

슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 증대 및 제동에 관한 연구

권 오 정* · 박 창 권 · 오 병 수

전남대학교 기계시스템공학부

A Study of Increasing Regeneration Energy and Braking Using Super Capacitor(EDLC)

Oh Jung Kwon* · Chang Kwon Park · Byeong Soo Oh

Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 4 January 2006/Accepted 30 June 2006)

Abstract : This experiment explains about electrical braking equipment which will be used for 1.2kW PEMFC HEV. The equipment is made of BLDC motor and super capacitor(EDLC). The circuit is designed for regeneration braking that can save the energy from low voltage of generation with BLDC motor. Increasing a regeneration energy from braking system is effected with regeneration current and SoC of super capacitor(EDLC). Electrical braking in electrical vehicle is suitable for regeneration braking with dynamic braking together.

Key words : Regeneration braking(회생제동), Dynamic braking(발전제동), Electrical vehicle(전기자동차), Regeneration energy(회생에너지), Brush Less Direct Current motor(브러시리스(BLDC)모터), Electric Double Layer Capacitor(전기이중층 콘덴서), Hybrid Electric Vehicle(HEV, 하이브리드 전기 자동차)

1. 서 론

전기 자동차 및 연료전지 자동차는 많은 장점이 있으며, 다양한 방면으로 연구되어지고 있다. 이러한 연구 분야의 하나로서 순수 전기자동차 및 연료전지 자동차의 회생에너지를 얻으려는 노력은 계속되고 있다.¹⁾

차체(車體)가 가지고 있는 기계적 운동 에너지(Kinetic energy)를 전기적 에너지(Electrical energy)로 재생하여 생성된 에너지(Regeneration energy)를 얻을 수 있다면, 연료의 효율을 높일 수 있으며, 모터의 과열 방지 및 브러시(Brush)등의 모터 장비 수명을 연장 시켜 유지비를 줄일 수 있는 부가적 효과를 얻을 수 있다.

연료전지 자동차의 개발은 배터리를 이용한 Hybrid화를 주로 연구 하였으나, 출발과 정지를 수시로 반복하는 시내주행의 경우에는 그 특성에 더욱 적합한 구조라 판단되는 전기이중층 콘덴서(EDLC, -이하 슈퍼커패시터라 칭한다-)를 이용한 Hybrid화를 연구하고 있다.²⁾

본 연구는 연료전지 자동차와 전기 자동차에 사용할 슈퍼커패시터 Hybrid화 장비를 구성하고, 이를 이용하여 회생에너지를 얻고자 한다.

2. 이론적 배경 및 실험장비 구성

실험 장비는 배터리(Battery)와 슈퍼커패시터의 모듈(-이하 뱅크(Bank)라 칭한다-)을 이용하여 Hybrid 시스템을 구성하였다. 모터는 550W급의 BLDC Motor를 사용하였으며, 모터의 제어는 자체

*Corresponding author, E-mail: parranmal@empal.com

내장된 제어회로를 제어하는 장비를 사용하였다.

2.1 이론적 배경

2.1.1 모터의 전기적 제동법

전동기 및 부하 기계의 플라이휠 효과(GD²)가 큰 경우는 전동기를 전원분리 후에도 즉시 정지하지 않는다. 회전부의 축적된 운동 에너지가 기계적 마찰 및 공기마찰로 인하여 흡수될 때까지 회전을 계속한다.

회전부의 운동에너지를 제거하는 방법은 기계적 마찰력에 의해 제동을 거는 기계식 방법과 전기적 방법으로 나누어 볼 수 있다. 이때 회전에너지를 전기에너지로 변환하여 제동하는 방법을 모터의 전기적 제동법이라고 하며, 직류기에 사용하는 전기적 제동법을 요약하면 다음과 같다.³⁾

a) 역상제동 (Plugging braking)

단자접속을 변경하여 회전방향과 역방향으로 토크를 주어 제동하는 방법이다. 직류기의 경우는 단자 접속을 바꾸어 주며, 유도전동기의 경우는 3선(R-U, S-V, T-W)중 2선(T-V, S-W)의 접속을 바꾸어 제동하는 방법이다.

b) 회생제동(Regeneration braking)

회전부에 축적된 운동에너지를 전원측으로 반환하면서 제동을 하는 방법

c) 발전제동(Dynamic braking)

모터의 전기자를 전원에서부터 분리하여 발전기로 작용시키고, 회전부의 운동에너지를 제동저항에서 열로 소비시키는 방법

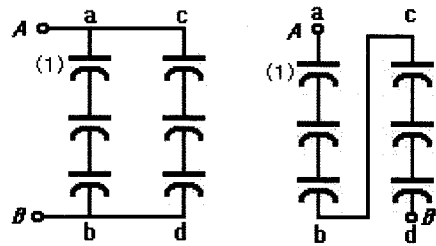
출력이 낮은 전기자동차(EV) 차량들의 경우는 이러한 전기적 제동법을 이용한 제동이 가능하다. 전기자동차는 기존의 내연기관 차량에 비하여 무공해, 저소음, 에너지 효율이 좋은 것 등의 많은 장점이 있음에도 불구하고 아직은 출력 밀도가 낮은 구동 시스템이기 때문에 가속력이 약할 뿐만 아니라 최고 속도가 낮으며 가솔린 연료에 비해 에너지 밀도가 낮아 일 회 충전 주행 거리가 짧다는 등의 요소

기술의 문제점과 소량 생산으로 가격이 기존 차량에 비해 2~3배 비싸다는 점등으로 인하여 그 보급이 미미한 실정이다.⁴⁾ 이러한 단점을 해결하는 방법으로 회생 에너지를 획득함으로써, 에너지 효율을 높이는 방안이 지속적으로 연구되고 있다.

