전기자전거의 BLDC 구동제어시스템 설계 및 구현

조성남*, 손영대*, 김철진**
동서대학교*, 한라대학교**

Design and Implementation of BLDC Drive Control System for Electric Bicycle

Sung-Nam Cho*, Young-Dae Son*, Cherl-Jin Kim**
Dongseo University*, Halla University**

Abstract - 본 논문에서는 전기자전거에 응용할 수 있는 BLDC 전동기의 구동제어시스템을 설계하였으며, 시뮬링크를 이용한 시뮬레이션을 통해 BLDC 전동기와 그 구동제어시스템의 특성파악을 수행 하였다, 모터 컨트롤 전용 16비트 마이크로컨트롤러인 dsPIC30F3010을 탑재하여 시스템을 설계하였으며, 2상 여자 제어법을 적용하여 6-스텝 인버터를 구동하고, PID 연산을 수행, 속도제어 방법을 통하여 전기자전거에 사용할 수 있는 BLDC 전동기의 구동제어시스템을 구현 하였다.

1. 서 론

최근, 에너지 고갈문제와 유가상승으로 인한 대체에너지의 필요성이 급증 하고 있으며, 심각한 환경오염을 줄이기 위하여 친환경적인 제품이 주를 이루어 생산되고, 시장의 규모가 점차 확대되어지고 있다. 이러한 제품 중의 하나인 전기자전거와 전기바이크는 기존의 운송수단인 자동차나 바이크, 자전거에 비하여 저소음, 저공해라는 장점과 이동거리 당 낮은 에너지 비용, 보험료, 운전면허증, 등록비, 주차료, 교통흐름의 개선 등의 경제적인 이유로 중국, 일본, 유럽 등의 시장에서 개인용 근거리 운송수단으로서 큰 활성화를 보이고 있다, 그리고 전기자전거에 주로 사용되는 BLDC 전동기는 일반 전동기에 비하여 소음이 적고 효율이 높으며, 광범위한 속도범위를 가지는 장점이 있다. 여러 장점에도 불구하고 과거 전동기 자체의 설계비용과 구동시스템의 설계비용이 높아 사용의 한계를 가졌으나, 최근 전력용 반도체소자 분야와 마이크로컨트롤러 분야의 기술발달로 저가의 비용으로 설계가 가능하게 되었으며, 모터제어 전용 마이크로컨트롤러의 기능을 이용하여 간단한 제어만으로도 효율적인 구동이 가능하게 되었다. BLDC 전동기는 다양한 활용성과 고효율적인 특성으로 인하여 그 응용 분야가 점차 성장 해가고 있으며, 여러 선진국에서 전기자전거와 전기스쿠터, 전동보드, 하이브리드 전기자동차, 선박용 발전시스템 등으로 응용 생산되고 있다. 본 논문에서는 이러한 BLDC전동기의 특성을 파악하고 장점을 살려 전기자전거용 BLDC전동기의 구동제어시스템을 설계하였으며, DSP엔진을 탑재한 dsPIC30F3010 16비트 마이크로컨트롤러를 이용한 2상 여자방식의 Upper Switch PWM제어를 이용하여 6-스텝 인버터를 구동하였으며, 홀 센서의 신호를 감지하고, 회전자의 위치를 측정하여 PID속도제어 방법을 구현하였다.

2. 전기자전거 구동제어시스템

2.1 BLDC 전동기의 개요

흔히 BLDC 전동기라 불리는 Brushless 전동기는 그 이름에서 알 수 있듯이 전동기의 내부에 기구적인 브러시 장치를 가지고 있지 않은 전동기를 말한다. 따라서 BLDC 전동기는 내부에 기구적인 브러시를 가지고 있지 않기 때문에 전기적인 방법으로 정류(Commutation)를 수행해주어야 하는 특징을 가지고 있으며, 일반적으로 가격과 성능 면에서 우수한 홀 센서를 이용하여 회전자의 위치를 파악하고, 그에 따른 회전자의 위치를 측정하여 전동기를 구동시킨다. 또한, BLDC 전동기는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 광범위한 동작 속도 범위 (수십~수만[rpm])
- 속도-토크 특성 우수
- 뛰어난 동적 특성
- 고효율(낮은 소비전력)
- 저소음
- 내구성 (상대적으로 긴 수명)

