

## 퍼지 로직 기반의 위성용 MPPT 개발 및 EBA를 통한 성능검증

염승용, 박기연, 김홍래, 장영근\*

## Development of Fuzzy Logic-based MPPT and Performance Verification through EBA for Satellite Applications

Seung-Yong Yeom, Ki-Yun Park, Hong-Rae Kim and Young-Keun Chang\*

School of Aerospace &amp; Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

## ABSTRACT

The satellite should generate electric power efficiently to perform the mission successfully within limited power. For this reason, the electrical power system of LEO satellites usually regulates the power which is generated from the solar cells using MPPT (Maximum Power Point Tracking) method. This paper proposes advanced MPPT algorithm based on the fuzzy logic applied to small CubeSat satellite. The simulation has been performed to confirm the validity of the proposed method by interlocking between MATLAB/Simulink and STK (Systems Tool Kit). The EBA(Energy Balance Analysis) has also been performed at two different pointing modes of KAUSAT-5 for solar irradiation according to the satellite orbit and attitude, and load capacity varied with operation modes by Simulink and STK. The performance of fuzzy logic-based MPPT algorithm was verified through the EBA. The validity of the proposed MPPT algorithm based on the fuzzy logic was also confirmed by comparing with P&O (Perturbation & Observation) algorithm that is general in the MPPT.

## 초 록

저궤도 위성이 제한된 전력 내에서 임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 효율적인 전력 생산이 중요하다. 이를 위해 저궤도 소형위성의 전력계에서는 주로 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 방식을 사용하여 태양전지에서 생산되는 전력을 조절한다. 본 연구에서는 소형 큐브위성(KAUSAT-5)에 적용될 퍼지 로직 기반의 MPPT 알고리즘을 제안하며, 제안된 방법의 유용성을 확인하기 위해 MATLAB/Simulink와 STK (Systems Tool Kit)를 연동하여 시뮬레이션을 수행하였다. Simulink와 STK를 이용하여 위성 궤도와 자세에 따른 태양 광량과 운용모드에 따라 변하는 부하용량에 대해 KAUSAT-5의 두 가지 지향모드에서 EBA(Energy Balance Analysis)를 수행하였고, 이를 통해 제안된 퍼지 로직 기반의 MPPT 알고리즘의 성능을 확인하였다. 제안된 퍼지 로직 기반의 MPPT는 가장 일반적인 방법의 하나인 P&O (Perturbation & Observation)와 성능을 비교하여 유용성을 확인하였다.

**Key Words** : MPPT(최대전력추적), STK(Systems Tool Kit), Fuzzy logic(퍼지 로직), Cubesat(큐브위성), EBA(에너지밸런스해석)

† Received: May 24 2014 Accepted: July 27, 2014

\* Corresponding author, E-mail : ykchang@kau.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## I. 서론

지속적인 위성 기술의 개발로 다양한 임무수행이 동시에 가능해짐에 따라 필요한 부하용량 또한 증가하고 있다. 부하용량의 증가는 더 많은 전력 공급을 요구하게 되지만, 위성에서 사용되는 태양전지, 배터리 및 전력계 전장품의 무게와 크기 등은 제한된다. 따라서 한정된 용량의 태양전지에서 최대 전력을 얻는 것은 위성 개발에 있어 필수적인 요구조건이 된다.

태양전지에서 최대 전력을 취하기 위해서는 태양전지의 최대 전력점을 추적하는 MPPT(Maximum Power Point Tracker) 방법이 널리 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 우주같이 환경 변화가 극심한 곳에서 MPPT의 반응속도는 빠르고 안정적이어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 4kg급 큐브위성에 적용될 퍼지 로직 기반의 MPPT를 개발하였으며, 시뮬레이션을 통해 FLCMPPT(Fuzzy Logic Control MPPT)의 성능을 P&O 방식의 MPPT와 비교하여 검증하였다. 기존에 개발된 퍼지 로직 기반의 MPPT들은 단순히 다른 알고리즘을 사용한 MPPT와 비교하여 성능을 검증하는 수준에 그쳤다면, 본 논문에서는 MPPT를 적용한 EBA 시뮬레이션을 통해 실제 위성 운용에서 MPPT

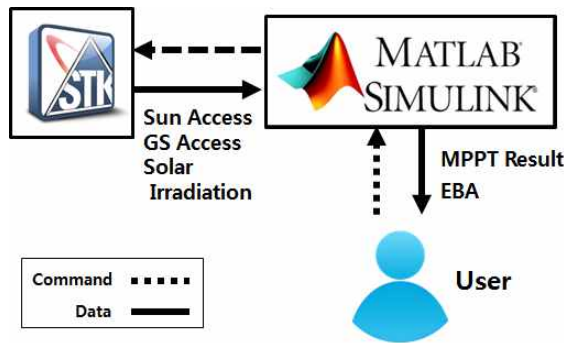


Fig. 1. Simulation Model Diagram

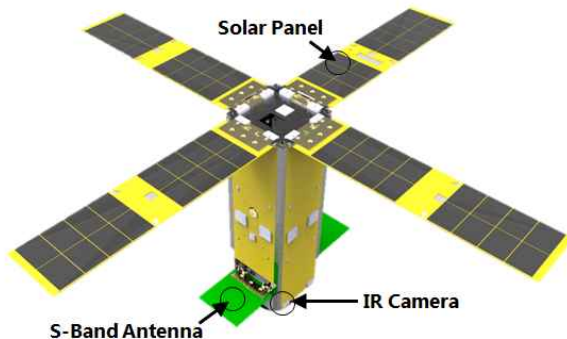


Fig. 2. KAUSAT-5 Configuration

Table 1. KAUSAT-5 Specification

항목	내용
임무 궤도	Sun Synchronous Orbit (LTDN : 10:30) (TBR) Altitude : 720 km (TBR)
설계 임무 수명	> 1 year
탑재체	주탑재체 : IRC, GMRM 부탑재체: MVSCMG(ADCS) FLCMPPT(EPS)
주탑재체 질량	IRC : Mass 580 g GMRM : Mass 47 g
위성체 질량	< 4 kg
위성체 전력	< 7 W @ EOL (Nadir) < 13 W @ EOL (Sun Pointing)

성능을 확인하였다.