2.1.2 슈퍼커패시터 회로

연료전지와 Hybrid화를 통해 소기의 목적(연비 및 가속성능 향상, 비용절감 등)을 달성 가능한 에너지 저장장치로는, 현재까지 배터리와 슈퍼커패시터를 들 수 있다.⁵⁾

슈퍼커패시터는 동력 시스템의 Hybrid system 구성시 지속적인 보조동력원으로 사용하기보다, 순간적인 가속과 정지 시 사용되는 출력 보조 및 에너지 회수용으로 사용된다. 슈퍼커패시터의 특성은 일반적인 콘덴서와 일치한다. Fig 1은 콘덴서의 직병렬 연결회로를 보여준다.



(a) Parallel circuit (b) Serial circuit
Fig. 1 Parallel-Serial connecting of capacitor

슈퍼커패시터의 에너지 계산과 직병렬 상태에서의 정전용량(靜電容量) 계산은 일반 콘덴서와 같은 수식을 사용한다. 다음은 직·병렬 상태에서의 정전용량계산식과 커패시터에 저장된 에너지에 대한 수식이다.

$$\text{(Serial)} : 1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n \text{ [1/F]} \quad (1)$$

$$\text{(Parallel)} : C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \text{ [F]} \quad (2)$$

$$\text{(Energy density)} : E = (1/2)CV^2 \text{ [J]} \quad (3)$$

슈퍼커패시터는 콘덴서와 배터리의 성질을 모두 가지고 있다. 따라서 에너지의 저장 상태를 SoC 상태로 표현해 준다. 슈퍼커패시터의 SoC 계산식은 다음과 같다.

$$SoC(\%) = (V_n)^2 / (V_{max})^2 \times 100 \quad (4)$$

초기 SoC 상태가 동일한 상태에서 콘덴서를 직렬 연결하고 충전하면 각각의 소자에 걸리는 전압은 일정하다. Fig. 1(a)의 경우 소자(1)의 전압은 다음과 같다.

$$V(1) = (1/3) \times V_{ab} \quad (V_{AB} = V_{ab} = V_{cd}) \quad (5)$$

이때, 균등 충전된 콘덴서를 직렬연결로 바꾸면 소자(1)의 전압은 변함없으나 A-B 양단 전압 V_{AB} 는 a-b와 c-d 모듈전압을 합한 것과 같다. 즉 병렬상태의 V_{AB} 보다 2배의 전압상태가 된다. 즉 직병렬 상태를 바꾸어 줄 경우 콘덴서 양단의 전압을 변경할 수 있다. 이때, 전체 회로의 정전용량의 값은 식 (1) · (2)에 의해서 변동하나, 회로에 저장된 에너지(Energy density)는 변하지 않는다. 병렬 상태에서 균등 충전된 '콘덴서 모듈(뱅크, Bank)'을 직렬로 변경된 후의 A-B 양단 전압 V_{AB} 는 아래 수식과 같다.

$$V_{AB} = V_{ab} + V_{cd} \quad (6)$$

2.2 실험장비의 구성

Photo. 1, Photo. 2 그리고 Photo. 3은 전기적 제동 장치를 제외한 실험장비의 외형을 보여주고 있다.

Generator/Motor는 550[W]급 BLDC Motor를 사용하였다. 사이즈는 W90*H90*L92[mm]이며, 유사한 사이즈의 직류전동기 또는 유도전동기보다 출력이 높고 가벼우며, 효율이 높은 장점이 있다. 그러나 회전자가 영구자석 이므로 자속(Magnetic flux)을 변경할 수 없고, 발전기로서 작용할 때 높은 전압을 얻는데 장애요소가 된다.

Photo. 2는 Dynamometer를 이용하여 BLDC모터와 Fly wheel의 rpm과 Torque를 측정할 수 있도록 만든 장비의 모습이다. Photo. 3은 Photo. 2에서 Fly wheel를 제거하고 BLDC 모터를 정상상태(Constant rpm)에서 실험할 수 있도록 유도전동기에 표준기어를 장착한 사진이다.

Photo. 4는 국내 대용량 슈퍼커패시터 제조회사인 NESCAP사의 2.7 Vdc, 100F 콘덴서를 이용하여 콘덴서 모듈, 즉 Bank를 만든 사진이다. Bank는 3개의

