

태양광 전원과 Li 배터리를 포함하는 마이크로 그리드의 운영특성 해석

김덕영*

¹군산대학교 전기공학과

Analysis of Micro-grid Operations Including PV Source and Li Battery

Deok Young Kim^{1*}

¹Dept. of Electrical Engineering, Kunsan National University

요약 태양광 전원은 태양광 패널이 설치된 지역의 위치와 날씨 그리고 기후 등에 매우 큰 영향을 받으며, 전원으로서의 사용시간의 제한과 출력의 불확실성이라는 특성을 갖는다. 이러한 태양광 전원의 불확실성을 가능한 줄이기 위해, 태양광 전원의 출력에 대한 오랜 기간 동안의 데이터를 분석하여 출력의 평균값을 산출해 내었다. 태양광 전원의 출력의 평균값은 태양광 전원에 직접 연결되어 그리드에 안정적인 전력을 공급하기 위한 Li 에너지 저장장치의 적정 용량산정과 운용방식에 꼭 필요한 데이터이며, 이로부터 Li 배터리의 충방전모드에 의해 그리드에 일정한 출력의 전력을 공급하는 것이 가능하도록 하였다. 태양광 전원과 Li 배터리를 포함하는 시스템이 악조건의 그리드 운전상태에서의 동작특성을 관찰하기 위해 Li 배터리의 충전율이 100%에서 10%로 단시간에 감소될 정도의 과부하 상태에 대해 태양광 전원과 Li 배터리의 운용특성을 분석하고 Li 배터리 셀 단위의 출력 및 온도특성을 해석하였다.

Abstract A micro-grid including photovoltaic source and Li battery has been installed and operated for several years at the campus of USF and been used as a test bed. Photovoltaic power source has been strongly influenced by the location, weather and climate of the installed area. To compensate for the uncertainty of photovoltaic source's power output, a Li battery is connected directly to the photovoltaic source and supplies electric power to the grid. The Li battery is operated to supply power output to the grid according to the charging or discharging mode of the battery based on the average power output of the photovoltaic source, which is calculated from the monitored data for several years. The grid of the photovoltaic and Li battery system is operated as a severe loading condition and the operating characteristics of PV source and Li battery cells are analyzed in detail.

Key Words : Data analysis, Micro-grid, Li energy storage, PV source

1. 서론

신재생 에너지의 대표적 에너지원인 태양광 발전은 전원으로서의 사용시간의 제한과 출력의 불확실성이라는 제한요소를 갖고 있지만, 환경친화적이면서도 에너지원의 무한 지속성이라는 특성과 태양광 소자기술의 발전에 기인한 발전효율의 향상 그리고 에너지 저장장치와의 연계운전을 통한 출력 불확실성의 감소 등으로 그 활용도가 점점 증가할 것으로 예상된다.

태양광 전원의 출력특성은 일반적으로 설치장소의 위치에 따른 일조량과 기후 그리고 날씨 특성에 크게 영향을 받는다. 본 논문에서는 태양광전원을 포함하는 마이크로그리드가 설치된 지역의 위치 및 기후특성에 의해서 나타나는 태양광 전원의 출력특성을 오랜 기간 동안 관찰하여 그 특성을 파악하도록 하였다. 또한 관측 데이터로부터 구한 태양광 전원의 출력특성으로부터 태양광 전원의 출력 평균값을 구하여 Li 에너지 저장장치와의 연계운전을 통해서 태양광 전원의 출력 불확실성과 사용시

이 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2011-0012638)

*Corresponding Author : Deok Young Kim(Kunsan National Univ.)

Tel: +82-10-3356-4746 email: dykim@kunsan.ac.kr

Received May 21, 2014

Revised (1st June 27, 2014, 2nd July 9, 2014)

Accepted July 10, 2014

간의 제한이라는 문제점을 해결하고 그리드에 일정 출력을 공급할 수 있도록 마이크로 그리드를 구성하였다[1,2]. 이때 에너지 저장장치로는 메모리 효과가 거의 없고 안정성과 내구성이 높은 Li 배터리를 사용하였다.

