

EEMF 기반 센서리스 영구자석 동기전동기 구동 시스템의 구동 재개 방법

이영재¹, 박영수¹, 이교범[†]

Restarting Method for EEMF Based Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Systems

Young-Jae Lee¹, Yeongsu Bak¹, and Kyo-Beum Lee[†]

Abstract

This paper proposes a restarting method for extended electromotive force (EEMF)-based sensorless permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive systems. The sensorless PMSM drive systems generally estimate the rotor speed and angle based on EEMF. However, if the inverter is stopped while the PMSM is rotating, the initial rotor speed and angle are required for restart. Therefore, the proposed restarting method estimates the initial rotor speed and angle using the short-circuit current generated by applying zero voltage vector from the inverter. The validity of the proposed method is verified by simulation and experimental results.

Key words: PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor), Restarting method, Sensorless control, Rotor speed estimation, Rotor angle estimation

1. 서 론

영구자석 동기전동기(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)는 소형, 경량화, 고효율 등의 장점이 있으므로, 최근 다양한 전동기 구동 분야에서 사용되고 있다^{[1]-[3]}. PMSM의 정확한 벡터 제어를 위해서는 회전자의 속도와 위치각 정보가 필요하며, 이를 얻기 위해서는 일반적으로 엔코더나 레졸버 등의 센서를 사용한다. 하지만, 회전자의 속도 및 위치각 정보를 얻기 위한 센서는 시스템의 부피를 증가시키며, 유지보수가 어렵고, 노이즈나 외란에 취약한 단점이 있다. 따라서, 최근에는 센서를 사용하지 않고 PMSM을 구동하는 다양한 센서리스 제어 방법이 연구되고 있다^{[4],[5]}.

센서리스 제어 방법은 크게 고주파 주입을 이용한 방법^{[6],[7]}과 모델 기반의 역기전력 또는 자속을 추정하는 방

법^{[8],[9]}으로 구분된다. 본 논문에서는 PMSM의 확장 역기전력(Extended electromotive force, EEMF) 기반의 센서리스 PMSM 구동 시스템을 다루며, 회전자표계 내에서 PMSM의 수학적 모델링 및 EEMF를 통해 회전자의 속도와 위치각을 추정한다. 또한, 최소차원 관측기를 사용하여 회전자 속도와 위치각을 추정하므로 다른 센서리스 제어 방법과 비교하여 구현이 간단한 장점이 있다^{[10],[11]}.

센서리스 PMSM 구동 시스템에서 인버터의 동작이 중단된 경우, 회전자의 초기 속도 및 위치각을 검출할 수 없으므로 시스템의 구동 재개가 불가능하다. 또한, 오차 성분을 포함하는 회전자의 초기 속도 및 위치각을 사용하는 경우에는 PMSM의 역기전력에 의한 전류의 왜곡이 발생하며, 시스템의 정확한 제어가 불가능하다^[12]. 이에 따라, 인버터의 동작이 중단된 경우, PMSM의 회전자 초기 속도 및 위치각을 추정하여 구동을 재개하기 위해서는 추가적인 방법이 요구된다.

PMSM 구동 시스템에서 여러 번의 영전압 벡터를 인가하여 회전자 초기 속도 및 위치각을 추정하는 방법^[13]이 연구되었으나, 이는 영전압 벡터를 여러 번 인가하므로 구현이 복잡한 단점이 있다. 본 논문에서는 EEMF 기반 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동 재개 방법을

Paper number: TKPE-2019-24-2-9

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

[†] Corresponding author: kyl@ajou.ac.kr, Dept. of Electrical & Computer Engineering, Ajou Univ.

Tel: +82-31-219-2376 Fax: +82-31-212-9531

¹ Dept. of Electrical & Computer Engineering, Ajou Univ.
Manuscript received Nov. 13, 2018; revised Nov. 28, 2018;
accepted Dec. 7, 2018

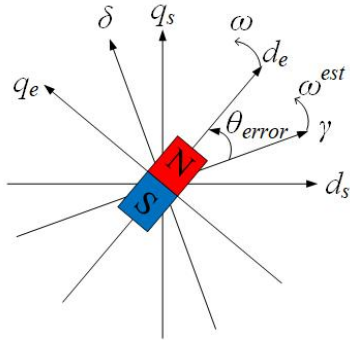


Fig. 1. Space vector diagram of PMSM.

