

영구 자석형 동기전동기의 센서리스 제어

양순배, 홍찬희, 조관열
(주) LG전자 Digital Appliance 연구소

Sensorless control of a permanent magnet synchronous motor

Soon-Bae Yang, Chan-Hee Hong, Kwan-Yuhl Cho
Digital Appliance Research Lab., LG Electronics Inc

ABSTRACT

A sensorless control of a PM synchronous motor under the parameter variation is presented. The rotor position is estimated by using the d-axis and q-axis current errors between the real system and motor model of the estimator. The stator resistance is measured at low speeds when the motor changes its rotating direction. The gains in the position estimator are also adapted according to the motor speeds.

1. 서 론

산업용에 주로 적용되어 왔던 인버터 시스템은 최근 가정용 전기제품에도 적용이 증가되고 있다. 가변속 제어용 전동기로는 유도전동기, 영구자석 동기전동기(PM synchronous motor), 스위치드 릴럭턴스 모터, 동기 릴럭턴스 모터(synchronous reluctance motor) 등이 있다. 그 중에서도 영구자석 동기전동기는 고효율 및 제어의 용이성으로 인해 수십 W ~ 수 kW의 소용량에서 활발히 적용되고 있다. 일반적으로 가전제품에 적용되는 영구자석 동기전동기는 구형파 전류제어방식을 사용하고 회전자 위치검출을 위해서는 저가의 홀센서(hall sensor)를 사용한다. 그러나 효율 및 소음/진동 측면에서 구형파 전류제어방식에 유리한 정현파(sinusoidal) 전류제어방식의 경우 홀센서는 회전자 위치정보의 낮은 분해능으로 인해 사용상의 제한을 받는다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 회전자 위치검출 센서를 제거한 센서리스 제어 알고리즘에 대한 연구가 진행되어 왔으며 응용분야에 따라 각각의 알고리즘은 장단점을 갖는다^{[1][3]}.

세탁기와 같이 짧은 시간내 정/역 회전을 반복하는 시스템의 경우 일정한 속도로 운전되는 정상상태 영역은 거의 없고 가속 및 감속운전을 반복함으로 안정한 운전을 위해서는 전동기가 정/역 회전을 할 때 가/감속 운전 특성이 양호해야 한다. 이러한 응용분야의 센서리스 제

어에서는 정/역 구간의 저속운전 및 가/감속시의 회전자 위치검출 및 제어성능이 중요하다. 참고문헌 [1]에서 제안된 센서리스 제어 알고리즘은 가상의 q축 및 d축을 설정하여 실제 시스템의 상전류를 가상의 축으로 축변환하여 관측기내의 모델식에 의한 전류와 비교하여 각 축의 전류오차로부터 관측기의 회전자 위치와 속도가 실제 시스템의 위치와 속도를 추종하도록 한다. 이러한 알고리즘은 저속 및 고속운전의 넓은 속도범위내에서 센서리스 제어를 수행할 수 있다. 그러나 전동기의 운전조건에 따라 고정자 저항 및 역기전력 상수가 변하였을 경우 위치오차가 증대된다. 또한 관측기의 위치검출 이득(gain)이 일정한 값으로 되어 있는 경우 빈번한 가감속 및 정/역운전시 속도변화에 따라 회전자 위치 검출오차가 증대된다.

본 논문에서는 빈번한 가감속 및 정/역운전이 요구되는 시스템에 사용되는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 회전자 위치검출 알고리즘의 특성에 영향을 미치는 고정자 저항 및 유기전압 상수의 온도에 따른 변동을 보상하고 회전자 위치검출 알고리즘의 제어이득(gain)을 전동기의 운전속도에 따라 변경함으로써 빈번한 가감속 운전에도 적합하다. 제안된 알고리즘의 특성은 실험을 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 시스템의 구성

그림 1은 표면부착형 영구자석 동기전동기의 제안된 센서리스 제어 알고리즘의 전체 블록도를 나타낸다. 속도제어기는 비례-적분 제어기(PI controller)를 사용하며 속도오차에 의해 q축 전류(I_q)를 제어한다. 고속 운전시는 d축 전류를 제어함으로써 약계자제어(flux weakening control) 모드로 운전한다. q축 및 d축 전류는 비례-적분 제어기에 의해 제어되며 q축의 전압명령은 q축전류 제어기의 출력에 역기전력(back emf)을 feed forward 하여