본 논문은 태양광 전원과 Li 에너지 저장장치를 포함하는 마이크로 그리드의 운용사례에 대한 것으로, University of South Florida (USF)의 대학 캠퍼스내에 설치된 마이크로 그리드 테스트베드의 운용사례와 측정 데이터를 기반으로 하였다. USF의 마이크로 그리드는 독립운전 및 계통연계 상황에서 다양한 계통조건에 대해 태양광 전원과 Li 배터리의 성능평가와 동작특성 분석을 목적으로 운영되고 있으며, 본 저자는 2008년부터 USF의 스마트 그리드 연구실의 마이크로 그리드 운용에 대한 실험에 참여하였으며, 논문에서 사용한 사진과 측정 데이터는 USF 스마트그리드 연구실의 허가에 의해 사용되었다.

2. 태양광 발전의 출력특성 해석

USF의 스마트그리드 연구실은 태양광 전원과 Li 에너지 저장장치를 포함하는 마이크로그리드의 운영사례에 대한 실험을 진행하기 위해 2006년부터 태양광 패널과 LiFePO₄ 배터리 저장장치를 포함하는 테스트 베드를 2개의 장소에 설치하여 운용하고 있다. 그 중 하나는 캠퍼스 안에 설치되었고, 나머지 하나는 인근의 공원지역에 설치되어 운용되고 있다. 두 개의 장소에 설치된 설비는 동일한 것이며 태양광 패널은 최대 2kW의 용량을 그리고 LiFePO₄ 배터리는 최대 20kWh(5kW×4hr)의 설비용량을 갖고 있다. Fig. 1은 캠퍼스내에 설치된 태양광 패널을 보인 것으로, 200W의 출력을 내는 10개의 패널이 직렬로 연결되어 있다[3].



[Fig. 1] PV panels installed in USF campus

2.1 태양광 발전의 설치위치에 따른 출력특성

태양광 발전의 효율을 최대로 하기 위해서는 태양광 패널과 태양광이 이루는 입사각이 매우 중요하며, 태양광 패널과 태양광이 90°를 이루는 경우에 최대의 출력전압이 발생한다. 일반적으로 태양광과 태양광 패널이 이루는 각도가 40°보다 작게 되면 전기에너지로 변환되는 양이 매우 크게 감소하게 되며, 5°이하가 되면 출력이 거의 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 PV 패널의 발전효율을 최대화하기 위해서는 태양광 추적기를 설치하여 패널의 각도를 조정하는 것이 필요하지만, 가격적인 면에서 설치비용이 크게 증가하며 패널 각도의 이동에 에너지의 일부가 사용되는 문제점이 있다[1]. 따라서 본 마이크로 그리드 테스트베드에서는 고정된 형태의 태양광 패널을 사용하였으며, 패널의 설치하는 두 지역의 위도(27°46'N)를 고려하여 PV 패널의 각도를 25° 남쪽 방향으로 고정하였다. 본 연구에서 사용한 마이크로그리드가 설치된 지역에서의 태양광 패널과 태양광이 이루는 최적 각도의 계절에 따른 변화는 Table 1과 같다.

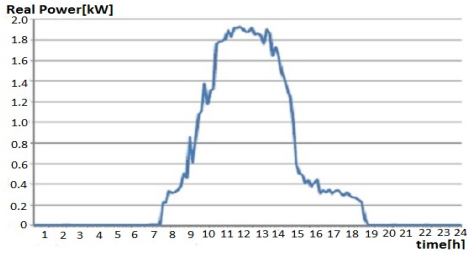
[Table 1] Optimal angle of PV panel depending on months

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Angle	44°	36°	28°	20°	12°	4°	12°	20°	28°	36°	44°	52°

