

# IMT2000을 위한 혼성마이크로 동력원 개발에 관한 연구

김일송, 윤명중  
한국과학기술원 전자전산학과

## Study on the development of hybrid power sources for the IMT2000

il-Song Kim, Myung-Joong Youn  
KAIST

### ABSTRACT

The study on the hybrid power source for the IMT2000 application has been presented. The hybrid power source is composed of solar cell, super-capacitor and battery. To compensate for the pulse loader of the IMT2000 application, the super-capacitor is connected through the Lithium-ion battery to absorb the pulse current. The solar cell provides the additional current to compensate for the depleted current. The controller design for the hybrid source has been presented and verified through experiment.

### 1. 서 론

차세대 IMT-2000 무선통신은 고속, 고용량 데이터 또는 영상전송으로 인하여 고용량의 동력원이 필요하게 되는데, 기존의 2차전지인 리튬 이온전지만 사용할 경우 사용시간이 대폭 감소하게 될 것으로 예상된다. 이를 극복할 수 있는 대안으로, 동력원간의 퓨전 기술을 이용한 혼성마이크로 동력원을 사용하면 사용시간 및 사용회수를 증대시킬 수 있다. 현재 국내에서 사용되고 있는 PCS (Personal Communications Services), DCS (Digital Cellular Services) 등의 휴대전화 경우, 전류 소모 패턴은 크게 대기상태 (STAND-BY MODE)와 통화상태 (TALK MODE)로 나뉘어 진다. 이 중 대기상태에서는 5 mA 정도의 저전류 소모 상태인 SLEEP 상태와 100 mA 정도의 피크 전류를 소모하는 상태가 일정 주기로 반복된다. 대기상태에서의 이러한 주기는 PCS 경우 5.12초 SLEEP에 0.2초 피크 (이를 SLOT CYCLE "I"이라 칭함), DCS는 2.56초 SLEEP에 0.2초 피크 주기(SLOT CYCLE "II")를 보인다. 상기와 같은 휴대전화의 소모전류 패턴 하

에서, 현재 상용으로 가장 많이 쓰이고 있는 700 mAh급 각형 리튬 이온 전지를 전원으로 사용할 경우 대기상태에서는 약 80시간 정도, 통화상태에서는 약 2시간 정도 지속시간을 보인다. 반면, 기존의 리튬이온전지 단독 전원을 태양전지, 리튬이온전지, 커패시터의 조합 형태의 복합 전원으로 대체할 경우 사용시간을 25% 이상 증대시킬 수 있다. 이는 곧 차세대 IMT-2000 과 같은 고속 무선 통신의 전원으로 응용할 수 있는 가능성을 시사한다. 즉 순간 고율 방전 (pulse discharge) 에 의해 과소비 되는 전기에너지 부분은 2차전지 대신 커패시터로 제어하고, 중저출력 방전 (moderate discharge) 부분은 2차전지로 공급하면서, 소비된 2차 전지와 커패시터의 전기에너지는 자발적으로 충전 가능한 태양전지에 의해 제공하는 태양전지/이차전지/커패시터 혼성 동력원의 기술 개발이 요구된다.

### 2. 슈퍼커패시터-2차전지 등가회로 및 작동원리

리튬이온전지와 전기화학 커패시터를 병렬로 조합하여 운용할 경우, 그림 1과 같은 등가회로로 유추할 수 있다. 그림1의 등가회로에서 PULSE 방전 시 배터리와 커패시터 각각에서 나가는 방전 전류는 아래와 같은 식으로 근사할 수 있다.

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{R_B}{R_C + \frac{T}{C_{SC}}} = \frac{R_B}{R_C(1 + \frac{T}{\tau})} \quad (1)$$

여기서,  $\tau = R_C C_{SC}$ ,  $T =$  펄스폭이다. 위 식에서, 상용 휴대전화의 대기상태의 경우를 살펴보면, 통상적인 제품의  $R_B$ 와  $R_C$ 를 각각 40m $\Omega$ , 25m $\Omega$ 으로 가정하고  $C_{SC}$ 가 1F 이면  $I_C = 1.58I_B$ 가 된다.

