

A Study on Compensation of Rotor Position Estimation Error in Hall-Sensor-Based PMSM Vector Control under Load Fluctuations

Dong-Jae Lee and Won-ho Kim*

Department of Convergence for Next-Generation Smart Energy System, Gachon University, Seongnam 13120, South Korea

Su-Yeon Cho and Yang-Jin Shin

Korea Automotive Technology Institute, Cheonan 31214, South Korea

(Received 17 September 2025, Received in final form 13 October 2025, Accepted 14 October 2025)

This paper proposes a phase error compensation control technique to ensure control stability when a load fluctuations cause a phase error between the actual coordinate system (d-q axes) and the estimated coordinate system (γ - δ axes) during vector control of PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) based on a hall-sensor. Under fluctuation load conditions, the torque stability is compromised due to the rapid changes in axis currents caused by the inter-axis phase error. The phase error compensation control technique proposed in this paper addresses issues caused by the phase error and ensures control stability through phase compensation. To validate the effectiveness of the proposed control technique, simulations were conducted, and the simulation waveforms before and after applying the phase error compensation control technique were compared and analyzed.

Keywords : PMSM, hall sensor, control stability, load fluctuations

홀센서 기반 PMSM 벡터 제어 시 부하 급변 상황의 회전자 위치 추정 오차 보상에 관한 연구

이동재 · 김원호*

가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과, 성남시 성남대로 1342, 13120

조수연 · 신양진

한국자동차연구원, 천안시 풍세로 303, 31214

(2025년 9월 17일 받음, 2025년 10월 13일 최종수정본 받음, 2025년 10월 14일 게재확정)

본 논문에서는 홀센서 기반 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor, 영구자석 동기전동기) 벡터 제어 시, 부하 변동으로 인해 실제 좌표계(d-q 축)와 추정 좌표계(γ - δ 축) 사이에 발생하는 위상 오차를 보상함으로써 제어 안정성을 확보하는 위상 오차 보상 제어 기법을 제안한다. 부하가 급격히 변동하는 조건에서는 축 간 위상 오차로 인해 전류가 빠르게 변하면서 토크 안정성이 저하될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 위상 오차 보상 제어 기법은 이러한 문제를 해결하고, 위상 보상을 통해 제어 안정성을 확보하도록 설계되었다. 제안된 제어 기법의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 위상 오차 보상 제어 기법 적용 전후의 시뮬레이션 파형을 비교·분석하였다. 그 결과, 제안된 기법이 부하 변동 상황에서도 안정적인 토크 제어를 가능하게 함을 확인하였다.

주제어 : PMSM, 홀센서, 제어 안정성, 급변 부하

I. 서 론

반도체 제조 공정은 고도의 정밀성과 높은 생산성을 요구하며, 이를 위해 사용되는 장비의 성능은 공정의 품질과 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 반도체 진공펌프는 제조 과정에서 핵심적인 역할을 수행하며, 이러한 진공 상태를 유지하기 위해 구동 모터의 위치와 속도를 정밀하게 제어하는 기술이 요구된다. 기존의 위치 센서로 널리 사용되는 엔코더와 레졸버는 높은 분해능과 안정성을 제공하지만, 비용이 높고 환경적 제약이 많은 단점이 있다[1,2].

엔코더는 디지털 펄스 기반의 센서로, 부하 변화가 급격한 시스템에서는 신호의 시간적 정확성이 감소할 가능성이 있다. 또한, 기계적 충격이나 진동에 민감하여 진공펌프와 같은 극한 환경에서 신뢰도가 저하될 수 있다. 높은 비용과 부피도 시스템 설계에 부담으로 작용한다. 한편, 레졸버는 아날로그 신호를 기반으로 작동하며, 비교적 열악한 환경에서도 안정적인 작동이 가능하지만, 노이즈에 취약하며 별도의 전용 회로 설계가 필요하여 시스템 설계 및 비용 측면에서 제약을 가진다[3,4]. 이러한 특성은 진공펌프와 같이 극심한 부하 변동이 발생하는 시스템에서 안정적인 운용을 어렵게 만드는 요인이다.

저비용 대안으로 주목받는 홀센서는 구조가 단순하고 설치와 유지보수가 용이하며, 상대적으로 저렴한 비용으로 시스템에 통합될 수 있는 장점을 가지고 있다[5]. 그러나 낮은 분해능으로 인해 급격한 부하 변동이나 고속 회전 조건에서 위치 추정 성능이 크게 저하될 수 있으며, 이는 제어 시스템의 안정성에도 부정적인 영향을 미친다. 특히, 반도체 진공펌프 시스템과 같이 극심한 부하 변동인 Vent 부하가 발생한다면, 내기와 외기의 압력 차이로 인해 순간적으로 모터를 정지시킬 정도의 급격한 부하가 발생하고, 이에 따라 홀센서 신호의 불규칙성이 두드러지게 된다. 이러한 경우, 기존의 보정 기법으로는 극단적인 상황을 효과적으로 처리하기 어렵다.

이를 해결하기 위해, 기존 연구에서는 속도나 위치 관측기를 활용한 추정 방법이나 디지털 필터를 적용하여 신호의 왜곡을 줄이는 다양한 기법들이 제안되었다. 하지만, 이러한 기법들은 주로 일반적인 부하 변동 조건에 초점이 맞추어져 있어, 극단적인 부하 급변 상황에서는 적용이 어렵다.

본 연구는 급변 부하 상황에서 홀센서를 활용할 경우 발생하는 위상 오차를 보정할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 기법은 급격한 부하 변동으로 인해 왜곡된 홀센서 신호 타이밍을 실시간으로 보정함으로써 실제 위치각을 최대한 추정할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 기존에 사용하던 고비용 센서를 대체하면서도 급격한 부하 상황에서 안정적인 위치 추정 성능을 확보할 수 있다.

또한, 본 논문에서는 제안된 기법의 유효성을 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 이를 통해 반도체 진공펌프와 같은 고속 회전 및 급격한 부하 변동 조건에서도 제안된 기법의 적용 가능성을 확인하였다.

II. 홀센서를 통한 회전자 위치 추정

홀센서는 <Fig. 1>과 같이 전동기 내부에 전기각 기준으로 120° 간격의 세 개의 홀센서(Hall A, Hall B, Hall C)가 배치되어 회전자의 자기장 변화를 감지한 후 이를 전기적 신호로 변환한다. 홀센서의 출력 신호 상태에 따라 전기각 한 주기를 총 6개 구역으로 나눌 수 있고, 60° 간격으로 회전자의 위치를 파악할 수 있다. 그러나 홀센서의 출력 신호가 교번하는 시점을 제외하고는 6개로 나뉜 구역 사이의 회전자 위치 정보는 정확히 알 수 없다. 그래서 회전자 위치를 추정하기 위해 먼저 60° 간격으로 나뉜 각 구역 간의 시간 차이를 측정한다. 이후, 홀센서로 얻은 회전자 위치 정보와 홀센서 신호 사이의 시간 간격을 바탕으로 모터의 회전 속도를 계산하고 회전 속도를 적분하여 회전자의 위치각을 구한다[6,7].

