

배터리 병렬 구조 인공위성 전력계 시스템의 에너지 균형 분석

이기선, 장기영, 조윤제, 조보형

서울대학교 전기공학부

An Orbital Energy Balance Analysis of Satellite Power System employing Parallel Battery Configuration

K. S. Lee, K. Y. Jang, Y. J. Cho, B. H. Cho

Power Electronics Lab, Seoul National University

Abstract

저궤도 인공위성 전력계 시스템에서 배터리는 식 (eclipse) 기간 동안 부하에 전력 공급을 담당한다. 따라서 배터리는 전체 위성의 수명과 성능을 결정 짓는 가장 중요한 요소이다. 이러한 배터리의 신뢰성을 향상시키기 위해, 다이오드를 사용하여 배터리를 병렬로 구성하는 시스템이 사용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 배터리 병렬 구조 시스템의 성능 검증을 위해 배터리의 충방전 특성을 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있는 Functional 모델링의 방법을 제시하고, 그 모델을 배터리 병렬 구조 인공위성 전력계 시스템에 적용하여 배터리 병렬 구조에 의해 생기는 배터리 불균형과 그 원인을 확인하고 나아가 대안을 제시하였다.

1. 서론

저궤도 인공위성 전력계 시스템은 크게 태양전지 (Solar Array : SA), 배터리 (Battery), 배터리 충전 제어기 (Battery Charge Regulator : BCR)의 세 부분으로 이루어져 있다. 태양전지는 인공위성의 주 전원으로 사용되며, 인공위성이 지구의 그늘(eclipse)에 들어갔을 때는 보조 전원 장치인 배터리가 전력을 부하에 공급한다. 따라서 다음번 식기간 동안의 에너지 공급을 위해 낮(sunlight)기간 동안 배터리는 만충전 되어야 한다. 이를 위해 저궤도 위성은 배터리 충전 제어기로서 배터리의 충전을 제어한다. 배터리 충전 제어기는 배터리 충전량이 작을 때 동작하는 최대 전력 추적(Peak Power Tracking : PPT) 모드와 배터

리 충전량이 많을 때 배터리의 만충 전압을 배터리의 기준전압으로 제어하는 배터리 정전압(Constant Voltage) 모드의 두 가지 모드로 작동한다.

보조 전원 장치인 배터리의 신뢰성을 높이기 위해, 그림 1과 같은 배터리 병렬 구조인 듀얼 배터리 시스템(Dual Battery System)이 사용된다. 이 시스템은 2개의 배터리가 다이오드를 통해 부하에 연결되어 있고, 각 배터리의 충전을 담당하는 배터리 충전 제어기와 주 에너지원인 태양전지가 개별적으로 장착되어 있다. 배터리 병렬 구조 시스템이 정상적으로 전력을 공급하려면 배터리의 충방전 전력이 두 개의 배터리에 동등하게 분배되어야 한다. 배터리 충방전이 불균형을 이룰 경우 하나의 배터리만이 부하에 거의 모든 전력을 공급하므로 부하의 요구전력을 공급하지 못하며, 배터리 수명도 짧아진다.

본 논문에서는 배터리의 충방전 균형을 확인하고 원인을 밝히기 위한 장시간 시뮬레이션(Long term simulation)이 가능한 Functional 모델의 설계와 그 배경을 소개하고, 장시간 시뮬레이션을 통해 배터리 병렬 구조 인공위성 전력계 시스템의 배터리 불균형 경우를 확인하여 그 대안을 제시한다.

