

직렬/병렬 연결 Ni-MH 전지전원 충방전장치의 특성

(A CHARGER/DISCHARGER CHARACTERISTICS OF SERIAL/PARALLEL CONNECTED Ni-MH BATTERY)

김광현* · 허민호* · 안재영* · 전기오** · 김영백***

(Kwang-Heon Kim · Min-Ho Heo · Jae-Young Ahn · Ki-Oh Jeon · Young-Baek kim)

1. 서 론

현재 수요가 증가되고 있는 휴대용 기기와 조만간 대중화될 것으로 예상되는 전기자동차에서는 더욱 더 큰 용량의 전지와 고효율, 저 EMI의 충/방전장치를 필요로 하고 있다. Ni-MH, Ni-Cd, Li-ion과 같은 차세대 전지의 단일전지 용량을 증가시키려는 연구가 많이 진행되고 있으나 아직 주목할만한 연구결과는 없다. 따라서, 순수한 EV나 HEV와 같이 대용량의 전원을 필요로 하는 용도에서는 단일전지를 직/병렬로 연결한 형태의 전지전원을 구성하여 사용하고 있다.

그러나, 전지전원을 구성하는 단일전지는 수명, 전류파형, 온도, 제작시의 미미한 특성 차이로 인하여 충/방전이 반복됨에 따라 단일전지의 특성이 저하되고, 이로 인하여 전지전원 전체의 특성과 수명을 저하시킨다. 전지전원의 특성 저하는 EV 또는 HEV의 운전특성과 제어에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서, EV 또는 HEV에 탑재되어 주충전 기능과 더불어 단일전지별로 균등충전을 수행하고, 충전전류를 선택적으로 제어할 수 있

는 기능이 필요하다.

또한, EV 또는 HEV의 운전특성을 시뮬레이션하고, 제어기를 구성하거나, 엔진, 발전기, 모터 등의 용량을 최적으로 선정하기 위해서는 전지에 대한 모델을 알아야만 한다. 그러나 Lead-Acid, Ni-Cd 단일전지의 모델은 보고된바 있으나, Ni-MH 단일전지에 대한 모델은 아직 없는 실정이다. 따라서, Ni-MH 단일전지의 모델을 도출하고, 이로부터 직/병렬 연결된 전지전원의 특성을 알기 위한 모델을 구할 필요가 있다.

본 논문은 여러 개의 Ni-MH 단일전지를 직/병렬로 연결하여 전원으로 사용하는 직렬형 HEV에서 Ni-MH 전지전원 모델링과 이를 위한 충/방전기에 대한 것이다. Ni-MH 단일전지 모델을 구하기 위해 충/방전 특성이 비슷한 Ni-Cd 모델을 기본으로 사용하고, Ni-Cd 모델의 파라메타를 Ni-MH 전지에 맞게 보정하기 위해 Ni-MH 전지의 충/방전 실험에 의해 얻어지는 데이터를 이용한다. 그러나, 이 Ni-Cd 모델은 반복된 충/방전에 의한 단일전지의 열화 특성을 표현 할 수 없다. 더욱이, 단일전지 모델을 직/병렬 연결한 전지전원으로 확장 적용하기 위해서는 각 단일전지의 충/방전 특성이 모두 같아야 한다는 전제조건을 만족시켜야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 Ni-MH 충/방전기가 전지별 균등충전기능과 선택적 절환기능을 갖도록 구현하였다.

