

RPPT 시스템을 위한 단순화된 직·병렬 구조

양정환, 배현수, 이재호, 조보형
서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

A Simplified Series-Parallel Structure for the RPPT(Regulated Peak Power Tracking) System

J. H. Yang, H. S. Bae, J. H. Lee and B. H. Cho
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

기준에 사용된 저궤도 인공위성 전력계 시스템을 분석하고, 시스템의 효율을 향상시키는 단순화된 직병렬 구조를 제안한다. 인공위성이 지구를 공전하는 동안 상황에 따라 변화하는 제안된 구조의 동작을 모드로 분류하고, 제안한 시스템을 안정적으로 운용하기 위해 시스템 운용 알고리즘을 제안한다. 모의 실험을 통하여 기존의 직렬구조와 제안된 구조의 효율을 비교한다. 제안된 단순화된 직병렬 구조의 안정적인 동작을 검증하기 위해, 200W급 태양전지와 100W급 전력조정기 두 모듈을 병렬로 구성하여 실험하였다.

1. 서론

저궤도 인공위성 전력계 시스템의 에너지 원은 주 에너지 원인 태양 전지와 보조 에너지 원인 배터리 구성되어 있다. 전력계 시스템의 주 에너지원으로 사용되는 태양 전지는 부하가 요구하는 전력을 공급하고, 배터리에 에너지를 저장한다. 배터리는 인공위성이 식구간에 있는 동안에 에너지원으로 쓰일 뿐 아니라 일광구간에 에너지 저장용으로도 쓰인다. 현재의 인공위성은 과거보다 다양한 임무를 수행하기 때문에 전력 요구량이 증가하였다. 따라서 인공위성의 에너지 원인 태양전지와 배터리 또한 그 용량이 증대되었다. 이에 따라 태양전지와 배터리의 용량을 줄여 인공위성의 경량화에 기여할 수 있는 고효율의 인공위성 전력계 시스템이 요구된다. 본 논문에서는 시스템의 경량화, 고효율화를 위해 적은 소자를 사용하여 인공위성 전력계 시스템의 전체 효율을 증대시키는 단순화된 직병렬 구조를 제안한다.

2. 기존의 인공위성 전력시스템의 구조 분석

2.1 직렬 구조

그림 1.(a)는 인공위성 전력계 시스템에 주로 쓰이는 직렬구조이다. 태양전지와 배터리 사이에 위치하여 태양전지의 전압을 제어하거나 배터리 만충 시 배터리 전압을 제어하는 태양전지 레귤레이터, 배터리와 부하 사이에 위치하여 부하의 전압을 제어하는 배터리 방전 레귤레이터로 이루어져 있다. 직렬구조는 전력단의 수정 없이 컨버터를 추가하여 모듈확장이 유리하며, 인공위성 전력계 시스템에 필요한 최소한의 DC-DC 컨버터를 사용하므로 경량급 소형위성에 유리하다. 그러나 일광구간동안 태양전지에서 발전된 전력이 부하로 이동할 때 태양전지 레귤레이터와 배터리 방전 레귤레이터를 통과하므로 두 번

의 전력 변환과정을 거친다. 이에 따라 태양전지는 부하가 요구하는 전력과 추가적으로 전력 변환 과정에서 손실되는 전력을 공급해야 하므로, 전체 시스템 측면에서 효율이 감소한다 [1][2].

2.2 병렬 구조

그림 1-(b)는 병렬구조 시스템을 나타낸다. 병렬 구조 시스템은 태양전지와 배터리 사이에 위치한 태양전지 레귤레이터, 태양전지와 부하 사이에 위치한 버스 레귤레이터로 이루어져 있다. 인공위성이 식구간에 들어가면 배터리의 에너지가 태양전지 레귤레이터와 버스 레귤레이터를 통과하므로 두 번의 전력손실이 생긴다. 일반적으로 일광구간에 식구간보다 길기 때문에 직렬구조 시스템에 비해서 효율이 높다. 그러나 제어가 직렬구조에 비해 복잡하고, 부하가 태양전지가 낼 수 있는 에너지보다 많은 에너지를 요구할 경우 사용할 수 없으므로, 태양전지의 용량이 큰 시스템에 사용해야 한다[3].

