

HILS를 이용한 신재생 에너지원이 포함된 에너지 저장시스템의 운영 시나리오 개발

Development of Operation Scenarios by HILS for the Energy Storage System Operated with Renewable Energy Source

신 동 철* · 전 지 환** · 박 성 진** · 이 동 명*
(Dong-Cheol Shin · Jee-Hwan Jeon · Sung-Jin Park · Dong-Myung Lee)

Abstract - According to government policy, renewable energy facility such as solar power generation is being implemented for newly constructed buildings. In recent years, the introduction of Energy Storage System (ESS) served as an emergency power for replacing an existing diesel generator has been increasing. Furthermore, in order to expand the efficacy of the ESS operation, operation in combination with renewable energy sources such as solar and wind power generation is increasing. Hence, development of the ESS operation algorithms for emergency mode as well as the peak power cut mode, which is the essential feature of ESS, are necessary. The operational scenarios of ESS need to consider load power requirement and the amount of the power generation by renewable energy sources. For the verification of the developed scenarios, tests under the actual situation are demanded, but there is a difficulty in simulating the emergency operation situation such as system failure in the actual site. Therefore, this paper proposes simulation models for the HILS(Hardware In the Loop Simulation) and operation modes developed through HILS for the ESS operated with renewable energy source under peak power reduction and emergency modes. The paper shows that the ESS operation scenarios developed through HILS work properly at the actual site, and it verifies the effectiveness of the control logic developed by the HILS.

Key Words : Energy Storage System(ESS), HILS, Renewable energy, Emergency operation, Grid connected operation

1. 서 론

정부는 2012년 이후 급격히 증가하는 정부 재정의 부담을 줄이고자 신재생에너지원에 대한 발전차액지원제도를 중단하고 신재생에너지 공급 의무화하도록 하였다. 이러한 조치는 발전차액 지원제도가 급변하고 있는 세계 시장 정세에 대한 빠른 대응과 보급 규모의 예측 및 소요재원의 충당이 어렵기 때문이다. 이와 같은 상황 변화에 따라 신재생 에너지 발전원이 적용된 전력계통 및 에너지 저장 시스템에 대한 관심이 크게 대두되기 시작했다 [1]. 한편, 신재생 에너지 중 태양광은 설비 유지 및 보수에 대한 부담이 적고 청정 빛에너지를 사용함으로써 가장 주목 받는 에너지원이다 [2]. 그러나, 태양광 발전은 환경 조건에 따라 변동하는 발전량으로 인해 계통 전체의 출력 변동을 야기하는 단점이

있다. 이를 해결하기 위해 기존 태양광 발전 시스템에 ESS(에너지 저장 시스템, Energy Storage System)를 추가한 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다 [3].

ESS는 일반적으로 전력 수요가 적을 때 혹은 전력단가가 낮을 때 에너지를 저장하였다가 전력 수요가 많은 피크 부하 시간에 저장된 에너지를 방출하여 피크 전력 저감하는 것이 주 목적이다 [4], [5]. 또한, ESS는 최근에는 정전과 같은 전력망 사고의 대처 방안으로 비상발전기를 대체하는 연구가 진행되고 있다 [6]. 비상발전기로는 주로 디젤 발전기가 사용되고 있으며 [7], [8], 이를 ESS로 대체시 이산화탄소 배출 및 소음, 진동이 없을 뿐만 아니라, 전원 고장 등의 비상운전 시 즉시 전력 공급이 가능하여 빠른 대응이 가능하다. 또한 ESS는 디젤발전기에 비해 실시간으로 작동을 파악할 수 있어 정전 시 비상발전기가 작동하지 않는 상황의 방지가 가능하다. 이와 더불어, 태양광과 풍력과 같은 신재생 발전원을 ESS에 결합하여 ESS의 동작 시간을 확대하려는 연구가 진행되고 있어 비상 운전 시간의 증대 및 피크전력 저감량 확대를 가져올 수 있다.

신재생원이 포함된 ESS의 제어 동작 알고리즘의 개발을 위해서는 다양한 부하의 패턴과 날씨에 따라서 변동 폭이 큰 신재생 에너지원의 발전량을 고려한 알고리즘 개발 및 적용이 필요하다.

* Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

E-mail: dmlee@hongik.ac.kr

* School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

** Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Korea.

Received : August 3, 2017; Accepted : January 4, 2018

그러나, 다양한 패턴의 부하와 신재생 에너지원의 발전량을 고려한 제어전략을 실 부하 조건에서 테스트하기에는 경비 및 시간적인 제약이 따른다. 또한 전원 고장에 따른 정전에서의 동작성 확인 및 알고리즘 개발 등을 실제 운전 조건에서 검증하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 운전 기법을 HILS (Hardware In the Loop System)를 통해 개발하고자 한다.

HILS는 Hardware In the Loop System의 약어로 하드웨어와 소프트웨어가 결합된 실시간 시뮬레이션 기술이다. 자동차, 항공기, 선박 등에서 제어 시스템 알고리즘을 시험하거나 새로운 시스템이 제대로 적용하는지 확인하는데 주로 사용되었고, 현재는 배터리 관리 시스템의 알고리즘 검증 등으로 에너지 저장 시스템을 포함한 전력계통의 연구에도 적용이 가능하다. 주된 목적은 복잡한 시험의 수행이나, 실험이 용이하지 않은 시스템에 대한 동작 확인을 목적으로 한다. HILS를 통한 알고리즘 개발 사례는 최근 증가하는 추세이다[9]-[11]. HILS를 통해 개발하려는 하드웨어는 제어기 혹은 PCS(Power Conditioning System) 등이다.

본 논문을 통해 ESS에서 중요 부품인 배터리에 대한 HILS 시스템에 대하여 구성 및 모델을 제시하려 한다. 본 연구에 사용된 HILS 장비는 종래의 연구 등에서 사용하는 HILS 장비에 비해 비교적 저속의 장비이다. 배터리와 같은 단품을 HILS를 통해 테스트하는 구성사례 및 운영 모델을 보인다. 본 연구는 ESS의 운전 알고리즘에 따른 배터리의 동작을 실험하는 것이 목적이다. 본 연구의 ESS는 신재생 에너지원으로서 태양광 발전이 결합된 형태이며, HILS를 통해 개발하고자하는 것은 ESS의 계통 연계 모드와 비상 운전 모드 시나리오이다. 즉, 태양광 발전의 발전량과 가변하는 부하 전력량을 고려한 피크 전력 저감 및 비상 운전 모드의 알고리즘의 개발 및 검증이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실험에 사용된 운용 알고리즘의 구현에 대해 설명한다. 계통 연계시에는 피크 전력 저감 기법으로 전기 요금을 절약하고 계통 고장 시 즉 비상 운전 모드인 경우에는 태양광 발전량과 비상부하 요구량에 따라 배터리의 충·방전 동작을 통해 안정된 발전량을 비상부하에 공급하여 그에 따른 피해를 방지할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 3장에서는 HILS의 구성 및 HILS를 통한 개발된 알고리즘의 동작 결과와 본교의 ESS의 개발된 알고리즘의 적용에 따른 동작 상태를 보임으로써 본 연구의 유용성을 보인다.

2. ESS 운영 시나리오

2.1 ESS와 신재생에너지의 계통 연계 구성

본 연구의 에너지 저장 시스템(ESS)의 계통연계 구성은 그림 1과 같다. 건물 부하에 ESS가 연계되어 있고, 신재생 에너지원으로서 태양광 발전원(PV, photovoltaic)이 계통에 연계되어 있다. EMS(Energy Management System)을 통해서, 태양광의 PCS와 ESS의 PCS에 대해 운전 지령을 주도록 한다. 한편, ACB는 Air Circuit Breaker의 약어이다.

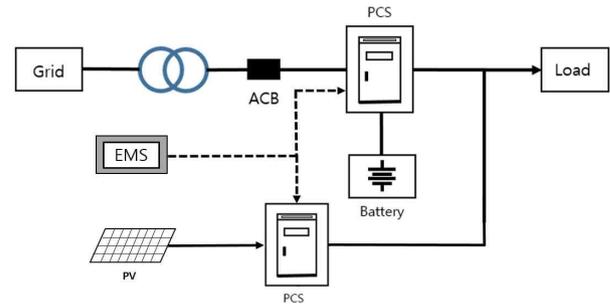


그림 1 HILS를 통해 운용 알고리즘을 개발할 태양광 에너지원이 포함된 에너지 저장 시스템(ESS)