*전남대학교 전기공학과

**목포기능대 생산자동학과

***전남직업전문학교 전기과

2. 직렬형 HEV의 Ni-MH 전지전원

HEV는 기존의 내연기관 엔진에 전지전원과 모터가

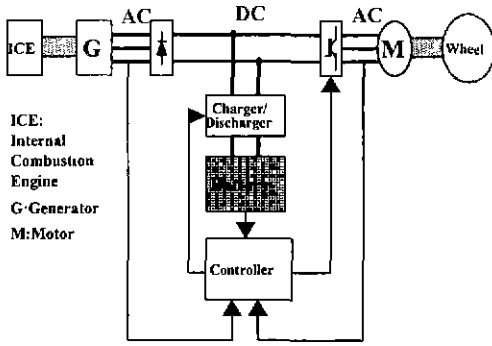


그림 1. 직렬형 HEV의 구성

Fig. 1. Configuration of serial HEV

병렬로 추가되어 기계적으로 연결되는 병렬형과 엔진-발전기 시스템과 전지전원 시스템이 직렬로 연결되는 직렬형으로 구분되고 있다. 병렬형 HEV는 엔진과 전지에 연결된 모터가 클러치에 의해 드라이브 샤프트로 연결되는 구조이다. 병렬형 HEV는 내연기관 엔진과 전지-모터로부터 동시에 구동력을 얻을 수 있으므로 엔진과 모터를 직렬형에 비해 작게 할 수 있다. 이러한 구조는 기존의 차량구조에 전지와 모터가 추가되고 구동력의 전달구조가 기존 차량과 거의 같은 형태이다. 그러나 클러치를 특수구조로 만들어 엔진과 모터를 필요에 따라 연결하거나 혹은 끊어야 하기 때문에 운전 제어가 어렵다. 또한, EV에서 기대되는 운전 편의성이나 무공해의 장점을 얻기 어렵다는 단점이 있다.

이에 비하여 직렬형 HEV는 엔진-발전기-전지-모터-동력전달장치-바퀴(부하)로 이어지는 구조를 가지고 있다. 직렬형 HEV는 모터의 속도와 토크를 제어함으로써 편리한 운전성 및 저공해성의 잇점을 얻을 수 있으며, 병렬형 구조보다 순수 EV에 근접한 구조로서 엔진-발전기/전지-모터의 효율적 운전제어로 병렬형 HEV보다 에너지 전달효율을 개선시킬 수 있다. 그러나 이러한 HEV의 운전특성은 부하 변동에 따라 전지의 충/방전 전류가 불규칙하게 되고 경우에 따라 전지에 과전류가 흘러 전지를 손상시키는 원인이 되고 있다[1][2]. 따라서 전지전원은 직렬형 HEV 각 구성요소의 선정에 중요한 요인이 된다. 직렬형 HEV는 병렬형 HEV에 비해 순수 EV에 훨씬 근접한 구조로서 엔진-발전기/전지-모터의 효율적인 운전제어로 에너지 전달 효율을 개선시킬 수 있으며 모터의 속도와 토크를 제

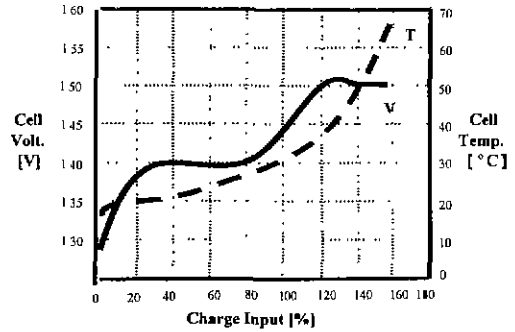


그림 2. Ni-MH 전지의 충전 특성 곡선

Fig. 2. Charging characteristics of Ni-MH battery

어함으로써 편리한 운전성 및 저공해성의 이점을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같은 직렬형 HEV 구조에서 전지전원의 충/방전 시스템을 개발한다.

전지전원 시스템과 엔진-발전기 시스템이 연계 운전되는 경우에는 엔진-발전기 출력이 부하의 기저 부분을 담당하게 하고 과부족 부하를 전지가 담당하게 함으로써 엔진-발전기의 출력을 일정하게 할 수 있다. 엔진이 기동되거나 가/감속 시에 엔진의 에너지 전달효율이 나빠지고 공해물질의 발생이 증가한다는 측면에서 보면 엔진-발전기 출력을 일정하게 유지해야 한다.

