

직류전동기 제어기법을 적용한 3상 BLDC 모터 제어에 관한 연구

김진만* · 남택근**†

* 목포해양대학교 선박수리지원센터 책임연구원, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

A Study of Control for 3 Phase BLDC Motor using Control Methodology of DC Motor

Jin-Man Kim* · Taek-Kun Nam**†

* Head Principal Researcher/PhD, Ship Repair Supporting Center, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Professor Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 본 논문은 직류전동기(DC motor)와 전기적인 특성은 유사하지만, 수명과 신뢰성이 향상된 BLDC 모터의 제어기법에 대해 언급하고 있다. BLDC모터는 회전자의 위치 정보를 사용하여 직류전동기의 기계적인 접촉에 의한 정류 장치를 제거함으로써 내구성과 속도 안정성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 BLDC모터의 권선에 흐르는 전류가 직류전동기의 전기자에 흐르는 구형파 형태의 전류인 것에 착안하여 직류전동기에 대한 제어기를 설계하고, 설계된 제어기를 3상 BLDC모터에 적용하여 제어기의 유효성을 확인하였다. 이를 위해 3상 BLDC모터의 전기적인 파라미터 값을 가지는 단상 직류전동기의 모델링을 실시하였고, 도출된 시스템에 대해 근궤적법을 적용하여 전동기의 속도제어를 위한 PI 제어기를 설계하였다. DC 전동기의 속도제어 시뮬레이션을 시행하여 제어기의 성능을 확인하였고, 동일한 제어기를 MATLAB으로 구현한 3상 BLDC모터의 속도제어에 적용하였다. DC 전동기와 유사한 제어 결과를 3상 BLDC모터에서 얻을 수 있었고, 이를 통해 연구에서 제안한 제어기법의 유용성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : BLDC전동기, 스위칭, 상전환, 근궤적, 속도제어

Abstract : This paper discusses the control method of BLDC(Brushless Direct Current) motor that has similar electrical characteristics with DC motor but has improved its lifespan and reliability. The BLDC motor can improve durability and speed stability by using rotor position information to eliminate commutators that require mechanical contact with DC motors. In this study, a controller for a DC motor was designed based on the fact that the current in the windings of a BLDC motor is a square-wave current like the current flowing in the armature of a DC motor. Next, the designed controller was applied to a 3-phase BLDC motor to confirm the effectiveness of the controller. In detail, a single-phase DC motor with electrical parameter values of a three-phase BLDC motor was modeled and a PI controller for motor speed control was designed by applying the root locus method to the derived system. The speed control simulation of the DC motor was performed to confirm the validity of the controller, and the same controller was applied to the speed control of the 3-phase BLDC motor implemented in MATLAB. From the simulation, similar results of the DC motor were obtained in the 3 phase BLDC motor and confirmed the usefulness of the proposed control scheme.

Key Words : BLDC motor, Switching, Commutation sequence, Root-locus, Speed control

1. 서 론

직류전동기는 정류자 및 브러쉬와 기계적인 접촉을 통해 전기자 전류의 극성을 바꾸어 일정한 방향으로 회전력을 발생시키는 장치이다. 하지만, 기계적인 정류 장치는 마찰, 소음

이 발생하게 되고 전동기의 정상적인 기능을 얻기 위해서는 정기적인 유지보수가 뒤따라야 한다. 반면에 BLDC(brushless direct current) 전동기는 회전자의 위치 정보를 활용하고, 반도체 소자의 스위칭 기능을 적용하여 직류전동기의 정류자와 브러쉬 기능을 수행할 수 있도록 한다. 따라서 정류자와 브러쉬의 유지보수에 필요한 비용 절감 효과를 얻을 수 있고, 영구자석이 회전하는 관계로 관성이 작아 신속하게 속도조정이 가능하다. 아울러 직류전동기보다 허용전류를 키

* First Author : kjmsrs@srscenter.or.kr, 061-240-7543

† Corresponding Author : tknam@mmu.ac.kr, 061-240-7225

을 수 있어 최대 출력 토크를 높일 수 있는 장점이 있다(Kim et al., 2020).

최근 운송 수단의 친환경 정책에 따라 육상 자동차와 선박의 추진 장치에 전기 모터를 적용한 연구들이 지속해서 증가하고 있다. 운송기기에서는 에너지 효율과 더불어 승차감 향상이 중요한 과제이며 이를 위한 전동기의 과도성능 향상이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 DC 전동기에서 브러시를 제거한 BLDC가 적용되고 있다(Lee et al., 2021; Park et al., 2022).

