

# 배터리 온도를 고려한 하이브리드 전력시스템의 퍼지 논리 제어 기법 연구

김 남 규\*, 김 명 진<sup>o</sup>

## A Study on Fuzzy Logic Control Approach of a Hybrid Power System Considering Battery Temperature

Namgyu Kim\*, Myungchin Kim<sup>o</sup>

요 약

본 논문은 태양광/배터리 전력 시스템에 사용되는 태양광 발전기의 출력을 유연하게 제어할 수 가변출력제어기법을 퍼지논리제어기로 구현한 결과를 소개한다. 시스템 신뢰성의 향상을 위하여 제안된 기법에서는 가용할 수 있는 태양광 발전출력 정보와 배터리 전류정보의 적용을 고려하였다. 데이터 센터와 기지국과 같은 ICT 주요 시설의 경우, 정전 시에도 지속 가능한 운영을 위해 신재생 발전 전원과 배터리가 통합된 하이브리드 전력시스템을 구성하는 것이 일반적이다. 그러나 고장으로 인한 시스템 중단 및 유지보수 비용 증가를 피하기 위해 배터리의 수명 특성을 고려할 필요가 있다. 이에 배터리 노화 요인 중 하나인 배터리 온도를 고려할 필요가 있다. 배터리 온도를 줄이기 위한 배터리 전류 제한을 목적으로 배터리가 전원 버스에 직접 연결된 형상의 하이브리드 전력시스템에 대해 배터리 충전 상태에 따른 제어 방안을 제시한다.

**Key Words** : Hybrid power system(HPS), Energy storage system(ESS), Flexible power point tracking(FPPT), Maximum power point tracking(MPPT), Fuzzy logic controller(FLC)

ABSTRACT

This paper introduces a fuzzy control law that realizes flexible power control for photovoltaic (PV) sources in PV/battery hybrid power systems. In order to improve reliability, the proposed approach utilized information of the available PV output and the battery current. In the case of ICT facilities such as data centers and base stations, it is common to construct a hybrid power system using a renewable power generation source and ESS for sustainable operation. However, it is necessary to consider the lifetime characteristics of the battery in order to avoid system interruption due to failure and increase in maintenance cost. Considering that battery aging is highly affected by temperature, it is necessary to consider battery temperature during system design. In order to limit the battery temperature rise, a control method according to the battery charge/discharge status is proposed for a hybrid power system in which the battery is directly connected to the main bus.

\* 이 성과는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2020R1C1C1011572)

\* 이 성과는 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A6A1A12047945)

• First Author : Chungbuk National University, School of Electrical Engineering, imtng@chungbuk.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Chungbuk National University, School of Electrical Engineering, mckim@chungbuk.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202101-001-B-RE, Received December 31, 2020; Revised February 15, 2021; Accepted February 22, 2021

## 1. 서론

빅 데이터 및 통신 기술의 발전으로 인해 데이터 센터와 기지국과 같은 ICT 주요 시설들은 증가하는 추세이다. 이러한 시설들은 정전 시에도 시스템이 중단되지 않고 지속적으로 운영이 될 수 있도록 하는 전력 시스템의 설계가 필요하다. 신재생 에너지원이 주요 전력원으로 활용되는 경우에는 안정적인 전력공급을 위해서 에너지 저장 시스템 (Energy Storage System: ESS)이 결합된 하이브리드 전력 시스템 (Hybrid Power System: HPS)의 운영을 고려하는 것이 일반적이다. ICT 인프라의 지속적인 운영을 위해서는 높은 신뢰성을 가진 HPS가 요구되며 다양한 토폴로지 및 제어 방안들이 제시된다<sup>1-4</sup>.

ESS 구성은 리튬이온 배터리를 기반으로 하여 에너지 밀도 향상을 목적으로 연료전지를 추가 구성하거나 혹은 전력변환장치를 이용하여 각 전원들의 전력 관리 전략(Power Management Strategy)를 목적으로 제어하는 방안들이 연구되어 왔다. 전력변환장치를 이용하여 배터리를 전력시스템에 연결하는 경우에는 전력변환장치의 추가 설치 및 스위칭 소자의 고장 발생으로 인하여 전력시스템의 운영비용 상승과 신뢰성 저하와 같은 문제를 야기할 수 있다<sup>5</sup>. 이로 인해 전력변환장치를 제거하고 배터리를 직접 전원버스(Main bus)를 연결하는 수동식 연결형상(Passive Configuration)을 가진 HPS가 연구되어 왔다<sup>5-7</sup>. 수동식 HPS의 경우에는 시스템 버스 전압은 배터리의 전압 값에 의해 결정되며, 해당 전압 값은 배터리의 SOC (State of Charge) 값에 따라 변동된다. 배터리의 전력소비량을 감소하기 위한 목적으로 연료전지를 함께 구성하는 전력시스템의 경우, 연료전지의 전압범위를 배터리의 전원버스 전압 범위와 동일하게 유지하기 위해 가스 압력을 제어하거나<sup>6</sup> 혹은 연료전지에 전력변환장치를 추가함으로써 배터리 SOC 및 부하 전력에 따른 제어 방안이 연구되어 왔다<sup>5</sup>. 그러나 연료전지와 같은 에너지 저장매체의 추가적인 연결은 시스템의 복잡성 증가 및 연료전지의 효율을 감소시킬 수 있다는 단점이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 신뢰성 향상, 운영비용 감소 및 간단한 구성을 목적으로 Fig 1과 같이 태양광 발전 시스템과 함께 배터리를 전원버스에 직접 연결하여 HPS를 구성한다<sup>7</sup>.