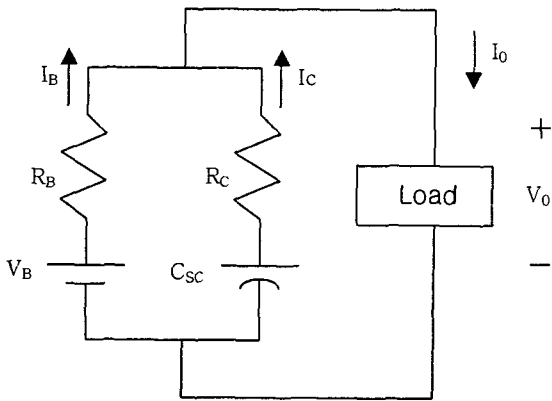


그림 1. 배터리, 커패시터 조합 방전 시의 등가회로  
Fig.1 Equivalent circuit between battery and super-capacitor discharge

이는 곧 펄스 피크 시에 흐르는 전류의 60% 정도를 커패시터에서 감당한다는 뜻으로서, 리튬이온 전지 단독으로 사용하였을 때 100 mA 펄스 방전시의 누적량이 300 mAh (  $\approx 80\text{시간}/(5.12\text{초}+0.2\text{초}) \times (100\text{mA} \times 0.2\text{초})$  ) 정도이므로, 이 중 200 mAh 정도가 커패시터에 의해 방전될 수 있는 것이다. 따라서, 리튬이온전지의 방전 가능시간이 기존보다 28% (  $\approx 200\text{mAh}/700\text{mAh}$  ) 정도 길어지게 된다. 이 때 각각의 100mA 펄스 시에 커패시터를 통하여 나가는 전하량 12 mC (  $\approx 60\text{mA} \times 0.2\text{초}$  )은 커패시터의 커패시턴스 용량 1F를 고려할 때 12mV의 전압 강하량에 불과하다. 그런데, 커패시터의 시상수가 25 msec 정도로 펄스폭 대비 5배 가량 시간이 길기 때문에 커패시터 동작전압이 낮을 경우 충전 지연 누적 현상이 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 커패시터 단독이 아닌 리튬이온전지와와의 조합에 의해 사용되는 상황이므로, 커패시터의 동작전압은 최소 4.2V 이상이 되어야 한다.

### 3. 태양전지/슈퍼커패시터/2차전지 모듈 구성도

그림 2는 태양전지, 리튬이온전지, 전기화학 슈퍼커패시터의 조합 회로에 대한 개략도를 나타내고 있다. 전력단은 높은 에너지 변환 효율을 가지기 위해서 동기식 변전환기(Synchronous Buck Converter)로 구성되어 있다. 충전 제어회로는 태양전지로부터 커패시터 및 리튬이온전지로의 충전시 충전효율 극대화를 위한 회로로서, 세개의 제어기가 Diode-AND 로 연결되어 있다. 각각의 제어기는 MPPT controller(최대전력점 추종을 하는 기능) 와 CC-Controller(배터리 일정충전전류제어기, 보통 기준전류는 배터리 용량의 0.5C 로 정함) 그리고 CV-Controller(배터리 일정충전전압 제어기, 보통 만충전 전압은 4.2V로 정함)로 구성되어 있다.

각 제어기의 출력신호 3개가 AND된 다음 삼각파와 비교되어 두개의 스위치 S1,S2 제어신호를 만들어 내게 되고, Gate Driver를 거쳐서 스위치를 구동하게 된다. F1(s), F2(s), F3(s)는 AC이득증폭회로서 입력과 출력의 dynamic에 의해서 정상상태에러를 0 으로 하고 빠른 과도응답특성을 가지는 P-I 제어기를 선정하였다.

