

# 표면부착형 영구자석 동기전동기의 자속기반 센서리스 제어 알고리즘의 추정자속 오프셋 제거 기법

김학준<sup>1</sup>, 조관열<sup>†</sup>, 김학원<sup>1</sup>, 이광운<sup>2</sup>

## Eliminating Method of Estimated Magnetic Flux Offset in Flux based Sensorless Control Algorithm of Surface Mounted PM Synchronous Motor

Hack-Jun Kim<sup>1</sup>, Kwan-Yuhl Cho<sup>†</sup>, Hag-Wone Kim<sup>1</sup>, and Kwang-Woon Lee<sup>2</sup>

### Abstract

The rotor position of a PM synchronous motor is commonly estimated from the mathematical model for the sensorless control without rotor position sensors. For the magnet flux-based rotor position estimator in the stationary reference frame, the magnet flux estimator for estimating rotor position and speed includes the integrator. The integrator in the magnet flux estimator may accumulate the offset of the current sensors and the voltage drift. This continuous accumulation of the offset may cause the drift and overflow in the integrator, such that the estimated rotor position and speed may fail to track the real rotor position and speed. In this paper, the magnet flux estimator without integrator is proposed to avoid overflow in the integrator. The proposed rotor position and speed estimator based on magnet flux estimator are verified through simulation and experiment.

**Key words:** PM synchronous motor, Sensorless, Magnet flux estimator, Rotor position estimator, Offset

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기는 유도전동기에 비하여 회전자  
의 저항 손실이 없어 높은 효율을 유지하고 직류전동기  
보다 출력밀도가 높아 큰 출력토크를 낼 수 있으며, 속  
응성이 좋다는 장점을 가지고 있다. 영구자석에 의한 재  
료비 상승의 단점이 있음에도 불구하고 고효율 및 제어  
특성이 우수하기 때문에 전기자동차, 에어컨, 냉장고, 세  
탁기 등의 가전기기 및 산업용에 널리 사용되고 있다.

표면부착형 영구자석 동기전동기(Surface mounted  
PM synchronous motor)의 백터제어를 위해서는 회전자  
의 위치정보가 필요하다. 회전자의 위치정보는 일반적으

로 절대형 엔코더(Absolute encoder), 레졸버(Resolver),  
홀센서(Hall sensor) 등의 위치검출 센서를 통해 얻을  
수 있다. 이러한 위치검출 센서는 고가이며, 위치센서를  
취부하기 위한 추가적인 설치 공간 확보가 필요하다는  
단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점들을 극복하기 위해  
센서리스 제어 알고리즘에 대해 지속적인 연구가 진행  
되어 왔다<sup>[1]-[4]</sup>. 그 중에서 영구자석 동기전동기의 수학  
적 모델을 이용한 센서리스 제어 알고리즘은 역기전력  
(Back emf) 기반 회전자 위치추정 방법과 영구자석의  
자속(Magnet flux) 기반 회전자 위치추정 방법으로 구  
분할 수 있다. 역기전력 기반 센서리스 제어 알고리즘의  
경우 역기전력은 회전자 속도에 비례하기 때문에 고속  
에서는 회전자 위치추정에 장점을 가지고 있으나 일반  
적으로 정격속도 5% 이하의 낮은 속도에서는 회전자 위  
치를 추정하는데 한계를 갖는다. 반면 자속 기반 센서리스  
제어 알고리즘의 경우 추정 자속은 회전자 속도와 관  
계가 없으므로, 회전자 위치추정 특성은 저속에서 역기전  
력 기반의 센서리스 제어 알고리즘보다 효과적이다<sup>[2],[3]</sup>.

자속 기반 센서리스 제어 알고리즘의 경우 고정자의  
쇄교자속(Flux linkage)은 회전자의 영구자석에 의한 쇄  
교자속과 고정자에 흐르는 전류에 의한 자속으로 구성

Paper number: TKPE-2017-22-3-5

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

<sup>†</sup> 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

<sup>1</sup> Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea  
Nat'l Univ. of Transportation

<sup>2</sup> Electrical and Control Eng., Mokpo Nat'l University  
Manuscript received Jan. 5, 2017; revised Feb. 1, 2017;  
accepted Feb. 20, 2017