BLDC모터의 제어 방식은 회전자 위치 정보를 검출할 수 있는 센서의 유무에 따라 다르게 이루어진다. 모터의 토크를 유지하면서 정확한 위치 제어가 수반될 필요가 있을 경우는 위치 정보를 검출할 수 있는 홀(Hall) 센서를 일반적으로 사용하고 있으며, 회전자 축의 연장선에 엔코더(Encoder)를 추가하여 제어하게 된다. 한편, 헤어드라이어, 드론 등과 같이 고회전, 저토크 운전 기능만 사용하면 전동기의 역기전력 검출만으로도 회전자의 위치를 추정하여 제어할 수 있다(Hendershot and Miller, 2010).

한편, Kim and Hur(2014)은 단상 BLDC모터를 적용한 팬 모터(fan motor)의 드라이버 설계를 위해 단상 BLDC모터의 모델링 및 회로설계에 대한 시뮬레이션 수행 결과를 보인다.

Kim et al.(2010)에서는 BLDC모터의 일반적인 구조와 동작, 상 전환 시 발생하는 토크 리플을 저감할 수 있는 대책에 대해 언급하고 있지만 BLDC모터를 제어하기 위한 구체적인 제어 방법은 제시되지 않았다.

본 연구에서는 BLDC모터의 권선에 흐르는 전류가 직류 전동기의 전기자에 흐르는 구형파 형태의 전류인 것에 착안하여 직류전동기에 대한 제어기를 설계하고, 설계된 제어기를 3상 BLDC모터에 적용하여 제어기의 유효성을 확인하고자 한다. 이를 위해 3상 BLDC모터의 전기적인 파라미터 값을 가지는 단상 직류전동기의 모델링을 실시한다. 도출된 시스템에 대해서는 근계적법을 적용하여 단상 직류전동기의 속도 제어용 제어기를 설계하고 동일한 제어기를 3상 BLDC모터의 속도제어에 적용하여 제어 특성을 비교하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 3상 BLDC모터의 구동 원리와 모델링에 대해 살펴보고, 제3장에서는 3상 BLDC모터의 각 상에 공급되는 전류가 단상 직류 여자 전동기와 같은 구형파라는 점에 착안하여 직류전동기의 속도제어를 위한 제어기를 설계한다. 제4장에서는 제안된 시스템의 유용성을 평가하기 위한 수치 시뮬레이션 결과에 관해 기술하고, 제5장에서 결론을 맺는다.

2. BLDC모터의 모델링

2.1 BLDC모터 구동 시스템

Fig. 1은 3상 BLDC(brushless direct current motor)전동기의 구동 시스템을 나타내고 있다. BLDC모터는 회전자가 일정한 방향으로 회전하도록 회전자의 영구자석 위치에 따라 전류를 흘려서 자속을 발생시킬 고정자 권선(2ϕ)을 바꿔주면서 회전자에 힘이 연속적으로 발생하도록 한다. 이를 위해 영구자석(회전자) 위치를 검출하는 홀 소자 3개(HA, HB, HC)를 배치(120도 전기각)하여 회전자의 위치를 6개 구간으로 구별하여 검출하게 되고, 회전자의 1회전을 6개 구간으로 나누어 구동한다.

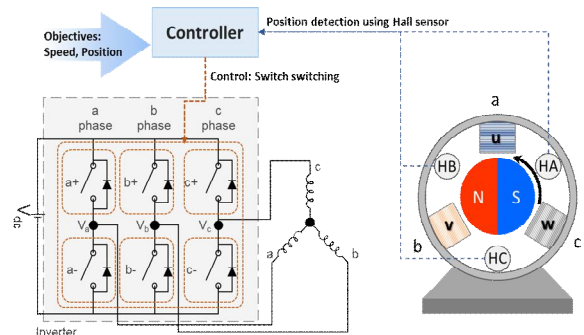


Fig. 1. Driving system for 3 phase 2 poles BLDC motor.

BLDC모터의 1회전 6개 구간에서의 작동 절차는 Fig. 2와 같다. 단, Fig. 2에서 고정자 권선의 +전류가 흐르면 S극, -전류가 흐르면 N극이 발생하는 것으로 한다.