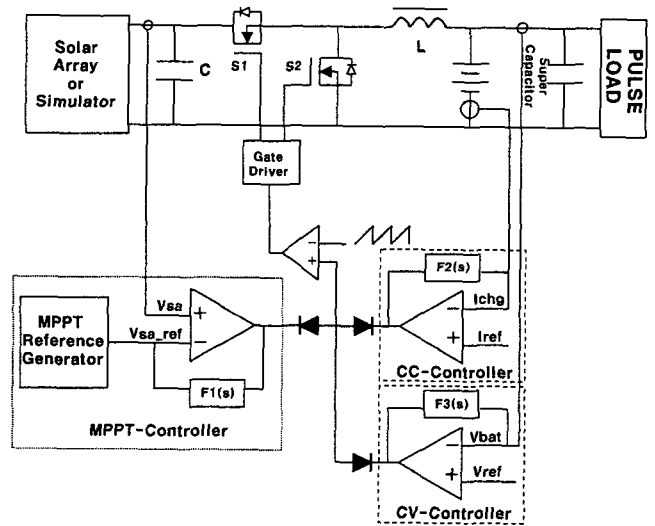


그림 2. 태양전지/슈퍼커패시터/2차전지 모듈구성도와 제어기  
Fig. 2 Configuration of the solar cell/ super-capacitor/ battery and controller

### 4. 제어기 구성 및 동작원리

그림 3은 위에서 언급된 제어기의 동작을 흐름도 그림으로 설명하고 있다<sup>[1]</sup>. 먼저 태양전지에서 들어오는 전력 Psa가 배터리에서 필요로 하는 전력 Pbat보다 작을 경우에는 제어기가 태양전지에서 최대전력을 뽑아서 배터리에 충전시키게 된다. 즉 MPPT 제어기가 동작하는 상태가 되어 각각의 Condition은  $Vref > Vbat$  ,  $Iref > Ibat$ 가 된다. 이경우 제어기 상태는 CC와 CV는 Disable 되고, MPPT가 Enable 되어서 MPPT제어기가 동작하게 된다. 만약 태양전지에서 뽑아낼 수 있는 에너지가 배터리가 필요로 하는 에너지보다 크다면, 배터리 전류-전압 제어상태로 들어가야 되는데 이것은 먼저 배터리 전류를 관찰함으로써 알 수 있게 된다.  $Ibat > Iref$ 이면 제어기는 CC상태로 들어가서  $Vref < Vbat$ 가 되고  $Vsa > Vsa\_ref$  가 되어 CV와 MPPT는 Disable 되고 CC가 Enable 되어 배터리는 일정전류 제어모드로 들어가게 된다. 만약 배터리 전압이 만 충전 전압에 도달하게 되면 ( $Vbat > Vref$ )이면 CC와 MPPT가 Disable 되어서 CV 제어상태로 들어가며, 이때의 상태는  $Iref > Ibat$ 이고

$V_{sa} > V_{sa\_ref}$  가 된다. 이상의 State transition이 배터리와 태양전지의 상태에 따라서 연속적으로 변화하게 된다. 이와 같은 동작은 그림 2에 표시된 아나로그 연산증폭기(OP-Amp)에 의해서 구현되며, 동작원리는 그림 3과 동일하다.

