

BLDC 전동기를 위한 고성능 전류 제어 기법

A High Performance Current Control Stratege for a BLDC Motor

김 상 훈* 김 진 용***
Kim, Sang-Hoon Kim, Jin-Yong

Abstract

In this paper, a high performance current control strategy for a Brushless DC Motor is presented. The proposed strategy is based on the ramp comparison PI current control with the predictive voltage compensation. The proposed strategy is compared with the hysteresis current control strategy. The proposed method can improve the current waveforms, and it can reduce the torque ripples. So the proposed strategy is suitable to a high performance current control strategy for a Brushless DC Motor.

The simulation and experimental results for a laboratory Brushless DC motor drive system confirm the validity of the proposed strategy.

키워드 : BLDC 전동기, PI 제어, 예측전압보상

Keywords : BLDC motor, PI control, predictive voltage compensation

1. 서론

브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor)는 구조상으로는 회전자와 영구 자석으로 된 동기 전동기와 같으나, 전력용 반도체 스위칭 소자와 회전자의 위치 센서를 통하여 정류자와 브러시를 대신하도록 하며, 회전자의 기자력과 고정자의 기자력이 일정각을 유지하도록 함으로써 직류 전동기의 운전 특성을 얻는 전동기이다. 따라서, BLDC 전동기는 정류자형 직류 전동기에서와 같이 브러시의 마멸로 인한 보수가 필요 없으면서도 정류자형 직류 전동기와 같은 우수한 제어 특성이 있다. 또한 전력용 반도체 스위칭 소자의 개발과 회로전자석의 개발에 힘입어 고속화 및 소형화가 가능하

게 되어 서보 시스템의 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. [1][2]

BLDC 전동기를 구동하기 위해서는 전류의 파형을 준 구형파로 만들어야 하며, 이를 위해서 인버터가 필요하다. BLDC 전동기의 구동 시스템은 CR-PWM VSI(Current Regulation Pulse Width Modulation Voltage Source Inverter)와 CR-PWM CSI(Current Regulation Pulse Width Modulation Current Source Inerter)가 있다. 전류원 인버터(CSI)방식은 대용량의 BLDC 전동기에 대해서는 제작이 힘들고, 빠른 전류의 변화에 부적당한 문제점을 드러낸다.[2]

CR-PWM VSI에 의한 구동방법은 여러 가지가 있으나 대표적으로 히스테리시스 비교 제어기법, 삼각파 비교 제어기법, 그리고 예측 제어기법의 3가지를 들 수 있다.[3]

BLDC 전동기의 단점으로는 전류의 전류(轉流)시 발생하는 토크 리플이다. 이상적인 BLDC 전동

* 강원대학교 전기공학과 부교수, 공학박사

*** 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정

기의 경우 전류(轉流)시 전류의 오차가 없으므로 토크 리플은 없지만, 실제 전동기의 경우 인덕턴스와 역기전력의 영향으로 인하여 토크 리플이 생기게 된다. 현재 토크 리플을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

따라서, BLDC 전동기의 전류를 얼마나 준구형파의 형태로 만들 수 있는가 하는 것이 BLDC 전동기의 제어시 하나의 관점이라고 하겠다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 전류 제어를 위하여 CR-PWM VSI에 의해서 삼각파 비교 제어기법과 예측 전압 보상을 이용하였다.

본 논문에서 제안한 전류제어기법은 BLDC 전동기의 전류 파형과 토크리플을 개선한다.

2절에서는 BLDC 전동기의 전반적인 기본 원리와 및 특성에 대해서 서술하였고, 3절에서는 BLDC 전동기의 일반적인 전류제어기법을 기술하고, BLDC 전동기의 전류 제어를 위하여 제안한 삼각파 비교 전류제어기법과 예측 전압 보상에 대한 설명과 이 기법을 적용했을 때와 일반적인 전류제어기법들과의 차이점을 기술하였다. 본 논문에 제안한 전류제어 기법의 우수성을 확인하기 위한 방법으로 시뮬레이션과 실험을 하였는데, 우선 시뮬레이션을 통해 제안한 전류제어 기법의 성능을 확인한다. 그리고, BLDC 전동기의 전류제어를 위한 전압원 인버터와 DSP 제어보드를 이용하여 얻은 실험 결과로 시뮬레이션 결과를 입증한다.

