

I/F 초기 기동 방법을 적용한 드럼세탁기용 IPMSM의 벡터제어

박진호, 이정효, 김경민, 원충연
성균관대학교

IPMSM Vector Control using an I/F Initial Operating Method for Drum Washing Machine

Jin-Ho Park, Jung-Hyo Lee, Kyung-Min Kim, Chung-Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

Because few signals are generated using low resolution position sensor at low speed, rotor position estimation is difficult in drum washing machine application. Besides, inertia of water and drum affect the initial operation load up to two times of rated load. Therefore overcurrent can be occurred at initial operation. In this paper, IPMSM vector control for drum washing machine is proposed by applying I/F initial operating method and sensorless control. And we verify the performance through experiment.

1. 서 론

최근의 드럼세탁기는 드럼에 전동기를 직접 연결하여 전동기 취부 공간에 대한 제약을 줄이고, 기존의 벨트에 의한 손실을 제거하는 방식이 사용된다. 이런 방식은 효율이 증가하는 장점이 있는 반면에 세탁 부하의 변동이 직접 전동기에 영향을 주며 편심이 발생할 경우 철심이 파괴될 위험이 있다. 따라서 드럼에 직접 취부 하는 전동기의 제어는 부하에 강인해야하며 드럼의 편심을 어느 정도 제거하여야 한다.

기존 드럼세탁기의 구동 방법은 회전자의 정확한 위치 정보가 필요 없는 v/f 제어 방법이나 BLDC(Brushless DC) 전동기에 일반적으로 사용되는 2상 여자 방식을 사용하고 있다. 하지만 2상 여자 방식의 BLDC(Brushless DC) 전동기는 상 전환 시 토크 리플이 발생하여 역기전력이 정현파인 BLAC(Brushless AC) 전동기에 비해 구동 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 그리고 v/f 제어 방법은 구현이 쉽다는 장점이 있지만 주파수 변화에 따른 전동기 내부 임피던스의 변화를 제대로 반영하지 못하기 때문에 역률과 효율이 떨어지는 단점이 있다.^{[1][2]} 뿐만 아니라 드럼세탁기의 급변하는 부하에 대한 순시적인 토크 제어가 불가능하기 때문에 전동기의 고성능 제어가 어렵다. 이에 비해 벡터 제어 방법은 자속 축의 전류와 토크 축의 전류를 따로 제어하기 때문에 순시적인 토크 제어가 가능하여 효율 향상이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 이 방법은 높은 분해능의 회전자 위치 센서를 필요로 한다. 벡터 제어 방법에 일반적으로 사용되는 증분형 엔코더(Incremental Encoder)는 가격 및 내구성, 취부 공간의 제약 등과 같은 문제로 인하여 실제 드럼세탁기에 적용하기가 어렵다. 한편 홀센서에 의한 제어는 낮은 분해능 때문에 벡터제어에 필요한 충분한 위치 정보를 얻을 수 없다. 특

히 저속에서의 구동은 Edge 신호 발생이 늦기 때문에 제어에 필요한 위치정보 획득이 어렵다. 따라서 순시적인 속도 및 위치 추정이 가능한 센서리스 제어 방법이 필요하다.

또한 드럼세탁기의 초기 기동 부하는 물에 의한 관성에 의해 정격 부하의 두 배 까지 인가된다. 정확한 회전자의 위치 정보 없이 이러한 부하가 인가되면 과도한 기동 전류에 의한 탈조가 발생할 위험이 크다. 따라서 기동 부하가 크더라도 안정적으로 전동기를 제어할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 드럼세탁기용 IPMSM의 벡터제어에 속도 및 위치 추정에 강점을 갖는 별도의 센서리스 제어 방법을 적용한다. 그리고 과도한 기동 전류의 문제점을 해결하기 위한 I/F 초기 기동 방법을 적용하여 드럼세탁기용 IPMSM의 벡터제어를 구현한다. 그리고 실험을 통하여 구동성능을 확인한다.