Fig. 1 Energy Storage System(ESS) with photovoltaic sources, whose algorithms developed through HILS

2.2 운영 시나리오를 적용할 장소의 전력 요금

ESS에 적용하기 위한 운영시나리오를 구성하기 전에 먼저 부하 및 전력 요금의 확인이 필요하다. 현시점에서 한국전력에서 정하고 있는 계절별, 시간대별 부하 분류는 표 1과 같다. 표 2는 현 시점에서의 본교에 적용되는 요금표이다. 표 2에서 알 수 있듯이 경부하 시간대와 최대 부하 시간대의 가격을 고려하면, 소비 전력 변동이 심한 여름과 겨울철에는 2배 이상의 요금 차이를 알 수 있다. 따라서 ESS를 최대부하 시간에는 피크부하 저감을 위해 방전을 하고, 경부하 시간대는 충전 동작을 수행하여 전력 요금을 낮출 수 있음을 알 수 있다.

표 1 계절별·시간대별 부하 분류

Table 1 Load classification by season and time

계절	여름철	봄·가을철	겨울철
경부하	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
중간 부하	09:00~10:00	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	17:00~23:00	20:00~22:00
최대 부하	10:00~12:00	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	13:00~17:00	17:00~20:00 22:00~23:00

표 2 교육용 유형 전력 요금표

Table 2 Eul type fare applied to schools

구분	기본요금 (원/kWh)	전력량요금 (원/kWh)			
		시간대	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
고합 A 선택 2	6,980	경부하	45.3	45.3	49.3
		중간부하	90.0	59.7	88.5
		최대부하	155.9	80.2	127.2

2.3 신재생원이 포함된 ESS 장치의 운영시나리오

본교에 설치된 ESS의 용량, 태양광 발전량, 비상 부하 및 운영 조건은 아래와 같다. 여기서, SoC는 State of Charge의 약어이다.

배터리 용량: 총 500kWh
 PV 발전량(건물 옥상 설치): 최대 50kW
 최대 비상 부하 전력: 147kW
 비상 부하 운전 지속 요구 시간: 2시간
 최대 비상 부하 전력량: 147kW*2시간=294kWh

앞서 설명한바와 같이 ESS 운영 시나리오는 크게 계통 연계 모드와 비상 운전 모드 두 가지로 나누어진다. ESS가 종래 디젤 발전기의 역할인 비상 발전기로서 동작해야 하므로, 비상 운전 시 부하는 목표 운전시간인 2시간 동안 PV와 ESS로부터 전력을 공급받아야 한다. 이를 위해 계통 연계 모드 시에는 비상시 동작을 위하여 ESS는 항상 일정량 이상의 SoC를 유지해야 한다. 최대 비상 부하 전력으로 2시간 동안 사용될 시, 필요 전력량은 294kWh이고 PV의 발전량이 0kW 경우를 대비하여 배터리의 비상시 대비 용량을 300kWh로 설정하였다. 이 용량은 SoC 60%에 해당하므로 비상시 전력공급을 대비하기 위하여 최저 SoC값을 60%로 설정하였다.

표 3은 계통 연계 모드 시 계절에 따른 부하 시간대에 따라 ESS의 동작을 구분한 시나리오로 봄·여름·가을일 때에 해당한다. 표 3에 따라 봄·여름·가을에 적용되는 ESS의 운전 시나리오 순서도는 그림 2와 같다. 겨울 기준으로 ESS 운영 순서도는 그림 3과 같다. 지면의 제약으로 겨울철 운전 시나리오에 대한 설명은 생략한다.

표 3에 해당하는 계통 연계모드 시나리오의 기본 배경은 경부하 시간에는 낮은 요금을 통해 ESS는 충전을 진행하고 상대적으로 높은 요금 시간인 최대부하시간에 방전한다. 또 중간부하 시간 중 최대부하 시간 사이에 있는 중간부하시간은 다음 최대부하 시간간의 피크전력 저감을 위하여 충전을 하며 그 외의 중간부하 시간에는 충·방전 동작을 멈추는 것을 기본으로하여 작성되었다. 그에 해당하는 상태를 시나리오에서는 state를 통해 정해졌다. 다만 실험시 안전성을 위해 배터리의 충전 상한은 90%로 정하였다. ESS의 충·방전량은 SoC 60~90%를 사용하므로 총 용량의 30%에 해당하는 양을 충·방전시간으로 나눠서 시간 단위로 일정하게 유지시킨다. 그에 따른 ESS 충·방전 지령치는 식 (1)과 같다. 한편, 경부하시간은 10시간으로 다른 부하 시간대 보다 길다. 이로 인해 1시간 동안 ESS 총 용량의 30%에 해당하는 양을 빠르게 충전시켜 State 2가 되도록 하였다.

