

후륜 허브 전동기를 가지는 전기 자전거에서의 비용효과적 회생 제동

김준호, 김문영, 문건우
한국과학기술원

Cost-Effective Regenerative Brake Control Method for E-bike with Rear Hub Motor

Jun-ho Kim, Moon-Young Kim, and Gun-Woo Moon
KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

본 논문에서는 외전형 영구자석 동기 전동기의 전기적 브레이크 동작 시에 발생하는 회생 에너지를 분석한다. 그리고 전류 정보 없이 전압 속도 및 배터리의 전압만으로 회생 전력을 제어하는 방법을 제안한다. 후륜 허브 전동기를 가지는 자전거 프로토타입을 제작하고, 제안하는 회생 제동 제어 기법을 적용한 실험을 통해 제안 기법을 검증한다.

1. 서론

최근 환경 문제와 석유 가격의 상승으로 전기를 동력원으로 하는 운송 수단에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 도심 내의 친환경 근거리 이동 수단으로써 전기 자전거가 주목 받고 있다^[1]. 전기 자전거를 이용해 이동할 수 있는 거리는 적재된 배터리의 용량에 좌우된다. 그러므로 장거리 운행을 위해서는 대용량의 배터리가 요구된다. 그러나 적재 가능 용량이 작은 자전거에 사용할 수 있는 배터리의 용량은 한정적이다. 따라서 효율적인 자전거의 운행이 필요하며, 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 전력 회생 기법이 요구된다.

기존의 기법은 배터리로 입력되는 전류를 센싱하여 배터리의 입력 전력을 제어한다^[2]. 그러나 회생 전류가 작은 시스템에서 저항을 이용한 전류의 센싱이 어려워 가격이 상승하는 문제가 있다. 다른 방식으로 수퍼 캐패시터와 양방향 부스트 컨버터 회로를 사용한 방식이 있다^[3, 4]. 그러나, 제어의 복잡성과 부피 증가의 문제를 야기한다. 본 연구에서는 전류 정보 없이, 전동기의 속도와 배터리의 전압 정보만으로 회생 전류를 제어하는 기법을 제안한다. 그리고 후륜 허브 전동기를 가진 전기 자전거에 적용하여, 감속 시에 안정적으로 전력을 회생할 수 있음을 검증한다.

2. 본론

2.1 회생 전류 생성 원리

외전형 다극 구조의 전동기는 정현파의 역기전력을 가진다^[5]. 이론적으로 전력 회생을 위한 제어가 없이도 역기전력과 배터리 전압 관계가 특정 조건을 만족하면 회생 전류가 발생한다.

$$\sqrt{3}\lambda_{\omega}\omega_{kph}\sin\theta > V_{Bat} \quad (1)$$

여기에서 λ_{ω} 는 역기전력 상수, ω_{kph} 은 전동기 속도, V_{Bat} 는 배터리 전압을 나타낸다. 배터리에서 보여지는 전동기의 역기전력은 선간 전압($V_{line-to-line}$)이다. 따라서 전류가 흐르기 시작하는 도통 시작 각(θ_s)과 전동기 내부 인덕턴스에 인가되는 전압($v_L(t)$) 및 전류의 최대값($i_{L,peak}$)은 각각 다음과 같다.

$$\theta_s = \sin^{-1}\left(\frac{V_{Bat}}{\sqrt{3}\lambda_{\omega}\omega_{kph}}\right) \quad (2)$$

$$v_L(t) = 0.5\left[\sqrt{3}\lambda_{\omega}\omega_{kph}\sin(\omega_{\theta}t + \theta_s) - V_{Bat}\right] \quad (3)$$

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{3}\lambda_{\omega}\omega_{kph}\cos\theta_s}{\omega_{\theta}L} - \frac{V_{Bat}\theta_{sec}}{\omega_{\theta}L} \quad (4)$$