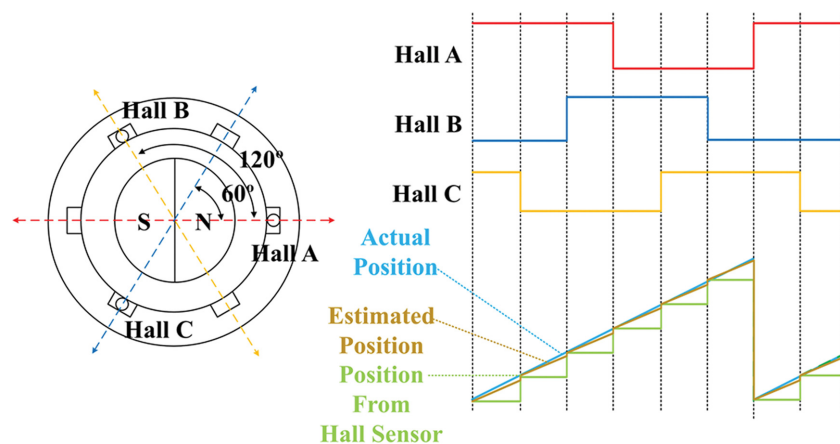


Fig. 1. (Color online) Hall sensor-based rotor position estimation algorithm.

그리고 다음 홀센서 신호가 교번할 때까지 이전 구역에서 측정된 회전자 위치각을 바탕으로, 홀센서 신호 사이의 회전자 위치를 추정할 수 있다.

III. 홀센서를 활용한 추정 위치 계산 방법

<Fig. 2>는 정속 조건에서 회전자 위치 추정을 설명한 그림이다. <Fig. 2>에서 Hall A, Hall B, Hall C는 전기각 기준으로 각각 120° 간격으로 배치되어 있으며, 회전자가 60° 이동할 때마다 홀센서 신호가 교번하여 회전자 위치를 감지한다[8]. 파란색 실선은 홀센서로 측정된 회전자 위치를 나타내며, 일정한 간격으로 변화하는 것을 볼 때 회전자는 일정한 속도로 회전하고 있음을 알 수 있다.

그러나 홀센서 신호는 60° 간격으로만 업데이트되므로, 다음 홀센서 신호가 발생하기 전까지 정확한 회전자 위치를 측정할 수 없다. 이를 보완하기 위해 회전자의 각속도와 신호 간 시간 간격을 이용해 위치를 추정한다[9].

붉은색 점선은 이러한 위치 추정 과정을 시각적으로 보여준다. 홀센서 신호가 교번하는 시점에서 회전자의 새로운 위치각이 계산되며, 이후 구간에서는 각속도와 시간을 적분하여 회전자의 위치를 추정한다. 즉, 홀센서 신호가 변화하지 않는 구간에서는 이전 신호에서 계산된 각속도와 시간을 이용해 위치를 보간하여 추정 값을 계산한다[10]. 정속 조건에서는 모터의 속도가 일정하기 때문에 이러한 방식으로 위치를 추정하는 것이 매우 효과적이며, 회전자의 위치를 안정적으로 추정할 수 있다.

회전자의 절대 위치각은 각 홀센서 신호의 변화에 따라 계

산할 수 있다. 회전자의 전기적 위치각 θ_{Hall} 은 다음 수식으로 표현되며, 이후 수식은 계산의 편의성을 위해 라디안 단위를 기준으로 정의한다.

$$\theta_{Hall} = \frac{\pi}{3} \cdot n [rad] \quad (1)$$

여기서 θ_{Hall} 은 회전자의 물리적 위치를 전기 각도로 변환한 값이며, n 은 각 홀센서 신호가 교번할 때마다 변화하는 정수 값이다. n 은 60° 간격으로 회전자가 이동할 때마다 증가하며, 홀센서 신호의 교번에 따라 일정한 간격으로 갱신된다. 따라서 θ_{Hall} 은 홀센서가 감지하는 신호에 따라 $\pi/3$ 간격으로 갱신되며, 이를 통해 각 홀센서 신호가 변화할 때마다 회전자의 절대 위치를 전기각으로 나타낼 수 있다.

식(1)에서 출력된 홀센서 신호로 계산된 회전자의 위치는 주기적인 교번 신호에 기반한 값이다. 하지만 홀센서는 단위로만 신호를 출력하기 때문에, 신호가 교번하지 않는 구간에서 회전자의 정확한 위치를 측정하는 것은 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 모터의 각속도 w 를 활용한다.

모터의 각속도 w 는 다음 식(2)로 정의된다.

$$w = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{\Delta T} [rad/s] \quad (2)$$

여기서 ΔT 는 홀센서 신호가 교번하는 시점 사이의 시간 간격을 나타낸다. 이 시간 간격을 통해 모터의 각속도를 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 홀센서 신호가 발생하지 않는 구간에서도 회전자의 위치를 추정할 수 있다. 모터의 각속도 w 가 일정하다고 가정하면, 이전 홀센서 신호가 발생한 후 경

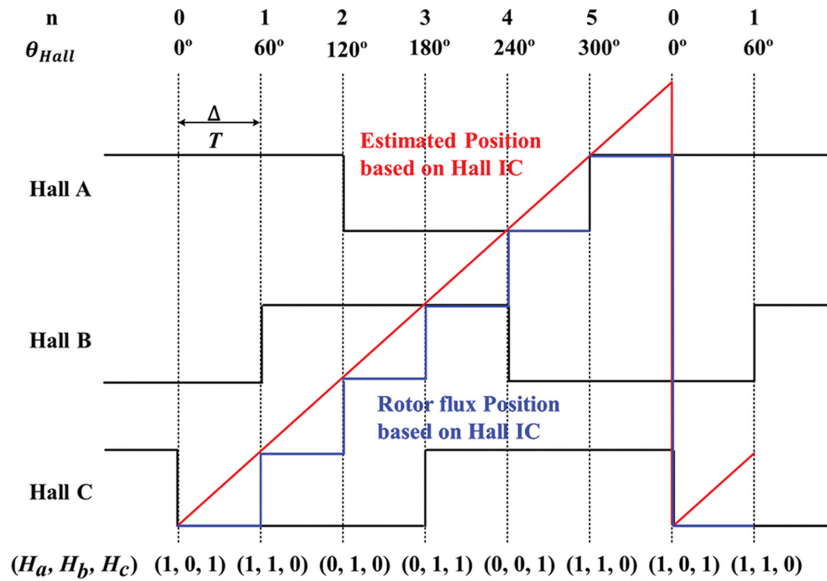


Fig. 2. (Color online) Rotor position estimation based on hall sensor signals.

