

고속 영구자석 동기전동기 구동장치의 홀센서 고장검출 및 보호제어

장명혁¹, 이광운[†]

Hall Sensor Fault Detection and Fault-Tolerant Control of High-Speed PMSM Drive System

Myung-Hyuk Jang¹, and Kwang-Woon Lee[†]

Abstract - This paper presents a novel hall sensor fault detection and fault-tolerant control method for a high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system. A phase locked loop (PLL) type position estimator is used with a conventional interpolation based rotor position estimator to reduce position errors due to misalignment of hall sensors. The expected trigger time of hall sensor's output is used for detecting hall sensor fault condition and the PLL type position estimator is reconfigured for fault-tolerant control at the hall sensor fault condition. The proposed method can minimize current ripples during the transition from sensed control using hall sensors to sensorless control. Experimental results have been proposed to prove the validity of the proposed method.

Keywords: hall sensor fault detection, fault-tolerant control, PMSM

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 단위 체적 당 출력 밀도가 높기 때문에 소형화 및 경량화가 요구되는 터보 컴프레서, 터보 블로워(turbo blower)와 같은 고속 회전 시스템에 널리 적용되고 있다. 고속 회전 영구자석 동기전동기에서는 원심력으로 인해 영구자석이 파손되는 것을 방지할 목적으로 영구자석을 표면부착형으로 하고, 별도의 캔을 사용하여 영구자석을 고정한다. 고속 영구자석 동기전동기 구동 시스템에서 위치 센서의 고장은 제어 신뢰성을 저하시키는 주요 인자이다. 위치 센서 고장에 대응하기 위해 센서리스 제어 방식이 적용되고 있으나^[1], 센서리스 제어로 인해 가속 성능이 저하되고, 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우 센서리스 기동을 위해 강제 정렬 및 동기가속이 필요하여 신속한 기동이 어려운 단점이 있기 때문에 회전자 위치 검출 목적으로 홀센서를 사용하는 추세이다^[2].

본 논문에서는 홀 센서를 이용하는 고속 영구자석 동

기전동기 구동 시스템에서 홀 센서의 고장을 검출하고, 고장이 검출되었을 때 회전자 위치 검출 부를 재구성함으로써 홀 센서 고장으로 인한 신뢰성 저하 문제를 개선할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 일반적으로 위치 센서 고장에 대한 보호 제어에서는 센서리스 위치 추정기를 병행으로 사용하고, 센서로부터 취득한 위치 값과 센서리스 제어기에서 추정된 위치 값을 비교하여 그 차이가 일정 값 이상이면 위치 센서 고장으로 판단하여 센서리스 제어로 전환한다. 이때 센서 고장을 판별하는데 사용되는 기준 값이 너무 작으면 정상 조건에서도 고장으로 잘못 판단할 수 있고, 기준 값이 너무 크면 센서리스 제어로 전환되는 과정에서 전류 맥동이 크게 발생하는 단점이 있다^[3,4]. 본 논문에서 제안하는 방식은 홀 센서로부터 추정된 회전자 위치 값을 입력으로 하는 Phase Locked Loop(PLL) 방식 속도/위치 추정기를 사용하고, 홀 센서 출력의 변화가 예상되는 시점에서 홀 센서 출력이 변화하지 않는 경우 위치 센서 고장으로 판단하여 PLL 방식 속도/위치 추정기의 입력을 센서리스 추정기에서 구한 위치 오차로 전환하는 방식으로 고장 모드 감지가 간단하고, 센서리스 제어로 전환되는 과정에서 전류 맥동이 발생하지 않는 장점이 있다.

2. 홀 센서를 이용한 회전자 위치 및 속도 추정

Paper number: TKPE-2013-18-3-1 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: kwlee89@mmu.ac.kr, Dept. of Electronic Engineering, Mokpo Nat'l Maritime Univ. Tel: +82-61-240-7269 Fax: +82-61-240-7251

¹ Willings Co., Ltd.

