

## 하이브리드 3륜 전기자전거의 Power Assistant 제어기

박윤창, 박준휘, 안진우, 이동희  
경성대학교 메카트로닉스공학과

### Power Assistant Controller of A Hybrid Electronic Tri-cycle

YunChang Kwak, Junhwi Park, Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee  
Dept. of Mechatronics Engineering Kyungsoong University

**Abstract** - 본 논문은 페달력과 전기 구동력을 동시에 사용하는 하이브리드 3륜 전기자전거의 구동부에서 보조력의 제어에 토크리플이 억제될 수 있도록 역기전력 함수를 이용한 PAS(Power assist system)을 제안한다. 제안된 방식에서는 하이브리드 3륜 전기자전거의 구동력을 제공하는 BLDC(Brushless DC) 전동기의 역기전력 형상과 토크 사이의 상관관계를 바탕으로, 사용자의 요구 토크에 대하여 추정된 역기전력 역함수를 통해 지령 전류를 발생하고, 지령전류의 제어에는 추정된 역기전력 함수를 사용하여 제어 성능을 향상시킨다. 연속적인 역기전력의 추정에는 홀센서의 위치각과 추정속도를 통해 연속적인 위치각을 추정하고, 이를 통해 록-업 테이블의 실제 역기전력 데이터와 위치 보정값을 사용하게 된다.

하이브리드 3륜 전기자전거의 제안된 PAS 제어 방식은 시뮬레이션을 통해 가능성을 검증하였다.

## 1. 서 론

경제적 발달과 함께 최근에는 단순히 삶을 영위하는 생활에서 자신을 개발하고 그 속에서 자신만의 가치를 찾으며 삶의 질을 윤택하게 하는데 초점이 옮겨지고 있다. 도심에서는 차량의 증가로 인한 교통 체증과 화석 연료기반의 차량으로 인해 환경오염이 증가하고 있고, 이러한 문제를 해결하기 위해 친환경적인 운송수단인 전기자전거에 대한 관심이 높아지고 있다[1].

전기자전거는 대형 소평물이나 시장의 장보기 같은 근거리 이동시에는 차량에 비해 이동이 편하다는 장점이 있지만, 다량의 물품 구입할 때에는 적재의 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 3륜 전기자전거의 개발이 진행되고 있다.

전기자전거의 구동 방법은 크게 POD(Power On Demand) 방식과 PAS(Power Assist System)방식으로 분류된다. POD 방식은 스로틀에 의해 사용자가 요구하는 동력을 조절하는 방식으로 이에 따른 동력은 모두 전동기에서 발생한다.

PAS 방식은 POD 방식과 달리 페달에 가해지는 힘을 토크 센서가 측정하여 페달당하는 동력의 변화에 비례한 만큼 전동기를 구동해 동력을 보조하는 형식으로서, 사람의 인력과 전동기의 동력으로 전기자전거를 구동하는 방식이다. 장점으로는 POD 방식에 비해 주행거리가 훨씬 늘어나게 되고, 유지비가 저렴하다[2].

본 논문에서는 PAS 방식을 적용한 3륜 전기자전거를 대상으로 하여, 구동 전동력은 최대 1.2[kW]급의 BLDC(Brushless DC) 전동기로 발생하는 제어기를 설계하였다. 사용자의 페달력을 토크 센서로 입력 받아, 이에 해당하는 토크를 발생하는 토크 제어기를 설계하였다. 본 논문에서 제안하는 PAS 제어기는 감성적인 주행 특성을 발생하기 위해, BLDC 전동기의 토크 리플을 억제하기 위한 제어 방식을 제안한다. 제안된 BLDC 전동기의 토크 제어방식은 전동기의 실제 역기전력 특성을 고려하여, 지령토크를 발생하기 위한 적합한 비선형 형상의 전류 지령치를 발생하고, 전류 제어기에도 비선형 역기전력 함수를 보상하여 제어 특성이 개선 될 수 있도록 하였다. 특히, 연속적인 비선형 역기전력 함수와 역기전력의 역함수는 홀센서 검출위치와 속도에 의한 연속적인 위치 추정을 통하여 록-업 테이블의 비연속 데이터가 추정위치에 의해 보정되는 연속적인 데이터가 생성되도록 하였다.

제안된 방식은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 PI 방식의 토크 및 전류 제어기와 비교함으로써, 그 유효성을 검증하였다.

## 2. 하이브리드 3륜 전기 자전거의 구조 설계

### 2.1 3륜 전기자전거의 견인 구조

본 논문에서 설계한 3륜 하이브리드 자전거는 최대 중량 100[kg] 이하로 하고, 최대 적재중이 300[kg]가 되고, 최대 제한속도는 24[km/h]가 되는 사양으로 설계하였다. 구체적인 3륜 자전거의 사양은 표 1과 같다.

