슈퍼커패시터를 이용한 전기차량용 회생제동 에너지 저장장치 개발

논 문
60-3-12

Development of Regenerative Energy Storage System for An Electric Vehicle Using Super-Capacitors

정 대 원*
(Dae-Won Chung)

Abstract - This paper presents the circuit arrangement and effective control method of regenerative energy storage system for an electric vehicle using super-capacitors as the braking energy storage element. A bi-directional controlled current flow of the DC-DC converters with the capacitor bank is connected in parallel with battery, and is controlled so that the whole of the braking energy is effectively absorbed into the capacitors and released back to the electric motor upon acceleration. The converter needs the series-parallel switching circuit for making the best use of the series capacitors and for limiting the step-up ratio of the boost converter. The proposed methods are verified by computer simulation and experimental set-up. They are usefully applied to the electric vehicles such as green cars, electric motorcycles, bike, etc which are power- supplied by the electric batteries.

Key Words : Electric vehicle, Regenerative energy charger, Super-capacitors, DC/DC converter

1. 서 론

전기자동차를 비롯한 전기차량에서는 공통적으로 배터리에 저장된 전기 에너지를 이용하여 전기모터를 구동함으로써 단한번의 충전으로 얼마만큼 장시간 혹은 장거리를 사용할 수 있는가? 하는 문제가 매우 중요한 핵심기술로 받아들여지고 있다. 장시간(혹은 장거리)의 사용을 위해서 배터리 용량을 단순히 증가시키는 것을 생각하기 쉬우나 배터리 용량 증가는 자동차 무게와 충전장치의 가격상승을 동시에 불러 일으켜 무한정으로 증가시킬 수 없는 제한이 따른다. 이를 해결하기 위해 새로운 형태의 리튬 배터리를 개발하는 등 다양한 기술적 진보를 꾀하고 있지만 실효성이 높은 해결방안이 뚜렷이 제시되고 있지 않은 형편이다. 이러한 상황에서 자동차 제동시 발생하는 기계에너지를 전기 에너지로 변환하여 이를 전기 저장장치에 재충전하여 사용하는 기술이 최근에 널리 개발되기 시작하였다[1~12]. 그러나 전기차량 제동시 발생되는 기계에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 전기모터의 발전기 역할대처와 배터리(Battery) 저장기술만을 단순히 이용하는 것만으로 회생전력을 효과적으로 저장할 수 없다. 이는 전력변환의 효과적인 상호작용과 회로의 최적화가 이루어져야 하고 그보다 배터리의 경우 빈번한 충방전이 발생할 경우에 배터리 열화현상이 두드러지게 나타나서 배터리의 수명을 단축시키는 원인이 되고 과도적인 고조파 성분의 충전전류에 매우 취약한 동시에 충전시정수가 커서 비교적 짧은 시간에 방생하는 회생전류를 효과적으로 충전시키지 못하기 때문이다. 슈퍼커패시터는 전기화학적 반응을 이용하는 배터리와는 달리 전극과 전해질 계면으로 단순한 이온의 이동이나 표면화학반응에 의한 충방전 현상을 이용하여 고에너지 밀도와 급속 충방전이 가능하고 높은 충방전 효율과 반영구적인 충방전 사이클 수명 특성을 가지고 있어 보조 배터리의 수단으로 개발되고 있는 차세대 에너지 저장용 전기소자로써 최근에 많은 기술적 진전이 되고 있다[10],[14],[15].

본 논문에서는 회생제동 충방전 장치를 위한 슈퍼커패시터를 이용한 배터리 보조 충전장치에 관한 회로설계와 제어방식에 대하여 주로 다룬다. 회생제동 충방전장치를 위한 보조수단으로 슈퍼커패시터의 활용에 관한 연구는 최근에 전기자동차 개발에 대한 관심이 높아지면서 활발하기 시작하였다[1~12]. 연구의 주된 관심은 어떻게 충방전시 DC 버스에서의 과도전압 상승을 억제하고, 회생전류 에너지를 짧은 과도시간에 에너지 저장장치에 효과적으로 저장하고 반대로 정상운전 시에는 모터 부하에 다시 흘릴 수 있느냐 하는 문제들이다. 결국에는 에너지 저장장치와 전류변환장치간의 효율성과 스위칭 소자들의 제어성의 문제로 귀착된다. 회생제동 충방전 장치의 스위칭소자의 정확한 동작을 보장하기 위해, 기존 연구결과[6,7]에서 뒷받침하고 있듯이 2개의 스위치를 직렬로 연결하여 사용하는 것은 큰 용량을 가진 직렬 인덕터(L)의 영향으로 2개 스위치의 동기화된 On-Off 동작이 보장되지 못하여 실패한 연구경험에 비추어, 본 연구에서는 축전기와 병렬로 연결된 슈퍼커패시터 충방전 스위칭을 위해 양방향 스위치를 제안하였으며, 양방향 제어되는 전류원의 역할을 하게 된다. 양방향 전류원은 DC-DC 변환기 역할과 슈퍼 커패시터 뱅크 및 제어용 MCU(마이크로프로세스) 및 해당 피동소자 등으로 구성된다. 제안된 회로는 컴퓨터 시뮬레이션과 실험장비 세팅에 의한 성능실험을 통해 그 성

* 정 회 원 : 호남대학교 전기공학과 교수
E-mail : dwchung@honam.ac.kr
접수일자 : 2010년 11월 17일
최종완료 : 2011년 2월 14일

능을 검증하였으며, 그 핵심적인 회로와 제어기술을 중심으로 그 결과를 새로이 제안한다. 본 장치는 전기자동차를 비롯한 전기 오토바이 및 전기 자전거에서 회생에너지 저장장치로 널리 활용될 것으로 기대된다.