2. BLDC 전동기의 특성[4][5]

2.1 기본 원리

그림 1은 BLDC 전동기의 일반적인 전체 구성도이다. 그 주요 구성을 살펴보면 DC 링크 전압, 전압원 인버터, BLDC 전동기, 위치센서 그리고 제어회로 등으로 구성된다.

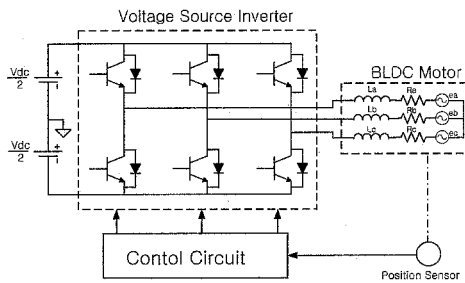


그림 1. BLDC 전동기의 전체 구성도

DC링크 전압 및 인버터는 부하에 전압을 인가하기 위한 장치이다. 부하에 필요한 전압과 주파수를 인버터가 공급한다.

위치센서 및 제어회로는 BLDC 전동기의 회전자 위치, 즉 자속을 위치센서로 인식하여 인버터의 스위치를 위치센서에 맞추어 스위치 하기 위해서 필요하다.

BLDC 전동기에서 토크 리플을 감소시키기 위해 요구되는 상전류는 120°의 준구형파이다.

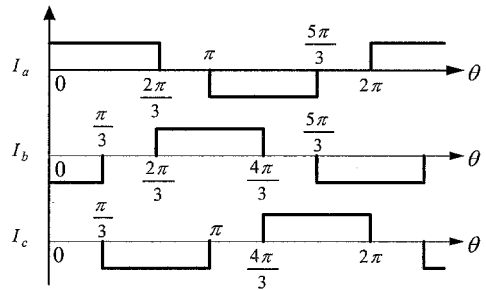


그림 2. BLDCM의 이상적인 전류파형

그림 2는 BLDC 전동기의 이상적인 고정자 전류 파형을 나타낸 것이다.

그림 3은 BLDC 전동기의 이상적인 역기전력 파형이다. 사다리꼴 역기전력은 구형 공극 자속 분포를 갖는 회전자 영구자석과 집중권 고정자 권선에 의해 만들어진다. 상전류가 폭이 120°이면 매 60°마다 상전류의 전류(轉流)를 위해 소자를 스위칭하여야 하는데, 이를 위하여 저정밀 위치센서인 홀 센서나 광전 센서가 사용된다.

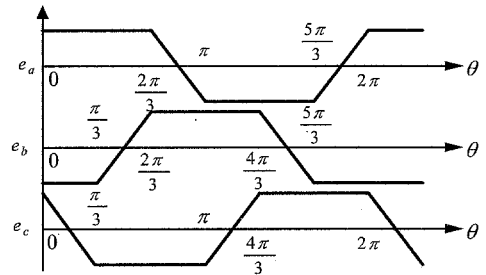


그림 3. BLDCM의 이상적인 역기전력파형

본 논문에서는 BLDC 전동기의 위치센서로 홀센서를 사용하였다.

BLDC 전동기는 고정자의 전류를 그림 2와 같이 준구형파로 제어하는 것이 관건이다. 그러나 실제 BLDC 전동기에서 인덕턴스와 매 60°마다 전류의 전류(轉流)로 인하여 그림 2와 같은 이상적인 전류 파형은 만들기 어렵다. 따라서 고정자의 전류를 그

림 2와 같이 만들기 위한 많은 기법들이 소개되고 있다. 본 논문에서도 마찬가지로 좀더 이상적인 전류 파형에 가까운 전류를 만들기 위한 기법을 제안하였다.

2.2 BLDC 전동기의 모델링[6]

BLDC 전동기의 구동 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1에서 BLDC 전동기를 보면 각 상당 R, L, 그리고 역기전력의 관계로 이루어져 있음을 알 수 있다.

BLDC 전동기의 일반적인 방정식을 세워보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + LP \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, V_{as}, V_{bs}, V_{cs} 는 각상의 상전압이고, i_a, i_b, i_c 는 각 a, b, c상의 전류, R 는 전동기의 각상 저항, L 은 전동기의 각상 인덕턴스, P 는 미분 연산자 (d/dt)이며, e_a, e_b, e_c 는 각상의 역기전력이다.

