

외부부하에 의해 회전중인 표면부착형 영구자석동기전동기의 센서리스 제어 알고리즘

이한솔¹, 조관열[†], 김학원¹

Sensorless Control Algorithm of a Surface Mounted PM Synchronous Motor Under Naturally Rotating by Load

Han-Sol Lee¹, Kwan-Yuhl Cho[†], and Hag-Wone Kim¹

Abstract

PM synchronous motor may be rotated to an arbitrary direction and speed by outside wind under natural condition in cases where the fan is applied outside, such as in vehicle radiators and outdoor air-conditioners. Sensorless controls that cannot detect rotor position requires additional sensorless control algorithm because a rotor is rotated by an external load. In this study, the sensorless control of a PM synchronous motor under naturally rotating condition is proposed. The natural rotation conditions are classified as forward high-speed rotation, reverse high-speed rotation, and low-speed rotation. Experiment results verify the performance of the sensorless control, including the rotor speed and position detection at natural rotation mode and switch to the closed-loop sensorless control.

Key words: PM Synchronous motor, Sensorless control, Natural load, Rotor position detecting

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 직류전동기 및 유도전동기와 대비하여 높은 효율과 우수한 제어성능으로 인해 냉장고, 에어컨, 세탁기 등의 가전제품 및 전기자동차, 승강기 등의 산업용에 적용되고 있다. 영구자석 동기전동기의 백터제어를 위해서는 회전자의 위치를 알아야하며 일반적으로 위치검출용 센서를 사용하여 검출한다. 절대형 엔코더(Absolute Encoder), 레졸버(Resolver) 및 홀센서(Hall Sensor) 등의 위치검출용 센서는 가격이 비싸고 설치를 위한 별도의 공간 확보가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 센서리스 알고리즘이 다양한 분야에 적용되고 있다^{[1]-[6]}.

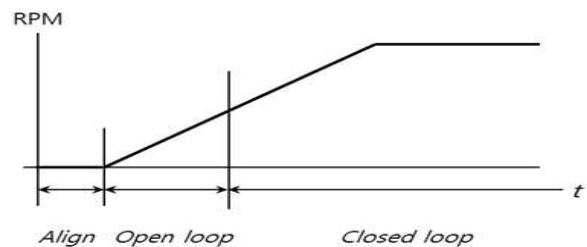


Fig. 1. Starting algorithm of sensorless control.

영구자석 동기전동기의 수학적 모델을 기반한 센서리스 제어 알고리즘에는 역기전력(Back Emf)을 기반한 위치추정 방법, 쇄교자속(Flux Linkage)을 기반한 위치추정 방법, 그리고 회전자 돌극성(Saliency)에 의한 방법 등이 있다^{[1]-[4]}. 모델기반 영구자석동기전동기의 센서리스 제어를 위해서는 일반적으로 그림 1과 같이 정지 상태에서 회전자를 기동하기 위해 일정한 위치에 정렬시키고 개루프로 강제 기동 시킨 후 일정속도 이상에서 센서리스 제어로 전환한다. 그러나 자동차 라디에이터용 쿨링팬과 에어컨 실외기의 경우 팬 모터는 외부부하에 의해 회전자가 임의의 방향과 임의의 속도로 회전할 수 있다. 이러한 경우에는 일반적으로 사용되는 센서리스 제

Paper number: TKPE-2018-23-1-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kycho@ut.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea Nat'l Univ of Transportation
Tel: +82-43-841-5329 Fax: +82-43-841-5320

¹ Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea Nat'l Univ. of Transportation

Manuscript received Sep. 29, 2017; revised Nov. 3, 2017; accepted Dec. 12, 2017

— 본 논문은 2017년 전력전자학술대회 우수추천논문임

어를 위한 회전자 정렬이 불가능 할 수 있다. 그에 따라 센서리스 제어를 위한 추가적인 알고리즘이 필요하다.

기존 논문^[5]에서는 외부부하에 의해 회전하고 있는 회전자를 멈추기 위해 영전압 벡터를 인가하여 회전자를 정지시킨 후 초기기동 알고리즘으로 속도를 증가 시킨 후 센서리스 운전모드로 전환하게 된다. 정지를 위해 영전압 벡터를 인가하게 되면 제동 전류(Braking Current)가 발생하게 되며 속도가 높아질수록 더 큰 제동 전류를 발생시킨다. 다른 방법^[6]으로는 자연부하에 의해 회전중인 영구자석 동기전동기에 토크를 인가하지 않고 센서리스 제어로 전환하기 위한 회전자 위치정보를 얻기 위하여 dq축 전류를 0(영)으로 제어한다. 하지만 dq축 전류를 0으로 제어하는 초기에 회전자의 위치정보가 없기 때문에 전류가 튀는 현상이 발생하고, 또한 속도에 따라 큰 전류가 발생된다. 초기 전류의 튀는 현상은 시스템에 문제를 유발할 수 있으며 큰 전류 용량을 갖는 스위칭 소자가 필요하게 되어 비용 상승의 단점이 있다.