2. 슈퍼커패시터 회생에너지 충방전 장치

2.1 제안된 회생에너지 충방전 회로

그림 1에서 전기차량용 제안된 회생에너지 저장용 슈퍼커패시터의 충방전 회로도를 나타내고 있다. 배터리와 모터 사이에는 모터 구동 인버터를 통해 전류가 양방향으로 흐르는 전류원으로 작용한다. 즉 전기 차량을 정상적으로 구동시에는 배터리에서 전류가 모터로 흘러 전기차량용 모터를 구동하게 되지만, 차량을 제동해야 할 경우에는 모터가 발전기 역할을 하게 되어 전류가 인버터 환류다이오드를 통해 역방향으로 흘러들어 온다. 모터를 구동시키는 전력원으로 배터리와 슈퍼커패시터가 마련되었다. 그렇지만 배터리와 슈퍼커패시터의 전기적 특성이 서로 달라 전력원의 역할이 서로 다르다. 즉 배터리의 충방전 특성상 시정수(내부저항과 정전용량에 의해 결정됨)가 다소 긴 반면에 슈퍼커패시터는 시정수가 짧아 단시간에 충방전이 가능하여 회생제동시 발생되는 전력을 빠르게 충전할 수 있다. 따라서 회생에너지 충전용 커패시터는 회생제동시 발생하는 전력을 충전하는 충전모드와 정상운전시 슈퍼커패시터 전력을 부하에 공급하는 방전모드의 2가지 운전모드를 갖는다. 이와 같이 부하전류의 방향에 따라 충전모드와 방전모드로 결정되고 충전모드에서는 모터부하에서 역으로 흐르는 전류는 배터리에 충전되기 이전에 병렬로 연결된 슈퍼커패시터에 DC-DC 변환장치를 통해 저장된다. 결국 슈퍼커패시터 전류는 모터부하전류의 방향에 따라 정,역방향으로 제어되어 흐르게 된다. 즉, 정상적인 가속운전시에는 인덕터에서 부하방향으로 흐르지만, 제동시에는 제동전류가 인덕터 방향으로 흐르게 되어 충방전을 지속적으로 하게 된다. 이러한 운전모드는 모터 부하전류와 DC-DC 컨버터 전류를 검출하여 두 전류간에 발생하는 오차의 크기에 비례하는 PI(비례적분) 제어기를 통하여 인덕터 스위치의 PWM 듀티비를 조절함으로써 가능하다. 제안된 충방전 회로의 동작 및 제어과정을 이후부터 구체적으로 상술한다.

(1) 슈퍼커패시터 충전모드(T2 : Buck, Step-down) 동작

○ [T2 Turn-On 상태] : 전기차량의 구동 모터에 차량관성력에 의해 제동력이 가해지면 모터는 곧바로 발전기 역할을 하게 되어 발전기에서 생성된 전류가 모터 드라이버의 환류다이오드를 통하여 역으로 흐르게 되고, 전류센서 CS-2와 CS-3를 통해 역전류가 검출되어 Boost IGBT (T2)을 PWM 듀티 사이클로써 도통(turn-on)시킨다. 이때 인덕터(L2)에서 일시적으로 회생되는 전류를 저장한다.

○ [T2 Turn-Off 상태] : IGBT T2이 turn-on된 상태에서는 인덕터(L2)에 저장된 전류는 Buck 다이오드(D1)를 통하여 슈퍼 커패시터에 전류를 저장을 하고 다시

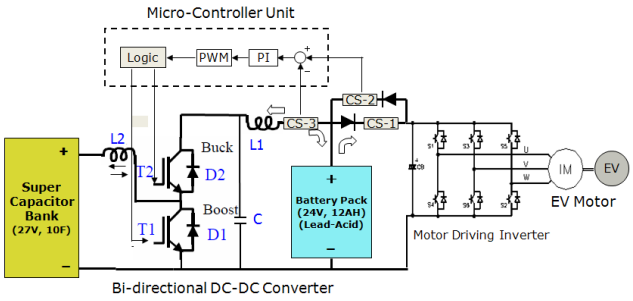


그림 1 전기차량용 회생에너지 충방전 장치의 개념도

Fig. 1 Conceptual Diagram of Regenerative Energy Charger for Electric Vehicle

T2가 Turn-On이 되면 인덕터(L1)에 저장되었던 전류는 인덕터(L2)에 전달되어 에너지를 저장하게 된다. 이 과정은 슈퍼커패시터의 단자전압에 도달될 때 까지 차례차례 충전을 하게 되고 정격전압에 이르게 되면 더 이상 충전되지 않도록 한다.

(2) 슈퍼커패시터 방전모드(T1 : Boost, Step-up) 동작

○ [T1 Turn-On 상태] : 회생전력이 CS-2에서 검출되지 않을 경우(즉 정상적인 모터부하전류 공급)에는 슈퍼커패시터에 저장된 전기 에너지를 모터 부하에 공급하기 위해 Buck 스위치 T1를 PWM 듀티 사이클로 도통(turn-on)하게 되고, 이때, 방전전류는 인덕터(L2)에 저장을 하게 된다.

○ [T2 Turn-Off 상태] : IGBT T1이 Turn-Off 상태에서 인덕터(L2)에 저장된 전류는 Boost 다이오드(D2)를 통하여 방전하여 다시 모터부하에 전기 에너지를 공급하게 된다. 방전동작 중이라도 회생전력이 CS-2에서 다시 검출이 되거나 슈퍼 커패시터의 단자전압의 1/2에 도달하게 되면 방전동작은 정지되며, 다시 충전동작을 준비하게 된다.