과된 시간 t 동안의 위치각 변화를 고려하여 회전자의 추정 위치각 θ_{est} 를 계산할 수 있다. 이때, 추정 위치각 θ_{est} 는 식 (1)에서 얻은 값인 θ_{Hall} 을 사용하여 식(3)으로 계산한다[11].

$$\theta_{est} = \omega t + \theta_{Hall}[\text{rad}] \quad (3)$$

식(3)을 통해, 홀센서 신호가 교번하지 않는 구간에서도 회전자의 추정 위치를 계속 계산할 수 있다.

IV. 급변 부하 상황에서의 위상 오차

<Fig. 3>은 급변 부하 상황에서 홀센서 신호로 추정된 회전자 위치와 실제 회전자 위치 간의 위상 오차를 나타낸다. γ - δ 축은 추정 위상에 동기된 좌표계를 나타내며, d-q 축은 모터 회전자의 실제 전기각 위치에 동기된 좌표계이다[12]. 급변 부하 상황에서는 회전자의 각속도가 급격히 변하면서 추정 좌표계(γ - δ 축)와 실제 좌표계(d-q 축) 간에 위상 오차가 발생한다. 이는 모터의 추정 각속도가 홀센서 신호가 입력되는 시점에서만 계산되기 때문이다. <Fig. 3>과 같이 부하가 발생하면, 홀센서 신호 교번 구간 내에서 추정 각속도와 실제 각속도 간 차이가 발생하여 동기 좌표계 사이에 위상차 θ_{error} 가 발생한다.

전류 벡터 I_a' 는 부하 인가되기 전에 제어하고 있던 지령 전류를 나타낸다. 급변 부하가 인가되기 전 정속 조건에서는 추정 좌표계와 실제 좌표계 간의 위상차가 거의 없다. 그러나, 부하 변동으로 좌표계 간의 위상 오차가 발생하면 기존에 제어하고 있던 전류 벡터 I_a' 은 추정 좌표계 상에서 전류 위상각이 θ_{error} 만큼 벌어진 I_a 로 바뀌게 된다. 이때, 홀센서 신호를 기반으로 벡터 제어를 수행하는 인버터는 이러한 위

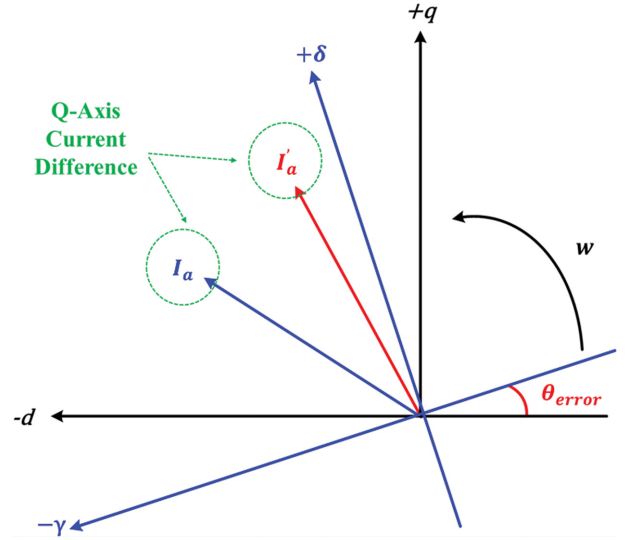


Fig. 3. (Color online) Phase error between actual coordinate system and estimated coordinate system.

상 오차를 감지하지 못하므로, 실제 회전자의 q축에서 더 떨어진 I_a 를 제어하게 되어 토크 출력이 감소한다. 따라서 제어 성능을 유지하기 위해서는 실제 좌표계와 추정 좌표계 간의 위상 오차를 최소화할 수 있는 제어 기법이 필요하다.

V. 위상 오차 보상 및 급변 부하 시 회전자 위치 추정

<Fig. 4>는 PMSM 벡터 제어 로직에 위상 오차 보정 기법을 적용한 구조를 나타낸다. 본 연구에서 제안한 방법은 홀센서 신호 간의 간격을 이용해 계산된 속도 및 위치 정보를

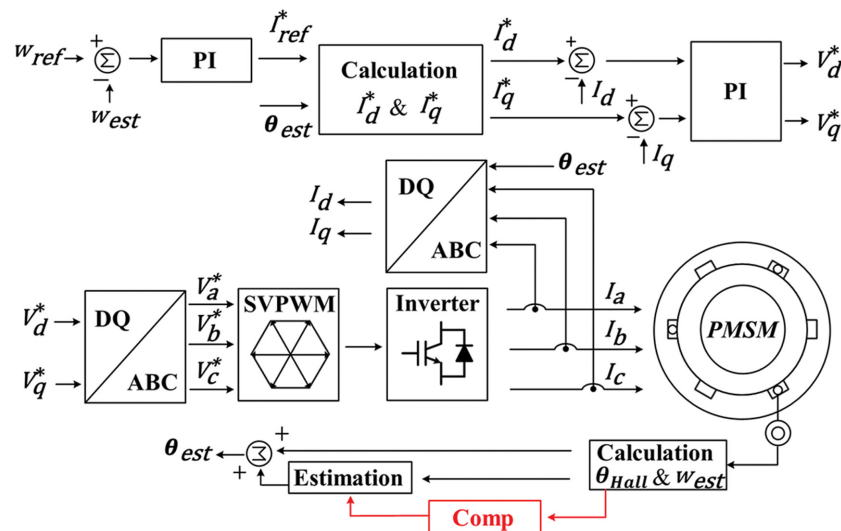


Fig. 4. (Color online) Phase error compensation method applied to hall-sensor-based PMSM vector control algorithm.

기반으로 위상 오차를 보정하도록 설계되었다.

PMSM 벡터 제어 로직에서는 각 홀센서 신호 출력될 때 회전자의 위치를 추정하고, 이를 기반으로 좌표계를 설정하여 제어를 수행한다. 그러나 부하가 발생하면 홀센서 신호 출력 간격이 불규칙하게 변할 수 있으며, 이로 인해 추정된 위치와 실제 위치 간의 오차가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 홀센서 신호 출력 시점에서 측정된 각속도와 위치값을 활용하고, 보정 상수를 통해 추정된 위치를 보정하는 기법을 적용하였다.

<Fig. 5>는 부하 변동으로 인해 홀센서 신호 출력 시간이 변화하는 경우의 파형을 보여준다. 이 파형을 바탕으로 위상 오차 보상 기법 적용하기 위한 조건을 평가한다. 정속 운전 시, 홀센서 신호는 일정한 간격으로 출력된다. 그러나 <Fig. 5>와 같이 부하가 발생하면, 다음 홀센서 신호가 출력되기 전까지의 시간이 길어진다. 부하 변동이 없을 경우, <Fig. 5>의 θ_n 에서 홀센서 신호가 출력되며, 이때 홀센서 출력 신호 간의 시간 차이를 t_n 이라고 정의한다. 만약, t_n 이 경과한 후에도 홀센서 신호가 출력되지 않으면, 추가 경과 시간을 따로 카운트한다. 이러한 과정을 통해 급격한 부하 변동 시 발생하는 위상 오차를 보정할 수 있다.

