

태양광-배터리 하이브리드 전원시스템의 에너지 효율개선을 위한 규칙기반 협조제어 원리

Rule-based Coordination Algorithms for Improving Energy Efficiency of PV-Battery Hybrid System

유철희* · 정일엽[†] · 홍성수** · 장병준**
(Cheol-Hee Yoo · Il-Yop Chung · Sung-Soo Hong · Byung-Jun Jang)

Abstract - This paper presents effective design schemes for a photovoltaic (PV) and battery hybrid system that includes state-of-the-art technologies such as maximum power point tracking scheme for PV arrays, an effective charging/discharging circuit for batteries, and grid-interfacing power inverters. Compared to commonly-used PV systems, the proposed configuration has more flexibility and autonomy in controlling individual components of the PV-battery hybrid system. This paper also proposes an intelligent coordination scheme for the components of the PV-battery hybrid system to improve the efficiency of renewable energy resources and peak-load management. The proposed algorithm is based on a rule-based expert system that has excellent capability to optimize multi-objective functions. The proposed configuration and algorithms are investigated via switching-level simulation studies of the PV-battery hybrid system.

Key Words : PV PCS, BESS, Grid-connected, Rule-based, Coordination algorithms

1. 서론

최근 환경오염에 의한 이상기후 및 화석연료 고갈 등의 에너지 문제가 화두로 떠오르는 가운데, 이에 대한 해결책으로 태양광 발전, 풍력 발전 등과 같은 신재생 에너지를 이용한 발전시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 미국, 유럽, 일본 등의 선진국들에서는 각 국가에 맞는 신재생 에너지를 기반으로 여러 연구들이 진행 중이며 국내에서도 신재생 에너지를 이용한 발전시스템의 연구개발이 활발히 진행 중이다. 이러한 연구개발의 결실로 현재는 제주도의 풍력 발전단지, 전남 신안의 태양광 발전단지 등 신재생 에너지를 이용한 다수의 발전단지가 운영 중이며, 가까운 미래에는 신재생 발전시스템 및 분산전원과 부하로 이루어진 마이크로그리드(Microgrid) 기술이 적용되어 발전 전력 및 에너지원의 이용이 효율적으로 이루어질 전망이다 [1-5].

일반적으로 이러한 신재생 발전시스템은 전력계통에서 직접 전력을 공급받기 어려운 도서지역 및 산간벽지와 같은 곳에 적용되는 독립형 방식과 계통과 직접 연결되어 신재생 발전시스템에서 생산된 전력을 사고 팔수 있는 구조인 계통 연계형으로 구분된다. 또한 신재생 발전시스템은 기후, 지역

등의 외부 조건에 의해 발전량이 일정하지 않고 변화가 크게 발생하기 때문에 대규모의 신재생 에너지원이 전력계통에 연결될 경우 전압, 주파수의 변동 및 안정도가 저하될 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 일반적으로 에너지 저장장치인 2차 전지 또는 슈퍼 커패시터 등을 연결하여 신재생 에너지 전원의 발전량 변화를 보상하는 기술이 필요하다. 또한 에너지 저장장치에 저장된 에너지는 전력수요가 크게 증가하는 피크 부하 시간 때에 일정 전력을 부담할 수 있어 효율적인 전력 이용을 가능하게 한다 [4-5].

현재 국민대학교의 에너지-IT 센터에서는 신재생 에너지를 이용한 마이크로그리드 연구의 일환으로 태양광 전원과 에너지 저장장치를 갖는 태양광-배터리 전원시스템을 구축하여 관련 연구를 진행하고 있다. 설치된 태양광-배터리 전원시스템은 그림 1과 그림 2와 같이 태양광 어레이, 태양광 전원 연계용 DC/DC 전력변환기, 계통연계용 전력변환기, AC 부하용 DC/AC 인버터 그리고 배터리로 이루어져 있으며 태양광 어레이를 제외한 4개의 장치들은 30V의 직류 버스(DC Bus)에 서로 연결되어 있다. 태양광 어레이의 정격 출력은 1kW이며, 배터리는 정격전압 12V, 정격용량 100Ah의 납축전지 2개가 직렬로 연결된 형태로 구성된다. 본 논문에서는 이러한 태양광-배터리 전원시스템의 효율적인 운영기법에 대해 제안한다. 특히 제안하는 운영기법은 태양광 전원의 최대전력점 추종(MPPT: Maximum Power Point Tracking), 계통연계용 전력변환기의 양방향 전력제어, 배터리의 효율적인 충방전을 가능하게 한다. 또한 발전 전력의 효율적 이용 및 배터리의 자율적인 충방전 제어를 이용하여 전체 시스템의 효율을 높이기 위해 규칙기반 전문가 시스템을 이용한 협조제어 알고리즘을 제안한다. 이러한 개선사항 및 제안된 협조제어 알고리즘을 검증하기 위하여 MATLAB/

[†] Corresponding Author: College Electrical Engineering & Computer Science, Kookmin University

E-mail : chung@kookmin.ac.kr

* College Electrical Engineering & Computer Science, Kookmin University

** College Electrical Engineering & Computer Science, Kookmin University

Received : July 16, 2012; Accepted : November 23, 2012

Simulink을 사용하여 태양광 어레이, 배터리 및 전력변환기들의 실제 값들을 기반으로 상세 모델링 한다. 그리고 태양광 전원시스템의 실제 동작과 거의 유사하게 동작하도록 시간대별로 일사량 및 부하량을 변화도록 하여 동작 검증의 정확성을 높인다.



그림 1 태양광-배터리 전원시스템
Fig. 1 PV-Battery Hybrid System Hardware

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 개선된 태양광-배터리 전원시스템 구성 및 태양광 발전시스템, 배터리 충방전장치, 계통연계형 인버터의 Simulink 상세모델에 대해서 설명하며 3장에서는 제안된 규칙기반 전문가 시스템 협조제어 알고리즘에 대하여 자세히 설명한다. 4장에서는 계통연계 동작 시 부하 및 일사량의 변화에 따른 태양광 발전시스템 모델의 모의실험 결과를 제시하며 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 태양광-배터리 전원시스템의 구조 및 모델링

2.1 기존의 태양광-배터리 전원시스템

그림 1과 그림 2는 현재 국민대 에너지-IT 센터에 설치되어 있는 태양광-배터리 전원시스템 장비 및 구성도를 보여준다. 정격 1kW 태양광 어레이가 실외에 설치되었고 128V_{dc}의 전기를 생산하여 연구실 내의 태양광 전력변환기로 전달한다. 태양광 전력변환기는 벅(Buck) 컨버터 형태의 DC/DC 컨버터로 직류버스(DC Bus)에 에너지를 공급한다. 이때 DC/DC 컨버터는 태양광 어레이 측의 전압을 일정하게 제어하는 기능을 수행한다. 배터리는 별도의 전력변환장치 없이 태양광의 발전 전력 및 부하의 소모 전력에 따라 수동적으로 전력을 충/방전한다. 계통연계 전력변환기는 직류버스의 전압을 30V_{dc}로 일정하게 제어하여 장마철과 같이 태양광 어레이에서 전력공급이 부족한 경우 배터리가 방전되는 것을 방지한다. 이와 같이 기존에 설치되어 있는 태양광-배터리 전원시스템은 보급형 시스템으로서 가격이 저렴하고 제어가 단순하다는 장점이 있으나 반면에 태양광 전원의 발전 전력을 최대한으로 이용할 없으며, 계통측 전력변환기에서는 단방향으로 전력을 제어할 수밖에 없어 부하에서 사용하고 남은 전력에 대한 효율적인 에너지 활용이 불가능하다. 또한 배터리는 독립적으로 충/방전량을 조절할 수 없어 계통연계형 발전시스템으로서 한계점이 존재한다. 본 논문에서는 앞서 언급한 문제점을 개선하고자 MPPT 기능, 양방

향 계통연계형 인버터 제어원리, 배터리 충방전을 위한 별도의 전력변환 회로를 추가로 적용하고자 한다.