2. 홀센서를 사용한 초기 위치 추정 알고리즘

홀센서는 회전자 영구자석의 N극과 만날 때 전압을 발생시킨다. 이 때, 홀센서에서 전압을 발생하는 순간은 특정 회전자 위치에 고정되며 이 신호는 전동기의 정확한 회전자 위치 정보를 포함한다. 2개의 홀센서에서 90° 간격으로 발생하는 On/Off 신호에 따라서 초기 회전자의 위치를 A, B, C, D 4개의 구간으로 나누어서 검출이 가능하다.

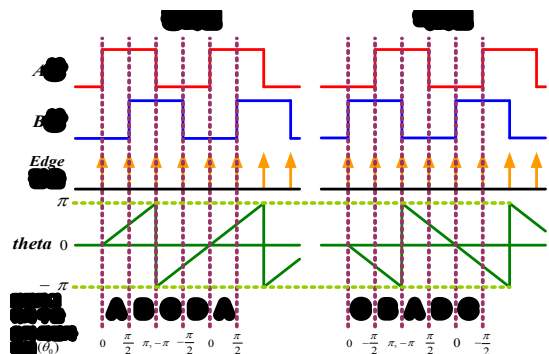


그림 1 정·역회전 시 홀센서 신호에 따른 초기 회전자 위치 정보
Fig. 1 Initial rotor position information in forward and backward direction using 2-hall sensors signal

그림 1은 홀센서의 Edge 신호를 사용하여 정·역회전 시 초기 회전자의 위치정보를 나타내는 그림이다. 이와 같은 방법

으로 검출된 초기 회전자 위치 정보 θ_0 를 이용하여 I/F 초기 기동 시 기준 회전자 위치 정보 $\theta_{reference}$ 를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\theta_{reference} = \int 2\pi f^* dt + \theta_0 \quad (1)$$

3. I/F 초기 기동 방법

I/F 초기 기동 방법은 고정 전류 지령을 인가하여 일정한 토크를 발생시키는 방법이다.^[3] 고정 전류 지령으로 일정한 토크를 발생시키므로 제어기가 탈조하는 위험을 방지한다. 따라서 기존의 v/f 제어 방법의 단점인 저속 구동 시 낮은 전압 지령으로 인해 과도 전류가 발생하는 현상을 해결할 수 있다.

초기 기동 전류의 크기는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 일정 속도로 구동하는데 필요한 전동기의 전체 쇄교자속은 식 (2)와 같다.

$$\lambda = \frac{V_{back_EMF}}{\omega} \quad (2)$$

한편 전동기의 쇄교자속은 d축 전류와 q축 전류에 의해서 결정되며 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda = \sqrt{(L_d i_{d-reference} + \phi)^2 + (L_q i_{q-reference})^2} \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 영구자석에 의한 자속이다. d축에 흐르는 전류가 거의 없다고 가정하면 식 (3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda = \sqrt{(\phi)^2 + (L_q i_{q-reference})^2} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 I/F 기동 시의 전류를 계산하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_{q-reference} = \frac{\sqrt{(\lambda^2 - \phi^2)}}{L_q} \quad (5)$$

비록 전동기에서 발생하는 토크는 부하 토크에 대한 영향도 고려하여 설계해야 하지만, 근사적인 지령 전류는 결정할 수 있다. 본 논문에서는 I/F 초기 기동 방법에 의한 도달 속도를 20[rpm]으로 결정하였으며, 식 (5)로 계산된 초기 기동 전류는 약 0.3[A]이다.

4. IPMSM의 벡터제어

본 논문에서는 순시적인 회전자 위치와 속도를 추정하기 위해 참고문헌 [4]에서 제안한 센서리스 제어 방법을 적용하였다. 그림 2는 적용한 센서리스 제어의 위치 추정 방법을 나타낸 블록도이다.

이 방법은 전류 모델 기반 센서리스 제어 방법의 장점인 부하에 강인한 점과, 저속 구동 시 위치 추정에 대한 장점은 그대로 가지면서 역기전력에 대한 아크탄젠트를 사용하지 않아 위치와 속도를 추정하는데 강점을 갖는다.

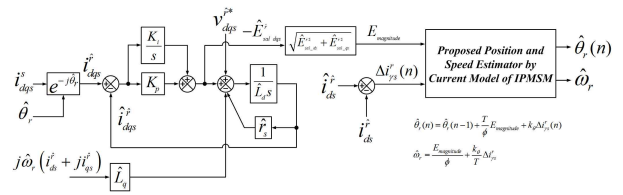


그림 2 적용한 센서리스 제어의 위치 추정 방법
Fig. 2 Rotor position estimation method of sensorless vector control using a back-EMF estimation and current model of IPMSM

그림 3은 제안한 방법을 적용한 IPMSM의 센서리스 벡터제어 블록도이다.