위상 오차 보상 기법을 적용하기 위해, 홀센서 신호가 출력된 시점에서 회전자의 각속도와 위치각을 계산한다. 부하 발생 시점을 기준으로, 부하 발생 이전의 홀센서 신호를 기반으로 계산된 속도를 w_n 로 정의한다, 이때, w_n 은 식(4)로 계산할 수 있다.

$$w_n = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{t_n} [\text{rad/s}] \quad (4)$$

홀센서 신호 출력 간의 시간 t_n 을 이용하여 회전자의 각속도를 계산한다. 식(1)을 적용하여 홀센서 신호가 출력된 시점에서의 회전자 위치각 θ_{Hall} 을 정의하였고, 이를 앞서 편의상 θ_n 으로 표현하였다. 이를 기반으로, 부하 변동이 발생하기 전 회전자의 추정 위치각은 식(3)을 활용하여 식(5)으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{est_n} = w_n t + \theta_n [\text{rad}] \quad (5)$$

급격한 부하 변화로 인해 위상 오차가 발생하면 시간에 대한 변수를 측정한다. 부하 변동이 감지된 순간부터 다음 홀센서 신호가 출력되기 전까지의 시간을 활용하여, 위상 오차를 보정하기 위함이다. 정상 상태에서 모터가 일정한 각속도

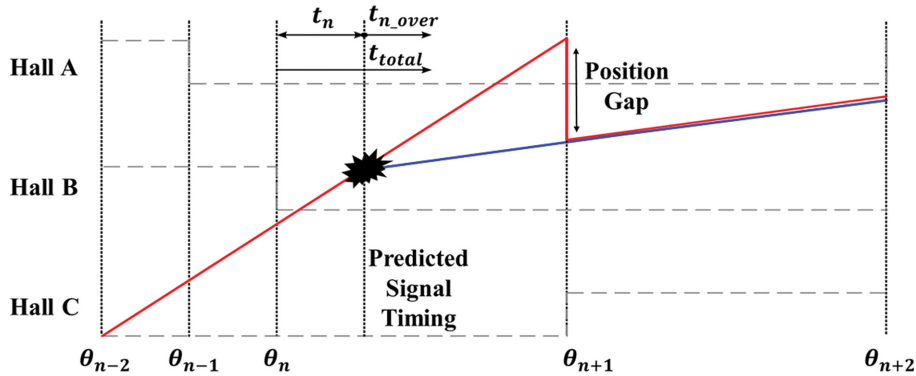


Fig. 5. (Color online) Hall sensor signal waveform and timing analysis during load fluctuations.

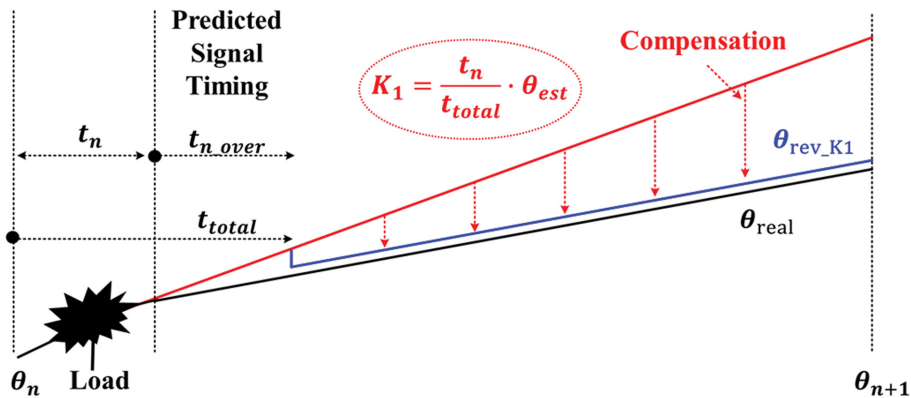


Fig. 6. (Color online) Compensation method using K_1 during load fluctuations.

로 회전하며, 홀센서 신호 간 시간 간격 t_n 는 일정하게 유지된다고 하였다. 이때, t_n 을 부하 변동 여부를 감지할 수 있는 기준으로 사용한다.

<Fig. 5>처럼 급변 부하가 발생하면 회전자속도가 급격히 감소하여 홀센서 신호 간의 간격이 변화한다. 그리고 <Fig. 5>는 이러한 변화를 기반으로 위상 오차 보정 기법을 적용하기 위한 변수 t_{total} 과 t_{n_over} 를 시각적으로 나타낸다. t_{n_over} 는 신호가 발생해야 하는 시점 t_n 을 초과한 이후 추가로 경과된 시간을 나타내며, 이는 부하로 인해 홀센서 신호가 지연된 상황을 반영한다. 변수 t_{total} 은 부하 발생 전 홀센서 신호가 인가된 시점부터 홀센서 신호 지연으로 인해 발생한 t_{n_over} 를 포함한 전체 시간을 나타낸다. 이는 식(6)로 나타낸다.

$$t_{total} = t_n + t_{n_over} \quad (6)$$

식(6)을 바탕으로, 다음 홀센서 신호가 발생하기 전까지 회전자의 추정 위치각을 보정하기 위해 보정 상수 K_1 을 정의한다. K_1 은 부하가 발생 이전 정속 상태에서의 홀센서 신호 간 시간 간격 t_n , 부하 변동으로 인해 발생한 t_{n_over} 와 t_n 의 합인 t_{total} 의 비율로 계산된다. 이 관계는 식(7)로 표현되며, t_{total} 이 항상 t_n 보다 크므로 K_1 은 0에서 1의 값을 가진다.

$$K_1 = \frac{t_n}{t_{total}} \quad (0 < K_1 \leq 1) \quad (7)$$

보정 상수 K_1 을 활용하여, 부하 발생 이전의 홀센서 신호로 계산된 모터 각속도 w_n 에 보정 상수 K_1 을 곱해 새로운 추정 위치각 $\theta_{rev_K_1}$ 을 계산한다. 이 보정된 위치각 $\theta_{rev_K_1}$ 은 다음 홀센서 신호가 발생하기 전까지 회전자의 추정 위치각으로 사용된다. $\theta_{rev_K_1}$ 은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{rev_K_1} = K_1 \cdot w_n t + \theta_n \quad (8)$$