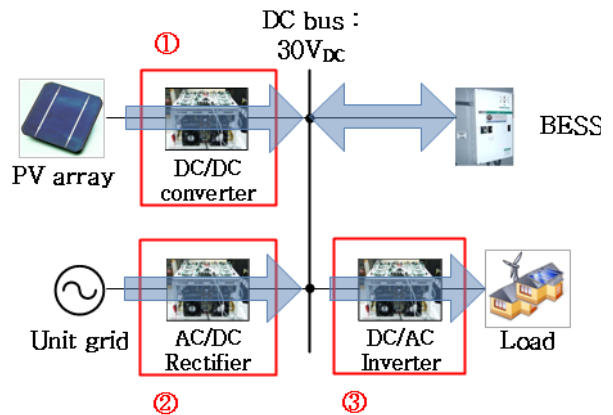


그림 2 태양광-배터리 전원시스템의 구성도
Fig. 2 Configuration of PV-Battery Hybrid System

2.2 태양광-배터리 전원시스템 개선방안

그림 3은 효율적인 태양광 발전 전력을 이용하기 위하여 본 논문에서 제안하는 개선된 태양광-배터리 전원시스템의 단선도이다. 전체 시스템의 전압 및 용량은 기존에 설치된 시스템과 동일하다. 제안하는 개선방안은 다음과 같다.

우선 태양광 어레이에 연계된 DC/DC 컨버터에 MPPT 알고리즘을 탑재한다. 태양광 어레이는 일반적으로 P-N 다이오드와 유사한 전압-전류 특성을 갖게 되는데 이때 어레이 전압의 크기에 따라 출력 전력의 크기가 변화한다. 따라서 태양광 전원의 출력전력을 최대로 하기 위해 어레이 전압의 크기에 변화를 주는 MPPT 알고리즘을 탑재함으로써 전체 시스템의 에너지 활용도를 높일 수 있다.

둘째로, 기존의 시스템에서 배터리 충방전이 상황에 따라 수동적으로 이루어지는 것을 개선하기 위하여 별도의 전력변환기를 이용하여 배터리의 충방전 제어를 독립적으로 수행하도록 한다. 따라서 배터리에 SOC (State-Of-Charge)를 효율적으로 제어할 수 있어 과부하에 의한 전력공급에 문제가 생기거나 계통사고 시 등과 같이 비정상상태에서 부하에 전력을 신뢰성 있게 공급할 수 있으며 저장된 에너지를 이용하여 전력계통의 수요반응(Demand Response)에 참여할 수 있다.

셋째로 계통연계 인버터를 양방향으로 전력이 흐르도록 제어한다. 이를 통해 태양광 전원에서 발전한 전력 가운데 로컬 부하에 사용하고 남은 전력을 계통에 판매할 수 있으며 배터리 충방전 알고리즘과 연계하여 전체 시스템의 에너지를 보다 효율적으로 관리할 수 있다.

마지막으로 자율적인 제어기능이 부여된 전력변환기들을 협조제어하여 전력계통의 상황에 따라 에너지 저장 또는 방전, 전력의 매도 또는 매수 등을 효율적으로 수행할 수 있는 지능형 관리기술을 제안한다.

개선된 태양광-배터리 전원시스템은 MATLAB/Simulink 프로그램을 이용하여 상세 모델링 하였고 구체적인 개발 내용은 다음과 같다.

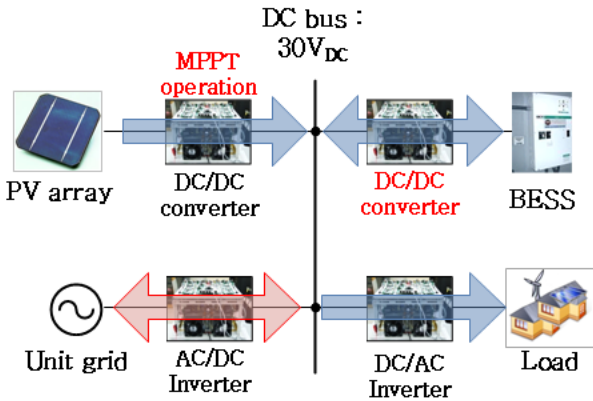


그림 3 개선된 태양광-배터리 전원시스템 구성
Fig. 3 Modified PV-Battery Hybrid System

2.3 개선된 태양광-배터리 전원시스템의 상세 해석모델 개발

2.3.1 태양광 발전기 모델

태양광 발전(PV, photovoltaics)은 pn 접합된 반도체에 광 에너지를 가하면 전기가 발생하는 광전효과(Photovoltaic Effect)를 이용한다. PV 모듈 여러 개를 직-병렬로 연결한 것을 PV 어레이(array)라고 부르며 부하에 흐르는 전류 I_L 는 다음과 같이 표현할 수 있다[6-7].

$$I_L = N_p \left[I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{q}{kTA} \frac{V_o + R_s I_L}{N_s} \right) - 1 \right\} \right] \quad (1)$$

이때 I_{ph} 는 광 기전류, R_s 는 PV 모듈의 직렬 등가저항이며, N_s 는 직렬 연결된 셀의 수, N_p 는 병렬 연결된 모듈의 수, q 는 전하량, k 는 Boltzman 상수, A 는 pn접합 이상 계수, I_s 는 셀의 역포화 전류이다. 식 (1)과 MATLAB/ Simulink 를 이용하여 3.3kW급 이상적인 PV 어레이의 수학적 모델을 구현하였으며, 모델의 전압-전류, 전압-전력 특성 곡선을 그림 4에 나타내었다. 4개의 병렬 PV 모듈과 540개의 직렬 셀을 연결하였고 일사량은 50, 80, 100mW/cm² 임을 가정하였다.

그림 4의 전력-전압 곡선을 살펴보면 알 수 있듯이 이상적인 PV 어레이는 일사량에 따라 하나의 최대 전력점(Maximum Power Point)이 존재한다. 일반적으로 태양광 발전시스템은 외부의 조건(일사량, 온도)에 따른 최대 전력을 발전하도록 제어하는 것이 중요하며 이러한 제어 방법을 최대전력 추종제어(MPPT)라고 한다. 본 논문에서 일반적으로 많이 사용되는 MPPT 알고리즘으로 P&O 기법을 적용하였으며 그림 5의 순서도와 같이 동작한다. 전압과 전류의 곱으로 전력을 계산하고 이전의 전력과 현재의 전력을 비교하여 현재 전력이 더 크고 전압도 더 크다면 전압지령치에 일정한 스텝(c)값을 더해주고 전압이 작다면 스텝만큼 빼준다. 반대로 현재보다 이전의 전력이 더 크고 현재 전압이 더 클 경우엔 스텝을 빼주고 반대인 경우는 스텝만큼 더해준다.

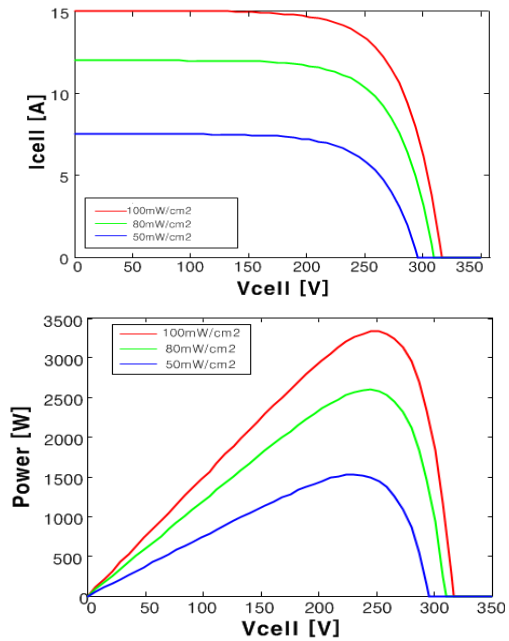


그림 4 일사량에 따른 이상적인 PV 어레이 특성 (상: 전압-전류 특성곡선, 하: 전압-전력 특성곡선)

Fig. 4 Ideal PV array characteristics (Top: V-I characteristics, Bottom: P-V characteristics)

P&O 알고리즘은 최대 전력점 근방에서 스텝만큼의 변동으로 미세하게 진동하는 단점이 있으나 알고리즘이 단순하고 일사량의 급격한 변동에도 강인하게 동작하기 때문에 본 논문의 목적에 부합하는 방법이다. 간단한 피드백 구조를 갖고 있으며 소수의 추정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다.