본 논문에서는 외부부하에 의해 영구자석 동기전동기가 회전하고 있는 경우 센서리스 제어를 위한 모드 전환 시 전류의 튀는 현상을 없애고 원하는 회전방향, 원하는 속도로 제어하기 위한 새로운 센서리스 제어 알고리즘을 제안한다.

2. 확장 역기전력기반 회전자 위치추정 알고리즘^[2]

영구자석동기 전동기의 회전자 위치정보를 추정하기 위하여 정지 좌표계 모델을 사용할 경우 역기전력 추정기의 위상 지연으로 인해 속도가 증가할수록 위상차이가 커진다. 그에 비해 동기좌표계 모델을 사용하면 정상 상태에서 추정된 역기전력이 직류성분이 되기 때문에 위상지연 문제가 발생하지 않아 고속 운전의 비중이 큰 센서리스 제어 응용분야에 많이 사용된다. 본 논문에서 사용된 센서리스 제어 방식은 영구자석 동기전동기의 동기좌표계모델을 사용하여 PI state filter로 역기전력을 추정하고 추정된 역기전력으로부터 위치와 속도를 추정한다.

2.1 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

그림 2는 실제 회전자의 위치를 나타내는 dq축 좌표계와 추정된 회전자의 위치를 나타내는 $\gamma\delta$ 축 좌표계이다. 확장 역기전력을 이용한 영구자석 동기전동기의 수학적 모델 전압 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$E_{cx} = \omega_r ((L_d - L_q)i_d + \lambda_m) - (L_d - L_q)p i_q$$

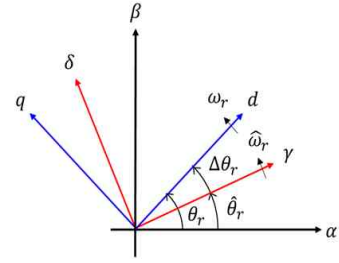


Fig. 2. Dq-axis and $\gamma\delta$ -axis.

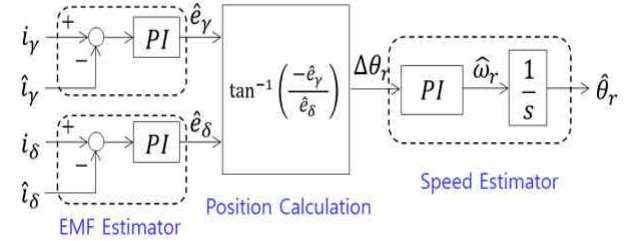


Fig. 3. PI type rotor position estimator.

식 (1)에서 p 는 미분연산자이고 λ_m 는 회전자 자속을 나타낸다. 여기서 추정된 위치오차($\Delta\theta_r = \theta_r - \hat{\theta}_r$)와 추정된 속도오차($\Delta\omega_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$)가 충분히 작다고 가정하면 추정된 회전자의 위치를 나타내는 $\gamma\delta$ 축 좌표계 전압방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_d p & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_q & r_s + L_d p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + E_{cx} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta_r \\ \cos\Delta\theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 PI State Filter를 이용한 속도, 위치추정

회전자의 위치 추정을 위한 역기전력은 그림 3과 같이 $\gamma\delta$ 축 전류와 모델 식에 의해 계산된 전류($i_{\gamma\delta M}$)의 전류오차를 PI 제어기에 의해 $\gamma\delta$ 축 역기전력을 추정한다. 여기서 모델 식에 의해 계산된 전류는 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 이산형태(Discrete Form)로 구한다. 추정된 역기전력으로부터 식 (4)와 같이 위치오차를 추정하고 추정된 위치오차를 0으로 만들기 위하여 일반적으로 PLL(Phase Locked Loop)을 적용하여 식 (5)와 (6)와 같이 속도와 위치를 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_{\gamma M}(k+1) &= \left(1 - \frac{r_s}{L_d} T_s\right) \hat{i}_{\gamma M}(k) + \frac{T_s}{L_d} (v_\gamma(k) + \hat{\omega}_r L_q \hat{i}_\delta(k) - \hat{e}_\gamma(k)) \\ \hat{i}_{\delta M}(k+1) &= \left(1 - \frac{r_s}{L_d} T_s\right) \hat{i}_{\delta M}(k) + \frac{T_s}{L_d} (v_\delta(k) - \hat{\omega}_r L_q \hat{i}_\gamma(k) - \hat{e}_\delta(k)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{-\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_r = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \Delta\theta_r \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_r = \int \hat{\omega}_r dt \quad (6)$$

3. 제안하는 센서리스 제어 알고리즘

외부부하에 의해 팬이 임의의 속도와 임의의 방향으로 회전 시 원하는 방향과 속도로 제어하기 위해서는 두 가지 방법이 있다. 하나는 외부부하에 의해 자연 회전 시 회전자를 정지시키고 그림 1과 같이 초기기동 알고리즘을 적용하여 재기동 하는 방법이다. 다른 하나는 외부부하에 의한 회전상태에서 영구자석 동기전동기의 속도정보와 위치정보를 얻어 센서리스로 전환하는 방법이다. 센서리스 전환을 위해서는 정확한 회전자의 위치를 알아야 한다. 본 논문에서는 후자의 방법을 사용한다.