Fig. 2의 ①에서 스위칭으로 $I_a = I, I_b = -I$ 가 되므로 a 상 하단에는 S극이 b상의 하단에는 N극의 자계가 발생한다. 따라서 a상에서는 회전자의 영구자석 S극을 밀어내게 되고, b상에서는 회전자의 영구자석 S극을 끌어당기게 된다. Fig. 2의 ②에서는 스위칭으로 $I_a = I, I_c = -I$ 가 되므로 a 상 하단에는 S극이 c상의 하단에는 N극의 자계가 발생한다. 따라서 a상에서는 회전자의 영구자석 N극을 끌어당기게 되고, c상에서는 회전자의 영구자석 N극을 밀어내게 된다. Fig. 2의 ③에서는 스위칭으로 $I_b = I, I_c = -I$ 가 되므로 b 상 하단에는 S극이 c상의 하단에는 N극의 자계가 발생한다. 따라서 b상에서는 회전자의 영구자석 S극을 밀어내게 되고, c상에서는 회전자의 영구자석 S극을 끌어당긴다.

Fig. 2의 ④, ⑤, ⑥에서도 위에서와같이 영구자석 회전자의 위치를 검출하고, 스위칭으로 고정자 권선에서 적절한 자계를 발생시켜 회전자가 반시계 방향으로 회전하게 된다.

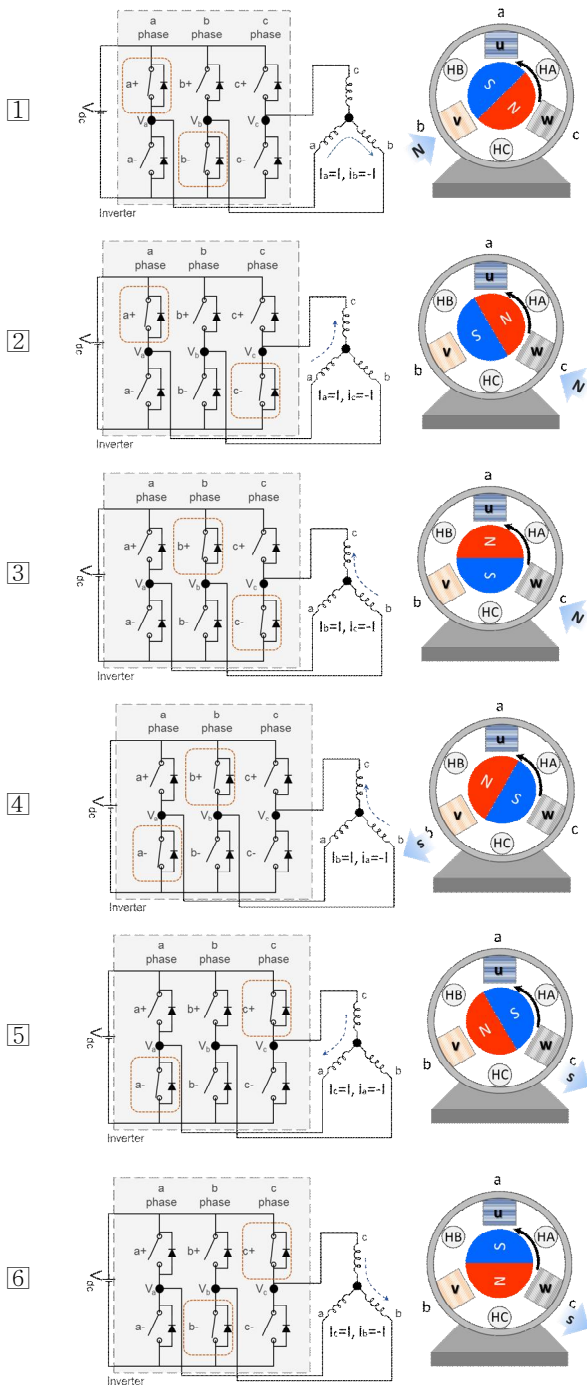


Fig. 2. Driving process of 3 phase 2 poles BLDC motor.

Fig. 2와 같은 구동 과정에서의 스위칭 소자의 동작, 홀 소자 출력신호, 전류 및 역기전력과 각 상에서의 토크는 Fig. 3과 같다.

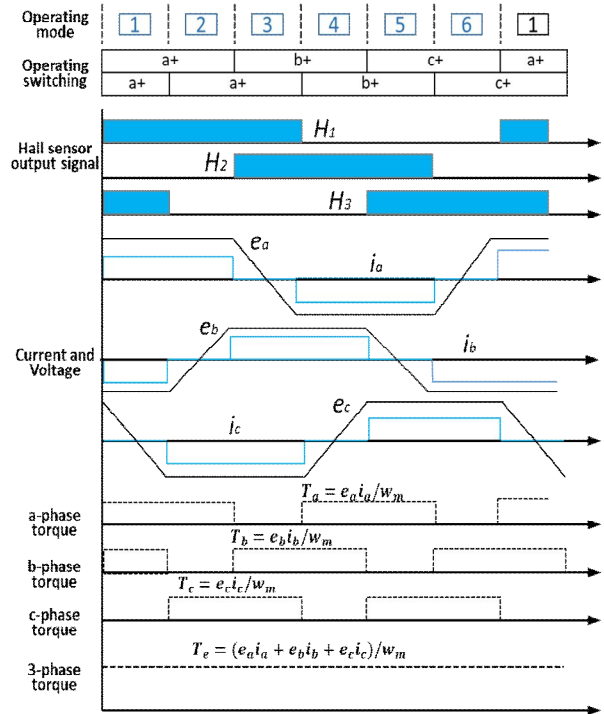


Fig. 3. Switching process of 3 phase BLDC motor.