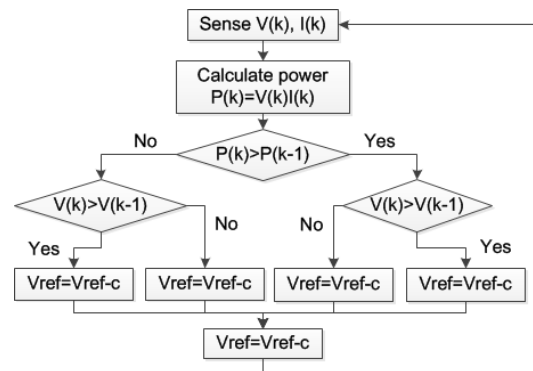


그림 5 P&O MPPT 알고리즘
Fig. 5 P&O MPPT algorithm for PV Generation

그림 6는 PV 어레이를 직류 버스에 연계하기 위해 사용하는 벡 컨버터(buck converter)의 회로도를 보여주며 그림 7은 벡 컨버터의 제어 블록선도이다. 본 논문에서 태양광-배터리 전원시스템의 직류 버스 전압은 30V_{dc}의 저전압이기 때문에 개방회로 전압(V_{OC})이 약 150V인 PV 어레이를 적용하기 위해서는 강압형 컨버터인 벡 컨버터를 사용한다. 컨버터의 제어는 PV 어레이의 전압과 전류를 측정하여

MPPT를 수행한 후 PV어레이의 전압명령(V_{pv}^*)이 발생되고, 이 명령값과 PV 어레이 출력 전압 같아지도록 PI 제어기를 사용한다. 이 PI 제어기의 출력신호는 PV 어레이의 전류명령치가 되고 측정된 어레이 전류와 함께 전류제어루프를 통해 벡 컨버터의 스위칭 신호를 발생시켜 PV 어레이를 최대 전력점에서 동작하도록 제어한다. 따라서 1kW 정격의 PV 어레이는 최대전력 동작점(127V, 7.8A) 부근에서 동작하며 이때의 PV 출력 전력은 약 1kW로 최대 전력점에서 동작하게 된다.

표 1은 태양광 발전시스템에서 사용된 파라미터 값들을 제시한다. 인덕터 값은 태양광 발전시스템의 정격인 1kW의 최대 전력점($V_{cell}=130V$)에서 스위칭 주파수 5kHz로 구동할 때 출력 전류의 스위칭 리플율이 5%가 되도록 설계하였다.

표 1 태양광 발전시스템에 사용된 설계값

Table 1 Parameters of PV power conditioning systems

| 구분 | 설계값 | |
|---------------------|---------------|------|
| 태양광 어레이 최대 출력 전력 | P_{pv_max} | 1kW |
| 최대 개방회로 전압 | V_{OC} | 150V |
| 스위칭 주파수 | fs | 5kHz |
| 인덕턴스 | L1 | 3mH |
| 전압 제어기 | K_{p_v} | 0.1 |
| | K_{i_v} | 10 |
| 전류 제어기 | K_{p_i} | 1 |
| | K_{i_i} | 20 |

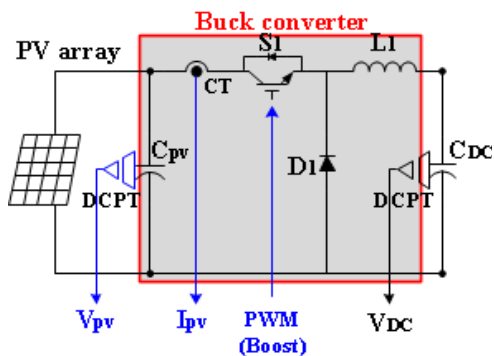


그림 6 Buck Converter를 이용한 태양광 발전시스템
Fig. 6 PV Power Conditioning System using Buck converter

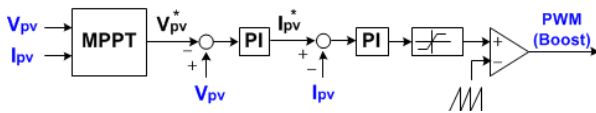


그림 7 PV 연계를 위한 Buck Converter의 제어원리
Fig. 7 Control block diagram of buck converter integrating PV array to electric power system

2.3.2 배터리 및 충방전 시스템 모델

태양광-배터리 전원시스템의 배터리는 납축전지를 사용하였으며 그림 8과 같은 충전 및 방전 특성을 갖는다. 일반적으로 배터리 충/방전 시에는 정전류로 동작하게 된다. 정전류 충전 시에는 최대 충전전압인 약 4.2V까지 전압이 상승하고, 4.2V에 도달한 이후에는 충전전류는 줄어들고 정전압(constant voltage) 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 배터리 방전의 경우에는 최대 충전되었을 시 4.2V에서 방전을 시작하여 약 3.4V까지 일정하게 전압이 하강하며 그 이후에는 급속하게 전압이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 배터리 수명을 고려하였을 때 충전은 정전류 및 정전압 기능을 가지는 양방향 컨버터 알고리즘을 적용한다. 또한 방전 시 일정 전압 이하로 방전될 경우 배터리 수명에 안 좋은 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 SOC 여유를 가지고 구동되어야 한다.

MATLAB/Simulink 환경에서는 상기에 언급한 납축전지 배터리 특성뿐만 아니라 리튬이온 배터리 등의 다양한 2차 전지에 대한 수학적 모델링을 라이브러리로 제공하고 있다. 그림 9에 나타낸 것과 같이 제공하는 배터리 모델은 충/방전 전류에 따른 배터리 전압을 수식을 이용해 계산하는 연산부분과 이를 전압으로 표현해주는 전압원 및 내부 기생 저항으로 구성된다 [8-9]. 해석모델에 사용된 배터리는 기존 사양인 12V의 정격전압, 용량은 100Ah의 배터리를 2개 직렬 연결하여 사용하였다.