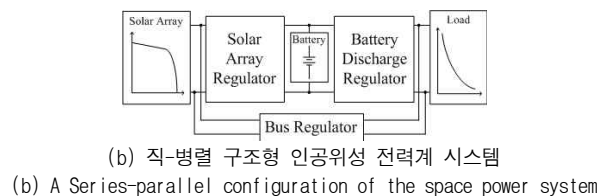
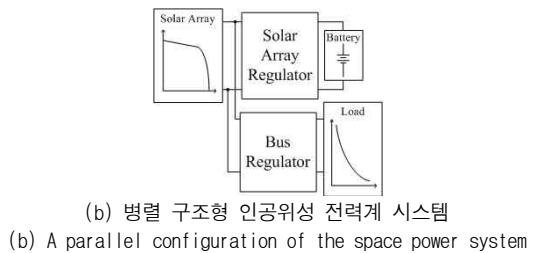
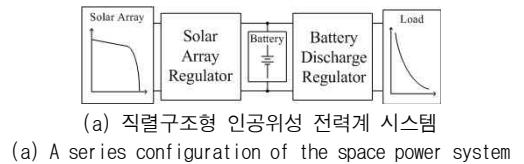


그림 1 저궤도 인공위성의 태양전지 전력시스템
Fig. 1 The solar array power system for the LEO satellite

2.3 직-병렬 구조

그림 1-(c)는 직-병렬 구조 전력계 시스템을 나타낸다. 직병렬 구조는 일광구간에서 태양전지에서 발전된 전력이 부하로 이동할 때 두 번의 전력 변환 과정을 거쳐 효율이 낮아지는 직렬구조의 단점을 해결한 구조로써, 태양전지에서 부하까지 전력을 전달해주는 버스 레귤레이터가 추가된 구조이다. 태양전지에서 부하까지 전력이 이동할 때, 하나의 컨버터만 거치므로 효율이 높다. 그러나 직렬구조에 비해 컨버터의 개수가 늘어나므로 추가적으로 비용이 들고, 전력계 시스템의 부피가 커져 소형의 인공위성에서 적용하기 어렵다. 또한 제어가 복잡해진다[3].

3. 단순화된 직-병렬 구조

그림 2는 단순화된 직-병렬 구조를 나타낸다. 이 구조는 기존의 직렬구조의 버스 레귤레이터에 스위치 하나를 추가하여 이를 태양전지에 연결한 것이다. 직렬 구조, 병렬 구조에 레귤레이터가 하나 더 추가되는 직병렬 구조에 비해, 제한한 구조는 스위치 하나가 더 추가된다. 따라서 직병렬 구조보다 간단하며, 비용과 부피를 줄일 수 있다. 일광구간에서 배터리에 연결된 스위치는 동작하지 않고, 태양전지에 연결된 스위치가 동작하여 태양전지의 에너지가 버스 레귤레이터를 거쳐 부하로 전달된다. 따라서 기존의 직렬구조의 태양전지 에너지가 태양전지 레귤레이터와 버스 레귤레이터, 두 개의 레귤레이터를 통과함에 따라 생기는 전력 손실을 줄여 전력계 시스템의 효율을 증가시킨다. 그러나 버스 레귤레이터의 두 개의 스위치 중 어떤 스위치를 동작시켜야 하는지 결정하는 제어가 필요하다. 따라서 제어가 복잡해지나 디지털 컨트롤러로 제어 알고리즘을 구현할 수 있다.