$$ESS\text{충}\cdot\text{방전량} = ESS\text{용량} \times 0.3 \div \text{충}\cdot\text{방전 시간} \quad (1)$$

비상운전 시나리오 순서도는 그림 4와 같다. 비상부하량이 태양광 발전량보다 클 경우 ESS에서 방전을 통해 나머지 비상부하량을 충당하고, 비상부하량이 태양광 발전량보다 작을 경우 태양

광 발전량 중 부하에 전달하고 남은 잉여 태양광 발전량을 ESS에 충전시키도록 한다. 다만, SoC가 0% 이하 일 때 방전이 되는 상황과 SoC가 90% 이상 일 때 충전하는 상황일 땐 배터리 보호를 위해 동작을 정지시키도록 했다. 그에 해당하는 상태를 앞과 동일하게 시나리오에서는 state를 통해 정해주었으며 계통 연계 운전시의 state와 겹치지 않도록 음의 값으로 설정했다.

표 3 ESS의 운전 시나리오(계통 연계모드, 봄, 여름, 가을기간)
 Table 3 ESS operation scenario of grid-connected mode for spring, summer, and autumn seasons

시나리오	모드	SoC	부하 상태	배터리 충·방전 지령치
State 1	계통 연계	SoC<90%	경부하 23시~9시	충전 150kW
State 2	계통 연계	SoC>90%	경부하 23시~9시	정지
State 3	계통 연계	SoC>60%	최대부하 10시~12시	방전 75kW
State 4	계통 연계	SoC<60%	최대부하 10시~12시	정지
State 5	계통 연계	SoC>60%	최대부하 13시~17시	방전 37.5kW
State 6	계통 연계	SoC<60%	최대부하 13시~17시	정지
State 7	계통 연계	SoC<90%	중간부하 12시~13시	충전 150kW
State 8	계통 연계	SoC>90%	중간부하 12시~13시	정지
State 9	계통 연계	-	중간부하 09시~10시 17시~23시	정지

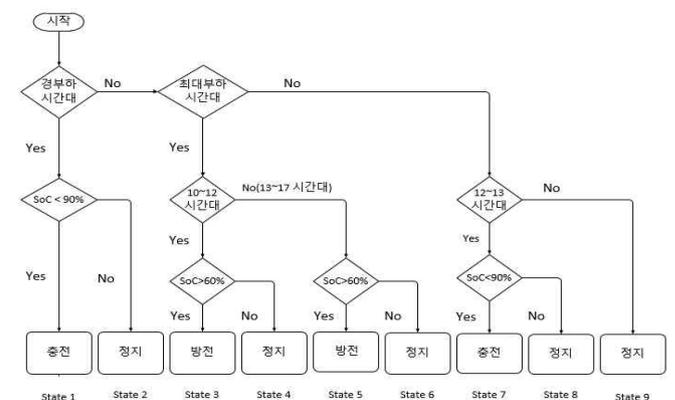


그림 2 ESS의 운전 시나리오의 순서도(계통 연계모드, 봄, 여름, 가을기간)

Fig. 2 Flowchart for the ESS operation scenario of grid-connected mode for spring, summer, and autumn seasons

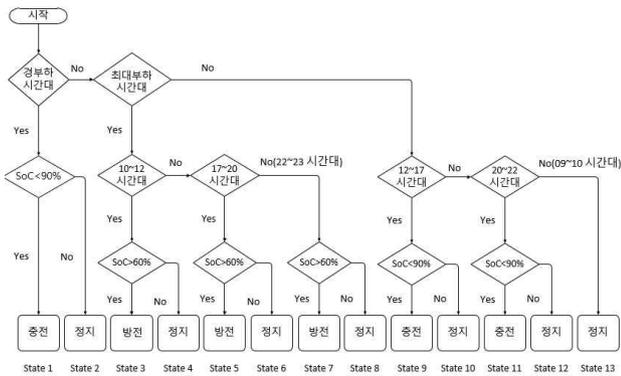


그림 3 ESS의 운전 시나리오의 순서도(계통 연계모드, 겨울기간)
 Fig. 3 Flowchart for the ESS operation scenario of grid-connected mode for winter season