된다. 따라서 회전자의 위치 정보를 갖는 영구자석에 의한 쇄교자속은 고정자 쇄교자속과 고정자에 흐르는 전류에 의한 자속의 차로부터 구할 수 있다. 고정자의 쇄교자속은 일반적으로 고정 좌표계(Stationary  $\alpha\beta$  reference frame)에서 고정자에 인가되는 전압과 저항에 걸리는 전압의 차를 적분함으로써 구할 수 있다. 이러한 적분 방법에 의해 계산된 고정자 자속은 전류센서에 의해 검출되는 3상 전류의 DC 오프셋(Offset), 전동기 상수 변동 등에 의해 오프셋 또는 드리프트(Drift) 현상이 발생할 수 있다. 따라서 적분기의 출력에 고역통과 필터(High pass filter)를 추가하여 추정된 고정자 쇄교자속의 오프셋 또는 드리프트 현상을 제거할 필요가 있다<sup>[4]</sup>. 그러나 이러한 경우에도 자속 추정기의 적분기의 출력은 지속적인 오프셋의 누적으로 인해 MCU에서 오버플로우가 발생할 수 있으며 이 경우 회전자 추정위치는 실제 회전자 위치를 추종할 수 없게 된다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치추정을 위한 자속 추정기의 적분기에 지속적으로 누적되는 현상을 제거하기 위한 영구자석의 쇄교자속 추정 알고리즘을 제안한다.

## 2. 자속기반 회전자 위치추정 알고리즘

영구자석 동기전동기의 자속 기반 회전자 위치추정 알고리즘의 경우 회전자 위치정보는 영구자석의 자속 정보로부터 얻을 수 있다. 회전자 위치에 따른 영구자석의 자속 정보는 고정자의 총 쇄교자속과 고정자 전류에 의한 쇄교자속으로부터 구할 수 있다. 그림 1은  $\alpha\beta$  고정좌표계와 회전자 위치에 기반한  $dq$  동기좌표계의 관계를 나타낸다. 영구자석의 자속  $\lambda_m$ 은  $d$ 축에 존재하며, 따라서  $\alpha$ 축으로부터  $d$ 축이 이루는 각도는 회전자의 위치를 나타낸다. 정지좌표계의  $\alpha\beta$ 축 전압방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서  $v_{\alpha\beta}$ ,  $i_{\alpha\beta}$ 는 각각 전동기에 인가되는  $\alpha\beta$ 축 전압 및 고정자에 흐르는  $\alpha\beta$ 축 전류를 나타내며,  $\lambda_{\alpha\beta}$ 는 고정자의  $\alpha\beta$ 축 쇄교자속을 나타낸다. 고정자의  $\alpha\beta$ 축 쇄교자속  $\lambda_{\alpha\beta}$ 는 고정자 전류에 의한 쇄교자속과 영구자석의 자속으로 구성되며, 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{m\alpha} \\ \lambda_{m\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix}$$

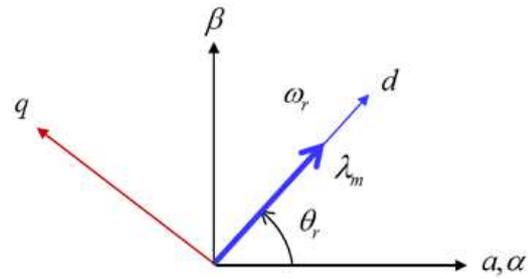


Fig. 1. Magnet flux and rotor position.

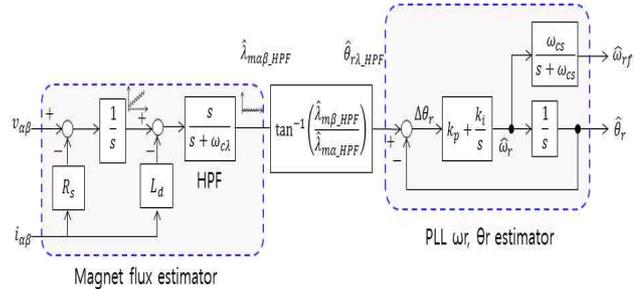


Fig. 2. Conventional rotor position estimator.