Manuscript received Dec. 11, 2012; accepted Jan. 14, 2013

영구자석 동기전동기의 자극 위치 검출에 사용되는 홀 센서는 전기 각 180도 간격으로 출력이 바뀌며, 일반적으로 3개의 홀 센서를 사용하여 전기 각 60도의 위치 검출 분해능을 구현하고 있다. 홀센서 출력 신호들이 변화하는 시점 간의 시간 차(Δt_{hall})를 측정하여 다음과 같이 회전자의 전기 각속도를 추정할 수 있다^[2,3,5].

$$\hat{\omega}_e = \frac{\pi}{3\Delta t_{hall}} \quad (1)$$

회전자의 전기각($\hat{\theta}_e$)은 식 (1)의 전기 각속도를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\theta}_e = \theta_{hall} + \hat{\omega}_e \Delta t \quad (2)$$

식 (2)에서 θ_{hall} 는 홀센서 출력 신호가 변화된 시점에서의 회전자의 전기각으로, 일반적으로 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 중 하나에 해당하는 값을 가지며, 홀센서 출력 신호가 변화할 때마다 새로운 값으로 갱신된다. Δt 는 홀센서 출력신호가 변화된 시점을 기준으로 현 시점까지의 경과시간을 의미하며, 일반적으로 전동기 제어를 위해 사용되는 마이크로프로세서에 내장된 타이머를 이용하여 측정한다. 식 (1), (2)에 의한 위치 및 속도 검출 방식은 홀 센서의 부착 오차 등의 요인으로 인하여 추정 속도 및 위치에 맥동 성분이 포함되어 전동기 제어 성능을 크게 저하시킬 수 있다. 이러한 단점을 보완할 목적으로 전차원 속도 관측기를 이용하는 방식이 제안된 바 있다.^[2] 전차원 속도 관측기를 설계하기 위해서는 기계적 제정수(전동기 관성)에 대한 정확한 정보가 필요하며, 기계적 제정수에 오차가 클 경우 속도 관측 성능이 크게 저하될 수 있다. PLL 방식의 속도 관측기를 사용하는 경우 전동기 속도가 변화하는 과도 구간에서 실제 값과 추정 값 사이에 위상 지연이 발생하는 단점이 있으나, 기계적 제정수 없이도 표준 2차 시스템에서 감쇠비(damping ratio)와 비감쇠 고유주파수(undamped natural frequency)에 따른 응답 특성을 이용하여 쉽게 속도 관측기를 설계할 수 있다^[6,7]. 본 논문에서는 그림 1과 같은 회전자 속도 및 위치 검출 방식을 사용하였다.

그림 1에서 PLL 속도/위치 추정기의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\hat{\theta}_{PLL}}{\hat{\theta}_e} = \frac{k_{ep}s + k_{ei}}{s^2 + k_{ep}s + k_{ei}} \quad (3)$$

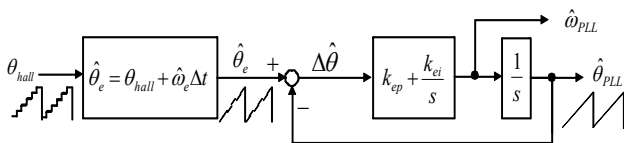


Fig. 1 Speed/position estimator using PLL type observer

비례 이득(k_{ep})과 적분 이득(k_{ei})은 일반적으로 다음과 같이 감쇠비(ζ)와 비감쇠 고유주파수(ω_n)를 이용하여 설정한다^[7].

$$k_{ep} = 2\zeta\omega_n, k_{ei} = \omega_n^2 \quad (4)$$

그림 2와 그림 3은 3개의 홀 센서 출력들(Ha, Hb, Hc) 중에서 Ha에는 0도, Hb에는 -10도, Hc에는 +10도의 전기각 오차가 있다고 가정한 상태에서 PSIM을 이용하여 2극 영구자석 동기전동기를 대상으로 20,000 [rpm]의 속도 제어를 모의 실험한 결과이다. 모의 실험에서 스위칭 주파수는 10kHz로 설정하였다. 그림 2의 경우 회전자 속도 및 위치 추정에 식 (1)과 (2)를 이용하였다. 그림 3에서는 그림 1과 같이 PLL 방식의 속도 및 위치 추정 방식을 사용하였고, PLL 방식 추정기의 비례 이득 및 적분 이득 설정에 사용되는 감쇠비(ζ)는 1, 비감쇠 고유주파수(ω_n)는 180 [rad/sec]으로 설정하였다. 그림 2와 그림 3을 비교해 보면, 그림 3의 경우 PLL 방식의 속도 및 위치 추정 방식에 의해 홀 센서 위치 오차의 영향이 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 PLL 방식 속도/위치 추정기가 저역통과필터 특성을 갖기 때문이다^[7].

