

## 전기 자전거에서의 회생 에너지 제어

박용순\*, 이학준\*, 설승기\*, 김강수\*, 김재용\*, 김택현\*  
서울대\*

### A study on control of regeneration energy in a electrical bicycle system

Yong-Soon Park\*, Hak-Jun Lee\*, Seung-Ki Sul\*, Gang-Soo Kim\*, Jae-Yong Kim\*, Taek-Hyun Kim\*  
Seoul National University\*

**Abstract** - 최근 전기 구동 시스템을 갖춘 친환경적인 하이브리드 자동차 혹은 전기 자동차에 대한 관심이 높고 있다. 본 논문에서는 비교적 구조가 간단한 자전거에 쉽게 적용될 수 있는 BLDC 모터를 기준으로, 전기자전거 주행 상황에 있어서의 슈퍼캐패시터를 이용한 회생 에너지 제어에 대하여 언급한다. 회생 에너지를 최대한 슈퍼캐패시터에 전달할 수 있는 제어 방법을 제시하고 이를 컴퓨터 모의 실험을 통해 확인한다.

#### 1. 서 론

전동기를 동력원으로 사용하는 전기자전거는 기존 자전거의 간편한 특성에 더해, 인간의 근력을 대신하여 탑승자의 편의성 향상에도 도움을 줄 수 있다. 그러나 자전거는 한 곳에 고정되어 있는 시스템이 아니기 때문에, 전기자전거로 이동할 수 있는 거리는 배터리가 한 번에 저장할 수 있는 에너지 용량에 따라 제한될 수밖에 없다. 더욱이 자전거는 자동차에 비해 차체가 간단하고 제적 용량도 작기 때문에, 대용량의 에너지 저장매체를 적재할 수 없어 더욱 효율적인 에너지 사용이 요구된다.

전동기는 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로도 변환할 수 있기 때문에, 내리막길에서 브레이크 기능을 대신하는 동시에 발전기로 동작하여 에너지를 회생할 수 있다. 회생된 에너지는 슈퍼캐패시터에 저장하여 점동기가 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환할 때 배터리의 에너지에 우선하여 사용됨으로써 전체 효율을 향상시킬 수 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전기자전거 주행에서의 에너지 회생 시기

전기자전거에서 배터리의 에너지 효율을 높이기 위해서는, 먼저 언제 전동기를 발전기로 구동할 것인지가 중요하다. 전동기가 언제 발전기로 동작하는지는 전동기의 속도와 토크를 이용하여 쉽게 파악할 수 있다. 속도를 자전거가 앞으로 나아가는 방향을 정방향이라 하고, 토크는 전동기의 출력이 자전거가 앞으로 나가도록 작용할 때를 정방향이라 정의하기로 한다. 속도가 정방향이고 토크가 역방향이거나, 속도가 역방향이고 토크가 정방향이면 전동기가 발전기로 동작하게 된다.[1] 기본적으로 전기자전거가 토크를 제어하여 구동되는 시스템일 경우, 전동기의 발전 동작 여부에 대한 파악이 수월하다. 이는 속도는 위치 센서로 파악 가능하고, 토크는 운전자가 직접 지령으로 조절하고 있기 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 배터리와 전동기 사이의 인버터가 토크 제어 방식에 따라 구동되는 시스템이라 가정한다.

자전거는 후진의 필요성이 적고 통상 기계적 장치에 의해 후진이 불가능하도록 제작되어 있으므로, 일반적으로 전기자전거에서 회생을 생각해야 할 상황으로 토크가 역방향인 경우만 고려하면 된다. 즉, 전동기의 토크는 역방향으로 제어되면 통상 자전거는 에너지 회생되는 것으로 간주될 수 있다. 이 경우 역방향 토크는 브레이크처럼 속도를 감속시키는 동시에, 기존의 브레이크에서 마찰로 손실되던 기계적 에너지는 전동기의 발전기 작용에 의해 전기적 에너지로 변환되어 회생될 수 있다.