3.1 기존정지 및 센서리스 전환 방법^{[5]-[6]}

본 논문에서는 기존에 사용되었던 정지 후 기동방법과 외부부하에 의한 회전상태에서 센서리스 전환을 위한 위치 속도와 위치 추정 시 발생하는 문제점을 검토하고 새로운 센서리스 전환방법을 제안한다.

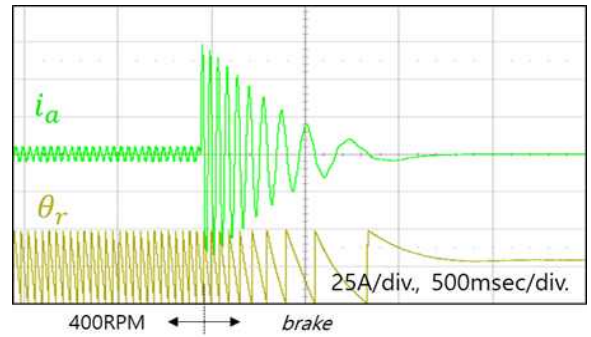
외부부하에 의해 회전중인 영구자석 동기전동기의 가장 간단한 제어 방법은 회전자를 정지시킨 후 재기동시키는 방법이다. 회전하고 있는 회전자를 멈추기 위해 영전압 벡터를 인가한다. 이 경우 그림 4(a)와 같이 제동 전류가 흐르게 되며, 속도가 증가함에 따라 제동전류의 크기가 증가함으로 고속에서 제동할 경우에는 사용에 제한을 받는다.

영구자석 동기전동기의 모델을 기반으로 한 회전자 위치 추정방법은 일반적으로 측정된 전류(i_{abc})를 통해 얻은 dq축 전류(i_{dq})와 전류제어기 출력 값인 전압 지령(V_{dq}^*) 값이 필요하다. 외부 부하에 의해 회전 시 전동기 자연회전에 영향을 주지 않고 위치추정을 위해서는 dq축 전류를 영(Zero)으로 제어한다. 표면부착형 영구자석(SPM) 동기전동기의 경우 dq축 전류를 영으로 제어하면 토크를 발생시키지 않으므로 모터 구동에는 영향을 주지 않는다. 이 경우 역기전력의 크기는 식 (2)의 모델식에서 전압 지령 값과 같게 되므로 전압 지령 값으로부터 회전자의 속도 및 위치를 추정할 수 있다.

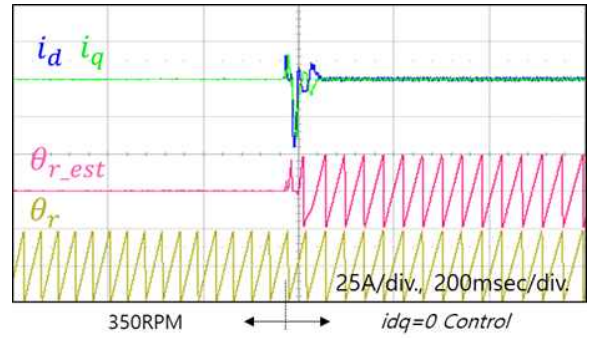
그림 4(b)는 외부부하에 의해 정방향으로 자연회전 중인 회전자의 위치 추정 파형이다. dq축 전류를 영으로 제어함으로써 회전자 위치추정이 되고 그에 따라 센서리스 운전으로 전환도 가능하다. 하지만 초기 위치정보가 없기 때문에 전류가 크게 되는 현상이 발생한다. 외부 부하에 의한 자연회전 시 속도가 높을수록 초기 위치 추정 시 큰 전류가 발생되고 이러한 큰 전류는 시스템의 문제를 일으킬 수 있고 시스템 사양에 따라 고속에서는 사용이 불가능할 수도 있다.

3.2 제안하는 속도 및 위치 검출방법

기존 외부부하에 의해 자연회전 시 센서리스 운전 모드로 전환을 위해 발생하는 전류상승 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 자연회전 모드에서 초기 속도 및



(a) Braking



(b) $i_{dq} = 0$ control

Fig. 4. Problems of conventional methods.

위치 를 검출한다. 역기전력 검출은 MCU(Magni V S12ZVM)에 내장되어 있는 전압검출 회로를 사용하여 순간 역기전력을 검출한다. 검출된 순간 역기전력은 식 (7)과 같이 계산하여 3상 역기전력을 구한다.