그림 5는 HILS 실험에 사용할 데이터로 시나리오가 운영될 본 대학의 비상 부하량과 4월 10일자 태양광 발전량의 실측데이터이다. 데이터의 태양광 발전량은 오전 7시경 발전을 시작하여 일조량이 가장 큰 13시경에 약 44.3kW로 최대 발전량을 보이고 19시이후 발전을 멈추었다. 비상부하량은 본교 미술 강의동에 설치된 승강기, 환기 시설, 조명 시설, 비상 배수 시설 등의 전력량이다. 비상부하량의 경우 05시에 조명 시설과 환기 시설이 가동되어 일시적으로 상승하고 학생들의 이동이 많은 09시부터 12시 사이에 147kW의 최대 부하량을 보였다. 본교의 강의동이 저녁수업과 학생들의 야간 과제 수행 활동이 많은 미대강의동이라는 특성상 17시부터 23시까지 부하량이 증가하는 패턴을 보인다. 실험에 사용될 이 데이터는 비상부하보다 태양광 발전이 큰 경우, 작은 경우 두 가지 모두 포함하는 데이터로 예측 불가한 비상부하량과 태양광 발전량의 변화에 모두 대처가 가능한지 확인할 수 있는 적합한 부하 형태로 생각된다.

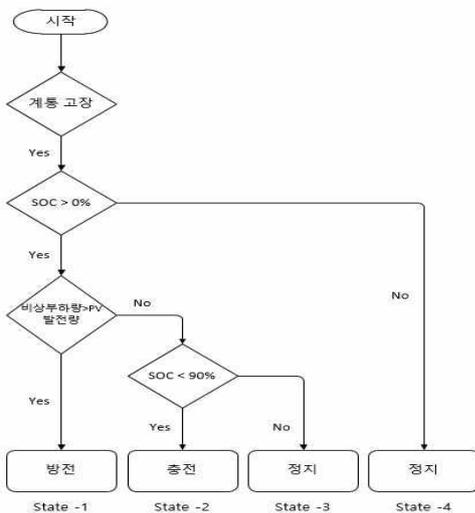


그림 4 비상 운전 시나리오의 순서도
 Fig. 4 Flowchart of emergency operation mode

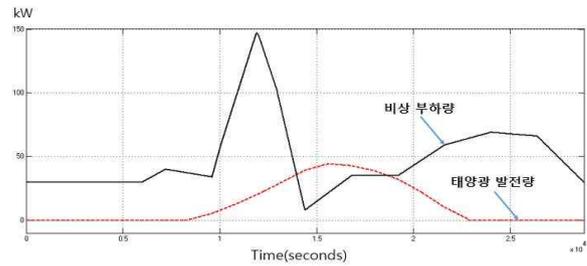


그림 5 본교의 ESS와 연계된 태양광 발전의 전력량 패턴 및 비상부하의 전력량 패턴

Fig. 5 Patterns of the solar power generation and the emergency load in the school where the ESS operates

3. HILS를 통한 운영시나리오 검증

3.1 HILS의 구성

Hardware In the Loop Simulation System 즉 HILS 시스템은 구성품의 실험을 위해 대상 컴포넌트를 하드웨어로 사용하여 시뮬레이션을 수행한다. 본 연구에서는 ESS의 계통연계 운전과 비상 운전 시나리오를 MATLAB/Simulink 모델을 이용하여 구현하고 실험에 사용된 5kWh급 배터리(SP44-29E-114)는 그림 6과 같이 학교에 설치된 500kWh급 배터리(SPS744-29E-684)에서 한 개의 Tray에 해당하는 배터리를 HILS 실험의 하드웨어로 사용하였다.