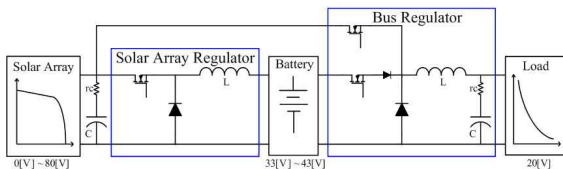


그림 2 단순화된 직-병렬 구조형 인공위성 전력계 시스템
Fig. 2 A Simplified Series-Parallel structure for the LEO satellite power system

4. 단순화된 직-병렬구조의 동작 모드

4.1 Eclipse Mode

인공위성이 식구간에 들어가면 태양전지는 전력을 발전하지 못하므로 배터리만이 부하가 요구하는 전력을 공급하는데 이를 Eclipse Mode라 한다. 그림 3-(a)과 같이 버스 레귤레이터의 배터리에 연결된 스위치가 동작하고 버스 레귤레이터는 부하 전압을 제어한다. 태양전지는 전력을 발전하지 못하므로 태양전지 레귤레이터는 동작하지 않는다.

4.2 Peak Power Tracking(PPT) Charge Mode

태양전지의 최대 출력 전력이 부하가 요구하는 전력보다 큰 경우, 태양전지에서 발전된 전력을 배터리와 부하가 나누어 쓰게 된다. 그림 3-(b)와 같이 태양전지 레귤레이터는 태양전지 최대 전력점 추적을 위해 태양전지의 전압을 제어한다. 버스 레귤레이터는 태양전지에 연결되고, 부하 전압을 제어한다.

4.3 Peak Power Tracking(PPT) Charge Mode

태양전지가 발전할 수 있는 최대 전력보다 부하가 요구하는 전력이 클 때는 태양전지와 배터리가 동시에 부하로 전력을 공급해 주어야 한다. 태양전지와 배터리에 연결되어 있는 버스 레귤레이터의 스위치는 동시에 동작할 수 없으므로, 그림 3-(c)와 같이 배터리에 연결된 스위치가 동작한다. 태양전지 레귤레이터는 최대 전력점 추적을 위해 태양전지 전압을 제어하고, 버스 레귤레이터는 부하의 전압을 제어한다. 이 모드에서 단순화된 직-병렬 구조는 기존의 직렬구조와 동일하게 동작한다.

4.4 Trickle Charge(TC) Mode

그림 3-(d)는 TC Mode를 나타낸다. PPT Charge Mode에서 배터리의 충전 상태가 증가하면 배터리의 과충전을 방지하기 위하여 배터리의 전압을 정전압으로 제어한다. 배터리 전압을 정전압으로 제어하면 배터리로 인가되는 전류가 간접 제어된다. 와 같이 태양전지 레귤레이터는 배터리 누수 충전 제어기에 의해 제어된다.

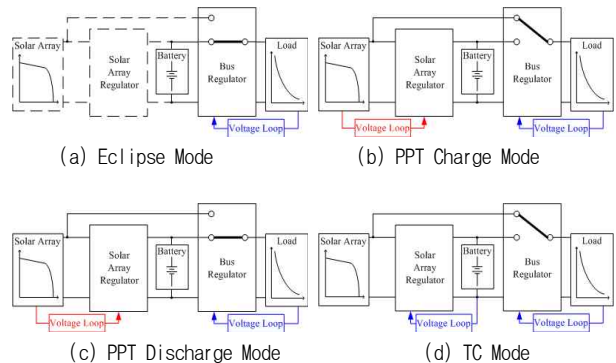


그림 3. 단순화된 직-병렬 구조의 각 모드별 동작
Fig. 3 Modes of the Simplified Series-Parallel structure