제안하였으며, 두 번의 영전압 벡터만을 이용하므로 구현이 간단하다. 인버터의 동작이 중단된 경우에 PMSM의 회전자의 초기 속도 및 위치각은 영전압 벡터를 인가하여 발생하는 단락 전류 벡터를 통해 추정한다. 또한, 추정된 회전자의 초기 속도 및 위치각 정보를 이용하여 시스템의 구동 재개가 가능하다. 제안한 구동 재개 방법의 타당성은 5 kW급 PMSM을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. EEMF 기반의 센서리스 제어 방법

2.1 PMSM 모델링

그림 1은 PMSM의 공간 벡터도를 나타낸다. d_s - q_s 는 고정 좌표계, d_e - q_e 는 회전 좌표계를 나타낸다. 회전 좌표계의 d-축은 모터의 N극과 일치하며, γ - δ 는 추정된 회전 좌표계를 나타낸다. ω 는 PMSM 회전자의 속도(d_e - q_e 축의 회전 속도)를 나타내며, ω^{est} 는 PMSM 회전자의 추정 속도(γ - δ 축의 회전 속도)를 나타낸다. 또한, θ_{error} 는 d_e - q_e 축과 γ - δ 축 사이의 위치각을 나타내며, 이를 PI 제어기를 통해 0으로 제어하여 PMSM의 회전자 속도와 위치각을 추정할 수 있다^[8].

d_e - q_e 축에서 PMSM의 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{de} \\ V_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{de} \\ I_{qe} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 PMSM의 전압 방정식을 d_e - q_e 축에서 θ_{error} 만큼 지연시킨 γ - δ 축으로 모델링하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_\gamma \\ V_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\gamma \\ I_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, PMSM의 역기전력을 나타내는 e_γ 와 e_δ 는 식 (3)과 같으며, d_e - q_e 축과 γ - δ 축 회전 속도의 오차를 나타내는 $(\omega^{est} - \omega)$ 항을 포함한다.

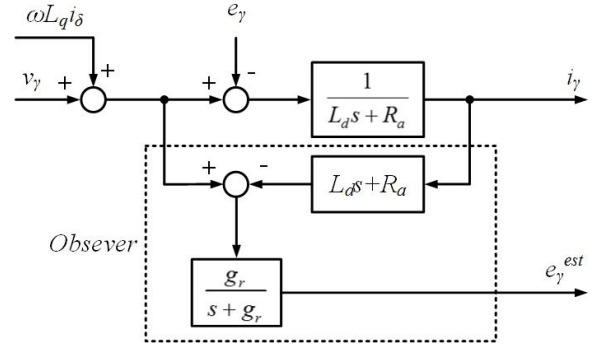
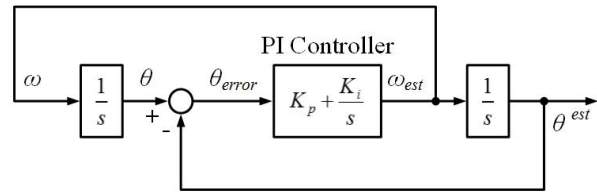
Fig. 2. Block diagram of the least order observer for estimating e_γ^{est} .

Fig. 3. Block diagram of estimating rotor speed and angle.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{emf} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{error} \\ \cos\theta_{error} \end{bmatrix} + (\omega^{est} - \omega)L_d \begin{bmatrix} -I_\delta \\ I_\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한, 식 (3)에 나타난 EEMF 항은 식 (4)와 같다.

$$E_{emf} = \omega[(L_d - L_q)I_{de} + \phi_f] - (L_d - L_q)(pI_{qe}) \quad (4)$$

2.2 최소차원 관측기

그림 2는 최소차원 관측기의 블록도를 나타낸다. g_γ 는 최소차원 관측기의 이득값이며, 최소차원 관측기를 통해 e_γ 와 e_δ 의 추정값인 e_γ^{est} 와 e_δ^{est} 를 추정할 수 있다^[14]. 즉, PMSM 회전자의 추정 속도 ω^{est} 가 실제 속도 ω 를 정확히 추종하게 되어 오차가 무시할 수 있을 정도로 작아지게 되면, $(\omega^{est} - \omega)$ 항이 0으로 수렴하게 되므로, PMSM 역기전력의 추정값 e_γ^{est} 와 e_δ^{est} 는 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma^{est} \\ e_\delta^{est} \end{bmatrix} = E_{emf} \begin{bmatrix} -\sin\theta_{error} \\ \cos\theta_{error} \end{bmatrix} \quad (5)$$

