

CPLD활용 E-bike 구동제어시스템 시뮬레이션 및 실험

조성남, 최진욱, 손영대
동서대학교

Experiment with the simulation of E-bike Drive System

Sung-Nam Cho, Jin-Wook Choi, Young-Dae Son
Dongseo University

Abstract - 본 논문에서는 CPLD를 활용하여 E-bike에 장착 가능한 독립여자권선 영구자석 전동기 구동제어시스템의 설계에 관한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. E-bike에서 독립여자권선 영구자석 전동기의 적용은 고가의 구동제어시스템으로 인하여 사용에 제한을 가지고 있다. 이러한 문제점의 보완을 위해 고가의 전동기 구동 전용 마이크로컨트롤러의 사용 대신 원칩 마이크로컨트롤러와 CPLD를 활용한 PWM 로직 발생회로를 구현하였으며, 3상 인버터로 구성 된 구동제어시스템을 설계 하였다. 또한 최적 설계를 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, PI 전류제어를 적용하여 속도-토크 범위가 넓고 여러 우수한 장점을 가진 독립여자권선 영구자석 전동기의 효율 개선을 목표로 하였다.

1. 서 론

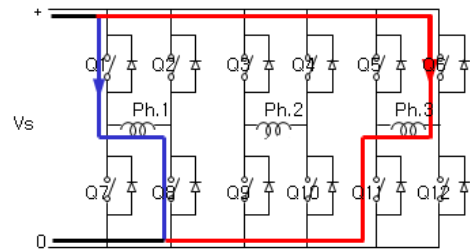
최근, 유가상승 문제와 심각한 환경오염 문제로 인하여 세계적으로 친환경 및 그린에너지 기술 분야가 발달하고 있다. 이에 따라 자동차의 의존도가 서서히 감소하고 있는 추세인 반면 전기자동차 및 전기자전거에 대한 관심은 급격하게 높아지고 있다. 그리고 전기를 이용한 운송수단의 기술개발이 다양한 분야에서 이루어지고 있으며, 그 시장의 규모역시 활발하게 증가되고 있다. 이러한 배경을 통해 볼 때 유가상승에 따른 경제적인 문제나 환경오염 문제에 대처하여 전기자전거는 현대인들이 이용할 수 있는 친환경적인 근거리 운송수단으로써 최근 괄목할 만한 성장 추세에 있다고 볼 수 있다. 이와 같이 전기자전거의 수요가 확대일로에 있는 배경은, 이동거리 당 낮은 에너지 비용(자동차에 비해 1~2%), 보행로, 운전면허증, 등록비, 주차료, 교통호흡의 개선, 환경친화성 및 탑승자의 건강에 있어서 많은 장점이 있기 때문이다. 또한 미국과 유럽, 일본, 중국, 한국 시장을 볼 때 전 세계의 300개 이상의 주요 제품들이 생산되고 있으며, 각각 다양한 전동기 및 구동방식 등과 관련한 제품기술 현황 및 특성을 가지고 있다. 일반적으로 E-bike에 사용되는 전동기는 일반 전동기에 비하여 상대적으로 효율이 좋고 수명이 긴 Y-결선 타입의 3상 BLDC 전동기를 채택하여 사용하고 있으나 사용 전력 대 낮은 에너지 효율로 인한 등판능력 저하, 결상시의 기동 불가 등의 여러 문제점을 가지고 있다. 이에 비하여 독립여자권선 영구자석 전동기의 경우 Y결선 3상 BLDC 전동기보다 토크특성이 우수하고, 높은 출력효율을 가진다. 하지만 이런 여러 장점에도 불구하고 독립여자권선 영구자석 전동기의 구동제어시스템은 설계비용이 높음에 따라 전기자전거에 장착이 불리하였다. 본 시스템에서 사용된 전동기는 Spoke타입 독립여자권선 영구자석 전동기로서 소형·경량이고, 토크특성이 우수하고 출력 효율이 높아 넓은 속도제어 범위에서 고효율을 유지할 수 있고 결상 시에도 운전이 가능하다는 장점을 가진다. 본 연구는 이러한 장점을 살려 전기자전거용 구동제어시스템에 사용이 가능할 수 있도록 설계비용을 낮추기 위하여 저가형 마이크로컨트롤러를 사용하였으며 CPLD를 활용한 PWM 로직회로를 설계하여 12개의 파워 스위치로 구성된 3상 인버터의 구동신호를 제어하여 독립여자권선 영구자석 전동기를 적용한 전기자전거용 구동제어시스템을 구현하였다. 본 논문은 2.1의 독립여자권선 영구자석 전동기의 특성 및 구동원리, 2.2의 구동제어시스템, 2.3의 시뮬레이션 및 실험 결과, 3의 결론으로 총 4개 부분으로 구성하였다.

