

영구자석 동기전동기의 상수변동을 보상한 센서리스 제어

梁淳培*, 趙官烈, 洪贊熙

Sensorless Control of a Permanent Magnet synchronous Motor with Compensation of the Parameter Variation

Soon-Bae Yang, Kwan-Yuhl Cho, and Chan-Hee Hong

요 약

영구자석 동기전동기의 전동기상수 변동을 보상한 센서리스 제어를 제안한다. 실제시스템의 d축 및 q축 전류와 위치 예측기의 전동기 모델의 d축 및 q축 전류의 차이를 이용하여 회전자의 위치를 예측한다. 전동기가 회전방향을 바꿀 때 발생하는 낮은 속도에서 고정자 저항을 검출하고 온도변화에 의한 고정자 저항 및 유기전압 상수의 변동을 보상한다. 또한 회전자 위치 예측기의 이득은 전동기 속도에 따라 보상된다.

ABSTRACT

A sensorless control of a PM synchronous motor with the compensation of the motor 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 position estimator. The stator resistance is measured at low speeds when the motor changes its rotating direction and the variation of the stator resistance and back emf constant caused by the temperature variation is compensated. The gains in the position estimator are also adapted according to the motor speeds.

Key Words : Sensorless control, PM synchronous motor, Parameter Compensation, Inverter

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 비해 유리한 정현파(sinusoidal) 전류제어방식의 경우 홀센서는 회전자 위치정보의 낮은 분해능으로 인해 사용상의 제한을 받는다. 또한 센서를 사용함에 따른 재료비의 증대 및 센서로 인한 부피증대 등의 문제가 있다. 이러한 문제를

*LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원

E-mail : sbyang@lge.com

접수일자 : 2002. 7.26

1차심사 요청일 : 2002. 7.30

심사완료일 : 2002. 9.12

해결하기 위하여 회전자 위치검출 센서를 제거한 센서리스 제어 알고리즘에 대한 연구가 진행되어 왔으며 응용분야에 따라 각각의 알고리즘은 장단점을 갖는다 [1][8].

세탁기와 같이 짧은 시간내 정/역 회전을 반복하는 시스템의 경우 일정한 속도로 운전되는 정상상태 영역은 거의 없고 가속 및 감속운전을 반복한다. 이러한 운전조건하에서 영구자석 동기전동기의 안전한 운전을 위해서는 전동기가 정/역 회전을 할 때 가/감속 운전 특성이 양호해야 한다. 이러한 응용분야의 센서리스 제어에서는 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 실제시스템의 위치와 속도를 추종하도록 한다. 이러한 알고리즘은 저속 및 고속운전의 넓은 속도범위 내에서 센서리스 제어를 수행할 수 있다. 그러나 전동기의 운전조건에 따라 고정자 저항 및 역기전력 상수가 변화했을 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 제어 이득(gain)을 전동기의 운전속도에 따라 변경함으로써 빈번한 가감속 운전에 적합하다. 제안된 알고리즘의 특성은 실험을 통하여 검증하였다.

2. 센서리스 제어 알고리즘

2.1 시스템의 구성

그림 1은 표면부착형 영구자석 동기전동기의 제안된 센서리스 제어 알고리즘의 전체 블록도를 나타낸다. 속도제어기는 비례-적분 제어기(PI controller)를 사용하여 속도오차에 의해 q축 전류(I_q)를 제어한다. 고속 운전시는 d축 전류를 제어함으로써 약제자제어(flux weakening control) 모드로 운전한다. q축 및 d축 전류는 비례-적분제어기에 의해 제어되며 q축의 전압명령은 q축전류 제어기의 출력에 역기전력(back emf)을 정제환(feed forward) 하여 전압제어의 빠른 응답특성을 갖도록 하였다. 회전자의 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 링크(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.