Ni-MH 전지는 Ni-Cd 전지의 카드뮴에 의한 환경문제를 고려해서 양극과 전해질은 Ni-Cd와 같으나 음극에 수소 저장 합금을 사용한 전지이다. Ni-Cd 전지에 비해서 30-40% 정도 높은 에너지 밀도를 갖고 있으며, 수명이 길고, 용량이 크기 때문에 전기자동차용 전지전원으로 주목받고 있다. Ni-MH 전지는 충전시 과전압에 대해서 매우 민감하기 때문에 전지의 효율적인 충전을 위해서는 만충전, 과전압, 고온과 과도한 온도 변동 등에 주의해야 한다.

그림 2는 정전류로 충전하는 동안의 Ni-MH 전지의 전압과 온도의 변화를 나타내고 있다. 충전중 전지 전압은 상승하고 온도는 점진적으로 상승한다. 전지가 75~80% 충전에 이르면 양극에서의 산소발생에 기인하여 전압은 급상승하며 두 전지의 온도는 산소재결합 반응으로 인해 급격하게 올라간다. 이러한 전지온도의 급격한 상승은 전지를 과충전하게 되는 결과가 되고 정격 만충전 전압을 낮아지게 한다. 결과적으로 충전중

Ni-MH 전지전압은 충전전류와 온도에 따라 변화한다 [3].

Ni-MH 전지의 충전방식에는 정전류 충전방식을 기본으로 하여 여러가지 변형된 방식이 사용되어 왔다 [4]. 이 중에 3단계 충전방식과 다단계 충전방식은 Ni-MH 전지의 급속충전에 많이 사용되고 있는 방식이다. 계단 충전방식에서 사용하는 기존의 대표적인 충전단계의 절환 방법으로는 과도한 온도상승을 막기 위하여 온도상승률을 비교 판단하여 다음 충전단계로 절환하는 ΔT 법과 특정 전압값에 이르면 충전을 중지하고 다음 충전단계를 수행하는 ΔV 법이 있다.

ΔV 법은 시간 변화에 따른 전압 변화율이 0인 시점에서 절환하는 $\Delta V=0$ 법과, 전압변화율이 일정값 이상으로 감소하거나 증가하는 시점에서 절환하는 $-\Delta V$ 법, 그리고 $+\Delta V$ 법으로 나뉘어진다. 지금까지의 충전방식은 직/병렬 연결된 전지전원을 일괄적으로 절환 시킴으로서 단일전지간의 잔존용량 차이가 점점 커지게 되고 특정 전지의 과충전이나 부족충전 현상을 가져오게 되어 급속한 열화를 초래한다.

직렬로 연결된 전지전원에서 충/방전을 반복하면 전지간에 불균등이 발생해서 각 전지의 수명에 치명적인 악영향을 줄 수 있고 전지 사용상의 안전에도 문제가 된다. 그러므로 각 전지간의 불균등을 해소 할 수 있도록 균등충전 함으로서 전지의 수명을 연장시키고 안정성을 향상시킬 수 있다.

3. Ni-MH 전지 모델

시뮬레이션을 위한 전지모델은 수학적, 전기화학적, 전기적 모델 등이 있다. 수학적인 모델은 이상적인 전지에 대해서는 비교적 간단한 식으로 해석이 가능하지만 실제 전지의 여러 특성을 고려한 경우 계산식이 복잡해지고, 이를 위해 계산 프로그램이 따로 필요하게 되는 등의 문제가 있다. 전기화학적 모델은 기존의 실험결과에 대해서 좋은 해석 결과를 가지고 있지만, 이것 역시 필요한 전지모델에 비해서 매우 복잡한 구조를 가지고 있으므로 본 논문에서는 Zimmermann과 Peterson의 Ni-Cd 모델을 사용한다.