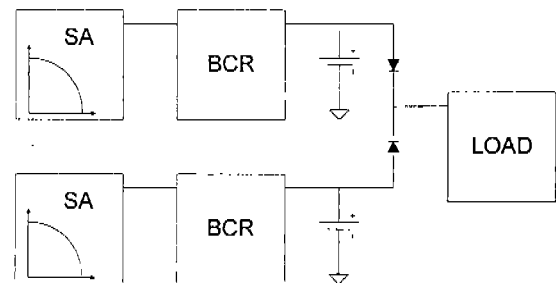


그림 1 듀얼 배터리 시스템 (Dual Battery System)

2. Functional 모델

장시간 시뮬레이션의 경우에는, 짧은 시간 (Short term) 동안 안정적으로 동작한다는 가정 하에서, 전체 에너지 흐름에 영향을 주지 않는 다이내믹(dynamic)을 없애고 정상상태(steady state)를 나타내는 상태 변수만을 Function으로 만들어서 시뮬레이션 하는 Functional 모델을 사용한다.

2.1 태양전지 모델

태양전지의 출력 특성은 식 2.1과 2.2에 의해 계산된다[1]. 식 2.1은 해석적인 근이 존재하지 않으므로 Newton Raphson 방법에 의해 주어진 전압에 따른 전류를 계산한다. 식 2.2은 온도 변화에 따른 출력 특성의 변동을 계산한다.

$$I = I_g - I_o \left(e^{\frac{q}{AKT} V_d} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad 2.1$$

$$V_d = V + I R_s$$

$$\begin{aligned} \Delta I &= f_c \Delta T \\ \Delta V &= (f_v + f_c R_s) \Delta T \end{aligned} \quad 2.2$$

2.2 배터리 모델

배터리는 SOC(State of Charge), 충전 전류 및 온도에 따라 그 전압 특성이 비선형적으로 변동한다. 또한 배터리의 출력 전압은 전체 시스템의 에너지 균형 및 전력 공급에 중요한 영향을 미치므로 시스템 설계 시 배터리의 비선형적 특성을 고려하여 설계하는 것이 중요하며 모델 또한 배터리의 이런 비선형적인 특성을 정확히 표현할 수 있어야 한다. 여기서는 여러 모델 중에서 충방전 특성과 자체 방전(self discharge)을 잘 표현한 Zimmermann 회로 모델을 사용한다[2]. 등가회로는 그림 2와 같다. R_s 는 배터리의 내부 저항을, $D1$, $D2$ 와 C_d 는 배터리의 충방전 특성을 나타내는 파라미터이다. $D3$ 와 C_s 는 배터리의 자체 방전을 표현한 파라미터이다.

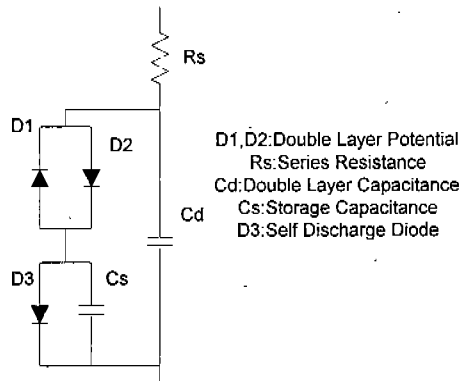


그림 2 Zimmermann 배터리 등가 모델

2.3 전력단 모델

전력단의 다이내믹 특성을 생략하고 그 기능만을 고려하여 전력단을 그림 3과 같이 모델하였다. 동작 특성에 따른 정확한 효율을 계산하기 위해, [1]에서 제시된 여러 가지 손실에 관한 관계식을 사용하여 전력단의 동작 상황에 따른 전력 손실을 계산하여 이를 바탕으로 전력단의 출력 전류를 계산한다.

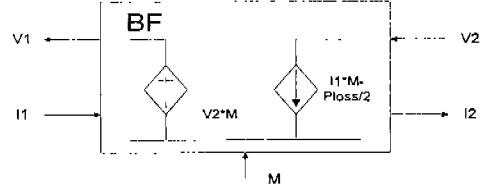


그림 3 전력단 (Power Stage) 모델

2.4 제어기 모델

시스템 제어기는 최대 전력 추적 모드와 배터리 정전압 모드의 두가지 모드로 구성되어 있다. 최대 전력 추적 모드는 태양전지 모델에서 계산된 최대 전력 전압을 기준전압으로 그림 4의 전압 보상회로로써 태양전지의 전압을 제어하고, 배터리 정전압 모드의 경우는 배터리의 전압을 배터리 만충 전압을 기준전압으로 하여 그림 4의 회로로 제어한다. 이 두 모드의 전환은 최대 전력 추적 모드의 제어전압(control voltage : V_c)과 배터리 정전압 모드의 제어전압의 두 V_c 를 받아서 큰 쪽의 V_c 에 의해 전압 비 M 이 결정되는 알고리즘으로 구현하였다.