발생되는 전기적 토크식은 다음과 같다.

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

여기서, ω_m 은 각속도이다.

기계적 속도 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - T_L - B_m \cdot \omega_m}{J} \quad (3)$$

여기서, T_L 부하 토크, B_m 은 마찰계수, J 는 회전자 관성 모멘트이다.

식 (1), (2), (3)의 표현으로 BLDC 전동기를 모델링할 수 있으며, 이 모델링을 가지고 BLDC 전동기의 전류제어에 이용한다.

3. BLDC 전동기의 전류제어 기법

3.1 BLDC 전동기의 일반적인 제어기법[3]

일반적인 BLDC 전동기의 전류 제어 방법은 그림 4와 같이 히스테리시스 전류 제어기를 주로 사용하였다. 그림 4에서처럼 기준전류와 실제전류를 비교하여 그 오차를 히스테리시스 밴드 범위에서 제어하는 방법이다. 이 방법은 제어기의 설계가 간

단하고, 제어방법이 쉬운 장점이 있으나 부하의 변동에 따라 스위칭 주파수가 일정하지 않고 크게 변화하는 단점이 있다.[3]

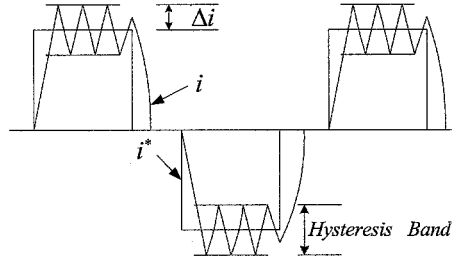


그림 4 히스테리시스 전류 제어기

3.2 제안한 전류제어 기법

(1) PI 전류제어기에 의한 제어[7]

본 논문에서 BLDC 전동기의 전류를 제어 위하여 PI 전류제어기를 이용하였다.

전동기의 관성이 커서 역기전력의 변화가 전류제어기의 응답성에 비해 충분히 느리다면 그림 5와 같이 역기전력을 상수로 보고 고정자회로의 R_a, L_a 부하를 대상으로 BLDC 전동기의 전류제어기를 설계할 수 있다. 또, 다른 방법은 역기전력을 추정할 수 있다면, 추정된 역기전력을 전류제어기의 출력에 전향 보상함으로써 그림 5의 블록 선도에서 역기전력의 영향을 상쇄시킬 수도 있다.

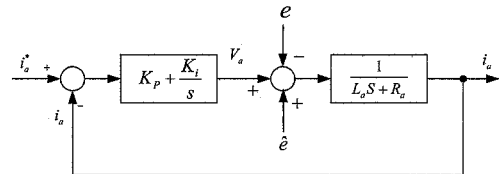


그림 5. PI 제어기의 블록 선도

이와 같이 역기전력의 영향을 배제하고 비례적분제어기의 영점(Zero)이 시스템의 극점을 상쇄하도록 설계하면 전류제어계 폐루프 응답특성을 1차 지연요소와 같이 되도록 할 수 있다. [8][9] 그림 5에서 PI 제어기를 구하면 다음과 같다.

$$G_{PI}(s) = K_{pe} + \frac{K_{ie}}{s} \quad (5)$$

$$G_{PI}(s) = K_{pe} \left(1 + \frac{1}{T_c \cdot s} \right), \quad T_c = \frac{K_{pe}}{K_{ie}} \quad (6)$$

식 (5)는 전류제어 시스템의 시정수를 도입하여 식

(6)으로 변환할 수 있다. 여기서, K_{pc} 는 비례이득이고, K_{ic} 는 적분이득이다.