그림 3은 Ni-Cd의 충전특성곡선을 나타내고 그림 2의 Ni-MH 곡선과 아주 유사함을 알 수 있다 따라서 Ni-Cd 모델을 기본으로 하여 실험을 통해 파라메타를 보정함으로써 Ni-MH 모델을 만들 수 있다. 그림 4에

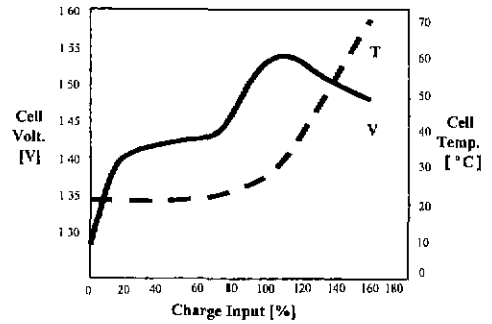


그림 3. Ni-Cd 전지의 충전 특성 곡선
Fig. 3. Charging characteristics of Ni-Cd battery

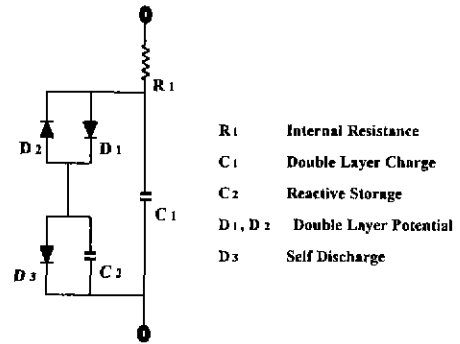


그림 4. Ni-Cd 전지 모델
Fig. 4. Model of Ni-Cd battery

서 R_1 은 전지 내부저항을 나타낸다. 역병렬로 연결된 다이오드 D_1, D_2 는 전기화학적인 전지 내부저항의 히스테리시스 특성과 비선형적인 효과를 나타낸다. 이런 요소는 충/방전 전류의 방향과 방전깊이(DOD)의 함수이다. 다이오드 D_3 는 충전중에 발생하는 누설전류와 과충전시 발생하는 도전성 누설전류를 나타낸다. C_1 은 양극판 사이에 저장되는 용량성 요소의 선형적인 효과를 나타내고, C_2 는 전지의 화학적 작용에 의한 저장 효과를 나타낸다[5]. 전지 모델의 각 요소를 표현하는 수식들은 Zimmermann과 Peterson의 연구[6]에서 도출된다. 다이오드 D_1, D_2, D_3 를 나타내는 식들은 다음과 같다.

$$I_1 = 2k_1 \sinh(k_3 V_1) \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{I_0 e^{40.27 k_2 (1 - \frac{519}{T+459})}}{e^{40.27 \frac{V_0}{L}} - 1} \quad (2)$$

$$k_3 = \frac{20900}{L(T+459)} \quad (3)$$

단,

I_0 ; 60°F 와 V_0 에서 기준 다이오드 전류[A]

V_0 ; 60°F 와 I_0 에서 기준 다이오드 전압[V]

T ; 실제 다이오드 온도[°F]

I_1 ; T 와 V_1 에서 실제 다이오드 전류[A]

V_1 ; 실제 다이오드 전압[V]

k_2, L ; 실험결과에 의해서 얻어지는 상수

커패시터 C1과 C2를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$C = A e^{-B(V-V_M)^2} + D \quad (4)$$

단,

C ; V에서 커패시터 값[F]

V ; 커패시터의 동작 전압 수준[V]

V_M ; 중간 전압 수준[V]

A ; $V=V_M$ 에서 커패시터 값[F]

B ; 분포 상수

D ; 최소 커패시터 값[F]

실험에 의해서 Ni-MH 전지는 약간 다른 파라메타 값을 적용시키게 된다.

4. 충/방전기 구성

직/병렬로 연결된 Ni-MH 전지전원의 전체적인 충/방전 시스템을 그림 5와 같이 구성하였다. Ni-MH 전지는 시판되는 1.2V, 1200mAh 용량을 갖는 원통형 전지를 사용하고 충·방전 회로는 스위칭 소자로 MOSFET를 사용해서 충전시 강압과 방전시 승압을 위한 승/강압 초퍼회로로 구성했다. 단일 전지의 단자 전압은 A/D의 변환주기와 멀티플렉서 선택시간을 동일한 클럭으로 동기화 시킴으로서 순차적으로 12비트 A/D에 차동 입력된다. 각 단일 전지의 단자전압을 측정 한 후 $\Delta V=0$ 이 되는 단일 전지를 디지털 출력을 통해서 절환 시킨다.

