

논문 2017-54-6-16

Cadence Sensing 방식의 전기자전거를 위한 정밀 토크제어 컨트롤러 설계

(Design of Precise Torque Controller for Electric Bicycle with Cadence Sensing Drive System)

이 주 연*, 김 대 순*, 이 종 하**, 송 제 호**

(Juyeon Lee[Ⓒ], Daesoon Kim, Jongha Lee, and Jeho Song)

요 약

본 논문에서는 전기자전거의 정밀 토크제어를 위하여 새로운 토크제어 방식을 제안하고 구현한다. 트로틀 노이즈를 제거하기 위한 이동 평균 필터를 채택함으로써 256 단계의 세분화된 트로틀 단계로 전기자전거의 제어가 가능하다. 설계된 컨트롤러는 전기자전거에 장착 실험되어 기존의 Cadence 감지 컨트롤러 대비 개선된 선형 제어특성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a novel torque control scheme is proposed and implemented to handle the torque level of ebike precisely. By adopting moving average filters to eliminate throttle noise, ebike driver could control throttle level on wide span of 256 steps. Designed controller is plugged into ebike and tested to demonstrate it's linear control incomparable to conventional cadence sensing controller.

Keywords : Electric bicycle, Cadence sensing, Throttle mode, Pedal assist system mode, Torque controller

I. 서 론

전기자전거는 일반 자전거의 바퀴 허브 등에 직류모터를 장착하고 동력을 보조하는 기능을 하여 평지 및

오르막길에서의 쾌적한 주행을 가능하게 한다. 전기자전거의 운전자는 트로틀(Throttle)모드와 PAS(Pedal Assist System)모드의 두 가지 방법을 선택적으로 사용하여 전기자전거에 구비된 직류모터의 동력보조 정도를 제어할 수 있다.^[1] 트로틀 모드는 오토바이에 사용되는 트로틀 레버와 유사한 기능을 하며 전기자전거 핸들 바에 장착되고 당기거나 풀어주는 등의 동작을 통하여 전기자전거의 보조동력기능을 하는 직류 모터의 토크 값을 가변시키는 역할을 한다. PAS 모드에서는 전기자전거 운전자가 페달링 동작을 통하여 모터의 출력을 제어하며 페달링 시에 크랭크축의 회전을 감지하는 Cadence 센서를 통하여 전기자전거에 구비된 직류모터의 동력보조에 대한 토크의 크기를 제어할 수 있다.^[2] Cadence 센싱 방식의 모터 구동 시스템은 현재 가장

* 정회원, 제이라이텍 (J_LITECH)

* 정회원, 전주비전대학교 디지털전자정보과 (Department of Digital Electronics & Information, VISION University of Jeonju)

** 정회원, 전주비전대학교 디지털전자정보과(Department of Digital Electronics & Information, VISION University of Jeonju)

** 정회원, 전북대학교 IT응용시스템공학과 (Division of Convergence Technology Engineering, CHONBUK National University)

Ⓒ Corresponding Author (E-mail : jyscgo@daum.net)

Received : January 19, 2017 Revised : April 5, 2017

Accepted : May 16, 2017

대중적인 전기자전거 제어 시스템으로서 보통 3-5단계의 토크레벨을 설정할 수 있다. 일반적으로 토크레벨의 설정 작업은 핸들 바에 별도로 설치된 LCD계기판 혹은 스위치를 이용하여 선택하므로 조작시에 전방주시 태만에 의한 안전운행의 문제가 발생하고 운전자가 원하는 모터의 출력을 정교하게 제어하기 어렵다.

본 논문에서는 상기 문제점들을 개선하기 위하여 Cadence 센싱 방식 전기자전거의 토크레벨을 256단계로 세분화하여 정밀 제어할 수 있는 새로운 방식의 정밀 토크제어 방법을 제안하고 설계 및 구현하였다.