외부부하에 의해 자연회전 중인 회전자의 속도는 역기전력의 크기와 주파수로부터 검출이 가능하다. 역기전력의 Zero-crossing 지점을 검출하여 역기전력의 주파수로부터 회전자의 속도를 검출할 경우 역기전력의 Zero-crossing 검출 오차에 의해 검출된 속도오차가 증가할 수 있다. 본 논문에서는 식 (8)과 같이 3상 역기전력으로부터 역기전력의 크기(Peak)를 검출하고, 식(9)와 같이 ω_r , e_{peak} , λ_m 의 관계식으로부터 회전자의 속도를 검출한다. 검출된 속도는 구동 알고리즘의 속도판단 기준으로 사용된다.

$$\begin{aligned} e_{an} &= \frac{e_{ab} - e_{ca}}{3} = -\lambda_m \omega_r \sin \theta_r \\ e_{bn} &= \frac{e_{bc} - e_{ab}}{3} = -\lambda_m \omega_r \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \\ e_{cn} &= \frac{e_{ca} - e_{bc}}{3} = -\lambda_m \omega_r \sin \left(\theta_r + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$e_{peak} = \sqrt{\frac{2(e_{an}^2 + e_{bn}^2 + e_{cn}^2)}{3}} \quad (8)$$

$$\omega_r = \frac{e_{peak}}{\lambda_m} \quad (9)$$

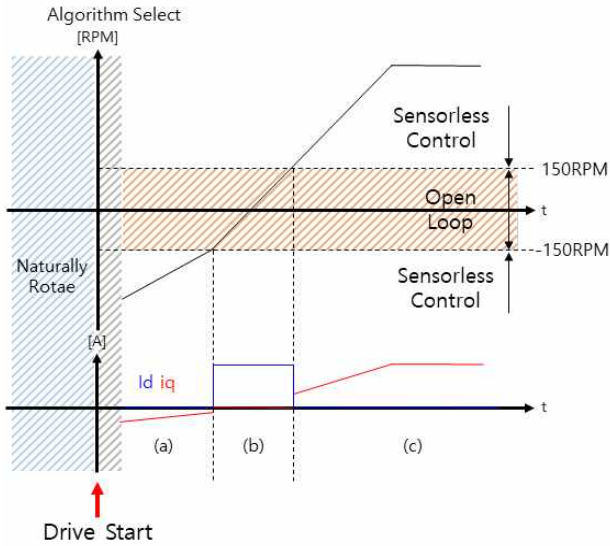


Fig. 5. Sensorless drive algorithm.

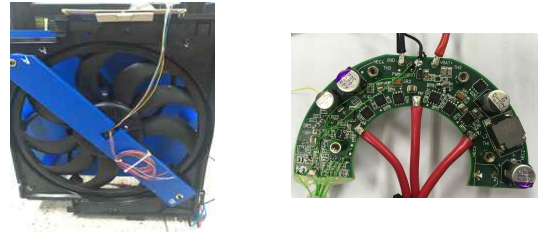
자연회전 상태에서 회전자의 속도를 검출한 후 센서리스 제어를 위한 회전자 위치검출 알고리즘이 동작한다. 이 때 검출된 역기전력의 Zero-crossing 지점을 찾아 회전자의 초기 위치를 잡아주며 d축 역기전력(e_d) 오차에 PLL을 적용하여 최종 위치를 검출한다. 정방향 및 역방향 회전방향의 판단은 서로 다른 두 상의 역기전력의 크기를 비교하여 판단한다. 검출된 위치정보는 센서리스 운전 모드로 전환을 위한 위치 추정 시 사용된다.

3.3 정방향 고속회전 시

외부부하에 의해 전동기가 정방향으로 150rpm 이상의 속도로 회전할 경우 그림 5에서 (c) 구간에 해당하고 이를 정방향 고속회전 모드로 설정한다. 이 모드에서는 회전하는 영구자석 동기전동기의 역기전력 검출을 통하여 회전자의 초기 속도를 검출하여 고속임을 확인하고 검출된 위치정보를 바탕으로 속도 및 위치추정기가 동작한다. 센서리스 운전모드로 전환되면 추정속도를 사용하여 원하는 속도로 제어한다.

3.4 정방향, 역방향 저속회전 시

영구자석 동기전동기가 외부부하에 의해 자연회전 시 검출된 속도가 정방향 150rpm 이하이거나 역방향 150rpm 이하인 경우에 저속으로 판단하여 저속회전 모드로 동작한다. 150rpm 이하의 저속으로 회전하는 경우 추정된 역기전력의 크기가 작으므로 역기전력으로부터 추정된 회전자 위치의 오차가 증가하여 센서리스 제어가 불가능할 수 있다. 따라서 자연회전 모드에서 센서리스 제어로 바로 전환을 하지 않고, 일정한 d축 전류를 인가하면서 검출된 위치정보를 바탕으로 만들어진 개루프 위치정보를 사용하여 강제구동을 하여 속도를 증가시킨다. 그림 5의 (b) 구간에 나타난 바와 같이 외부부하에 의



(a) Fan motor (b) Control board

Fig. 6. Experimental setup.