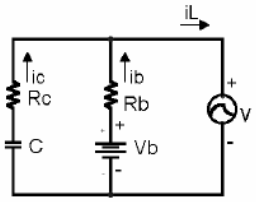
(3) 슈퍼 커패시터 과충전 보호

슈퍼 커패시터 과충전에 의한 소손을 방지하기 위해 제너다이오드로써 과전압을 억제하고 있으며, 충전전류 검출에 의해 과충전을 억제하도록 제안된다(그림 3 참조).

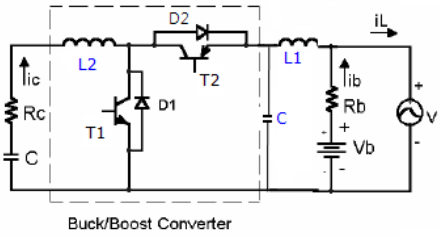
2.2 슈퍼 커패시터 뱅크 연결회로 및 균등충전/과충전 방지 회로

(1) 슈퍼커패시터 연결회로 모델링

슈퍼커패시터와 배터리 및 부하모터의 연결회로는 그림 2의 (가) 그림과 같이 등가화 모델링된다. 그림에서 부하전류(i_L)은 정상부하시에는 (+) 전류방향이 되지만 회생제동 시에는 역으로 흘러 (-) 전류가 된다. 그림 (가)의 등가화 회로에서 정상부하시를 기준으로 매우 짧은 기간 중에 기초적인 키로히호프의 전압, 전류법칙을 적용하여 회로 방정식을 세우면 식 (1) ~ (3)의 기초방정식을 얻는다.



(가) 슈퍼커패시터-배터리 병렬회로



(나) Buck/Booster Converter 연결회로

그림 2 슈퍼 커패시터 연결회로 모델링

Fig. 2 Modeling of Super-Capacitor connected circuits

$$i_c + i_b = i_L \tag{1}$$

$$v = v_c - i_c R_c = v_b - i_b R_b \tag{2}$$

$$i_c = -C\frac{dv_c}{dt} \tag{3}$$

이들 수식으로부터 식 (4)을 얻고, 이로부터 과도상태 1차 전압방정식의 해 (6)을 얻는다.

$$\frac{dv_c}{dt} + \alpha v_c = \alpha v_b + \beta i_L \tag{4}$$

$$(\text{여기서, } \alpha = \frac{1}{C(R_b + R_c)}\ \beta = -\frac{R_b}{C(R_b + R_c)}) \tag{5}$$

$$v_c = Ke^{-\alpha t} + v_b + \beta e^{-\alpha t}\int i_L e^{\alpha t} dt \tag{6}$$

(K는 v_c, v_b 초기치에 의해 결정됨)

슈퍼커패시터 전압은 식 (6)에서 주어진바와 같이 정상상태인 배터리 전압과 과도전압 상태 전압의 합으로 이루어져 있음을 알 수 있으며, 슈퍼커패시터 용량(C), 내부저항(R_b, R_c)과 배터리 및 슈퍼커패시터 초기전압상태에 의해 결정됨을 확인시켜 준다. 그림 2의 (나)에서는 슈퍼커패시터 충방전 DC-DC 전력변환소자를 포함한 등가회로의 모델링을 나타내고 있다. 그림에서 전력의 흐름은 전력 스위치 T1, D1, T2, D2의 동작에 의해 결정되며, 슈퍼커패시터에 충방전되는 전력량은 PWM 신호의 듀티비에 의해 결정된다. 즉, 정상부하 전류를 공급(정상운전)시에는 스위치 T1와 D2에 의해 슈퍼커패시터로부터 모터부하로 전류가 흐르게 되며, 반대로 회생제동 발생시에는 스위치 T2와 D1에 의해 슈퍼커패시터에 역방향으로 흐르게 된다. 이를 슈퍼커패시터에 흐르는 전류는 식 (7)에서와 같이 2계 미분방정식으로 표현된다. 이 경우 $f(t)$는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{di_c^2}{dt^2} + \frac{R_c}{L_2}\frac{di_c}{dt} + \frac{1}{L_2 C} i_c = f(t) \tag{7}$$

$$f(t) = \begin{cases} 0 & S_1, S_4 \\ \dfrac{R_b}{L_2}\dfrac{di_L}{dt} & S_2, S_3 \end{cases} \tag{8}$$

식 (8)에서 S1은 T1, D2가 모두 turn-on 상태를 S2는 T1와 D2가 모두 turn-off 상태, S3은 T2, D1이 모두 turn-on 상태, S4는 T2, D1이 모두 turn-off 상태를 각각 나타낸다.

(2) 슈퍼커패시터 균등화 충전 및 과충전 보호

슈퍼커패시터는 저전압(2.7V) 대용량(보통 100~1000F)을 갖는 대용량 커패시터를 말하며, 양극사이에 산화금속 및 폴리메르 화합물을 사용하여 전하를 충전함으로써 전기화학적 작용에 의해 전하를 충전하는 배터리와는 근본적으로 차이가 있다. 따라서 요구하는 전압레벨에 적합하도록 사용하기 위해서는 다수의 커패시터를 직렬로 연결한 뱅크 형태로 사용해야 하고, 이 경우에 직렬연결에 의한 불균등 충전현상이 발생하기 쉽다. 이러한 현상을 방지하기 위해 균등화 충전회로가 필요하고 과충전현상을 방지하기 위해 제너다이오드를 이용하여 일정 전압을 유지하도록 한다. 그림 2에서 이에 대한 회로도와 슈퍼 커패시터 소자를 나타내고 있다. 본 회로 시뮬레이션과 회로시험에서 활용된 커패시터 뱅크소자는 전기자전거 모터부하(24V, 250W)을 고려하여 100F 2.7V 용량을 갖는 10개의 슈퍼 커패시터를 사용하여 직렬 커패시터의 용량은 27V, 10F을 갖는다. 또한 슈퍼 커패시터 뱅크에는 10A 부하전류와 20KΩ의 균등화 저항을 사용하여 직렬 커패시터에서 발생하기 쉬운 불균화 충전을 방지하도록 고려하였다.