3. 홀 센서 고장 검출 및 보호 제어

홀 센서 고장의 검출 및 보호 제어를 위해 구성한 속도 및 위치 추정기는 그림 4와 같다. 그림 4에서 전동기 제어에 사용되는 회전자 속도 및 위치 정보는 PLL 방식

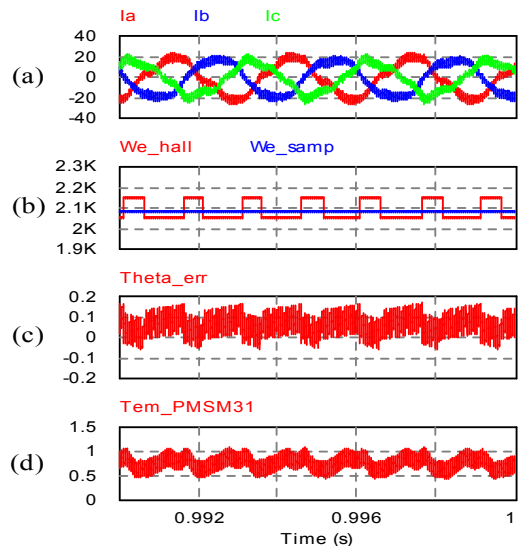


Fig. 2 Simulation result with hall sensor position errors at 20,000 rpm, (a) Phase currents(Ia, Ib, Ic) [A]. (b) Actual(We_{samp}) and estimated (We_{hall}) electrical rotor speed [rad/sec]. (c) rotor position error [rad]. (d) Torque(Tem_{PMSM31}) [Nm]

의 속도/위치 추정기를 이용하여 추정한다. PLL 방식 속도/위치 추정기의 입력은 회전자 위치 추정 오차이다. 홀 센서가 정상 동작 상태로 판정된 경우 홀 센서 출력으로부터 추정된 회전자 위치($\hat{\theta}_e$)와 PLL 방식 속도/위치 추정기의 출력($\hat{\theta}_{PLL}$) 사이의 오차 값이 PLL 방식 속도/위치 추정기에 입력된다. 즉, 홀 센서가 정상 동작으로 판정된 경우 그림 4의 홀 센서 고장 검출기가 낮은 레벨의 스위치 제어 신호(Usw)를 출력하여 스위치가 a점에 연결되게 한다. 또한, 홀 센서가 고장으로 판정되는 경우에는 홀 센서 고장 검출기가 높은 레벨의 스위치 제어 신호(Usw)를 출력하여 스위치가 b점에 연결되도록 한다.

그림 4에서 회전자 위치($\hat{\theta}_e$)를 구하는 데 사용되는 추정 속도($\hat{\omega}_e$)와 홀 센서 트리거(trigger) 이후의 경과 시간(Δt)의 곱인 $\hat{\omega}_e \Delta t$ 의 값은 전기각 60도를 초과하지 않도록 제한하였으며, 추정 속도($\hat{\omega}_e$)는 전기 각 180도 간격으로 출력이 변화하는 하나의 홀 센서를 기준으로 출력의 변화 시점 간격(Δt_{h180})을 측정하여 다음과 같이 구하였다.

$$\hat{\omega}_e = \frac{\pi}{\Delta t_{h180}} \quad (6)$$

식 (1)과 같이 전기 각 60도에 해당하는 연속된 홀 센서 트리거 신호들의 간격으로부터 추정 속도($\hat{\omega}_e$)를 구하는 경우 3개의 홀 센서들 중에서 1개의 홀 센서만 고장이어도 6회의 트리거 신호가 발생하는 전기 각 360도 구간에서 2회만 정상적으로 속도를 구할 수 있다.