2.2 BLDC모터의 모델링

BLDC모터의 수식적인 모델링은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, v_a, v_b, v_c 는 상전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, e_a, e_b, e_c 는 역기전력, R 과 L 은 각각 권선저항과 인덕턴스를 의미한다.

아울러, 3상 BLDC모터의 전력과 출력 토크는

$$P_m = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2)$$

식(2)로 나타낼 수 있고, ω_m 은 전동기의 기계적인 각속도를 의미한다. 본 연구에서 제어 대상으로 하는 BLDC모터의 사양은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. BLDC motor specifications

Specifications	
Nominal voltage	16 V
Nominal current	0.69 A
Nominal torque	0.32 Nm
Nominal speed	80 rpm
Max speed	340 rpm
Max instant torque	0.41 Nm
Max instant current	0.92 A
Line resistance	13.5 Ω
Phase to phase inductance	6.56 mH
Wire connect	Y
Speed constant	21 rpm/V
Torque constant	0.45 Nm/A
Rotor inertia	268 gcm ²
Number of pole pairs	2
Motor weight	174 g

3. 제어기 설계

3.1 제어기 설계

3상 BLDC 모터의 각상에 전해지는 전류를 살펴보면 직류 전동기의 전기자 도체와 마찬가지로 구형파의 전류가 가해지고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 이러한 구형파의 전류가 3상에 위상차를 가지고 공급되므로 각 상 기준에서 본다면 단상 직류 여자 전동기와 유사한 형태의 전류가 흐른다고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 단상의 직류 여자 전동기용 제어기를 설계하여 Table 1과 같은 전기적인 특성을 가지는 3상 BLDC모터에 적용하여 그 유용성을 확인하고자 한다.

단상 직류 여자 전동기의 전기 시스템과 기계 시스템을 고려하면

$$\begin{aligned} v &= Ri + L \frac{d}{dt} i + e \\ J \dot{\omega} + B\omega &= T_e \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)과 같이 간략화된 모터 방정식을 얻을 수 있다. 단, v , i , e 는 각각 권선에 가해진 전압, 전류, 역기전력을 의미하고, J 는 모터의 관성모멘트, B 는 댐핑계수, ω 는 각속도를 의미한다. 여기에 역기전력과 토크에 관련된 식은

$$\begin{aligned} e &= K_e \omega \\ T_e &= K_T i \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 단, K_e [V/rpm]는 역기전력 상수, K_T [Nm/A]는 토크 상수이다.

식(3)과 식(4)를 라플라스 변환하여 정리하면 전압으로부

터 모터의 속도는 식(5)와 같다.

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{s^2 JL + (LB + JR)s + BR + K_e K_T} \quad (5)$$

Table 1의 전동기 파라미터를 적용하였을 때 시스템(식(5))의 전달함수는

$$G(s) = \frac{6.752 \times 10^5}{s^2 + 2068s + 1.427 \times 10^7} \quad (6)$$

식(6)이 되고, 시스템의 안정성에 관련된 극점(pole)은 $s = -1.0339 \times 10^3 \pm j3.67235 \times 10^3$ 이다. 식(6)에 대한 근궤적(root locus)을 구하면 Fig. 4와 같다.

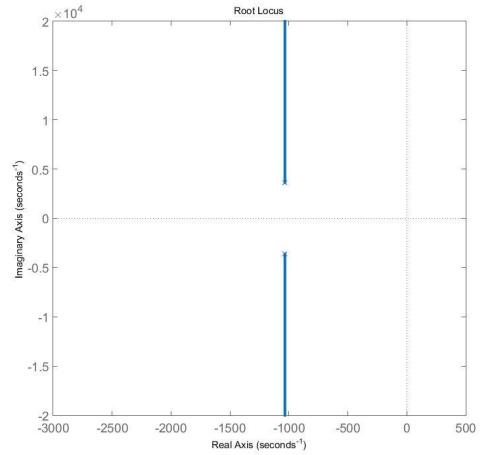


Fig. 4. Root locus of the system.