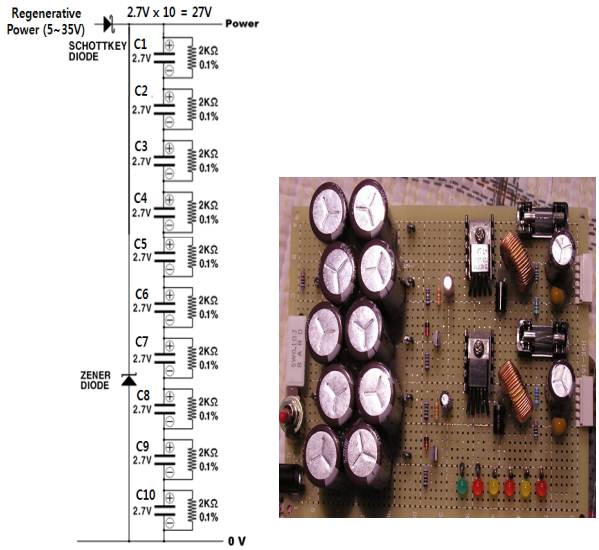


그림 3 슈퍼커패시터 뱅크의 균등충전 회로 및 장치도

Fig. 3 Equalizing Charging Circuit and Apparatus of Super-Capacitor Bank

3. 제어 알고리즘

일반적으로 슈퍼 커패시터의 가격이 높은 관계로 커패시터 용량 선정에서 많은 제약이 따른다. 또한 배터리와 수퍼커패시터의 상호 보완적인 에너지 저장 기능에 따라 배터리 용량을 고려하여 커패시터 용량은 최소치가 되도록 해야 한다. 커패시터 에너지 저장능력에 영향을 미치는 요소로써 배터리 전압, 배터리 충전상태, 순간적인 배터리 전류치, 부하전류, 커패시터 충전상태 및 전류치 등이다. 또한 차량의 속도가 고려되어야 한다. 즉, 차량이 최초 가속할 경우에는 기동전류가 높이 때문에 배터리 및 커패시터가 부하 전류를 충분히 공급할 수 있어야 하고, 정상 운전 중에는 커패시터는 완전 방전상태로써 가급적 많은 전력을 저장할 준비를 해야 한다. 또한 중간속도인 경우에는 충방전을 빈번히 수행할 수 있도록 해야 한다. 배터리와 커패시터에 저장되는 에너지는 $E=\frac{1}{2}CV^2$으로 전압의 제곱에 비례하여 전압측정을 통해 충방전상태를 추정하는 좋은 방법이 된다. 특히 배터리 단자 전압이 정격전압에 비해 급격히 높아질 경우에는 배터리에 저장된 에너지가 완전충전 상태를 예상해야 한다. 또한 커패시터 충전상태 또한 단자전압 측정을 통해 예측이 가능하고 이는 커패시터 충전 에너지($E_{cap}=\frac{1}{2}C_{cap}V_{cap}^2$)에 의해 결정되고, 커패시터 전압은 IGBT(T2)의 PWM 게이팅 신호의 듀티비로써 조정가능하다. 따라서 커패시터의 충방전을 위한 제어동작은 다음과 같이 수행되어야 한다.

(1) 커패시터 충전모드(회생제동시)

차량이 움직이는 상태에서 부하전류가 역방향으로 흐르는 경우에는 회생제동이 발생하고 있음을 뜻하고, 배터리 단자 전압이 급격히 증가할 경우에 회생전력 에너지를 커패시터로 저장하도록 해야 한다. 이 경우 커패시터 전압은 가능한 낮은 전압을 유지하도록 Buck 운전에 의한 PWM 듀티비를 제어해야 하고, 일정치 이상으로 증가된 경우에는 커패시터에 저장된 에너지가 만충전 상태로 더 이상 저장할 수 없음을 인지하고 이 경우에는 충전을 정지하도록 해야 한다.

(2) 커패시터 방전모드(모터 가속운전시)

차량이 움직이는 상태에서 부하전류가 부하방향으로 흐르고 배터리 단자 전압이 낮아지는 경우에는 가속 운전 상태로 정상적으로 부하전류를 공급한다. 이 경우에는 커패시터에 저장되었던 에너지를 다시 부하 쪽으로 공급하도록 커패시터 전압을 Boost 운전에 의한 PWM 듀티비를 제어한다.

위와 같은 모든 동작은 마이크로프로세스(MCU)에 의해 제어되어야 한다. 전기차량용 슈퍼커패시터 충방전 양방향 Boost-Buck 쵸핑회로의 전류제어 알고리즘의 흐름도를 그림 4에서 나타내고 있다. 앞에서 상술한 바와 같이 회생전력 및 정상적인 모터구동 전력제어에 따라 요구되는 전류제어를 위한 비례적분제어(PI Control) 알고리즘[13]을 적용하였다. 그림 1에서 나타낸 그림과 같이 요구되는 전력의 차이만큼 슈퍼커패시터로 전류가 유입되거나 유출되도록 Boost(Step-up) 시키거나 Buck(Step-down)용 IGBT의 PWM 듀티비를 가변시킨다.

