.

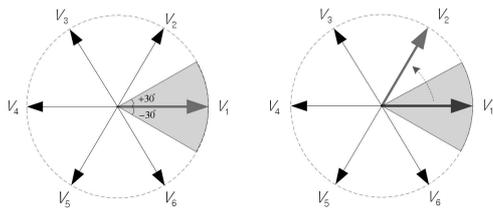


그림 5. 판별 위치 및 최종 설정 위치

이러한 원리를 바탕으로 한 회전자의 위치 추정
 과정과 기동 과정의 순서도가 그림 6에 보인다.

3. 실험 장치 구성

구현된 센서리스 제어의 알고리즘을 검증하기
 위해 Texas Instruments사의 TMS320F28335
 DSC(Digital Signal Controller)를 주 처리기로 사
 용하는 디지털 제어를 사용하였다. 실제 센서리
 스 알고리즘의 구현은 전용 칩(Chip)을 사용할 예
 정이다. 3상 인버터의 스위칭 소자로는 MOSFET
 를 사용하였고 그 스위칭 주파수는 15kHz이다. 디
 지털 제어기, 인버터와 냉장고와 울트라 노트북 컴
 퓨터의 냉각 팬용으로 사용된 두 종류의 SPMSM
 이 그림 7에 보인다. 두 SPMSM의 사양은 표 2와

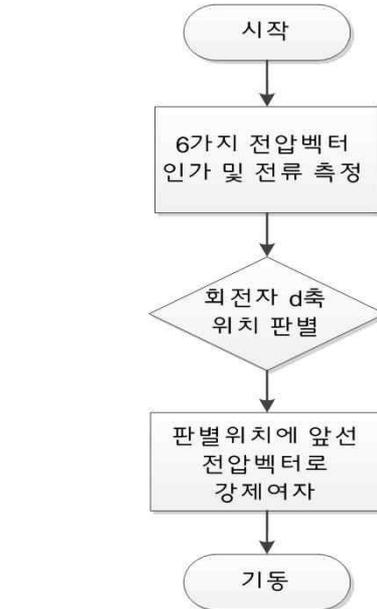


그림 6. 초기 위치 추정 및 기동의 순서도

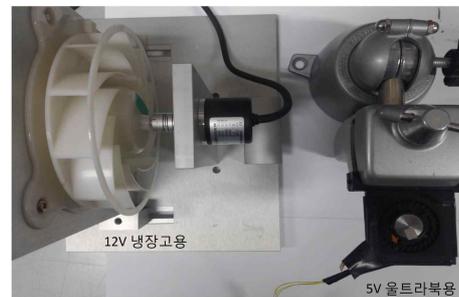


그림 7. 실험 시스템 및 사용된 SPMSM

표 2. SPMSM 사양

항목	냉장고용	울트라북용
극수	8극	8극
입력전압	12 Vdc	5 Vdc
상전류	0.2 A	140 mA
정격회전수	1700 rpm	6000 rpm
고정자 인덕턴스	4.2 mH	0.4 mH
저항	5.4 Ω	1.4 Ω

4. 실험 결과

먼저 기동을 위한 회전자의 초기 위치 추정을 위해 인가한 전압 벡터와 그에 따른 전류가 그림 8에 보인다. 6개의 전압 벡터들을 연속적으로 인가 후 측정된 전류가 각각 그림 9에 보인다. 전압 벡터는 각각의 방향에 따라 4회씩 인가하며 전류의 최대, 최소치를 뺀 나머지 2회 전류 값의 평균을 취한다. 측정된 전류의 크기비교를 통해 가장 큰 전류(즉, 가장 작은 인덕턴스)를 발생하는 전압 벡터의 위치를 찾아 그곳을 d축의 위치로 선정한다. 전압 벡터의 인가 순서에 따라 전동기가 회전할 수 있으므로 V1-V4-V2-V5-V3-V6 순서로 인가한다.