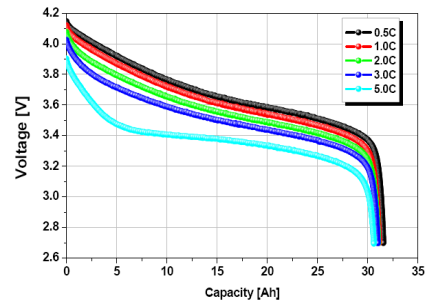
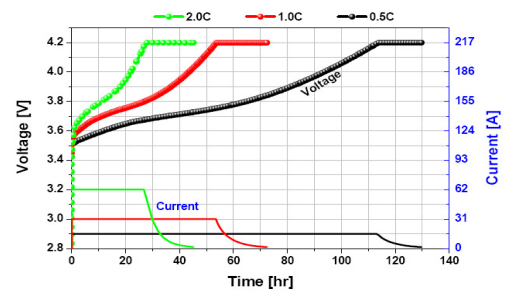


그림 8 납축전지 충전 특성(상) 및 방전 특성(하)
Fig. 8 Lead-Acid battery charging (Top) and discharging (Bottom) characteristics

납축전지를 자율적으로 충전 및 방전하기 위해서 본 논문에서는 비절연형 양방향 부스트 컨버터를 사용하였다. 그림 10에 배터리 충방전을 위한 전력 변환기 모델과 제어 블록도를 나타내었다. 충전의 경우 Q_2 를 스위칭 함으로써 Q_1 양단에 걸리는 전압을 필터링하여 배터리 전압을 생성하게 된다. 즉, 두 개의 스위치 중 Q_2 는 능동 스위치로 Q_1 는 수동 스위치인 다이오드로 동작하는 벡 컨버터가 되어 직류 버스

에서 배터리로 에너지가 전달되어 충전 된다. 이때 스위치 Q_2 는 주기 T_s , 도통 시간 DT_s 로 on/off를 반복하게 된다. 스위치 Q_2 가 on될 때에는 인덕터에 배터리 전압과 Bus 전압의 차가 걸리게 되어 인덕터 전류(I_L)가 상승하고 배터리에는 에너지가 전달된다. 스위치 Q_2 가 off될 때에는 인덕터에 배터리 전압이 역으로 걸리게 되어 Q_1 을 통하여 환류하면서 인덕터 전류(I_L)는 감소하게 된다.

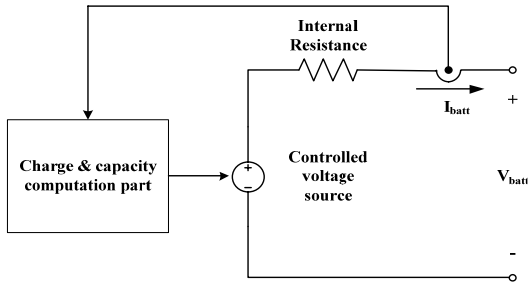


그림 9 Simulink를 이용한 배터리 등가모델
Fig. 9 Battery equivalent model of Simulink

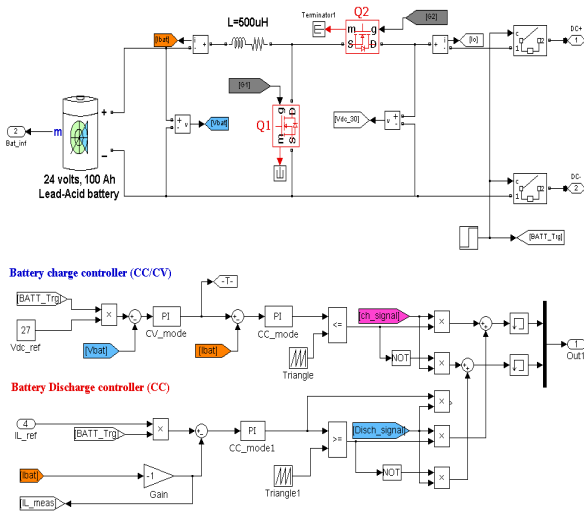


그림 10 배터리 충방전을 위한 양방향 컨버터 모델(상) 및 제어 원리(하)
Fig. 10 Bi-directional converter and Control block diagram (for battery charging and discharging)

방전의 경우에는 배터리 전압은 Q_1 을 통하여 전류를 상승하게 하고, 이때 배터리 전압과 상승된 전류를 함께 직류 버스 측으로 넘김으로써 전압을 생성하게 된다. 즉, 두 개의 스위치 중 Q_1 은 능동 스위치로 Q_2 는 수동 스위치인 다이오드로 동작하는 부스트 컨버터로 구동되며 배터리에서 직류 버스로 에너지가 전달된다. 이때 스위치 Q_1 은 주기 T_s , 도통 시간 DT_s 로 되어 on/off를 반복하게 된다. 스위치 Q_1 이 도통될 때에는 인덕터에 에너지를 저장하게 되고, 이때 인덕터 전류(I_L)은 상승하게 된다. 이때의 인덕터에 걸리는 양단 전압은 배터리 전압과 같다. 또한 Q_1 이 Off될 때에는 인덕터에 저장된 에너지는 스위치 Q_2 를 통하여 방전을 하게 되고 인덕터 전류(I_L)은 감소하게 되며, 이때 인덕터에 걸리는 양단 전압은 배터리 전압과 직류 버스 전압의 차와 같다.

표 2 에너지 저장장치에 사용된 설계값

Table 2 Parameters of BESS

| 구분 | 설계값 |
|-----------|-------------------------|
| 배터리 정격 전압 | Vnominal 24V |
| 배터리 용량 | Rated Capacity 100Ah |
| 스위칭 주파수 | fs 5kHz |
| 인덕턴스 | L 500uH |
| 전압 제어기 | Kp_v 30 |
| | Ki_v 2000 |
| 전류 제어기 | Kp_i 1 |
| | Ki_i 100 |

배터리의 제어는 크게 충전 시와 방전 시로 나눌 수 있는데, 충전 및 방전 신호는 외부의 협조제어 알고리즘에 의해서 발생된다. 충전 시에는 협조제어 알고리즘에서 발생하는 충전 전류 제어명령으로 정전류 제어를 하게 되며, 배터리 전압이 최대 충전 전압인 27V에 다다른 정전압 제어를 하게 된다. 그림 10에서 보면 알 수 있듯이 배터리의 전압이 27V에 도달하지 않았을 시에는 전압 제어기의 리미터 값인 충전 전류 레퍼런스로 충전하고 배터리 전압이 27V가 되면 자연스럽게 정전류 제어에서 정전압 제어로 전환되도록 구성하였다. 방전 시는 단순히 정전류 제어를 통하여 협조제어에서 요구하는 방전 전류량으로 정전류 제어하도록 하였다.

표 2에는 배터리 충방전 시스템에 사용된 설계 값들을 제시하였다. 인덕터의 리플전류는 배터리의 수명과 밀접한 관계가 있기 때문에 설계 시 유의해야 한다. 본 논문에서 인덕턴스는 스위칭 리플에 의한 리플율을 5%로 설정하고 설계하였다. 또한 충전 및 방전 시 전류 제어기의 게인(Gain)은 동일한 값을 사용하였다.

2.3.3 계통연계형 인버터 모델(DC/AC inverter)

일반적으로 신재생에너지를 이용한 계통연계형 발전시스템의 경우, 자유로운 전력조류를 위해 양방향 인버터가 필요하다. 본 논문의 태양광-배터리 전원시스템은 단상 220Vac의 상용전원과 연결되어있는 구조로 그림 11과 같은 풀 브릿지 구조의 단상 계통연계형 인버터를 적용하였고 그에 따라 직류 버스 전압제어, 인버터 출력 전류의 위상 제어 및 효율적인 전력조류 제어가 가능하다. 필터는 L-필터를 적용하였다. 또한 계통 측에 저주파 변압기를 삽입하여 220Vac을 16.5Vac로 변환하여 계통과 연결하였다. L-필터의 경우에는 스위칭에 의해 발생하는 리플성분과 기본파 출력 전류의 성분의 비율이 3%가 되도록 설계하였다 [10]. 표 3에는 계통연계형 인버터에 사용된 설계값을 제시하였다.

그림 12은 계통연계형 단상 인버터의 제어 블록도를 나타낸다. 일반적으로 단상 인버터의 제어블록은 계통전압의 위상을 검출하는 PLL(Phase-Locked Loop), 전압 및 전류 제어기, Unipolar SPWM 블록, ab-dq 및 dq-ab 축 변환 블록으로 구성된다. 이러한 계통연계형 단상 인버터의 제어는 d-q 동기회전축 상에서 순시전력을 제어함으로써 가능하다. 하지만 단상의 경우에는 3상에 비해 상(phase)이 하나만 존

제하기 때문에 동기회전좌표계로 변환하기 위해서는 가상의 2상이 필요하게 된다 [11]. 이를 위해 단상 계통연계형 인버터에서는 가상 2상 PLL을 적용하여 인버터의 출력 전압 V_{grid} , 출력 전류 I_o 는 동기회전좌표계 상의 일정한 직류성분으로 나타낼 수 있다. 그 결과 인버터의 순시유효전력과 무효전력은 d축과 q축으로 분리되어 각각 따로 제어할 수 있다. 이러한 특성은 계통제어 및 해석에 매우 유용하며 정지좌표계에 비해 높은 정확도를 갖는다.