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink와 STK를 연동하여 수행되었다. Fig. 1과 같이 STK에서 설정된 위성 모델과 궤도 정보를 통해 태양광량, 태양 접촉, 지상국 접촉에 대한 정보를 얻어 Simulink로 전송하게 되며, Simulink에서는 STK로부터 얻은 데이터를 이용하여 MPPT를 실행한다. 실시간으로 시행되는 MPPT와 함께 변화하는 위성 부하용량을 바탕으로 소형위성 운용에 대해 MPPT를 검증하기 위해 EBA(Energy Balance Analysis)를 수행한다. EBA는 위성이 운용되는 동안 전력 생산과 소비, 배터리 용량 등의 변화를 분석하는 도구로 전력계의 초기 개념설계 단계에서 필수적으로 수행하여야 한다. 시뮬레이션에 사용되는 위성은 현재 한국항공대에서 개발 중인 KAUSAT-5이며, EBA를 위해 KAUSAT-5의 전력사용량 분석을 이용하였다. KAUSAT-5는 3U+ 크기의 큐브위성으로 전체 형상은 Fig. 2와 같으며 규격은 Table 1에 나타내었다.

## II. 본론

### 2.1 MPPT의 동작원리

MPPT는 태양전지의 고유한 특성인 I-V 곡선으로 설명할 수 있다. Fig. 3은 태양전지의 I-V 곡선으로 아래 면적이 최대가 되는 지점에서 최대 전력을 가지게 된다. 이러한 I-V 곡선의 형상은 태양전지의 온도와 입사되는 태양광량에 따라 변하는 특징이 있다. Fig. 4는 입사 광량이 일정할 때 태양전지의 온도에 따른 I-V 곡선을 나타

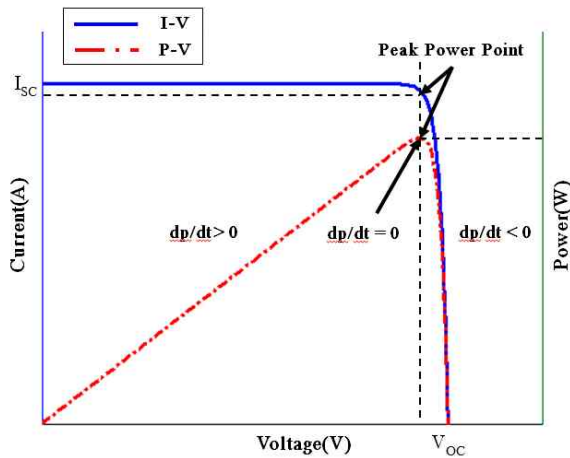


Fig. 3. I-V Curve Characteristics of Solar Cell

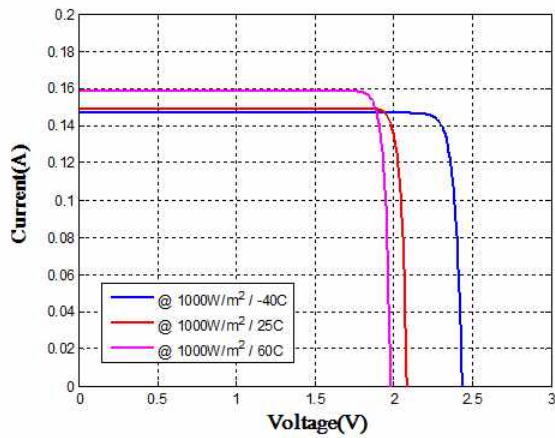


Fig. 4. I-V Curve Characteristics of Solar Cell Relative to the Temperature

낸다. 그래프에서 온도가 높아질수록  $V_{oc}$ 는 줄어들지만,  $I_{sc}$ 는 늘어나는 것을 볼 수 있으며 온도에 대해서 전압이 전류보다 더 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 태양전지의 온도가 낮을수록 태양전지의 에너지 전환 효율은 높아지며, 반대로 온도가 높을수록 에너지 전환 효율은 낮아지는 특성을 보인다. 결국 태양전지의 온도가 상승할수록 전력 생산량은 저온에서의 전력 생산량보다 줄어들게 되며, Fig. 4에서는  $-40^{\circ}\text{C}$ 일 때 가장 많은 전력을 생산하게 된다<sup>(1)</sup>.

또한 태양전지 출력은 태양전지와 연결된 시스템 부하에 크게 영향을 받으며, 부하의 크기에 따라 I-V 곡선 위에 태양전지 작동점의 위치가 결정된다. 태양전지가 시스템 부하와 직접 연결이 되어 있을 경우, 태양전지의 작동점은 일반적으로 최대 전력이 생산 가능한 지점을 벗어나 태양전지는 최대 전력을 생산하지 못하게 된다.

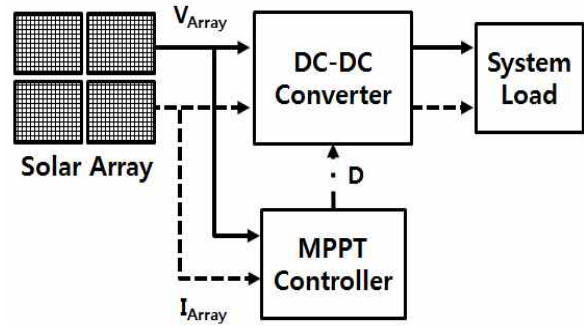


Fig. 5. MPPT System Block Diagram

최대 전력점을 추적하기 위해서는 MPPT 알고리즘을 실행할 컨트롤러가 필요하며, Fig. 5와 같이 태양전지와 시스템 부하 사이에 DC-DC Converter가 위치해야 한다. MPPT 컨트롤러는 DC-DC Converter의 PWM을 제어하여 태양전지의 출력을 조절할 수 있으며, 반복적인 실행을 통해 최대 전력점을 찾을 수 있게 된다.