결과적으로, d_e - q_e 축과 γ - δ 축의 사이의 위치각인 θ_{error} 는 추정된 e_γ^{est} 와 e_δ^{est} 를 이용하여 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_{error} = \tan^{-1}\left(-\frac{e_\gamma^{est}}{e_\delta^{est}}\right) \quad (6)$$

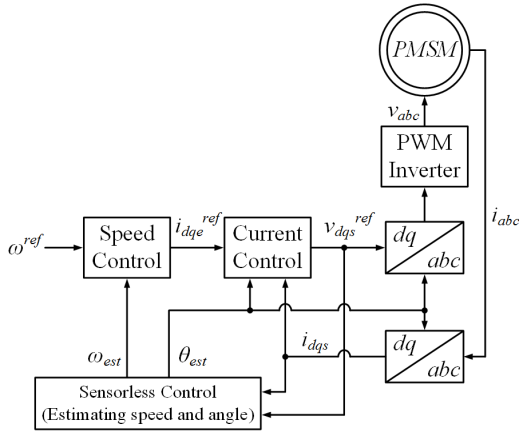


Fig. 4. Control block diagram of sensorless PMSM drive system.

2.3 센서리스 제어

그림 3은 PMSM 회전자속도와 위치각을 추정하기 위한 블록도를 나타낸다. 회전자속도 ω 를 적분하여 얻은 위치각 θ 와 추정된 위치각 θ^{est} 의 오차 θ_{error} 를 PI 제어기를 통해 0으로 제어하여, 추정된 속도 ω^{est} 를 얻을 수 있다^[5].

센서리스 PMSM 구동 시스템의 제어 블록도는 그림 4와 같다. EEMF 기반 센서리스 제어 방법을 통해 PMSM 회전자속도와 위치각을 추정하며, 이를 이용하여 PMSM의 속도 제어 및 고정 좌표계 전압과 전류의 회전 좌표계로의 좌표 변환을 수행한다. 속도 제어기의 출력은 회전 좌표계 d_e - q_e 축 지령 전류(i_{dqe}^{ref})이며, 이를 통해 PMSM의 출력 전류를 제어한다. 마지막으로, 전류 제어기의 출력은 고정 좌표계 d_s - q_s 축 지령 전압(v_{dqs}^{ref})이며, 이를 통해 PWM 인버터를 동작시켜 PMSM을 구동한다. 이때, i_{abc} 는 PMSM의 3상 출력 전류를 나타낸다.

3. 제안하는 구동 재개 방법

3.1 회전자 초기 속도 추정 방법

센서리스 PMSM 구동 시스템에서 인버터의 동작이 중단된 경우, 인버터를 통해 영전압 벡터를 인가하면, PMSM의 역기전력에 의해 단락 전류가 발생된다^[13]. 이러한 단락 전류는 회전자속도 및 위치각 정보를 포함하고 있으므로 이를 통해 PMSM의 구동 재개를 위한 회전자속도 및 위치각 정보를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 두 번의 영전압 벡터를 인가하여 발생된 단락 전류를 통해 회전자속도 및 위치각 정보를 추정하고, 이를 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동 재개를 위해 사용한다.