한편, HPS 신뢰성을 고려하기 위해 ESS의 리튬이온 배터리 수명 특성을 분석해야 한다. 배터리의 수명 특성은 높은 방전심도(Depth of discharge: DOD) 및 배터리 운영 온도에 의해 저하된다<sup>3,9-11</sup>. 이러한 요인

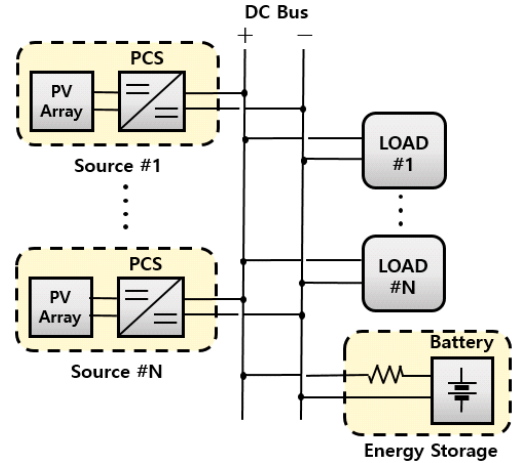


그림 1. PV-Battery HPS 구성  
Fig. 1. PV-Battery HPS configuration

들 중에서 배터리 온도를 낮추기 위해서는 배터리 전류를 제한해야 한다. 그러나 전원버스에 직접 연결한 배터리의 경우, 배터리 전류를 제어하기 위해서는 태양광 발전 시스템의 출력을 최대 출력지점에서 유지하는 것이 아닌 출력을 제한하기 위한 별도의 제어가 필요하다<sup>7</sup>. 이에 본 연구에서는 일사양에 따른 최대 PV(Photovoltaic) 출력과 배터리 전류 크기에 따라 유연하게 PV 출력을 제어할 수 있도록 FPPT(Flexible power point tracking)와 퍼지 논리 제어기(Fuzzy logic controller: FLC)를 이용한 PV 출력 제어 방안을 제시한다.

FPPT는 계통 연계형 PV 시스템이 급격한 부하 변동에도 전력품질을 유지할 수 있도록 충분한 예비력을 갖추기 위해 출력을 제한하는 제어 기법 중 하나이다<sup>12</sup>. PV 시스템의 경우에는 최대의 출력을 얻기 위해서 MPPT 모드로 동작하는 것이 일반적이다. 하지만, 본 연구에서는 FPPT 기법을 적용하여 배터리의 충전 시 발생할 수 있는 온도상승을 억제하였으며, 이를 통하여 배터리의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다. 그러나 적절한 예비 출력을 선정하지 않은 경우에는 FPPT 제어를 할 수 없게 되거나 PV 출력이 크게 변동될 수 있다. 이를 방지하기 위해 입출력에 대한 제어 규칙들을 만들어 인간의 추론 능력을 근사화한 시스템 분석 기법 중 하나인 퍼지 논리 제어기를 이용하여 상황에 따른 예비 출력을 산정하도록 한다<sup>13</sup>. 입력 데이터로는 가용할 수 있는 최대 PV 출력과 배터리 전류 크기로 선정하였으며, 사용자가 원하는 조건에 따라 퍼지 규칙 기반 행렬을 설정함으로써 적절한 예비 출력을 산정할 수 있다.