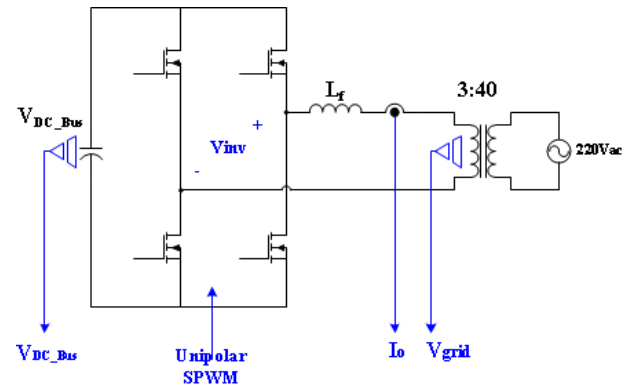


그림 11 계통연계형 단상인버터
Fig. 11 Grid-connected single-phase voltage source inverter

표 3 계통연계형 인버터에 사용된 설계값
Table 3 Parameter value of Grid-connected inverter

| 구분 | | 설계값 |
|------------|-------------------------------|---------|
| 인버터 출력전압 | V_{grid} | 16.5Vac |
| 계통측 변압기 턴비 | $n_{primary} : n_{secondary}$ | 3:40 |
| 스위칭 주파수 | f_s | 5kHz |
| 인덕턴스 | L_f | 191.3uH |
| 전압 제어기 | $K_{p,v}$ | 0.1 |
| | $K_{i,v}$ | 200 |
| 전류 제어기 | $K_{p,i}$ | 10 |
| | $K_{i,i}$ | 500 |

또한 계통연계형 인버터는 직류 버스의 전압을 일정하게 제어 하는 역할도 하게 된다. 그림 11에서 보면 인버터 회로에서 버스전압을 측정해 오고 이는 전압제어기를 통해 일정 전압(30V_{dc})으로 제어된다. 전압제어기의 출력은 인버터 전류의 d축 명령이 일정 q축 명령치와 함께 d, q축 전류제어기를 통해 인버터의 유효 및 무효전력을 제어 한다. 이렇게 최종적으로 제어기를 통해 나온 출력은 풀 브릿지 인버터의 leg 사이 전압인 V_{inv} 의 지령치가 되고, 반송파 신호와 비교하여 Unipolar SPWM 방식의 게이팅 신호가 발생된다. 이때 PWM의 선형영역에서 제어하기 위해서는 변조율(modulation index)을 1보다 작은 범위에서 제어해야 하며 해석모델에서는 변조율을 0.8로 설정하였다. 그림 13에 MATLAB/Simulink로 구현한 계통연계형 단상 인버터 모델을 도시하였다.

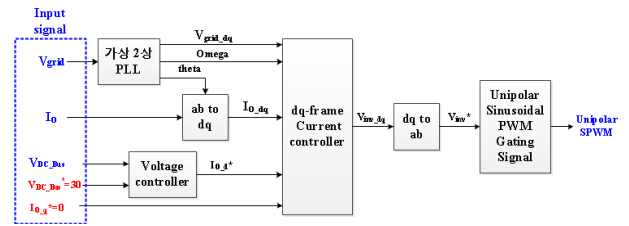


그림 12 계통연계형 단상인버터의 제어 블록선도
Fig. 12 Control block diagram of single-phase inverter

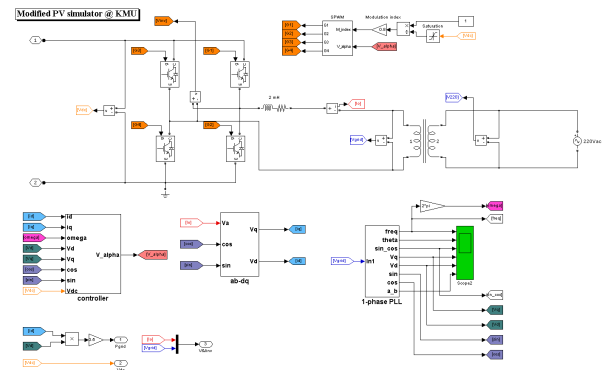


그림 13 계통연계형 단상인버터 해석 모델
Fig. 13 Simulation model of grid-connected single phase inverter

3. 전력 조류를 위한 협조제어 알고리즘

본 논문에서는 태양광-배터리 전원시스템 상의 태양광 발전량과 부하의 전력 소모량 및 배터리 충전상태를 측정하여 통합적으로 배터리 충방전을 제어하는 협조제어 알고리즘을 제안한다. 협조제어 알고리즘으로 지능형 제어알고리즘의 하나인 규칙기반 전문가시스템 (Rule-based Expert System)을 적용하였으며 개발한 전문가시스템의 구조는 그림 14와 같다. 규칙기반 전문가시스템의 구조는 크게 데이터베이스(Database)와 기반지식(Knowledge Base) 그리고 추론엔진(Inference Engine)으로 구성된다. 기반지식에는 문제 해결에 필요한 지식을 IF-THEN 형식의 규칙으로 저장한다. 즉 입력이 조건(IF)에 부합하면 그 다음 취해야할 행동(THEN)에 대한 정보가 출력으로 나오게 된다. 데이터베이스는 외부입력 정보를 통해 데이터를 수집하고 추론(Inference)이 진행되면서 기반지식에 의해 새롭게 얻게 되는 정보들도 업데이트하는 역할을 한다. 마지막으로 추론엔진에서는 데이터베이스에 저장되어 있는 정보들과 이와 관련된 기반지식의 규칙들을 서로 연결시킴으로써 문제에 대한 해를 찾아 나가게 된다. 이러한 규칙기반 전문가시스템은 새로운 규칙을 추가하기 위해서는 사용자가 직접 기반지식을 업데이트해야 하는 단점이 있지만 전문가시스템을 구성하는 데이터베이스와 기반지식 그리고 추론엔진을 분리하여 모듈화 함으로써 시스템의 업데이트 및 관리가 용이하며 관리자의 지식과 경험을 쉽게 적용할 수 있다. 또한 지식기반 전문가시스템은 범위가 좁은 특정분야의 문제해결에서 매우 우수한 성능을 가지며 도출된 해를 관리자가 직관적으로 이해할 수 있다는 장점을 가진다 [12-13].