Table 1의 자료로부터 태양광과 패널이 이루는 각도를 고려할 때 가장 출력 효율이 좋은 계절은 봄과 가을인 것을 알 수 있다. 또한 태양광의 밝기와 온도도 태양광 패널의 출력에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 태양광이 밝을수록 효율은 증가하지만, 패널 주위의 온도가 증가하면 효율은 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 Table 1에서 계절적으로 최적에 가까운 봄철의 태양광 출력을 나타낸 것으로, 그래프의 특성상 구름에 의해 출력값이 순간적으로 변하는 부분들이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이 때 전기적 출력이 지속된 시간은 11시간 40분이며 태양광 출력의 특성상 그래프의 오른쪽에 석양시에 나타나는 특성인 작은 출력이 지속되는 구간(knee)이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 태양광 패널의 최대 출력은 1.92kW로 패널의 최대 출력값인 2kW에 가까운 출력을 내고 있으며, 구름 등의 날씨조건에 의해 불규칙한 특성을 가지므로 태양광 패널에서 발생하는 하루 동안의 전체 전력량을 계산하기 위해 리만 적분식을 사용하였다.

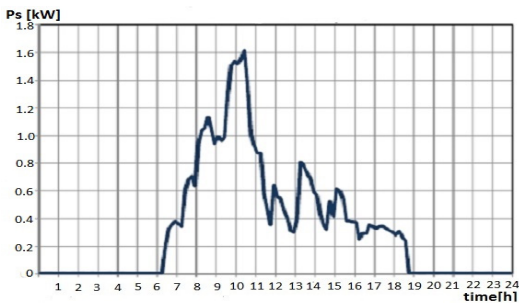
$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_i) \left(\frac{b-a}{n} \right) \quad (1)$$



[Fig. 2] PV output real power in optimal condition

식(1)에서 a, b는 적분구간으로 Fig. 2의 경우 태양광 전원이 비교적 큰 값의 출력을 내는 시간구간 뿐만 아니라 아주 작은 값의 출력을 내는 시간구간까지 모두 포함하였으며, 이때 시간간격은 모니터링 시간간격인 10분으로 하였다. 따라서 하루 24시간에 대해서 10분 간격으로 전체 144개의 적분구간에 대해서 식(1)의 리만 적분식을 사용하여 태양광 패널의 전체 출력 전력을 구하였고, 이때의 태양광 패널의 전체 출력 전력값은 11.94kWh으로 계산되었다.

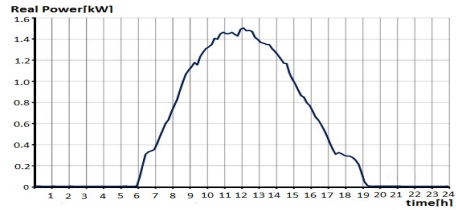
Fig. 3은 임의의 하루 동안의 태양광 패널의 출력을 나타낸 것으로 기상조건의 변화가 크게 나타난 경우로, Fig. 2와 비교하여 태양광이 PV 패널에 입사되는 시간이 불규칙하고 출력전력의 값이 작은 것을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 구름에 의해 패널이 가리는 현상이나 비, 안개 등의 기후적인 변화가 주원인이 된다. Fig. 3에서 태양광 패널 출력의 관측주기는 Fig. 2와 동일하게 10분 간격이며, 태양광 패널의 최대 정격출력이 2kW인데 비해 순간적인 최대 출력은 1.6kW로 약 80%이며, 전체 출력 전력량도 크게 감소한 것을 알 수 있다.



[Fig. 3] PV output real power with sudden change of weather

2.2 태양광 발전 출력의 평균값 계산

태양광 발전을 그리드에 연결하여 전력을 공급하거나 에너지 저장장치와 연계하여 태양광 전원의 출력 불확실성을 개선하기 위해서는 태양광 발전의 평균 출력에 대한 실험 데이터가 필요하다. 태양광 전원의 출력평균을 구하기 위한 데이터 해석시 날씨에 따라서 태양광 출력이 극단적으로 나타나는 경우를 최소화하고 보다 정확한 해석결과를 위해서는 보다 오랜 기간과 많은 시간구간에 대해서 데이터의 평균을 구할 필요가 있다. Fig. 4는 일반적인 조건에서 37일 동안의 태양광 패널의 전기적 출력을 10분 간격으로 데이터를 모니터링하여 시간구간별로 평균값을 구한 결과이며, 평균값을 구하기 위해 사용된 시간구간은 전체 5328개 이다.