## II. 본 론

### 2.1 하이브리드 전력시스템 구성

태양광 발전 시스템은 출력이 기상 변동에 큰 영향을 받으므로 안정적인 전력 균형을 위해서 ESS를 연계하여 HPS를 구성하는 것이 일반적이다. 이러한 시스템의 구성은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. ESS의 경우, 배터리의 전류의 원활한 제어 및 DC 버스 전압을 일정하게 유지하기 위해 전력변환장치를 함께 구성하는 것이 일반적이다. 그러나 스위칭 소자는 컨버터 동작 시 발생하는 도통 손실과 스위칭 손실로 인해 전체 시스템의 고장률의 큰 부분을 차지하고, 이는 전체 신뢰성 저하의 주원인이 된다. 이러한 문제점으로 인해 Fig 1과 같이 배터리를 DC 버스에 직접 연결하는 시스템을 고려할 수 있다. 그러나 배터리가 별도의 전력변환장치 없이 직접 시스템에 연결되는 경우에는 필요이상의 충전전류가 흐를 수 있다. 배터리 전류의 크기가 증가할수록 배터리의 내부 저항에 의한 열 손실이 증가하며 배터리 온도 상승으로 이어진다. 즉, 높은 배터리 전류는 배터리 수명 저하의 원인이 될 수 있다. 이에 전체 시스템의 유지보수 비용을 저감하기 위해 배터리 충전 전류에 따른 태양광 발전 시스템의 출력 제어 방안을 연구할 필요가 있다.

### 2.2 HPS 제어 방안

배터리 전류 크기의 최소화를 목표로 태양광 발전 시스템을 제어하기 위해서는 배터리의 충·방전 상태를 고려해야 한다. 배터리 전류는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_B = (P_{PV} - P_{Load}) / V_B \quad (1)$$

여기서,  $I_B$ 은 배터리 전류,  $P_{PV}$ 은 PV 출력,  $P_{Load}$ 은 부하 출력 그리고  $V_B$ 은 배터리 전압이다.  $P_{Load}$ 가  $P_{PV}$ 보다 큰 경우,  $I_B$ 은 음수가 되고 배터리 방전 상태가 된다. 이 때 방전 전류의 크기는  $P_{PV}$ 가 높을수록 감소한다. 즉, 배터리가 방전 상태인 경우에는 PV 시스템 제어할 때 최대 PV 출력을 만드는 MPPT 제어가 적합하다. 이에 반해  $P_{PV}$ 가  $P_{Load}$ 보다 큰 경우,  $I_B$ 는 양수가 되고 배터리 충전 상태가 된다. 이 때 배터리 충전 전류의 크기는  $P_{PV}$ 가 낮을수록 감소하고, PV 시스템은 최대 출력으로부터 예비 출력만큼 PV 출력을 제한하는 FPPT 제어가 적합하다. PV 출력 제한 값은 식 (2)와 같다.

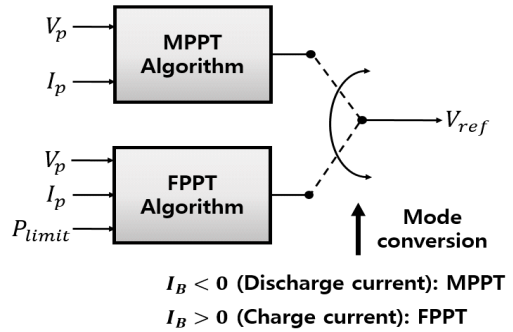


그림 2. HPS 제어 블록 다이어그램  
Fig. 2. HPS control block diagram

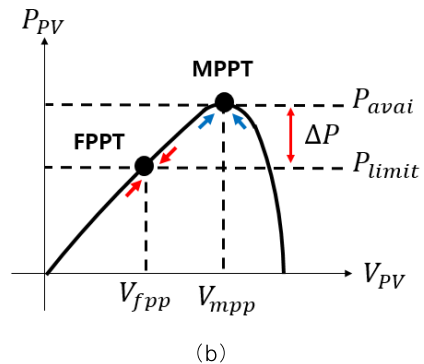
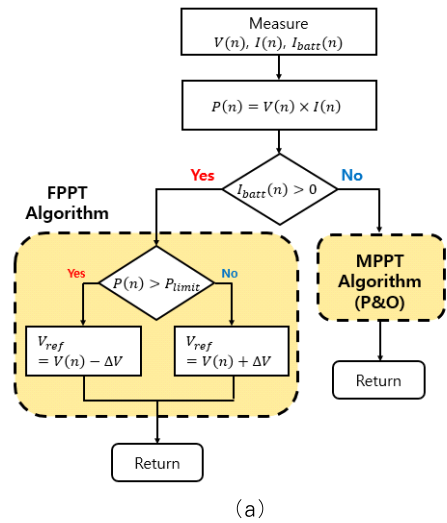