TABLE I
MOTOR SPEC

Parameter	Value	Unit
Rated power	210	W
Rated speed	2,000	rpm
Rated current	21.1	Arms
Number of poles	8	
Magnet flux	0.006	Wb
Phase resistance	10	mΩ
d-axis inductance	44	uH
d-axis inductance	44	uH

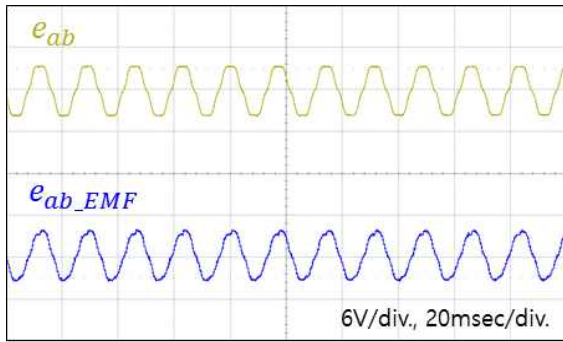
해 역방향으로 회전하고 있다면 영구자석 동기전동기는 서서히 감속하게 되며 정속으로 방향이 전환되고 그 이후에는 기존 센서리스 제어 방법과 같이 일정 속도까지 증가 시킨 후 센서리스 운전모드로 전환된다.

3.5 역방향 고속회전 시

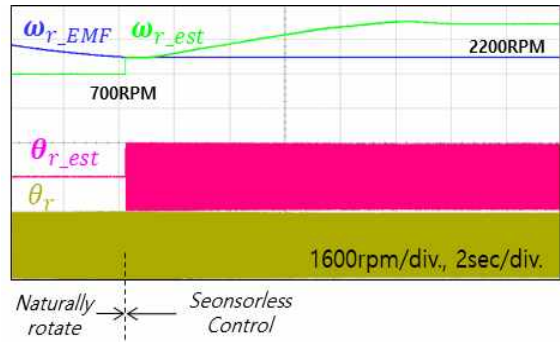
외부부하에 의해 영구자석 동기전동기가 역방향으로 150rpm 이상의 고속으로 회전할 경우 그림 5에서 (a) 구간에 해당하고 이를 역방향 고속회전 모드로 설정한다. 이 모드에서는 정방향 고속회전 모드와 마찬가지로 회전하는 영구자석 동기전동기의 역기전력 검출을 통하여 회전자의 초기 속도를 검출하여 역방향 고속임을 판단하고 검출된 위치정보를 바탕으로 속도 및 위치추정기가 동작하고 센서리스 운전모드로 전환된다. 이후 정방향으로 회전시키기 위해 속도제어에 의해 감속되며, 속도가 역방향 150rpm 이하가 되면 그림 5의 (b) 구간의 저속회전 모드로 동작함에 따라 강제구동에 의해 역방향에서 정방향으로 전환 후 그림 5의 (c) 구간에서 센서리스 운전모드로 전환된다.

4. 실험결과

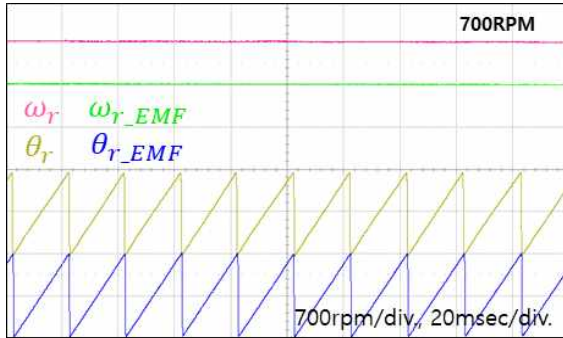
그림 6은 실험에 사용된 자동차 라디에이터용 팬 모터와 영구자석 동기전동기의 보드를 나타낸다. 영구자석 동기전동기는 dq축 인덕턴스가 같은 SPM(Surface Mounted PM) 타입이다. 제어 및 파워보드는 모터 부착



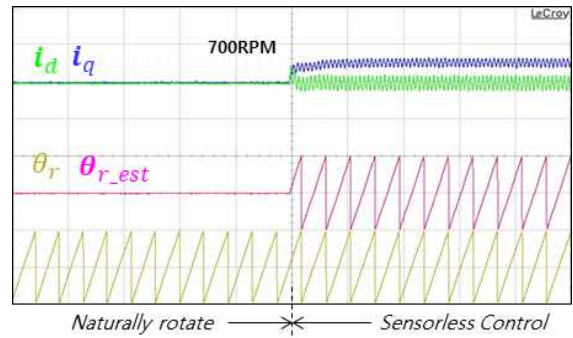
(a) Real and detected back EMF



(a) Rotor speed and position



(b) Real and estimated speed and position



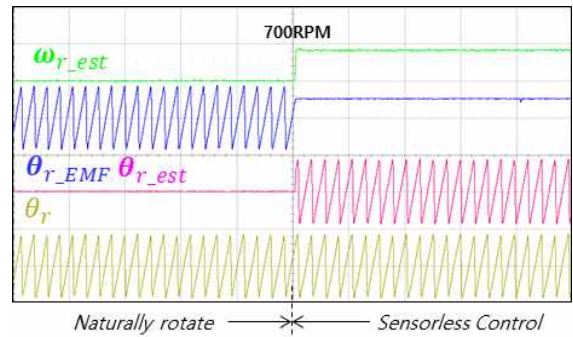
(b) Enlarged current and position waveforms

Fig. 7. Back emf and position at natural rotation.