[Fig. 4] Average value of PV panel output power

Fig. 4의 태양광 발전의 출력 평균값으로 나타낸 출력 곡선은 Fig. 2와 Fig. 3의 출력곡선에 비해서 훨씬 완만한 출력값의 변화를 보이며, 최대 출력값이 1.504kW이다. 식(1)의 적분으로 구한 하루 평균 전체 출력에너지는 11.95kWh로 계산되었으며, 따라서 태양광 패널이 발전을 하지 않는 밤 시간을 포함하여 37일 동안의 전기적 출력의 평균값은 0.49kW이다. 또 다른 관점에서 Fig. 4에서 태양광 패널이 출력을 내는 평균시간은 13시간 10분이었으며, 태양광 패널이 전기적 출력을 내는 13시간 10분 동안에는 평균 0.92kW의 전기적 출력을 발생하는 것을 알 수 있다.

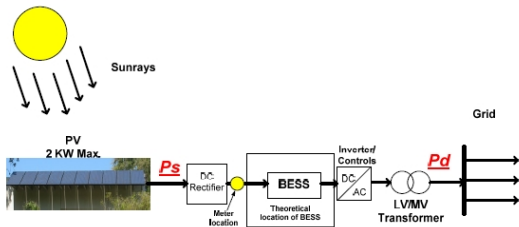
3. 태양광 전원과 배터리의 연계운전

태양광 발전은 또 다른 신재생에너지원인 풍력발전에 비해서 상대적으로 변동성이 더 크며, 발전원리상 낮 시간에만 출력이 가능한 특징을 갖는다. 즉 하루를 기준으로 약 반 정도의 시간동안 출력을 낼 수 없는 발전원이 되며, 이러한 단점을 극복하기 위해서는 에너지 저장장

치와의 연계운전이 반드시 필요하다.

3.1 태양광 패널과 에너지 저장장치의 연계

Fig. 5는 태양광 패널과 Li 에너지 저장장치의 연계상태를 나타내었다. 이 때 에너지 저장장치로는 LiFePO₄를 사용하였으며, LiFePO₄ 배터리는 다른 배터리에 비해 충전과 방전시에 메모리 효과가 거의 없으며, 배터리의 부피와 중량이 작아서 설치가 용이하고 사용시 안정성이 높으며 수명이 긴 장점을 갖는다[4]. 태양광 패널의 전기적 출력이 Li 에너지 저장장치에 직접 연결되어 Li 배터리를 통해서 그리드에 전력이 공급되며, Li 배터리의 출력은 인버터를 거쳐서 그리드에 공급된다[5,6].



[Fig. 5] Connections of PV and Li battery system

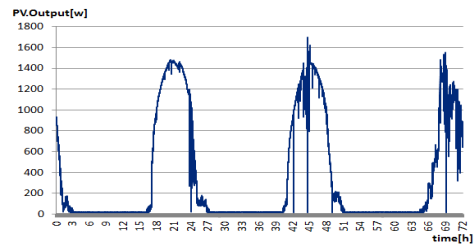
Fig. 5에서 P_s 는 태양광 패널의 출력을 나타내며 P_d 는 Li 배터리에서 그리드로 직접 공급되는 전력을 나타낸다. Fig. 5에서 태양광 패널과 Li 에너지 저장장치를 통해서 그리드에 공급되는 전력 P_d 가 일정한 값이 되도록 하면 태양광 전원이 이상적인 발전원으로서의 역할을 하게 된다. 이 때 배터리에 공급 또는 저장되는 전력 P_{BESS} 는 다음과 같이 태양광 발전의 출력과 그리드 공급전력의 차에 해당된다.