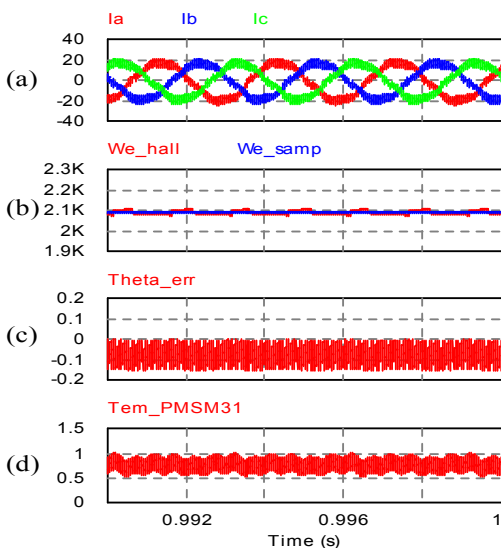


Fig. 3 Simulation result with hall sensor position errors at 20,000 rpm, (a) Phase currents(Ia, Ib, Ic) [A]. (b) Actual(We_samp) and estimated (We_hall) electrical rotor speed [rad/sec]. (c) rotor position error [rad]. (d) Torque(Tem_PMSM31) [Nm]

즉, 식 (1)의 방식에서는 고장 홀 센서가 다른 정상 홀 센서에 영향을 미친다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 식 (5)와 같이 전기 각 180도에 해당하는 홀 센서 각각의 트리거 신호 간격으로부터 속도를 구하였다. 이러한 경우 고장 센서가 다른 정상 센서에 영향을 주지 않는다. 고장 홀 센서로부터는 속도를 구할 수 없으며, 이는 곧 홀 센서 고장으로 판정되어 그림 4에 나타난 바와 같이 역기전력 추정 기반 위치 오차 추정기 및 PLL 방식 속도/위치 추정기에 의해 속도가 구해지도록 하였다.

그림 4의 홀 센서 고장 검출기 구성은 그림 5와 같다. 그림 5의 홀 센서 고장 검출기에서는 홀 센서 출력(θ_{hall})의 트리거 이후에 $\hat{\omega}_e \Delta t$ 의 값이 전기 각 60도를 초과하면 홀 센서 고장으로 판단하여 제어 신호(Usw)에 1을 출력하고, 홀 센서 출력(θ_{hall})에서 새로운 트리거 신호가 감지되면 제어 신호(Usw)에 0을 출력한다. 일반적으로 홀 센서의 정렬 오차, 속도의 맥동 등으로 인하여 $\hat{\omega}_e \Delta t$ 의 값이 정확하게 전기 각 60도를 나타내지 못한다. 이로 인해, 홀 센서 고장 검출의 기준을 전기 각 60도로 설정하면 실제로는 홀 센서 고장이 아닌 경우에도 홀 센서 출력(θ_{hall})에서 새로운 트리거 신호가 감지되기 이전까지 일시적으로 홀 센서 고장으로 판단할 수 있다. 이러한 경우 일시적으로 역기전력 기반 위치 오차 추정기의 값이 PLL 방식 속도/위치 추정기에 입력된다. 홀 센서 고장 판단의 기준으로 전기 각 60도에 보정 값을 더하는 것을 고려할 수 있으나, 홀 센서의 정렬 오차가 전동기마다 서로 다를 수 있고, 홀 센서 신호의 트리거 간격으로부터 측정된 속도 값이 순시 속도를 정확하게 나타내지 못하기 때문에 보정 값을 구하는 데 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기 각 60도를 고장 판단의 기준으로 사용하였다.