그림 3. HPS 제어 알고리즘 및 P-V 곡선 (a) 알고리즘 (b) P-V 곡선  
Fig. 3. HPS control algorithm and P-V curve  
(a) Algorithm (b) P-V curve

$$P_{limit} = P_{avai} - \Delta P \quad (2)$$

여기서,  $P_{limit}$ 는 출력 제한 값,  $P_{avai}$ 는 가용할 수

있는 최대 출력 그리고  $\Delta P$ 는 예비 출력이다. 최종적인 HPS 제어 블록 다이어그램은 Fig 2에서 확인할 수 있고 이를 구현하기 위한 알고리즘 및 P-V 곡선은 Fig 3과 같다.  $\Delta P$ 가 증가할수록  $P_{limit}$ 은 감소하여 PV 출력과 배터리의 충전 전류는 낮아진다. 그러나 배터리 전류 크기가 0 부근에 있을 때 MPPT와 FPPT 모드가 수시로 전환되면서 PV 출력이 크게 변동될 수 있다. 또한,  $\Delta P$ 가  $P_{avail}$ 보다 커지는 경우에는  $P_{limit}$ 은 음수가 되어 더 이상 FPPT 제어를 할 수 없게 된다. 이에 따라 배터리 전류와 가용할 수 있는 PV 출력을 고려하여 적절한 예비력을 선정할 필요가 있다.

2.3 퍼지 논리 제어기 설계

배터리 충전전류와 가용할 수 있는 PV 출력을 고려한 예비 출력을 선정하기 위해 퍼지 논리 제어기 (FLC)를 제시한다. 제어기 구성은 Fig 4와 같고 이를 구현하기 위해 먼저 입출력에 대한 소속 함수를 설정해야 한다. 본 논문에서 퍼지화기(Fuzzifier)을 구현하기 위한 소속 함수는 배터리의 충전 전류가 2.5[A]를 넘지 않도록 하며, 태양광 발전 시스템의 최대 출력이 2[kW]이라는 가정 하에 Fig 5 (a), (b)와 같이 설정하였다. 그리고 비 퍼지화기(Defuzzifier)를 구현하기 위한 소속 함수는 예비 출력이 0~500[W]에서 선정될 수 있도록 Fig 5 (c)와 같이 설정하였다. 두 입력은 퍼지화를 거쳐 퍼지 규칙에 따라 퍼지 출력이 나오고 비 퍼지화를 통해 최종적으로 예비 출력이 산정한다. 이 때 퍼지 규칙은 아래의 조건을 만족하도록 설정하였으며, 퍼지 규칙 기반 행렬은 Table 1에서 확인할 수 있다.

- (1) 충전전류가 높은 경우, 예비출력을 높인다.
- (2) 충전전류가 낮은 경우, 예비출력을 낮춘다.
- (3) 가용할 수 있는 PV 출력이 낮은 경우, 예비출력을 낮춘다.

FLC을 통해 산정된 예비출력은 식 (2)의 PV 출력 제한 값을 구할 수 있고, 이는 FPPT 제어에 적용된다. PV 출력이 높아지거나 부하출력이 낮아지면 배터리 충전전류는 증가하여 퍼지 규칙에 따라 예비출력이 증가한다. 즉, PV 출력이 낮아지고 최종적으로 배터리의 충전전류 줄일 수 있다. 그리고 충전전류가 매우 낮은 경우에는 예비출력을 낮춤으로써 PV 시스템 제어 시 MPPT와 FPPT 모드가 수시로 전환하는 상황에 대해서도 PV 출력 변동을 줄일 수 있다. 또한, 일사량이 낮아 가용할 수 있는 PV 출력이 낮은 경우, 예비출

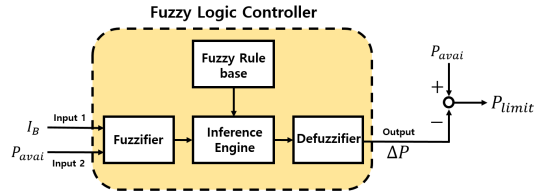


그림 4. FLC 블록 다이어그램  
Fig. 4. Fuzzy logic controller block diagram

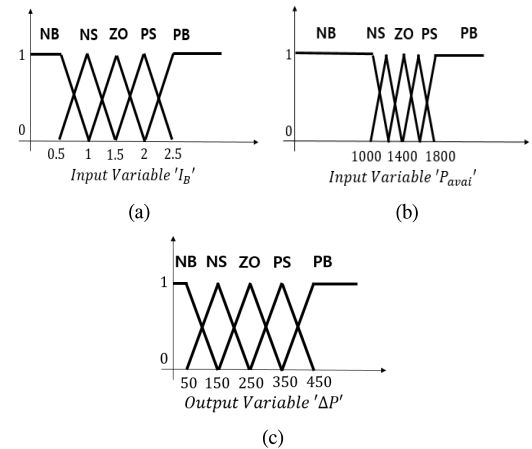


그림 5. 입출력에 대한 소속 함수 (a) 배터리 충전 전류 (b) 가용할 수 있는 PV 전력 (c) 예비출력  
Fig. 5. Membership function for inputs / output (a) Battery charge current (b) Available PV power (c) Reserve power