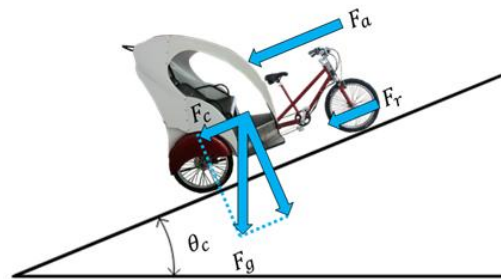
표 1에서 제시된 3륜 전기자전거의 성능을 만족하기 위한 견인 전동기의 사양은 차량의 운전 조건과 가속성능 및 등판성능에 의해 계산되어질 수 있다.

<표 1> 3륜 전기자전거의 사양

항목	요구성능
무게	300kg
최고 속도( $V_{max}$ )	24km/s
타이어 반경( $R$ )	34cm
최대 등판 능력	8.5°
PAS 비율	50%

그림 1은 3륜 자전거의 등판 상태에서 가해지는 외력에 대해 요구되는 전동기의 견인능력을 그림으로 나타내고 있다. 3륜 차량의 주행 성능은 공기밀도( $\rho$ )는 온도, 고도, 습도에 따라 조금씩 달라지지만, 일반적인 평균값을 사용하고, 구름 저항계수( $C_{rr}$ )은 아스팔트 노면을 기준으로 계산하였다. 그리고 등판각은 15% 기준인 8.5°로 설정했다.

전동기의 용량 선정을 위해서는 3륜 전기자전거에서 필요한 최대 토크를 구해야 된다. 최대 요구 토크( $T_{max}$ )를 구하기 위해서는 우선 차량의 최대 추진 부하력( $F_{max}$ )를 구해야 된다.  $F_{max}$ 는 차량의 공기 저항력( $F_a$ ), 차량의 등판 저항력( $F_c$ ) 그리고 차량의 구름저항력( $F_r$ )의 합과 같고 이는 식(1)~(4)와 같다[3].



<그림 1> 3륜 전기자전거에 가해지는 외력

$$F_a = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 = 2.71 N \quad (1)$$

$$F_c = m \cdot g \cdot \sin(\theta_c) = 434.56 N \quad (2)$$

$$F_r = C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta_c) = 29.08 N \quad (3)$$

$$F_{max} = F_a + F_c + F_r = 466.35 N \quad (4)$$

그리고 차량의 최대 요구 토크( $T_{max}$ )는 다음 식(5)와 같이 계산된다.

$$T_{max} = \frac{F_{max} \cdot R}{N_r \cdot \eta_g} = 3.52 Nm \quad (5)$$

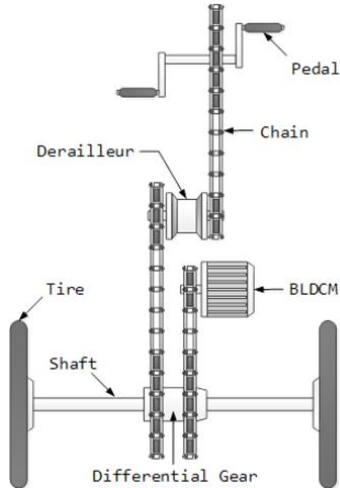
이와 같이 전동기의 사양은 정격 토크가 3.52 Nm이상이어야 되고, 최대 속도를 만족하기 위한 전동기의 요구 속도는 기어비를 고려하여 최대 속도가 결정된다. 등판능력을 위해 요구되는 최대 토크와 최대 속도를 만족하기 위해 기어를 적용하였으며, 본 연구에서 적용된 BLDC 전동기의 사양은 다음 표 2와 같다.

〈표 2〉 BLDCM의 사양

항목	사양
최대 용량	1.2kW
전압	48V
최대 전류	30A
정격 토크	3.8Nm
정격 속도	3000rpm

2.2 하이브리드 3륜 전기자전거의 동력전달계

하이브리드 3륜 전기자전거의 동력전달계는 그림 2와 같다. 페달을 밟는 힘은 체인을 통해서 변속기(Derailleur)로 전달되고, 변속기에서 차동기어(Differential Gear)로 동력이 전달된 후, 차동 기어에서 타이어로 직접 힘이 전달되어 3륜 전기자전거를 구동하게 된다. 이때 PAS 보조력을 출력하는 BLDC 전동기는 차동 기어와 직접 연결되어 있어서 타이어에 바로 힘을 전달하여 동력을 보조하게 된다.



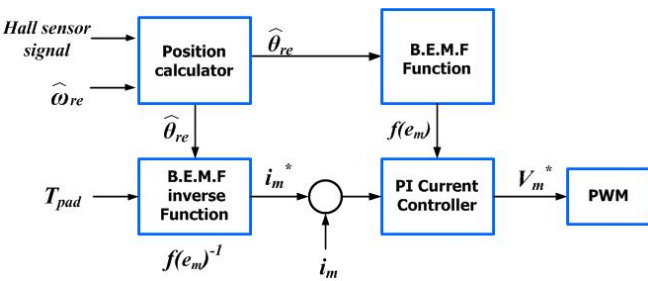
〈그림 2〉 3륜 전기자전거의 동력 전달계

2.3 토크 센서 특성

PAS를 구성하기 위해서 최우선으로 고려해야 할 사항은 페달을 밟을 때의 토크를 측정하는 토크 센서의 특성이다. 토크 센서의 특성을 잘못 이해하면 오작동, 급발진 등이 발생해 안전의 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 본 논문에서 사용한 토크 센서는 자전거의 크랭크축 대신 설치해 페달에 가해지는 토크를 직접 읽을 수 있는 방식의 토크 센서로서 최대 102 Nm까지 측정이 가능하다.