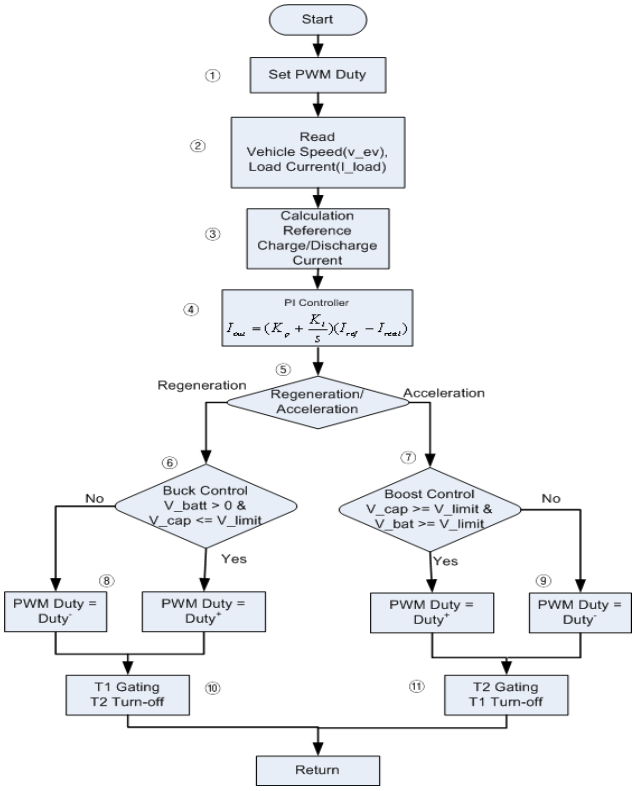


그림 4 회생에너지 충방전 장치제어 흐름도

Fig. 4 Flow diagram of Control Algorithm for Regenerative Energy Charging Apparatus

이렇게 제어함으로써 궁극적으로 전기차량의 회생시 발생되는 전력을 효율적으로 슈퍼커패시터에 충전하여 저장하거나 방전시켜 부하전류로 활용될 수 있도록 해야 한다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 제안된 회로의 시뮬레이션 조건

제안된 회로의 성능을 확인하기 위해 Simplorer Tool[16]을 이용한 회로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 회생제동시에는 발전기 역할에 의한 전압원으로 가정되고 반대로 정상적인 모터부하인 경우에는 모터부하로 가정하였다. 배터리의 충방전 특성을 고려하여 배터리 모델과 회생제동 IGBT의 On-Off를 PWM 신호와 출력상태를 고려하였다. 시뮬레이션에 사용된 능동조사의 파라메터는 표 1과 같다.

4.2 회생제동시 시뮬레이션 결과 및 분석

회생에너지 저장에 따른 회로 시뮬레이션 결과는 그림 5~10에서 전류흐름과 전압상태를 구분하여 그림으로 나타내고 있다. 그림에서 회생제동모드에서는 회생전력 발생시

표 1 회로 시뮬레이션 및 성능시험 조건

Table 1 Parameter Conditions for Circuit Simulation and Performance Test

파라메터	단위	값	비고
Super-Capacitor	F	10	
	V	27	
Battery Bank	Ah	12	
	V	24	
L1	mH	0.1	
L2	mH	0.2	
C	uF	200	
PI Gain (MCU)		$1+100/s$	(주*)
IGBT PWM 주파수	kHz	20	IRG4PC40UD/TO
Brushless DC Motor	V	24	
Motor Capacity	W	250	
Motor Inductance	mH	0.0013	
Motor Resistance	Ohm[Ω]	0.068	

(주*) MCU : dsPIC30F6012 (Microchip Co.)

슈퍼커패시터에서 일시적으로 약 20A의 충전전류가 흘러 충전전압이 램프적으로 상승하여 약 27[V]에 이러고 충전전압에 도달하면 더 이상 충전하지 않는다. 이 과정에서 배터리 충전전류 및 인덕터 전압의 변화량을 확인할 수 있다. 이 결과에서 배터리에 충전되는 전류는 거의 0에서 머무르고 대부분이 슈퍼커패시터에 효과적으로 충전되고 있음을 알 수 있다. 또한 슈퍼커패시터 전압은 초기 0[V]에서 최고전압 27[V]에 이러르 더 이상 상승하지 않고 충전된 상태에서 머무러고 있다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이 회생제동 기간 중에 배터리에 충전되는 전류는 고조파 성분의 전류를 무시하면 거의 전류의 흐름이 없는 상태에서 머무른다.