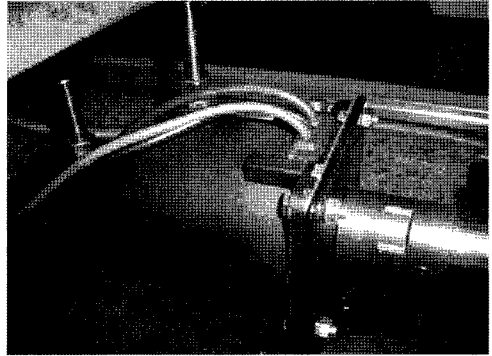


Photo. 1 External shape of BLDC motor

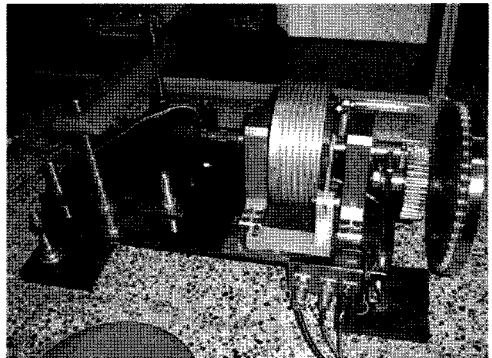


Photo. 2 Dynamometer with a Fly wheel

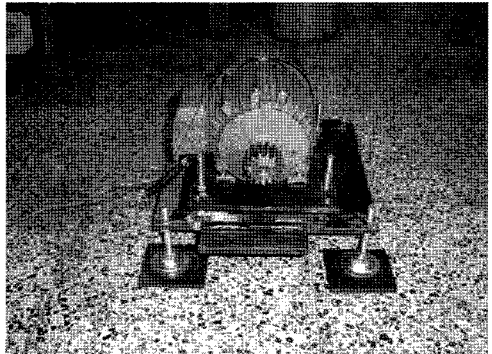
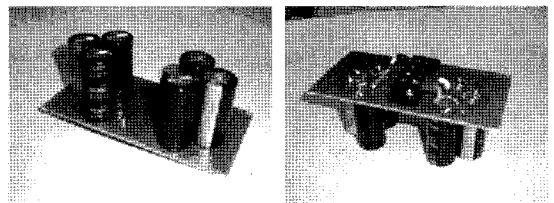


Photo. 3 Induction motor



(a) Top view

(b) Bottom view

Photo. 4 EDLC bank module (2 banks)

슈퍼커패시터를 직렬로 연결하여 구성하였으며, 각 소자별 불균등 전압을 제거하기 위하여 각각의 소자마다 +/- 단자를 오차 1%이하의 정밀저항을 이용하여 연결하였다. Photo 4는 2개의 Bank를 구성한 모습을 보여주고 있다. 본 실험에서는 총 4개의 Bank를 구성하여 실험하였다.

2.3 전기적 제동 시스템

구성된 실험장비는 발전제동과 회생제동을 모두 사용할 수 있도록 구성하였다. 본 실험에서는 전기적 제동 중 회생제동을 주요 관심 사항으로 잡으며, 회생에너지의 획득 및 제동에 관한 실험을 주 대상으로 하였다. 회생제동시 에너지 회수량을 늘릴 수 있는 방안으로 EDLC(슈퍼커패시터)의 뱅크전환을 통한 방법을 사용하였다. Bank 전환회로는 Relay를 이용하여 구성하였다. 구성된 전기적 제동장치의 회로는 Fig. 2와 같으며, 각 Relay의 역할은 Table 1에 요약하였다.

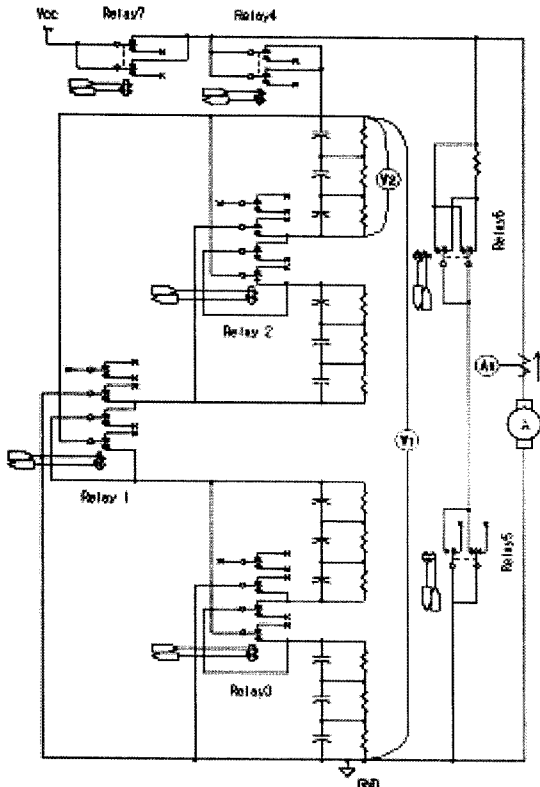


Fig. 2 Electrical braking circuit

Table 1 Use of relay

Relay n	Use
Relay1	For bank changing
Relay2	For bank changing
Relay3	For bank changing
Relay4	Circuit breaker of bank
Relay5	Relay for dynamic braking
Relay6	Relay for dynamic braking
Relay7	Circuit breaker

Fly Wheel를 이용함으로써, 평지 제동상황과 유사한 상황을 만들 수 있었으며, 이는 보다 뚜렷하게 본 실험 장비의 효과를 보여 줄 수 있었다.

발전제동 회로의 사용은 Photo 3의 유도전동기를 이용하여 일정 rpm 상태에서의 BLDC 모터의 발전 특성을 파악해 봄으로서, 전기적 제동장치의 회로 구성에 필요한 기초적인 데이터를 얻는데 사용하였으며, 이는 제4장 결과를 통하여 설명하고자 한다. 즉, 실험 초기 발전제동 장비는 회로구성을 위한 기초 실험을 목적으로 사용하였다.

Photo 5는 최종적으로 완성된 전기적 제동장치의 외형을 보여주고 있다.