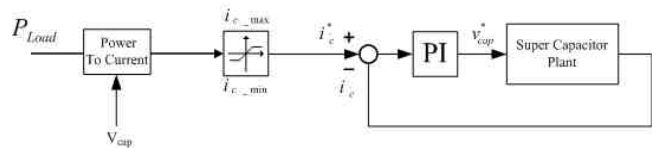
##### 2.2 전동기의 전력 계산 및 슈퍼캐패시터 전류 지령

전기자전거가 에너지를 회생하게 되고 이를 슈퍼캐패시터에 저장하기 위해서는, 먼저 회생 전력을 대한 계산이 이루어져야 한다. 전동기의 각 상의 임피던스와 역기전력이 평형이라고 가정하였을 때, BLDC 모터의 입력 전력은 다음과 같다.[2]

$$P_{in} = V_{as}i_{as} + V_{bs}i_{bs} + V_{cs}i_{cs} = \frac{3}{2} \text{Re}[V_{ds}^* (i_{ds}^*)^*]$$

여기서 전력은 전류 제어기의 계산된 지령 전압과 측정된 전류의 곱으로 근사할 수 있다. 만약 슈퍼캐패시터와 직류단 사이의 전력 변환 과정의 손실을 무시할 수 있다면 위 식에서 구한 전력이 회생 시에 슈퍼캐패시터에 입력되어야 하므로, 회생 전력을 슈퍼캐패시터의 전압으로 나눠주면 슈퍼캐패시터에 흘러들어 가야할 전류에 대한 지령을 얻을 수 있다.

$$P_{av} \approx \frac{3}{2} [V_{ds}^* i_{ds}^* + V_{qs}^* i_{qs}^*], \quad \hat{I}_c = \frac{P_{av}}{V_{cap}}$$

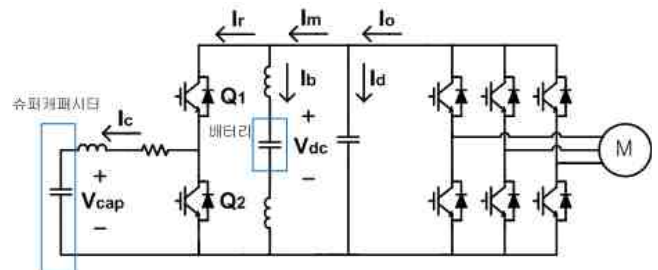


<그림 1> 슈퍼캐패시터 전력 제어

여기서 구한 슈퍼캐패시터 전류 지령값은 슈퍼캐패시터가 전압이 낮을 경우 매우 커지게 되는데, 이 경우 전력 변환 회로에 사용된 소자의 보호를 위하여, 계산된 전력을 모두 받아들이지 못하더라도, 우선적으로 사용된 스위치 소자의 전류 정격을 넘지 않도록 제한하여야 한다.

그림 1은 전체 슈퍼캐패시터 전력 제어의 블록도이다. 전동기를 통해 회생되는 에너지를  $P_{Load}$ 라 할 때, 실제 슈퍼캐패시터의 전압을 이용하여 슈퍼캐패시터의 전류 지령을 생성하게 된다.  $i_{c\_max}$ ,  $i_{c\_min}$ 는 슈퍼캐패시터 전류 지령의 제한치로써 슈퍼캐패시터의 전압과 스위칭 소자의 정격에 의해 정해지게 된다.

##### 2.3 전기자전거 시스템의 회로도 및 기본 제어 방법



<그림 2> 전기자전거 시스템 구성

그림 2는 전기자전거의 전기적인 부분에 대한 회로도이다. 전동기와 배터리, 배터리와 슈퍼캐패시터 사이 전력변환 장치는 각각 2 레벨-3 레그 인버터와 벡-부스트 컨버터로 구성하였다.

시스템에서 제어의 대상이 되는 것은 전류로, 인버터에서는 좌표변환에 의한 d-q축 전류를, 컨버터에서는 슈퍼캐패시터로 흘러가는 전류를 비례적분(PI) 제어기로 제어한다. 반송파(Carrier Wave)의 주파수는 5kHz, 샘플링 주파수는 10kHz로, 제어기의 대역폭은 500Hz로 설정하였다.