식 (2)에서  $\lambda_m$ 은 영구자석의 자속을 나타내며, 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우  $\alpha\beta$ 축 인덕턴스는 돌극성(Saliency)이 없으므로  $L_s = L_d = L_q$ 와 같이 동일하게 나타난다. 식 (1)과 (2)로부터 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{\alpha\beta} + \frac{d}{dt} \lambda_{m\alpha\beta} \quad (3)$$

영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$ 는 식 (3)을 적분하여 식 (4)와 같이 얻을 수 있으며, 회전자의 위치정보는 식 (2)와 식 (4)로부터 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta} = \hat{\lambda}_{\alpha\beta} - L_s i_{\alpha\beta} = \int (v_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) dt - L_s i_{\alpha\beta} \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{m\beta}}{\hat{\lambda}_{m\alpha}} \right) \quad (5)$$

식 (4)에서 회전자 위치정보를 갖는 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$ 는 고정자 전압과 저항에 걸리는 전압의 차를 적분하여 얻어지기 때문에 전류검출 센서의 오프셋 또는 전동기 상수 등의 변동에 의해 DC 오프셋과 저주파의 드리프트(Drift) 현상이 발생할 수 있다. 영구자석의 추정자속의 DC 오프셋이나 드리프트는 추정되는 회전자 위치의 오차를 유발하기 때문에 식 (6)과 같이 고역통과 필터(High pass filter)를 추가하여 제거할 수 있다. 고역통과 필터에 의해 구해진 영구자석의 추정자속으로부터 회전자의 추정위치는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_HPF}(s) = \frac{s}{s + \omega_{c\lambda}} \hat{\lambda}_{m\alpha\beta}(s) \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_{r\_HPF} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{m\beta\_HPF}}{\hat{\lambda}_{m\alpha\_HPF}} \right) \quad (7)$$

그림 2는 기존의 영구자석 동기전동기의 자속 기반 회전자 위치추정 알고리즘을 나타낸다. 정확한 회전자 위치정보를 얻기 위해 식 (7)의 회전자 추정위치를 PLL(Phase locked loop)을 통하여 추정속도 및 추정위치의 오차를 감소시키고 전동기 상수 등의 변동에 둔감하게 한다. 영구자석의 추정자속으로부터 구한 회전자 추정위치와 최종 추정위치의 오차를 PI 제어기에 의해 식 (8)과 같이 회전자 속도를 추정하고 추정속도로부터 식 (9)와 같이 최종 회전자 위치를 추정한다.

$$\hat{\omega}_r = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (\hat{\theta}_{r\_HPF} - \hat{\theta}_r) \quad (8)$$

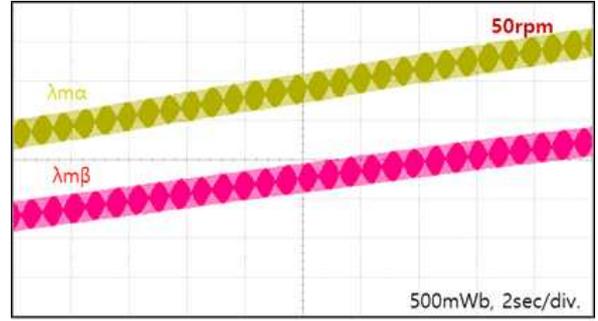
$$\hat{\theta}_r = \frac{1}{s} \hat{\omega}_r \quad (9)$$

그림 3(a)는 식 (4)에 의한 자속추정기로부터 추정된 영구자석의  $\alpha\beta$ 축 추정자속을 나타낸다. 적분기의 영향으로 영구자석의  $\alpha$ 축 추정자속에 오프셋이 지속적으로 누적되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 영구자석의 추정자속에 발생하는 오프셋을 제거하기 위해 낮은 차단주파수를 갖는 고역통과 필터를 통과한 추정자속을 나타낸다. 고역통과 필터에 의해 영구자석의 추정자속의 오프셋이 제거됨을 확인할 수 있다. 그러나 고역통과 필터를 사용한 자속추정 방식은 고역통과 필터에 의해 위상 지연이 발생하고, 그림 3(a)에 나타난 추정자속은 적분기에 의해 지속적으로 오프셋이 누적되는 문제를 갖는다. 적분기로 인한 지속적인 오프셋 누적은 시간이 지속됨에 따라 추정자속의 오버플로우(Overflow) 현상을 유발할 수 있으며 이 경우 회전자의 위치추정을 할 수 없는 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치추정을 위한 자속추정기의 적분기에 지속적으로 누적되는 오프셋 현상을 제거하기 위해 적분기를 제거한 영구자석의 자속추정 방법을 제안한다.