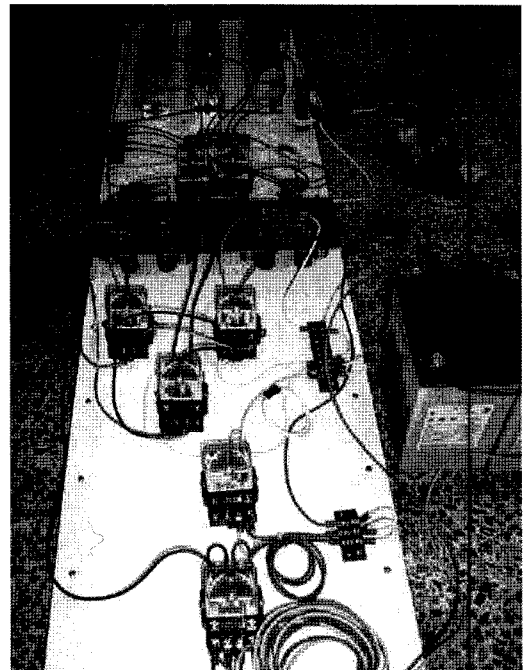


Photo. 5 External shape of electrical braking circuit

3. 실험결과 및 고찰

실험은 회생제동 장비를 구성하기 위한 기초적인 실험과 플라이휠을 이용한 슈퍼커패시터(EDLC)의 충전을 통한 에너지 회수 가능성을 알아보기 위한 실험으로 나누어져 있다.

3.1 BLDC 모터의 최고 발생 전압

회로 구성과 모터의 발전 효율을 알아보기 위하여 Photo 3의 유도전동기를 이용하여 일정한 rpm으로 돌리면서 발생하는 전압을 측정해 보았다. 최고 전압을 알아보기 위해서 ‘Open circuit’ 상태에서의 Voltage를 측정해 보았다. 아래 그림 Fig. 3은 BLDC 모터를 100rpm 단위로 증가시키면서 측정한 Open circuit voltage를 보여주고 있다. 모터의 전압은 rpm에 선형적으로 비례하면서 증가함을 알 수 있었다.

내부 회전자자 영구자석으로 되어있어 모터의 효율은 좋으나, 발전기로서 작용 시 자속(磁束)의 양을 조절할 수는 없다. 모터의 발생전압은 1500rpm에서 12.5[V]를 넘지 못하였다. 따라서 회로의 전압이 24[V]로 유지되었을 때는 모터의 회생에너지를 얻지 못할 것으로 생각되었다.

전류가 높아지면 전압은 내려갈 것이므로 회로의 구성에 있어 모터의 회생전압으로 인한 전압상승은 고려할 필요가 없었다. 모든 회로는 24[V]로 구성할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

이러한 사실을 바탕으로 회생제동을 통한 에너지의 회수량을 늘리기 위함은 물론, 필히 모터의 발생 전압보다 낮은 상태의 전압으로 슈퍼커패시터(EDLC)의 전압을 낮추어 주어야 에너지의 회수가 가능함을 알 수 있었다.

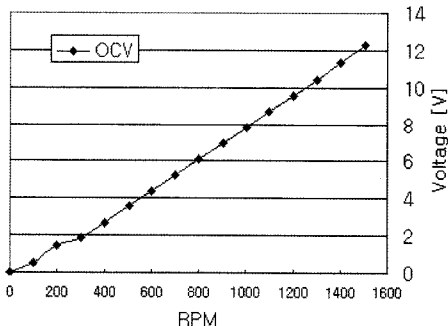


Fig. 3 Open circuit voltage of BLDC motor

Table 2 Test condition of dynamic braking

RPM	300	600	900	1200	1500
저항[ohm]	0.333	0.5	1.0	2.0	3.0

이외에도 모터에 내장된 컨트롤 시스템의 소손 없이 회생제동이 가능한지 여부를 알아 보기 위한 실험을 하기 위해서, 모터의 정격전류가 24[A]이며, 발생전압이 12[V] 정도이므로 저항은 약 0.5[ohm] 정도를 기준으로, 288[W] 이상을 견딜 수 있도록 구성하여 실험을 시작하였다.

3.2 BLDC 모터의 발전기로서의 출력 특성

3.1절의 실험 장비와 동일하게, 유도전동기를 이용하여 모터를 일정하게 돌리면서 발전제동(Dynamic braking)을 통해 정상상태에서의 전류와 전압 그리고 전력을 측정하였다. BLDC 모터의 내부회로의 안전성을 위해서 저항값은 3[ohm]부터 시작하여 실험하였다.

실험에 사용한 저항은 1[ohm] 300[W]이다. 저항 3개를 이용, 직·병렬로 구성하여 Table 2와 같이 저항값을 설정하였으며, 추가적으로 모터의 두 전원 단자를 Short시키는 실험을 하였다. 이때는 모터의 정격전류를 감안하여 24[A]를 넘지 않는 범위에서 실험을 실시하였다. 또한 기준 저항값을 0.5[ohm]으로 설정하였으므로, 기준저항보다 조금 낮은 저항값인 0.333[ohm]을 두어, 그 특성을 파악해 보았다.

Fig. 4, Fig. 5 그리고 Fig. 6은 실험용 모터의 출력과 전압 그리고 전류를 측정한 값이다. 최고 출력은 Short회로에서 발생하였다. 817rpm에서 24[A]가 측정되었기 때문에 Short회로의 실험을 중단하였다.

저항값이 낮을수록 전류는 높게 측정되고 전압은 낮게 측정 되었다. 전압값은 OCV(Open circuit voltage)보다 모두 낮게 측정되었으며, 저항에 따른 값의 차이는 크게 두드러지지 않았다. 저항에 따른 전류의 값은 1500rpm에서 최고 전류와 최소 전류가 각각 0.333[ohm]과 3[ohm]에서 측정되었으며, 그 측정 전류차이가 약 5배 정도 되었다. 이를 통해서 본 모터의 발전출력 특성은 전류의 영향이 전압보다 두드러짐을 알 수 있었다.