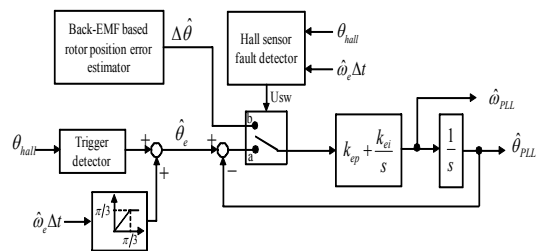


Fig. 4 Speed/position estimator for hall sensor fault detection and fault-tolerant control

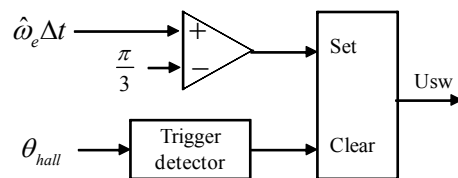


Fig. 5 Hall sensor fault detector

홀 센서 부착 오차 및 고장에 따른 그림 5의 홀 센서 고장 검출기의 동작 특성을 설명하기 위해 그림 6과 같이 전동기 운전 중에 홀 센서 Hb에 고장이 발생하여 출력이 낮은 레벨로 고정되고, 홀 센서 Hc에는 정렬 오차로 인한 위치 오차가 있다고 가정하였다. 그림 6에서 Ha의 트리거 이후에 전기각으로 60도에 해당하는 시간이 경과했을 때 Hc의 정렬 오차로 인해 Hc의 트리거 신호가 발생하지 않으므로 홀 센서 고장 검출기는 높은 레벨의 제어 신호(Usw)를 출력한다. 그리고, 일정 시간 후에 Hc에서 새로운 트리거 신호가 발생하면 홀 센서 고장 검출기는 낮은 레벨의 제어 신호(Usw)를 출력한다. 또한, Hb의 트리거 신호 발생 예상 시점에서 Hb의 고장으로 인해 트리거 신호가 발생하지 않으므로 홀 센서 고장 검출기는 높은 레벨의 제어 신호(Usw)를 출력하고, Ha에서 새로운 트리거 신호가 출력될 때 낮은 레벨의 제어 신호(Usw)를 출력한다. 그림 6에서 회전자 위치($\hat{\theta}_e$)는 홀 센서 부착 오차 및 고장으로 인해 홀 센서 고장으로 판정된 경우 과거 값을 유지하게 된다.

그림 4에서 역기전력 추정에 기반한 회전자 위치 오차 추정기는 홀 센서의 고장 유무에 관계없이 전동기 운전 중에 병렬로 동작하고, 추정된 역기전력으로부터 회전자 위치 오차의 추정 값($\Delta\hat{\theta}$)을 계산하여 출력하는 역할을 담당한다. 회전자 위치 오차 추정기의 구성은 그림 7과 같다. 상 전압 지령($v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*$)과 상 전류(i_a, i_b, i_c), 그리고 회전자 추정 위치($\hat{\theta}$)로부터 가상의 동기 좌표계인 $\gamma-\delta$ 축에서의 전압 지령(v_γ^*, v_δ^*)과 전류(i_γ, i_δ)를 구하고, 확장 역기전력(Extended-EMF)에 기반한 영구자석 동기전동기 수학적 모델과 외란 관측기를 이용하여 추정된 $\gamma-\delta$ 축에서의 역기전력($\hat{e}_\gamma, \hat{e}_\delta$)으로부터 회전자 위치 오차의 추정 값을 직접 구하였다.^[7]