## 2.2 퍼지 로직 제어(Fuzzy Logic Control) MPPT (FLCMPPT)

### 2.2.1 퍼지 로직의 정의

퍼지란 단어는 사전적으로 ‘불분명한’, ‘애매모호한’ 등의 의미를 가진다. 이러한 의미의 이름을 사용하는 퍼지 로직은 정확한 개념이 적용되지 않는 상황 사이에 분명한 경계가 존재하지 않을 때, 애매모호한 상황을 여러 근사값으로 구분 지어 놓는 논리이다. 참 혹은 거짓의 이진법적인 논리에서 벗어나 조건에 따라 유연한 결과를 표현하는 논리 개념으로 여러 근사값과 주관적인 값을 사용하는 규칙을 생성할 수 있는 규칙 기반의 기술(Rule-based Technology)이다.

경계가 존재하지 않는 애매모호한 상황은 ‘적다’, ‘많다’, ‘뜨겁다’, ‘차갑다’ 등의 형용사적으로 표현되는 단어로 많이 표현된다.

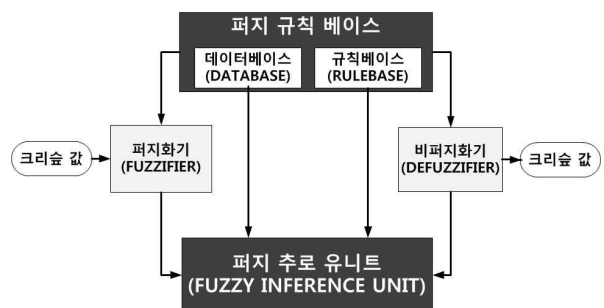


Fig. 6. Fuzzy Logic Structure Diagram

퍼지 로직은 크게 퍼지화기(Fuzzifier), 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base), 퍼지 추론 유닛(Fuzzy Inference Unit), 비퍼지화기(Defuzzifier)로 이루어지며 전체 흐름도는 Fig. 6과 같다. 수치적으로 표현되는 크리슌(Crisp) 값이 입력되면, 미리 약속되어진 퍼지 규칙 베이스와 퍼지 추론 유닛에 따라 출력이 정해진다. 결정된 출력은 여전히 퍼지화된 개념으로서 수치적으로 이해하기 위해 비퍼지화기를 통해 크리슌 값으로 변환된다.

2.2.2 퍼지 로직 MPPT(FLCMPPT)

퍼지 로직을 이용한 MPPT는 일반적으로 다른 알고리즘을 사용하는 것에 비해 외부 환경 변화에 대한 반응속도가 빠른 것으로 알려져 있다. 또한 수렴 결과가 보다 정확하고 안정적이며 기존 방식들보다 비선형 시스템에 효율적이다. 그러나 다른 알고리즘에 비해 높은 성능을 가지는 대신 알고리즘 자체가 복잡하며, 이를 처리하는 프로세서의 능력을 더 요구하게 된다. 제한된 자원을 사용해야 하는 위성의 전력 환경과 작은 크기로 인해 최대의 효율을 요구하는 초소형위성에서는 FLCMPPT가 훌륭한 대안이 될 수 있다.

FLCMPPT는 퍼지 로직을 기반으로 하는 MPPT로 두 개의 입력 변수와 한 개의 출력 변수를 가진다. 두 개의 입력 변수는 오차 E와 오차 변화율 CE이며 시간 t 에서 다음 식 (1) 및 (2)와 같다<sup>(2)(3)</sup>.

$$E(t) = \frac{P_{Array}(t) - P_{Array}(t-1)}{V_{Array}(t) - V_{Array}(t-1)} \quad (1)$$

$$CE(t) = E(t) - E(t-1) \quad (2)$$

입력 변수 E(t)는 시간 t 일 때 현재 I-V 곡선 상에서 부하 작동점의 위치가 최대 전력점의 왼쪽인지 또는 오른쪽인지를 나타내며, 입력변수 CE(t)는 작동점이 움직여야하는 방향을 나타낸다<sup>(4)</sup>.

출력 변수 D는 DC-DC Converter를 작동시킬 PWM의 Duty Ratio를 나타내며 식 (3)과 같다<sup>(2)(3)</sup>.

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) - D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (3)$$

전체 FLCMPPT 인터페이스는 ‘Madani’s

Table 2. Fuzzy Rule Table

CE \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	NS	ZE	ZE
PB	NB	NB	NB	ZE	ZE

NB : Negative Big                      PB : Positive Big  
 NS : Negative Small                 PS : Positive Small  
 ZE : Zero Equal