출력의 경우, Fig. 4에서 알 수 있듯이 0.333[ohm]-1500rpm에서 약 172[W] 정도의 최고 출력을 보였다.

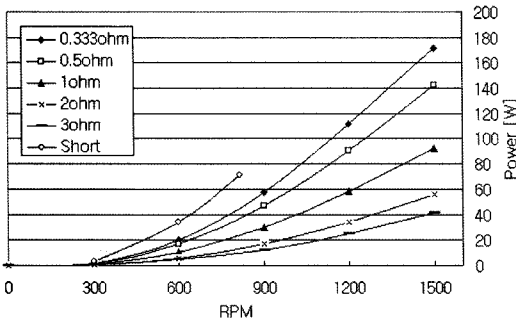


Fig. 4 Power of BLDC motor

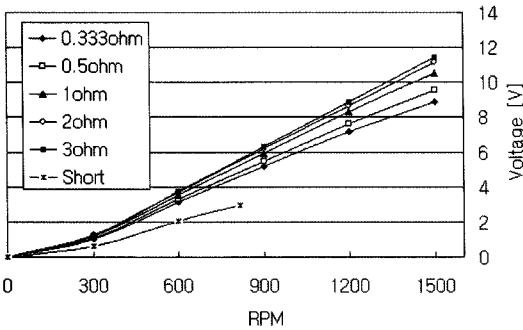


Fig. 5 Voltage of BLDC motor

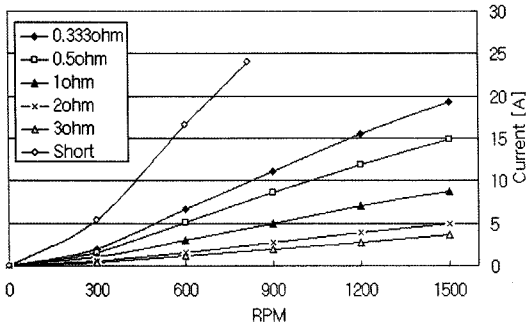


Fig. 6 Current of BLDC motor

모터의 정격출력이 500[W]이며, 전기 장비의 효율이 70~90[%]을 갖는다는 점을 감안할 때 발전능력은 좋지 않음을 알 수 있었다. 이는 모터의 특성에 기인한 것이라 하겠다.

모터의 LCR Meter를 이용하여 RLC값을 측정하여 내부저항 및 역기전력을 발생시키는 코일 값을 측정하여 보았다. 저항(R)은 54,792[ohm]이고, 코일(L)값은 45.6[mH]이며, 콘덴서(C)값은 553.77[nF]이었다. 모터의 내부 저항은 크고, 코일값 또한 작지 않음을 알 수 있었다.

3.3 플라이휠을 이용한 회생제동

본 실험은 1회 정지 시 발생하는 회생에너지를 얻어 봄으로서 회생제동 장치로서의 가능성을 알아보기 위함이다. 플라이휠은 지속적인 에너지를 갖지 않고, 동력이 전달된 최종 상태의 회전속도의 제곱에 비례하여 에너지를 가지며, 전기적 제동 시 단위 임펄스(Unit impulse)와 같은 효과를 가짐을 경험적으로 알 수 있었다. 따라서 회로의 분석을 위해서 발전제동용 저항을 이용하여 모터의 정상상태의 경우를 알아보았다면, Fly wheel은 충격량에 가까운 힘을 가할 경우에 에너지 획득이 가능한지 여부를 알 수 있었다.

또한 플라이휠은 자동차와 같이 초기중량을 가지고 출발하는 경우와 평지 제동과 유사한 효과를 얻을 수 있다. 이는 유도전동기를 통해 지속적인 에너지를 얻는 상황이 긴 경사로를 내려가는 것을 모사할 수 있는 경우와 조합할 수 있는 좋은 상황모사(狀況模寫)조건이다.

회로의 특징을 비교하기 위해 3가지 실험을 하였다. 첫째, 배터리만 사용하여 모터를 구동하는 경우, 둘째, 배터리와 슈퍼커패시터의 Hybrid 상태에서 बैं크(Bank)전환을 하지 않는 경우, 마지막으로 배터리와 슈퍼커패시터의 बैं크전환을 통한 회생제동을 사용하는 경우이다. 각 실험의 결과는 Fig. 7과 Fig. 8 그리고 Fig. 9 순으로 그려보았다.

3.3.1 배터리만 사용하여 모터를 구동

아래 Fig. 7은 배터리만을 사용하여 모터를 구동하는 경우의 시간에 따른 배터리(주전원: Circuit voltage)의 전압과 회생전류(Current) 그리고 모터의 속도변화(rpm)를 보여주고 있다.

보조 동력원 없이 급속한 출발을 하는 경우, 배터리의 전압이 급격하게 떨어지는 모습을 알 수 있다. 6~7[s]사이와 62~64[s]사이에서의 급격한 전압변동이 그 대표적인 모습이라 하겠다. 특히 6~7[s]사이에서의 rpm 변화를 보면 상승하던 속도가 한번 떨어졌다 속도를 다시 회복하는 모습을 알 수 있다. 이러한 상황은 BLDC모터를 보조동력없이 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC) 시스템에 사용한다면, 모터 기동시 출력을 기대할 수 없으며, PEMFC 시스템의 급격한 전류변동을 유발하여 수명을 단축시킬 수 있다.