그림 5에서 전류제어기의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I}{I^*} = \frac{K_{pc}s + K_{ic}}{L_a \cdot s^2 + (R_a + K_{pc})s + K_{ic}} \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있는 바와 같이 전류제어기의 이득에 따라 시스템의 특성이 달라진다. 전류제어기의 이득을 선정하는 방식은 전동기 제어 시스템의 전체 구성에 따라 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 주파수 응답 곡선을 이용한 이득 선정 방식에 의해 제어 이득을 구하였다.[3][7]

개루프 응답 곡선에서 이득이 3dB 감소되는 주파수인 교차각 주파수(cross over frequency) ω_c 는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_c = \frac{K_{pc}}{L_a} \quad (8)$$

이상의 주파수 응답 곡선을 이용한 전류제어기의 해석으로부터 다음과 같이 전류제어기의 이득을 선정할 수 있다.

$$K_{pc} = L_a \cdot \omega_c \quad (9)$$

$$K_{ic} = R_a \cdot \omega_c \quad (10)$$

비례계인과 적분계인을 선정하면, 출력전류와 전류지령치 사이의 전달함수가 다음과 같이 된다.

$$\frac{i(s)}{i^*(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} = \frac{1}{T_c s + 1} \quad (11)$$

식 (11)에서 알 수 있듯이, 전류제어기의 주파수 대역(Bandwidth)은 ω_c 로 주어진다. 그러므로 원하는 전류제어기의 주파수 대역을 결정함으로써, 오버슈트 없는 전류제어 특성을 얻을 수 있다. 실제 회로정수 ($r = \frac{L}{R}$)의 크기를 고려하면 전류제어기는 상위 속도제어계나 위치제어계에 비하여 충분히 빠른 응답 특성을 가지는 1차 지연요소로 설계할 수 있다.[8][9]

본 논문에서는 PI 제어기의 이득을 식(9)과 식(10)을 이용하여 비례이득 K_{pc} 와 적분 이득 K_{ic} 를 구하였다.

(2) 예측 전압의 보상[10][11]

앞서 설명한 PI 전류제어기를 설계하여 BLDC 전동기의 전류를 제어함에 있어 PI 제어기의 1차 지연으로 인한 전류의 지연이 있다. 이를 보상하기 위하여 전압을 미리 예측하여 이를 PWM시에 보상하는 방법을 연구하였다.

식 (1)과 같이 BLDC 전동기의 전압 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = (R + PL)I + E \quad (12)$$

샘플링 기간 동안 전압, 전류, 역기전력의 평균값은 순시적으로 공급되는 순시값과 거의 같다. 따라서, 식 (12)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \bar{V}(n), I = \bar{I}(n), E = \bar{E}(n) \quad (13)$$

식(12)에서 미분식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PI = \frac{I(n+1) - I(n)}{T} \quad (14)$$

여기서, T는 샘플링 주기이다.

식(13)과 식(14)를 사용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{V}(n) = R \cdot \bar{I}(n) + \frac{1}{T} [I(n+1) - I(n)] + \bar{E}(n) \quad (15)$$

식 (15)에서 전류와 전압의 관계가 주어진다.

$\bar{V}(n)$ 은 샘플링 포인트 n, n+1 사이의 평균 전압이다. 게다가, $I(n+1)$ 은 기준전류 $I^*(n+1)$ 로 대체될 수 있다. 따라서, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{V}^*(n) = R \cdot \bar{I}(n) + \frac{1}{T} [I^*(n+1) - I(n)] + \bar{E}(n) \quad (16)$$

식(16)에서 n번째 샘플링에서의 전류는 식(15)에서 사용한 n번째 샘플링 앞의 전압과 전류로 예측할 수 있다. 식(16)에 예측 부분을 넣으면 다음 식과 같다.

$$R \cdot \bar{I}(n) \simeq R \cdot \bar{I}(n-1) \simeq R \cdot I(n-1) \quad (17)$$

결국, 기준 전압은 다음 식과 같다.

$$\bar{V}^*(n) = 2R \cdot I(n-1) - \bar{V}(n-1) + 2E(n) + \frac{1}{T} [I^*(n+1) - I(n-1)] \quad (18)$$

식 (18)은 n과 (n+1)번째 샘플링 사이의 기준 전압을 n번째 샘플링 앞의 전압과 전류로 계산할 수 있다는 것을 보여준다. [10]

식(18)은 다시 다음과 같이 표현할 수 있다.[11]

$$\bar{V} = \frac{2R}{1 - e^{(-TR/L)}} (i^* - i e^{(-TR/L)}) + 2K_e \cdot \omega_r \quad (19)$$

여기서, \bar{V} 는 예측전압, i^* 은 기준 전류, K_e 는 역기 전력 상수, ω_r 은 속도, R 은 고정자 저항, L 은 고정자 인덕턴스이다.