형으로 반달모양의 형태를 가지며, MCU는 3상 모터 구동용으로 Magni V S12ZVM을 사용하였다. 영구자석 동기전동기는 표 1과 같이 3상, 8극으로 구성되며, 인버터의 스위칭 주파수는 16kHz, 추정기에 사용되는 전류는 2상 션트(Shunt) 저항을 사용하여 측정된다.

그림 7(a)는 프로브로 측정된 실제 선간 역기전력(e_{ab})과 MCU 내부회로에 의해서 검출된 역기전력(e_{ab_EMF})의 파형이다. 디스플레이상에선 DAC를 위한 추가적인 보드 사용으로 인하여 원스텝 딜레이로 인해 위상 지연이 나타나지만 실제 시스템에 적용 시엔 딜레이 현상이 없고 잘 검출됨을 확인 할 수 있다. 그림 7(b)는 외부부하에 의해 자연회전 중인 영구자석 동기전동기의 엔코더로 측정된 실제 속도(ω_r) 및 위치(θ_r)파형과 역기전력 검출을 통하여 검출된 속도(ω_{r_EMF}) 및 위치(θ_{r_EMF})를 나타낸다. 기계적 한 주기에 해당하는 전기적 네 주기의 위치오차를 비교해 본 결과 평균 약 5도 이하의 위치오차로 잘 검출 되고 있음을 확인 할 수 있다.

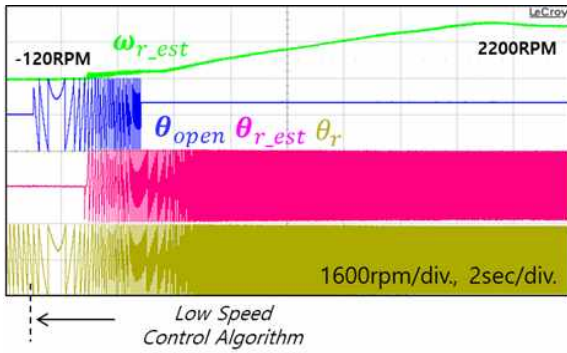
그림 8은 외부부하에 의해 회전자가 정방향 고속회전 시 센서리스 제어 알고리즘 특성을 나타낸다. 그림 8(a)는 외부부하에 의해 회전중인 회전자가 서서히 감속하다 700rpm에서 센서리스 제어 알고리즘이 적용된 파형이다. 검출된 속도는 자연회전 모드에서만 동작함으로 전환 시 속도로 수렴하고 추정된 속도와 위치를 사용하여 센서리스 운전모드로 전환 후 목표속도인 2,200rpm



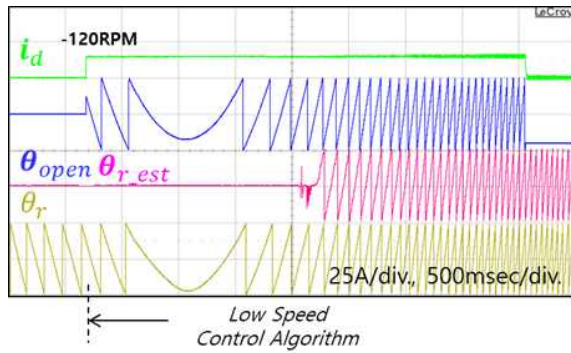
(c) Enlarged waveform of detected position

Fig. 8. Forward high speed rotation mode.

으로 제어 됨을 알 수 있다. 그림 8의 (b)와 (c)는 자연회전 모드에서 센서리스 운전모드로 전환 시점의 확대 파형이다. 자연회전 구간에서는 역기전력을 검출하여 속도와 위치를 검출하고 검출된 속도와 위치를 바탕으로 추정기가 동작하면서 센서리스 운전모드로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 센서리스 운전모드로 전환된 후 속도제어기가 동작하기 때문에 q축 전류에 의해 토크 및 속도가 제어된다. 그림 9는 영구자석 동기전동기가 외부부하에 의해 역방향 120rpm으로 회전하고 있을 시 정방향 및 역방향 저속회전 모드의 센서리스 제어 특성을 나타낸다. 검출된 회전자의 속도가 정/역방향 150rpm 이하이므로 저속으로 판단하여 미리 설정된 가속 패턴으로 강제 기동하여 속도를 증가시킨다. 역방향으로 회전