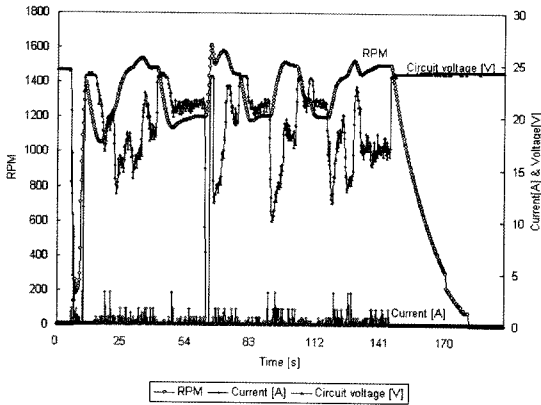


Fig. 7 Driving BLDC motor with battery only (@ 24.5[V])

140[s] 부근에서 모터는 정지하고 있으나 회생전류는 전혀 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 BLDC 모터의 rpm의 변화폭은 크지 않았으며, 제동으로 인한 소리도 발생하지 않았다.

이는 배터리가 SoC상태에 따른 내부저항의 변화에 따라 회생에너지를 얻지 못하는 경우보다는, BLDC 모터의 발생전압이 주전원 전압(Battery voltage)보다 낮기 때문에 나타난 현상이다.

3.3.2 배터리와 슈퍼커패시터의 Hybrid 상태로 모터 구동

아래 Fig. 8은 배터리와 슈퍼커패시터의 Hybrid 상태로 모터를 구동하는 경우의 시간에 따른 배터리(주전원:Circuit voltage)과 슈퍼커패시터(EDLC: Module voltage)의 전압과 회생전류(Current) 그리고 모터의 속도변화(rpm)를 보여주고 있다.

Table 3은 Fig. 2에서 Relay의 시간에 따른 스위칭을 나타내는 ‘Time table’이다. 슈퍼커패시터(EDLC)는 뱅크전환을 하지 않으므로 Relay1~4는 작동하지 않는다. 따라서, 12개의 콘덴서가 병렬로 접속되어 보조 전원으로 작동한다. 이때, 오직 회생에너지의 측정을 위해서 Relay7을 사용하여 모터가 작동한 후, 200[s]가 흐른 시점에서 주전원인 배터리의 연결을 끊어 주었다.

이때 200[s]에서 모터가 완전히 멈춘 237[s]사이에서 회생전류의 발생은 일어나지 않았으며, 오히려 미소하나마 전압이 떨어지는 모습을 관찰하였다. 또한 BLDC 모터의 rpm의 변화폭은 크지 않았으며, 제동으로 인한 소리도 발생하지 않았다.

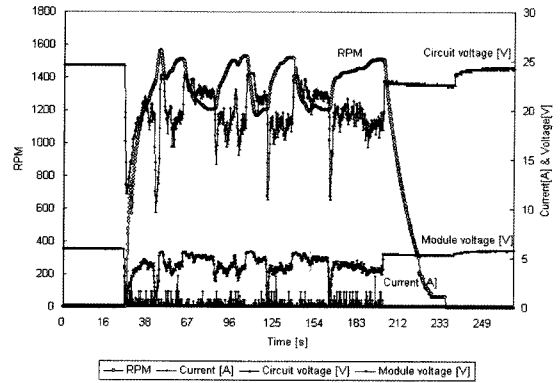


Fig. 8 Driving BLDC motor with battery and EDLC (Without change of EDLC bank's circuit, @24.5[V])

Table 3 Time table of Fig. 8

Relay	0~200(s)	200~238(s)	238~260(s)
Relay 1	×	×	×
Relay 2	×	×	×
Relay 3	×	×	×
Relay 4	×	×	×
Relay 5	×	×	×
Relay 6	×	×	×
Relay 7	×	○	×

(○: turn on, ×: turn off)

이는 배터리와 슈퍼커패시터 모두 회생에너지를 얻지 못하였음을 나타내주고 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 배터리의 전압은 뚫렸으나 슈퍼커패시터의 전압이 약23[V]이기 때문에 모터에서 발생한 전압으로는 회생이 불가능함을 알 수 있었다.

그러나 모터 기동 후 200[s]동안의 rpm과 전압들의 관계를 보면, Fig. 7과 비교해 기동 시 전압 하강과 급격한 속도변화에 따라 떨어지던 전압의 하강폭은 많이 줄어들었음을 알 수 있었다. 본 실험에 사용한 모터의 기동과 급가속을 위해서는 Multi Power system이나 Hybrid 전원의 설계가 필요함을 알 수 있었다.

제동효과를 비교하면 다음과 같다. Fig. 7에서는 모터가 제동 후 완전히 멈출 때까지 140[s]에서 176[s]까지 약36[s]의 시간이 소요되었다. Fig. 8의 경우는 위에서 설명한 것과 같이 200[s]에서 시작하여 평균적으로 약37[s]간 회전하고 있음을 알 수 있다. 회생에너지가 존재하지 않음은 제동효과 또한 없음을 실험을 통해 알 수 있었다. 제동효과는 소리

로서도 확연히 구분됨을 알 수 있었다.

3.3.3 뱅크전환을 통한 회생제동

Fig. 9는 배터리와 슈퍼커패시터의 Hybrid 상태에서 모터를 구동하며, 제동시 콘덴서의 뱅크전환을 통해서 회생에너지를 얻는 경우의, 시간에 따른 Fig 2의 V_1 (Circuit voltage)과 슈퍼커패시터(EDLC: Moduel voltage)의 전압과 회생전류(Current) 그리고 모터의 속도변화(rpm)를 보여주고 있다.