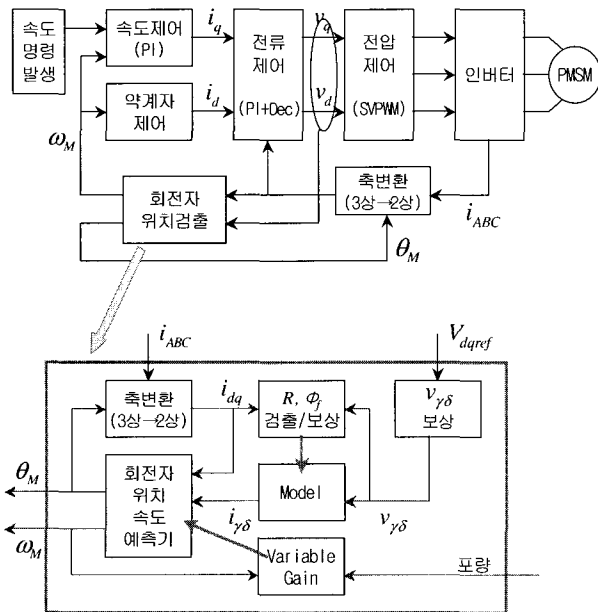


그림 1 센서리스 제어 블록도
Fig. 1 Block diagram of sensorless control

2.2 회전자 위치검출 알고리즘

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 그림 2에 나타난 바와 같이 회전자 위치 좌표축인 d-q축과 Δθ 만큼의 각 오차가 있는 가상의 축으로 식 (2)는 Δθ가 충분히 작다는 가정을 포함한다.

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

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L_d p & -\omega_M L_q \\ \omega_M L_d & R+L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 v_d, v_q 는 d축 및 q축 전압, i_d, i_q 는 d축 및 q축 전류, v_γ, v_δ 는 γ 축 및 δ 축 전압, i_γ, i_δ 는 γ 축 및 δ 축 전류를 나타낸다. 또한 R 은 상저항, e 는 고정자 한상에 유기되는 유기전압의 크기를 나타내며 L_d, L_q 는 d축 및 q축 인덕턴스(inductance)를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 이산모델(discrete model)로 변환하는 경우 n 과 $(n-1)$ 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.

$$\begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\frac{R}{L_d}T & \omega_M \frac{L_q}{L_d}T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q}T & 1-\frac{R}{L_q}T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d}v_\gamma(n-1) \\ \frac{T}{L_q}v_\delta(n-1) \end{bmatrix} - e \begin{bmatrix} -\frac{T}{L_d}\sin \Delta\theta \\ \frac{T}{L_q}\cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\frac{R}{L_d}T & \omega_M \frac{L_q}{L_d}T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q}T & 1-\frac{R}{L_q}T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d}v_\gamma(n-1) \\ \frac{T}{L_q}v_\delta(n-1) \end{bmatrix} - \frac{T}{L_q}e_M \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 T 는 샘플링시간(sampling time)을 나타낸다. 전류오차에 대한 식은 식 (3)과 식 (4)로부터 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

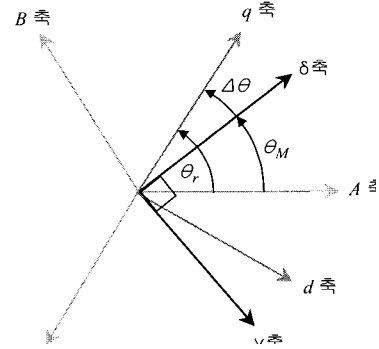


그림 2 회전자 실제위치와 추정위치
Fig. 2 Real axis and estimated axis of rotor

$$\begin{bmatrix} \Delta i_\gamma(n) \\ \Delta i_\delta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta\theta \\ L_d (e_M - e \cos \theta) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta\theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$e_M(n) = e_M(n-1) - k_e \Delta i_\delta(n) \quad (6)$$

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{T}{\phi_f} e_M(n) + k_\theta \Delta i_\gamma(n) \quad (7)$$

여기서, ϕ_f 는 유기전압 상수(back emf constant), k_e 는 역기전압 추정 이득(gain), k_θ 는 회전자 위치추정 이득을 나타낸다.