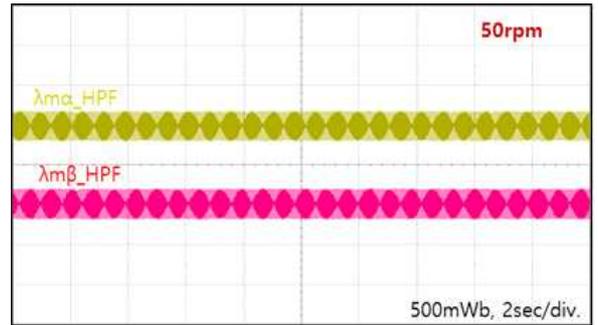
### 3. 제안하는 센서리스 제어 알고리즘

영구자석 동기전동기의 영구자석의 자속을 추정하기 위한 자속추정기의 적분기에 오프셋 누적으로 인한 오버플로우를 방지하기 위해 식 (4)와 식 (6)으로부터 영구자석의 자속은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}(s) = \frac{s}{s + \omega_{c\lambda}} \left( \frac{1}{s} (V_{\alpha\beta}(s) - R_s I_{\alpha\beta}(s)) - L_s I_{\alpha\beta}(s) \right) \quad (10)$$



(a) Offset of estimated magnet flux



(b) Estimated magnet flux with HPF

Fig. 3. Estimated magnet flux of conventional estimator.

식 (10)은 식 (11)과 같이 적분기가 제어된 저역통과 필터의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서  $\omega_{c\lambda}$ 는 저역통과 필터(Low pass filter)의 차단주파수(Cutoff frequency)를 나타낸다. 고역통과 필터와 적분기를 대신해서 저역통과 필터를 사용하고  $\omega_{c\lambda}$ 의 역수를 곱하여 주면 적분기가 제거된 영구자석의 자속 추정기가 된다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_LPF}(s) = \frac{\omega_{c\lambda}}{s + \omega_{c\lambda}} \frac{1}{\omega_{c\lambda}} (V_{\alpha\beta}(s) - R_s I_{\alpha\beta}(s)) - \frac{s}{s + \omega_{c\lambda}} L_s I_{\alpha\beta}(s) \quad (11)$$

저역통과 필터를 통해 추정된 자속은 식(12)와 같이 아크탄젠트 연산을 통해 회전자 위치를 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta}_{r\lambda\_LPF} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{m\beta\_LPF}}{\hat{\lambda}_{m\alpha\_LPF}} \right) \quad (12)$$

그림 4는 본 논문에서 제안하는 저역통과 필터를 사용한 영구자속의 자속 추정기를 나타낸다. 영구자석의 자속은 고정 좌표계의 전압 레퍼런스과 계측된 전류를 사용하여 전압과 저항에 걸리는 전압의 차를 만들고 적분기와 고역통과 필터를 저역통과 필터로 대체하여 고정자의 총 쇠교자속을 추정한다. 고정자의 총 쇠교자속에서  $L_s i_{\alpha\beta}$ 를 빼주어 영구자석의 자속을 추정하고, 최종적으로 영구자석의 추정자속으로부터 회전자의 위치를 추

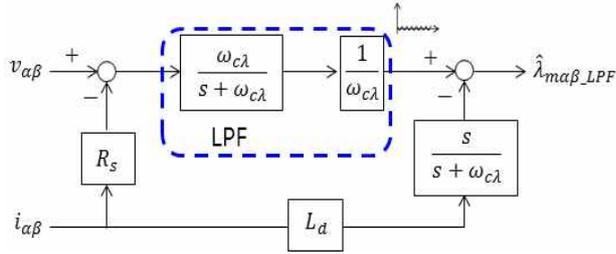


Fig. 4. Proposed magnet flux estimator.