결정한다. 회전자 위치 및 속도는 관측기(estimator)에서의 전동기모델과 실제시스템의 q축 및 d축 전류를 비교하여 q축 및 d축전류의 각각의 오차로부터 관측기의 회전자 위치가 실제시스템의 회전자 위치 및 속도를 추종하도록 관측기의 위치 및 속도를 보상한다. 관측기에서 회전자 위치계산을 위해 필요한 q축 및 d축전압은 실제 스위칭 시간에 데드타임(dead time)을 보상하고 DC link 전압의 값을 고려하여 다시 계산된다. 또한 전동기의 저항 및 역기전력 상수의 온도에 따른 변화를 보상하기 위하여 전동기의 운전주파수와 전압 및 전류 신호를 이용하여 실제의 저항값을 추정하고 저항 값으로부터 모터의 역기전력 상수를 보정한다.

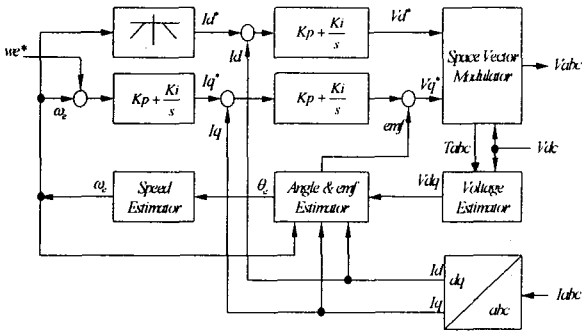


그림 1 전체 블록도

Fig. 1 Block diagram of PMSM sensorless control

2.2 센서리스 알고리즘의 개요

본 논문에 적용한 센서리스 알고리즘은 참고문헌[1]에서 제안된 알고리즘을 근간으로 하여 전동기 상수의 변동을 보상하고 전동기속도에 따라 회전자 위치검출 이득을 보상함으로써 가감속 및 정역운전시 발생하는 회전자 위치검출 오차를 저감하였다. 영구자석 동기전동기의 회전자 기준인 d-q축에서의 전압 및 전류에 따른 모델식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 식 (2)는 관측기(estimator)에서 임의로 추정하고 있는 v-δ축상의 모델식을 나타낸다. v-δ축은 회전자 위치 좌표축인 d-q축과 Δθ만큼의 각 오차가 있는 축이며 식 (2)는 Δθ가 충분히 작다는 가정을 포함한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -\dot{\theta}_M L_q \\ \dot{\theta}_M L_d & R + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -\dot{\theta}_M L_q \\ \dot{\theta}_M L_d & R + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_s \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1) 과 (2)를 이산모델(discrete model)로 변환하는 경우 n과 (n-1)스텝에서의 식으로 다시 정리하면 식 (3), (4)와 같다. 단 식(4)는 현재의 검출된 회전자 위치가 오차가 적은 경우에 (n-1) 스텝에서 n 스텝의 값을 추정하는 값이다.

$$\begin{bmatrix} i_r(n) \\ i_s(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_r(n-1) \\ L_d v_s(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 - \frac{R}{L_d} T & \dot{\theta}_M \frac{L_q T}{L_d} \\ -\dot{\theta}_M \frac{L_d T}{L_q} & 1 - \frac{R}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r(n-1) \\ i_s(n-1) \end{bmatrix} - \frac{T}{L_d L_q} e \begin{bmatrix} -L_q \sin \Delta\theta \\ L_d \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{M_r}(n) \\ i_{M_s}(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_r(n-1) \\ L_d v_s(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 - \frac{R}{L_d} T & \dot{\theta}_M \frac{L_q T}{L_d} \\ -\dot{\theta}_M \frac{L_d T}{L_q} & 1 - \frac{R}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r(n-1) \\ i_s(n-1) \end{bmatrix} - \frac{T}{L_q} e_M \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

전류오차에 대한 식은 식 (3)과 식 (4)로부터 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_r(n) \\ \Delta i_s(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_r(n) \\ i_s(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{M_r}(n) \\ i_{M_s}(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta\theta \\ L_d (e_M - e \cos \theta) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta\theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)의 결과로부터 추정 역기전력과 회전자 위치는 식 (6), (7)과 같이 구할 수 있다.

$$e_M(n) = e_M(n-1) - K_e \Delta i_s(n) \quad (6)$$

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{T}{K_F} e_M(n) + K_\theta \Delta i_r(n) \quad (7)$$

여기서 K_e 는 역기전압 추정이득(gain)이고, K_θ 는 회전자 위치 추정이득이다.