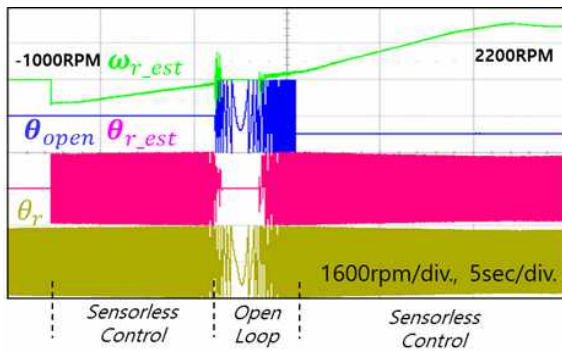


(a) Rotor speed and position

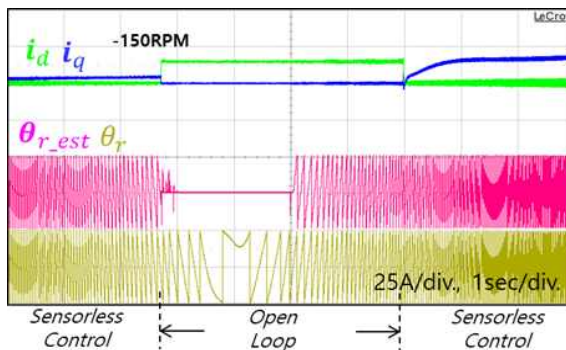


(b) Enlarged current and position waveforms

Fig. 9. Low speed rotation mode.

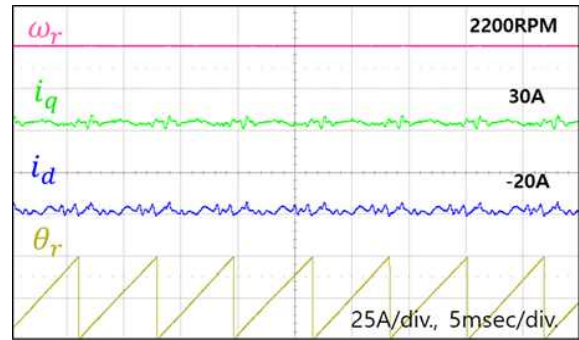


(a) Rotor speed and position

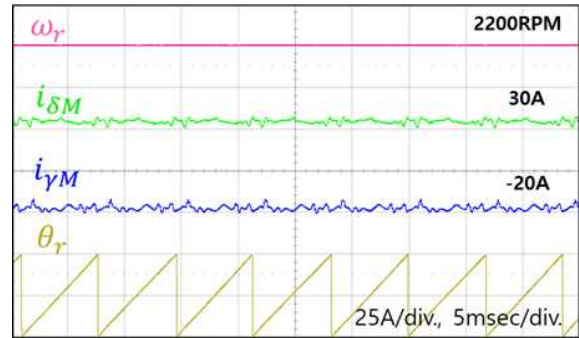


(b) Enlarged current and position waveforms

Fig. 10. Reverse high speed rotation mode.



(a) Real dq current and position



(b) Estimated dq current and real position

Fig. 11. Dq current and position at 2,200rpm.

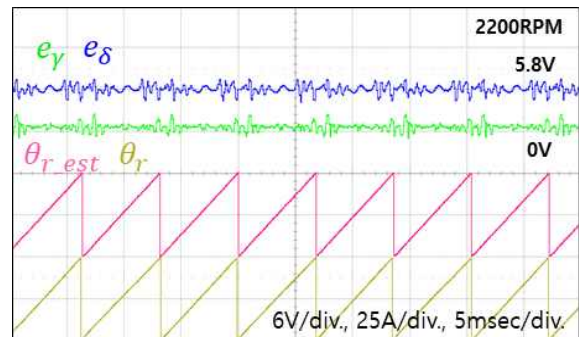


Fig. 12. Estimated back EMF and position at 2,200rpm.

하고 있기 때문에 서서히 감속하여 정방향으로 방향이 전환되고 목표속도인 300rpm 까지 강제 기동을 통해 속도가 증가한다. 이때 회전자 속도 및 위치 추정 알고리즘이 동작하며 목표속도에 도달했을 때 센서리스 운전 모드로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(b)에 나타난 바와 같이 강제구동 시엔 d축 전류만을 사용하여 가속하고, 센서리스 운전모드로 전환된 후에는 SPM 타입이기 때문에 d축 전류가 0으로 제어됨을 확인할 수 있다. 그림 10은 역방향 고속회전 시 센서리스 제어특성 파악으로 실험은 외부부하에 의해 역방향으로 1,000rpm으로 회전하고 있을 시 2상의 역기전력의 크기를 비교하여 역방향임을 감지하고 150rpm 이상이기 때문에 역방향 고속회전 모드로 판단한다. 정방향 고속회전 모드