2. 본 론

2.1 독립여자권선 영구자석 전동기의 특성 및 구동원리

최근, 전기자동차 또는 전기자전거 시스템에 Y결선 BLDC 전동기나 소형이며 영구적인 수명을 가지는 SRM이 활발히 적용되고 있다. 또한 독립여자권선 BLDC 전동기는 기존의 Y결선 BLDC 전동기에 비하여 두 배의 상전압을 가지고 있어 최대전류를 증가시킬 수가 있다. 따라서 기존의 Y결선 BLDC 전동기 보다 최대토크가 높고, 전류제어를 통하여 상전류의 맥동을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서는 기존의 Y결선 BLDC 전동기나 SRM을 대신할 수 있는 새로운 형태의 전동기

즉, SRM의 독립여자권선과 BLDC 전동기의 회로류 영구자석(IPM)을 모두 가지고 있는 Spoke 타입의 독립여자권선 영구자석(IEWPM: Independently Excited Winding Permanent Magnet) 전동기를 전기자전거 시스템에 적용하기 위한 구동제어기 설계를 수행하였으며, 그림 1에서 알 수 있듯이, 구동 인버터는 총 12개의 파워 스위치로 구성되며 구간별 두 개의 상만 도통하는 2상 여자방식과 상하의 스위치 모두 PWM 파형으로 구동되는 바이폴러 PWM 방식을 사용하였다.



<그림 1> Spoke 타입 IEWPM 전동기의 구동 인버터

독립여자권선 3상 영구자석 전동기는 각 상의 권선이 독립적으로 구성되어 전원 단에 병렬로 연결되어 있으며, 기존의 3상 BLDC 전동기의 구동방식과는 달리 각 상을 독립적으로 구동할 수 있고 구형파나 정현파 구동 시 통전각을 0°~180°까지 구동 가능하므로 3상 중 특정 한 상의 권선이나 스위칭 소자에 이상이 발생했을 경우에도 2상만으로 안정적인 운전이 가능하다. 그러므로, 이 전동기를 전기자전거 구동시스템에 적용할 경우, 한 상의 사고 시에도 안전한 곳으로 나머지 상의 운전만으로 이동할 수 있는 장점이 있다. 또한, 직류 입력전압이 각 상에 분배되지 않고 전부 인가되므로 동일한 전압에서도 Y결선 방식에 비해 상당 역기전력을 증가시킬 수 있어 고 효율화와 소형·경량화가 가능하다. 특히, 전류위상각(진상각) 제어뿐만 아니라 통전각(여자폭) 제어가 가능하므로 고효율 및 토크리플 저감을 위한 제어변수가 증가하는 장점을 갖고 있다. 표 1은 본 시스템에 사용된 IEWPM 전동기의 제원을 나타낸다.

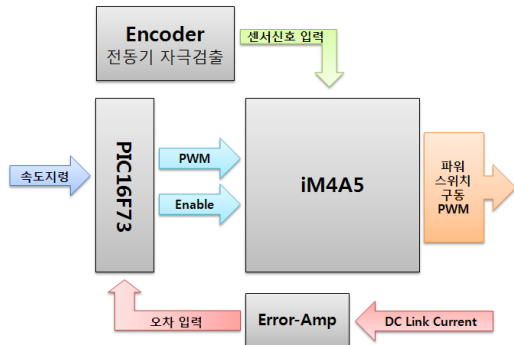
<표 1> IEWPM 전동기 제원

구동전압	48[V]
상저항	0.6[Ω]
출력	500[W]
전동기 외경	117[mm]
전동기 축방향 길이	138[mm]