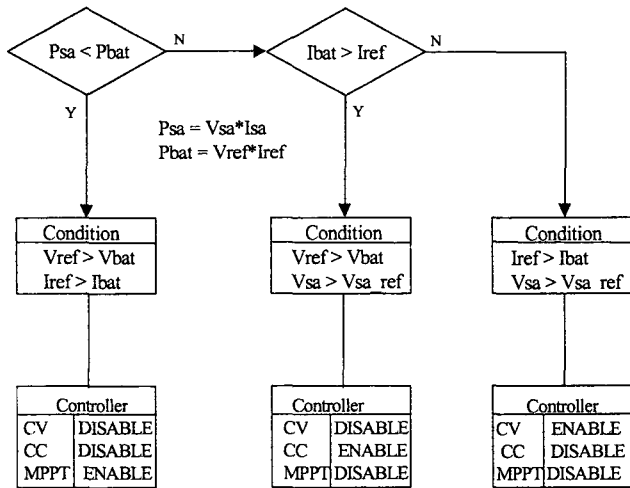


그림 3. 제어기 동작모드 흐름도 그림  
Fig. 3 Flowchart for the controller operational mode

### 5. 최대전력추적제어기 구성 및 동작원리

태양전지에서 최대전력을 뽑아내기 위해서는 최대전력점 제어를 필요로 하게 된다. 태양전지의 최대전력점을 추종하는 알고리즘은 과거 수십 년 동안 개발되어 왔으며 그중 가장 대표적으로 사용되는 Perturb & Observation (P&O) 방법은 태양전지 전압을 변화시키면서 발생하는 전력의 변화를 관찰하는 것이다<sup>[2][3]</sup>. 발생하는 전력은 태양전지 전압과 전류를 곱한 것으로서 전압 대비 전력 변화는 다음 그림과 같다.

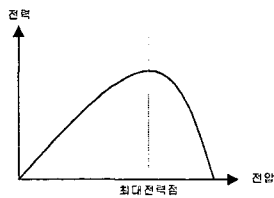


그림 4. 태양전지의 전력 대 전압 특성 커브  
Fig.4 Solar cell characteristic curve ( power versus volt)

이방법의 가장 큰 단점은 기존의 값을 저장하기 위한 메모리와 전압과 전류를 곱하기 위한 곱셈기(multiplier)를 필요로 한다는 것이다. 또한 펄스방전기가 연결된 경우, 고율의 방전기간 동안 배터리가 방전하기 때문에 배터리

전압도 감소하게 된다. 태양전지의 전압/전류와 배터리 전압과 출력전류는 상관관계가 있기 때문에 태양전지의 전압과 전류도 같이 변화하게 된다. 이 관계를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

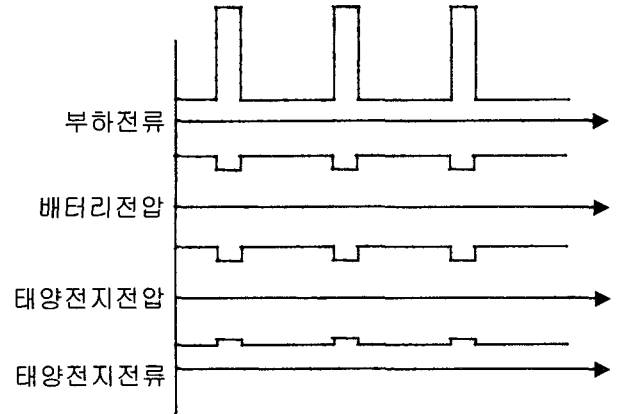


그림 5. 펄스 방전시의 배터리와 태양전지의 전압/전류 파형  
Fig. 5 Waveform of battery and solar cell volt/current during pulse discharge

이런 조건하에서는 기존의 P&O 방법을 사용할 경우, 오동작할 수 있다. 따라서 P&O 대신 다른 알고리즘을 사용해야 한다. 전력단의 손실이 없다고 가정하면, 태양전지의 에너지는 출력단에 흐르는 전류와 배터리의 곱과 동일하다. 즉 배터리의 전압이 매우 느리게 변화하여 일정하다고 가정하면 출력단의 전류의 최대값이 태양전지의 최대전력점에 해당하게 된다.