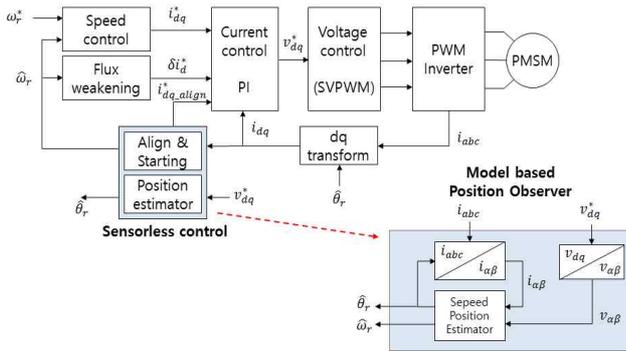


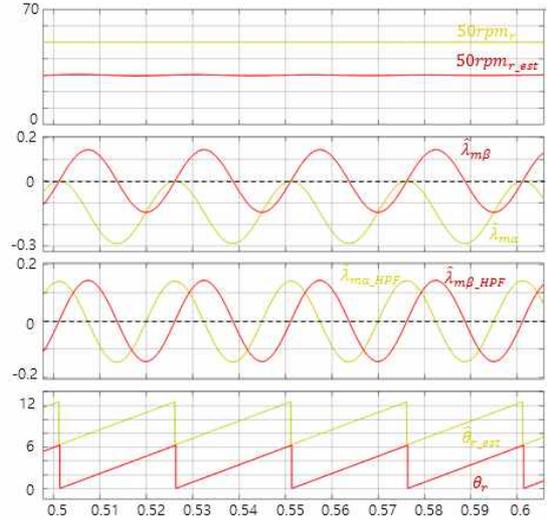
Fig. 5. Block diagram of proposed sensorless control.

정한다. 제안된 자속추정기는 적분기가 제거됨에 따라 기존 자속추정기의 적분기에 누적되는 오프셋 현상을 제거할 수 있다.

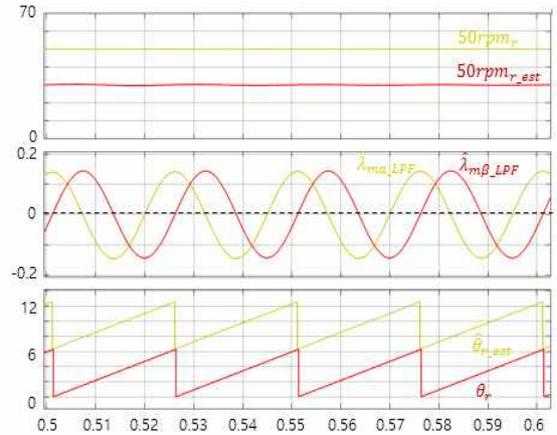
그림 5은 제안된 영구자석의 자속추정기를 갖는 센서리스 제어알고리즘의 블록도를 나타낸다. 표면부착형 영구자석 동기전동기는 속도제어기, 전류제어기, SVPWM (Space vector PWM) 및 PWM 인버터를 통해 제어된다. 또한 고속운전을 위해 약자속 제어(Flux weakening control)가 추가된다. 회전자가 정지되어 있을 때 회전자의 초기위치는 알 수 없기 때문에 초기기동 알고리즘을 통해 개루프 제어(Open loop control)에 의해 회전자를 기동시키고 그 구간에서 제안된 영구자석의 자속추정기로부터 회전자의 위치를 추정한다. 개루프 제어 구간에서 주어진 회전자 속도 및 위치와 자속추정기에 의해 추정된 추정속도 및 추정위치의 오차가 일정한 값 이내로 도달할 경우 전동기는 추정속도와 추정위치에 의해 구동되는 폐루프 제어(Closed loop control)로 전환된다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

그림 6(a)는 기존 고역통과 필터를 사용한 자속추정기로부터 추정된 영구자석의  $\alpha\beta$ 축 추정자속, 회전자의 추정속도 및 추정위치의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 또한 6(b)는 제안된 자속추정기로부터 추정된 영구자석의  $\alpha\beta$ 축 추정자속, 회전자의 추정속도 및 추정위치의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 6(a)에서 기존 자속추정기의 경우 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$  은 적분기의 영향으로 오프셋이 발생함을 알 수 있다. 추정자속의 오프셋



(a) Conventional estimator with HPF



(b) Proposed estimator with LPF

Fig. 6. Estimated magnet flux and rotor position at 50rpm.

은 낮은 주파수의 고역통과 필터를 통해 제거되며 최종적으로 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_HPF}$  으로부터 추정된 회전자의 위치는 실제 위치를 잘 추종함을 알 수 있다. 그러나 자속추정기의 적분기에는 오프셋이 계속 누적되어지기 때문에 오버플로우가 발생할 우려가 있으며 이는 구동중인 전동기에 치명적인 손상을 줄 수도 있다. 제안된 자속 추정기의 경우 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 적분기가 제거됨으로써 저역통과 필터를 통과한 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_LPF}$  에는 오프셋이 발생하지 않는다. 또한 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_LPF}$  으로부터 추정된 회전자의 추정위치는 실제 회전자 위치를 잘 추종함을 알 수 있다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표

TABLE I  
MOTOR SPEC

Parameters		Value	Unit
Washing	Power	97	W
	Current	2.36	A
	Speed	50	rpm
	Torque	18.5	Nm
Spinning	Power	272	W
	Current	2.31	A
	Speed	1,300	rpm
	Torque	2.0	Nm
Number of poles		48	
EMF constant		0.144	Vsec
Phase resistance		5.47	$\Omega$
<i>d</i> -axis inductance		35.5	mH
<i>q</i> -axis inductance		35.5	mH