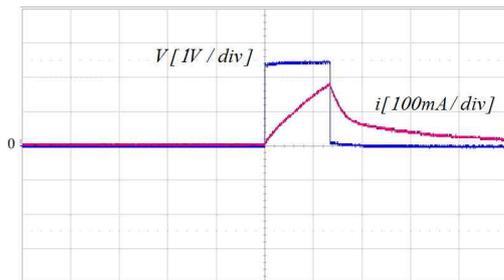


그림 8. 인가 전압 벡터와 전류

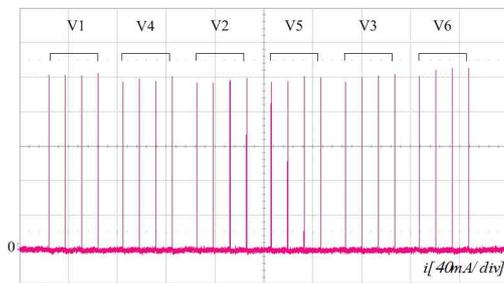


그림 9. 인가 전압벡터에 따른 측정 전류

본 논문에서 적용한 역기전력을 바탕으로 하는 센서리스 기법은 역기전력의 크기가 작은 저속영역에서는 사용하기 어렵다. 따라서 추정된 초기 위치를 사용하여 기동을 한 후 동기 운전을 통해 가속을 하게 되며, 역기전력이 충분히 확보되는 특정 속도이상에서 센서리스 운전으로 전환이 되도록 한다.

그림 10은 12V SPMSM에 대한 1700rpm까지의 가속특성으로 실제 속도와 추정 속도 및 고정자 전류를 보인다. 실제 속도는 엔코더를 통해 계산하였으며, 기동과 정격속도까지 우수한 제어 특성을 확인할 수 있다. 동기 가속에서 센서리스 백터 제어로의 전환 속도는 350rpm으로 설정하였다. 그림 11은 5V SPMSM의 경우 정격속도까지의 가속 특성을 보인다. 이 역시 우수한 제어 특성을 확인할 수 있다. 이 경우 엔코더를 사용하기 힘들어 추정 속도만 보인다. 실제 속도는 타코미터를 통해 측정하였는데, 추정속도와 일치함을 확인하였다.

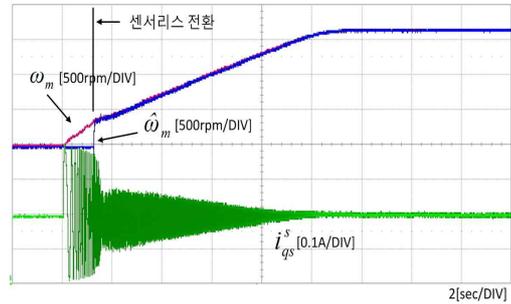


그림 10. 12V SPMSM 가속 특성

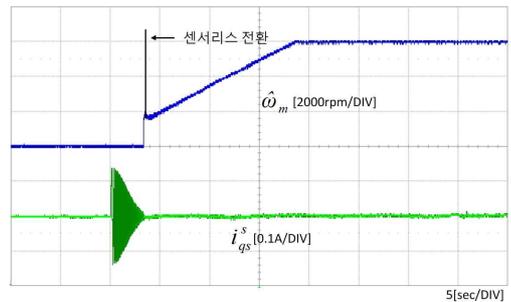


그림 11. 5V SPMSM 가속특성

5. 결론

본 논문에서는 저가의 소형 팬 구동용 SPMSM의 센서리스 구동 시스템을 구현하였다.

인덕턴스 포화현상을 이용한 초기 위치를 추정하였으며, 역기전력을 기반으로 하는 센서리스 제어 방식을 적용하였다.

구현된 센서리스 알고리즘은 냉장고와 울트라

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제34권, 2014.
김 상 훈, 김 지 민

노트북 컴퓨터의 냉각 팬용 두 SPMSM 구동 시스템에 대한 실험을 통해 그 효용성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Mario Pacas, "Sensorless Drives In Industrial Applications", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp.16-23, June 2011.
- [2] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터제어*, 복두 출판사, 2011.
- [3] 장주영, 최찬희, 석출기, "정밀 토크 제어를 위한 SMPM 전동기의 약자속 영역에서 자기 돌극성 추정", *조명·전기 설비학회 논문지*, vol.23, no.8, pp.67-73, 2009.
- [4] 이윤규, "인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기 위치 추정", *강원대학교 대학원 석사학위 논문*, 2010.