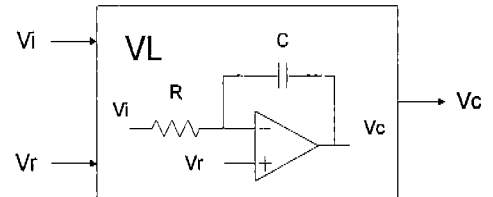


그림 4 전압 보상 회로

2.5 다이오드 OR 회로 모델

듀얼 배터리 시스템은 배터리 출력단이 다이오드 OR 회로로 묶여 있다. 이 경우, 배터리의 작은 전압 차이에 의해 다이오드 특성 곡선에 따라 전류가 분배되므로 이상적인 다이오드 모델로는 듀얼 배터리의 방전을 정확히 표현하기 어렵다. 그러므로 태양전지와 마찬가지로, 식 2.3과 같은 다이오드 전압 전류식을 Newton Raphson 방법으로 풀어주어야 한다.

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \quad 2.3$$

i_D = positive diode current

v_D = positive diode voltage

$V_T = kT/q$: thermal voltage

I_s = reverse saturation current

3. 시스템 분석

배터리 병렬 구조 시스템은 배터리 출력단이 다이오드 OR회로로 묶여있기 때문에 배터리의 전압이 같게 유지되므로 충방전에서 배터리 불균형이 발생할 수 있다. 배터리 충방전 불균형이 발생하는 원인은 다음의 2가지 경우로 나뉜다.

3.1 배터리의 중간 전압(middle voltage)이 차이가 날 경우

그림 5는 배터리의 중간 전압이 차이가 날 경우의 충방전 곡선이다. 점선은 중간 전압이 낮은 쪽 배터리, 실선은 중간 전압이 높은 쪽 배터리의 충방전 곡선이다. 다이오드 OR회로로 묶인 시스템은 전압을 동일하게 해 주므로 전압 변동 구간이 같게 나타난다. 배터리가 불균형을 이루게 되면 균형을 이루었을 때와 같은 전력을 공급하기 위해 배터리 전압 변동 구간이 아래쪽으로 커지게 된다. 그러므로 방전할 때, 전압이 높은 배터리의 충전전류는 A까지 떨어져서, 최저 충전전류가 B인 전압이 낮은 배터리보다 DOD (Depth of Discharge)가 커지게 된다. 전압의 차이가 커서 DOD의 크기가 커지면 배터리의 성능이 나빠져서[8] 배터리의 화학저항이 커지므로 방전 곡선이 평형을 이루는 그림 5의 (b)와 같이 변화한다. 따라서 전압이 큰 배터리의 용량은 D에서 E로 줄게되고 충방전 전류는 C에서 E사이를 사용하게 되므로 전압이 높은 쪽 배터리로는 그들기간 동안에 전력을 공급하기 힘들어진다.

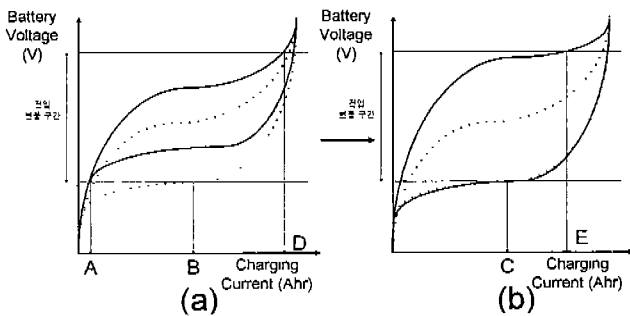


그림 5 충방전 곡선 (배터리 전압이 차이가 날 경우)