2.3 상저항 변화의 추종

전 절에서 설명한 것과 같은 센서리스의 방법은 전동기 모델의 정확도가 중요하다. 특히 빈번한 정/역 회전이 있는 경우는 더욱 그러하다. 또한 전동기는 운전 조건에 따라 그림 4와 같이 온도에 따른 저항의 크기 변화를 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.

본 논문에서는 정/역회전시 세탁기의 동작상의 특성을 사용하여 저항을 측정하였다. 세탁기는 제품의 특성상 정/역 회전을 반복하게 되므로 그림 3에 나타난 바와 같이 회전수가 영(zero) 근처인 시점이 존재한다.

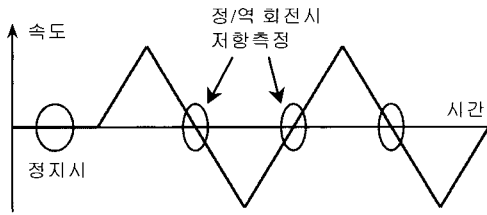


그림 3 상저항 검출 시점
Fig. 3 Time for detecting phase resistance

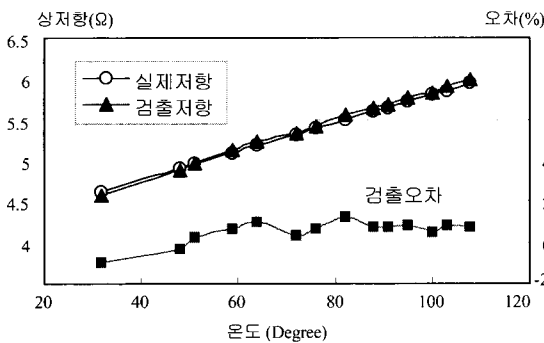


그림 4 온도변화에 따른 상저항 검출
Fig. 4 Detection of phase resistance with temperature variation

이러한 시점에 인가되는 전압과 전류의 크기로부터 저항을 측정하였다. 전동기가 정지해 있는 상태에서 전원이 인가되어 최초 회전시 초기저항의 정확도를 위해 저항을 측정하고 전동기가 정상운전시에는 정/역회전시 회전속도가 낮을 때 저항을 측정한다. 전동기 정지시는 전동기를 일정위치에 고정시킨 후 회전자 위치가 발생하지 않도록 d축 전류만 인가함으로써 식 (8)로부터 상저항을 계산할 수 있다.

$$R(t_0) = \frac{V_d}{I_d} \tag{8}$$

전동기가 정/역회전시 속도가 작은 영역에서 전동기의 속도를 0(zero)으로 가정하고 q축에 일정전류를 가하고 d축 전류를 0(zero)으로 제어하면 이때의 상저항은 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$R(t) = \frac{V_q}{I_q} \tag{9}$$

그림 4는 위와 같은 방법으로 측정된 상저항과 실제의 상저항을 나타낸다. 그림 4에 나타난 바와 같이 고

정자 권선의 주위온도가 30 °C에서 110 °C 로 80 °C 변하는 동안 저항은 약 30%가 증가하였고, 이 범위동안 저항은 약 2% 이내의 오차로 잘 추종되고 있음을 볼 수 있다.

2.4 주파수에 따른 위치검출 알고리즘 이득조정

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 추정이득은 속도에 반비례함을 알 수 있다. 이런 이유로 회전자의 위치 추정이득의 값에 따라서 회전자 위치 수렴속도가 다르게 된다. 따라서 속도에 따라서 적절한 회전자 위치 추정이득이 설정되어야 한다. 이와 더불어 본 논문에서는 역기전압 추정이득도 속도와 반비례하도록 하였다. 이는 저속영역에서 역기전압 추정이득의 값을 크게 함으로서 추정하는 역기전압의 크기가 충분히 빨리 변동되어 빠른 시간내에 저속상태에서 벗어날 수 있도록 하였다. 그림 6과 7은 역기전압 추정이득과 회전자 위치 추정이득의 속도에 따른 값을 나타낸다.