1과 같이 48극의 dq축 인덕턴스가 같은 SPMSM (Surface mounted PMSM) 타입으로 전동기가 세탁통 (Tub)과 직결 구조로 연결된 DD(Direct drive) 드럼세탁기(Front loading washer)에 사용된다. 영구자석 동기전동기의 전류제어, 전압제어 및 회전자 위치추정기는 PWM 주파수와 동기되어 동작하며, PWM 주파수는 16kHz이다. 영구자석의 자속추정기에 사용되는 3상 전류는 3개의 션트(Shunt) 저항으로부터 검출되고, 전압은 전류제어기의 출력인 레퍼런스 전압을 사용하였다.

그림 7은 기존의 고역통과 필터를 사용한 자속추정기의 영구자석의 추정자속과 회전자의 추정위치를 나타낸다. 정지좌표계에서 전압방정식으로부터 추정된 영구자석의 자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$  으로부터 고역통과 필터를 통과한 자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_HPF}$  를 구하고 아크탄젠트 연산을 통해 회전자의 위치를 추정한다. 추정된 영구자석의 자속 위치정보는 PLL 제어기에 의해 회전자의 속도  $\omega_{r\_est}$  를 추정하고, 회전자 추정속도를 적분하여 정확한 회전자의 위치  $\theta_{r\_est}$  를 추정한다. 하지만 앞에서 언급한 것과 같이 그림 3(a)의 고역통과 필터를 통과하기 전의 영구자석의 추정자속은 전류검출 오프셋과 전압드리프트에 의해 적분기는 지속적으로 증가하여 최악의 경우 오버플로우가 발생하여 회전자 위치를 추정할 수 없는 현상이 발생한다. 그림 8(a)는 50rpm으로 운전 시 추정된 영구자석의 자속에 오프셋이 누적되어 오버플로우가 발생한 경우를 나타낸다. 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$  의 오프셋은 고역통과 필터에 의해 제거되어 회전자의 추정위치는 실제 회전자 위치를 잘 추종하고 있지만 영구자석의 추정자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta}$  에는 지속적으로 누적된 오프셋의 영향으로 인해 오버플로우가 발생하게 된다. 따라서 고역통과 필터를 통과한 자속  $\hat{\lambda}_{m\alpha\beta\_HPF}$  로부터 추정된 회전자 위치  $\theta_{r\_est}$  는 실제 회전자 위치를 추종할 수 없게 된다. 그림 8(b)

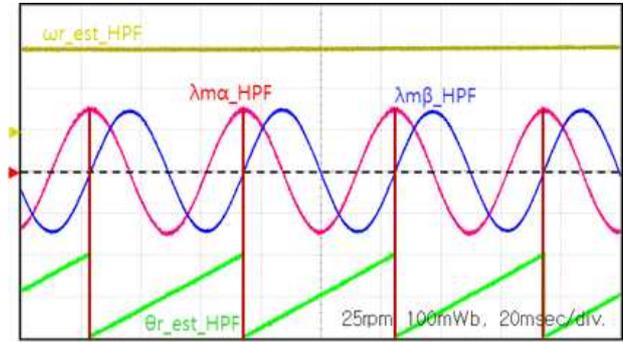
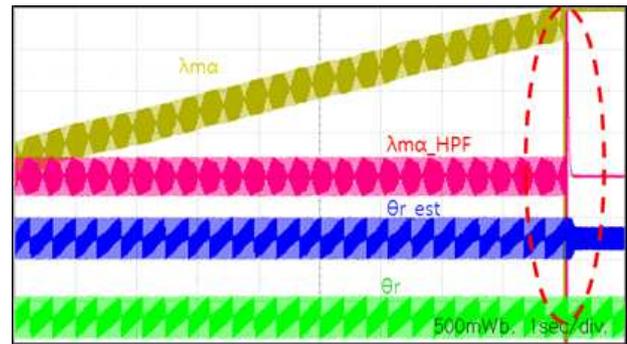
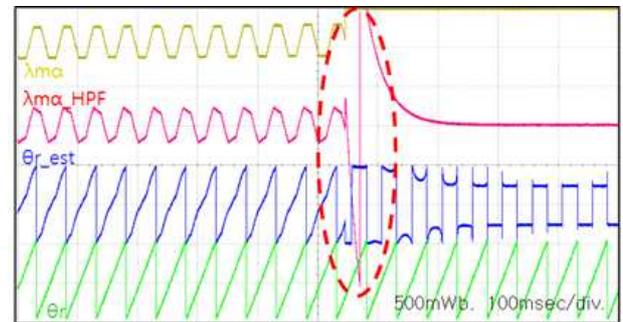


Fig. 7. Estimated magnet flux and rotor position of conventional estimator at 50rpm.