BLDC 전동기는 다른 전동기와 비교했을 때 수십에서 수만[rpm]에 달하는 광범위한 동작 속도 범위를 가지고 있어 전동기 자체의 응용이 용이하며, 속도-토크 특성이 우수하여 그 활용도 또한 높은 편이다. 회전자가 영구자석으로 되어 있어 뛰어난 동적 특성을 가지며, 낮은 소비전력을 가지면서도 우수한 효율을 가진다. 그리고 소음이 적으며, 브러시의 교체가 필요 없어 유지 및 보수가 용이하여 수명이 반영구적이면서도 신뢰성이 높다. 그럼에도 불구하고 전동기 자체의 비용과 전력용 반도체 소자의 높은 비용으로 사용의 한계를 가졌으나 최근에 들어 반도체 분야와 마이크로컨트롤러 분야의 기술이 발달함에 따라 그 시너지 효과로 설계비용이 감소하고, 전동기의 구동제어가 간단해 BLDC 전동기의 활용이 용이해져 가정용 전기기기, 산업용기기등 여러 응용분야에서 그 쓰임새가 증가하고 있다. 본 시스템에서도 마이크로컨트롤러의 간단한 제어를 통하여 전동기의 제어를 수행할 수 있었다.

2.2 BLDC 전동기의 구동원리

2.2.1 BLDC 전동기의 회로방정식과 발생토크

그림 2.에서 3개의 권선에 대한 회로방정식은 다음과 같으며, 모든 권선의 고정자저항은 같고, 제형파의 역기전력을 가지며, 회전자의 인덕턴스는 변하지 않는다고 가정 하였다.

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

식 (1) BLDC 전동기의 전압방정식

그리고 발생하는 토크에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_m} \qquad \text{식(2)}$$

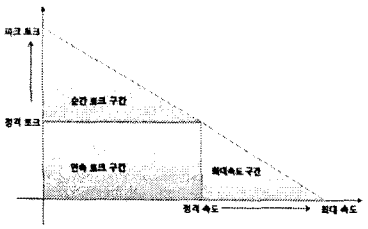

그림 1. BLDC 전동기의 속도-토크 특성

2.2.2 2상 여자방식 PWM 제어

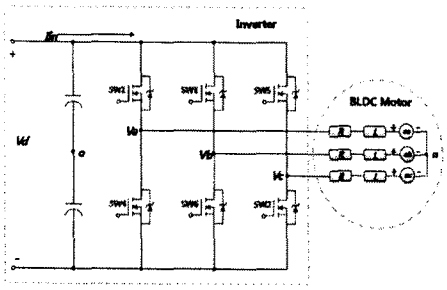

그림 2. BLDC 전동기의 등가회로와 인버터 회로

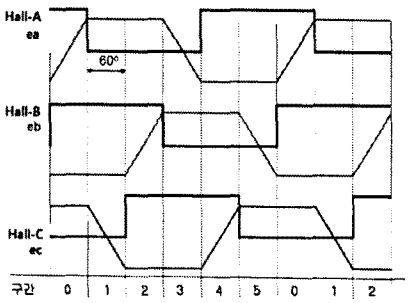

그림 3. BLDC 전동기의 홀센서 신호와 역기전력 파형

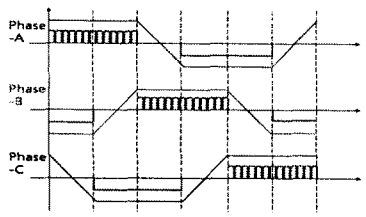

그림 4. 6-스텝 인버터의 Upper Switch PWM 제어

BLDC 전동기는 내부에 기구적인 브러시를 가지고 있지 않는 대신 회전자의 위치를 파악하기 위하여 홀 센서를 사용한다. 그림 3은 일반적인 BLDC 전동기의 홀 센서에서 발생 되는 신호와 역기전력 파형을 나타낸 것이며, 이를 통하여 회전자가 1회전 하기 위해 60° 간격으로 6개의 구간으로 나누어 지는 것을 알 수 있다. 본 시스템에서는 그림 2.의 6-스텝 인버터에 MOSFET의 On/Off 구간을 총 6개로 구분하여 3개의 권선 중 2개의 권선에 전류를 흘려주는 2상 여자 방식을 이용 하였으며, Upper Switch PWM 제어를 통해 구현 하였다. 그리고 스로틀 액슬레이터 내부에 내장된 홀 센서의 전압가변 방식을 입력 값으로 받아 ADC연산을 수행하여 PWM의 듀티비를 증가 또는 감소시켜 전동기의 속도 가속 및 감속을 제어하였다.