3. 제안된 PAS 제어방식

PAS 제어 방식의 성능 향상을 위해서 BLDC 전동기 토크가 실제 역기전력 특성에 따라 리플이 발생하는 특성을 분석하였다. BLDC 전동기의 토크는 역기전력과 전류의 곱으로 나타나게 되므로, 토크 리플을 감소시키기 위한 전류 지령을 만들기 위해서는 역기전력의 비선형적인 형태를 고려해 전류 지령치를 계산하여야한다. 또한 전류 제어기에도 비선형 역기전력 함수를 보상하여 제어를 하면 제어의 성능이 향상되게 된다. 이러한 특성을 고려하기 위해, 연속적으로 발생하는 비선형적인 역기전력을 함수화 시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 홀센서 검출위치와 추정 속도를 통해 연속적인 추정위치를 계산하고, 룩-업 테이블에 저장된 비연속적인 역기전력 함수와 역기전력의 역함수를 추정위치에 따라 보정되는 연속적인 역기전력 데이터를 도출하여, 이를 사용해 토크 제어의 성능 향상을 도모했다.

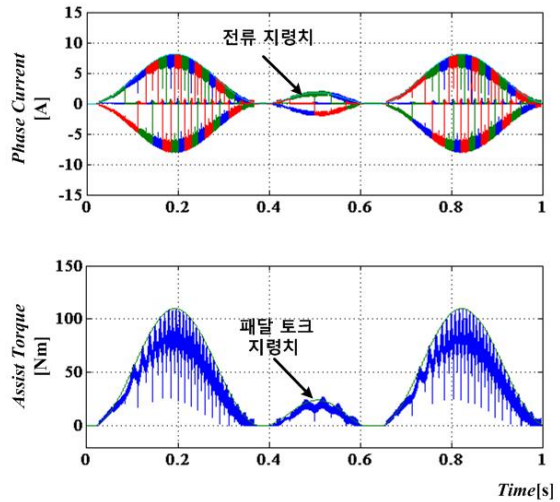


〈그림 3〉 제안된 PAS 제어방식 블록도

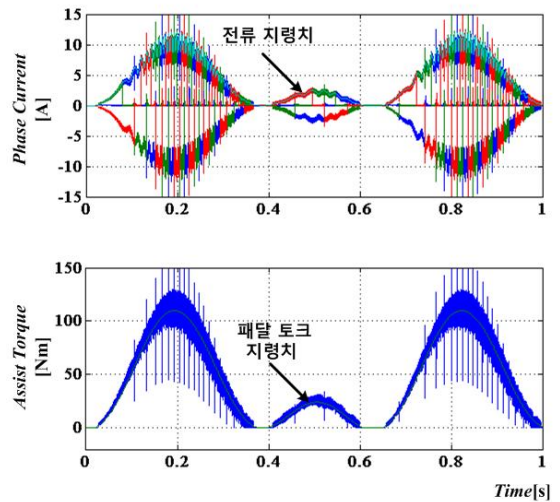
4. 시뮬레이션 결과

그림 4는 기존의 PAS 제어 방식의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 전류 지령치는 PAS 센서의 형상을 잘 추종하고 있지만, 역기전력의 비선형성으로 인하여 실제 출력 토크에는 리플이 발생하고 있음을 보이고 있다.

그림 5는 제안된 PAS 제어 방식의 시뮬레이션 결과이다. 기존의 PAS 제어방식과 다르게 전류 지령치와 상전류가 비선형 적인 역기전력의 형태를 따라가는 것을 알 수 있다. 하지만 보조력의 토크 리플이 기존의 PAS 제어 방식에 비해 매우 감소한 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 기존의 PAS 제어 방식 시뮬레이션 결과



〈그림 5〉 제안된 PAS 제어 방식 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 논문에서는 PAS를 적용한 3륜 전기자전거의 PAS 제어 방식을 제안했다. 제안된 PAS 제어 방식은 페달의 토크 출력을 지령치로 사용한다. 하지만 기존의 PAS 제어 방식과 다르게 페달 토크 지령치와 역기전력 역함수로 구한 데이터의 이용해 전류 지령치를 구한다. 이러한 PAS 제어 방식은 기존의 PAS 제어 방식에 비해 토크 리플이 감소했음을 시뮬레이션을 통해 검증했다.

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 BK21+사업으로 수행된 연구결과임 (22A20130012436).

〔참 고 문 헌〕

[1] 김태형, 이상훈, “전기자전거용 구동시스템 개발동향”, 전력전자학회지, 제16권 제4호, pp.33-41, 2011.08  
 [2] 사복강, “PAS 기능을 갖는 e-bike용 bldc모터 구동시스템 관한 연구”, 건국대학교 석사학위논문, 2011.12