$$P_{BESS} = P_s - P_d \quad (2)$$

그리드에 공급되는 전력 P_d 는 일정한 값을 유지하는 것이 이상적이므로, 태양광 발전의 출력 P_s 가 그리드 공급전력 P_d 보다 큰 경우 Fig. 5의 Li 에너지 저장장치는 충전모드가 되어 식(2)의 태양광 전원의 출력과 그리드 공급전력의 차에 해당하는 전력량이 충전되게 되며, 태양광 발전의 출력 P_s 가 그리드 공급전력 P_d 보다 작은 경우는 Li 에너지 저장장치는 방전모드가 되어 식(2)의 태양광 전원의 출력으로는 모자라는 만큼의 전력을 그리드에 공급하게 된다.

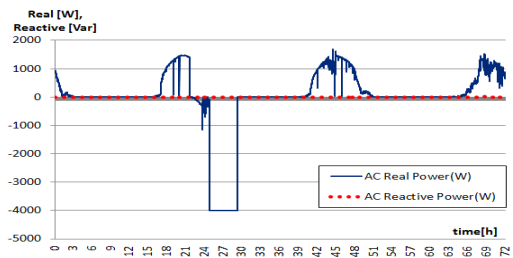
3.2 태양광 패널과 에너지 저장장치의 과부하시 동작특성 해석

태양광 패널과 Li 에너지 저장장치의 연계운전시 임의로 3일 동안의 시간구간을 선정하여 태양광 전원의 발전특성과 그리드 부하의 급격한 동작에 의한 Li 배터리의 동작특성을 해석하였다. Fig. 6은 Fig. 5에 보인 마이크로 그리드 운용데이터 중에서 임의로 선정한 3일 동안의 시간구간에서 태양광 전원의 출력특성을 나타낸 것이다. Fig. 8의 태양광 발전의 출력특성은 관찰구간인 3일 동안의 날씨조건에 차이가 많이 발생하여 태양광 전원의 출력특성이 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다.



[Fig. 6] PV output power during 3 days

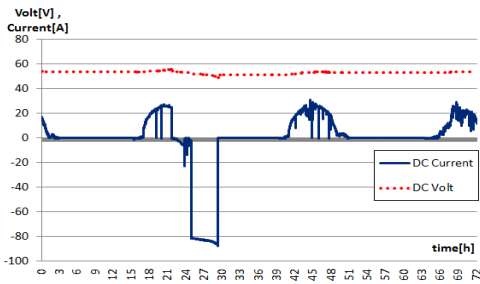
Fig. 7은 태양광 전원과 연계된 배터리 인버터의 입출력 전력을 나타낸 것으로 그리드에 4kW의 부하가 24시 56분부터 29시 21분까지 4시간 25분 동안 동작하는 경우를 가정하였다. 이는 본 실험에서 사용한 Li 배터리의 최대설비용량인 20kWh의 약 90%에 해당하는 부하량으로, 태양광 전원과 Li 배터리가 연계된 마이크로 그리드에서 과부하 운전조건인 경우의 Li 배터리의 성능평가 및 동작특성 분석을 목적으로 한 것이다.



[Fig. 7] Input and output power of Li battery

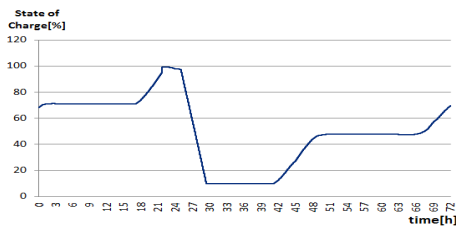
Fig. 8은 Fig. 7의 마이크로 그리드 운전조건일 때 Li 배터리의 15개 셀 전체의 출력전압과 전류를 나타낸 것으로 그리드에 큰 값의 부하가 동작되는 시간구간에서