2.2 구동제어시스템

전기자전거 시장의 규모가 증가됨에 따라 구동제어시스템의 설계 비용절감 또한 중요한 과제이다. 본 시스템에서는 주요부품의 높은 단가로 인한 설계비용의 증가 이유로 기존의 Y결선 3상 BLDC 전동기 보다 특성이 우수하지만 전기자전거에서 사용이 불리하였던 독립여자권선 영구자석 전동기의 구동제어시스템의 설계비용을 절감하였다. 본 시스템에서는 Flyback 타입의 SMPS를 이용하여 전원 부를 설계하였고, 저가형 원칩 마이크로컨트롤러인 PIC16F73을 이용하여 기본적인 제어 부를 구성하였으며, iM4A5 CPLD를 활용하여 PWM 발생 로직을 설계하여 12개의 IGBT로 구성된 3상 인버터 구동에 필요한 구동 신호를 발생시켰다. 이러한 설계 기법은 독립여자권선 영구자석 전동기의 구동원리에 따라

최소 12개의 PWM 로직을 가지는 마이크로컨트롤러를 사용하여 설계된 구동제어시스템 보다 설계비용을 절감할 수 있다. 또한 추가적으로 DC 링크단의 전류를 검출하여 비교회로를 통한 오차를 계산하여 PI 전류제어를 구현하여 전동기의 속도를 안정적으로 제어하였다. 그림 2는 본 시스템의 주요 동작과 신호의 흐름을 간단하게 나타내었다.

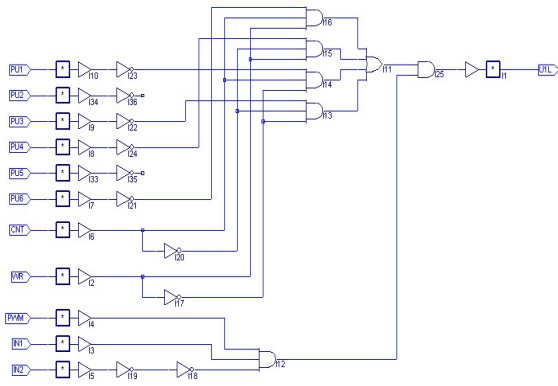


〈그림 2〉 구동제어시스템의 주요 동작과 신호의 흐름

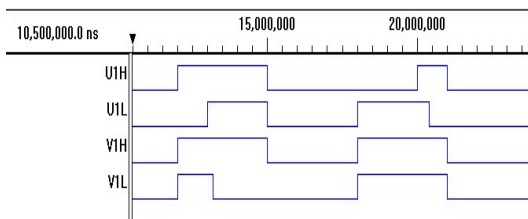
본 논문에서 연구되어진 시스템의 동작원리를 살펴보면 우선으로 속도지령이 입력되어지면 PIC16F73에서 AD 연산을 수행한 뒤 iM4A5의 PWM 로직에 필요한 구동신호와 PWM을 출력하여 준다. 다음으로 이렇게 입력 받은 신호와 엔코더에서 발생한 6개의 센서신호는 iM4A5에서 처리되어 3상 인버터의 IGBT 구동에 필요한 PWM을 출력한다. 그리고 여러 애플리케이션에서는 시스템이 구동될 때 DC 링크 단에서 발생하는 전류를 검출하여 입력신호로 사용하여 오차를 계산한 뒤 이것을 PIC16F73에서 속도지령에 적합한 신호를 발생시켜 전류제어를 수행하였다. 본 시스템에서의 개발환경은 PIC16F73의 개발을 위해 MPLAB ICD2와 MPLAB IDE를 이용하였으며, iM4A5의 개발을 위해 ispLEVER Classic을 이용하였다.

2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에서는 DC 48[V]의 전압을 시스템의 구동전원으로 사용하였으며, 속도 가변에 따른 CPLD의 정확한 처리 동작을 확인하기 위하여 ispLEVER Classic 소프트웨어에 기본으로 내장된 Waveform Viewer를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 12개의 파워 스위치 구동신호를 발생하는 PWM 로직 중 하나를 나타내었다.