Fig 4로부터 두 개의 극점은 좌반평면(LHP)에 있는 것을 알 수 있고, 비례 게인에 해당하는 상수값을 증가($0 \rightarrow \infty$)시킬 때 따라 근의 위치는 \pm 허수축으로 이동하는 것을 보인다. 전동기의 속도제어를 위한 목표 회전속도를

$$RPM \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 50, & 0 \leq t \leq 5 \\ 100, & t > 5 \end{cases} \quad (7)$$

식(7)과 같이 설정하고, 전동기의 회전속도 출력값이 목표치에 추종하는 제어하고자 한다. 제어기를 설계하기에 앞서 Fig. 5와 같은 목표치를 인가했을 때 제어기를 적용하지 않은 상태에서의 결과는 Fig. 6과 같이 정상상태 오차(1초~5초 구간: 45 rpm, 5초~10초: 95rpm)가 남는 것을 확인할 수 있다. 이러한 정상상태 오차를 없애기 위한 효과적인 제어기는 적분 제어기이므로 PI 제어기를 적용하였다.

오차에 대한 제어입력을 $u(t)$ 라고 한다면, PI 제어기는 $u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$ 와 같고, 라플라스 변환하면

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s} := C(s) \quad (8)$$

식(8)과 같이 표현되므로 원래의 시스템에 극점을 0, 영점으로는 K_i/K_p 을 추가한 것과 같다.

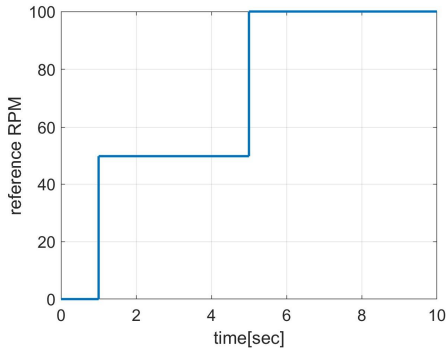


Fig. 5. Desired RPM of DC motor.

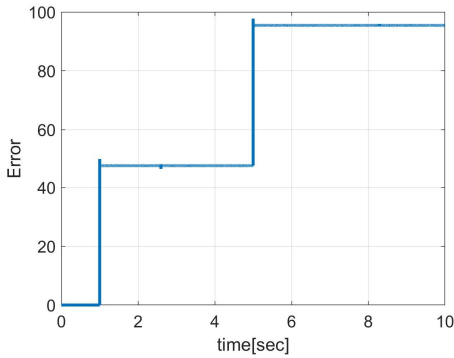


Fig. 6. RPM error of DC motor without control.

식(8)의 제어기 $C(s)$ 를 전동기의 전달함수 식(6)에 추가하여 개루프 전달함수를 구하면

$$C(s)G(s) = \frac{6.752 \times 10^5 (K_p s + K_i)}{s(s^2 + 2068s + 1.427 \times 10^7)} \quad (9)$$

식(9)가 얻어진다. 과도응답에 영향을 미치지 않기 위해서는 영점이 원점 부근에 위치하도록 K_p, K_i 를 선택하는 것이 바람직하지만, 현재 식(6)의 극점은 원점에서 멀리 떨어져 있으므로 $K_p = K^*, K_i = 10K^*$ 로 설정하여 식(9)에 대입하면

$$C(s)G(s) = \frac{K^* 6.752 \times 10^5 (s + 10)}{s(s^2 + 2068s + 1.427 \times 10^7)} \quad (10)$$

식(10)에 대한 근궤적에서 적합한 게인 K^* 를 선정하면, K_p, K_i 를 도출할 수 있다. 제어기의 파라미터 값을 구하기 위해 식(10)에 대한 근궤적을 그리면 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 근궤적을 보면 Fig. 4와 비교해 원점 부근에 \times (영점), \circ (극점)이 추가된 것을 알 수 있다.

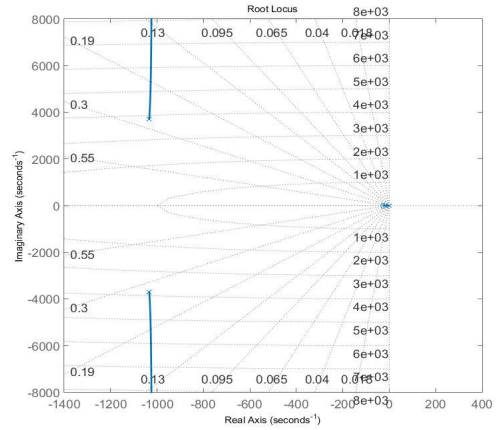


Fig. 7. Root locus of controlled system (PI control).