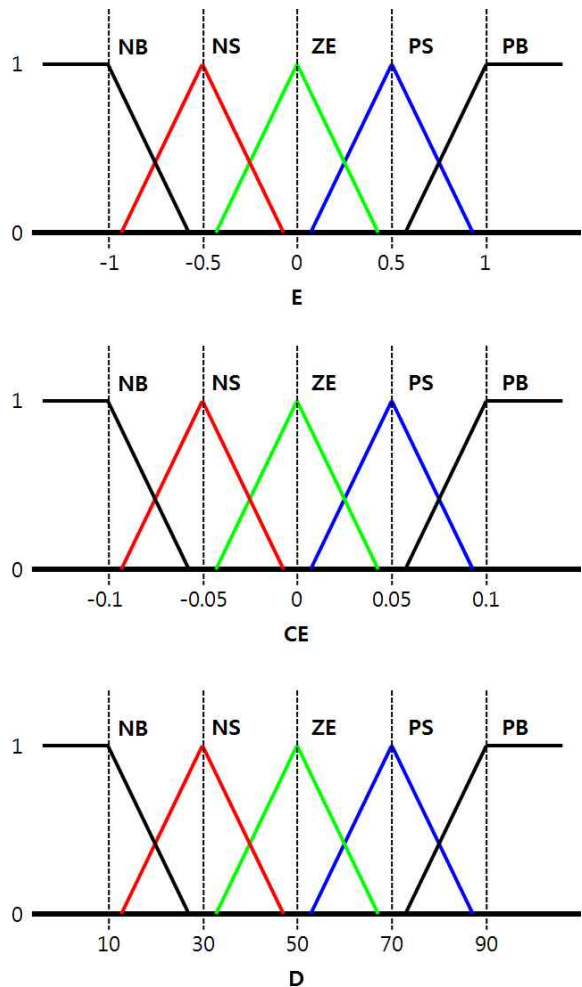


Fig. 7. Membership Function of E, CE and D

Method’를 사용하며, 비퍼지화는 면적중심법(Center of Gravity Method)을 사용한다.

두 입력과 하나의 출력에 대한 규칙은 Table 2와 같다. Table 2에서 각 변수들에 대한 Membership Function은 Fig. 7과 같다<sup>(5)</sup>.

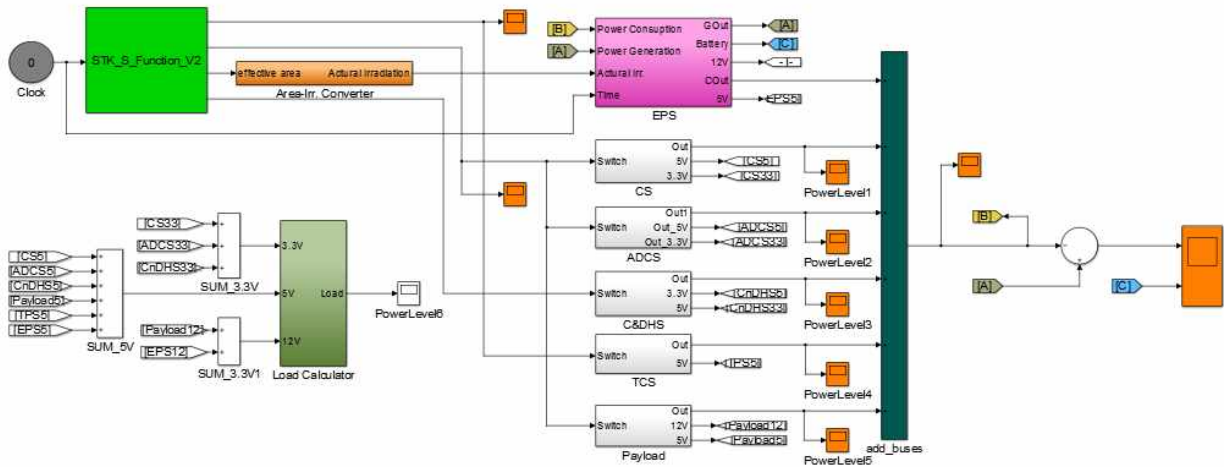


Fig. 8. Simulink EBA Simulation Model

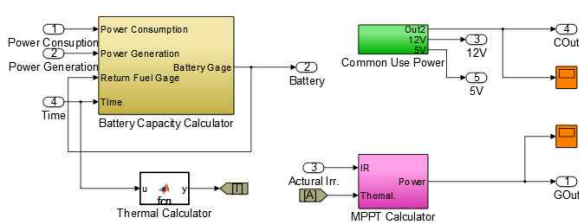


Fig. 9. Simulink EPS Subsystem Model

2.3 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 모델은 MATLAB/Simulink를 기반으로 개발되었다.

Figure 8은 Simulink로 작성된 EBA 시뮬레이션 모델을 보여주고 있다. 시뮬레이션은 Simulink를 중심으로 실행되며, Simulink의 S-Function 기능을 이용하여 STK를 구동시키며 실시간으로 STK의 데이터를 Simulink로 가져오게 된다. STK에서 Simulink로 입력되는 데이터들은 각 특성에 맞게 필요한 서브시스템 블록으로 들어가게 된다. 전체 시뮬레이션 모델에 들어가 있는 서브시스템은 자세결정 및 제어서브시스템, 명령 및 데이터 핸들링 서브시스템, 통신 서브시스템, 전력 서브시스템, 열제어 서브시스템과 탑재체로 총 6개이다.

Figure 9는 전체 시뮬레이션 모델 중 전력 서브시스템을 보여주고 있다. 전력 서브시스템은 전력 사용량 계산 블록, MPPT 계산 블록, 배터리 용량 계산 블록으로 나뉜다.

설계된 시뮬레이션 모델에서 사용한 배터리 충·방전 알고리즘은 Fig. 10에서 보여주는 바와 같다.  $P_G$ 는 태양전지판에서 생산되는 전력을 의미하며,  $P_C$ 는 위성에서 소비되는 전력을 의미한다. 태양전지판의 생산전력과 위성의 소비전력의 차