표 1. 퍼지 규칙 기반 행렬  
Table 1. Fuzzy rule base matrix

		PV Available Power ( $P_{avail}$ )				
		NB	NS	ZO	PS	PB
Battery current ( $I_B$ )	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	NS	NB	NB	NS	NS	ZZ
	ZO	NB	ZZ	PS	PS	PS
	PS	NB	PS	PS	PB	PB
	PB	NB	PB	PB	PB	PB

력을 낮춤으로써 PV 출력 값이 음수가 되어 FPPT 제어가 되지 않는 상황을 방지할 수 있다. 즉, FLC를 통해 전력 시스템 운영 시 발생할 수 있는 상황들에 대해서 배터리 전류 크기와 가용할 수 있는 PV 최대 출력을 고려하여 유연하게 PV 출력을 제어할 수 있다.

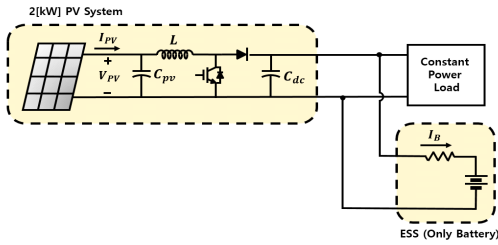


그림 6. 시뮬레이션을 위한 회로도 구성  
Fig. 6. Circuit configuration for simulation

2.4 시뮬레이션 결과

제안 기법의 성능을 확인하기 위해 PSIM을 이용하여 전체 회로도는 Fig 6과 같이 구성하였다. 2[kW] 단일 PV 시스템과 전원 버스에 직접 연결된 배터리를 이용하여 HPS을 구성하였고, 부하는 정 출력 부하를 고려하였다. 여기서 사용한 PV 모듈 파라미터는 Table 2에서 확인할 수 있으며<sup>[14]</sup>, 배터리는 Table 3과 같은 특성을 가지는 배터리 셀이 직렬로 100개 연결된 배터리라고 가정한다<sup>[15]</sup>. 이 때, 전원 버스 전압은 배터리의 전압 값에 의해 결정되며 그 크기는 시스템에서 요구하는 DC 전압 범위에 포함된다고 가정하였다.

본 연구에서 제안한 제어기법의 기능을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과는 Fig 7-10에 제시되어 있다. 일반적인 MPPT 기법과의 차이를 분석하기 위하여 동일한 조건에 대해서 MPPT 제어를 한 경우의 결과도 제시되어 있다. 배터리가 방전되는 경우 (배터리 전류가 0보다 작은 경우)에는 제안한 기법과 MPPT 기법 모두 PV 출력과 배터리 전류가 동일함을 확인할 수 있다. Fig 7과 10의 경우, 일사량 증가 및 부하가 감소함에 따라 배터리 전류는 점점 증가하여 0을 넘어가는 순간 배터리는 충전 상태가 되고, PV 시스템은 MPPT 제어에서 FPPT 제어로 전환되는 것을 확인할 수 있다.

표 2. PV 모듈 파라미터  
Table 2. PV Module parameters

$P_{MPP}$ [W]	200
$V_{OC}$ [V]	33
$I_{SC}$ [A]	8.19
$V_{MPP}$ [V]	26.7
$I_{MPP}$ [A]	7.49
Parallel strings	5
Series-connected modules	2

표 3. 배터리 셀 파라미터  
Table 3. Battery cell parameters

Cell Capacity [Ah]	2.5
Voltage (nominal) [V]	3.3
Internal Impedance [ $m\Omega$ ]	6
Recommended Standard Charge Method	2.5 A to 3.6 V CCCV for 60 min
Surface Area of Heat Exchange $S_{area}$ [ $m^2$ ]	0.0149
Cell Weight $m$ [g]	76
Specific Heat Capacity of the Cell $C_p$ [J/kg/K]	810.53
Convective Heat Transfer Coefficient $h_{conv}$ [ $W/m^2/K$ ]	5

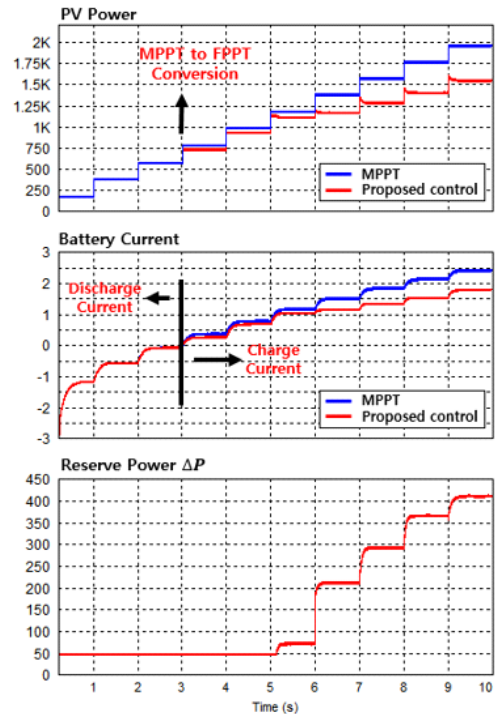


그림 7. 일사량 증가에 따른 시뮬레이션 결과  
Fig. 7. Simulation results according to the increase in solar radiation