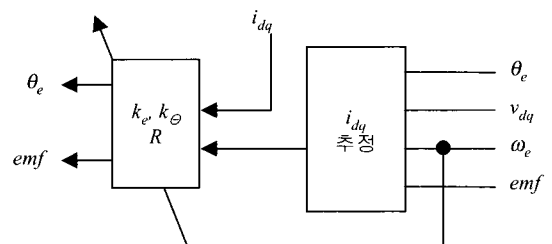


그림 5 속도에 따른 이득조정
Fig. 5 Gain tuning with motor speed

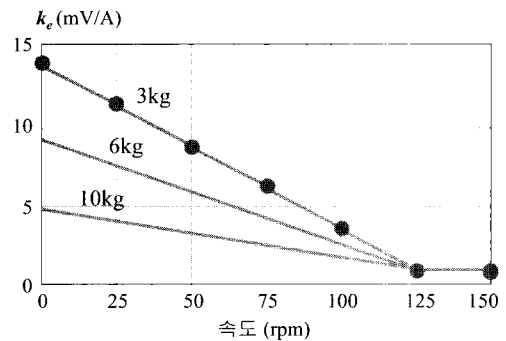


그림 6 속도에 따른 역기전압 추정이득
Fig. 6 Gain for estimated emf with motor speed

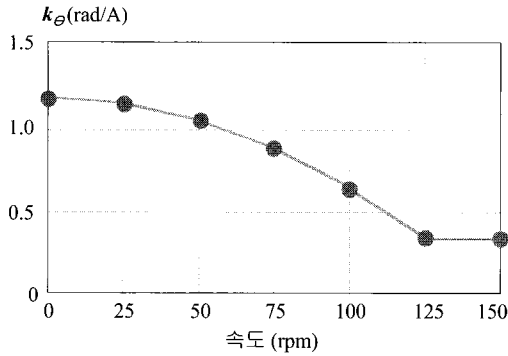


그림 7 속도에 따른 회전자 위치 추정이득
Fig. 7 Gain for estimated rotor position with motor speed

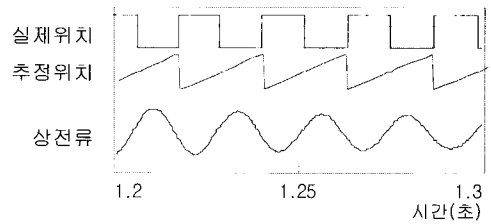
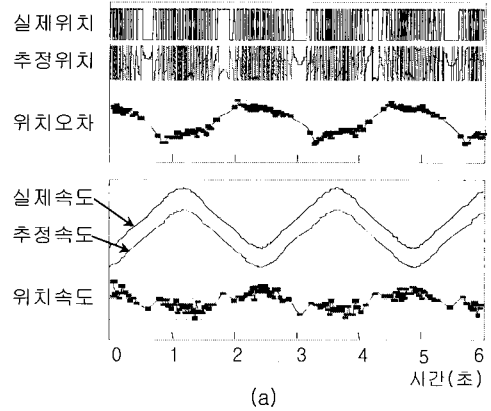
3. 실험 및 고찰

제안된 저항검출 기법과 위치검출 블록을 적용하여 세탁기에 센서리스 알고리즘을 적용하여 실험하였다. 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 8은 전동기의 주위온도가 65°C일때의 제안된 센서리스 제어의 회전자 위치검출 특성의 실험결과를 나타낸다. 전동기의 온도상승에 따른 고정자 상저항 및 유기전압 상수의 변화를 보상하였으며 회전자 위치 추정이득과 역기전압 추정이득을 속도에 따라 변동시켰다. 그림 8(a)에 나타난 바와 같이 정/역의 속도제어가 잘 이루어짐을 알 수 있고 정/역 기동 및 가감속시 회전자의 실제위치와 계산된 위치와의 위치검출오차는 전기각으로 25도 이내에 있음을 알 수 있다. 또한 이때의 실제속도와 계산된 속도와의 차이는 5rpm 이내이다. 그림 8(b)는 정/역회전 방향이 바뀌는 구간, 가속