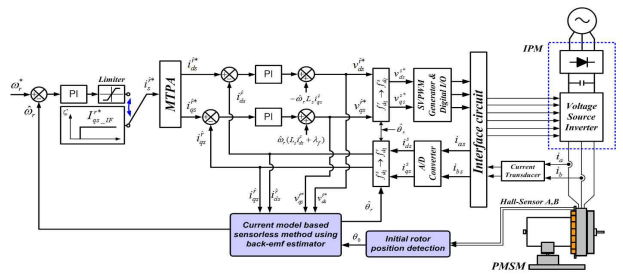


그림 3 IPMSM의 센서리스 벡터제어 블록도
Fig. 3 Block diagram of sensorless vector control for IPMSM

I/F 초기 기동 방법은 매우 짧은 시간동안 기동 토크를 발생시킨 후 속도 제어가 적용된 센서리스 벡터 제어 방법으로 전환된다. IPMSM의 특성을 고려하여 MTPA 제어를 적용하였고, 전동기의 빠른 응답을 갖는 토크 제어를 위해 센서리스 벡터제어 방법을 적용하였다. 또한 전류 제어기의 d축과 q축에 각각 역기전력 전향보상을 해주었고, SVPWM 방식으로 3상 인버터를 제어하였다.

5. 실험 결과

제안한 방법을 적용하여 실험을 하였다. 실험에 사용된 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 실험에 사용된 드럼세탁기용 IPMSM의 제정수
Table 1 IPMSM parameters for drum washing machine using in experiment

상저항(R_s)	3.05 [Ω]
d축 인덕턴스(L_d)	15.4 [mH]
q축 인덕턴스(L_q)	36.2 [mH]
쇄교 자속(ϕ)	0.0297 [Wb]
관성 모멘트(J_m)	0.0297 [$kg \cdot m^2$]
정격 출력(P_{rate})	1.8 [kW]
정격 전압(V_{rate})	310 [V]
정격 전류(I_{rate})	6 [A]
극 수($pole$)	24 [P]
정격 속도(ω_{rate})	400 [rpm]
정격 토오크(T_{rate})	20 [N · m]

정방향과 역방향 구동이 원활히 수행되는지 확인하기 위하여 파우더 브레이크를 이용하여 일정 부하로 전동기를 구속시킨 후 기동시켰으며, 지령 속도는 세탁 모드 시의 지령 속도 패턴과 동일하게 인가하였다.

그림 4는 10[N·m]의 부하 인가 시 I/F 초기 기동 방법을 적용하여 45[rpm]의 세탁모드에서 정방향과 역방향 기동 시의 속도와 전류, 추정 위치각에 대한 실험 파형이다.

I/F 초기 기동 방법은 0.02[sec]동안 적용하였다. 기동 부하가 큰 상태에서 잘 구동되는 것을 확인할 수 있다.

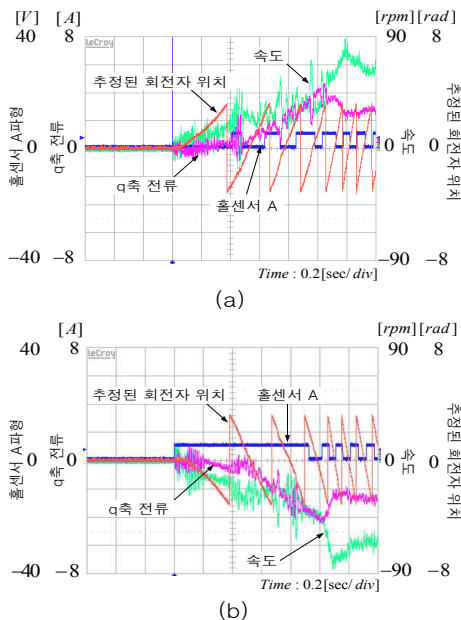


그림 4 10[N·m] 부하 인가 시 IPMSM의 초기 기동 파형
 (a) 정방향 실험 파형
 (b) 역방향 실험 파형
 Fig. 4 Initial operation experimental results with 10[N·m] load
 (a) Experimental result in forward direction
 (b) Experimental result in backward direction

그림 5는 MTPA 제어 시 d축 전류와 q축 전류, 회전자 속도를 나타내는 실험파형이다. d축 전류를 0으로 하는 계자 기준 제어에 비해 IPMSM은 d축 전류를 음으로 제어함으로써 더 적은 전류로 동일한 크기의 토크를 발생시킬 수 있다.