인버터를 통해 영전압 벡터를 인가하는 경우, PMSM의 전압 방정식은 식 (7)과 같으며, q-축 고정자 권선의

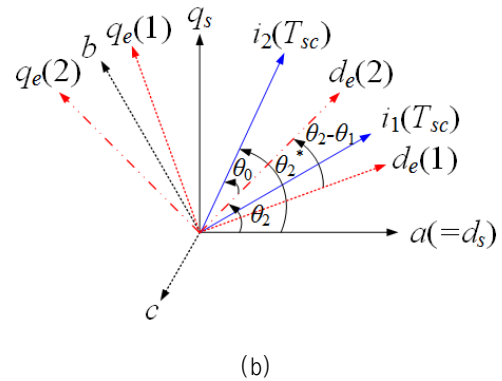
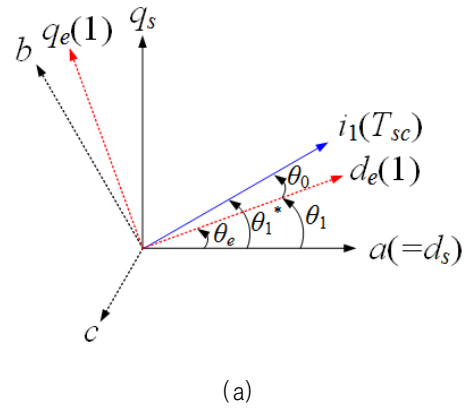


Fig. 5. Short-circuit current vectors generated by (a) first and (b) second zero vector.

시정수 L_q/R_s 가 샘플링 주파수 T_s 보다 매우 큰 경우에 R_s 는 0으로 근사화 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{de} \\ I_{qe} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\phi_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, ω 가 일정하고 초기 전류가 0이라고 가정하면, 식 (7)의 I_{de} 와 I_{qe} 는 라플라스 변환을 사용하여 식 (8)과 같이 단락 전류 I_{SC} 로 표현이 가능하다^[13].

$$I_{SC} = \begin{bmatrix} I_{de} \\ I_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\phi_f}{L_d}(1 - \cos\omega T_s) \\ -\frac{\phi_f}{L_q}\omega T_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

센서리스 PMSM 구동 시스템에서 인버터를 통해 첫 번째 영전압 벡터가 제어 주기 T_s 동안 인가되는 경우, 3상 단락 전류가 발생한다. 이를 통해 정지 좌표계 d_s - q_s 축 단락 전류 i_{ds} 및 i_{qs} 를 얻을 수 있으며, 회전자속도 초기 위치각은 식 (9)와 같이 추정한다.

$$\theta_1^* = \tan^{-1}\left(\frac{i_{qs}}{i_{ds}}\right) \quad (9)$$

TABLE I
PMSM PARAMETERS

Parameter	Value	Unit
Rated power (P_{rated})	5	kW
Rated speed (ω_{rated})	1750	rpm
Rated current (I_{rated})	19.09	A _{peak}
Stator resistance (R_s)	28.3	Ω
Stator d -axis inductance (L_d)	0.125	H
Stator q -axis inductance (L_q)	16.5	H
Number of pole (P)	3	-
Rotor magnet flux linkage (ϕ_f)	20	Wb
Moment of inertia (J)	0.0066	kgm ²

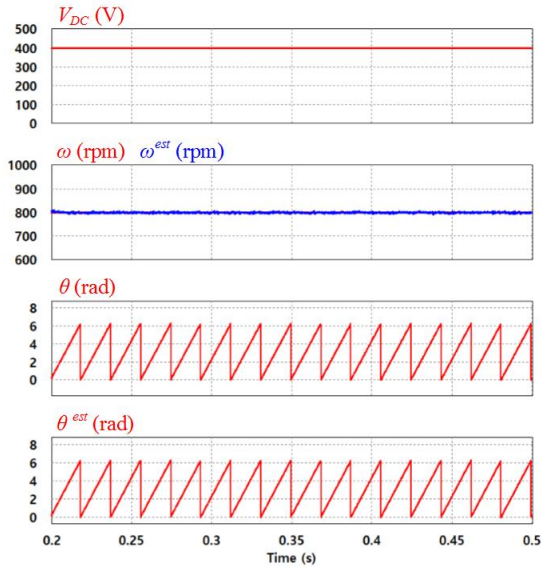


Fig. 6. Simulation results of EEMF based sensorless PMSM drive system.