Fig. 7로부터 감쇠비와 오버슈트 등을 고려하여 제어기 파라미터를 도출하였고, 감쇠비를 최대로 할 수 있는 근궤적 게인에 따른 비례, 적분 게인은 각각

$$K_p = 1.28, K_i = 10.28 \quad (11)$$

식(11)이 얻어진다. 근궤적 게인 K^* 는 1.28, 감쇠비(ζ)=0.26, 오버슈트는 42.8%로 계산되었다. Fig.7의 근궤적에서 감쇠비는 게인(K^*)이 커짐에 따라 줄어들고 각주파수는 비례해서 커지는 것을 알 수 있다.

식(11)에서 도출된 PI 제어기 파라미터의 유효성을 확인하기 위해 아래 그림과 같은 제어 블록을 구성하였고, 제어기는 PI 제어기를 적용하였다(Fig. 8).

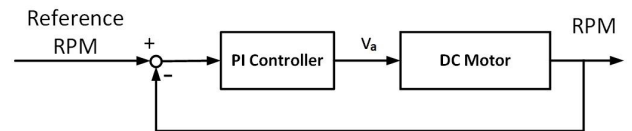
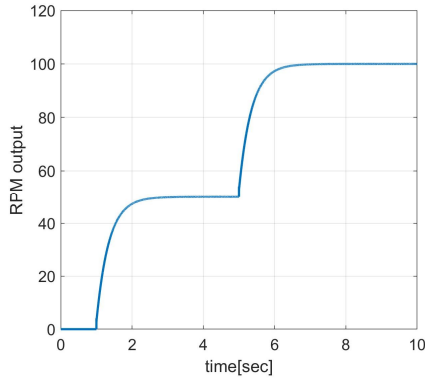


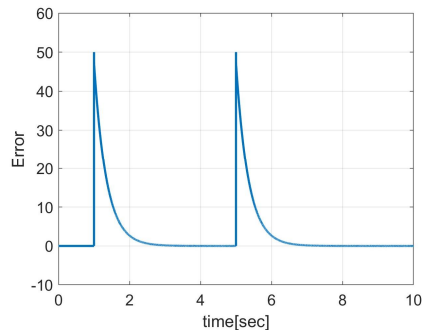
Fig. 8. Block diagram for DC motor control.

Fig. 8에서의 제어대상은 식(6)의 전달함수로 표현되는 DC 모터이고 이때 파라미터는 Table 1의 값을 적용한 것이다. Fig. 9는 Fig. 4 모델에 식 (6) 과 같은 PI 제어기를 적용했을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig. 9 (a)는 Fig. 5와

같은 제어목표치(RPM)에 대한 제어출력을 나타내고 있고, Fig. 9 (b)는 제어목표치와 제어출력과의 오차이다. 그림에서 알 수 있듯이 목표 회전속도에 추종하는 제어 결과를 보인다.



(a) Control output of DC motor



(b) Error value of DC motor control

Fig. 9. Results of DC motor control.

4. BLDC모터 제어

4.1 제어기 적용

3장에서 언급한 DC 모터의 제어를 위해 설계한 PI 제어기를 3상 4극 BLDC모터 제어에 적용하여 시뮬레이션하였다. BLDC모터의 속도제어를 위한 블록선도는 아래의 Fig. 10과 같고, 블록선도 내부의 요소인 3상 인버터(inverter)와 BLDC 모터는 MathWorks사의 Simcape를 이용하여 구성하였다.

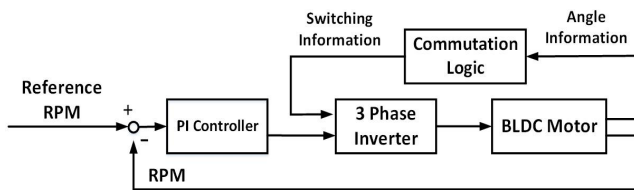
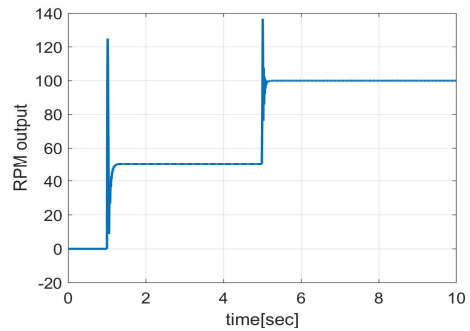


Fig. 10. Configuration of 3 phase BLDC motor.