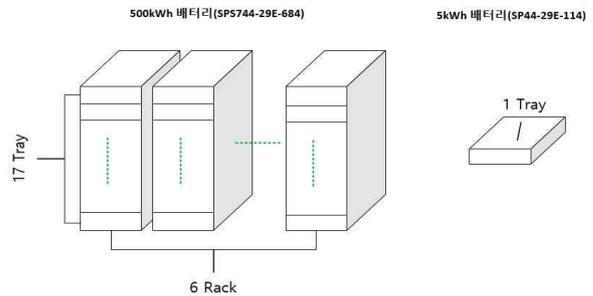


그림 6 ESS의 배터리와 HILS 실험에 사용된 배터리 구성
 Fig. 6 The battery installed in ESS of our school and the battery used in the HILS experiment

실험 장치 구성은 그림 7과 같다. 배터리 충전과 방전을 수행하는 Programmable DC Power Supply(이하 P.S), Programmable DC Electric Load(이하 E.L), ESS 시나리오를 수행하는 Target PC(NI PXIe-1078)와 검증 대상 하드웨어인 배터리(5kWh)로 구성된다. 태양광 발전 및 그리드 전력의 모사는 P.S를 사용하고 건물의 일반부하 및 비상부하의 모사는 E.L를 사용한다. ESS의 운영 시나리오 시뮬레이션 프로그램은 Target PC를 통해 진행되며 시뮬레이션에 따라 충전 혹은 방전 지령치를 P.S 혹은 E.L로 전송하고 그에 따른 배터리의 결과 값을 받아서

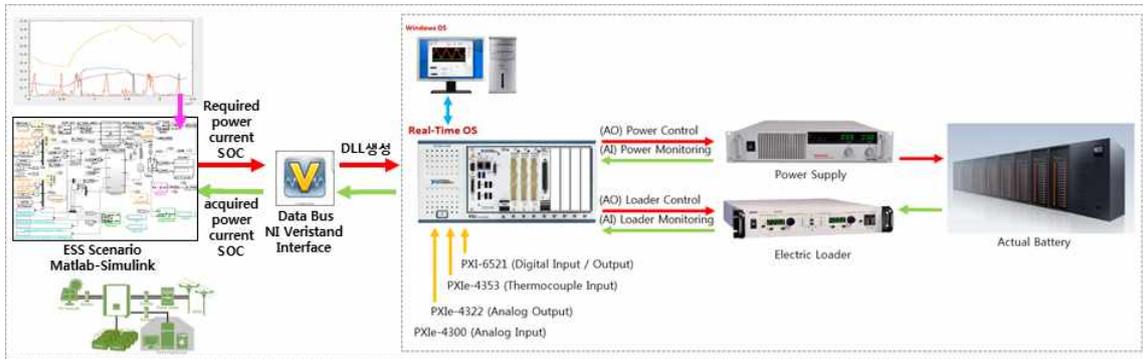


그림 7 HILS의 구성도
Fig. 7 Configuration diagram of HILS

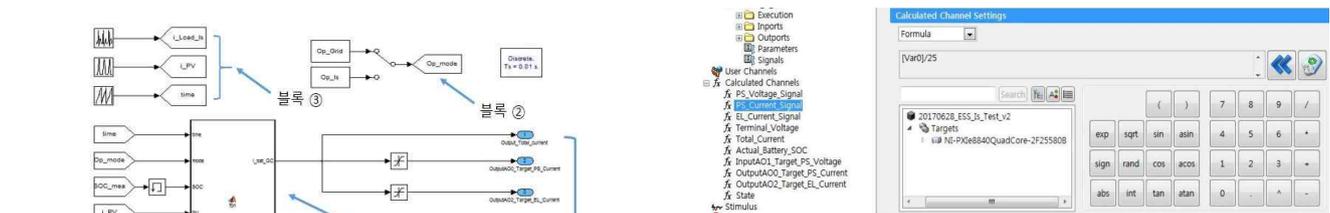


그림 8 HILS 실험에 사용된 ESS 운영 시뮬링크 모델
Fig. 8 Simulink model used in development of ESS operation scenarios

실험을 진행한다. 실험의 결과 값은 Host PC 실시간으로 모니터링 된다. 통신은 모두 실 시간으로 빠른 통신을 하기 위해 Analog통신을 사용하였으며, AO와 AI는 아날로그 입력과 출력에 의미한다.