부하 발생 이전에 측정된 홀센서 신호 사이의 시간이 t_n 이

므로 부하 발생 이후 홀센서 출력 신호와 이전 신호 사이의 시간은 t_{n+1} 로 정의할 수 있다. 이를 기반으로 부하 전후 홀센서 신호 출력 간격의 변화를 이용하여, 위상 오차 보상 알고리즘이 종료될 조건을 결정한다. 이를 위해 보정 상수 K_2 를 정의하며, K_2 는 부하 발생 후 추정 위치각이 실제 위치각을 얼마나 추종하고 있는지 판단하는 지표 역할을 한다. K_2 는 식(9)으로 정의한다.

$$K_2 = \frac{t_n}{t_{n+1}} \quad (9)$$

부하 발생 이후 첫 번째 홀센서 신호 타이밍(θ_{n+1})에서 K_2 를 계산하기 시작하며, K_2 는 홀센서 신호 간 시간 간격을 비교한다. K_2 의 값이 1에 가까울수록, 보정된 위치각이 실제 위치각을 잘 추적하고 있음을 시사한다. 따라서, 홀센서 신호 타이밍에서 출력 신호 간 시간 간격의 비율 K_2 를 계산한다.

$$\theta_{rev_K_2} = K_2 \cdot w_n t + \theta_n \quad (10)$$

만약 t_n 과 t_{n+1} 의 간격이 비슷하여 K_2 값이 1과 유사하다면 보정 상수 K_2 를 활용하여 추정 위치각을 계산한다. 이렇게 계산된 위치각은 식(10)에 따라 $\theta_{rev_K_2}$ 로 정의된다. 이 값은 벡터 제어의 위치각으로 직접 사용되지는 않으며, 현재 추정각 θ_{est} 와 비교하는 판단 기준으로 사용한다. $\theta_{rev_K_2}$ 와 θ_{est} 를 사용하여 $\frac{\theta_{est}}{\theta_{rev_K_2}}$ 의 값이 [0.97, 1.03] 범위 내에서 존재하면 보상 알고리즘을 종료하고, 그렇지 않으면 다음 홀센서 타이밍에서 동일한 절차를 반복한다. K_1 을 포함한 전체적인 흐름도는 <Fig. 8>에 도식화하였다.

<Fig. 9>는 위상 오차 보상 기법이 적용되지 않은 상태에서 급격한 부하 발생 시 추정된 위상과 실제 위상 간의 차이를 시각적으로 나타내었다. 빨간색 그래프는 추정 위치각, 검

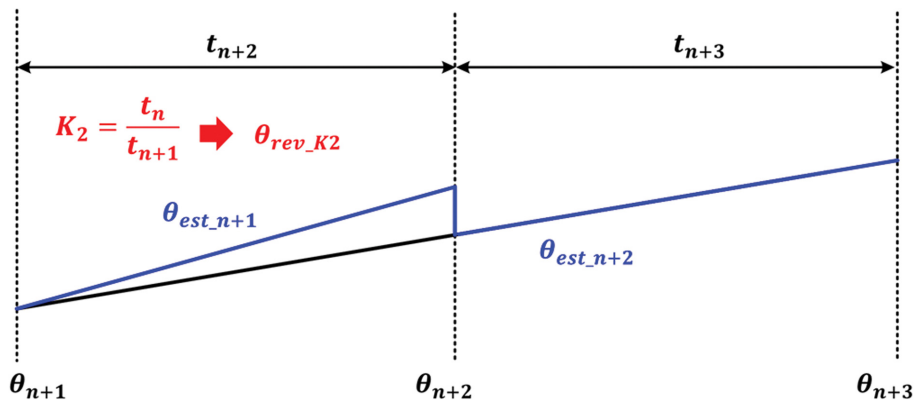


Fig. 7. (Color online) Method for verifying similarity estimated rotor position applied K_2 .

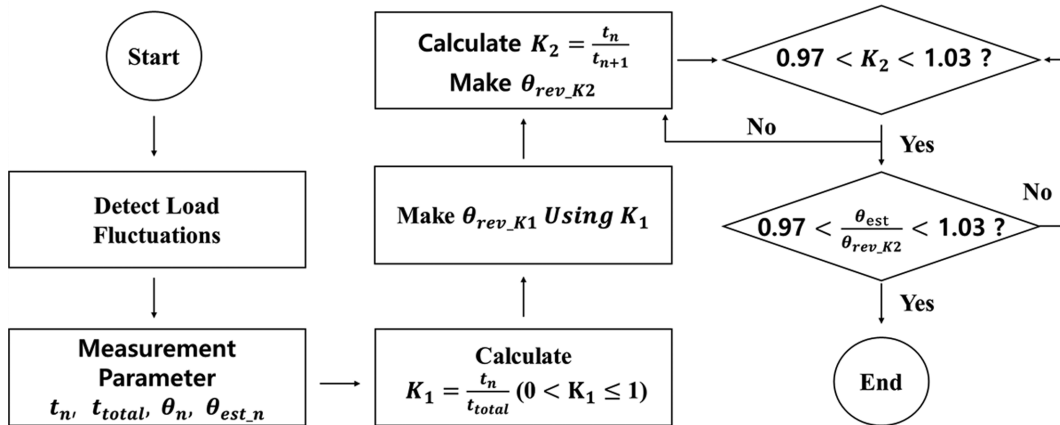


Fig. 8. (Color online) Flowchart of phase-error compensation using K_1 and K_2 .

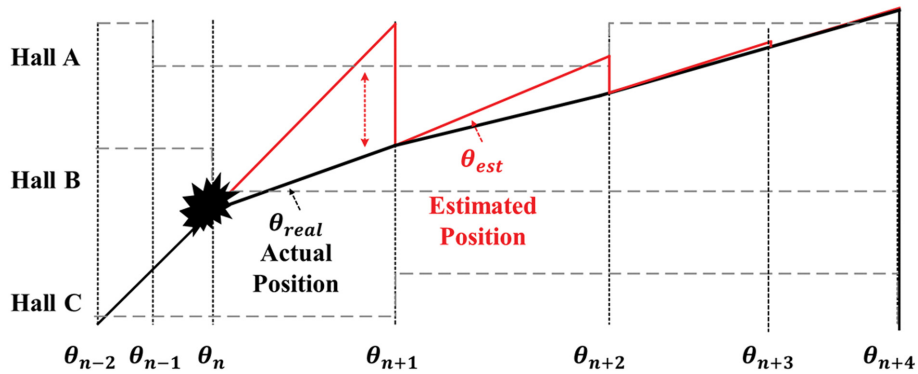


Fig. 9. (Color online) Estimated rotor position before applying phase error compensation during load fluctuations.