Table 4는 Fig. 9에서 Relay의 시간에 따른 스위칭을 나타낸다. 슈퍼커패시터는 145~187[s] 사이에 뱅크전환을 시키기 위해서 Relay1~4를 작동시켰다. 이때 회생에너지와 배터리에 의한 슈퍼커패시터의 충전량을 구분하기 위해서 Relay7을 사용하여 배터리의 연결을 끊어 주었다.

또한 뱅크의 전환에 따른 주전원 측정값과 모듈 전압이 같아지는지 여부를 분별하기 위해서 145~187[s]동안 Module을 병렬로 유지하였으며, 187~196(s)사이에는 병렬로 전환된 Module을 다시 직렬 연결하여 전체적인 모듈의 전압이 상승하는지를 파

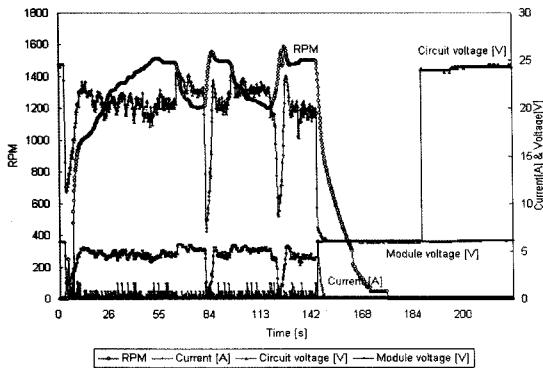


Fig. 9 Driving BLDC motor with battery and EDLC (With change of EDLC bank's circuit, @24.5[V])

Table 4 Time table of Fig. 9

Relay	0~145(s)	145~187(s)	187~196(s)	196~215(s)
Relay 1	×	○	×	×
Relay 2	×	○	×	×
Relay 3	×	○	×	×
Relay 4	×	×	○	×
Relay 5	×	×	×	×
Relay 6	×	×	×	×
Relay 7	×	○	○	×

(○: turn on, ×: turn off)

악하였다. 최종적으로 Relay7의 작동을 멈춤으로서 주전원인 배터리를 회로에 연결시켰다. 145[s]에서 모터의 전원은 끊어지고 뱅크전환이 일어나면서 2가지의 변화를 관찰할 수 있었다. 회생전류의 경우 약5[s]간 삼각파(triangle wave)형태의 회생전류가 나타났다. 또한 뱅크의 전환으로 주전원이 끊긴 회로전압(Circuit voltage)와 Module voltage가 같아지는 모습이 나타났다. 이는 4개의 모듈을 모두 병렬로 만들어 줌으로서, 전압이 약4.26[V]까지 낮아졌기 때문이다. 회생 전류의 발생은 Module의 전압을 상승시켰으며, 이는 187[s]가 흐른 시점에서 뱅크를 다시 직렬연결로 바꾸었을 때, 전압 상승분으로 나타났다.

모터 기동 후 145[s]동안의 rpm과 전압들의 관계를 보면, Fig. 7과 Fig. 9를 비교해보면 기동 시 전압 하강과 급격한 속도변화에 따라 떨어지던 전압의 하강폭(Voltage drop)은 많이 줄어들었음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 8과 같은 현상이다. 이는 모듈이 직렬회로로 연결된 상태에서는 Hybrid system과 같은 효과를 가짐을 알 수 있다.

제동효과를 비교하면 다음과 같다. Fig. 7과 Fig. 8에서 각각 36[s]와 37[s]걸렸던 제동시간이 145[s]에서 제동이 걸리기 시작하여 174[s]에서 완전히 멈춤으로서, 약29[s]만에 멈추는 것을 알 수 있다. 145[s]부분에서 보면 rpm이 급하강하는 모습을 볼 수 있는데 이 또한 제동되는 모습을 보이는 것이라 하겠다. 즉 회생전류에 의한 회생에너지가 존재함은 제동효과 또한 있음을 알 수 있었다. 그러나 전류의 발생이 사라진 이후에는 rpm이 완만하게 떨어지면서, 최종적으로 모터가 완전히 멈출 때까지의 시간은 앞 두 실험과 비슷해지면서 만족할 수준은 아니었다.

역전류가 발생하면, 충전량이 증가하고 제동력도 얻을 수 있으나, 역전류의 급격한 변화는 아래 수식 (7)과 같은 역기전력의 발생을 유발할 수 있음을 감안할 때, 충전에 적합한 전류의 선정은 중요한 부분이다.

$$e = -L(di/dt) [V] \quad (7)$$

3.4 뱅크전환을 통한 회생에너지

앞 절에서 뱅크전환을 통하여 회생에너지와 제동

력을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 배터리의 경우, SoC(State of Charging)의 상태에 따라서 충전량이 변한다. 슈퍼커패시터 또한 SoC라는 개념을 가지고 있으며, 이에 따른 최적의 전류 조건을 구해보고자 뱅크가 전환 된 후의 모습인, 4개의 모듈이 병렬로 연결된 상태에서 일정한 SoC 상태를 유지하며 제동을 걸어보았다. 이때 전압의 상승폭을 예측하여 아래 수식 (8)에 따라 저장된 에너지량을 측정해 보았다.

$$E = 1/2 \times (100/3)(V_2^2 - V_1^2) \times 4 [J] \quad (8)$$

Fig. 10은 SoC 상태에 따른 회생에너지의 양을 보여주고 있다. 생성된 순간최고전류(Peak Current)와 전류의 발생 시간은 Fig. 11을 통해서 알 수 있다.