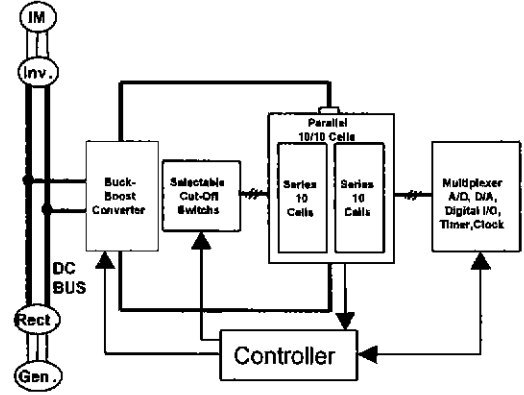


그림 5. 제안된 회로의 구성

Fig. 5. Configuration of proposed circuit

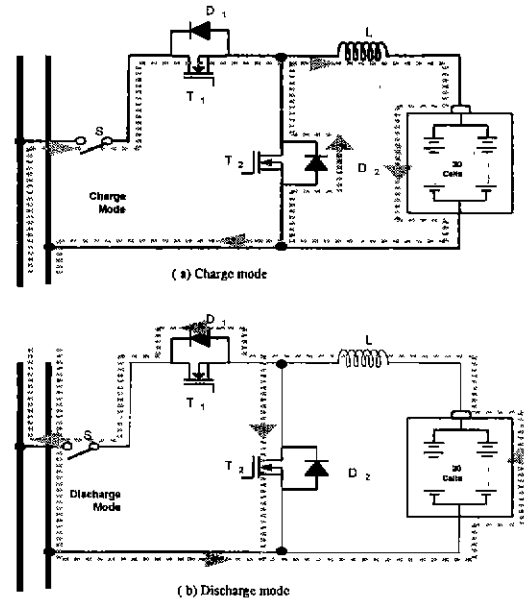


그림 6. 제안된 충/방전 시스템의 동작

Fig. 6. Operations of charge/discharge in proposed system

12비트 D/A를 이용해서 충전시 정전류를 유지시키는 기준전압과 방전시 직류 모션 전압보다 같거나 큰 전압으로 유지시키는 기준전압을 만들어낸다. 선택적 절환 부분은 스위칭 전용 트랜지스터와 포트커플러를 사용해서 구성하였다. 절환 스위치는 각 단일 전지마다 충전과 절환, 방전을 위해서 3개의 트랜지스터가 사용

되고 각 트랜지스터의 제어는 디지털 출력을 포토커플러로 절연시켜서 사용한다.

그림 6(a)와 (b)는 강압과 승압을 통해 충·방전이 일어나는 초피회로를 나타낸 것이다. 먼저 충전시에는 T1이 스위칭 되면서 입력전압을 강압시킨다. T1이 오프시에는 다이오드 D2를 통해서 환류한다. 방전은 전지전원의 전압이 직류 모션 전압보다 크거나 같아야 이루어지므로 방전시에는 방전 스위치 S를 닫고, T2를 스위칭 시켜서 출력전압을 직류 모션 이상으로 승압시킨다. T2가 온 되면 코일 L에 에너지가 축적되었다가 오프시에 다이오드 D1을 통해 방전이 이루어진다.