PV 출력과 부하 출력 간의 차이가 증가할수록 배터리 충전 전류가 증가하는데, 이 때 FLC를 통해 예

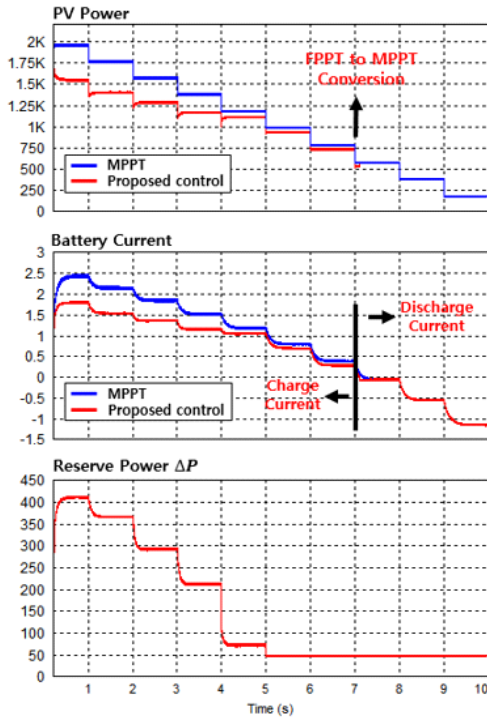


그림 8. 일사량 감소에 따른 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation results according to the decrease in solar radiation

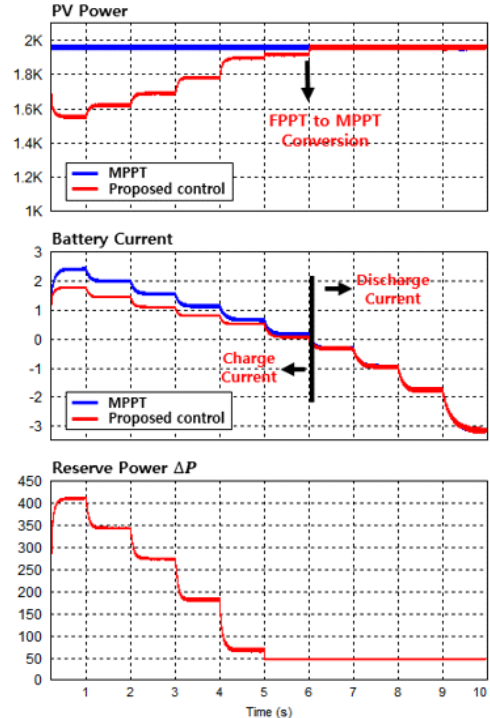


그림 9. 부하량 증가에 따른 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation results according to load increase

비 출력  $\Delta P$  가 증가하면서 PV 출력을 낮출 수 있고, 이에 따라 배터리 충전 전류 또한 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 Fig 8과 10의 경우, 일사량 감소 및 부하가 증가함에 따라 배터리 전류는 점점 낮아지며 0보다 낮아지는 순간 배터리는 방전 상태가 되고, PV 시스템은 FPPT 제어에서 MPPT 제어로 전환되는 것을 확인할 수 있다. PV 출력과 부하 출력 간의 차이가 감소함에 따라 FLC를 통해 예비 출력  $\Delta P$  가 감소하며, PV 시스템의 제어 모드 변환 시 큰 리플 없이 MPPT 제어 방안으로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 4가지 경우에 대해서 제안한 기법을 적용한 결과는 MPPT 제어만을 하는 경우보다 배터리 전류가 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 가용할 수 있는 최대 PV 출력과 배터리 충전전류 크기에 따라 FLC를 통해 예비 출력  $\Delta P$ 를 제어할 수 있었다.

일사량 및 부하 변동에 따른 배터리 수명 특성을 분석하기 위해서 Fig 7, 9의 배터리 전류 데이터와 Table 2의 배터리 셀 파라미터를 통해 배터리 온도를 추정한다. 배터리 온도 추정 값은 식 (3)을 통해 구할 수 있다<sup>[15]</sup>.