5. 시스템 운용 알고리즘

그림 4는 제한한 시스템의 운용 알고리즘을 나타낸다. 인공위성이 일광구간에 있는지 식구간에 있는지는 태양전지의 전압이 미리 설정한 기준전압 이상인지 아닌지로 판단한다. 기준전압보다 태양전지의 전압이 낮으면 식구간에 있다고 판단하고 버스 레귤레이터는 배터리에 연결되고, 태양전지 레귤레이터는 동작하지 않는다(Eclipse Mode). 인공위성이 일광구간에 있다면 버스 레귤레이터의 입력을 어느 쪽으로 연결해야 할지 다시 정해야 한다. 현재 버스 레귤레이터의 입력이 배터리라면(PPT Charge Mode) 부하가 요구하는 전력이 태양전지가 내는 전력보다 큰 경우 그대로 유지하고, 그렇지 않으면 버스 레귤레이터의 입력을 태양전지로 바꾼다(PPT Charge Mode).

버스 레귤레이터의 입력이 태양전지라면(PPT Charge Mode) 현재 태양전지의 동작점을 판단하여, 태양전지가 최대 전력점에서 동작하지 않는다면 그대로 유지한다(TC Mode). 태양 전지가 최대 전력점에서 동작한다면, 태양전지의 전력과 부하가 요구하는 전력을 비교하여 부하가 요구하는 전력이 작으면 그대로 유지하고(PPT Charge Mode), 부하가 요구하는 전력이 크면 버스 레귤레이터의 입력을 배터리로 바꾼다(PPT Discharge Mode).

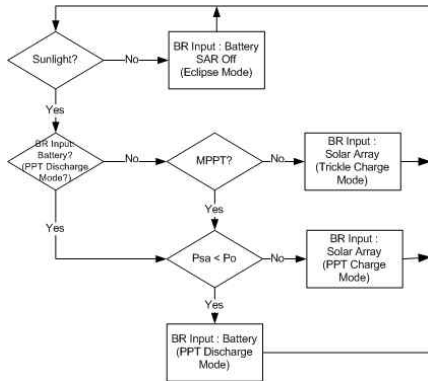


그림 4. 단순화된 직-병렬 구조의 운용 알고리즘
Fig. 3 Modes of the Simplified Series-Parallel structure

6. 모의 실험 및 하드웨어 실험 결과

모의실험을 통하여 제안한 구조의 효율을 직렬 구조의 효율을 비교하였다. 태양전지에서 발생한 전력은 부하로 전달되고 남은 전력은 배터리를 충전하는데 쓰인다. 따라서 태양전지에서 발생한 전력과 부하가 요구하는 전력이 같다면, 배터리에 많은 에너지를 저장할 수 있는 구조가 전력변환과정에서 손실이 적다고 할 수 있다. 그림 5는 모의실험 결과 나타낸다. 배터리에 남은 최종 에너지는 제안한 구조가 38338J로, 직렬구조 37111J에 비해 약 11% 많음을 확인하였다. 따라서 제안한 구조가 직렬 구조에 비해 에너지 변환 효율이 높다고 볼 수 있다.

운용 알고리즘과 각 스위칭 레귤레이터의 제어를 검증하기 위하여 하드웨어를 이용하여 실험하였다. 일사량을 대신하여 HID램프를 사용하였다. 인공위성이 식구간에 있으면 태양전지 레귤레이터는 동작하지 않고 배터리만 버스 레귤레이터를 통해 부하로 방전된다(I). Eclipse Mode에서 동작하지 않던 태양전지 레귤레이터는 최대 전력점 추적을 시작하여, 시스템은 PPT Discharge Mode로 동작한다. 태양전지만으로 부하에 충분한 전력을 전달하지 못하므로 배터리가 방전함을 확인할 수 있다(II). 인공위성이 일광구간으로 완전히 들어갔을 때, 부하가 요구하는 전력(100W)보다 태양전지가 발전할 수 있는 전력(180W)이 많으므로 버스 레귤레이터는 태양전지에 연결되어 PPT Charge Mode로 동작한다(III). 부하가 요구하는 전력(200W)이 태양전지가 발전하는 전력(180W)보다 많아지면, 버스 레귤레이터는 배터리에 연결되어 PPT Discharge Mode로 동작하며, 배터리는 방전한다(IV). 부하가 요구하는 전력(100W)이 태양전지가 발전하는 전력(180W)보다 다시 작아지면, 버스 레귤레이터는 태양전지에 연결되어 PPT Charge Mode로 동작하며, 배터리는 다시 충전된다(V). 인공위성이 식구간으로 들어가 태양전지가 발전할 수 있는 최대 전력이 서서히 줄어들어, 부하가 요구하는 전력(100W)보다 작아지면, 버스 레귤레이터는 배터리에 연결되어 PPT Discharge Mode로 동작한다(VI). 인공위성이 식구간으로 완전히 들어갔을 때 제안한 구조는 Eclipse Mode로 동작하여, 버스 레귤레이터는 배터리에 연결되고, 태양전지 레귤레이터는 동작하지 않는다(VII).