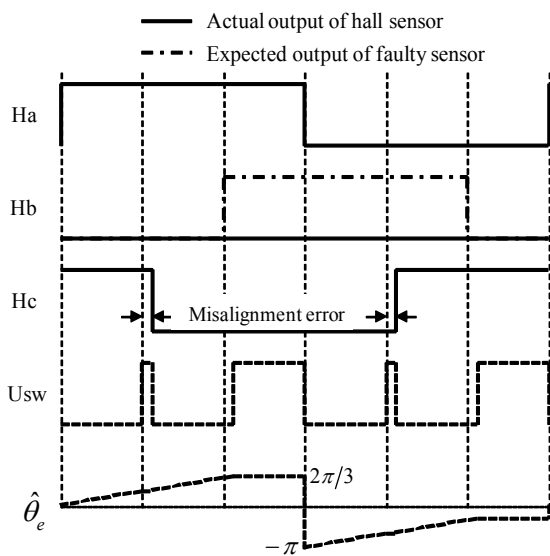


Fig. 6 Operation example of hall sensor fault detector

기존의 위치 센서 고장에 대한 보호 제어에서는 센서리스 위치 추정기에 의해 추정된 위치 정보와 위치 센서로 검출한 위치 정보 사이의 오차를 구하고, 그 오차가 일정 기준 값을 초과하면 위치 센서 고장으로 판단하여 센서리스 제어 방식으로 전환하게 된다.^[3,4] 이러한 방식은 오차의 기준 값이 크게 설정된 경우 위치 센서 고장에 대한 보호 제어(센서리스 제어)로 전환되는 과정에서 전류 맥동이 크게 발생할 수 있고, 반대로 오차의 기준 값이 작게 설정되면 정상적으로 동작하는 센서들에 대해서도 고장으로 잘못 판단하여 센서리스 방식으로 전환하는 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방식은 홀 센서의 일부가 고장으로 판정된 경우에 정상적으로 동작하는 홀 센서의 출력 신호를 유효하게 이용할 수 있으며, 홀 센서의 트리거 신호 발생 시점을 예측하고, 예측된 시점에서 트리거 신호가 발생하지 않는 경우 고장으로 판정하므로 별도의 기준 값이 필요하지 않고, 센서리스 제어로 전환되는 과정에서 발생할 수 있는 전류 맥동을 억제할 수 있는 장점이 있다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 홀 센서 고장 검출 및 보호 제어 방식의 효과를 평가할 목적으로 그림 8과 같은 실험 시스템을 구성하였다. 그림 8에서 블로워는 영구자석 표면 부착형 구조의 영구자석 동기전동기에 의해 구동되며, 전동기 사양은 표 1과 같다. 전동기 제어를 위해 TI社의 DSP TMS320F28335를 사용하였고, 인버터의 PWM 주파수는 10kHz로 설정하였다. 전류 센서를 이용하여 상 전류를 직접 검출하였고, 동기 좌표계에서 비례-적분 구조의 전류 제어기를 사용하였으며, 디지털 제어기로 구동되는 인버터에서 발생하는 시간 지연을 보상하는 방식을 사용하였다.^[8] 전류 제어기의 실행 주기 및 대역폭은 각각 100 us, 628 rad/sec로 설정하였다. 영구자석 동기전동기의 회전자 위치 검출 목적으로 그림 8에서와 같이 홀 센서 케이블을 DSP 보드에 연결하였고, 특정 홀 센서의 입력을 무시할 수 있도록 전동기 제어 소프트웨어를 구현하여 홀 센서 고장 모드에 대한 실험을 진행하였다. 그림 4와 그림 7의 PLL 방식 추정기에 사용되는 비례 및 적분 이득은 감쇠비(ζ)를 1, 비감쇠 고유주파수(ω_n)를 120 [rad/sec]으로 설정하여 구하였다.

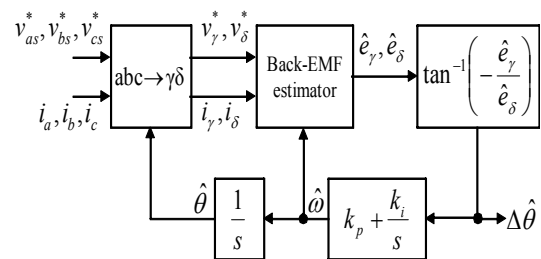


Fig. 7 Rotor position error estimator

Table 1 Motor parameters

Stator resistance	0.037 [Ω]
Stator inductance	0.18 [mH]
Back-EMF constant	0.029 [Wb]
Number of poles	2

그림 9에서 그림 11은 20,000 rpm으로 블로워를 운전하고 있는 상태에서, 각각 하나의 홀 센서(Ha), 두 개의 홀 센서(Ha, Hb), 그리고 3개의 홀 센서 모두에 갑작스런 고장이 발생한 경우를 가정하여 실험을 진행한 결과이다. 각각의 실험 과정에서 (a)는 홀 센서로부터 측정된 회전자 위치, (b)는 그림 4에 나타낸 PLL 방식 추정기에 의해 추정된 회전자 위치, (c)는 홀 센서 고장 검출기의 출력, (d)는 상전류이다.