2.3 BLDC 전동기 구동제어시스템

2.3.1 하드웨어 구성

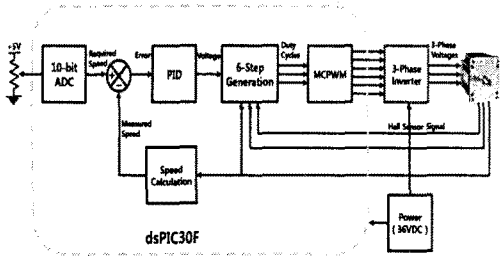

그림 5. BLDC 전동기 구동제어시스템의 주요 구성도

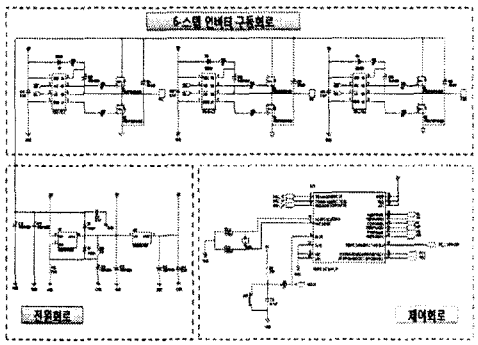

그림 6. 주요부 회로도

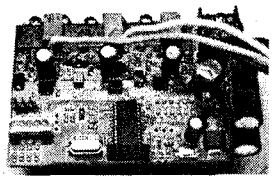

그림 7. 실제 제작 된 BLDC 구동제어시스템

본 시스템에서는 크게 전원회로(36VDC)와 인버터 구동회로, 16비트 마이크로컨트롤러를 이용한 제어회로의 3부분으로 구성하였다. 직류 전원으로 Lead-Acid 배터리(36V/12Ah)를 사용 하였으며, 16비트 마이크로컨트롤러는 모터제어 PWM모듈(MCPWM)이 탑재 된 마이크로칩사의 모터전용 컨트롤러 dsPIC30F3010을 사용하여 제작 하였으며, PID 제어법을 사용하여 전동기의 속도를 제어 하였고, 앞서 설명한 Upper Switch PWM제어를 이용한 2상 여자방식을 적용하여 인버터를 구동 하였다.

2.3.2 소프트웨어 개발시스템 및 구성

본 시스템에서는 프로그래밍 환경과 디버거 환경을 제공하는 Microchip MPLAB ICD2와 PICDEM MC LV Motor Control Development TargetBoard를 이용하여 개발환경을 구축하였으며, C-컴파일러는 MPLAB C30을 사용하여 시스템의 개발을 수행 하였다.

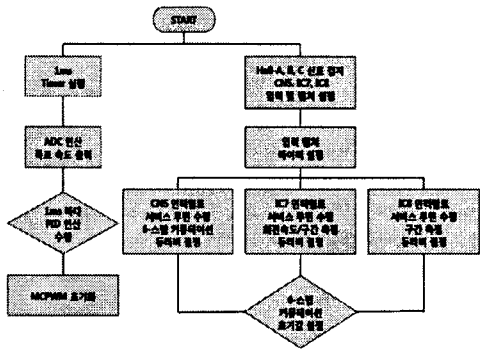

그림 8. 주요 소프트웨어 알고리즘 순서도

그리고 dsPIC30F3010에 내장된 MCPWM 모듈을 이용하여 Upper Switch PWM 방식으로 인버터를 구동하였다. dsPIC30F3010 마이크로컨트롤러에는 6개의 MCPWM 모듈을 내장하고 있으며, 그림 2.에서 상위의 SW1은 1H, SW3은 2H, SW5는 3H 그리고 하위의 SW4는 1L, SW6은 2L SW2는 3L이라고 보았을 때, MCPWM 핀의 설정 방법은 다음과 같이 제어 하였다.