3.2 HILS에 적용한 ESS 운영시나리오 모델

그림 8은 ESS 운영알고리즘에 대한 MATLAB/Simulink 모델이다. 블록 ①은 운영 시나리오 함수 블록이다. 블록 ②를 통해 계통 연계 운전 모드와 비상 운전 모드를 정해주게 되고, 블록 ③을 통해 그림 5에 해당하는 시간, 태양광 발전량, 비상부하량을 전달받는다. 실제 배터리의 전압, 전류, 초기 SoC 값은 HILS를 통해 블록 ④로 입력되며, 블록 ⑤는 하드웨어로 들어갈 출력으로 위에서부터 순서대로 전체 전류를 측정하기 위한 출력, 배터리의 충전을 수행시키기 위한 P.에 인가될 출력, 배터리의 방전을 수행시키기 위한 E.L에 인가될 출력, 배터리의 실제 SoC를 측정하기 위한 출력에 해당한다. Matlab/Simulink에서 구성된 출력 전압, 전류 출력치를 Target PC에서 사양에 맞는 아날로그 신호로 변환하기 위해 그림 9와 같이 P.S는 스펙에 해당하는 60V/250A(10V 제어)를 이용하여 식 (2)와 같이 하였다. E.L 또

그림 9 Target PC에서의 파워 서플라이(P.S) 입력 설정
Fig. 9 P.S input setting on Target PC

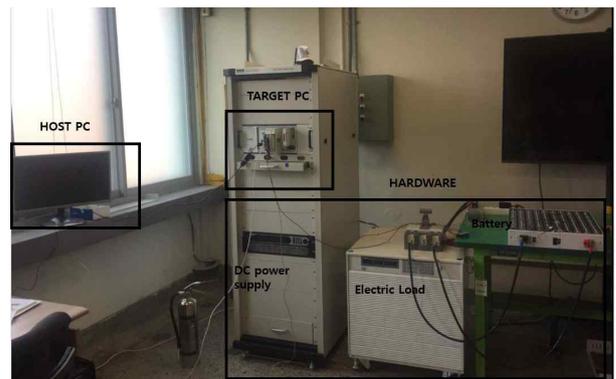


그림 10 HILS의 구성 사진
Fig. 10 HILS used in the experiment

한 스펙 60V/1000A(10V 제어)를 이용하여 식 (3)과 같이 변환 후 다운로드 가능한 DLL파일로 컴파일한다.

$$P.S \text{ Input} = AO_Target_PS_current(output) \div 25 \quad (2)$$

$$E.L \text{ Input} = AO_Target_EL_current(output) \div 100 \quad (3)$$

이 아날로그 신호들이 P.S 혹은 E.L 장비를 지령하여 배터리의 충·방전시킨다. 또한 실시간으로 배터리의 전압과 SoC를 읽어 Target PC로 전달해 시뮬레이션으로 피드백 되는 시스템을 구성하였다. 그림 10은 앞에서 설명한 HILS의 사진이다. 배터리 충·방전지령은 식 (4)와 같다. 이는 표 4의 배터리 사양을 이용

해 1C-rate인 114Ah를 배터리의 정격 충·방전량으로 설정한 경우이며, 식 (1)에 따른 ESS 충·방전 요구량과 ESS용량을 이용하여 구했다.

$$\text{전류지령치}([A]) = 114([Ah]) \times \text{ESS충·방전요구량}([W]) \div \text{ESS 용량}([Wh]) \quad (4)$$

표 4 실험에 사용된 배터리 사양

Table 4 Specification of the battery used in the HILS experiments

항목	내용	항목	내용
공칭전압	43.8V	공칭용량	114Ah
운전전압	36~48.6V	충전전압	48.6V
충전전류	28.5A (0.25C-rate)	방전전류	57.0A (0.5C-rate)

한편, SoC의 검출 방법은 coulomb counting method, open circuit voltage method, Kalman Filter estimation 등 여러 가지로 제안되고 있다[12]-[14]. 본 논문에서는 배터리의 충·방전 상황을 실시간을 제어해야하는 시간적인 제약 등을 고려하여 식 (5)로 표시된 coulomb counting methods를 이용하여 SoC를 계산하였다. 여기서, C_N 는 배터리 정격 용량이며, 실험에 사용된 정격 용량 114Ah를 대입하면 식 (6)와 같다. SoC_0 는 배터리 SoC의 초기치이다.