그림 9, 그림 10, 그림 11의 실험 과정에서 홀 센서 고장 검출기의 출력(Usw)을 보면, 홀 센서 부착 과정에서 발생한 위치 오차의 영향으로 인하여 홀 센서 고장 시점 이전에도 홀 센서 고장으로 판단하여 간헐적으로 높은 레벨의 신호가 출력되는 것을 알 수 있으며, 이로

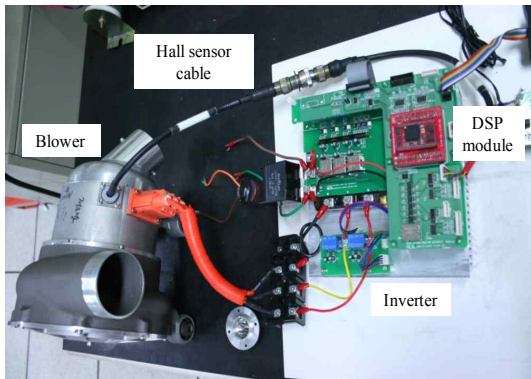


Fig. 8 Experimental setup

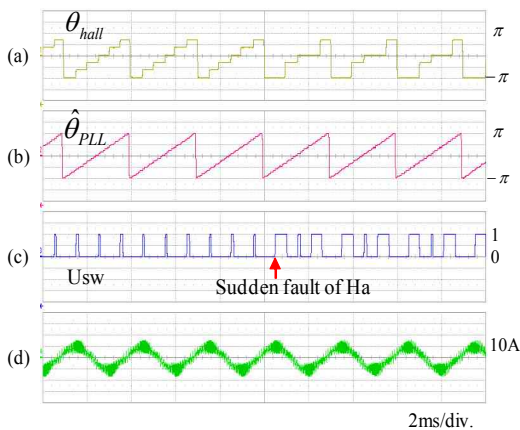


Fig. 9 Experimental results for sudden fault of hall sensor Ha, (a) Rotor position sensed from hall sensor. (b) Estimated rotor position. (c) Switch control signal (Usw). (d) Phase current (10A/div)

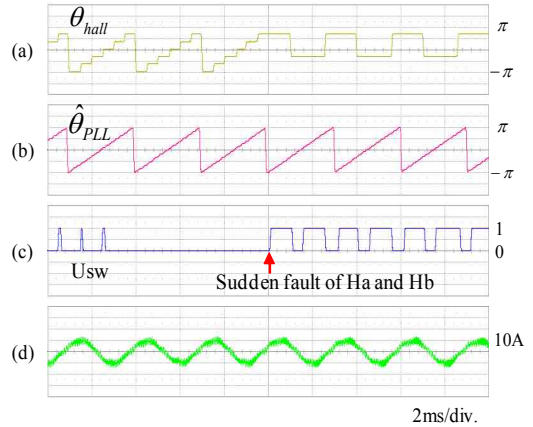


Fig. 10 Experimental results for sudden fault of hall sensor Ha and Hb, (a) Rotor position sensed from hall sensor. (b) Estimated rotor position. (c) Switch control signal (Usw). (d) Phase current (10A/div)

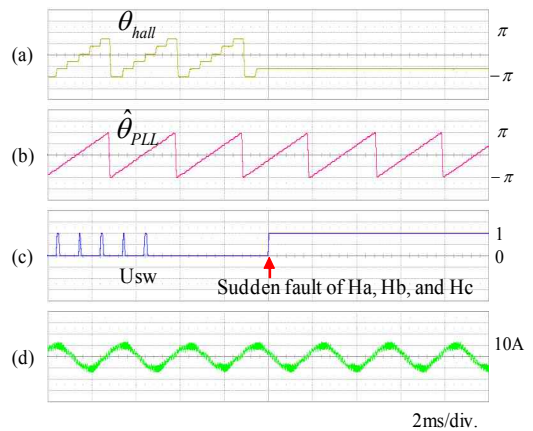


Fig. 11 Experimental results for sudden fault of hall sensor Ha, Hb and Hc, (a) Rotor position sensed from hall sensor. (b) Estimated rotor position. (c) Switch control signal (Usw). (d) Phase current (10A/div)