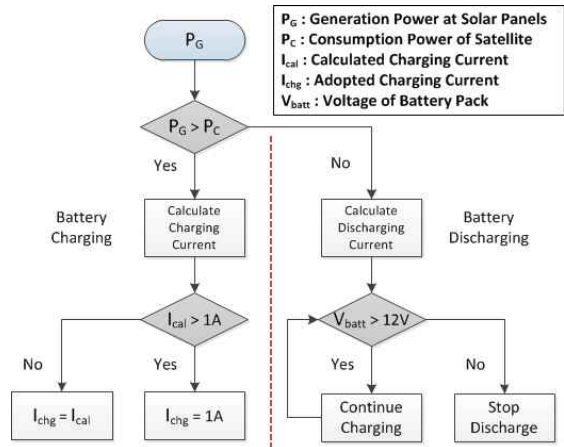


Fig. 10. Block Diagram of Battery Charging / Discharging Algorithm

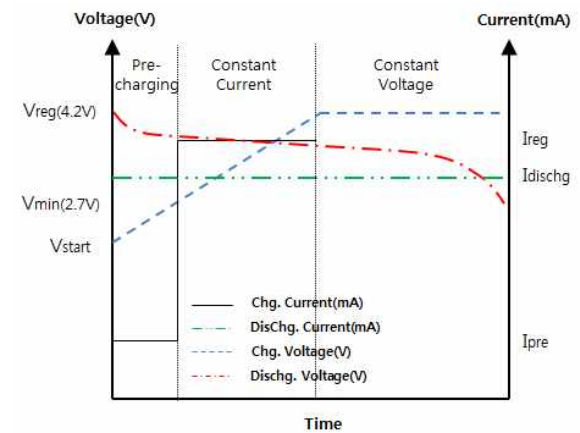


Fig. 11. Charging/Discharging Curve of Li-Polymer Battery

를 통해 배터리의 충전과 방전을 결정하게 된다. 충·방전을 통한 배터리 용량 계산은 Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 리튬-폴리머(Li-Polymer)



배터리의 하나의 셀에 대한 일반적인 충·방전 곡선을 기준으로 한다. KAUSAT-5의 설계 요구조건에 따르면 배터리 용량은 방전도(DOD)가 30% 이하이기 때문에 실제 운용 시 선-충전(Pre-charging) 모드의 충전은 고려하지 않고, 정전류(Constant Current) 모드와 정전압(Constant Voltage) 모드만 고려한다. 배터리 충전을 위해 사용되는 전력은 전력 생산량에서 전체 시스템의 전력 소비량을 제외한 나머지가 되며, 충전 당시 배터리 전압으로 나눈 값이 충전 전류가 된다.

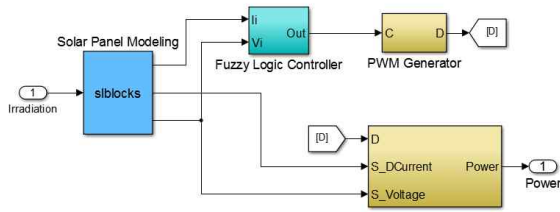


Fig. 12 Simulink MPPT System Model

최대충전 전류는 1A이기 때문에 충전 전류 계산 결과가 1A 보다 높을 경우에도 정전류로 1A를 고정해 사용한다. 계산 결과가 1A 보다 낮을 시에는 계산된 결과 값을 그대로 사용한다.

배터리가 방전되는 경우는 크게 두 가지 상황으로 나뉜다. 첫 번째 경우는 일 기간 중 생성되는 태양전지판 전력이 충분하지 못한 경우에 버스시스템 및 탑재체에서 요구하는 전력 중 부족한 전력을 배터리에서 충당하게 된다. 이 때 요구되는 배터리 용량은 소비되는 전력량에 따라 계산하게 된다. 두 번째는 식 기간 동안 태양전지판에서 전력을 전혀 생산하지 못하기 때문에 위성에 필요한 전력을 모두 배터리에서 충당하게 된다. 일반적인 리튬-폴리머 배터리의 방전종지전압(Final Discharge Voltage)은 2.5 ~ 2.75V이지만, 본 논문의 시뮬레이션 모델에서는 마진을 고려하여 배터리의 방전종지전압을 3V로 설정하였다. 따라서 4개의 배터리를 직렬로 연결하여 사용하는 경우 배터리 전압이 12V 이하로 내려가면 방전을 중지하게 된다.

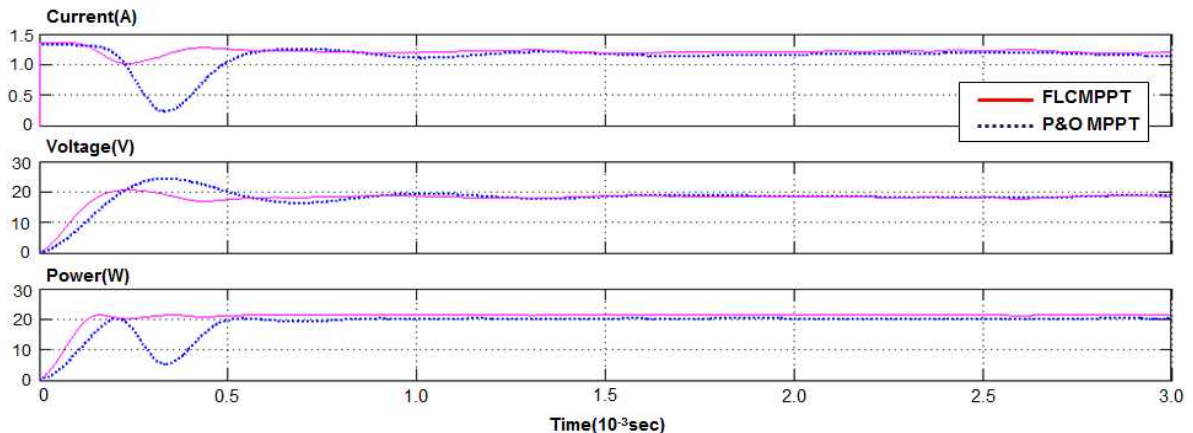


Fig. 13. Convergence Characteristics of FLCMPPT and P&O MPPT @60  $\Omega$  and 600  $W/m^2$