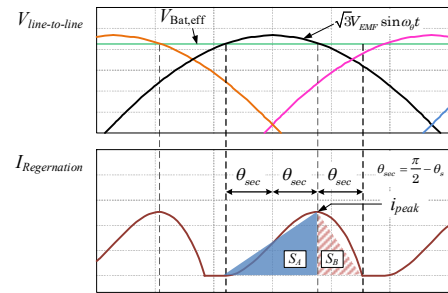


그림 1. 회생 전류 크기 분석 주요 파형

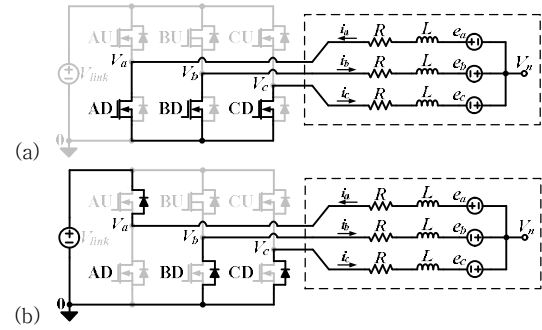


그림 2. 전력 회생 기법 (a) 모드 1 (b) 모드 2

여기에서 ω_{θ} 는 전기 각속도이고, 전류 도통 구간의 길이는 θ_{sec} 의 배수가 된다. 변수들을 회생 전류 파형에 표시하면 그림 1과 같다. 파형에서 S_A , S_B 의 삼각형 넓이를 구함으로써 평균 전류를 구할 수 있다. 이 때, $4/\pi$ 를 곱하여 정현파의 넓이를 구한다

$$i_{L,avg} = \frac{1}{T'}\left[S_A + \frac{4}{\pi}S_B\right] \quad (5)$$

이러한 인덕터 전류는 한 주기에 6번 발생하므로 $T' = \pi/3$ 이다

$$i_{regen,avg} = i_{L,avg} = \frac{2\theta_{sec}}{\pi/3}\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\right]i_{peak} \quad (6)$$

최종적으로 인덕터 전류의 평균은 회생 전류의 평균과 같아진다

2.2 회생 전류 분석

제안하는 기법에서 사용하는 3상 인버터 제어 방식은 그림 2와 같이 두 모드를 가진다. 이를 통해 인덕터에 에너지를 저장하고, 배터리로 전달하는 부스트 컨버터 동작을 수행한다. 그림 1과 같이 역기전력의 크기에 따라 동일 시비율에 대해 연속 도통 구간과 불연속 도통 구간이 발생하며, 구간의 길이는 실효 배터리 전압($V_{Bat,eff}$)에 의해 결정된다. 연속 도통 구간에서 배터리 전압이 그림 2(b) 구간에서만 회생 전류를 생성하는 역할을 수행하므로 실효 배터리 전압은 시비율의 함수가 된다.

$$V_{Bat,eff} = (1 - D)V_{Bat} \quad (7)$$

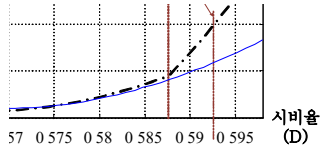


그림 3. 시비율에 따른 회생 전류 @ 15km/h, $V_{Bat}=38V$

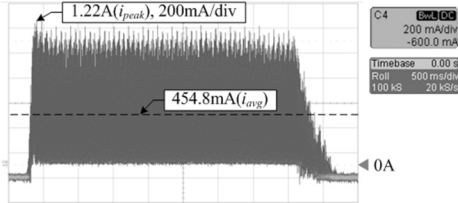


그림 4. 회생 전류 @ 15km/h → 0km/h, $V_{Bat}=38V$

표 1. 전동기 파라미터

항목	값
정격 전력	300 W
정격 전압	36 V
정격(최대) 전류	10 A (30 A)
휠 사이즈	26"
Pole/slot	24 / 27
상저항	0.1 Ω
상인덕턴스	661 μH
역기전력 상수(λ_ω)	0.63V/(km/h)



그림 5. 전동기 세트

이 때, 전동기 내부 인덕터에 흐르는 평균 전류는 다음과 같다.

$$i_{L,avg} = \frac{6}{\pi} \frac{\theta_{sec}}{\omega_\theta L} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \left(\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{kph} \cos \theta_s - V_{Bat,eff} \theta_{sec} \right) \quad (8)$$

회생 전류는 그림 2의 모드 2에서만 배터리로 입력되므로 인덕터 전류의 $(1-D)$ 만큼이 회생 전류가 된다. 불연속 도통 모드로 동작하는 구간에서 발생하는 전류는 부스트 컨버터 동작과 동일한 방식으로 계산할 수 있다. 경계 전도 모드로 동작하는 것으로 가정하여 최대 평균 전류를 구할 수 있다.

$$i_{DCM,avg} = \frac{\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{kph} D(1-D) 3\theta_s - 7\pi/6}{2 Lf_{sw} \pi/3} \quad (9)$$

따라서 최종적으로 회생 전류의 수식은 다음과 같다.

$$i_{regan,avg} = \frac{3(1-D) 2\theta_{sec}}{\pi \omega_\theta L} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \right) \left(\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{kph} \cos \theta_s - V_{Bat,eff} \theta_{sec} \right) + \frac{\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{kph} D(1-D) \left(\frac{3\theta_s - 7\pi/6}{\pi/3} \right)}{2 Lf_{sw}} \quad (10)$$

2.3 제안하는 전력 회생 제어

제안하는 기법의 적용 대상 자전거 시스템은 기계적 브레이크와 전기적 브레이크가 장착되어 있고, 후륜에 전동기가 있는 구조를 가정한다. 따라서, 후륜의 기계적 브레이크 외에 추가적인 브레이크 동작을 전동기가 수행하여 감속을 돕는 역할을 한다.