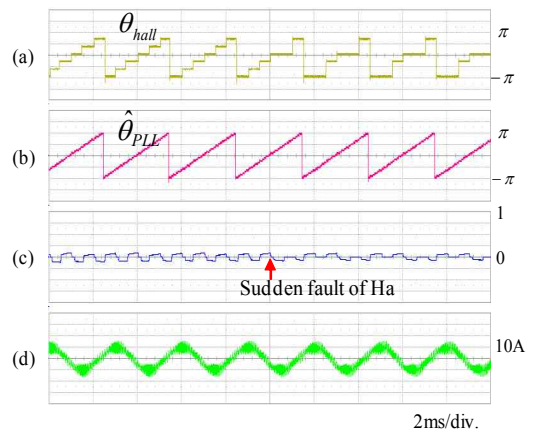


Fig. 12 Experimental results for sudden fault of hall sensor Ha, (a) Rotor position sensed from hall sensor. (b) Estimated rotor position. (c) Estimated rotor position error. (d) Phase current (10A/div)

인해 전동기 제어 성능이 저하되지 않음을 전류 파형으로부터 유추할 수 있다. 또한, 홀 센서의 갑작스런 고장이 발생했을 때에 제안한 홀 센서 고장 검출 및 보호 제어가 만족스럽게 동작함을 실험 파형으로부터 확인할 수 있다. 그림 12는 그림 9와 동일한 조건에서 위치 추정 오차를 보여주는 실험 결과이다.

5. 결 론

본 논문에서는 홀 센서를 이용하여 회전자 속도 및 위치를 검출하는 고속 영구자석 동기전동기 구동시스템을 대상으로 새로운 홀 센서 고장 검출 및 보호 제어 방법을 제안하였고, 실험을 통해 제안한 방식의 효과를 입증하였다. 본 논문에서 제안한 방식은 홀 센서 일부가 고장인 경우 정상 동작하는 홀 센서들의 출력 신호를 유효하게 이용할 수 있는 장점이 있다. 다만, 속도 맥동이 클 경우 고장 보호 제어로 전환되는 과정에서 토크 맥동이 발생할 가능성이 있으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다. 향후, 연료전지 차량에서 공기 공급에 사용되는 터보 블로워와 같이 운전 중 홀 센서 고장에 대해서 안정적인 보호 제어가 필요한 시스템에 본 연구 결과가 적용될 경우 구동 시스템의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

References

- [1] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Ji-Seob Byeon, "Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor," *IEEE Tans. Ind. Applicat.*, Vol. 39, pp. 811-818, May/Jun. 2003.
- [2] Myoung-Ho Kim, Jung-Sik Yim, Seung-Ki Sul and Sung-Il Lim, "Implementation of Super High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine Drive," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, pp. 329-335, Oct. 2008.
- [3] Kwang-woon Lee, "Position Sensor Fault Tolerant Control of Permanent Magnet Synchronous Generator," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 4, pp. 351-357, Aug. 2011.
- [4] K. Rothenhagen, and F. W. Fuchs, "Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 10, pp. 4229-4283, 2009.
- [5] S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "High-Performance Current-Sensorless Drive for PMSM and SynRM With Only Low-Resolution Position Sensor," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 39, No. 3, pp. 792-801, May/June, 2003.
- [6] M.C. Harke, G.D. Donato, F.G. Capponi, T.R. Tesch, and R.D. Lorenz, "Implementation Issues and Performance

Evaluation of Sinusoidal, Surface-Mounted PM Machine Drives With Hall-Effect Position Sensors and a Vector-Tracking Observer," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 44, No. 1, pp. 161-173, Jan./Feb., 2003.

- [7] S. Morimoto, K. Kawamotor, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, Jul./Aug., 2002.
- [8] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, "A Compensation Method for Time Delay of Full-Digital Synchronous Frame Current Regulator of PWM AC Drives," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 39, No. 3, pp. 802-810, May/June, 2003.

장명혁(張明赫)

1984년 8월 6일생. 2010년 목포해양대 해양 전자통신공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2012년~현재 월링스 연구소 연구원.



이광운(李光雲)

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 공대 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 편집위원.