##### 2.4 시뮬레이션에 사용된 BLDC 모터 및 슈퍼캐패시터

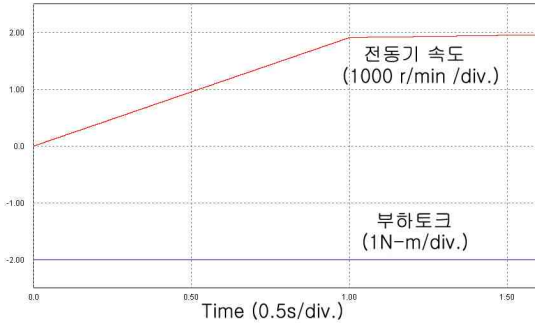
시뮬레이션에는 상용 제품들의 제정수를 사용하였다. 표1의 값은 시뮬레이션에 사용된 제정수이다.

<표 1> BLDC 모터 및 슈퍼캐패시터 제정수

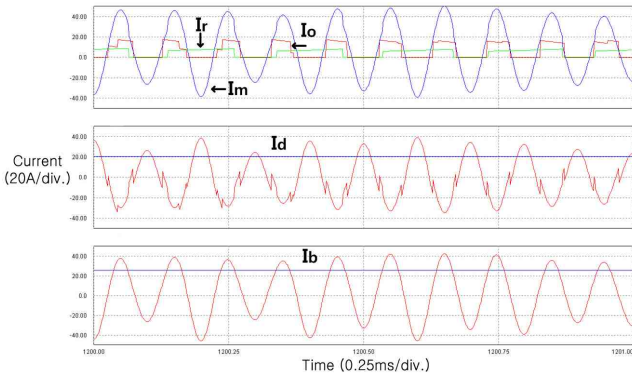
BLDC 모터		슈퍼캐패시터	
정격 출력	440 W	용량	80 F
정격 속도	3000 r/min	최대 전압	48.6 V
극수	8	ESR, DC	12.3 mΩ
선간저항	0.2 Ω	전력밀도	2000 W/kg
선간인덕턴스	0.48 mH	정격 전류	115 A
역기전력상수	13.5 V/(kr/min)	무게	11 kg

### 2.5 PSIM 시뮬레이션 상황 설정 및 결과

PSIM을 이용한 시뮬레이션은  $-2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 의 일정한 부하토크를 전동기가 정방향 회전하고 있는 상태에서 인가하여 자전기가 내리막에 있는 것과 같은 조건을 만들었다. 전동기의 속도변화는 그림 3과 같다고 가정하였다.



<그림 3> 시뮬레이션 상황 설정



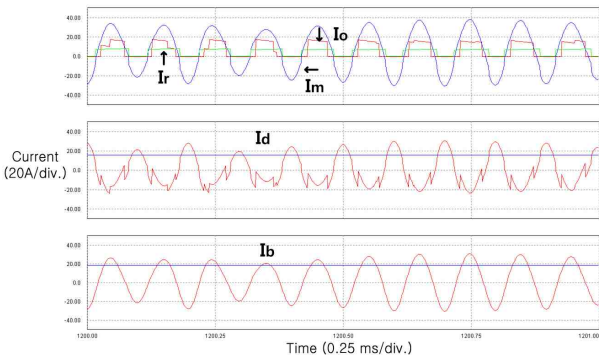
<그림 4> 시뮬레이션 결과 1

그림 4는 시뮬레이션 시작 후, 1.2초 부근의 파형이다.  $I_d$ 는 RMS값이 20.537 A이고,  $I_b$ 는 25.65 A이다.  $I_o$ 는 인버터의 샘플링 주기마다 나타나는데,  $I_r$ 은 그 두 배인 삼각파의 주기마다 나타나는 것을 알 수 있다. 그 결과 배터리에서 컨버터로 흐르는 전류  $I_r$ 이 인버터에서 배터리로 흐르는 전류  $I_o$ 가 없는 경우에도 흐르게 된다.