그림 6은 PI 전류 제어기에 예측 전압을 더한 블록 선도이며, 본 논문에서 최종적으로 제안한 방법이다. 우선 기준 전류 i^* 와 i 를 비교하여 그 차(Err_i)를 PI 제어기의 입력으로 넣는다.

PI 제어기의 입력으로 인한 출력 V^* 를 바로 PWM 하는 것이 아니라, 식(19)를 이용하여 예측 전압을 더하여, 그 더해진 값을 PWM 하였다.

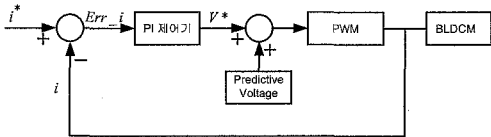


그림 6. 제안한 전류제어기법의 블록 선도

3.3 실험 결과

제안된 BLDC 전동기의 전류제어 기법의 타당성을 검증하기 위한 방법으로 시뮬레이션과 실험을 하여 제안한 전류제어기법을 확인하였다.

(1) 시뮬레이션 결과

제안한 전류제어기법을 우선 시뮬레이션으로 검증하였다. 시뮬레이션 툴은 Matlab을 사용하였고, 시뮬레이션을 위한 BLDC 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

Table 3-1. Parameters of BLDC Motor

정격출력	W	550 [W]
정격전압	V	188 [V]
정격전류	A	2.4 [A]
극수	P	4
저항	R	2.47 [Ω]
인덕턴스	L	10.09 [mH]
토크상수	Kt	0.63 [Nm/A]
역기전력상수	Ke	0.38 [V/rad/sec]

그림 7은 시뮬레이션 전체 블록 선도이다. 전체 블록 선도는 속도제어기(Speed Controller), 전류제어기(Current Controller), 예측 전압 보상기, PWM 인버터, BLDC 전동기, 엔코더로 구성되어 있다. 다음은 시뮬레이션 결과들이다.

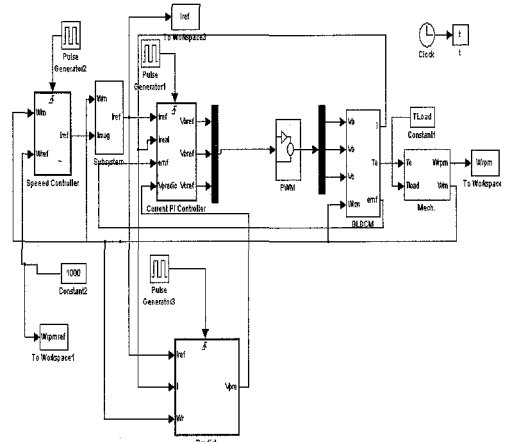


그림 7. 시뮬레이션 전체 블록 선도

그림 8과 그림9는 PI 전류제어기를 이용하여 BLDC 전동기를 제어했을 때의 전류 파형과 토크 파형이다. 속도는 1000rpm을 기준 속도로 정했다. 비례 gain과 적분 gain은 앞에서 설계한 것과 같이 계산하여 넣었다. 전류의 파형이 준구형파의 형태를 띄고 있으며, 비교적 전류 제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 하지만 준구형파에서 전류(轉流)시 파형이 찌그러짐을 볼 수 있다.

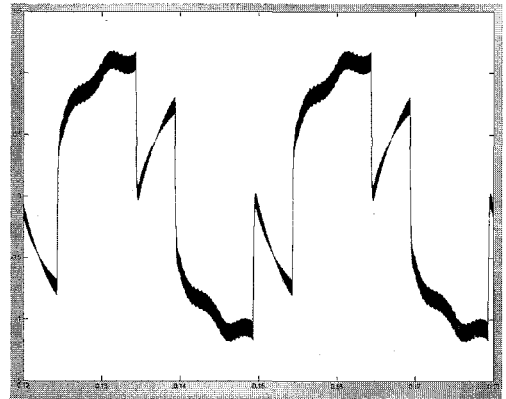


그림 8. BLDCM의 전류파형 (예측전압보상이 없을 경우)

그림 10과 그림 11은 예측 전압을 보상했을 경우의 전류 파형과 토크 파형이다. 그림에서 보듯이 이 전류 파형이 예측 전압 보상을 하지 않을 때 보다 훨씬 준구형파의 모양이고, 토크의 리플도 훨씬 적음을 알 수 있다.