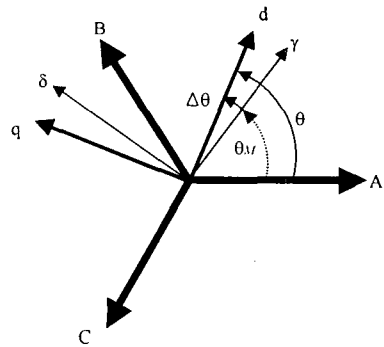


그림2 회전자 실제위치와 추정각

Fig. 2 Analytical model of PMSM

2.3 저항 변화의 추종

전 절에서 설명한 것과 같은 센서리스의 방법은 전동기 모델의 정확도가 중요하다. 특히 빈번한 정/역 회전이 있는 경우는 더욱 그러하다. 또한 전동기는 운전조건에 따라 그림 3과 같이 온도에 따른 저항의 크기변화를 갖는다. 이러한 저항의 크기 변화는 최대부하 구동시 약 10분 정도이면 전동기의 온도가 80°C 이상이 된다. 따라서 이러한 온도에 따른 저항변화를 잘 추종해야 위치가 잘 추종되어 좋은 정/역 특성을 갖게 된다.

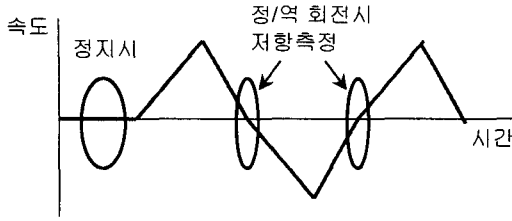


그림 3 저항 측정 시점
Fig. 3 time for detecting motor resistance

본 논문에서는 정/역회전시 세탁기의 동작상의 특성을 사용하여 저항을 측정하였다. 세탁기는 제품의 특성상 정/역 회전을 반복하게 되므로 회전수가 영(zero) 근처인 시점이 존재한다. 이러한 시점에 인가되는 전압과 전류의 크기로부터 저항을 측정하였다. 그림 3에 저항을 측정하는 시점을 표시하였다. 최초 회전시 초기저항의 정확도를 위해 저항을 측정한 후 나머지는 정/역회전시 회전속도가 낮을 때 저항을 측정한다. 이와 같이 측정한 저항의 정확도를 확인하여 보면 그림 4와 같다. 그림 43에서 보듯이 모터의 온도가 약 80°C 변하는 동안 저항은 약 30%가 변동되었고, 이 범위동안 저항은 약 2% 이내의 오차로 잘 추종되고 있음을 볼 수 있다.

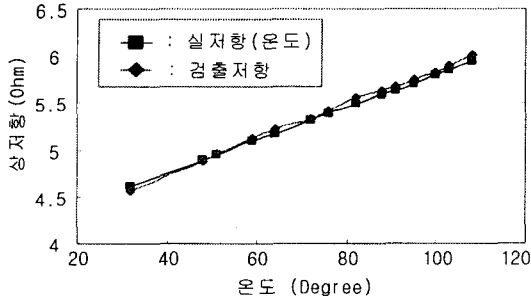


그림 4 모터 온도에 따른 고정자 저항변화
Fig. 4 Stator resistance with motor temperature

2.4 주파수에 따른 위치 검출 알고리즘 튜닝

본 논문에서는 저항변화를 검출하는 것과 더불어 그림 5와 같은 위치계산 블록을 사용하였다. 위치계산 블록에서는 측정된 모터의 상 저항을 사용하고 회전자 위치 추정이득과 역기전압 추정이득을 주파수의 함수로 결정된다. 참고문헌 [1]에서는 역기전압 추정이득(K_e)과 회전자 위치 추정이득(K_θ)을 상수화하여 사용하였다. 하지만 식 (5)과 식 (7)로부터 회전자 위치 추정이득(K_θ)은 속도에 반비례함을 알 수 있다. 이런 이유로 회전자의 위치 추정이득(K_θ)의 값에 따라서 회전자 위치 수렴속도가 다르게 된다. 따라서 속도에 따라서 적절한 회전자 위치 추정이득(K_θ)이 설정되어야 한다.