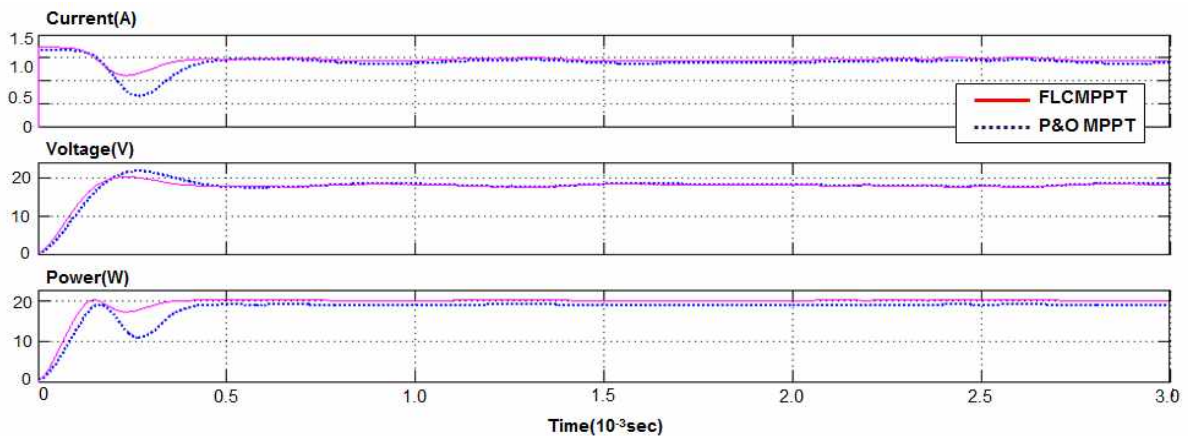


Fig. 14. Convergence Characteristics of FLCMPPT and P&O MPPT @60  $\Omega$  and 1200  $W/m^2$

Figure 12는 FLCMPPT 모델을 보여주고 있으며 FLCMPPT 모델은 전력계 블록 안에 위치한다. 시뮬레이션이 시작되면 STK에서 위성 위치와 자세에 따라 태양전지판에 입사되는 태양광량을 MPPT 시스템 모델로 보내게 된다. MPPT 시스템 모델 내에 위치하는 태양전지 블록은 입력된 태양광량에 따라 전력을 생성하며, 태양전지에 연결된 DC-DC Converter 모델과 퍼지 로직 모델에 의해 MPPT가 실행된다<sup>(6)(7)</sup>.

## 2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 세 가지 방법으로 실시하였다. 먼저 FLCMPPT와 P&O MPPT의 성능을 비교하였고, 다음은 FLCMPPT를 이용하여 위성이 지구 지향 모드와 태양지향 모드에서 운용한 결과를 확인하였다.

### 2.4.1 FLCMPPT와 P&O MPPT의 성능 비교

FLCMPPT와 P&O MPPT의 성능을 비교하기 위한 초기 조건은 다음 Table 3과 같다.

Figure 13과 Fig. 14는 태양전지판에 입사되는 태양광량 및 부하용량에 따른 각 MPPT에서의 전력, 전압 및 전류의 수렴 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 FLCMPPT를 이용한 결과가 P&O MPPT 보다 최대전력에 수렴하는 속도가 빠르며 Over-shoot 측면에서도 비교적 더 안정적이다.

미리 계산된 최대 전력점과 시뮬레이션 수렴값

Table 3. Initial Condition and Power Generated

항목	값
부하용량	60 Ω
입사 태양광량	(1) 1200 W/m <sup>2</sup> (2) 600 W/m <sup>2</sup>
태양전지 온도	25 °C
생산 전력(MPPT X)	(1) 7.13 W (2) 6.88 W

Table 4. MPPT Simulation Result and Efficiency

FLCMPPT		600 W/m <sup>2</sup>	1200 W/m <sup>2</sup>
60 Ω	수렴 결과	10.1 W	21.0 W
	최대전력 대비 효율	88.20 %	92.71 %
P&O MPPT		600 W/m <sup>2</sup>	1200 W/m <sup>2</sup>
60 Ω	수렴 결과	9.7 W	20.0 W
	최대전력 대비 효율	84.71 %	88.3 %

을 비교한 결과는 Table 4와 같다. FLCMPPT를 이용한 결과가 P&O MPPT 보다 최대 전력점에 근접한 것을 볼 수 있다.

FLCMPPT를 MPPT 알고리즘 중 가장 널리 알려진 P&O 알고리즘과 비교해본 결과 FLCMPPT의 수렴속도가 빠르고 안정적이며 더 효율적인 방법임을 확인하였다. FLCMPPT가 가지는 이러한 장점은 위성에서 필요한 조건에 더 알맞다고 할 수 있다.

### 2.4.2 태양전지판 방향에 따른 Energy Balance Analysis(EBA)

EBA는 한 궤도 이상에 대해 실시되며 본 논문에서는 큐브위성이 지구를 두 번 공전하는 동안의 전력을 분석하였다. 분석되는 결과는 궤도에 따라서 MPPT를 이용할 때 전력 생산량, 각 서브시스템의 전력 소비량, 위성의 배터리 잔량 변화량을 체크하게 된다.

본 논문에서는 위성의 태양전지판 방향이 천정(Zenith) 방향을 향할 때와 태양을 향하는 경우에 대해 각각 EBA를 실시하였다. 태양전지판이 천정을 향하는 상황은 KAUSAT-5의 IR 카메라가 지구를 촬영하거나 임무 데이터를 송신하기 위해 천저(Nadir) 방향을 향하는 경우에 이뤄진다. 그 밖에 일반적인 상황에서는 태양전지판이 충분한 전력공급을 위해 태양을 지향하도록 한다.

각 분석에서는 지상국 위치를 서울로 설정하였고, 위성이 지상국과 통신 가능한 거리를 지나갈 때 통신 및 IR 카메라를 이용한 영상촬영 임무를 실시하도록 설정하였다.

#### 2.4.2.1 태양전지판의 태양 지향에 대한 EBA

KAUSAT-5는 기본적으로 IR 카메라 촬영, 통신 등의 활동을 하지 않을 때에는 원활한 전력 생산을 위해 태양전지판이 태양을 지향하도록 한다. 태양전지판이 태양을 지향하는 자세가 유지되면 위성이 일 기간을 지나는 동안 충분한 태양광량을 일정하게 받을 수 있게 된다. 태양전지판의 온도는 식 기간 동안 약 -40°C 까지 떨어지며, 일 기간으로 돌입하여 전력을 생산하는 순간 태양전지의 특성으로 인해 높은 전압이 생성된다. 이 때문에 일 기간 돌입 후 초기에는 순간적으로 평균보다 많은 전력을 생산하게 되며 이러한 현상은 Fig. 15에서 확인할 수 있다.