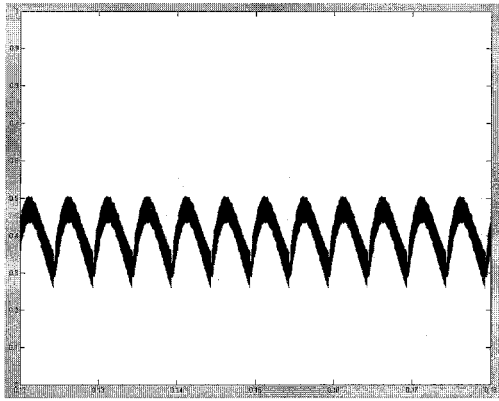


그림 9. BLDCM의 토크 리플파형
(예측전압보상이 없을 경우)

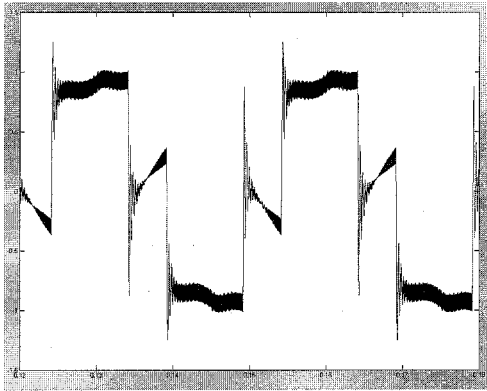


그림 10. BLDCM의 전류 파형
(예측전압보상할 경우)

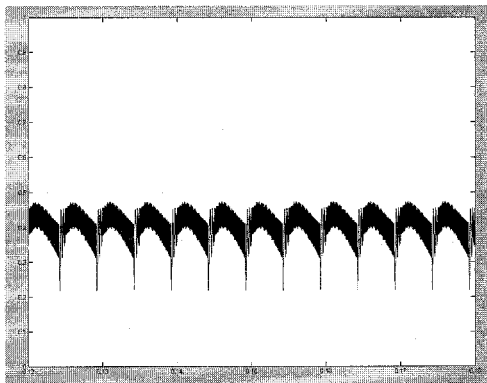


그림 11. BLDCM의 토크 리플 파형
(예측전압보상할 경우)

시뮬레이션 결과 파형에서 보였듯이 PI 전류제

어기에 예측 전압을 보상하면 훨씬 더 준구형파에 가까운 전류 파형을 얻을 수 있고, BLDC 전동기의 토크 리플도 줄일 수 있으며, 그로 인하여 속도 제어의 성능을 높일 수 있다.

(2) 실험 결과

제안된 BLDC 전동기의 전류제어 기법의 타당성을 시뮬레이션으로 검증하였고, 실험을 통해 그 타당성을 확인하기 위해 그림 12와 같은 IGBT PWM 인버터와 DSP 컨트롤러로 이루어진 시스템으로 실험을 수행하였다. 스위칭 주파수는 5[kHz]이고 직류단 전압은 300[V]이다. 제어기의 주 처리기는 TI사의 TMS320C33 DSP를 사용하였다.

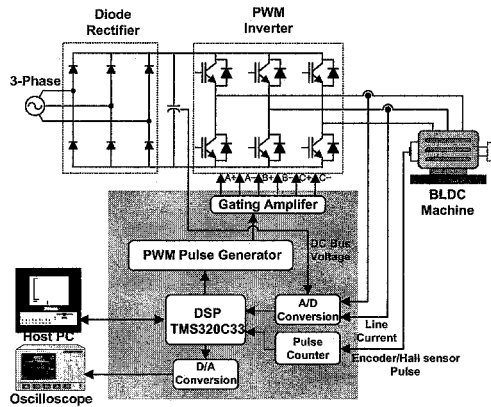


그림 12. 실험 시스템

DSP 보드를 이용하여 다음의 결과들을 얻었다.