또한, 첫 번째 영전압 벡터 인가를 통해 발생한 단락 전류가 0으로 감소할 때까지의 충분한 시간(T_{1-2})이 지난 후, 두 번째 영전압 벡터를 인가하여 θ_2 를 추정할 수 있다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 첫 번째와 두 번째 영전압 벡터에 의해 발생한 단락 전류 벡터 $i_1(T_{sc})$ 및 $i_2(T_{sc})$ 를 나타낸다. 여기서, θ_1 과 θ_2 는 $i_1(T_{sc})$ 및 $i_2(T_{sc})$ 와 a-축 사이의 위치각이며, θ_1^* 와 θ_2^* 는 동기 좌표계 d-축과 a-축 사이의 위치각을 나타낸다. 또한, θ_0 는 단락 전류 벡터와 d-축 사이의 위치각을 나타낸다. 단락 전류 벡터가 d_e - q_e 축의 회전 속도와 같은 속도로 회전하면, $i_1(T_{sc})$ 및 $i_2(T_{sc})$ 의 위치각 차이인 $\theta_2 - \theta_1$ 은 $\theta_2^* - \theta_1^*$ 와 동일하며, 회전자 초기 속도는 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\omega^e = \frac{\theta_2^* - \theta_1^*}{T_s + T_{1-2}} \quad (10)$$

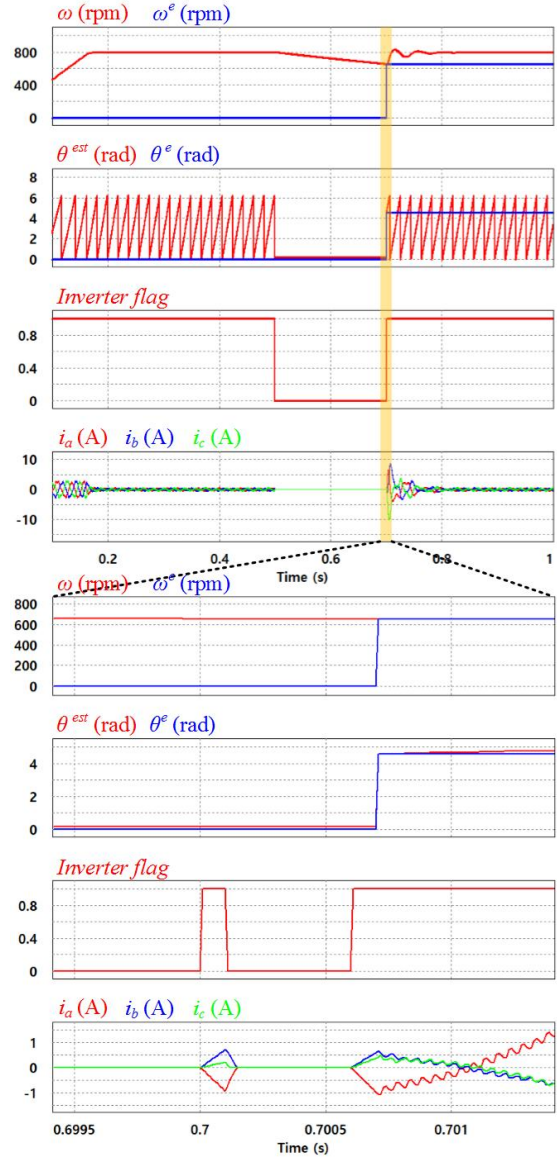


Fig. 7. Simulation results of proposed restarting method for EEMF based sensorless PMSM drive system.

회전자 초기 속도 추정 방법에서 두 번의 영전압 벡터가 인가되는 시간 사이에 회전자의 위치가 180° 이상 회전하는 경우에는 회전자의 정확한 초기 속도를 추정할 수 없으므로 식 (11)의 조건을 만족해야 한다.

$$\omega_{max}(T_{1-2} + T_s) < \pi, \quad T_{1-2} < \frac{\pi}{\omega_{max}} - T_s \quad (11)$$

3.2 회전자 초기 위치각 추정 방법

센서리스 PMSM 구동 시스템에서 인버터의 두 번째 영전압 벡터에 의해 발생한 단락 전류 벡터를 통해 회전자의 초기 위치각은 식 (12)와 같이 계산된다.

$$\theta^e = \theta_2^* - \theta_0 \quad (12)$$

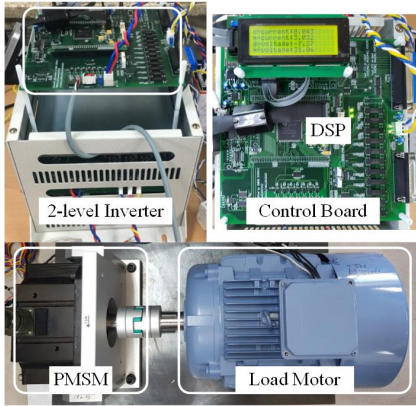


Fig. 8. Experimental set.