- (a) 배터리 전압 차이가 난 직후
- (b) 높은 전압의 배터리가 성능이 나빠진 후

3.2 2차 배터리의 셀이 하나 단락된 경우(cell failure)

그림 6은 2차 배터리의 셀이 하나 단락된 경우의 충방전 곡선이다. 점선은 2차 배터리, 실선은 1차 배터리의 충방전 곡선을 나타낸다. 2차 배터리의 만충 전압이 단락된 셀만큼 작아지므로 과충전을 막기 위해 정전압 모드의 기준 전압을 2차 배터리의 만충 전

압인 F만큼 낮춰줘야 한다. 3.1의 경우와 마찬가지로 2차 배터리의 충방전 곡선의 전압이 낮아지므로 1차 배터리의 DOD가 커지게 되어 1차 배터리의 성능이 나빠지며 그 결과 그림 6의 (b)와 같이 변화하게 된다. 1차 배터리의 충방전 전류는 C와 E사이를 사용하게 되므로 3.1과 마찬가지로 1차 배터리로는 부하에 전력을 전달하는데 문제가 생긴다. 결국 부하의 요구전력을 공급하지 못한다.

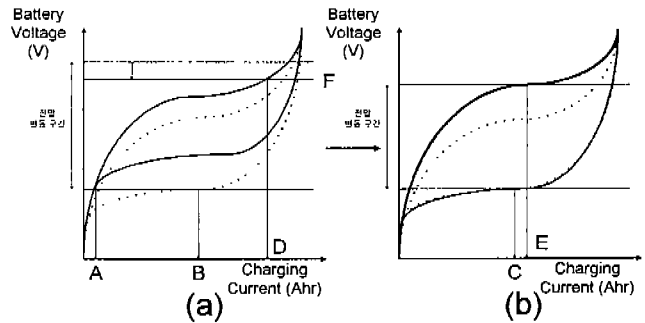


그림 6 충방전 곡선 (2차 배터리 셀 단락)

- (a) 단락 된 직후
- (b) 방전곡선이 평형을 이룬 후

4. 시뮬레이션

4.1 정상적으로 동작할 경우

그림 7은 배터리 병렬 구조 시스템을 2주기 동안 시뮬레이션한 결과이다. 온도는 -40°C 에서 70°C 까지 변한다고 가정하여 그늘(eclipse)동안은 선형적으로 감소하고 태양광(sunlight)동안은 선형적으로 증가한다. 정상적으로 동작한다면 두 개의 전력조절기와 배터리가 전력을 동등하게 배분하므로 하나의 전력조절기와 배터리에 관한 결과만을 포함하였다. 광도는 태양전지판이 태양을 제대로 쫓아간다는 가정하에 그들기간 동안은 0, 태양광 기간 동안은 1이라고 정하였으며, 약 2900초에서 3500초까지는 위성이 지구와 데이터를 교환하기 위해 지구를 향하게 되어 태양광을 적게 받는 것을 시뮬레이션 하였다.

(g)를 보면 그늘에 있는 경우는 배터리가 방전을 하며 태양광에 있을 경우에는 배터리가 충전된다. (f)에서 4300초 부근에서부터 6500초까지는 배터리 전압이 30V로 제어되는 것으로, PPT 모드에서 배터리 정전압 모드로의 전환을 뜻한다.

(g)를 보면 최저 충전이 3.6Ahr 이므로 16.28%의 DOD (Depth Of Discharge)를 갖는다. 일반적으로 배터리의 DOD를 20%까지 사용하므로 그림 7의 배터리는 임무수행기간 동안 제대로 동작할 것으로 예상할 수 있다.