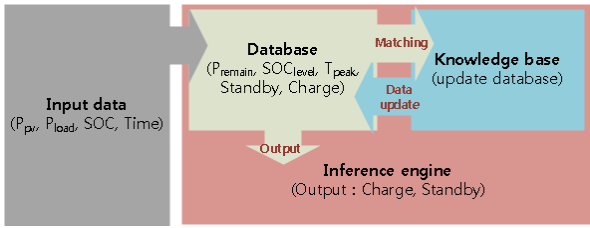


그림 14 규칙기반 전문가 시스템을 이용한 협조제어 알고리즘 구조

Fig. 14 Configuration of cooperation algorithm based on the rule-based expert system

표 4 입력데이터를 이용한 데이터베이스 변수값 결정

Table 4 Calculation of database variables from input data

| 입력 데이터 | 데이터 베이스 변수값 |
|----------------------------|-------------------|
| $P_{PV} < P_{load}$ | $P_{remain} = 0$ |
| $P_{PV} > P_{load}$ | $P_{remain} = 1$ |
| $SOC > 30\%$ | $SOC_{level} = 0$ |
| $30\% < SOC < 80\%$ | $SOC_{level} = 1$ |
| $SOC < 80\%$ | $SOC_{level} = 2$ |
| $Time < 14$ or $Time > 17$ | $T_{peak} = 0$ |
| $14 < Time < 17$ | $T_{peak} = 1$ |

본 논문에서는 태양광-배터리 전원시스템의 협조제어를 위해 필요한 입력신호로 태양광 발전시스템의 발전량(P_{PV}), 부하에서 소모하는 전력(P_{load}), 배터리의 충전상태(SOC) 그리고 전력사용량이 많은 피크부하 시간인지 판단하기 위해 현재 시각(Time)을 선정하였다. 이러한 4개의 입력은 데이터베이스에서 추론에 적합한 데이터로 정규화해서 저장된다. 데이터베이스에 저장되는 변수는 전원시스템 내의 잉여 전력 유무(P_{remain}), 배터리 SOC의 레벨 (SOC_{level}), 그리고 피크부하 시간대 유무(T_{peak})로 표현된다. 표 4는 전문가시스템의 입력 데이터로부터 데이터 변수를 구하는 방법을 나타낸다. 우선 태양광 전원의 발전량(P_{PV})과 부하의 소모전력(P_{load})을 비교해서 태양광 발전량이 큰 경우 잉여전력을 나타내는 변수(P_{remain})를 '1'로, 반대의 경우는 '0'으로 저장한다. 배터리 충전상태의 수준을 나타내는 데이터(SOC_{level})의 경우 배터리 SOC의 레벨은 배터리 수명을 고려하여 30~80%를 정상운영 범위로 설정하여, 배터리 SOC가 30% 미만일 때는 '0', 30~80% 사이에서는 '1', 그리고 80% 이상일 때는 '2'로 데이터화한다. 그리고 현재 피크부하 시간대인지를 나타내는 시간 데이터(T_{peak})의 경우, 현재 시간이 피크부하 시간일 경우에는 '1', 그 외의 시간에서는 '0'을 갖도록 하였다. 여기서 피크 부하 시간 때는 전력거래소의 보고서를 참조하여 14시~17시로 설정하였다 [14].

기본적인 협조제어 알고리즘의 개념을 그림 15에 나타내었다. 우선 태양광 발전량이 부하의 전력소모량 보다 큰지 판단한다. 만약 태양광 전원의 발전량이 더 크면 배터리의 SOC를 보고 충전할 것인지 또는 배터리의 동작을 멈출 것인지 판단한다. 반면 발전량이 부하의 소모량보다 작으면

현재 시점이 피크부하 시간대인지와 배터리의 SOC를 고려하여 배터리를 충전 또는 방전할 것인지 결정한다. 협조제어 알고리즘의 기본적인 아이디어는 피크부하 시가 아닌 낮 시간대에 태양광 발전전력을 이용하여 배터리를 충전하고 피크부하 시에 배터리에 저장된 에너지를 방전하여 전력수급을 안정하게 하려는 목적으로 알고리즘을 설계하였다.

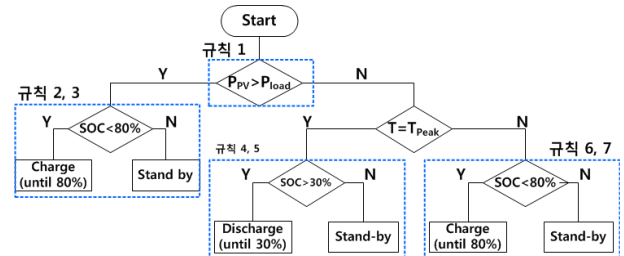


그림 15 협조제어 알고리즘의 순서도

Fig. 15 Flowchart of cooperation algorithm

전체적인 알고리즘의 동작 시퀀스는 다음과 같다. 데이터베이스에 정의된 데이터와 기반지식(규칙)의 조건문(IF)이 일치하면 결과값(THEN)이 데이터베이스에 업데이트 되고, 업데이트된 데이터베이스를 이용하여 그 다음 일치하는 규칙이 실행된다. 예를 들면 초기의 데이터베이스에 $P_{remain}=0$, $T_{peak}=1$, $SOC_{level}=1$ 이라는 값이 주어져 있다고 가정하자. 초기 데이터베이스 값을 이용하여 조건문을 만족하는 규칙이 실행되는데 전문가 시스템의 기본적인 동작원리에 따라 조건문의 변수중 하나라도 만족하지 않으면 그 규칙은 실행되지 않는다. 따라서 초기 조건과 일치하는 '규칙1'만 실행되고 그 결과 값으로 Look_time=1 이 데이터베이스로 업데이트 된다. 2번째 단계에서는 Look_time, T_{peak} , SOC_{level} 의 3개의 데이터베이스를 만족하는 '규칙4'가 실행되고 최종 출력값인 Charge=0 이 결정된다. 이러한 방식으로 다른 조건에서도 체계적으로 협조제어 알고리즘이 운영된다.

4. 시뮬레이션을 통한 모델 및 협조제어 알고리즘 검증

위에 설명한 전문가시스템 기반의 협조제어 알고리즘의 타당성 검증을 위해 MATLAB/Simulink를 이용하여 모의실험을 하였다. 태양광 전력변환기, 배터리 충방전장치, 계통연계형 인버터, 협조제어 알고리즘으로 구성된 전체 태양광-배터리 전원시스템의 해석모델을 그림 16에 나타내었다. 태양광 전력변환장치는 최대전력점 추종 알고리즘을 적용하여 일사량에 따른 최대 발전을 하도록 하였으며 계통연계형 인버터의 경우 피크 부하량을 고려하여 2.2kW급으로 설계하였고 양방향 전력 조류가 가능하도록 하였다. 또한 배터리 저장장치는 충전 시 계통연계형 인버터의 용량을 고려하여 30A의 정전류로 충전한다. 그리고 방전 시에는 피크 부하에서 발전 전력을 뺀 값만큼의 부족한 전력을 보충할 수 있도록 설계하였다. 각 전력변환기로부터 모니터링 신호를 받아 오면 협조제어 알고리즘 블록에서 규칙기반 전문가시스템을 이용하여 에너지 저장장치의 충방전 지령치 및 Standby 신호가 생성된다.

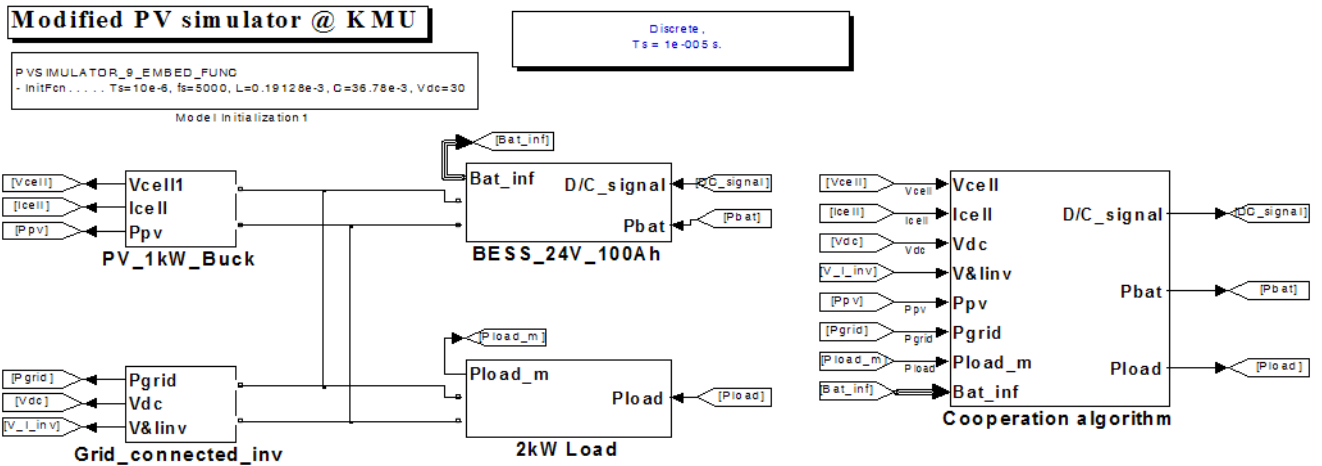


그림 16 태양광-배터리 전원시스템의 MATLAB/Simulink 해석모델
 Fig. 16 MATLAB/Simulink model of the modified PV-Battery Hybrid System