(a) Overflow in estimated magnet flux



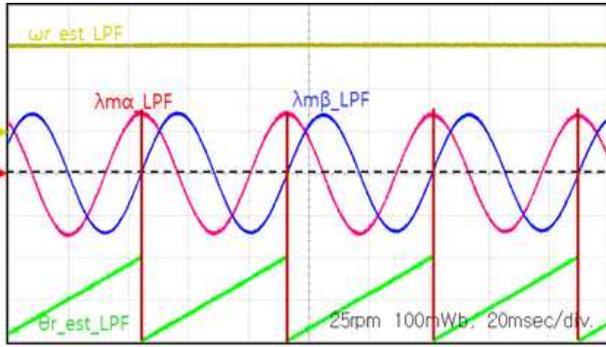
(b) Enlarged waveform of overflow

Fig. 8. Overflow of magnet flux in conventional estimator at 50rpm.

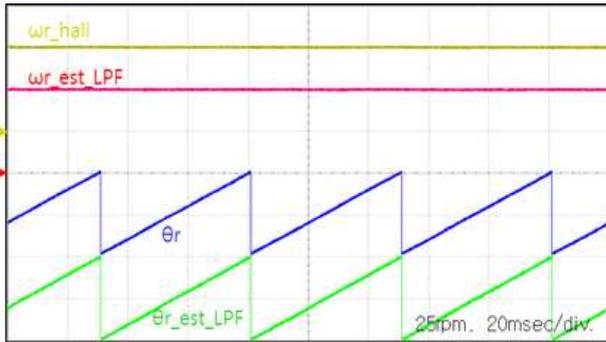
는 오버플로우 발생 확대 파형이다.

그림 9는 50rpm 운전 시 제안된 회전자 위치추정 알고리즘에 의한 영구자석의 추정자속 및 회전자의 추정위치 그리고 추정 속도를 나타낸다. 영구자석의 자속 추정기의 수학적 모델링으로부터 알 수 있듯이 제안된 자속추정기는 기존의 고역통과 필터를 사용한 자속추정기와 동일한 자속추정 특성을 갖는다. 그림 10은 1200rpm으로 운전 시 영구자석의 추정자속 및 회전자의 추정위치 그리고 추정 속도를 나타낸다. 1,200rpm의 고속에서도 회전자의 추정위치 및 추정속도는 실제 회전자 위치 및 속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 11는 50rpm 운전 시 제안된 회전자 위치추정 알고리즘에 의한 영구자석의 추정자속 및 회전자의 추정위치 그리고 추정 속도를 나타낸다. 영구자석의 자속 추정기의 수학적 모델링으로부터 알 수 있듯이 제안된 자속추정기는 기존의 고역통과 필터를 사용한 자속추정기와 동일한 자속추정 특성을 갖는다. 그림 10은 1200rpm으로 운전 시 영구자석의 추정자속 및 회전자의 추정위치 그리고 추정 속도를 나타낸다. 1,200rpm의 고속에서도 회전자의 추정위치 및 추정속도는 실제 회전자 위치 및 속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

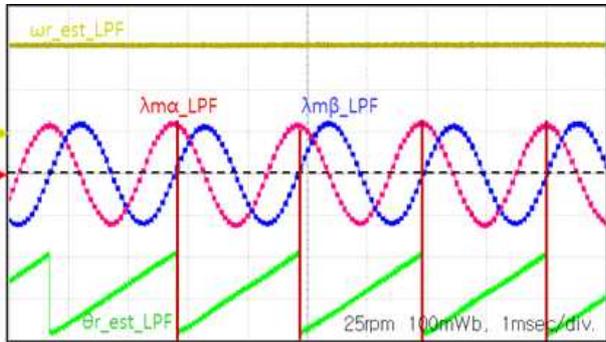


(a) Estimated magnet flux and rotor position

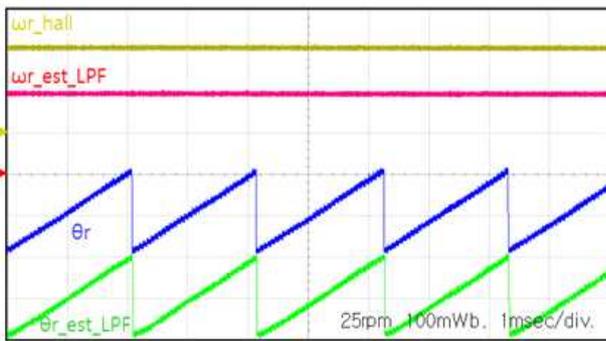


(b) Real and estimated rotor speed and position

Fig. 9. Estimator of proposed algorithm at 50rpm.