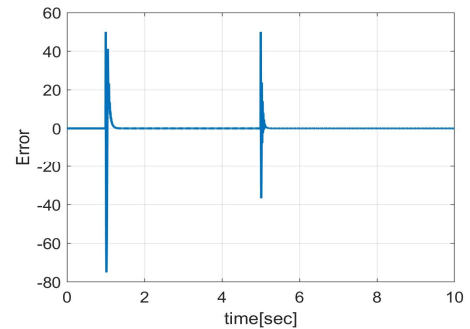
그림과 같이 블록선도는 BLDC모터의 속도치 목표값을 추종하기 위한 제어 시스템으로, 목표치(reference rpm), 오차 검출부, PI 제어기(PI controller), 3상 인버터(3 phase inverter), BLDC모터, BLDC모터 회전각도 검출부, 상전류 전환 블록(commutation logic)으로 구성되어 있다. 상전류 전환 블록에서는 BLDC모터의 회전자 회전 각도 정보로부터 3상 인버터의 스위칭 신호를 출력한다.

4.2 시뮬레이션

3장에서 설계한 직류전동기의 속도 제어기를 3상 BLDC모터의 제어에 적용하였고, Fig. 11은 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig. 11 (a)는 Fig. 5와 같은 목표값에 대한 제어 결과(출력 RPM)를 나타내고 있고, Fig. 11 (b)는 목표값과 제어 출력과의 오차를 나타내고 있다. 제어 결과로부터 목표값이 변화하는 시점 즉, 과도상태에서 출력과 오차값이 순간적으로 상승하는 현상을 보이고 있지만, 정상상태에서는 오차 없이 제어출력이 목표값에 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) Control output of 3φ BLDC motor



(b) Error value of 3φ BLDC motor control

Fig. 11. Results of 3φ BLDC motor control.

Fig. 12는 3상 BLDC모터의 상전압을 나타내고 있고, Fig. 13은 3상 BLDC모터의 선전류를 나타내고 있다. Fig. 12와 Fig. 13의 상전압, 상전류에서 보이는 것과 같이 목표값의 변화 시점인 1초와 5초에 순간적인 전압과 전류의 상승 현상과 인버터의 스위칭과 더불어 수반되는 리플을 확인할 수

있다. 이러한 리플은 토크에도 영향을 미치므로 리플 저감 방법에 관해서는 추가적인 연구가 필요하다.

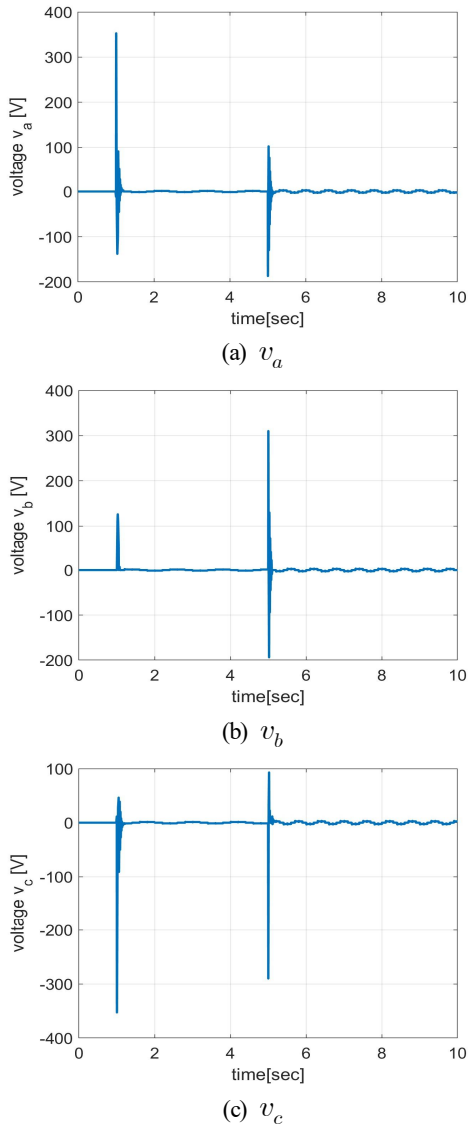


Fig. 12. Phase voltage of 3φ BLDC motor.