Figure 15는 태양지향 모드에서 생산되는 전력량을 보여준다. 일 기간 동안 태양전지판에서 생산되는 전력은 균일하게 입사되는 태양광량에 따라 일정한 것을 볼 수 있다. 그 결과 태양지향 모드에서 KAUSAT-5는 최대 22.8W, 평균 14.2W

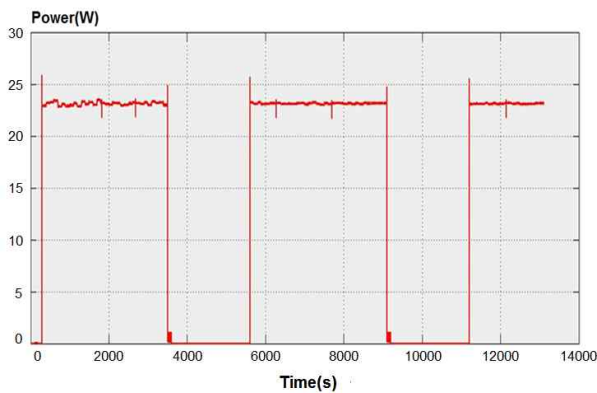


Fig. 15. Power Generation at Sun Pointing Mode

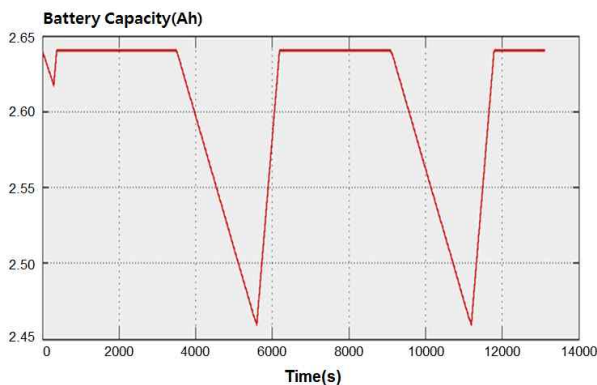


Fig. 16. Battery Capacity at Sun Pointing Mode

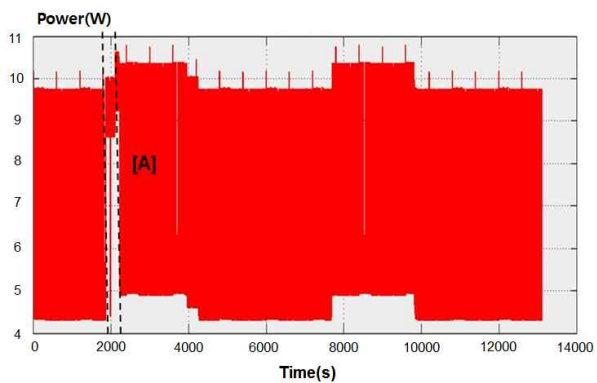


Fig. 17. Power Consumption of Satellite Subsystems

의 전력을 생산한다.

Figure 16은 궤도에 따라 변화하는 배터리 용량을 보여준다. 그래프에서 용량이 감소하는 구간은 배터리를 사용하고 있는 경우를 나타낸다. 전력 생산이 불가능한 식 기간 동안 배터리를 이용해 위성을 운용하게 되는 것을 확인할 수 있다. 식 기간 동안 떨어진 배터리 용량은 일 기간 동안 태

양전지에서 생산되는 전력을 이용하여 충전하게 된다. 그래프를 통해 태양전지판이 태양을 지향하는 자세를 유지할 때, 사용된 배터리를 충분히 충전할 수 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 위성의 전력 공급이 안정한 상태에 있음을 의미한다.

Figure 17은 서브시스템들의 전체 전력 사용량의 총합을 보여준다. 그래프의 구간 [A]에서는 서울에 위치한 지상국을 지나면서 송수신과 IR 카메라를 이용한 영상촬영을 하는 기간으로써 다른 시간대에 비해 평균적으로 소비되는 전력이 더 많은 것을 볼 수 있다. KAUSAT-5는 순간 최대 13.4W까지 전력을 사용하며, 평균 5.4W의 전력을 사용하고 있음을 확인할 수 있다.

2.4.2.2 태양전지판의 천정 지향에 대한 EBA

KAUSAT-5는 지상 촬영을 위해 주 탑재체인 IR 카메라가 지구를 지향해야 한다. 또한 임무데이터 전송을 위한 S-Band 안테나와 텔레메트리 송수신을 위한 UHF, VHF 안테나가 IR 카메라 옆에 설치되어 지구 쪽을 바라보고 있기 때문에 지상국과의 통신을 하는 경우에도 IR 카메라는 지구를 지향한다. IR 카메라가 지구를 지향할 때 태양전지판은 천정을 향하기 때문에 항상 태양을 바라볼 수 없으며, 태양전지판에 입사되는 태양광량도 시시각각 달라진다. 이는 위성 궤도에 대해 달라지는 입사 태양광량에 따라 생산되는 전력도 달라지며, 그에 대한 전력 분석 또한 필수적으로 수행해야 한다.

Figure 18은 천정 지향 모드에서 생산되는 전력을 보여준다. 태양전지판이 항상 태양을 바라보지 못하면서 전력생산량이 지속적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 시간에 따른 전력 생산량은 그래프에서 오목한 형태를 보이며, 최대 약 20.3W, 평균 5.86W의 전력을 생산하고 있다.