(a) Estimated magnet flux and rotor position



(b) Real and estimated rotor speed and position

Fig. 10. Estimator of proposed algorithm at 1,200rpm.

고리즘으로 구동 했을 때의 *a*상 상전류, *dq* 전류 및 회전자의 추정위치를 나타낸다. 그림 12은 1200rpm 운전

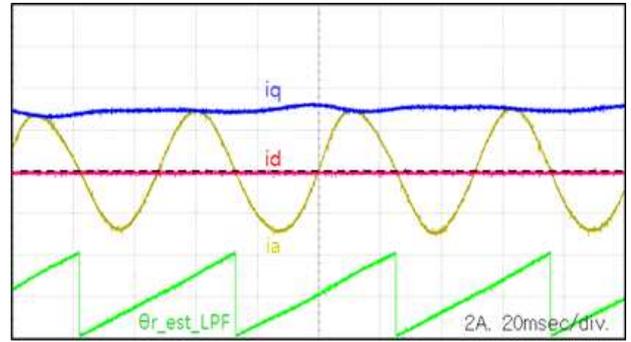


Fig. 11. Phase *a* and *dq* currents at 50rpm.

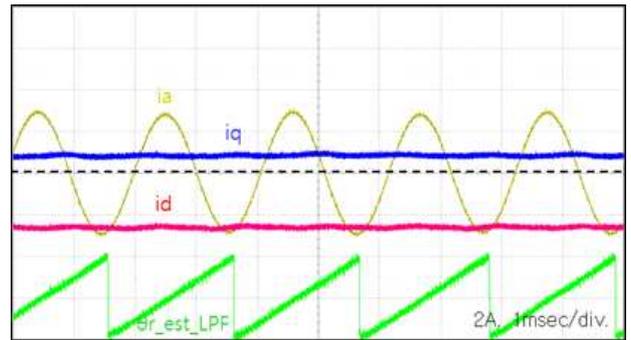


Fig. 12. Phase *a* and *dq* currents at 1,200rpm.

시의 특성을 나타낸다. 약계자 운전에 의해 *a*상 전류의 위상은 *a*상 유기전압에 대해 약 80도 앞서 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 영구자석 표면부착형 동기전동기의 정지 좌표계에서 영구자석 자속 추정기의 적분기로 인한 오프셋이 지속적으로 누적되는 것을 방지하기 위해 적분기를 제거한 영구자석의 자속 추정기를 제안하였다. 기존 영구자석의 자속 추정기의 적분기에서 지속적인 오프셋 누적으로 인해 오버플로우가 발생하는 문제점을 검토하였다. 또한 자속추정기의 수학적 모델링으로부터 기존 자속추정 알고리즘과 제안된 자속추정 알고리즘이 동일한 자속추정 특성을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 제안된 자속추정 알고리즘은 자속추정기의 적분기를 제거함으로써 오버플로우로부터 안전하며 기존 방식과 동일한 자속추정, 회전자 위치 및 속도 추정 특성을 나타냄을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구는 2016년도 에너지인력양성사업의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20164030201100)

## References

- [1] R. Mizutani, T. Takeshita, and N. Matsui, "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 2, pp. 841-846, July/Aug. 1998.
- [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, No. 4, pp. 604-614, July 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, July/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.

**김학준(金學俊)**

1990년 10월 29일생. 2015년 한국교통대 제어계측공학과 졸업. 2017년 동 대학원 제어계측공학과 석사 졸업.

**조관열(趙官烈)**

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 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(공학박). 1991년~2008년 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수. 당 학회 편집위원장.

**이광운(李光雲)**

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 졸업(공학박). 2000년~2007년 삼성전자 책임연구원. 2007년~2008년 고려대 BK21 연구교수. 2008년~현재 목포해양대 전자공학과 조교수. 당 학회 기획이사.