배터리의 전압이 최대 55.85V에서 48.84V로 감소하는 것을 알 수 있다. Li 배터리의 전류는 배터리에 유입되는 전류와 유출되는 전류의 차를 나타낸다. 태양광 전원이 출력을 내는 시간구간에서 배터리로 유입되는 전류는 최대 29.3A이며, 그리드 부하 동작시 배터리에서 그리드로 공급되는 전류는 최대 87.6A로 관측되었다. 그리드 부하가 동작하는 전체 시간구간에서 배터리에서 그리드로 공급되는 전류는 최소 80A 이상의 전류값이 관측되어 태양광 전원의 출력에 의해 배터리에 유입되는 전류값에 비해 배터리의 방전이 매우 급격하게 이루어지고 있음을 나타낸다.



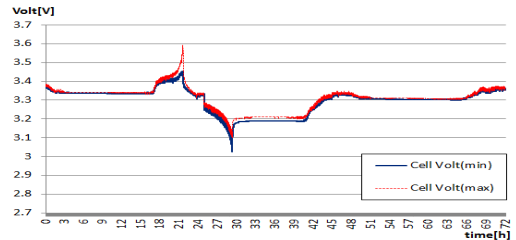
[Fig. 8] DC voltage and current of Li battery

Fig. 5의 마이크로 그리드 운전조건에서 Li 배터리의 충전율은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 태양광 전원이 출력을 내는 시간구간에서는 Li 배터리의 충전율이 상승하며 이 때 상승 기울기는 태양광 전원의 출력량에 따라서 달라지는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 배터리의 충전율이 감소하기 시작하는 24시 56분부터 29시 21분까지 4시간 25분 동안에 4kW의 크기를 갖는 부하가 동작하는 시간구간으로 배터리의 충전률이 100%에서 10%로 크게 낮아진 것을 알 수 있다. 이러한 경우는 그리드의 예상 최대부하가 동작하는 경우를 가정할 운용조건으로 단기간의 급격한 방전으로 Li 배터리의 동작조건이 악조건에 해당되는 운용조건이라 할 수 있다.



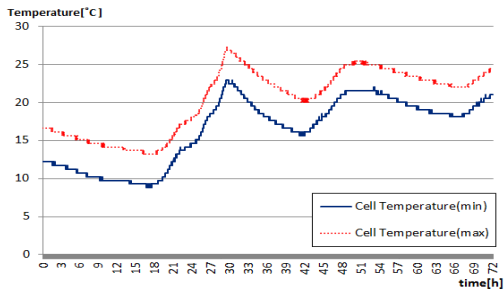
[Fig. 9] State of charging ratio for Li battery

Fig. 10은 Fig. 7의 마이크로 그리드 운전조건일 때, Li 에너지 저장장치의 15개 셀 각각의 출력전압의 최대값과 최소값을 관측한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 Li 배터리의 충전율이 최대인 순간에 Li 셀의 출력전압도 최대 3.6V에서 최소 3.45V의 값을 가지며, 그리드 부하가 동작하여 Li 에너지 저장장치의 충전율이 10%까지 감소한 시간구간에서 Li 배터리 셀의 출력전압도 최대 3.1V에서 최소 3.02V사이의 값을 갖는 것을 나타낸다. 이때 Li 배터리 셀의 최대 출력전압을 기준으로 충전율이 100%에 가까운 경우에서 충전율이 10%로 감소한 경우 Li 배터리 셀의 출력전압은 16.13% 감소하였고, Li 배터리 최소 출력전압을 기준으로 같은 조건에서 12.58%의 전압변동율을 갖는 것을 알 수 있다.