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

파라미터 항목	값
상저항 (25°)	4.5Ω
상 인덕턴스	31.8mH
역기전압 상수(선간)	6.48V·rad/s
DC 링크 전압	311V
스위칭 주파수	15kHz



y축: 위치(200도/div), 위치오차(25도/div)
속도(75rpm/div), 속도오차(5rpm/div), 전류(5A/div)

그림 8 제안된 알고리즘의 위치검출 특성 (65°C)
(a) 위치 및 속도
(b) 감속, 정/역반전, 가속시 상세파형

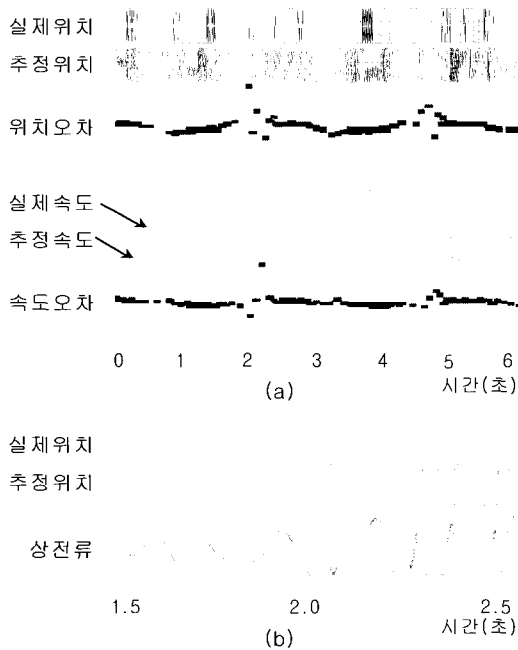
Fig. 8 Performance of the proposed algorithm at 65°C
(a) rotor position and speed
(b) enlarged waveforms for decelerating, changing, rotating direction, and accelerating

및 감속구간에서의 회전자 실제위치, 검출위치 및 상전류의 파형을 나타낸다. t=1.9초 근처에서 전동기가 가속할 때 위치검출오차가 전기각으로 20~30도 발생

하나 전동기가 가속됨에 따라 위치검출오차가 줄어들 수 있다.

그림 9는 전동기의 주위온도가 65°C일때 온도변화에 따른 상저항 및 유기전압 상수변화를 보상하지 않은 경우의 속도 및 위치검출 특성의 실험결과를 나타낸다. 전동기가 회전방향을 바꾼 후 가속구간에서 회전자 위치검출 오차가 50도 이상 크게 발생함으로써 이때의 실제속도와 검출속도의 속도오차는 40rpm 정도로 크게 되어 전동기의 탈조현상이 발생한다. 이러한 현상은 전동기의 부하가 커짐에 따라 더욱 발생빈도가 많아지게 되며 위치검출 오차도 증가하게 된다.

그림 10은 실험에 의한 상저항, 유기전압 상수, 회전자 위치 추정이득과 역기전압 추정이득의 변화에 따른 센서리스 제어의 신뢰성을 나타낸다. 상저항 변화의 경우 25°C일때의 저항을 기준으로 -10%~+5% 변화 시까지는 탈조현상이 발생하지 않으나 이 범위를 벗어



y축: 위치(200도/div), 위치오차(75도/div)
속도(75rpm/div), 속도오차(20rpm/div), 전류(5A/div)