Fig. 10에서는 SoC 상태가 낮을수록 충전전압과 슈퍼커패시터(EDLC)의 전압차가 커지므로 더 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있었다. 그러나 모듈전압

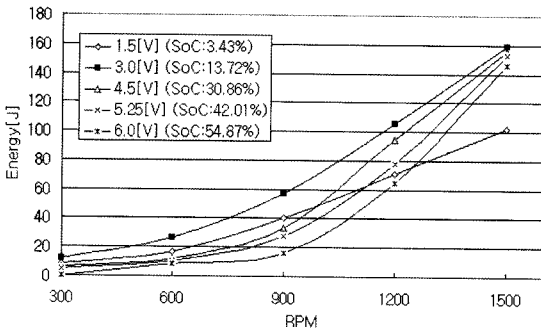


Fig. 10 Regeneration energy according to SoC as a function of motor rpm

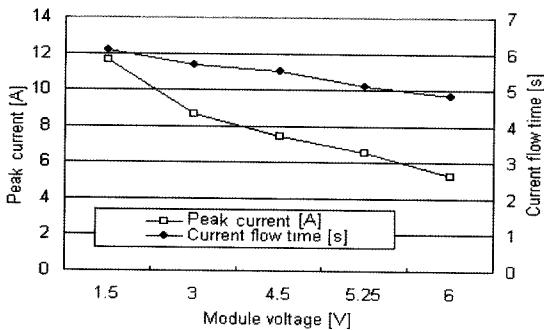


Fig. 11 Peak current and current flow time as a function of EDLC module voltage (SoC) - (@1500rpm)

이 1.5[V]-(Cell voltage: 0.5[V], SoC:3.43%)에서 충전이 잘 되지 않음을 알 수 있다. 이는 급격한 전류의 변화로 인한 역기전력의 효과라 하겠다. 따라서 적정 전압차와 전류는 모듈전압이 3.0[V]인 상태에서 나타남을 알 수 있었다.

슈퍼커패시터는 순간적인 전기에너지의 흡수에 우수한 성능을 보여준은 물론 10[A]가 넘는 충격전류에도 견딜 수 있는 강건한 특징을 가지고 있음을 부수적으로 알 수 있었다.

4. 결론

연료전지 자동차 및 전기자동차에 적용함을 목적으로 하는 전기적 제동방식 중 뱅크전환방식의 회생제동에 관하여 실험하여 보았다. 실험을 통하여 Bank 전환을 통해 슈퍼커패시터의 연결 상태를 직렬로 바꾸면, Bank의 양단 전압을 변경할 수 있게 되며, 이는 모터가 발전기로서 작동할 때의 전압이 낮은 경우에도 회생에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슈퍼커패시터를 병렬로 회로를 바꾸어 주면, 회생되는 에너지의 양을 증가시킬 수 있으며 제동 효과도 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 에너지를 얻은 다음 본 상태, 즉 직렬상태로 회로를 바꾸어 주면 획득한 에너지를 사용할 수 있었다.
- 3) 슈퍼커패시터의 직렬상태에서는 주전원의 보조 전원으로 작동함으로써 Hybrid system으로서 우수한 특징을 보여 주었다.
- 4) 플라이휠을 사용한 실험을 통해서 10[A]가 넘는 순간 전류도 받아주는 슈퍼커패시터의 강인한 특징으로 인하여 충전시간을 제한하는 저항 없이도 회로를 꾸밀 수 있었다.
- 5) 플라이휠을 이용한 Bank 전환을 통한 회생제동 시, 회생전류가 발생하는 순간의 제동력은 Bank 전환을 하지 않았을 때와 비교하여 5[s]정도 개선효과가 있다. 그러나 전류가 검출되지 않는 제동 후 5~6초 후는 제동력과 에너지회수를 기대할 수 없다.
- 6) 전류가 검출되는 제동 후, 5초 내외의 시간에 회생제동(Regeneration braking)을 실시하고 나머지

시간의 경우는 발전제동(Dynamic braking)을 통해 에너지를 태우는 방법이 좋을 것이다.

- 7) BLDC 모터의 발전능력이 좋지 않음을 고려하여, 유도전동기 및 직류기 등의 타 모터를 통한 비교연구가 되어야 할 것이다.

슈퍼커패시터의 직렬과 병렬의 전환은 회생에너지와 제동력 외에도, Hybrid system으로서도 좋은 결과를 기대할 수 있었다. 따라서 시내주행을 목적으로 하는 차량의 경우, 슈퍼커패시터의 Bank 전환방식을 이용한 회생제동 회로를 사용하는 것이 좋을 것이다.

후 기

본 연구는 2005년 Brain Korea 21 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- 1) S. Jeon, S. Choi, S. Jeong and T. Lim, Automatic Charging/Discharging Characteristic of a Fuel Cell Supercapacitor Hybrid System, Electric Vehicle Symposium, KSAE, KSAE04-L0029, p.1, 2004.
- 2) Board of Electric Vehicles Handbook Compilation, Handbook of Electric Vehicles, Daekwang Publishing Company, Seoul, Korea, p.181, 2003.
- 3) Institute of Electrical Engineers of Japan(IEEJ), Encyclopedia of Electrical Engineering, Kidari Co., p.16~5-16~7, 1993.
- 4) D. K. Song, "An Implementation of Regeneration Braking Controller using DSP for Electric Motor Car," Pusan National University, Ph. D. Dessertation, p.1, 1999.