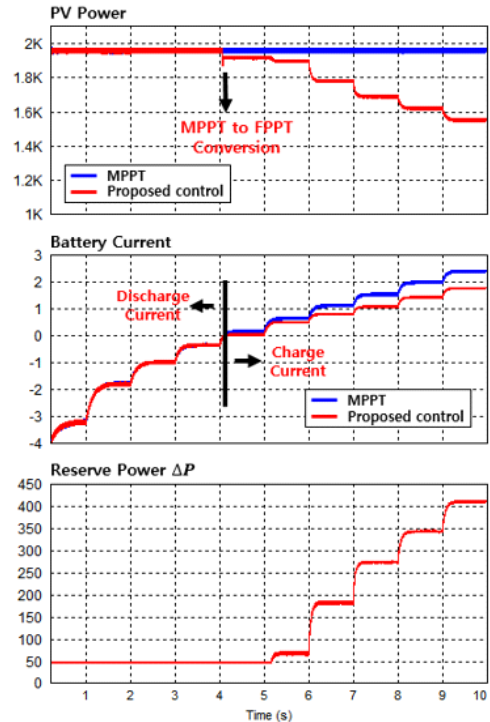


그림 10. 부하량 감소에 따른 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. Simulation results according to load decrease

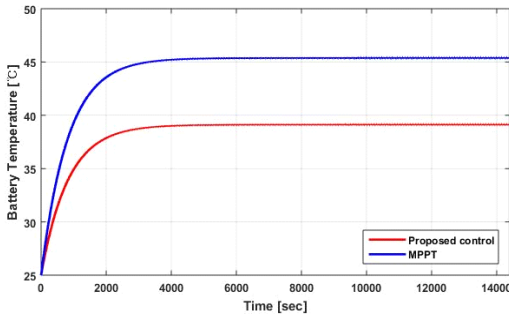


그림 11. 일사량 증가에 따른 배터리 온도 추정 결과  
 Fig. 11. Battery temperature estimation result according to the increase in solar radiation

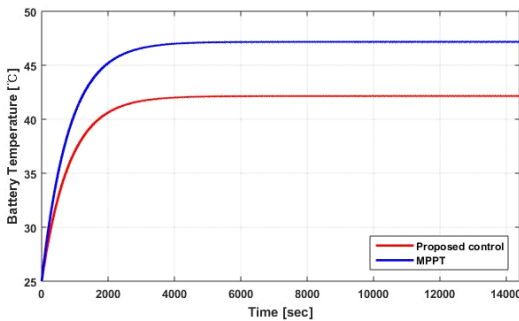


그림 12. 부하량 증가에 따른 배터리 온도 추정 결과  
 Fig. 12. Battery temperature estimation result according to load increase

$$C_p m \frac{dT_{batt}}{dt} = I^2 R - S_{area} h_{conv} (T_{batt} - T_{amb}) \quad (3)$$

여기서,  $C_p$ 은 열용량,  $m$ 은 질량,  $T_{batt}$ 은 배터리 온도,  $Q$ 은 내부 저항에 의한 손실,  $S_{area}$ 은 면적,  $h_{conv}$ 은 열전도 상수,  $T_{amb}$ 은 주변 온도,  $I$ 은 배터리 전류 그리고  $R$ 은 배터리 내부 저항이다. 식 (3)을 통해 10초간의 배터리 전류 데이터를 기반으로 4시간동안 반복하여 구한 배터리 온도 추정 결과는 Fig 11-12에서 확인할 수 있다. PV 시스템이 MPPT 제어만을 적용한 경우와 비교했을 때, 제안한 기법을 적용함으로써 배터리 충전전류는 낮아지고 배터리의 손실이 줄어들면서 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 배터리 수명 저하 요인 중 하나인 배터리 온도를 낮춤으로써 배터리 수명 특성을 향상시킬 수 있고, 이에 장시간 정전 시에도 ICT 주요 시설이 지속적으로 운용하기 위한 신뢰성이 높은 전력 시스템을 설계할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 퍼지 논리 제어기와 FPPT를 이용한 PV 출력 제어 방안을 제시한다. 부하 출력이 PV 출력보다 큰 경우에는 배터리는 방전상태가 되고, PV 출력이 부하 출력보다 큰 경우에는 배터리는 충전상태가 된다. 배터리 수명 특성을 고려할 경우, 배터리가 방전 상태일 때 PV 출력이 높을수록 방전 전류는 감소하므로 PV 시스템은 MPPT 제어하는 것이 유리하며 배터리가 충전상태일 때는 PV 출력이 낮을수록 충전 전류가 감소하므로 PV 시스템은 PV 출력을 제한하는 FPPT 제어하는 것이 유리하다. 한편, FPPT 제어에 쓰이는 PV 출력 제한 값을 결정하기 위해 예비력을 산정해야 한다. 이는 배터리 충전 전류와 가용할 수 있는 최대 PV 출력을 고려하여 퍼지 논리 제어를 통해 결정할 수 있다.