$$P_{sa} = V_{sa} * I_{sa} = V_{bat} * I_{out} \quad (2)$$

$P_{sa}(\max)$ 는  $I_{out}(\max)$ 에 비례하게 된다. 즉 출력전류의 최대값을 추적하면 최대 전력점을 구할 수 있다. 이런 경우, 곱셈기나 미분기를 필요로 하지 않고, 태양전지의 전압/전류에 대한 정보도 제어하는데 필요로 하지 않게 된다. 다만 펄스 방전으로 인한 출력전류의 순간감소에 대응할 수 있는 아주 작은 필터만 필요로 하게 된다. 또한 아주 간단한 하드웨어와 소프트웨어로 구현이 가능하다. 위에서 설명한 내용을 구현하기 위해 기준전압을 발생하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{out}(k) > I_{out}(k-1) &=> V_{sa\_ref} \text{를 증가} \\ I_{out}(k) < I_{out}(k-1) &=> V_{sa\_ref} \text{를 감소} \end{aligned} \quad (3)$$

이렇게 구성하면 매우 간단하고 고신뢰성의 최대전력점 제어가 구성된다. 이렇게 구성된 최대전력제어기의 성능을 알아보기 위하여 태양전지 시뮬레이터를 이용하여 태양전지의 특성커

브 3개를 주고, 각각의 경우에 최대전력점에 추종하는 가를 알아보는 실험을 하였다. 표 1에 각각의 커브에 해당하는 태양전지 파라미터값이 주어져 있다.

표 1. 각 모드에 대한 태양전지 파라미터 설정값  
Table 1. solar cell parameter per mode

| Mode | Voc[V] | Vmp[V] | Imp[mA] | Pmp[W] |
|------|--------|--------|---------|--------|
| 1    | 7.54   | 6.03   | 90      | 0.58   |
| 2    | 9.67   | 7.67   | 90      | 0.74   |
| 3    | 12.43  | 10.36  | 90      | 0.95   |

그림 6에 각 모드별로 최대전력점 추종능력실험 결과를 보여주고 있다. 최대전력점에 정확히 추종하는지를 보여주기 위해서 수식 (3)을 이용하지 않고 제어입력을 스캔하여 출력전류의 최대값을 알아낸 다음 이 값을 Holding하는 과정을 보여준다. 즉 tracking하는 과정에서 최대전력점을 알아내고, MPPT holding 단계에서 이 값을 계속 유지하는 것을 보여주고 있다. 모드별로 태양전지의 파라미터를 바꾸어서 실험을 하였고, 그 결과 아주 우수한 최대전력점 추종능력을 가짐을 보여주고 있다.

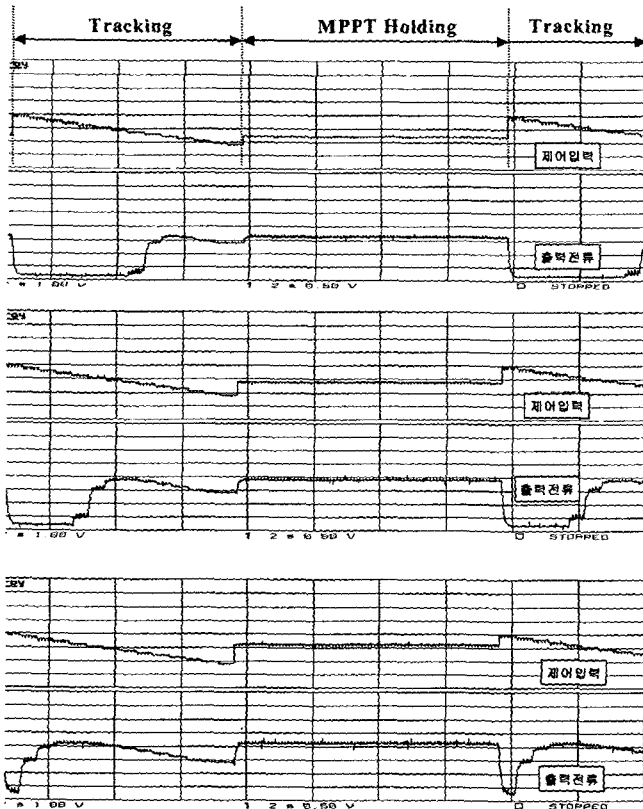


그림 6. 모드별 최대전력점 추종 실험 결과  
Fig. 6 Experimental result for the maximum power point tracking for each mode

## 6. 제작 및 실험 결과

그림 7에 제작된 시제품(prototype)을 보여 주고 있다. 이 시제품의 사양(specification)은 다음 표 2 과 같다.