와 마찬가지로 외부부하에 의해 자연회전 중엔 역기전력을 검출하여 회전자의 속도와 위치를 검출하고, 이 정보를 속도 및 위치 추정기의 초기정보로 사용하여 회전자의 속도 및 위치를 추정한다. 센서리스 운전모드로 전환되어 속도 제어에 의해 감속하고, 속도가 150rpm 이하가 되면 저속회전 모드로 전환하여 그림 9(b), 그림 10(b)와 같이 150rpm 전까진 d축 전류는 0이고 q축 전류만을 사용하여 감속해주고 150rpm이 되었을 경우 d축 전류와 추정된 위치를 바탕으로 만들어진 개루프 위치 정보를 통해 속도를 감소시킨 후 정방향으로 전환한다. 그 후 센서리스 운전모드로 전환되어 다시 q축 전류만을 사용하여 제어됨을 확인할 수 있다. 그림 10(a)에서 전환 시 추정 위치에서 개루프 위치정보로 천이됨에 따라 추정된 속도가 튀는 것을 확인 할 수 있지만 강제기동구간에서는 회전자의 추정위치 및 추정속도 정보를 사용하지 않으므로 제어특성에 영향을 주지 않고 실제 속도는 튀지 않는다.

그림 11은 약자속 제어가 적용된 2,200rpm의 정상상태에서 실제 dq전류와 모델식에 의해 계산된 전류의 파형을 나타낸다. 두 파형을 비교해보면 전류추정이 잘 되고 있음을 알 수 있으며, 속도를 증가시키기 위하여 d축 전류를 자속 방향과 반대 방향으로 발생시켜 공극의 유효자속 크기를 줄이는 약자속 제어 모드로 동작함을 알 수 있다. 그림 12는 2,200rpm으로 구동 시 $\gamma\delta$ 축 전류와 식(3)으로부터 모델식에 의해 계산된 전류의 전류오차를 PI 제어를 통하여 얻어진 $\gamma\delta$ 축 역기전력으로부터 추정된 회전자의 위치와 실제 회전자 위치를 나타낸다. 이론값과 비교하였을 때 역기전력의 크기는 0.1V 정도의 차이가 있지만 고정되어 있는 값이 아니기 때문에 계측 오차로 보인다. 그에 따라 기계적 한주기의 위치오차를 비교한 결과 크기는 6도 작게는 1도 미만으로, 평균 약 3도의 작은 위치오차로 잘 추정되고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 외부부하에 의해서 회전자가 자연적으로 회전 시 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 알고리즘을 제안하였다. 외부부하에 의해 자연적으로 회전하고 있는 영구자석 동기전동기의 dq전류를 0으로 제어하는 기존 센서리스 제어의 경우 회전자 위치검출 시 초기에 발생하는 전류 및 브레이킹 시 발생하는 피크전류로 인해 고속에서는 사용이 어려움을 확인하였다.

외부부하에 의해 정방향 고속회전, 역방향 고속회전 및 저속으로 회전중인 영구자석 동기전동기의 역기전력 검출을 통하여 회전자의 속도와 위치를 검출하고, 자연회전 중 검출된 회전자 속도와 위치를 바탕으로 멈추지 않고 기존 제어방법과 다르게 제동전류, 초기 전류 튀는

현상이 발생하지 않는 새로운 센서리스 제어 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성 사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030201100)

References

- [1] I. C. Baik, J. S. Lee, and H. W. Kim, "Sensorless speed control and starting algorithm using current control of SPM synchronous motor," *Trans. on Korea Institute of Power Electronics(KIPE)*, Vol. 18, No. 6, pp. 523-529, Dec. 2013.
- [2] K. W. Lee and J. I. Ha, "Evaluation of back-EMF estimators for sensorless control of permanent magnet synchronous motors," *Journal of Power Electronics*, Vol. 12, pp. 604-614, Jul. 2012.
- [3] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, Jul./Aug. 2002.
- [4] I. Boldea, M. C. Paicu, and G. D. Andreescu, "Active flux concept for motion-sensorless unified AC drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 23, No. 5, pp. 2612-2618, Sep. 2008.
- [5] A. Borisavljevic, E. Ho, and T. Takahashi, "Fan drive starting into naturally rotating load by sinusoidal sensorless permanent magnet motor control," *EPE-PEMC 2006*, Portorož, Slovenia, pp. 1190-1198, 2006.
- [6] H. S. Lee, K. Y. Cho, H. W. Kim, and Y. C. Cha, "Sensorless control algorithm of a PM synchronous motor under naturally rotating by load," *Summer Conference of Korea Institute of Power Electronics(KIPE)*, pp. 72-73, Jul. 2017.



이한술(李韓壽)

1991년 10월 23일생. 2016년 한국교통대 제어계측공학과 졸업. 2016년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 1993년~2004년 LG전자 DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수. 당 학회 협력이사.



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 1991년~2008년 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 편집위원장.