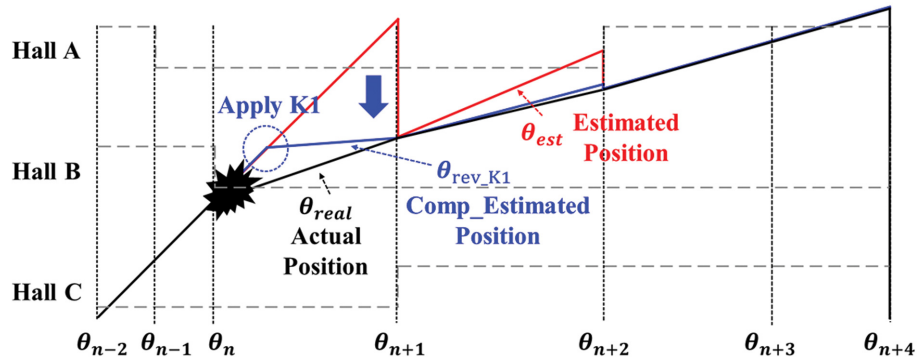


Fig. 10. (Color online) Estimated rotor position after applying phase error compensation during load fluctuations.

은색 그래프는 실제 위치각을 나타낸다.

<Fig. 9>에서 볼 수 있듯이, 홀센서 신호 사이에서 갑작스러운 부하 변화가 발생하면 실제 회전자 위치각은 부하로 인해 감속하며, 그 결과 기울기가 감소하는 형태를 나타낸다. 부하 변동으로 모터 각속도는 급격히 줄어들지만, 추정 위치각은 다음 홀센서 신호가 인가될 때까지는 즉각적인 신호 변화를 인지하지 못한다. 따라서 추정 위치각은 이전 홀센서 신호를 바탕으로 부하 변동과 관계 없이 계산되고 있으나, 실

제 위치각은 감속하기 때문에 위치각 차이 값이 점진적으로 커져 위상 오차가 발생한다.

<Fig. 10>은 위상 오차 보상 기법이 적용된 상태에서 급격한 부하 발생 시 추정된 위치각과 실제 위치각 간의 차이를 시각적으로 나타낸다. 추정 위치각은 빨간색 그래프, 보정된 위치각은 파란색 그래프, 실제 위치각은 검은색 그래프로 표현하였다. <Fig. 10>에서는 보정 상수 K_1 이 적용됨에 따라 추정 위치각이 실제 위치각에 가까워지려는 경향을 확인할 수

있다. 이는 부하로 인해 회전자의 실제 위치각이 감속하는 상황에서 위상 오차 보상 기법이 작동하기 때문이다. 이를 통해 위상 오차 보상 기법이 급격한 부하 변화 시 발생하는 오차를 줄이고 회전자 위치 추정 성능 개선이 이루어지는지 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다.

VI. 시뮬레이션

<Fig. 11>은 위치 센서로 홀센서를 사용하고 PMSM 대상 벡터 제어를 위한 시뮬레이션 회로를 모델링한 그림이다. 제안한 위상 오차 보상 기법의 타당성을 검증하기 위해 위상

오차 보상 기법 전후의 시뮬레이션을 진행하였다. PSIM 시뮬레이션의 파라미터는 <Table I>과 같다.

시뮬레이션은 스위칭 주파수 10[kHz], 샘플링 주기 100[us]로 수행하였다. 초기 조건은 속도 6,600[RPM], 부하 토크 0[Nm]이며, 외부 부하 인가 시점은 $t = 0.53[s]$ 지점에서 28[Nm]의 부하를 인가하였다. DC Link 전압은 300[V]로 유지하고, 전류는 전동기 설계 최대 전류 범위 내에서 흐르게 하였고, 속도는 6600[RPM]으로 제어하되 추가적인 제한은 적용하지 않았다.