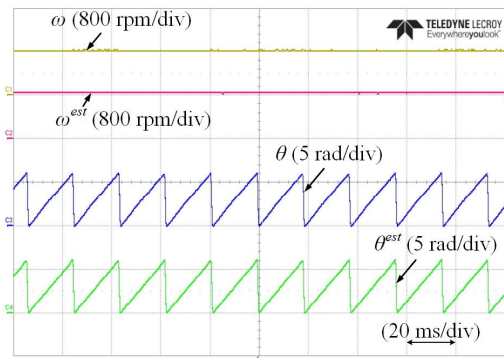


Fig. 9. Experimental results of EEMF based sensorless PMSM drive system.

여기서, θ_2^* 는 식 (9)를 통해 계산되며, $i_2(T_{sc})$ 와 d-축 사이의 위치각인 θ_0 는 식 (8)을 이용하여 식 (13)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\theta_0 \cong \tan^{-1}\left(\frac{I_{qe}}{I_{de}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-\frac{\phi_f}{L_q} \sin \omega^e T_s}{-\frac{\phi_f}{L_d} (1 - \cos \omega^e T_s)}\right) \quad (13)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{L_d \sin \omega^e T_s}{L_q (1 - \cos \omega^e T_s)}\right)$$

결과적으로, 인버터를 통해 영전압 벡터를 인가하여 발생된 단락 전류 벡터를 이용하여 PMSM 회전자들의 초기 속도 및 위치각 정보를 추정할 수 있으며, 이는 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동 재개를 위해 사용된다.

4. 시뮬레이션

PSIM 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안하는 센서리스 PMSM 구동 시스템을 위한 구동 재개 방법의 타당성을 검증하였다. PMSM 구동 시스템은 2-레벨 인버터를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 10 kHz로 선정하였다. PMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

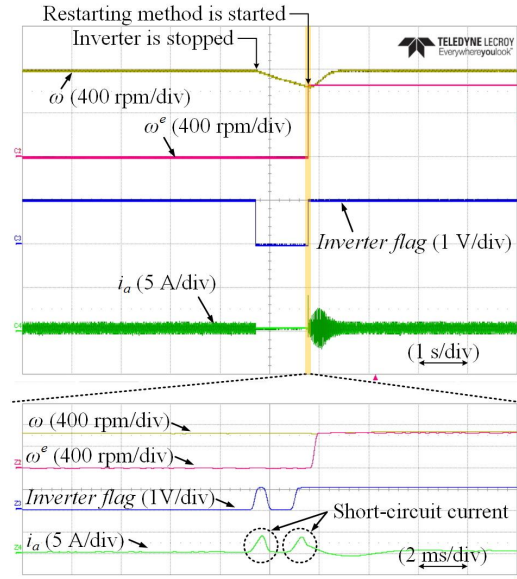


Fig. 10. Experimental results of proposed restarting method for EEMF based sensorless PMSM drive system.

그림 6은 EEMF 기반의 센서리스 제어 방법을 적용한 PMSM 구동 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 인버터의 직류단 전압(V_{DC})은 400 V로 설정하였으며, PMSM의 속도(ω)는 800 rpm으로 제어된다. 0.3 초부터 EEMF 기반의 센서리스 제어 방법이 적용되며, 센서리스 제어 방법을 통해 추정된 PMSM 회전자들의 속도(ω^{est}) 및 위치각(θ^{est})은 엔코더를 통해 얻은 회전자들의 실제 속도(ω) 및 위치각(θ)과 일치한다.