II. 본 론

1. Cadence Sensing 구동 시스템

전기자전거용 구동시스템은 크게 BLDC모터, 배터리 및 컨트롤러의 3가지 기능부로 구성된다.^[3] 이 중 모터 및 배터리의 경우 전 세계적으로 표준화가 이루어져 있으며 전기자전거의 핵심기술은 모터를 제어하는 컨트롤러의 설계 기술에 의하여 결정된다. 트로틀 및 PAS모드를 제어하는 컨트롤러는 PAS모드의 구현 방법에 따라 Cadence Sensing 방식과 Torque Sensing방식의 2가지로 분류된다. Cadence 센싱 방식의 전기자전거용 드라이브 시스템에 대한 전체 구성도는 그림 1과 같다.

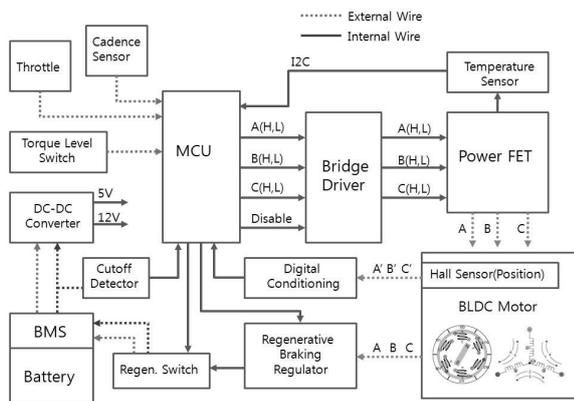


그림 1. Cadence Sensing 구동 시스템
Fig. 1. Cadence sensing drive system.

홀 효과에 의해 발생하는 전압의 발생 여부로 크랭크 축의 회전을 감지한다.^[4] 종래의 전기자전거에 사용되는 Cadence 센서 토크 제어 장치는 전기자전거 운전자가 페달을 구르는 동작의 여부만을 감지하는 온 오프 방식으로서, Cadence 센서에서 전압이 검출되면 전기자전거의 BLDC 직류모터에 대한 토크 값을 최대로 설정하여 동력 보조하게 한다. 따라서 운전자가 저속에서 지속적

으로 운행하고자 할 시에도 급가속이 되어 페달링 속도에 비례하는 전기자전거의 속도제어가 불가능하다.^[5] 스피드센서 방식의 문제점에 대한 대안으로서 토크센서 방식이 있으나 토크센서 방식은 페달링 시에 발생하는 디스크 혹은 스프링 등의 뒤틀림을 측정하는 기계식 방법으로서, 높은 장착 비용과 기존의 전기자전거에 장착이 어려운 문제점들을 갖는다.^[6]

2. 제안된 정밀 토크제어 컨트롤러

상기 문제점들에 대한 대안으로 대다수의 Cadence 센서 방식 전기자전거에는 일정한 속도로 전기자전거가 지속적으로 주행이 가능하도록 토크레벨 설정기능이 내장되어 있다. 하지만 종래의 전기자전거용 설정 장치는 자전거 핸들의 LCD계기판 혹은 스위치형 제어판에 부착되어 있는 버튼 형태 스위치를 운전자가 일일이 수작업으로 온오프 시켜야 하는 번거로움이 있어 가 감속이 반복되는 도심 주행 시에는 조작하기 번거로워 사용하기 어려운 측면이 있고 토크레벨이 3내지 5단계로 제한되어 있어 운전자로 하여금 운행조건에 맞는 BLDC모터의 정밀한 토크 설정이 불가능하다.^[7]

본 논문에서 제안하는 정밀 토크제어 컨트롤러의 시스템 구성도는 그림 2와 같다.

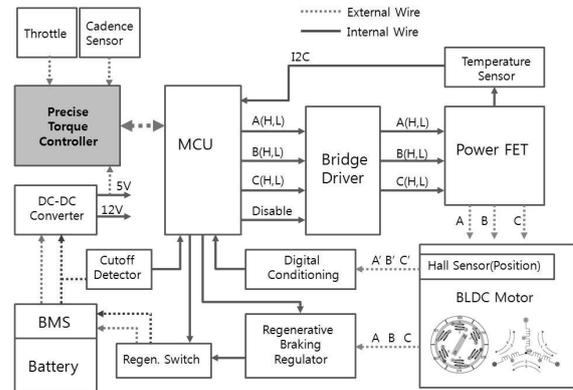


그림 2. 제안된 구동 시스템
Fig. 2. Proposed drive system.