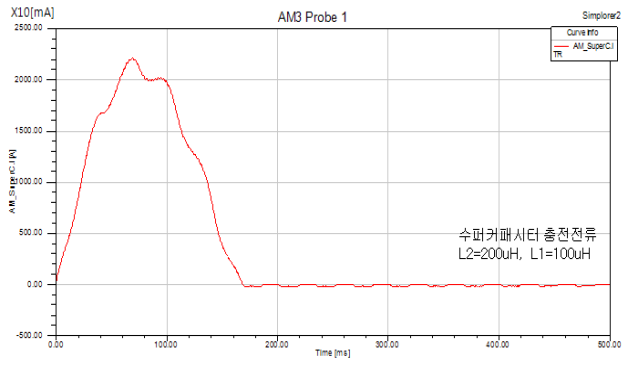


그림 5 회생제동시 슈퍼커패시터 충전전류

Fig. 5 Charging Current of Super-Capacitor in Regenerative Braking Mode

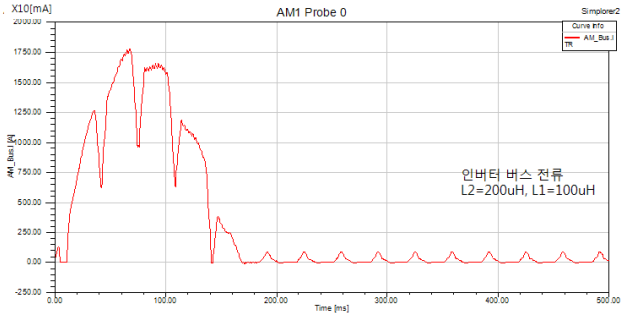


그림 6 회생제동시 인덕터 버스유입 전류

Fig. 6 Input Current of Inductor Bus in Regenerative Braking Mode

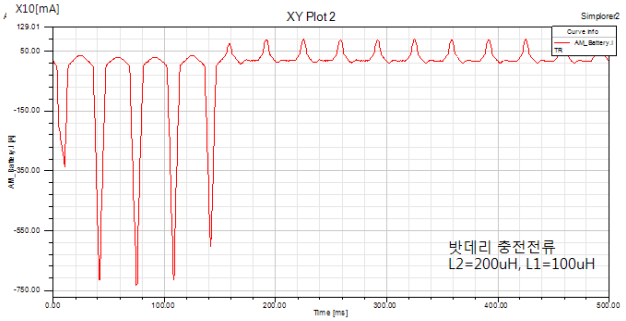


그림 7 회생제동시 배터리 충전전류

Fig. 7 Charging Current of Battery in Regenerative Braking Mode

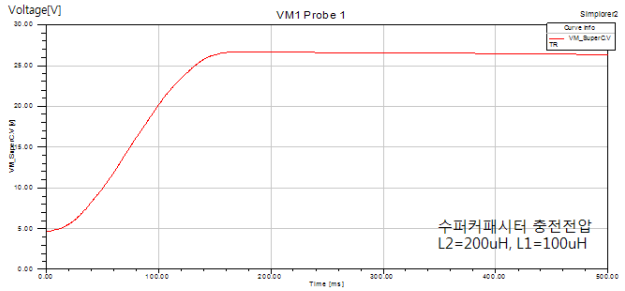


그림 8 회생제동시 슈퍼커패시터 충전전압

Fig. 8 Voltage of Super-Capacitor in Regenerative Braking Mode

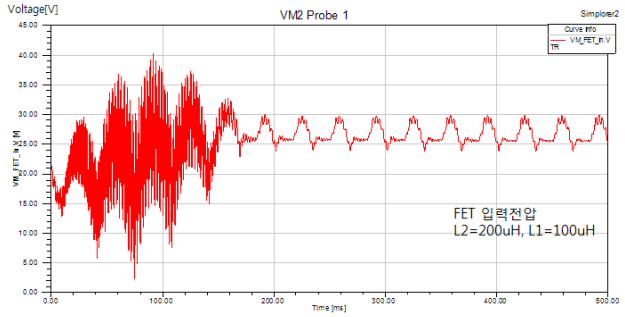


그림 9 회생제동시 IGBT 입력전압

Fig. 9 Input Voltage of IGBT in Regenerative Braking Mode

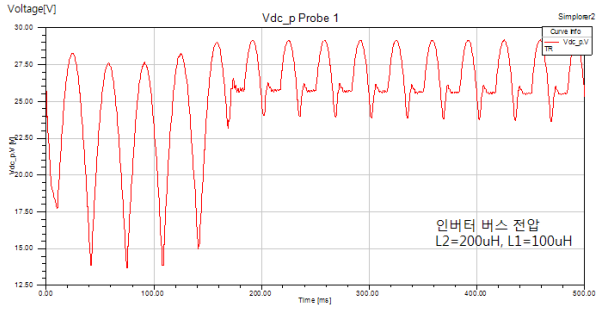


그림 10 회생제동시 인덕터 버스 전압

Fig. 10 Voltage of Inductor Bus in Regenerative Braking Mode

4.3 모터 가속모드시 시뮬레이션 결과 및 분석

정상적으로 차량용 모터에 전력을 공급할 경우에는 그림 11에서와 같이 슈퍼커패시터 전류는 역으로 흐르게 되어 부하전류에 전력을 공급하고, 일부는 배터리에 전력을 충전함으로써 배터리에 저장된 전력이 증가됨으로써 배터리의 사용시간을 늘리는 효과를 얻는다. 모터 가속에 필요한 최대 약 -35A의 전류가 방전초기에는 슈퍼커패시터 방전전류로 모터부하전류로 반대방향으로 흘러 방전하고 있음을 뜻한다. 이후에는 슈퍼커패시터에 저장되었던 전류가 모두 방전되어 재충전 준비를 하고 있음을 뜻한다. 도한, 그림 14에서와 같이 슈퍼 커패시터 전압이 5[V] 이하가 될 경우에는 방전을 멈추고 이후에는 배터리에서 부하전류가 흐르고 이후에 커패시터 전압은 최소 전압 5[V]로 복귀되어 정상상태를 회복함을 알 수 있다.