그림 7은 센서리스 PMSM 구동 시스템을 위한 제안하는 구동 재개 방법의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. ω 는 800 rpm으로 제어되며, 0.5 초에 인버터의 동작이 중단되어 인버터의 동작 유무를 나타내는 Inverter flag가 0이 된다. 이 때, PMSM의 3상 출력 전류(i_a, i_b, i_c)는 0이 되어 ω 는 감소하며, ω^{est} 와 θ^{est} 는 추정되지 않는다. 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동 재개를 위해 0.7 초에 제안하는 구동 재개 방법을 사용한다. 인버터는 제어 주기 T_s 동안 영전압 벡터를 인가한다. 영전압 벡터에 의해 발생된 단락 전류가 0이 될 때까지의 충분한 시간인 $5T_s$ 이후에 다시 영전압 벡터를 인가하며, 이때 발생된 단락 전류를 이용하여 PMSM 회전자들의 초기 속도(ω^e)와 위치각(θ^e)을 추정한다. 마지막으로, ω^e 와 θ^e 는 EEMF 기반 센서리스 제어의 전향보상 성분에 적용하여 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동을 재개한다.

5. 실험

본 논문에서 제안하는 구동 재개 방법의 타당성을 검증하기 위해 그림 8에 나타난 실험 세트를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험 세트는 2-레벨 인버터, PMSM,

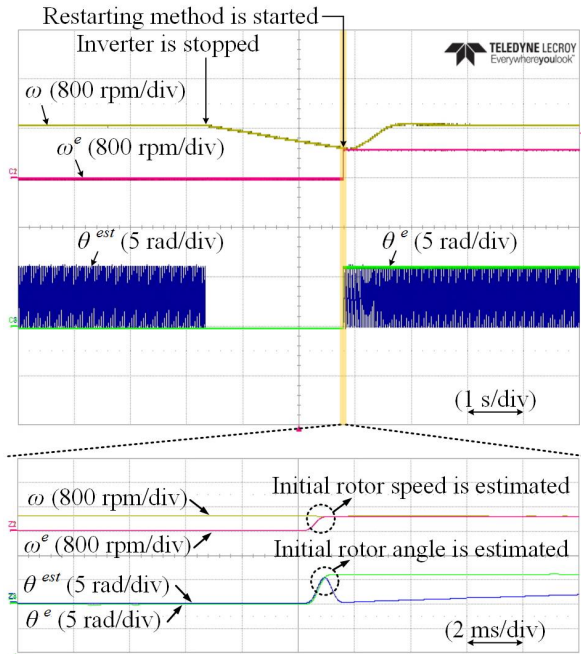


Fig. 11. Experimental results of initial rotor speed and angle estimated by using the proposed restarting method.

부하 모터인 3상 유도 전동기로 구성되며, 2-레벨 인버터는 TMS320F28335 디지털 신호 장치(DSP, Digital signal processor)를 통해 구동된다. PMSM의 파라미터는 표 1과 같으며, 직류단 전압은 400 V로 설정하였다.

그림 9는 EEMF 기반의 센서리스 제어 방법을 적용한 PMSM 구동 시스템의 실험 결과를 나타낸다. ω 는 800 rpm으로 제어하며, 센서리스 제어 방법을 통해 추정된 PMSM 회전자의 속도 ω^{est} 및 위치각 θ^{est} 는 엔코더를 통해 얻은 회전자의 실제 속도 ω 및 위치각 θ 와 일치한다.

그림 10은 센서리스 PMSM 구동 시스템을 위한 제안하는 구동 재개 방법의 실험 결과를 나타낸다. ω 는 EEMF 기반의 센서리스 제어 방법을 통해 800 rpm으로 제어된다. 인버터의 동작이 중단되는 경우에 Inverter flag가 0이 되며, PMSM의 a상 출력 전류(i_a)는 0이 되고, ω 는 감소한다. 약 1 초 후에 제안하는 구동 재개 방법이 시작되며, 두 번의 영전압 벡터를 인가한다. 두 영전압 벡터에 따라 단락 전류가 발생되며, 이를 통해 PMSM 회전자의 초기 속도(ω^e)를 추정한다. 마지막으로, ω^e 를 EEMF 기반 센서리스 제어의 전향보상 성분에 적용하며, PMSM 구동 시스템의 구동을 재개한다.

그림 11은 인버터의 동작이 중단된 경우, 제안하는 구동 재개 방법을 이용하여 추정된 PMSM 회전자의 초기 속도(ω^e) 및 위치각(θ^e)의 실험 결과를 나타낸다. PMSM 구동 시스템의 구동 재개를 위해 EEMF 기반 센서리스 제어의 전향보상 성분에 적용되는 ω^e 는 엔코더를 통해 얻은 PMSM의 실제 속도 ω 와 일치한다. 또

한, θ^e 는 EEMF 기반 센서리스 제어를 통해 얻은 회전자의 위치각 θ^{est} 를 정확히 추종한다.