[Fig. 10] Li battery cell output voltage

Fig. 11은 Fig. 7의 마이크로 그리드 운전조건에서, Li 에너지 저장장치 셀 각각의 측정온도의 최대값과 최소값을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 Li 에너지 저장장치의 셀 온도는 그리드 부하가 동작하여 배터리의 충전율이 10%까지 감소하였을 때 Li 배터리 셀의 온도가 최대로 상승하게 되며 이는 4시간 25분 동안의 그리드 부하의 동작에 의한 배터리의 급격한 방전운전에 기인한다. Li 배터리 15개 셀 중에서 최대 온도값을 기준으로 그리드 부하 동작이전의 13.2°C에서 Li 배터리의 충전율이 10%에 도달할 때까지 26.8°C로 셀 온도가 상승하였으며, Li 배터리 셀 중에서 최소 온도값을 기준으로 같은 조건에서 8.8°C에서 22.9°C로 셀 온도가 상승한 것을 알 수 있었다. 부하동작에 의한 Li 배터리의 온도상승은 Li 배터리의 허용온도범위인 40°C 보다 작은 값이며, 본 실험에서와 같은 배터리의 급격한 방전에 대해서도 Li 배터리 셀 온도가 허용온도 범위 안에서 유지되는 것을 알 수 있다.



[Fig. 11] Li battery cell temperature

4. 결론

본 논문은 태양광 전원과 Li 에너지 저장장치를 포함하는 마이크로 그리드의 운영특성 해석에 대한 것으로, 논문에서 사용한 마이크로 그리드 실험장치는 USF의 대학 캠퍼스내에 설치되어 다양한 계통조건에 대해 태양광 전원과 Li 배터리의 성능평가와 동작특성 분석을 목적으로 운영되고 있다. 본 실험에서는 태양광 전원의 발전시간의 제한과 출력의 불확실성이라는 문제점을 해결하기 위해 Li 에너지 저장장치와 연계하여 그리드에 일정한 전력을 공급할 수 있도록 마이크로 그리드를 구성하였다. 태양광 전원의 출력의 불확실성을 줄이기 위해 태양광 전원의 출력에 대한 오랜 기간 동안의 데이터를 분석하여 출력의 평균값을 산출해 내었으며, 이는 태양광 전원에 직접 연결되어 그리드에 안정적인 전력을 공급하기 위한 Li 에너지 저장장치의 적정 용량산정과 운용방식에 꼭 필요한 데이터이다. 마이크로 그리드를 구성하고 있는 태양광 전원과 Li 배터리의 성능평가 및 동작특성 분석을 위해 Li 배터리 설비용량의 90%에 해당하는 과부하가 동작되는 계통조건에 대해 마이크로 그리드의 운영실험을 하였으며, 이러한 과부하의 악조건에서 태양광 전원의 동작특성과 Li 배터리 각 셀에서의 입출력 전압과 전류, 온도 그리고 마이크로 그리드 운전조건에 따른 Li 배터리 전체의 출력전압과 전류 그리고 충전율과 그리드에 공급되는 전력에 대한 세부적인 실험결과를 제시하였다. 마이크로 그리드의 다양한 운전조건에 대한 태양광 전원과 Li 배터리의 성능평가와 동작특성 분석에 대한 실험결과는 마이크로 그리드의 활용 및 보급에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

References

- [1] Ali Keyhani, Smart power grid renewable energy systems, Wiley, 2010.
- [2] M. Hashem Nehrir, Caisheng Wang, Modeling and control of fuel cells, Wiley, 2009.
- [3] Islam M., Omole A. Islam A. Domijan A, "Dynamic capacity estimation for a typical grid-tied event programmable LiFePO4 battery", Energy Conference and Exhibition, 2010 IEEE International, pp.594-599, Dec. 2010.
- [4] X. Yuan, H. Liu, J. Zhang, Lithium-ion batteries, CRC press, 2011.
- [5] Amimaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-sourced converters in power systems, Wiley, 2009.
- [6] GreenSmith Energy Management Systems LLC. <http://greensmith.us.com/>

김 덕 영(Deok Young Kim)

[정회원]



- 1996년 8월 : 고려대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2001년 7월 ~ 2002년 8월 : 미국 Georgia Tech. Post-doc. Fellow
- 2008년 7월 ~ 2010년 1월 : 미국 University of South Florida 교환 교수
- 1996년 9월 ~ 현재 : 군산대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전력계통, 스마트그리드, 신재생에너지