제안한 기법을 적용한 결과, MPPT 제어만 한 경우에 비해 배터리 충전전류 및 배터리 온도가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 최종적으로 배터리 수명 저하의 요인 중 하나인 배터리 온도를 감소시킴으로써 전체 시스템의 신뢰성 향상 및 유지보수 비용 절감을 기대할 수 있다.

### References

- [1] R. Arno, A. Friedl, P. Gross, and R. J. Schuerger, "Reliability of data centers by tier classification," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 777-783, Mar./Apr. 2012.
- [2] T. Dragicevic, J. Vasquez, J. Guerrero, and D. Skrllec, "Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids," *IEEE Electrification Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 54-65, Mar. 2014.
- [3] K. Puczko, "Optimal design of renewable hybrid power supply systems," in *Proc. IEEE INTELEC 2011*, Oct. 2011.
- [4] M. H. Alsharif and J. Kim, "Optimal solar power system for remote telecommunication base stations: A case study based on the characteristics of South Korea's solar radiation exposure," *Substantiality*, vol. 8, no. 942, Sep. 2016.
- [5] B. Lee, S. Kwon, P. Park, and K. Kim, "Active power management system for an

- unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries,” *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, vol. 50, no. 4, pp. 3167-3176, Oct. 2014.
- [6] J. Bernard, M. Hofer, U. Hannelsen, A. Toth, A. Tsukada, F. Buchi, et al., “Fuel cell/battery passive hybrid power source for electric powertrains,” *J. Power Sources*, vol. 196, pp. 5867-5872, Mar. 2011.
- [7] M. C. Kim and S. W. Bae, “Decentralized control of a scalable photovoltaic (PV)-battery hybrid power system,” *Applied Energy*, vol. 188, pp. 444-455, Dec. 2017.
- [8] F. Chan and H. Calleja, “Reliability estimation of three single-phase topologies in grid-connected PV systems,” in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 7, pp. 2683-2689, Jul. 2011.
- [9] Y. Kwon, A. Kwasinski, and A. Kwasinski, “Coordinated energy management in resilient microgrids for wireless communication networks,” *IEEE J. Emerging and Sel. Topics in Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 1158-1173, Dec. 2016.
- [10] H. J. Khasawneh and M. S. Illindala, “Battery cycle life balancing in a microgrid through flexible distribution of energy and storage resources,” *J. Power Sources*, vol. 261, pp. 378-388, Feb. 2014.
- [11] C. Zhang, K. Li, and J. Deng, “Real-time estimation of battery internal temperature based on a simplified thermoelectric model,” *J. Power Sources*, vol. 302, pp. 146-154, Oct. 2016.
- [12] Y. Yang, K. A. Kim, F. Blaabjerg, and A. Sangwongwanich, “*Advances in grid-connected photovoltaic power conversion systems*,” Woodhead Publishing, pp. 153-183, 2018.
- [13] H. M. Lee, J. H. Lee, S. G. Jeon, and J. E. Kim, “Comparison of fuzzy logic controller and P&O MPPT,” *The 51th KIEE Summer Conf.*, pp. 915-916, Busan, Korea, Jul. 2020.
- [14] POSHARP, “*SF190-27-M200 solar panel from Hanwha SolarOne*” from [http://www.posharp.com/sf190-27-m200-solar-panel-from-hanwha-solarone\\_p518608011d.aspx](http://www.posharp.com/sf190-27-m200-solar-panel-from-hanwha-solarone_p518608011d.aspx)
- [15] Z. Gao, C. S. Chin, W. L. Woo, and J. Jia, “Integrated equivalent circuit and thermal model for simulation of temperature-dependent LiFePO<sub>4</sub> battery in actual embedded application,” *Energies*, vol. 10, no. 1, Jan. 2017.

김 남 규 (Namgyu Kim)



2020년 2월 : 충북대학교 전기공학부 학사 졸업  
 2020년 3월~현재 : 충북대학교 전기공학부 석사과정  
 <관심분야> 전기공학, 전력네트워크, 전력관리 시스템  
 [ORCID:0000-0002-9598-545X]

김 명 진 (Myungchin Kim)



2004년 2월 : 한양대학교 전자전기공학부 학사 졸업  
 2006년 2월 : 한양대학교 전기공학과 석사 졸업  
 2015년 8월 : The University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학부 박사 졸업  
 2006년 1월~2017년 2월 : 국방과학연구소 연구원  
 2017년 3월~현재 : 충북대학교 전기공학부 교수  
 <관심분야> 전력설비, 전력계통, 자산관리 시스템