본 논문의 구동 시스템은 기존의 컨트롤러에 연결되는 외부의 토크레벨 스위치를 제거하고 트로틀 및 Cadence 센서만으로 256 레벨의 BLDC모터에 대한 토크 설정을 가능하게 한다. 종래 시스템의 토크레벨이 최대 5단계 이내로 설정 가능한 것과 비교하여 운전자가 아날로그 방식에 근접한 다단계 토크레벨의 설정이 가능하다. 그림 2에 포함되어 있는 정밀 토크제어 컨트롤러의 기능부 구성도는 그림 3과 같다.

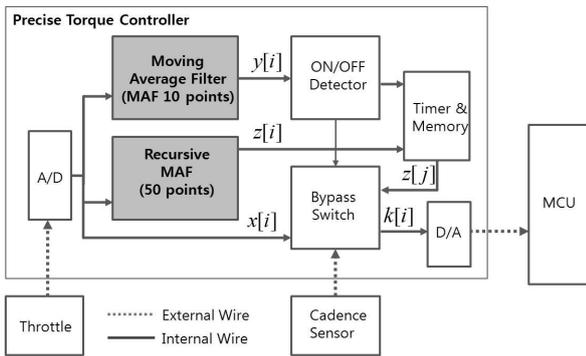


그림 3. 정밀 토크제어 컨트롤러 기능부 구성도
Fig. 3. Configuration of precise torque controller function.

정밀 토크제어 컨트롤러는 외부 트로틀 레버 및 Cadence 센서의 입력을 받아 외부 MCU에 BLDC모터 구동을 위한 토크레벨을 전송하는 역할을 한다. 그림 1과 같은 종래의 Cadence Sensing 구동시스템과 달리 외부의 토크레벨 스위치가 별도로 필요 없으므로 운전자가 안전하고 편리하게 기계식 토크 센싱 방식과 유사한 선형도 수준으로 모터 출력 제어를 가능하게 한다.

3. 알고리즘 및 모의실험

그림 3의 정밀 토크제어 컨트롤러는 트로틀 레버의 입력을 받아 트로틀 레버의 작동 여부를 검출하는 이동평균필터(MAF 10 points), PAS모드를 위해 토크 레벨을 검출하는 MAF(50 points), ON/OFF감지기, 타이머/메모리 및 바이패스 스위치 등으로 구성된다. 그림 4는 정밀 토크제어 컨트롤러의 동작 순서도이다.

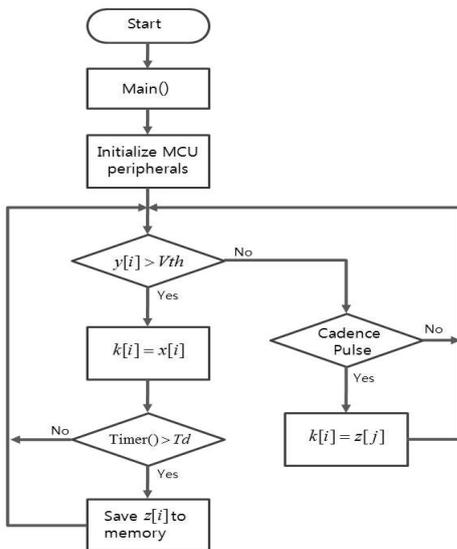
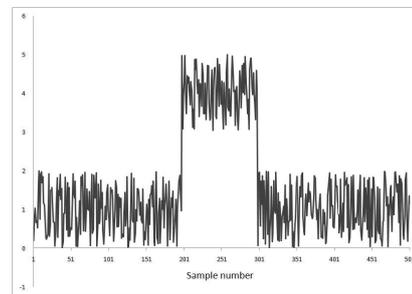
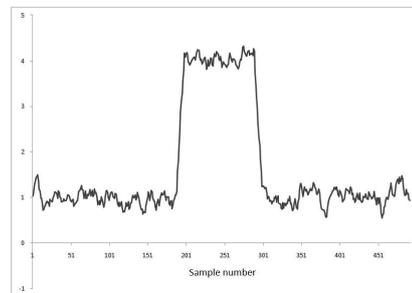


그림 4. 동작 순서도
Fig. 4. Operate flowchart.