Figure 19는 궤도에 따라 변하는 배터리 용량을 보여준다. 배터리 용량 그래프를 보면 태양지향

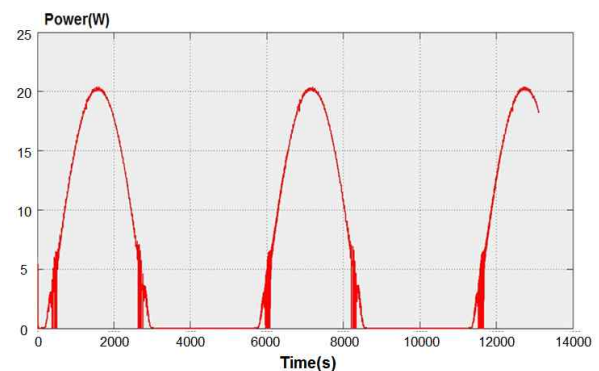


Fig. 18. Power Generation at Zenith Pointing Mode



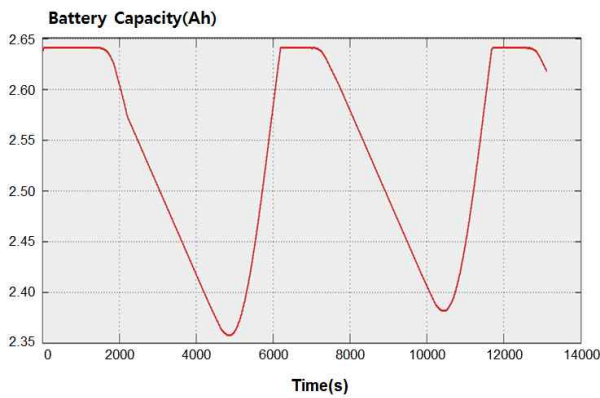


Fig. 19. Battery Capacity at Zenith Pointing Mode

모드와는 다르게 반복되는 궤도에 대해 용량이 가득 차 있는 시간이 더 짧은 것을 볼 수 있다. 이는 태양지향 모드에 비해 천정 지향 모드에서 평균 전력생산량이 더 낮기 때문에 배터리를 보다 자주 오랜 시간 사용하는 것으로 판단된다. 또한 지상국을 지나면서 송수신과 IR 카메라를 사용하는 기간 동안에는 보다 많은 배터리를 사용하는 것을 알 수 있다. 천정 지향 모드에서도 배터리 용량은 위성의 궤도 운용이 거둬지더라도 일 기간에서 사용량을 모두 충전하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 위성이 천정 지향 모드에서도 안정적으로 전력을 공급한다는 것을 알 수 있다.

그 밖에 서브시스템의 소비 전력이나 시스템 부하 변화는 태양지향 모드의 경우와 동일하다.

### III. 결 론

본 논문에서는 Simulink와 STK의 연동된 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 위성이 우주공간에서 보다 효율적인 전력 생산을 하기 위해서는 FLCMPPT가 더 유용함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 FLCMPPT는 기존에 널리 사용되는 P&O MPPT에 비해 수렴속도가 빠르고 안정적이며 보다 높은 효율을 가지고 있음을 확인하였다. 비록 MPPT 연산에 대해 FLCMPPT가 기존의 알고리즘을 이용한 MPPT에 비해 데이터 처리량이 많은 편이나 최근 프로세서와 컨트롤러의 기술수준에서는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 부가적으로 소형위성에 FLCMPPT를 적용하였을 때 충분히 안정적인 전력이 공급 되는지 여부를 검증하기 위해 EBA를 수행하였다. EBA는 크게 두 가지 모드에 대해 수행되었으며, 위성 모델로 사용된 소형위성

인 4kg급의 큐브위성 KAUSAT-5가 우주 공간에서 안정적인 전력을 공급받으며 운용될 수 있음을 확인하였다.

STK에서는 위성 태양전지판의 온도를 추정할 수 없어, 보다 정확한 FLCMPPT 시뮬레이션과 성능검증을 위한 EBA를 수행하기 위해 별도의 프로그램(IDEAS)을 이용하여 온도 데이터를 획득해야하는 한계가 있다. 하지만 이를 감안하더라도 본 분석은 기존에 분리되어 수행되었던 시뮬레이션을 하나로 통합하여 기존의 분석 방법에 비해 시뮬레이션에 드는 시간을 현저히 줄여줄 수 있었으며, 이를 통해 EBA를 통한 MPPT 검증은 보다 효율적인 분석 방법을 제공할 수 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 항공우주연구원의 “2012년 큐브위성 경연대회” 프로그램의 일환으로 진행된 결과로 항공우주연구원의 지원에 감사드립니다.

### References

- 1) H.E.A. Ibrahim and M. Ibrahim, "Comparison Between Fuzzy and P&O Control for MPPT for Photovoltaic System Using Boost Converter," *Journal of Energy Technologies and Policy*, Vol. 2, No. 6, 2012, pp.1~11.
- 2) M.S. Ait Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras, "Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, No. 3, 2007, pp.387~395.
- 3) A. Panda, M.K. Pathak and S.P. Srivastava, "Fuzzy Intelligent Controller for the Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic Module at Varying Atmospheric Conditions," *Journal of Energy Technologies and Policy*, Vol. 1.1, No. 2, 2012, pp.18~27.
- 4) T. Senjyu and K. Uezato, "Maximum Power Point Tracker Using Fuzzy Control for Photovoltaic Arrays", Faculty of Engineering of University of the Ryukyus, 1994.
- 5) N. Diaz, J. Hereandez and O. Duarte, "Fuzzy Maximum Power Point Tracking Techniques Applied to a Grid-Connected Photovoltaic System", Universidad Nacional,

2011.

6) M. Taherbaneh and M.B. Menhaj, "A Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker for Body Mounted Solar Panels in LEO Satellites", Amirkabir University of Technology,

2007.

7) P. Bansal, "Matlab\_Simulink Based -analysis of Photovoltaic Array Fed Multilevel Boost Converter", *Innovative Systems Design and Engineering*, Vol.4, No.7, 2013, pp.20~27.