<Fig. 12>는 일반적인 부하 상황에서 사용하는 홀센서를 활용한 추정각 제한 방법을 적용한 시뮬레이션 결과를 나타

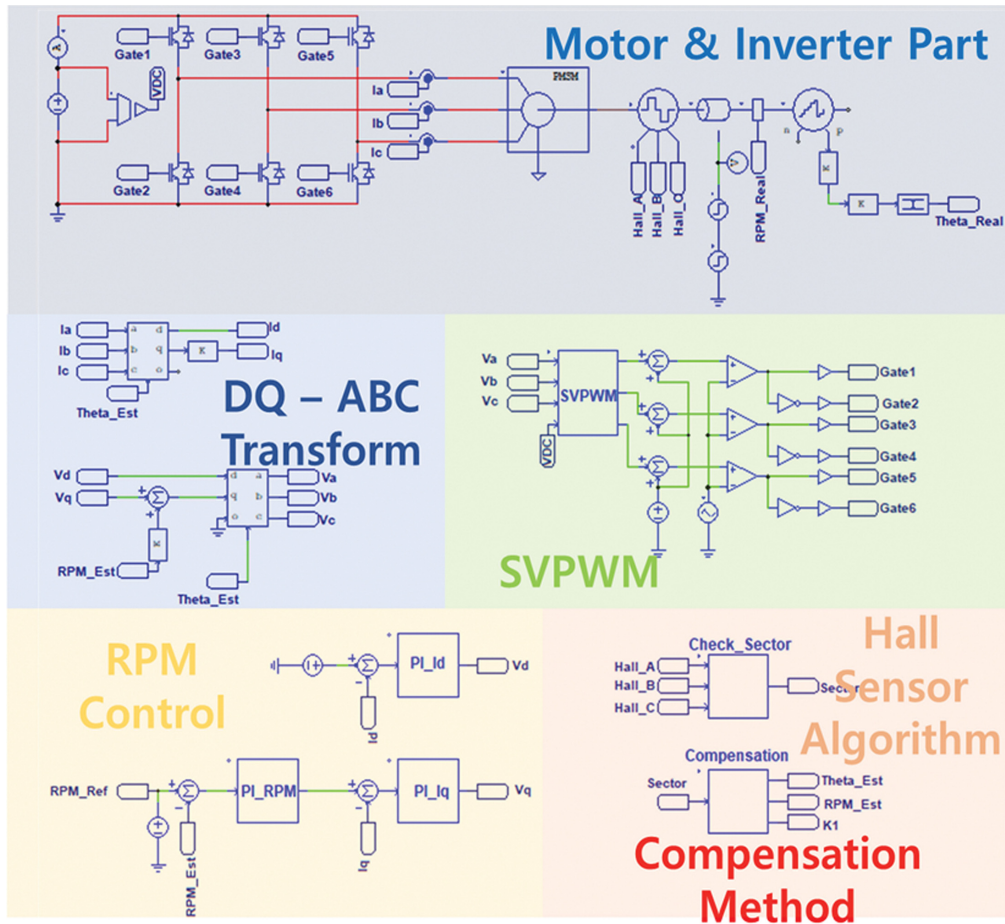


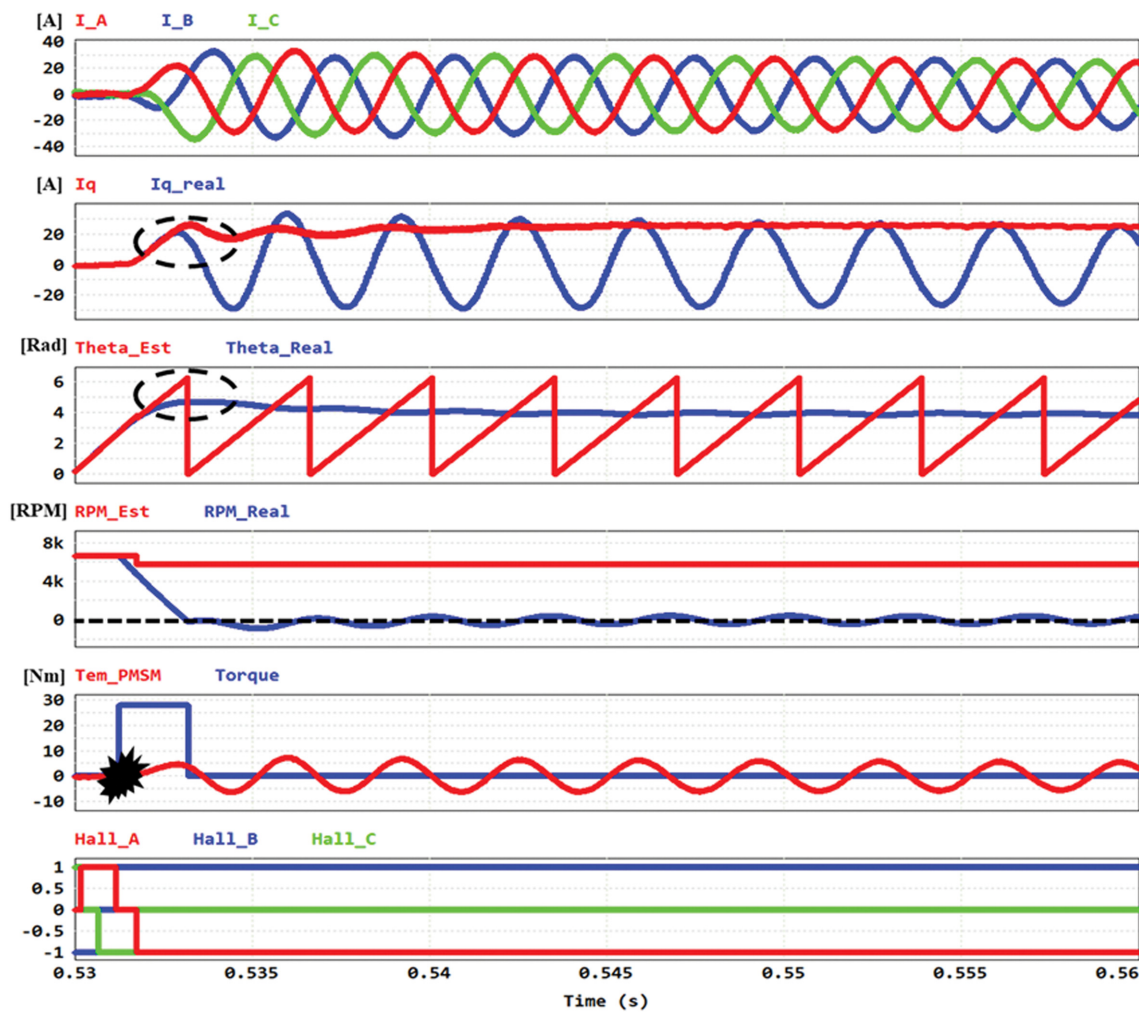
Fig. 11. (Color online) PMSM vector control simulation circuit with applied phase error compensation technique.

Table I. Motor and controller parameters of PSIM simulation.

Motor Parameter		Control Parameter	
Back EMF	26 [Vpk/krpm]	Switching Frequency	10 [kHz]
Moment of Inertia	70 [ukgm ²]	DC Voltage	300 [V]
d-axis Inductance	1.4 [mH]	Speed Reference	6600 [RPM]
q-axis inductance	1.5 [mH]	P-gain	0.015
Phase Resistance	0.145 [Ω]	I-gain	0.09
Poles	6	Load Torque	28 [Nm]

Table II. Performance comparison before and after applying the proposed compensation.

Metric	Before Compensation	After Compensation	Relative Improvement
Motor State	Stalled	Recovered	-
Current Overshoot	15.6 [A]	10.7 [A]	31.4 [%]
Peak Motor Torque	7.2 [Nm]	8.9 [Nm]	23.6 [%]
Minimum Motor Torque	-6.5 [Nm]	-0.97 [Nm]	85.1 [%]
Instantaneous Minimum Speed	-859 [RPM]	-71 [RPM]	91.7 [%]
Speed Recovery	Not Recovered	Recovered	-
Max Difference of q-axis Current	54.0 [A]	6.0 [A]	88.9 [%]
Max Difference of Motor Torque	11.7 [Nm]	7.0 [Nm]	40.2 [%]
Max Difference of Electrical Angle	3.14 [rad]	0.8 [rad]	74.5 [%]

**Fig. 12.** (Color online) Simulation waveform with the conventional control method under load fluctuations.

낸다. 이 방식은 제안된 제어 보상 기법을 적용하지 않은 것으로, 급격한 부하 변화로 인해 위치 추정이 정확히 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 그 결과, 시스템이 정지하는 현상이 발생하였다. 이를 통해 기존 방식이 급격한 부하 변화에는 효과적으로 대응하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

<Fig. 13>은 제어 보상 기법을 적용한 시뮬레이션 결과를

보여준다. 급격한 부하 상황에서 제안된 관측기는 빠르게 부하 변화를 감지하고 보정 상수 K_I 를 통해 위치 오차를 효과적으로 보상함으로써 회전자의 추정 위치각이 실제 위치각을 최대한 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 제안된 기법은 급격한 부하 변동에도 시스템의 안정성을 확보할 수 있음을 시뮬레이션으로 입증하였다.