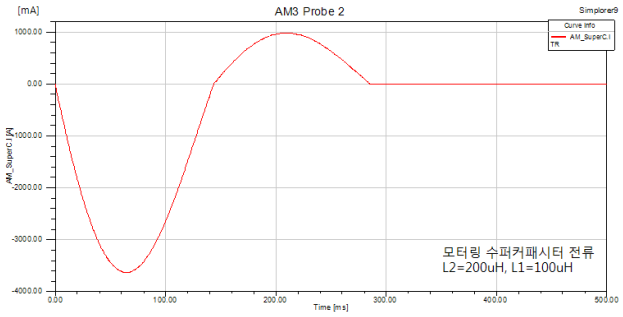


그림 11 모터 가속시 슈퍼커패시터 전류 흐름

Fig. 11 Discharging Current of Super-Capacitor in Motor Accelerating Mode

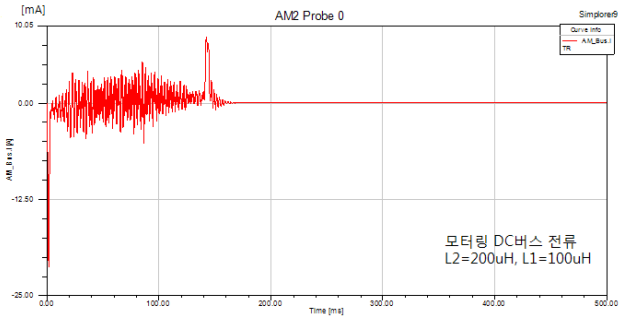


그림 12 모터 가속시 DC 버스 전류 흐름

Fig. 12 Current of DC Bus in Motor Accelerating Mode

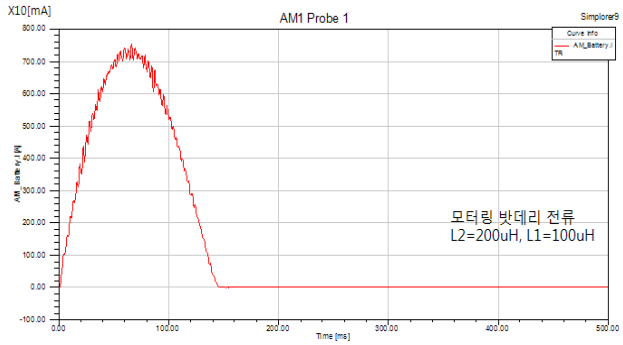


그림 13 모터 가속시 배터리 전류 흐름

Fig. 13 Charging Current of Battery in Acceleration Mode

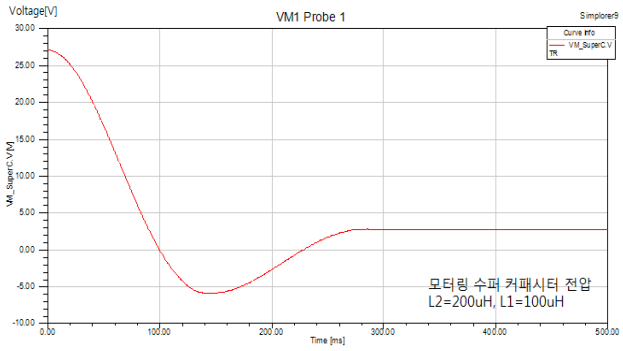


그림 14 모터 가속시 슈퍼커패시터 전압상태

Fig. 14 Voltage of Super-Capacitor in Acceleration Mode

4.4 실장시험 및 성능분석

그림 16에서 나타낸 바와 같이 제안된 회로의 성능을 검증하기 위해 전기자전거를 이용하여 회생제동 모드와 정상 모터의 가속모드에 대하여 성능시험을 수행하였다. 회로에 사용된 실험 장치에는 24V, 250W, 1800rpm 브러시리스 모터의 전기자전거를 사용하였다. 자전거 페달로써 회생전력을 발생시키는 발전기 역할을 모의할 수 있다. 그림 15에서 회생에너지 충방전 시험결과를 나타내고 있다. 그림에서 커패시터 전압(Vc)와 전류(Ic)를 각각 나타낸다. 그림에서 모터 전류는 약 20A의 부하전류가 흐르고 있으며, 모든 전류는 슈퍼커패시터로 흐르고 배터리로 흐르는 전류는 0A이다. 커패시터 전압은 회생제동모드에서는 최대전압 35V에까지 이르고, 가속모드에서는 최소 약 5V까지 도달한다. 그 이후에는 슈퍼 커패시터의 방전은 멈춘다. 배터리 전압과 전류는 계측이 어려운 점 있었으며, 자전거 바퀴의 동작상태는 극히 정상상태임이 확인되었다. 본 실험을 통해서 회생에너지를 위해 슈퍼 커패시터가 제 역할과 기능을 충분히 하고 있음을 확인할 수 있다.

이 시험결과는 앞서 시뮬레이션 결과와 전류와 전압의 크기에서 다소 차이가 발생하고 있는데, 이는 시뮬레이션 조건과 실제 시험장치의 설계 파라메터 상의 차이에서 비롯되고 있는 것으로 판단되며, 전체적인 동작경향은 극히 정상적으로 동작되고 있음을 시험결과를 통하여도 확인할 수 있었다.

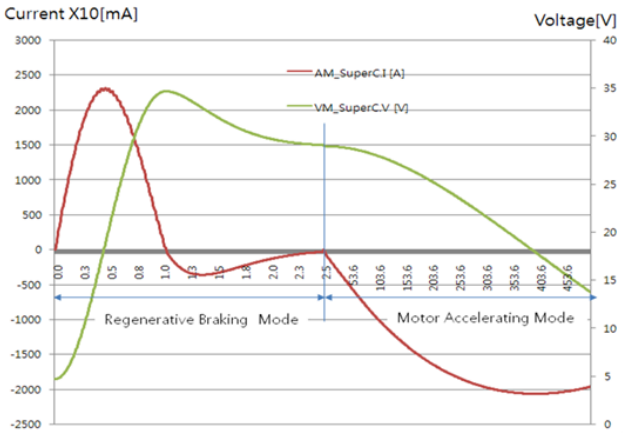
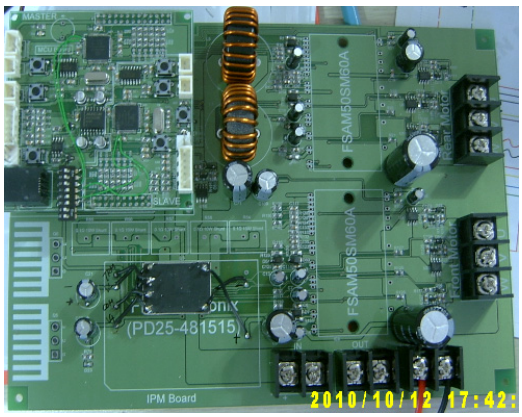