본 제어 기법은 전륜 또는 후륜의 기계적 브레이크가 동작할 시에 회생 전류를 발생시킨다. 브레이크의 세기를 센싱하지 않는 자전거 시스템에서 회생되는 전력이 크면 강한 브레이크 토크로 인해 운행의 안전성 및 편의성을 저해하게 된다. 따라서 작은 브레이크 토크를 유지하는 제어가 필요하다. 그러므로 전구간이 연속 도통 모드로 동작하지 않도록 제어해야 한다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 연속 도통 모드로 회생 전류가 발

생하게 되는 조건을 만족시키는 구간이 전기적 1회전에서 6번 나타남을 알 수 있다. 한 구간은 $\theta_{sec}(=0.5\pi - \theta_s)$ 의 3배가 되는 길이를 가진다. 그러므로 아래의 조건을 만족하면 전구간이 연속 도통 모드로 동작하는 것을 방지할 수 있다.

$$\frac{3(0.5\pi - \theta_s)}{\omega_\theta} < \frac{2\pi}{6\omega_\theta} \quad (11)$$

θ_s 가 가지는 최대, 최소값은 각각 0.5π , $7\pi/18$ 이므로, (1)을 통해 전구간 연속 도통 모드 동작을 방지할 수 있는 최대 시비율 및 회생 전류가 생성되는 최소 시비율을 구할 수 있다.

$$1 - \frac{\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{rpm}}{V_{Bat}} \leq D < 1 - \frac{\sqrt{3} \lambda_\omega \omega_{rpm}}{V_{Bat}} \sin \left(\frac{7\pi}{18} \right) \quad (12)$$

그림 3의 그래프는 구해진 수식들의 타당성을 판단하기 위하여 시비율에 따른 회생 전류의 크기를 비교한 결과이다. 매텔랩 결과는 수식 (10)을 바탕으로 구하였으며, PSIM 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과를 함께 도시하였다. 최대 시비율(D_{crit})에서 실제 전류와 예측 전류 사이에 발생한 오차는 앞선 도통 구간의 길이에 대한 가정에 의한 것이다. 따라서, 구해진 최대 시비율보다 작은 값을 최대값으로 사용함으로써 전구간이 연속 도통 모드로 동작하지 않도록 제어할 수 있다. 따라서 자전거의 속도와 배터리의 전압 정보만으로 회생 전류를 결정할 수 있다.

2.4 실험

실험을 위한 세트는 그림 5와 같이 구성하였으며, 사용된 전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 실험 조건은 자전거가 내리막을 내려오다가 정지하는 조건을 가정한다. 이 때, 회생되는 전류가 0.4A를 유지하도록 제어한 결과이다.

실험 결과는 그림 4와 같으며, 평균 충전 전류는 454.8mA이다. 이를 통해, 제안하는 기법을 이용하여 전동기 속도 및 배터리의 전압만으로 속도 변화 시에도, 안정성 및 운행의 편의를 저해하지 않으면서 전력을 회수할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 제안 기법을 이용하여 전기 자전거의 구동 시에 실 운행 가능 거리를 확장할 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 정현파의 역기전력을 가지는 외전형 영구자석 동기 전동기의 브레이크 동작 시, 발생하는 회생 전류를 분석하였다. 이를 통해, 추가 소자나 회로 없이 인버터의 하단 스위치의 동작을 전동기 속도 및 배터리의 전압 정보만으로 결정하는 전력 회생 기법을 제안하고, 실험으로 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] Roy Chaoming Hsu, *et al*, "A Reinforcement-Learning-Based Assisted Power Management With QoR Provisioning for Human-Electric Hybrid Bicycle," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 8, pp. 3350-3359, Aug. 2012.
- [2] Ming-Ji Yang, *et al*, "A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2203-2212, June 2009.
- [3] Omar Laldin, *et al*, "Predictive Algorithm for Optimizing Power Flow in Hybrid Ultracapacitor/Battery Storage Systems for Light Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3882-3895, Aug. 2013.
- [4] Ye Min, Bai Zhifeng and Cao Binggang, "Robust H2-Hinfinity Control for Regenerative Braking of Electric Vehicles," *in Proc. IEEE Int. Conf. Control Autom.*, pp. 1366-1370, May 2007.
- [5] J.R. Hendershot, "Brushless DC motor phase, pole and slot configurations," *in Proc. of 19th An. Symp. Incremental Motion Control Systems and Devices*, pp. 146-159, 1990.