표 5 협조제어 알고리즘의 규칙

Table 5 Rule of the cooperation algorithm

| 구분 | 조건문(IF) | 실행문(THEN) |
|-----|--|--------------------------------|
| 규칙1 | $P_{remain}=1$ | Look_soc=1 else Look_time=1 |
| 규칙2 | Look_soc=1 and $SOC_{level}<2$ | Charge=1 |
| 규칙3 | Look_soc=1 and $SOC_{level}=2$ | Standby=1 |
| 규칙4 | Look_time=1 and $T_{peak}=1$ and $SOC_{level}>0$ | Charge=0 |
| 규칙5 | Look_time=1 and $T_{peak}=1$ and $SOC_{level}=0$ | Standby=1 |
| 규칙6 | Look_time=1 and $T_{peak}=0$ and $SOC_{level}<2$ | Charge=1 |
| 규칙7 | Look_time=1 and $T_{peak}=0$ and $SOC_{level}=2$ | Standby=1 |

본 논문에서는 그림 17과 같은 태양광 일사량 데이터와 부하사용량을 이용하여 제안된 전문가시스템 기반의 협조제어 알고리즘 동작검증을 실시하였다. 일간 부하곡선 그래프는 한전 전력거래소에서 제공하는 '11년 8월 전력계통 운영실적'의 부하사용량 데이터를 참고하였다 [14]. 따라서 피크 부하시간은 14시부터 17시까지로 정하였고 이때 부하량은 태양광-배터리 전원시스템의 용량에 맞추어 1.1kW로 선정하였다. 또한 태양광 일사량 데이터는 12시~14시에 최대 일사량을 갖도록 데이터화 하였다. 만약 0시에 SOC가 50%라고 가정하면 규칙기반 전문가 시스템의 '규칙1'→'규칙6' 순서로 알고리즘이 수행되어 배터리의 SOC가 80%가 될 때까지 충전하게 된다. 12시~14시는 점심시간으로 인해 부하량은 소량 감소하고 일사량은 최대가 되어 '규칙1'→'규칙2' 또는 '규칙3' 이 수행된다. 14시~17시는 피크타임 시간으로 부하는 최대전력을 소비하지만 태양광 발전시스템에서는 최대발전 전력에서 서서히 전력이 줄어드는 시점이다. 따라서 제안된 알고리즘에서는 '규칙1'→'규칙4'를 통해 부족한 전력만큼 전력을 보상해주게 된다. 마지막으로 17시~24시에서는 피크부하 보상으로 인해 방전된 배터리 에너지를 다시 충전한다.

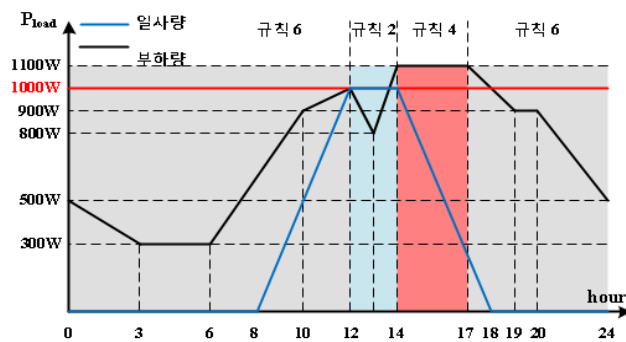


그림 17 시뮬레이션을 위한 일간 일사량 및 부하량 곡선
 Fig. 17 Irradiance data of PV array and loads curve for simulation

그림 18~19에 태양광-배터리 전원시스템 모델의 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 각 과형은 배터리 전력(P_{bat}), 배터리 SOC, 계통연계형 인버터의 전력(P_{grid}), 일간 부하량 지령치 및 실제 부하로 유입되는 전력량, 태양광 발전량(P_{pv}) 그리고 직류 버스 전압을 나타내었다. 초기 SOC 값은 50%로 설정하였고 시뮬레이션 시간은 6초를 24시로 가정하여 동작검증을 실시하였다.

초기상태에 직류 버스 전압이 30V로 제어된 후에 태양광 발전시스템, 배터리, 부하가 동작을 시작한다. 0~12시 동안은 표 5의 규칙 1, 6이 실행되어 배터리 SOC가 80%가 될 때까지 정전류로 충전을 한다. 그에 따라 배터리 전력은 750W로 충전을 하고 SOC는 선형적으로 증가한다. 이때 배터리 충전은 아직 태양광 발전시스템이 발전 가능한 시간이 아니기 때문에 오로지 계통전력만을 이용하게 된다. 12~14시 때에는 점심시간대로 소모전력량이 감소하는 구간이다. 또한 태양광 일사량은 최대가 되는 시간으로 실험조

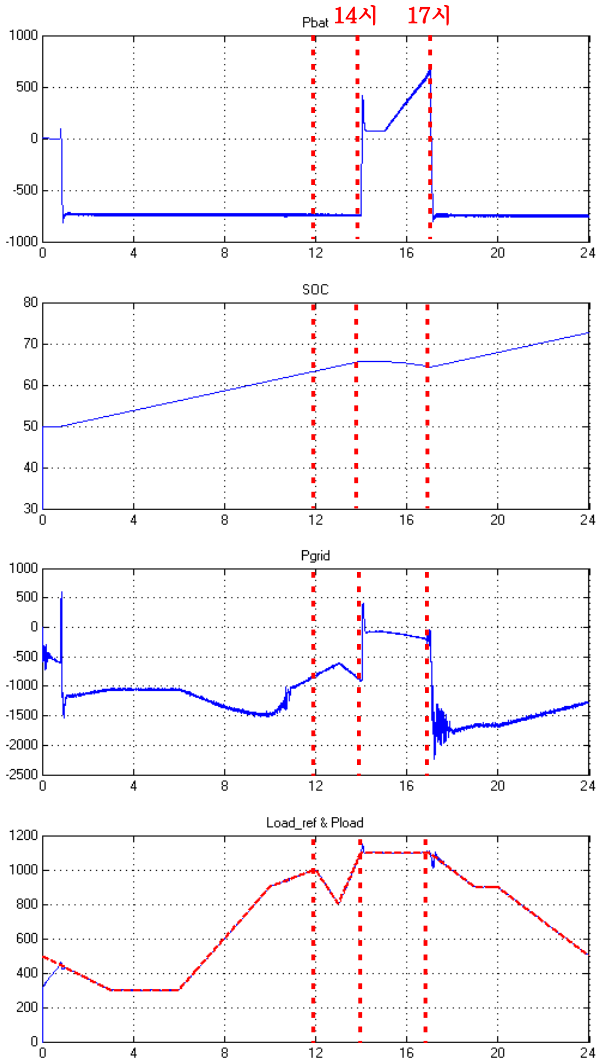


그림 18 시뮬레이션 주요파형 1(P_{bat} , SOC, P_{grid} , P_{load} & reference signal)