본 논문에서는 시분할 균등충전방식을 사용한다. 이 방식은 각각의 전지에 잔존용량에 반비례하는 충전시간을 시분할 하여 갖도록 하는 방법으로 하나의 충전시스템을 여러 전지에 순차적으로 연결하기 위해 제어 스위치를 사용한다. 그림 7(a)와 (b)는 균등충전 이전과 이후의 각 전지의 잔존용량을 나타낸 것이다[7]. 이 방식은 소프트웨어의 변경만으로 충전제어방식 및 대상 전지의 변경에 따른 이식성이 증가되는 장점이 있다. ΔV 법중 본 논문에서는 충전효율 특성이 우수하고 과충전을 방지할 수 있는 $-\Delta V=0$ 법을 사용하고 있다. 그림 8은 $-\Delta V=0$ 충전제어를 나타낸다. 제어 스위치는 선택적 충전단계절환을 위해서도 사용된다. 이 방식은 직/병렬로 연결된 전지전원을 제1단계 충전전류로 충전하다가 $\Delta V=0$ 인 단일 전지가 검출되면 그 전지를 절환 시키고 나머지 단일 전지들도 ΔV 가 0가 되는 순서대로 절환 시켜나가는 방식이다.

모든 전지가 절환되면 용량 불균등을 해소하기 위해 균등충전방식을 사용해 제2단계 전류로 충전한다. 제 2단계와 제 3단계에서도 전지의 절환방법은 1단계와 같은 방법으로 $\Delta V=0$ 이 되는 단일 전지만을 선택적으로 절환하게 된다. 그림 9는 선택적 절환 방식을 채용하여 충전전류를 절환하고 균등충전을 실시하는 제어 흐름도를 나타내고 있다. 각 단일 전지의 전압을 검출하여 $\Delta V=0$ 이 되는 전지만을 선택적으로 절환시키도록 제어 하게 되면 직렬 연결된 각 전지의 과충전과 부족충전에 의한 열화를 예방할 수 있다.

5. 결론

직렬 연결한 3개의 Ni-MH 전지에 대해서 시분할 균등충전을 포함한 선택적 충전단계 절환에 의한 계단

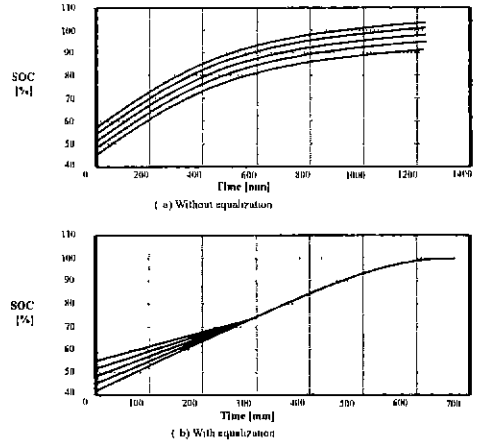


그림 7. Ni-MH 전지의 잔존용량
Fig. 7. SOC of Ni-MH battery

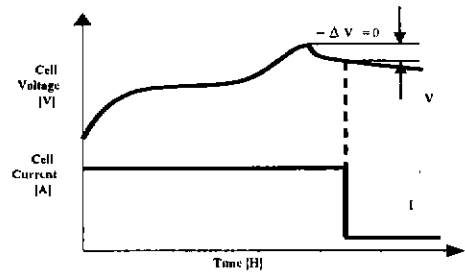


그림 8. 절환 방식
Fig. 8. Cut-off method

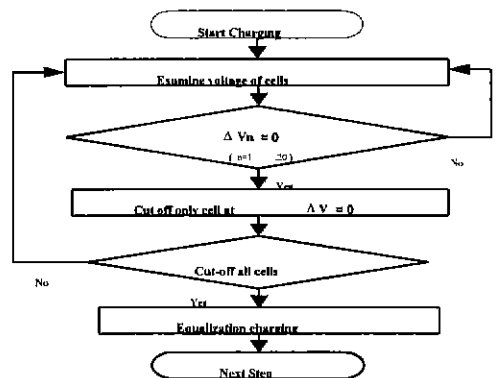


그림 9. 선택적 절환 제어 흐름도
Fig. 9. Flow chart for selectable cut-off control

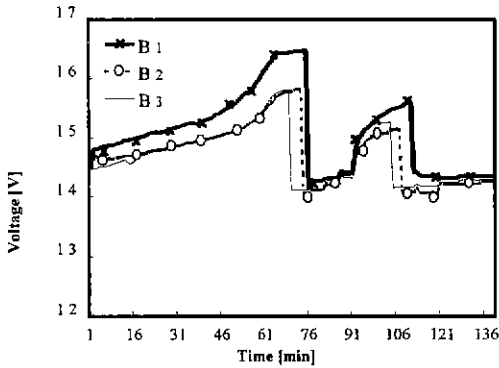


그림 10. 직렬 연결된 3개의 전지에 선택적 절환방식과 균등충전방식을 적용한 계단충전 특성곡선

Fig. 10. Characteristic of step-charging with selective cut-off and equalization method for three cell connected serially