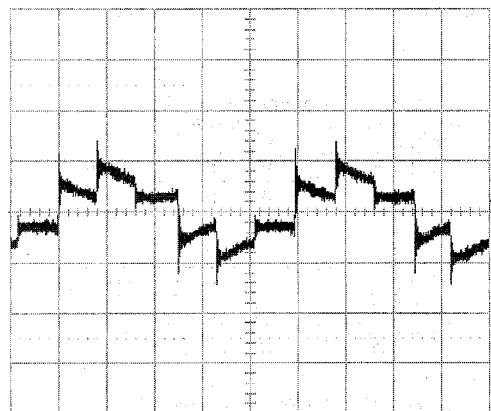


그림 13. BLDCM의 전류 파형(20ms/2V)
(예측전압보상이 없는 경우)

그림 13은 BLDC 전동기가 1000rpm으로 회전하

고 있을 때 전동기 a상의 실제 전류의 파형이다. 이 전류 파형은 전동기의 전류를 PI 전류제어기를 가지고 전류제어만 했을 때의 전류 파형을 나타내고 있다. a, b, c 각 상의 전류가 전류(轉流)될 때마다 전류에 리플이 생김을 알 수 있다.

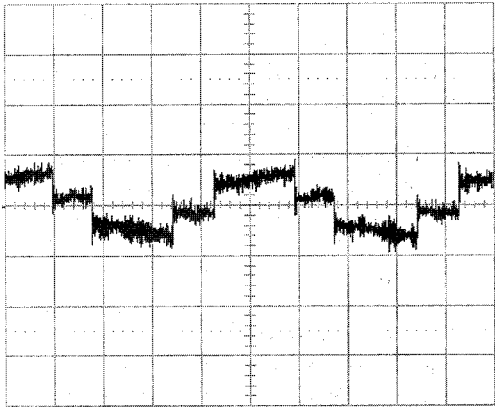


그림 14. BLDCM의 전류파형(20ms/2V)
(예측전압보상할 경우)

그림 14는 1000rpm으로 회전하고 있는 BLDC 전동기에 예측 전압을 추가했을 때의 전류 파형이다. 시뮬레이션에서 보였던 것처럼 PI 제어의 1차 지연을 보상해 주는 효과가 있다. 또한 전류 리플이 PI 제어만 했을 때보다 훨씬 작아짐을 알 수 있다.

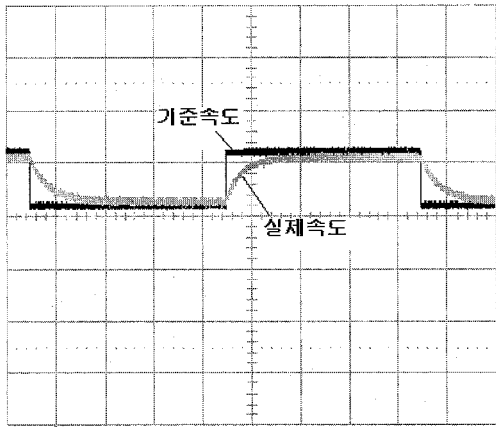


그림 15. BLDCM의 구형파제어 속도 파형

그림 15와 16은 BLDC 전동기의 속도제어시 파형이다. 그림 15는 기준 속도를 구형파로 주었을 때 실제 속도가 얼마나 잘 따라가는지를 나타내었다.

기준속도는 1000rpm에서 500rpm으로 가변하는 파형이다. 실제 속도가 기준 속도를 상당히 잘 따라가는 것을 알 수 있다.