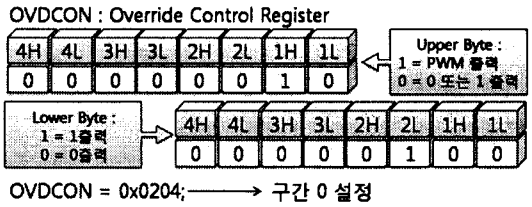

그림 9. MCPWM 핀 출력 설정 예 (그림 3. 구간 0)

이렇게 구간과 구간별 기능 설정이 끝나면 입력된 스로틀 액슬레이터의 변화를 입력으로 받아 ADC연산을 수행하여 그림 4.의 PWM 발생 구간의 듀티비를 증가, 감소시켜 전동기의 속도 가변을 구현 하였다. 그리고 또 하나의 장점으로 MCPWM 기능을 이용하면은 본 시스템에서 사용한 Upper Switch PWM제어뿐 아니라 사용자의 응용분야와 선택에 따라 Lower Switch PWM제어와 Bipolar PWM제어 등의 구동이 간단하다는 장점을 가진다. 그리고 전동기가 회전할 때 발생되는 홀 센서의 위치 신호를 측정하여 6개의 인버터 구동 구간을 검지하고, 홀 센서B 신호의 주기를 측정하여 IC7번 핀에 입력을 받아 1ms 마다 PID 속도제어 연산을 수행 하였다.

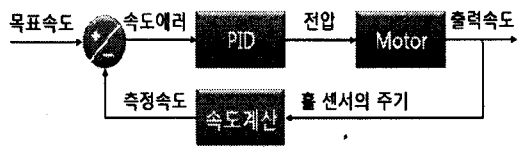

그림 10. PID제어 시스템 구성도

$$Control\ Output(T) = Control\ Output(T-1) + K_1 * Error(T) + K_2 * Error(T-1) + K_3 * Error(T-2) \quad \text{식(3)}$$

- $K_1 = Kp + Ki + Kd$
- $K_2 = -Kp - 2Kd$
- $K_3 = Kd$

식(3)은 PID 제어기 출력과 에러항목으로 정리한 것 이며, dsPIC30F3010에서는 PID 라이브러리를 제공하여 foodPID 함수를 이용하해 구현할 수 있으며. 라이브러리 추가와 간단한 명령어만 으로도 제어하기가 간단하다. 그리고 실수 형 연산을 DSP 엔진의 40비트 Accumulator 곱셈 연산자인 MAC 연산을 이용하여 매우 빠르게 연산하여 그 결과 값을 반환하여 주는 기능도 가지고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 장점과 특성을 파악하고, 전기자전거에서 사용할 수 있는 BLDC 전동기의 구동제어시스템을 설계 하였다. 본 시스템에서는 16비트마이크로컨트롤러인 dsPIC30F3010을 사용하였으며, MCPWM 모듈을 이용하여 회전자가 회전할 때 발생되는 홀 센서의 신호와 전동기에서 발생되는 역기전력파형을 분석하고, 60° 간격으로 구간을 나누어 Upper Switch PWM 제어 방법을 이용하여 6-스텝 인버터의 구동을 구현 하였으며, 전동기의 2개의 권선에 전류를 흘려주는 2상 여자 제어를 수행하여 전동기를 구동 하였다. 그리고 BLDC 전동기는 일반 DC 전동기에 비하여 속도-토크 특성이 우수 하여 효율적 측면에서 뛰어난 장점을 가지고 있으면서도 그 제어가 어려워 사용에 불편함이 있었으나 본 시스템에서는 모터전용컨트롤러를 이용하여 간단한 제어만으로 인버터의 구동과 PID 속도제어를 수행하여 BLDC 전동기의 강점을 충분히 살렸다. 최근, 환경오염과 유가상승 및 에너지 고갈문제가 심각하며, 자동차등의 장거리 이동수단이 발달한 반면 근거리 개인용 이동수단이 부족한 우리나라의 환경에서 전기자전거는 충분한 효과를 기대할 수 있을 것이다. 그리고 현재 일본과 중국 유럽등지에서 전기자전거 및 전기스쿠터를 생산하고 있지만, 우리나라의 제품이 가격의 경제적인 측면과 뛰어난 성능을 인정받아 우리나라와 외국 시장에서의 성장률이 크게 증가하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 본 연구에서 제시한 전기자전거용 BLDC 전동기 구동제어시스템은 비교적 낮은 제작비로 설계가 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 전기자전거 뿐만 아니라 전기바이크, 전동스쿠터등 그 응용분야와 기대효과가 크다고 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] MICROCHIP, "dsPIC30F Family Reference Manual"

[2] MICROCHIP, "MPLAB C30 C Compiler User's Gu id e"

[3] 서한석, 최영섭, "마이크로칩 마이크로컨트롤러 응용 모터 컨트롤", 2008.

[4] B.K. Lee, MEHRDAD EHSANI, "Advanced Simul a tion Model for Brushless DC Motor Drives", Elec tric Power Components and System, EMP 31(9), #6709, 200 3