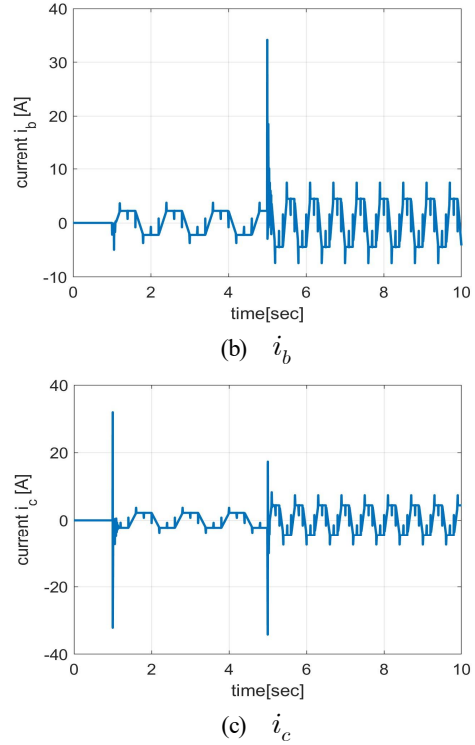
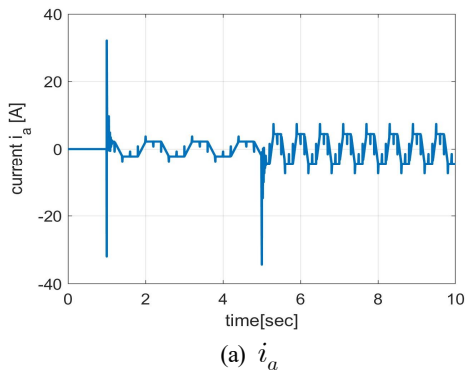


Fig. 13. Line currents of BLDC motor.

5. 결론

본 논문에서는 정류자와 브러시가 없는 기계적인 특성으로 인해 내구성과 가·감속 특성이 뛰어난 3상 BLDC모터에 대한 제어기법을 제안하였다. 이러한 3상 BLDC모터 제어를 위해서는 인버터, 회전각도 검출부, 회전자 회전각에도 따른 상전류 전환 기능을 고려하여야 한다.

이에 본 연구에서는 MATLAB의 Simulink를 활용하여 3상 BLDC모터의 제어 시뮬레이션을 위한 제어기, 3상 인버터, BLDC모터 모델, BLDC모터 회전속도 검출, 회전자 회전각에도 따른 상전류 전환 블록을 구성하였다. 아울러, 전동기의 목표회전 값(rpm)에 추종하는 제어 목적을 달성하기 위해 타 여자 직류전동기에 대한 제어기를 설계하여 설계된 제어기를 3상 BLDC모터에 적용하였다.

제어기 설계에 있어서는 계단 형태의 목표치 속도에 대한 응답 특성 결과에서 정상상태 오차를 확인하였고, 이를 개선하기 위해 근궤적법(root locus)을 적용하여 PI 제어기의 파라미터를 도출하였다.

도출된 제어기를 3상 BLDC모터의 속도제어에 적용하여 전동기 회전속도가 목표값에 수렴하는 것을 확인하였고, 이를 통해 제안한 제어기법이 유용하다는 것을 알 수 있었다.

한편, 목표값의 변화 지점에서 발생하는 피크값과 상전류

에 포함되는 리플 저감 방법에 관해서는 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 친환경 선박 전주기 혁신 기술개발사업 ‘친환경선박용 전기추진시스템 시험평가 및 무탄소연료 선박적용성 실증 기술 개발(20220631)’ 사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] Hendershot, J. R. and T. J. E. Miller(2010), Design of brushless permanent-magnet machines. Venice, FL, USA: Motor Design Books, pp. 667-680.
- [2] Kim, N. W. and C. W. Hur(2014), BLDC Motor Modelling using Matlab/Simulink Implementation, Korea Institute of Information and Communication Engineering Fall Conference Proceeding, pp. 958-961.
- [3] Kim, C. H., D. S. Sin, S. T. Lee, D. K. Kim, K. W. Lee(2010), A Low cost type fan motor driver design using the single phase BLDCM, Power Electronics Conference Proceeding, Vol. 2010 No. 11, pp. 331-332.
- [4] Kim, S. H.(2020), Motor Control, Bokdo.
- [5] Lee, H. T., H. S. Cho, J. K. Kim, J. K. Park, Y. H. Chang, J. S. Kang, J. M. Choi, and S. H. Park(2021), Development of a Hybrid-powered Knee and Ankle Prosthesis for Lower Limb Amputees Based on Brushless DC motors and Hydraulic Brakers, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 27, No. 10, pp. 769-775.
- [6] Park, S. W., Y. Ji, D. S. Kim, and S. K. Kim(2022), Steepest Gradient Technique-based Auto-Tuning Process for Active Damping Pole-Zero Cancellation BLDC Speed Controller, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 28, No. 7, pp. 469-654.

Received : 2023. 10. 10.

Revised : 2023. 10. 26.

Accepted : 2023. 10. 27.