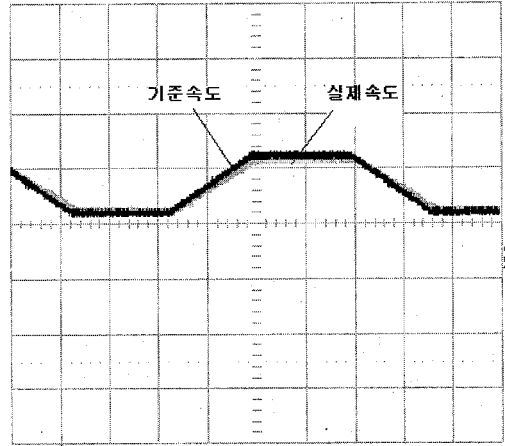


그림 16. BLDCM의 사다리꼴 제어 속도 파형

그림 16은 기준 속도를 사다리꼴로 변화 시켰을 때 실제 속도와 기준속도의 파형이다. 이때도 역시 속도는 1000rpm에서 500rpm으로 변화를 주었다. 이 파형 역시 속도제어가 잘 되고 있다는 것을 보여준다. 속도 제어 실험에서는 PI 제어기만 있을 경우나 예측전압을 보상했을 때, 두 가지 경우 속도제어가 정확히 이루어지고 있어 그 차이를 느끼기 어렵다. 그러나 시뮬레이션이나 실험에서 본 전류 파형이나 토크파형에서 보듯이 BLDC 전동기의 토크나 전류의 파형이 예측 전압을 보상한 경우에 더 좋은 파형이 나왔다. 이는 더 정밀하고, 정확한 고성능 전동기 제어를 할 경우 예측 전압을 추가할 경우 더 좋은 제어를 할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 BLDC 전동기를 제어하는 기법을 제안하였다. BLDC 전동기를 제어하기 위해서는 전류를 제어해야 하는데, 기존의 PI 전류제어와 예측 전압을 결합한 형태의 전류제어 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 BLDC 전동기의 전류를 좀더 기준전류에 가깝게 하는데 효과가 있었으며, 전동기의 토크리플을 감소하는데도 효과가 있었다. 앞의 PI 전류제어기의 설계에서도 설명하였듯이 PI 제어기는 1차 지연으로 생각할 수 있다. 그 지연으로 인해 생기는 기준 전류와 실제 전류의 차이를 예측 전압을 추가함으로써 보상할 수 있다.

본 논문에서 제안한 기법은 기존의 기법보다 복잡한 소프트웨어와 하드웨어가 필요하다. 하지만

더욱 정밀한 제어를 필요로 하는 고성능 BLDC 전동기의 속도 및 토크를 제어하기 위해서는 본 논문에서 제안한 PI 전류제어와 예측전압 보상의 방법이 전류의 파형 훨씬 좋아지고, 토크의 리플이 적었으며 더욱 정밀한 속도제어가 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] A. B. Plunkett, "A Current controlled PWM Transistor Inverter Drive", IEEE/IAS. Conf. Red, pp.785~192, Annual Meeting. 1979
- [2] Pragasen Pillay and Ramu Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 27, No. 5, pp.986~996, Sep/Oct. 1991
- [3] David Michael Brod, "Current controller for PWM inverters", Univ. of Wisconsin - Madison, 1984
- [4] Hoang Le-Huy and Robert Perret and Rene Feuillet "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-22, No. 4, pp. 748~755, July/Aug. 1986
- [5] Carstern-Sunnke Berendsen, Gerard Champenois, and Alain Bolopion, "Commutation Strategies for Brushless DC Motor : Influence on Instant Torque", IEEE Trans. on Power. Elec., Vol. 8, No. 2, pp. 231~236, April. 1993
- [6] Carstern-Sunnke Berendsen, Gerard Champenois, and Alain Bolopion, "Commutation Strategies for Brushless DC Motor : Influence on Instant Torque", IEEE Trans. on Power. Elec., Vol. 8, No. 2, pp. 231~236, April. 1993
- [7] Juan W. Dixon and Ivan A. Leal, "Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal", IEEE Trans. on Power. Elec., Vol. 17, No. 2, pp. 232~240, Mar. 2002
- [8] H. Sugimoto and etc, "Practical Aspects of Theory and Design of AC Servo System, Chapter 3.2", Motor Electronics Publications, in Japanese, 1990
- [9] V. Blasko and etc, "Sampling of Discontinuous Voltage and Current Signals in Electrical Drives : A System Approach" IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 5, pp. 1123~1130, Sep/Oct. 1998
- [10] Nobuyuki Matsui and Hironori Ohashi, "DSP-Based Adaptive Control of A Brushless Motor" IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 28, No. 2, pp. 448~454, Mar/Apr. 1992
- [11] Bojo Terzic and Martin Jadric, "Design and Implementation of the Extended Kalman filter for the Speed and Rotor Position Estimation of Brushless DC Motor" IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 48, No. 6, pp. 1065~1073, Dec. 2001