그림 15 회생제동 및 모터 가속 모드시 슈퍼커패시터의 전류 및 전압 상태

Fig. 15 Current and Voltage of Super-Capacitor in Regenerative Braking and Acceleration Mode

(가) 전기자전거 실험장치 셋업



(나) 모터 드라이버 PCB 보드

그림 16 전기자전거 실험장치 사진

Fig. 16 Testing Setup of Charging/Discharging Current of Super-Capacitor for Regenerative Energy of Electric Bike

5. 결 론

회생에너지 충방전을 보다 효율적으로 저장하고 관리하기 위해 슈퍼 커패시터를 활용한 양방향 DC-DC 충방전 회로와 제어방법을 새로이 제안하였다. 본 제안된 장치의 근본적인 목적은 회생제동시 흔히 발생하는 현상으로 배터리에서 발생하기 쉬운 빈번한 충방전에 따른 열화현상을 방지하고 회생제동에 의해 발생된 전기 에너지의 손실을 최소한으로 줄여 줌으로써 전기 에너지 효율향상을 꾀하는데 있다. 이를 위해 충방전 능력이 뛰어난 슈퍼 커패시터를 활용함으로써 배터리의 전기 에너지 저장효율향상과 과도현상을 억제할 수 있었다. 시뮬레이션과 자전거 실험장치의 시험측정을 통해 그 성능이 매우 효과적임을 확인하였다. 본 제안된 회로 기술과 방법은 배터리를 사용하는 전기차량용(전기자전거, 전기오토바이 및 전기자동차)의 회생에너지 충전장치로 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국산업기술진흥원의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 기술개발과제 (과제명 : “청소기용 전동기 및 드라이버(제어기) 개발”의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] 권오정, 박창권, 오병수, "슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 증대 및 제동에 관한 연구", KSAE, Vol 14, N0. 6, pp 24-33, 2006. 06.15

[2] Kyung-Won Kim, et all, "Implementation if Inverter Systems for DC Power Regeneration", Proceedings ICPE'01, Seoul, 2001

[3] Kasuga N, et all , "Ultra-Capacitir and Battery Hybrid EV with High Efficiency," EVS-15, 1998.

[4] Nomura, H., "A Basic Study on Regenerative Braking System Employing a Controlled Current Source", First Circular of CHINA-JAPAN Electric Vehicle Joint Conference-Beijing, 221-227, 2001.

[5] Ohshima, M., et. al., "Novel Utility-interactive Electrical Energy Storage System by Electrical Double Layer Capacitors and an Error Tracking Mode PWM Converter", Trans. IEE Japan, Vol. 118-D, No. 12, 1417-1425, 1998.

[6] Sugimoto, S., et al., "Energy Storage System Utilizing Large Capacity Electric Double-Layer Capacitors for Peak-Cut of Power Demand", Trans. IEE Japan, Vol. 432 11 8-D, No. 12, 1377-1385, 1998.

[7] Hiroshi Nomura, "Development of a Regenerative Braking System using Super Capacitors for Electric Vehicles", Journal of Asian Electric Vehicles, Volume 1, No. 2, Dec. 2003

[8] S. Pay, et all, “Effectiveness of Battery

Super-capacitor Combination in Electric Vehicles“, 2003 IEEE Power tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy
[9] Jun Takehara, et al, "EV Mini-Van Featuring Series Conjunction of Super-capacitors and Batteries for Load Leveling of its Batteries",14th Electric Vehicle Symposium, 1996 [on CD ROM].
[10] L.A.Viterna, "Super-capacitor Energy Storage in a Large Hybrid Electric Bus", NASA Lewis Research Center, 21000 Brookpark Rd., Cleveland, Ohio 44135. 14th Electric Vehicle Symposium, 1996[on CD ROM].
[11] F. Caricchi, F. Crescimbini, F. Giulii Capponi, L. Solero, "Super-capacitors Employment in Supply Systems for EV Motor Drives: Theoretical Study and Experimental Results", University of Rome. 14th Electric Vehicle Symposium, 1996 [on CD ROM].
[12] A. F. Burke, "Electrochemical Capacitors for Electric Vehicles. Technology Update and Implementation Considerations", University of California at Davis, EVS-12 Symposium Proceedings, pp.27-36, 1996.
[13] Ogatta, Discrete Control System, Printice-Hall Publish Co. 1995
[14] “슈퍼커패시터 기술개발동향 보고서” 한국과학기술정보연구원 2007. 9
[15] Maxwell Super-capacitors Data sheets and technical information for 100 and 250 Farads, [Maxwell publications]
[16] Simplorer (version 8) User Manual, ANSYS inc. http://www.ansys.com.

저 자 소 개

정 대 원 (鄭 大 源)

1957년 8월 6일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 학사. 1996년 충남대 대학원 전기공학과 석사. 1999년 동 대학원 전기공학과 박사. 1982년 - 1990년 한국전력기술 선임기술원. 1990년- 1997년 한국원자력연구소 선임연구원. 1997년 3월-현재 호남대학교 공대 전기공학과 교수

Tel : 062-940-5494

E-mail : dwchung@honam.ac.kr