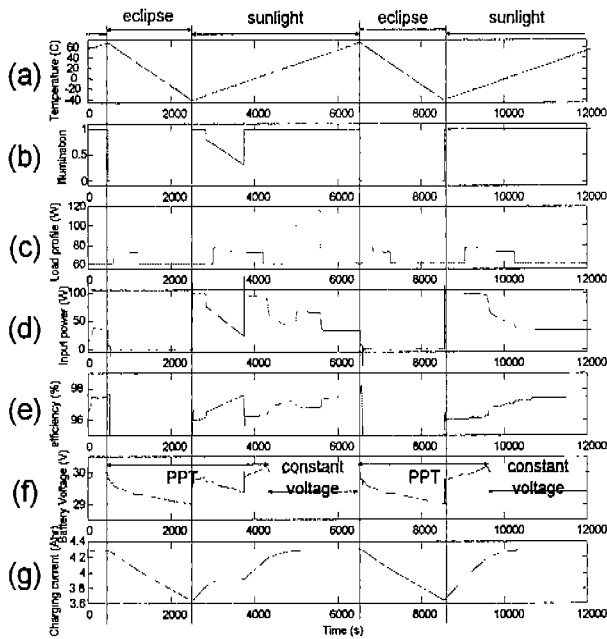


그림 7 시뮬레이션 결과 (정상 동작)

- (a) Temperature profile (°C)
- (b) Illumination profile
- (c) Load profile (W)
- (d) SAR Input power (W)
- (e) SAR efficiency (%)
- (f) Battery voltage (V)
- (g) Charging current (Ahr)

4.2 2차 배터리의 전압이 낮을 경우

그림 9는 배터리 전압이 차이가 날 경우의 시뮬레이션 결과이다. 3.1에서 예상한 바와 같이 전압이 높은 1차 배터리의 DOD가 30.23%로 배터리 한계 DOD인 20%보다 높다. 그 결과 1차 배터리의 화학저항이 커져, 결국 배터리의 수명이 짧게 되며, 1차 배터리의 용량이 작아지므로 그날 기간 동안의 전력 공급이 줄어든다.

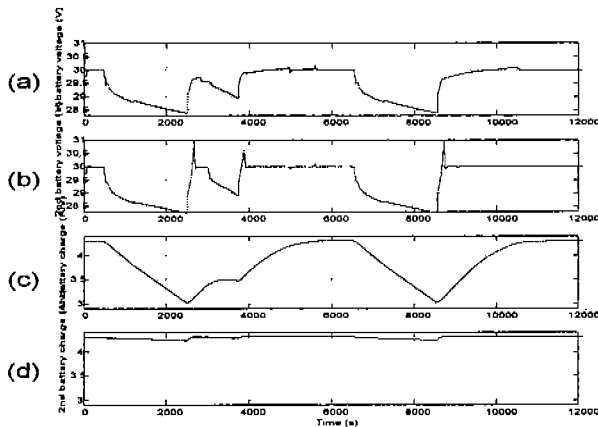


그림 8 시뮬레이션 결과 (배터리 전압 차이)

- (a) 1st battery voltage (V)
- (b) 2nd battery voltage (V)
- (c) 1st battery charge(Ahr)
- (d) 2nd battery charge(Ahr)

4.2 2차 배터리의 셀이 하나 단락된 경우

그림 9는 2차 배터리의 셀(cell) 하나가 단락 되었을 때의 시뮬레이션이다. 0초에서 2차 배터리의 셀 하나가 단락되었다. 이것을 관측하여 0초부터 배터리 기준 전압을 셀이 단락되어 내려간 2차 배터리의 만충 전압인 28.6V로 수정하였다. 3.2에서 예견했듯이 배터리 충방전은 그림 9의 (c), (d)와 같이 불균형을 이루게 된다. 1차 배터리는 2차 배터리와 전압이 같아질 때까지 방전을 계속하고, 그 결과 DOD가 69.77%가 된다. DOD가 커졌으므로 배터리의 화학저항이 늘어나게 되고[3] 1차 배터리의 충방전 곡선이 그림 6의 (b)와 같이 변하여 배터리가 불균형을 이루며 배터리 수명이 줄어든다.