표2. Prototype board 의 입출력 사양  
Table 2. Specification of the prototype board

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Topology              | Synchronous Buck Converter                           |
| Switching Frequency   | 200 KHz / 400 KHz                                    |
| Input Voltage Range   | 5V ~ 25V   |
| Maximum Input Current | 3A   |
| Controller            | MPPT<br>CC(Constant-Current)<br>CV(Constant-Voltage) |
| Bulk-Current          | 300 ~ 2000 [mA]                                      |
| Full Charge Voltage   | 4.2[V] ( Variable)                                   |
| Controller Status     | LED-Display  |
| Status Monitoring     | RS-232   |
| Dimension             | 50x36x5[mm]( LxWxH )                                 |

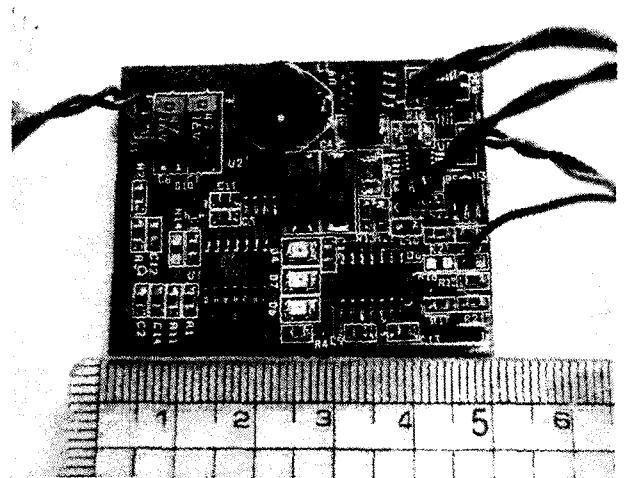


그림 7. 시제품 그림  
Fig. 7 Picture of prototype board

제작된 시제품을 가지고 실험을 하였다. 외부에너지 소스인 태양전지는 태양전지 시뮬레이터를 사용하였고, Super-Capacitor는 1 [F] / 5.0V 를 사용하였다. 2차 전지는 900 [mAh] / 4.2 [V] Li-ion 전지를 사용하였다. 펄스 부하장치를 위해서 Pulse discharger를 사용하였고, 방전 패턴은 10 [msec] 동안 3[A] 의 High rate 와 90 [msec] 동안 400 [mA] 의 Low rate를 반복적으로 가하였다.

그림 8에 충전시의 태양전지 전압, 배터리 전압-전류의 파형을 나타내었다. 제어기가 MPPT 모드에서 동작하고 있다가 배터리의 전압이 만충전 전압인 4.2[V]에 도달하게 되면 제어기가 CV모드로 전환되게 된다. CV모드에

서는 배터리의 전압은 항상 일정하게 유지되지만, 배터리 내부의 전하가 계속 증가함에 따라 충전전류는 계속해서 감소하게 된다. 이때 태양전지의 전압은 계속 증가하게 되는데, 그 이유는 태양전지의 동작점이 MPPT 모드에서는 최대전력점에서 유지되지만, CV 모드에서는 충전전류가 계속 감소하기 때문에 태양전지의 동작점이 최대전력점에서 오른쪽(즉 개방전압 Voc 쪽)으로 이동하기 때문에 태양전지의 전압이 증가하게 된다.