이와 더불어 본 논문에서는 역기전압 추정이득(K_e)도 속도와 반비례하도록 하였다. 이는 저속영역에서 역기전압 추정이득의 값을 크게 함으로서 추정하는 역기전압의 크

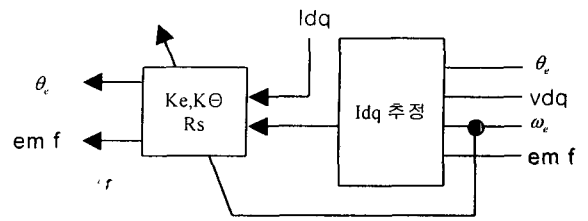


그림 5 위치 계산 블록
Fig 5 block diagram of position detector

기가 충분히 빨리 변동되어 빠른 시간내에 저속상태에서 벗어날 수 있도록 하였다. 그림 6과 7은 역기전압 추정이득(K_e)과 회전자 위치 추정이득(K_θ)의 속도에 따른 값을 나타낸다.

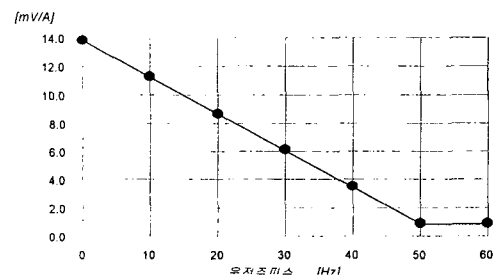


그림 6 속도에 따른 역기전압 추정계인(K_e) 값
Fig. 6 K_e versus motor frequency

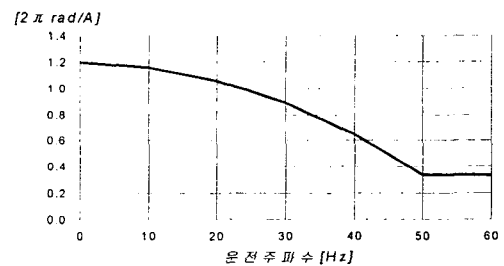


그림 7 속도에 따른 회전자위치 추정 계인(K_θ)
Fig. 7 K_θ versus motor frequency

3. 실험 및 고찰

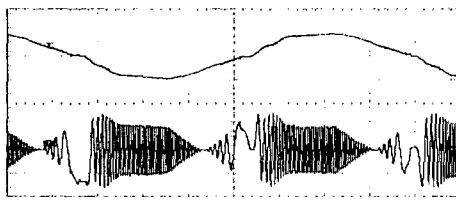
제안된 저항검출 기법과 위치검출 블록을 적용하여 세탁기에 센서리스 알고리즘을 적용하여 실험 하였다. TI의 TMS320F2402를 사용하여 알고리즘을 구현하였고 실험에 사용된 세탁기용 영구자석형 동기모터의 파라미터는 표 1과 같다. 세탁기의 부하는 세탁조에 넣은 마른 상태의 포의 무게와 물의 양으로 결정되는데 실험은 약 6kg의 포와 이에 적당한 물의 양으로 하였다.