충전의 특성을 그림 10에 나타내었다. 시분할 균등충전 모드를 첨가함으로써 전지간의 용량 불균등을 상당히 극복할 수 있고, 그에 따라 전지의 사용효율을 높일 수 있으며 충전특성이 개선된다. 각 충전단계 사이에 균등충전이 이루어지므로 각 전지의 잔존용량 차이를 감소시키고 직렬 연결된 전지들의 충전특성을 비슷하게 유지시킬 수 있다. 충전시간은 균등충전을 실시하지 않은 경우에 비해 길다. 즉, 단일전지별 선택적인 충전단계 절환방식을 사용함으로써 과충전에 의한 단일전지의 급격한 열화를 방지할 수 있고, 전지의 부족충전을 방지하여 전지의 충전 사용효율이 증가된다. 또, 균등충전을 동시에 실시함으로써 전지 충전특성이 증가한다.

직/병렬로 연결된 Ni-MH 전지전원의 충·방전 실험에서 얻어진 데이터를 통해 시간에 따른 온도, 전압변화 등을 모델링의 기본 파라메타로 정하고 부하변동에 따른 직렬형 HEV의 전지전원 모델을 만든다. 충/방전 시스템의 입력은 HEV 엔진/발전기 시스템의 일정한 출력이므로 충/방전 시스템의 불안정한 전원환경을 개선시킬 수 있어서 불규칙한 충/방전 전류로부터 전지를 보호하고 충/방전 효율을 높일 수 있다. 또한 선택적 충전단계절환에 의해서 각 단일 전지의 과충전에 의한 급격한 열화를 막을 수 있고, 전지전원의 수명을 연장시킬 수 있다. 이를 위해 Ni-MH 전지가 직렬 연결된 두 조의 전지전원을 다시 병렬로 연결한 구성을

사용하고, 엔진-발전기 출력이 일정한 직렬형 HEV의 전지전원으로 사용한다.

참 고 문 헌

- [1] Stephen T. Hung, Douglas C. Hokins, and Charles R. Mosling, "Extension of battery life via charge equalization control," Transactions on Industries Electronics of IEEE, Vol. 4, No 1, pp. 96-104, February, 1993.
- [2] Robert D. Soileau, "A diagnostic testing program for large lead acid storage battery banks," Transaction on Industry Applications of IEEE, Vol. 30, No 1, pp. 193-200, January 1994
- [3] D. Linden, "Sealed Ni-MH Batteries", in D. Linden, ed., op. cit., chap 33. McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [4] D.E. Reisner and M. Klein, "Bipolar Ni-MH Battery For Hybrid Vehicles," IEEE Aerospace and Electronic Systems Mag., 9, Apr 1994.
- [5] Z. Gur, X. Mang, A.R. Patil, D.M. Sable, B.H. Cho, and F.C. Lee, "Design of a Nickel-Hydrogen Battery Simulator for the NASA EOS Testbed", Proceedings of the IECEC, August, 1992
- [6] H. G. Zimmerman, R. G. Peterson, "An Electrochemical Cell Equivalent Circuit for Storage Battery Power System Calculations by Digital Computer", Proceedings of the IECEC, Vol. 6, pp. 6.33-6.39, 1970
- [7] Kwang-Heon Kim, Sin-Young Kang, "Time-Sharing Charge Equalization for Series Connected Battery Strings" ICPE of KIEE, October, 1995, Seoul, Korea, pp. 331~336