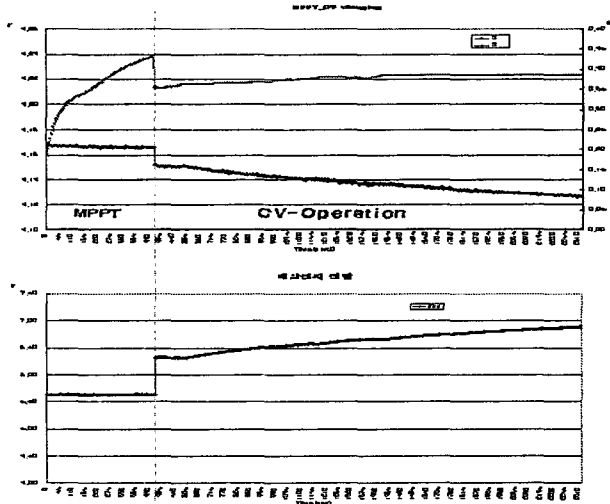


그림8. MPPT-CV 모드 전환시 태양전지 전압, 배터리 전압-전류 파형  
Fig. 8 Waveform of solar array voltage and battery volt-current between MPPT and CV change

그림 9에 펄스 방전시의 배터리 전압, 전류 파형을 나타내었다. 배터리 전압이 만 충전이 되어 있는 상태에서 시작해서 펄스 방전기를 사용해서 방전을 시킨 다음 배터리 내부에 장착된 PCM(Power Conditioning Module)의 보호회로가 동작하여 shutdown될 때까지의 시간과 파형을 기록한 것이다. (a)는 1[W]의 태양전지와 Super-capacitor와 배터리를 연결한 상태이고 (b)는 Super-capacitor와 배터리 (c)는 배터리만 연결한 상태의 파형이다. 실험 결과를 정리하며 다음과 같다.

| 연결 상태                    | 방전시간 | 향상을    |
|--------------------------|------|--------|
| 배터리                      | 82분  |        |
| 배터리+Super-Capacitor      | 90분  | 9.7[%] |
| 배터리+Super-Capacitor+태양전지 | 200분 | 144[%] |

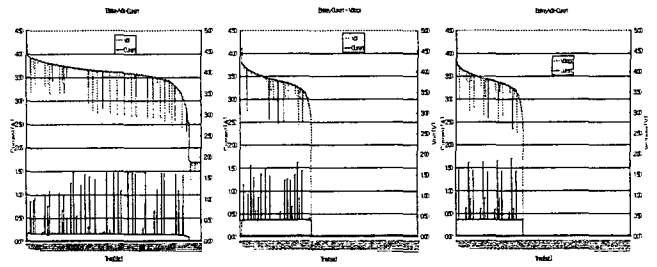


그림 9. 펄스 방전시의 배터리 전압, 전류 파형  
Fig. 9 Battery voltage/current waveform during pulse discharge

## 7. 결론

펄스 방전특성을 가지는 부하에 대해서 태양전지, Super-capacitor와 배터리를 연결한 혼성마이크로 동력원의 제어회로 설계와 최대전력추적기의 성능에 대해서 설명하였다. 시제품을 가지고 실험한 결과 우수한 추종능력과 제어기의 모드간 변화에 대해서 원하는 성능을 보여줌을 확인하였다. 이 결과로 혼성마이크로 동력원이 휴대용 통신기기 부문에서 기존의 동력원을 대체할 수 있는 가능성을 보여주었다.

이 논문은 한국과학기술원 인간친화복지로봇센터 (HWRS-ERC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

## 참고 문헌

- [1] 김일송, 이준영, 윤명중, "과학위성 1호 전력계 설계", 전력 전자학회 논문지 pp.475-483. Vol.5, No.5 2000
- [2] D.P. Hohm, M.E.Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithm using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed", PESC. 2000, pp. 1699-1702.
- [3] Eftichios Koutroulis, Kostas kalaitzakis, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE trans. Power Electronics, Vol.16 No.1 Jan 2001, pp. 46-54.