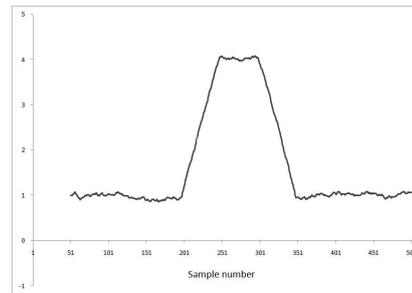
정밀 토크제어 컨트롤러는 트로틀 레버의 입력 값인 $x[i]$ 를 MAF-10 및 MAF-50 필터부에 동시 입력하여 A/D 변환 신호에 대한 필터링을 수행한다. MAF-10 필터는 잡음이 포함된 $x[i]$ 신호에 대해 10 points 이동평균 필터링 후 $y[i]$ 를 출력하며 ON/OFF감지부를 통하여 $y[i]$ 신호의 크기가 트로틀 레버의 구동전압 기준치인 V_{th} 를 초과할 경우 운전자가 트로틀 레버를 조작하는 것으로 판단한다. ON/OFF감지기가 트로틀 레버의 조작을 감지하면 바이패스 스위치부는 $x[i]$ 신호를 외부 MCU기능부로 바이패스 시켜 트로틀 레버의 실시간 전압 변화 신호인 $k[i]$ 를 BLDC모터의 출력을 제어하는 외부 MCU로 전송한다.



(a) 트로틀 레버 입력 $x[i]$
(a) Throtte lever input $x[i]$



(b) MAF-10 출력 $y[i]$
(b) MAF-10 output $y[i]$

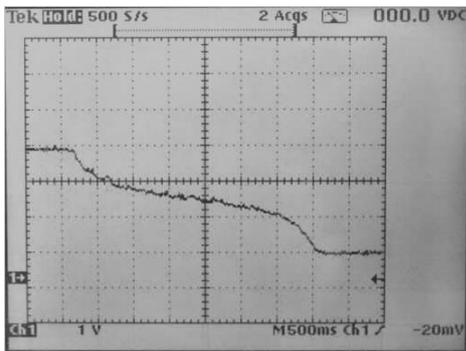


(c) MAF-50 출력 $z[i]$
(c) MAF-50 output $z[i]$

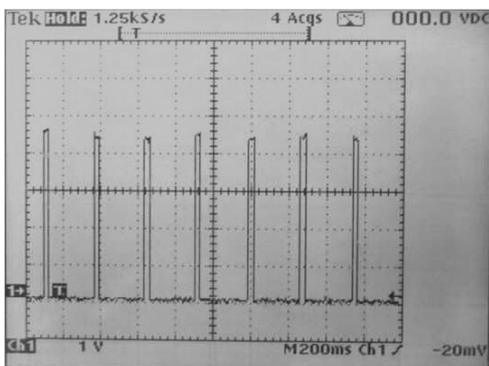
그림 5. MAF필터의 Step Response
Fig. 5. Step response of MAF filter.

본 논문에서는 트로틀 레버의 아날로그 신호에 포함된 잡음을 제거하기 위하여 시간영역에서의 스텝응답특성과 백색잡음 제거에 효과가 좋은 이동평균필터(MAF)를 적용하였다. MAF는 소프트웨어로 구현하기 편리하고 실시간 처리에 유리한 장점을 가지고 있다.

그림 3에서 MAF-10 필터는 잡음이 포함된 입력신호 $x[i]$ 에 대하여 10 points 이동평균 필터링을 수행하며 그림 5(b)와 같은 스텝응답 특성을 갖는다. 10 points의 협 구간 윈도우 필터링을 통하여 스텝입력에 대해 상대적으로 Sharp한 Edge특성을 가지므로 MAF-10의 출력 $y[i]$ 는 ON/OFF감지기에 전송되어 트로틀 레버의 작동 유무를 검출하는데 사용된다. 출력 $y[i]$ 의 값이 일정한 값으로 지속될 경우 컨트롤러는 운전자가 토크레벨 설정을 요구하는 것으로 판단하고 타이머가 일정한 시간 T_d 를 초과할 경우 $z[i]$ 를 메모리에 저장한다. MAF-50의 출력 값인 $z[i]$ 는 50 points 윈도우 필터링을 통해 잡음이 거의 제거되며 트로틀 레버가 인가되는 일정기간 T_d 구간의 이동평균으로서 운전자가 설정하는 토크레벨 정보이다.