Fig. 18 Simulation results 1

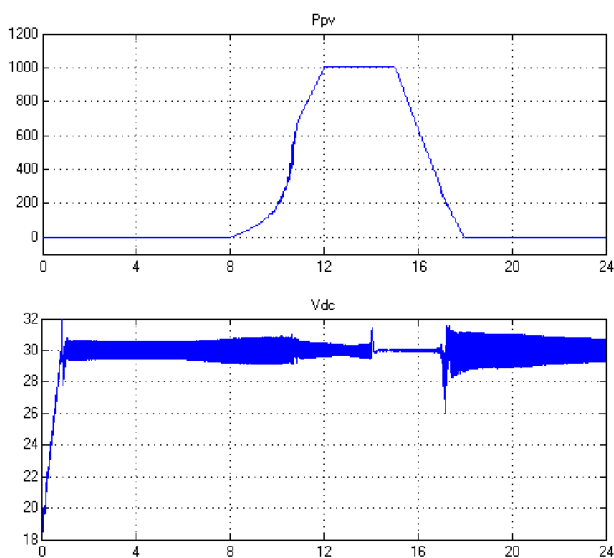


그림 19 시뮬레이션 주요파형 2 (P_{pv} , V_{dc_link})

Fig. 19 Simulation results 2

건 ($P_{pv}=1kW$, $P_{load}<1kW$, $SOC<80\%$)에 의해 태양광 발전량에서 부하의 소모전력량을 제외한 잉여전력과 계통전력을 이용하여 배터리를 충전한다. 14~17시는 피크부하 구간으로 협조제어 알고리즘에 의해 배터리가 방전하는 것을 확인할 수 있다. 특히 이때 부하에서 소모하는 전력은 태양광 발전 전력과 배터리의 전력을 최대한으로 활용하고 계통전력은 최소한으로 이용하는 것을 확인할 수 있다. 17~24시 동안은 피크 부하 보상을 위해 방전된 배터리를 충전하는 구간으로 배터리가 다시 정전류로 충전하는 것을 볼 수 있다. 그리고 모든 구간에서 직류 버스전압은 30V로 정확하게 유지되고 부하전력 또한 지령치를 추종하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존에 설치된 태양광-배터리 전원시스템의 단점을 보완하고자 태양광 발전에 최대전력점 추종알고리즘을 적용하였고, 배터리의 자율적인 충방전을 위한 DC/DC 전력변환기를 설계하였다. 또한 태양광-배터리 전원시스템의 에너지 효율을 높이기 위하여 양방향 조류제어를 위한 계통연계용 단상인버터를 설계하였다. 이렇게 개선된 태양광-배터리 전원시스템에서는 태양광 전원, 배터리, 계통연계 인버터가 자율적으로 제어가 가능하므로 이들을 효율적으로 협조하여 제어할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이 협조제어 알고리즘은 지능형 제어 알고리즘의 하나인 규칙기반 전문가시스템을 기반으로 설계하였고 그 과정을 자세하게 설명하였다. 제안한 협조제어 알고리즘은 태양광 전원의 출력의 불확실성과 피크부하 보상에 효율적으로 대처할 수 있는 장점을 가진다. 개선된 기능 및 구조 그리고 제안된 협조제어 알고리즘의 타당성 검증을 위해 MATLAB/Simulink를 이용해 모의실험을 진행하였다. 실험결과 기존 태양광-배터리 전원시스템과 비교했을 때 배터리의 독립적인 충/방전상태 제어와 피크부하의 효율적인 보상으로 인해 계통전력의 효율적인 이용이 가능함을 확인할 수 있었다.

가까운 미래에는 많은 가정 및 배전망에서 다수의 신재생 에너지 발전시스템이 실제 전력계통과 연계될 전망이다. 이 경우 계통의 안정도 및 유효전력의 보상 등을 위해 각 분산전원 및 부하들 간의 협조제어가 반드시 필요하다. 본 논문에서 제안하는 규칙기반 전문가 시스템의 협조제어 알고리즘은 쉽게 구현할 수 있고, 유지 보수가 간단하여 신재생 에너지 전원의 제어에 적합하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며 (NIPA-2012-H0301-12-2007) 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0003555)

References

[1] S. Teleke, M.E. Baran, S. Bhattacharya, and A.Q. Huang, "Rule-Based Control of Battery Energy

Storage For Dispatching Intermittent Renewable Sources,” IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol.1, no.3, pp.117-124, Oct. 2010.

[2] S. Kim, J. Jeon, C. Cho, J. Ahn, and S. Kwon, “Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.55, no.4, pp.1677-1688, Apr. 2008.

[3] I. Chung, W. Liu, D. Cartes, E. Collins, and S. Moon “Control Methods for Multiple Distributed Generators in a Microgrid System,” IEEE Trans. Industry Applications. Vol.46, no.3, May/June 2010.

[4] C. Yoo, I. Chung, S. Hong, W. Chae, and J. Kim, “A Feasibility Study on DC Microgrids Considering Energy Efficiency”, Trans. KIEE, vol. 60, no. 9, pp. 1674-1683, Sep. 2011.

[5] J. Lee, G. Kwon, B. Han, and H. Cha, “Operational Characteristic Analysis of DC Micro-grid with Detail Model of Distributed Generation”, Trans. KIEE, vol. 58, no. 11, pp. 2175-2184, Nov. 2009.

[6] J. Lee and G. Kim, Solar Cell Engineering, Green, 2008.

[7] Y. Ji, J. Kim, S. Park, J. Kim, and C. Won, “C-language based PV array simulation technique considering effects of partial shading,” IEEE International Conference on Industrial Technology 2009, Feb. 2009.

[8] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, “Methods for state-of-charge determination and their applications,” Journal of Power Sources, vol. 96, pp. 113-120, Jun. 2001.

[9] C.M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells,” Journal of The Electrochemical Society, vol. 112, pp. 252-257, Mar. 1965.

[10] H. Kim, “Filter Design for Utility Interactive Inverters using Single-phase Full-bridge Topology”, Trans. KIPE, vol. 12, no. 4, pp.346-353, Aug. 2007.

[11] Y. Xue, L. Chang, S. B. Kjør, J. Bordonau, T. Shimizu, “Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators : An Overview”, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19, no. 5, Sep. 2004.

[12] Michael Negnevitsky, Artificial Intelligence, 2nd Edition, Addison Wesley, 2004.

[13] A.B. Badiru and J.Y. Cheung, Fuzzy Engineering Expert Systems, with Neural Network Applications, John Wiley & Sons, 2002.

[14] Korea Power Exchange, Korea Power System Operation Data, Aug. 2011.

저 자 소 개



유철희 (柳哲熙)

1982년 6월 8일생. 2007년 국민대학교 전자공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자공학부 석사 취득. 2009년 현재 동 대학원 전자공학부 박사과정

Tel : 02-910-5048

Fax : 02-910-4449

E-mail : cheol21c@kookmin.ac.kr



정일엽 (丁一燁)

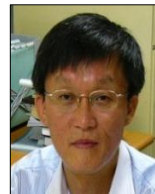
1976년 3월 16일생. 1999년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2005년-2006년 미국 버지니아텍 연구원, 2006년-2007년 ABB USCRC 방문 연구원, 2007년-2010년 미국 FSU-CAPS

연구원, 2010년 9월-현재 국민대학교 전자공학부 조교수

Tel : 02-910-4702

Fax : 02-910-4449

E-mail : chung@kookmin.ac.kr



홍성수 (洪成洙)

1961년 1월 25일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년, 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사, 박사 취득. 1984년-1999년 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원, 1999년-현재 국민대학교 전자공학부 정교수

Tel : 02-910-4701

Fax : 02-910-4449

E-mail : hongss@kookmin.ac.kr



장병준 (張炳竣)

1968년 3월 15일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년, 1997년 연세대학교 전자공학과 석사, 박사 취득. 1995년-1999년 LG전자 미디어통신 연구소 선임연구원, 1999년-2003년 ETRI 무선방송 연구소 선임연구원, 2003년-2005년 정보통신연구진흥원

선임연구원, 2005년-현재 국민대학교 전자공학부 정교수

Tel : 02-910-5468

Fax : 02-910-4449

E-mail : bjjang@kookmin.ac.kr