일반적으로 배터리보다 슈퍼캐패시터가 순간적으로 받아들일 수 있는 전류 용량이 더 크므로, 가급적이면 인버터에서 배터리로 흐르는 전류  $I_o$ 가 곧바로 컨버터쪽으로 흘러가는 것이 배터리의 손실을 줄이는 측면에서 유리하다.

### 2.6 삼각파 및 컨버터 샘플링 주파수의 변형

슈퍼캐패시터로 흐르는 전류인  $I_c$ 가 제대로 지령에 따라 제어되고 있다면, 그림 1의 Q1 스위치가 ON이 되는 순간 배터리 단에는  $I_c$  크기의 전류가 흐르는 정전류원이 보이게 된다. 따라서  $I_r$ 이 흐르는 스위칭 시간을  $I_o$ 에 맞춘다면, 인버터에서 배터리로 흐르는 전류가 곧바로 컨버터 측으로 흐르게 될 것이라 예상할 수 있다. 이를 위해 컨버터의 삼각파와 샘플링 주파수를 각각 2배로 올리고, 컨버터의 삼각파를 인버터의 삼각파 주기를 기준으로 90도 위상 지연시키는 방법을 사용하였다.

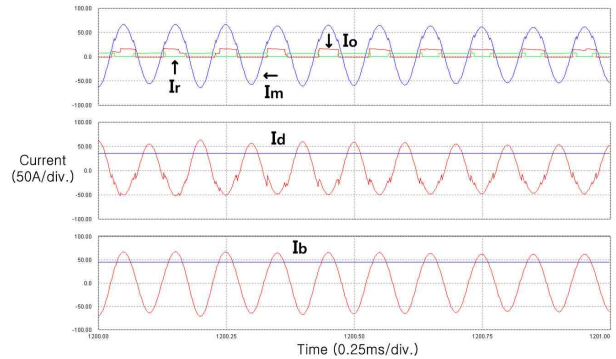


<그림 5> 시뮬레이션 결과 2

$I_r$ 이 나타나는 주기를  $I_o$ 에 맞추운 결과,  $I_d$ 와  $I_b$ 는 각각 15.737 Arms

와 18.544 Arms로 감소하였다.

한편, 삼각파의 위상 변형없이 삼각파와 컨버터 샘플링 주파수만 2배로 증가시킨 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다.



<그림 6> 시뮬레이션 결과 3

시뮬레이션 결과  $I_r$ 과  $I_o$ 의 위상 차이가 180도로 벌어지면서,  $I_d$ 와  $I_b$ 가 각각 36.1947 Arms와 45.275 Arms로 그림 4에 비해 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 단순히 삼각파와 샘플링 주파수를 높이는 것 외에 위상에도 변화를 주어  $I_r$ 이 흐르는 스위칭 시간을  $I_o$ 에 맞추는 것이, 인버터의 전류가 배터리 및 DC 캐패시터로 가는 전류의 비중을 줄여 곧바로 슈퍼캐패시터로 흐르는 비중을 높였다고 생각할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 전기자전거에서의 회생 에너지를 슈퍼캐패시터에 저장하는 최적의 제어 방법을 제시하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 슈퍼캐패시터의 백-부스트 컨버터 측의 반송파를 변형함으로써 전동기가 발전기로 동작할 때 인버터에서 배터리로 흐르는 리플 전류의 크기가 20% 이상 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 배터리의 내부 저항에 의한 손실은 40% 이상 저감할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 전력 제어 및 스위칭 방법을 통해 회생된 에너지를 최대한 효율적으로 슈퍼캐패시터에 저장함으로써 전기 자전거의 효율적인 운전을 가능하게 하고, 또한 배터리 수명을 늘릴 수 있을 것으로 생각된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P.C. SEN, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", second edition, John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 325-326
- [2] 설승기, "전기기기제어론", 개정판 1차수정, 홍릉과학출판사, 2009, pp. 153-155