(a) 트로틀 레버 비활성화
(a) Disable of throttle lever



(b) Cadence 센서 활성화
(b) Activate of cadence sensor

그림 6. 트로틀 레버 및 Cadence 센서
Fig. 6. Throttle lever and cadence sensor.

트로틀 레버의 작동이 중지되어 비활성화 되고 운전자가 인력으로 페달링을 하게 되면 그림 6(b)과 같이 Cadence 센서의 펄스신호가 바이패스 스위치 기능부로 입력되어 정밀 토크제어 컨트롤러는 PAS 모드로 진입하게 된다. PAS모드에서 페달링이 1회전 이상 지속될 경우 트로틀 모드에서 설정되어 메모리에 저장된 토크레벨 $z[i]$ 는 바이패스 스위치를 통해 $k[i]$ 값으로 외부 MCU에 제공된다.

4. 시스템 구현

본 논문에서는 정밀 토크제어 컨트롤러의 구현을 위하여 필터뱅크 및 주요 기능부를 ATmega16 MCU에 펌웨어로 설계 프로그래밍 한 후 관련 부품을 포함하여 PCB 설계 및 제작하였다. 제안된 컨트롤러는 트로틀 레버 및 Cadence 센서 와 기존의 시판되고 있는 컨트롤러 사이에 첼저 형태의 Plug-in 방식으로 결합이 가능한 장점이 있다. 구현된 정밀 토크제어 컨트롤러의 성능분석을 위해 BLDC모터 및 배터리를 구비한 전기자전거를 구성 제작하였으며^[8-9] 기존 컨트롤러와 비교 평가하였다.

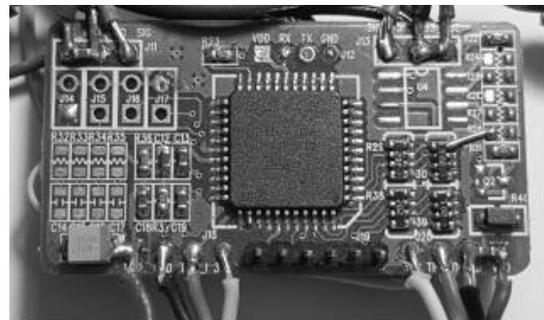


그림 7. 구현된 정밀 토크레벨 컨트롤러
Fig. 7. Implemented precise torque controller.



그림 8. 제작된 전기자전거
Fig. 8. Manufactured electric bicycle.

표 1. 제작된 전기자전거 사양

Table1. Manufactured electric bicycle specification.

항 목	단위	Spec.
토크레벨	Step	256
Rated Power	Watt	250
Rated Voltage	Voltage	36
Max. Current	A	20
최고속도	Km/h	30
Battery	18,650	3P10S

제안된 컨트롤러 회로를 채용하여 제작된 전기자전거는 표 1.과 같이 총 256레벨의 정밀 토크제어가 가능하다.

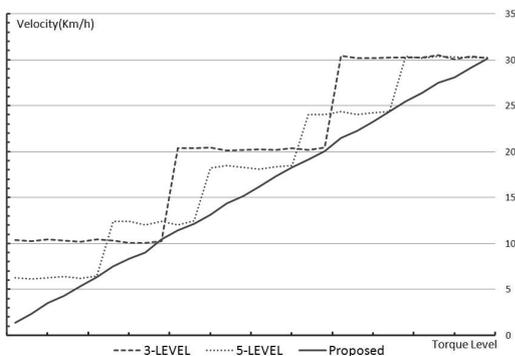


그림 9. 토크레벨 제어 비교 테스트

Fig. 9. Torque level control comparison test.