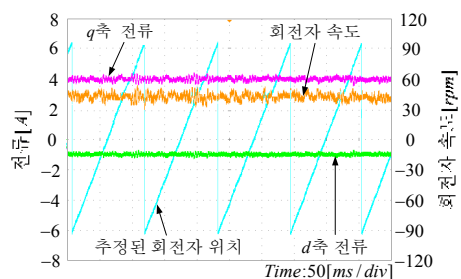


그림 5 20[N·m]부하 인가 시 MTPA 제어 실험 파형
 Fig. 5 MTPA control experimental results when the 20[N·m] load is applied

그림 6은 적용한 센서리스 제어 방법으로 저속 및 고속 제

어를 수행한 실험 파형이다.

저속에서도 정, 역회전이 원활히 수행되는 것을 확인할 수 있다. 또한 정토크 영역에서 실제 회전자의 위치와 추정된 회전자의 위치 오차가 거의 없이 지령 속도를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

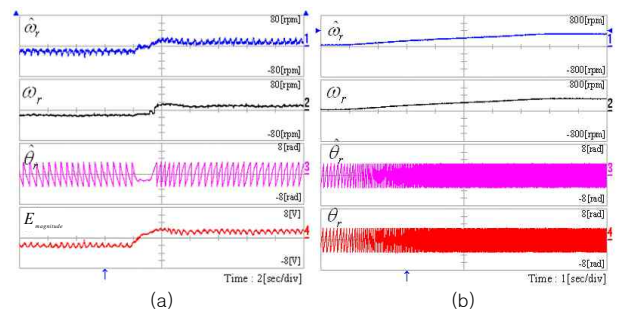


그림 6 센서리스 벡터제어 실험 파형
 (a) 12[rpm] 정역회전 제어
 (b) 45[rpm]→320[rpm] 속도 제어
 Fig. 6 Experimental results of sensorless vector control
 (a) Forward and backward rotating control at 12[rpm]
 (b) 45[rpm]→320[rpm] speed control

6. 결론

본 논문은 드럼세탁기용 IPMSM의 벡터제어에 기동 토크 발생을 위한 I/F 초기 기동 방법을 적용하였다. 그리고 안정적인 초기 기동을 위해 저가형 홀센서를 이용하여 초기 회전자 위치를 파악하고, I/F 초기 기동 방법을 사용하여 초기 회전자 위치 오차로 인한 과도 전류를 제한하였다. 또한 홀센서의 낮은 분해능을 보완하기 위해 센서리스 제어 방법을 적용하였다.

제안된 방법은 초기 기동과 저속 구동이 안정적으로 제어가 되는 것을 실제 세탁기에 적용된 실험과 MG세트를 이용한 실험을 통하여 검증하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 1-14, 1978.
- [2] 설승기, “전기기기 제어론”, 도서출판 브레인 코리아, 2002.
- [3] M. Fatu, R. Teodorescu, I. Boldea, G. Andreescu, F. Blaabjerg, “T-F Starting Method with Smooth Transition to EMF Based Motion-Sensorless Vector Control of PM Synchronous Motor/Generator”, in *Proc.IEEE-PESC*, pp.1481~1487, 15-19 June, 2008.
- [4] J. H. Lee, T. W. Kong, W. C. Lee, C. Y. Won, J. S. Yu, “A new hybrid sensorless method using a back EMF estimator and a current model of permanent magnet synchronous motor”, in *Proc.IEEE-PESC*, pp.4256~4262, 15-19 June, 2008.
- [5] 한양대학교 에너지변환연구실, “매입자석 동기모터의 설계 및 제어” 인터뷰, 2007.