6. 결 론

본 논문은 센서리스 PMSM 구동 시스템에서 인버터의 동작이 중단된 경우에 구동을 재개하는 방법을 제안하였다. 제안하는 구동 재개 방법은 인버터의 영전압 벡터를 통해 발생된 단락 전류 벡터를 이용하며, PMSM 회전자의 초기 속도 및 위치각 정보를 추정한다. 또한, 제안하는 구동 재개 방법으로 추정된 정보는 EEMF 기반 센서리스 제어 방법의 전향보상 성분에 적용되어 센서리스 PMSM 구동 시스템의 구동 재개를 수행한다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비지원(18RTRP-B146008-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Y. Bak and K. B. Lee, "Constant speed control of a permanent-magnet synchronous motor using a reverse matrix converter under variable generator input conditions," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 315-326, Mar. 2018.
- [2] H. Yang, H. Lin, Z. Q. Zhu, D. Wang, S. Fang, and Y. Huang, "A variable-flux hybrid-PM switched-flux memory machine for EV/HEV applications," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 52, No. 3, pp. 2203-2214, May/June. 2016.
- [3] Y. K. Kang, H. G. Jeong, K. B. Lee, D. C. Lee, and J. M. Kim, "Simple estimation scheme for initial rotor position and inductances for effective MTPA-operation in wind-power systems using an IPMSM," *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No 4, pp. 396-404, Jul. 2010.
- [4] F. Cupertino, G. Pellegrino, P. Giangrande, and L. Salvatore, "Sensorless position control of permanent-magnet motors with pulsating current injection and comparison of motor end effects," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 47, No. 3, pp. 1371-1379, May/June. 2011.
- [5] K. G. Lee, J. S. Lee, and K. B. Lee, "Wide-range sensorless control for SPMSM using an improved full-order flux observer," *Journal of Power Electronics*, Vol. 15, No 3, pp. 721-729, May 2015.
- [6] Y. Zhou and S. Long, "Sensorless direct torque control for electrically excited synchronous motor based on injecting high-frequency ripple current into rotor winding," *IEEE*

- Trans. on Energy Conversion*, Vol. 30, No. 1, pp. 246-253, Mar. 2015.
- [7] H. W. Sim, J. S. Lee, and K. B. Lee, "A simple strategy for sensorless speed control for an IPMSM during startup and over wide speed range," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 9, No. 5, pp. 1582-1591, Sep. 2014.
- [8] Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, "An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 2, pp. 288-298, Apr. 2003.
- [9] D. Y. Han, Y. Cho, and K. B. Lee, "Simple sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor using PLL based in extended EMF," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 711-717, Dec. 2017.
- [10] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Reduced-order extended luenberger observer based sensorless vector control driven by matrix converter with nonlinearity compensation," *IEEE Trans. on Industry Electronics*, Vol. 53, No. 1, pp. 66-75, Feb. 2006.
- [11] S. A. Davari, D. A. Kahburi, F. Wang, and R. M. Kennel, "Using full observer and reduced order observers for robust sensorless predictive torque control of induction motors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, No. 7, pp. 3424-3433, Jul. 2012.
- [12] S. Taniguchi, S. Mochiduki, T. Yamakawa, S. Wakao, K. Kondo, and T. Yoneyama, "Starting procedure of rotational sensorless PMSM in the rotating condition," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 45, No. 1, pp. 194-202, Jan./Feb. 2009.
- [13] K. Lee, S. Ahmed, and S. M. Lukic, "Universal restart strategy for high-inertia scalar-controlled PMSM drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 52, No. 5, pp. 4001-4009, Sep./Oct. 2016.
- [14] S. Morimoto, K. Keisule, 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.



이영재(李永在)

2018년 아주대 전자공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.



박영수(朴迎洙)

2014년 아주대 전자공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.



이교범(李敎範)

1997년 아주대 전자공학과 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학박). 2003년~2006년 Department of Energy Technology, Aalborg University(덴마크). 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학과 교수. 당 학회 편집이사.