실험결과 인공위성이 지구를 한 바퀴 공전하는 동안 제안한 구조는 제안한 운용 알고리즘과 설계한 제어기에 따라 안정적으로 동작함을 확인할 수 있다.

7. 결론

기존의 인공위성 전력계 시스템의 구조를 효율, 비용 면에서 분석하였다. 기존 구조의 장단점을 비교하여 단순화된 직병렬 구조의 인공위성 전력계 시스템을 제안하였다. 인공위성이 지구를 공전하는 동안 일어날 수 있는 상황에 따라 Mode별로 제안한 구조의 동작을 확인하였다. 일어날 수 있는 상황에 따라 제안한 구조가 안정적으로 동작할 수 있도록 운용 알고리즘을 제안하였다. 각 레귤레이터의 전력 손실을 분석하였고, 이를 바탕으로 모의 실험을 통해 시스템 전체 효율을 기존의 직렬 구조와 비교하였다. 하드웨어를 제작하여 제안한 구조의 안정적 동작과 제안한 운용 알고리즘을 검증하였다.

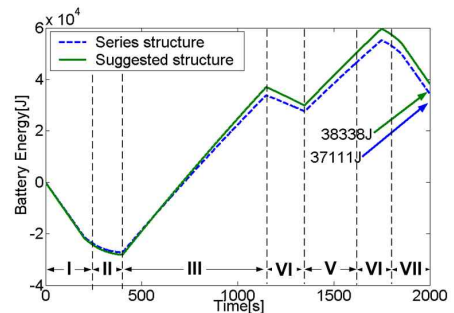


그림 5. 모의실험 결과
Fig. 5 Simulation result

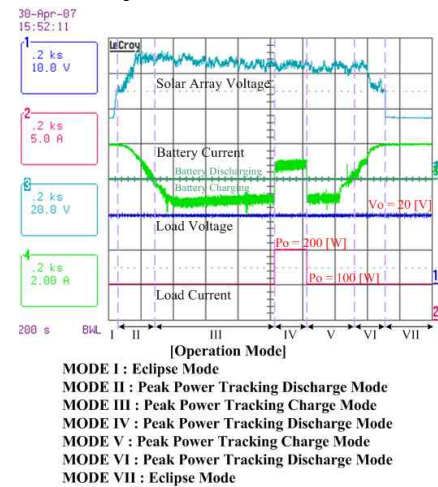


그림 6. 하드웨어 실험 결과
Fig. 6 Hardware experiment result

이 논문은 한국항공우주연구원(KARI)의 연구비 부분지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Huynh, P., and B.H. Cho, "Design and Analysis of a Regulated Peak-Power Tracking System," IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, Vol. 35, No. 1, pp. 84-91, July 1999.
- [2] Huynh, P., and B.H. Cho, Analysis and Design of a Microprocessor Controlled Peak-Power Tracking System. IECEC, 1992.
- [3] 조보형, 인공위성 전력계 시스템 설계 및 모델링(III), 서울대학교 기초전력공동연구소(제 5차년도 연차 보고서), 1997 전력계 구조