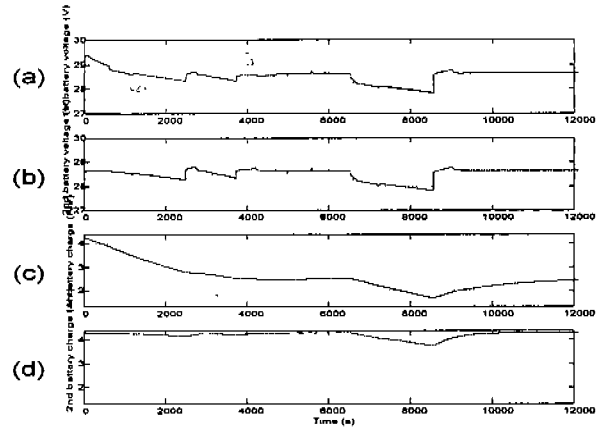


그림 9 시뮬레이션 결과 (Cell failure)

- (a) 1st battery voltage (V)
- (b) 2nd battery voltage (V)
- (c) 1st battery charge(Ahr)
- (d) 2nd battery charge(Ahr)

5. 결론

인공위성 전력계 시스템의 궤도 운행 기간 동안의 동작을 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있는 Functional 모델을 구현하고 배경을 소개하였으며, 이를 통해 배터리 병렬 구조에서 운행 기간 동안 생길 수 있는 문제점을 예측하였다.

듀얼 배터리 시스템은 출력단이 다이오드 OR회로로 묶여 있기 때문에 배터리의 전압이 같아지도록 충방전을 한다. 그러므로 배터리 충방전 곡선에서 차이가 생기면 배터리의 충방전이 불균형을 이루게 되고 결국 배터리의 수명이 짧아지고 전력용량이 작아지는 문제가 생긴다.

배터리 불균형은 긴 시간에 걸쳐서 일어나는 문제점이므로 임무수행 기간이 짧다면 큰 문제가 아니지만, 배터리 불균형에 의해 배터리 수명이 짧아지고 전력공급에 문제가 생길 수 있으므로 임무수행기간을

길게하기 위해서는 해결되어야 하는 문제이다. 이 문제점의 원인은 배터리 출력단의 다이오드 OR 회로에 의해 배터리를 전압 제어하기 때문이며 이를 해결하기 위해서는 다이오드 OR 회로 대신 배터리 출력단의 전류를 제어할 수 있는 회로인 방전기(Discharger)를 사용하여 배터리의 충방전 전류를 동일하게 제어하여야 한다. 방전기를 달면 그만큼 효율이 나빠지게 되므로, 긴 시간 임무수행의 신뢰성과 효율의 이율배반성(Trade-off)을 잘 판단해서 결정해야 한다.

참고문헌

- [1] 조보형, 인공위성 전력계 시스템 설계 및 모델링 (II), 서울대학교 기초전력 연구소(4차년도 연차 보고서), 1998.
- [2] H. G. Zimmerman, "An Electrochemical Cell Equivalent Circuit For Storage Battery/Power System Calculations By Digital Computer" IECEC, 1970.
- [3] David Linden, HandBook of Batteries, McGRAW-Hill, 2nd ed., 1995.
- [4] B. H. Cho and F. C. Lee, "Large Signal Analysis of Spacecraft Power Systems, IEEE PESC, 1987.
- [5] Huynh. P. and B. H. Cho, "Analysis and Design of a Microprocessor - Controlle Peak-Power Tracking System", IECEC, 1992.
- [6] S. J. Kim and B. H. Cho, "Analysis of Spacecraft Battery Charger Systems", IECEC, 1990.
- [7] J. R. Lee and B. H. Cho, "Modeling and Simulation of Spacecraft Power Systems", IEEE Transaction on Aerospace and electronic Systems, 1988. May.
- [8] D. Berndt, Maintenance-Free Batteries, RESEARCH STUDIES PRESS LTD, 1993
- [9] Samuel C. Levy and Per Bro, Battery Hazards And Accident Prevention, PLENUM PRESS, 1994.