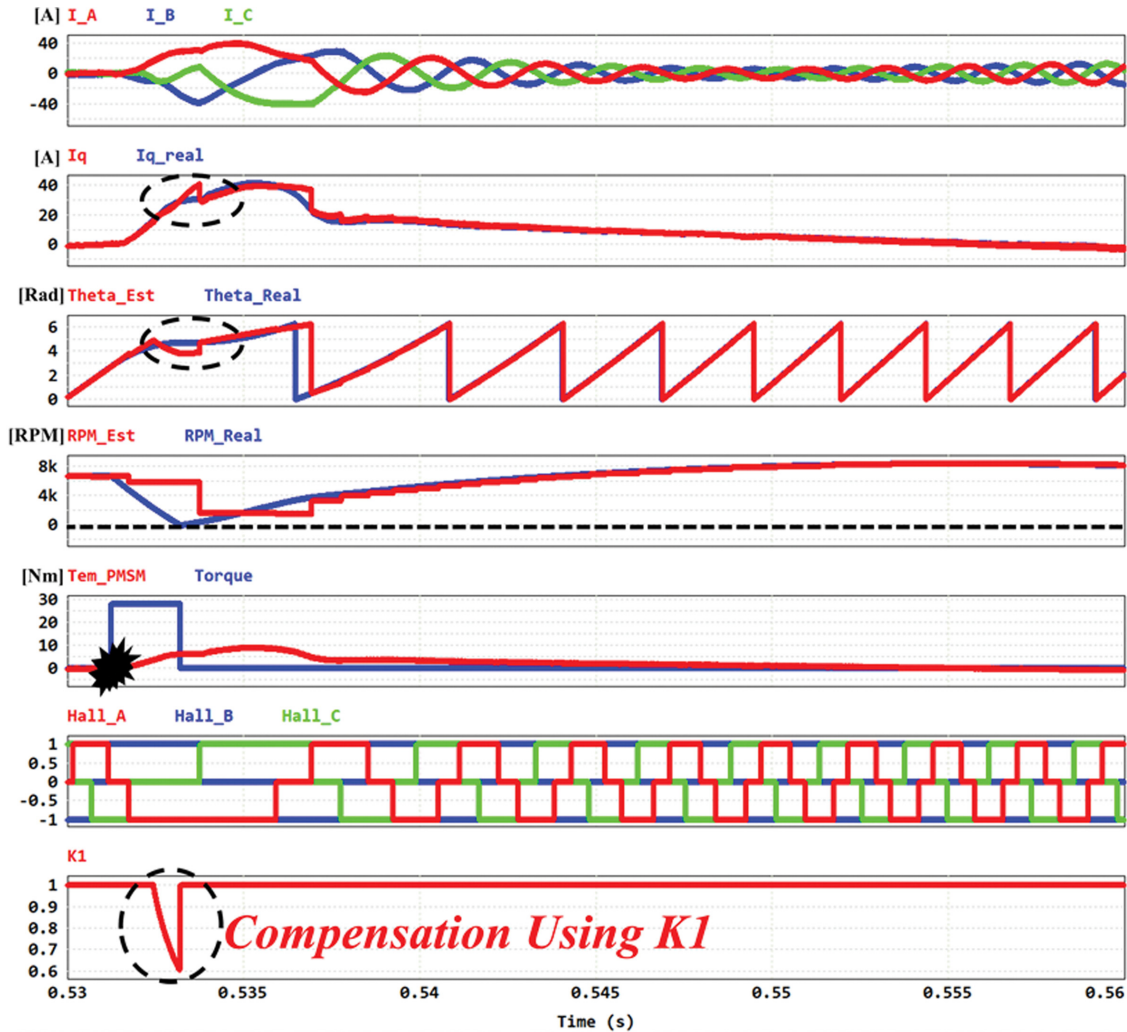


Fig. 13. (Color online) Simulation waveform after applying the phase error compensation technique under load fluctuations.

VII. 한계 및 향후 과제

본 논문에서 제시한 보상 기법은 연속 홀센서 신호의 시간 간격을 핵심으로 사용하므로, 홀센서 신호의 지터나 지연, 양자화 현상이 크게 발생하면 보상 정확도가 감소한다. 또한, 매우 높은 속도에서는 신호 간격이 너무 짧아 보상이 안정적으로 작동하기 어려운 구간이 생길 수 있다. 그래서, 향후 실험 시 홀센서 신호 타이밍 보정과 속도 구간별 파라미터 조정을 적용해 실제 하드웨어에서의 적용성을 체계적으로 검증할 필요성이 있다.

VIII. 결 론

본 논문에서는 홀센서를 이용한 PMSM 벡터 제어에서 급격한 부하 변화에도 제어 안정성을 보장하기 위한 위상 오차 보상 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 홀센서 신호 간 간

격, 속도, 그리고 위상 정보를 기반으로 d-q 축과 $\gamma\delta$ 축 간 위상 오차를 효과적으로 보정한다. 이를 통해 급변 부하로 인한 제어 시스템의 불안정성을 해결할 수 있다. 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션 회로를 구성하고, 기법 적용 전후의 파형을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 급변 부하 상황에서도 q축 전류 변동이 억제되어 토크 안정성이 유지되었다. 결과적으로, 제안된 위상 오차 보상 기법은 급변 부하가 발생했을 경우 제어 안정성 확보에 효과가 있음을 시뮬레이션으로 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02313282(2410012338), 반도체 공정 질소 가변 공급 진공시스템 통합 기술 개발).

References

- [1] S. I. Byun, S. G. Lee, S. A. Kim, and Y. H. Cho, Hall Effect Sensor-Based Space Vector PWM Control of Permanent Magnet Synchronous Machine, Proc. KIEE Conf., Korea (2012) pp. 304~306.
- [2] D. H. Son, D. W. Choi, M. S. Kim, B. K. Kim, and Y. H. Cho, The Vector Control of PMSM Using Low-Resolution Hall Effect Sensor, The 41st KIEE Summer Conference (2010) pp. 884~885.
- [3] A. Keyvannia and Z. Nasiri-Gheidari, IEEE Trans. Ind. Electron. **70**, 9593 (2023).
- [4] H. Saneie, Z. Nasiri-Gheidari, and A. Belahcen, IEEE Trans. Instrum. Meas. **72**, 1 (2023).
- [5] J. Bu, L. Xu, T. Sebastian, and B. Liu, Near-zero speed performance enhancement of PM synchronous machines assisted by low-cost Hall effect sensors, Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf., USA (1998) pp. 64~68.
- [6] S. Y. Kim, H. G. Byun, B. J. Go, and S. Y. Park, J. Korean Inst. Electr. Eng. **59**, 1809 (2010).
- [7] C. Y. Zun, H. S. Mok, and G. G. Park, Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Using Linear Hall Sensors, Proc. Power Electron. Conf., Korea (2016) pp. 103~104.
- [8] M. H. Jang and K. W. Lee, Trans. Korean Inst. Power Electron. **18**, 205 (2013).
- [9] M.-H. Kim, J. S. Yim, S. K. Sul, and S. I. Lim, Trans. Korean Inst. Power Electron., Korea **13**, 329 (2008).
- [10] J. H. Bae, Ph.D. Dissertation, Angle Compensation for Improving Speed Control of the BLDC Motor With Hall Sensors, Univ. of Seoul, Korea (2020).
- [11] H. J. Ahn and D. M. Lee, Speed and Position Estimation Method for PMSM With Low-Resolution Hall-Effect Sensors, Proc. Power Electron. Conf., Korea (2020) pp. 114~115.
- [12] D. J. Lee, J. S. Park, S. Y. Cho, Y. J. Shin, I. J. Yang, and W. H. Kim, A Study on Sensored to Sensorless Transition Control Logic During High-Speed Operation of Permanent Magnet Motor for Vacuum Pump, Proc. KIEE Conf., Korea (2023) pp. 1228~1229.