기존의 3-레벨 및 5-레벨의 Cadence Sensing 전기자전거 컨트롤러와 본 논문에서 제안한 정밀 토크제어 컨트롤러의 구동 테스트 결과는 그림 2.9와 같다. 실험 결과 제안된 토크제어 방식은 토크레벨의 증가에 따라 선형적인 속도 증가가 가능하며 기존 컨트롤러에서 불가능했던 정밀 토크제어가 가능한 것으로 확인되었다.

III. 결 론

본 논문에서는 Cadence 센싱 방식의 전기자전거에 사용되는 토크레벨을 256단계로 세분화하여 정밀 제어할 수 있는 새로운 방식의 정밀 토크제어 방법을 제안하고 설계 및 구현하였다. 정밀 제어를 위해 트로틀 동작감지 및 토크레벨 정보 검출을 위한 잡음 제거 기능을 독립적으로 수행하는 2개의 MAF를 채용하여 모의 실험 하였다. 제안된 컨트롤러는 PCB 설계 구현되었으며 전기자전거에 장착 구성되어 동작특성을 검증하였다. 기존 Cadence 감지 방식의 전기자전거에서 불가능했던 256 레벨의 선형적이며 정밀한 토크 제어가 가능

한 것으로 실험 결과 확인되었다. 제안된 방식에서는 종래의 컨트롤러에서 필수적인 토크레벨 스위치가 제거되어 운전자로 하여금 조작 시에 전방주시를 가능하게 하여 안전운행에 도움이 되며 정교한 토크레벨 제어로 고가의 토크 센싱 방식 전기자전거에 상응하는 선형적 비례보조 효과를 얻을 수 있다.

REFERENCES

- [1] Eric Hicks, "Crystalyte Hub Motor Review", Electric Bike, May 2012.
- [2] "Automotive and Transportation Solutions Guide", Texas Instruments, 2014.
- [3] Ron S, "Sine-wave controllers, making hub motors super quiet", Electric Bike, Sept. 2013.
- [4] "L6230 DMOS driver for three-phase brushless DC motor", Application note, STMicroelectronics, 2016.
- [5] Daesoon Kim, "Torque Control Apparatus on Electric Bicycles", Appl. No. 1020130068725, Korean Intellectual Property Office, 2013.
- [6] Daesoon Kim, "Torque Sensor Apparatus on Electric Bicycles", Appl. No. 1020130058677, Korean Intellectual Property Office, 2014.
- [7] Justin Le, "Analysis of regen on an ebike", Endless-Sphere, Dec. 2008.
- [8] Eric Hicks, "Gear Hub Motors vs Direct Drive", Electric Bike, Jan. 2012.
- [9] "Motor Drive and Control Solutions", Texas Instruments, 2015.

저 자 소 개



이 주 연(정회원)
2006년 원광대학교 전기공학부 학사 졸업.
2010년 전북대학교 전자공학과 석사 졸업.
2015년 전북대학교 전자공학과 박사 수료.

2015년~현재 제이라이텍 연구소장
<주관심분야: 임베디드 시스템, 디지털신호처리, 마이크로 프로세스>



김 대 순(정회원)
1995년 원광대학교 전자공학과 박사 졸업.
1993년 한국전자통신연구소 위촉 연구원.
2000년 (주)대우전자 반도체연구소 책임 연구원.

2016년~현재 전주비전대학교 디지털전자정보과 교수
<주관심분야: 임베디드 시스템, 집적회로 설계, Smart Farm, ADAS>



이 종 하(정회원)
1982년 전북대학교 전기공학과 학사 졸업.
1984년 전북대학교 전자계산기 공학 석사 졸업.
1993년 전북대학교 전자공학과 박사 졸업.

1990년~현재 전주비전대학교 디지털전자정보과 교수.
<주관심분야: 디지털신호처리, OLED TV>



송 제 호(정회원)
2003년 원광대학교 전자공학과 박사 졸업.
1996년~현재 전북대학교 융합기술 공학과 교수.
2017년~현재 (사)대한전자공학회 전북지부장.

2011년~현재 (사)한국산학기술학회 호남지부장.
<주관심분야: ICT, 정보통신, 통신망, 네트워크 시스템 설계, DSP>