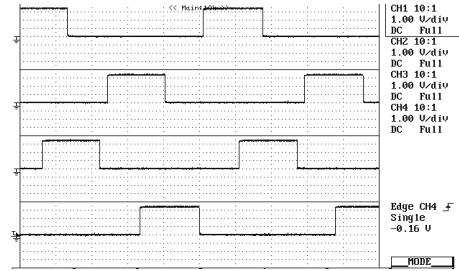
〈그림 3〉 PWM 로직의 기본 구성



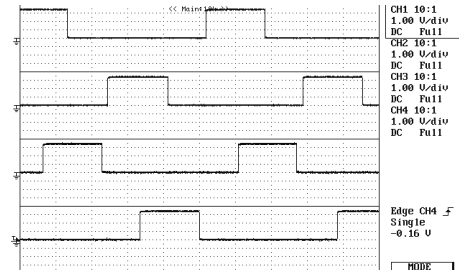
〈그림 4〉 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 PWM 발생 로직을 설계하였으며, 이를 바탕으로 12개의 파워 스위치로 구성된 3상 인버터를 제어하였

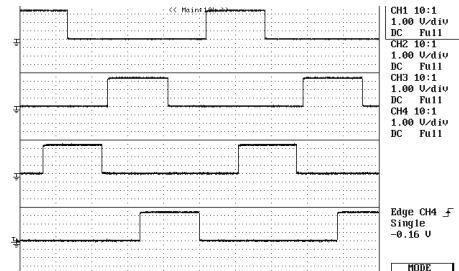
다. 이러한 방법은 설계비용 및 제품의 단가를 낮추어 독립자권선 영구자석 전동기를 E-bike에 적용을 가능하게 하였다. 또한 CPLD를 활용한 구동제어시스템은 가격이 저렴하다는 장점을 살려 다양한 전동력 응용분야에서 그 활용도가 높다고 볼 수 있다. 그림 5는 PI 제어 및 진상 각 제어를 통한 최종시스템에서의 3상 인버터 구동 신호를 측정한 결과이다.



(a) UIH, UIL, VIH, VIL의 파형



(b) W1H, W1L, U2H, U2L의 파형



(c) V2H, V2L, W2H, W2L의 파형

〈그림 5〉 실제시스템에서의 3상 인버터 구동 신호

3. 결 론

본 논문에서는 3상에서 다상으로 쉽게 확장이 가능하고, Spoke 타입의 영구자석을 매입하여 회전자 단위의 단원자적 당 전자기적 토크 증가가 가능한 IEWPM 전동기를 적용한 E-bike용 구동제어시스템을 설계하였다. Y결선 3상 BLDC 전동기는 속도 범위가 넓고 유지 보수가 용이하여 E-bike에서 주로 이용되고 있다. 이에 반해 독립자권선 영구자석 전동기는 기존의 Y결선 3상 BLDC 전동기보다 속도-토크 특성이 월등하게 우수하다는 장점을 가지고도 고가의 설계비용으로 인해 사용에 제한을 가졌다. 본 시스템은 독립자권선 영구자석 전동기의 설계비용이 높다는 단점의 보완을 위하여 저가형 원칩 마이크로컨트롤러를 사용하여 기본적인 제어를 담당 하게하였으며, CPLD를 활용하여 3상 인버터 구동에 필요한 PWM 발생 로직을 구현하여 시스템의 저가화를 도모하였다. 본 시스템에서 사용된 IEWPM 모터와 구동제어시스템은 제어가 간단하여 특히 속도 또는 토크 제어가 요구되는 적용분야에서 우수한 동작특성을 가지며, 설계비용의 절감을 통하여 전동력응용분야에서 다양하게 활용이 가능할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] Kwan-Jun Jo and Jin-Seok Oh, "Characteristic Analysis of Independent 3 phase BLDC Motor," The Trans. of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.12, No.4, pp.277~284, Aug. 2007.