그림 8과 9는 제안된 저항검출 기법과 회전자위치 추정이득(K_θ)과 역기전압 추정이득(K_e)을 속도에 따라 변동시켰을 때의 실험 파형이다. 그림 8(a)와 그림 9(a)는 세탁시의 속도 파형이다. 속도 0인 부분에서 약간의 지연이 발생하지만 비교적 정/역 회전이 잘 일어나고 있

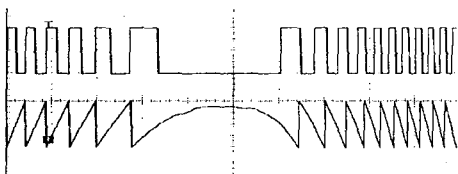
표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

파라미터 항목	값
상저항	4.5Ω (25°)
상 인덕턴스	31.88mH
역기전압 상수	선간 6.48V·rad/s
DC링크 전압	311V
스위칭 주파수	15kHz

다. 또한 온도의 변화와 무관하게 잘 동작하고 있음을 볼 수 있다. 그림 8(a)는 모터의 온도가 24°C일 때의 속도 및 상전류이고 그림 9(b)는 모터의 온도가 65°C일 때의 속도 및 상전류이다. 그림 8(a)과 9(b)에서 보듯이 홀소자에 의한 회전자 위치검출 신호와 위치 추정값이 모터의 온도에 관계없이 잘 맞고 있음을 볼 수 있다. 그림 10에는 모터 저항의 보상이 없을 때의 파형이다.

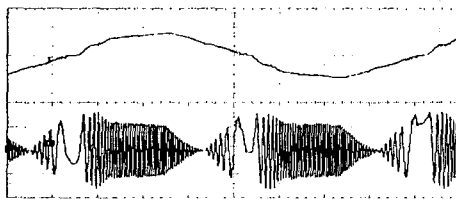


a) 속도 및 상전류

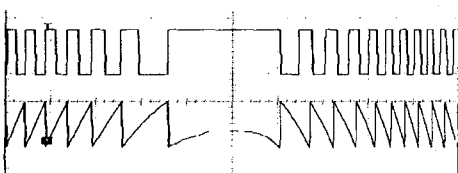


b) 회전자 실제위치 및 추정위치

그림 8 모터 온도 24°C에서의 파형
Fig. 8 waveform at motor temp 24°C



a) 속도 및 상전류



b) 회전자 실제위치 및 추정위치

그림 9 모터 온도 65°C에서의 파형
Fig. 9 waveform at motor temp 65°C

항상 탈조가 일어나는 것은 아니지만 부하의 상태에 따라 발생하며 부하의 크기가 클 수록 발생 빈도가 높아짐을 알 수 있었다.

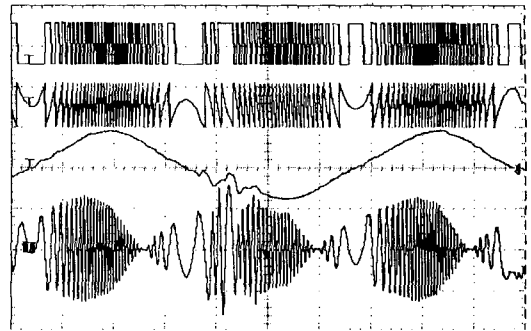


그림 10 저항 보상 없을 시의 파형(65°C)
Fig. 10 waveform without resistor compensation at 65°C

4. 결 론

본 논문에서는 세탁기용 영구자석형 동기모터를 센서리스 알고리즘을 적용하여 구동하였다. 모터의 온도 변화에 둔감하도록 저항을 측정하여 사용하도록 하였으며 저속에서의 구동 특성을 개선하기 위해 회전자위치 추정계인(K_θ)과 역기전압 추정계인(K_e)을 속도의 함수가 되도록 하였다. 이러한 방법이 세탁기와 같은 빈번한 정/역회전을 하는 시스템에서 적용 가능함을 실험으로 보였다.

참 고 문 헌

- [1] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. IE-43, No. 2, pp. 300-308, 1996, April.
- [2] 홍찬희, 조관열, 양순배, "영구자석 동기모터의 센서리스 제어," 전력전자 하계학술대회 논문집, pp. 393-396, 2001. 7.
- [3] A. Consoli, S. Musumeci, A. Raciti, and A. Testa, "Sensorless vector and speed control of brushless motor drives," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. IE-41, No. 1, pp. 91-96, 1994, Feb.
- [4] N. Ertugrul and P. P. Acamley, "Indirect rotor position sensing in real time for brushless permanent magnet motor drives," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. PE-13, No. 4, pp. 608-616, 1998 July.