그림 9 보상 없을 때의 위치검출 특성 (65°C)
(a) 위치 및 속도
(b) 정/역회전 및 가속시 상세파형

Fig. 9 Performance without compensation at 65°C
(a) rotor position and speed
(b) enlarged waveforms for changing rotating direction and accelerating

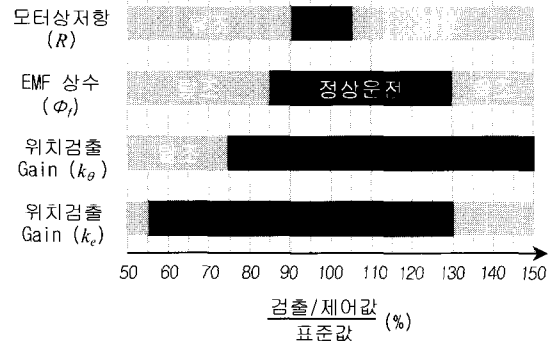


그림 10 전동기 상수변동시 운전특성
Fig. 10 Operating characteristics under parameter variation

나면 탈조가 발생한다. 또한 유기전압 상수는 25°C일 때의 값을 기준으로 85 ~ 130% 범위내에서 안정하게 동작한다. 제안된 알고리즘의 경우 상저항 검출오차는 ±2% 이내이고 유기전압 상수의 검출오차는 ±1.5% 이내이므로 전동기의 온도변화에 따른 상저항 및 유기전압 상수를 보상함으로써 탈조가 되지 않도록 정상운전을 할 수 있다.

4. 결 론

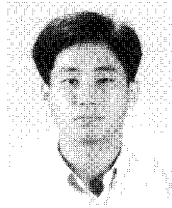
본 논문에서는 빈번한 정/역회전을 반복하는 시스템에서 영구자석형 동기전동기의 상수변화에 둔감한 센서리스 제어 알고리즘을 제안하였다. 전동기 정지 및 정/역회전시 속도가 낮은 영역에서 고정자 상저항을 검출함으로써 온도상승에 따른 고정자 상저항 및 유기전압 상수의 변화를 보상하였다. 또한 회전자 위치 추정이득과 역기전압 추정이득을 속도에 따라 조정함으로써 저속에서의 센서리스 제어특성을 향상시켰다. 제안된 알고리즘을 세탁기에 적용하여 세탁운전 모드에서 빈번한 정/역회전시 온도변화에 따른 전동기 상수 보상 및 회전자 위치검출 알고리즘의 특성을 검증하였다.

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, April 1996.
[2] 홍찬희, 조관열, 양순배, "영구자석 동기모터의 센서리스 제어", 전력전자학회 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, Feb. 1994.
 - [4] N. Ertugrul and P.P. Acarnley, "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, July 1998.
 - [5] H.A. Toliyat, L. Hao, D.S. Shet, and T.A. Nondahl, "Position-sensorless control of surface mount permanent magnet AC (PMA) motors at low speeds", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. IE-49, No. 1, pp. 157~164, Feb. 2002.
 - [6] G.H. Jang, J.H. Park, and J.H. Chang, "Position detection and start-up algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductance variation", IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 149, No. 2, pp. 137~142, March 2002.
 - [7] A. Consoli, G. Scarcella, and A. Testa, "Industry application of zero-speed sensorless control techniques for PM synchronous motors", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-37, No. 2, pp. 513~521, March 2001.
 - [8] T. Yuzawa, K. Tanaka, R. Moriyama, and I. Miki, "An efficient estimation method of sensorless initial rotor position for surface PM synchronous motor", in Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001, pp. 44~49, 2001.

저 자 소 개



양순배(梁淳培)

1966년 8월 8일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1991년~현재 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원.



조관열(趙官烈)

1963년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년~현재 LG전자(주)디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 당 학회 편집위원.



홍찬희(洪贊熙)

1968년 3월 24일생. 1991년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1994년~1998년 LG산전(주) 중앙연구소 선임연구원. 1999년~현재 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 선임연구원.