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{C_N \times 3600} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{114 \times 3600} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (6)$$

실험은 시나리오 상 시간인 24시간을 기준으로 1/3로 축소한 8시간으로 스케일링했으며 식 (7)과 같이 28,800초가 24시간에 해당한다. 그에 따라 전류지령치는 식 (4)에 3배를 취한 식 (8)을 사용하였다.

$$\text{실험에 사용된 하루} = 24\text{시} \div 3 = 8\text{시간}(28800\text{초}) \quad (7)$$

$$\text{실험에 사용된 전류지령치} = \text{식 (4)} \times 3 \quad (8)$$

3.3 HILS 실험 결과

그림 11, 12는 여름(6~8월) 기준 계통 연계 시나리오 실험 결과이다. 그림 11은 HILS를 통해 실시간으로 측정된 배터리의 전압, 배터리에 유입된 전류, state, SoC의 파형이다. 그림 12는 Host PC에서 측정되는 값들을 엑셀 데이터로 저장 후 MATLAB을 이용하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림 12를 통해 배터리 전압, 배터리 전류, state, SoC 등이 운영 시나리오와 일치하는 값을 확인할 수 있다.

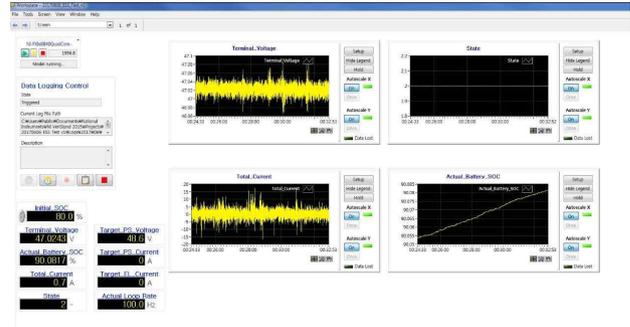


그림 11 Host PC에 표시된 HILS 실험 결과

Fig. 11 HILS results displayed on the host PC

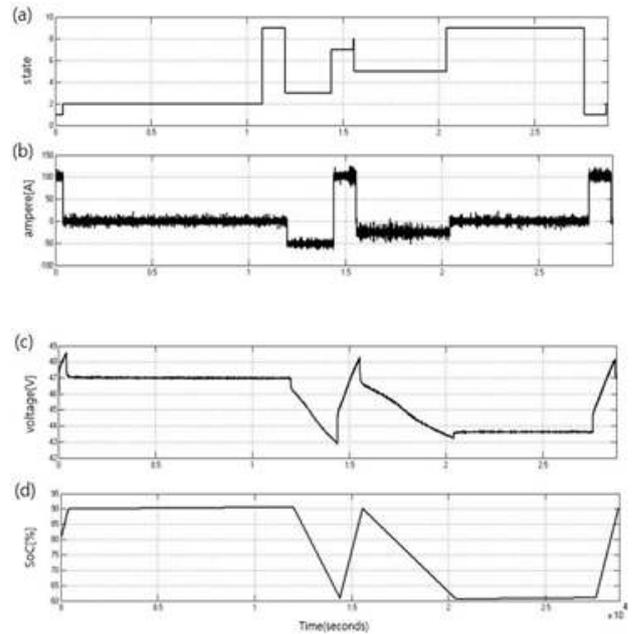


그림 12 실험 결과(계통 연계모드): (a) state, (b) 배터리 전류, (c) 배터리 전압 (d) 배터리 SoC

Fig. 12 Experimental result of grid-connected mode: (a) state, (b) battery current, (c) battery voltage, and (d) SoC

그림 13은 시나리오에서 정해진 state가 변함에 따라 변하는 배터리 전류, 배터리 전압, SoC를 보여주기 위해 전체 시간 중 0:00~09:00시에 해당하는 0~10,800초 구간을 확대한 그림이다. 이 시간은 경부하에 해당하기 때문에 배터리는 식 (8)에 따라 102.6A 충전을 진행하는 state 1의 상태를 400초까지 진행한 후 SoC 90%가 되어 state 2가 되었고 충전을 멈추는 state 2의 상태를 10,800초까지 유지하게 되며, 10,800초 이후는 중간부하 중 동작을 멈추는 state 9의 상태로 전환하게 된다(그림 13(a)). 그에 따른 배터리 전류, 전압과 SoC는 그림 13(b)~(d)에서 보여주고 있으며 그림 13(c)를 통해 배터리는 운전전압 내에서 운전 중임을 확인할 수 있다.

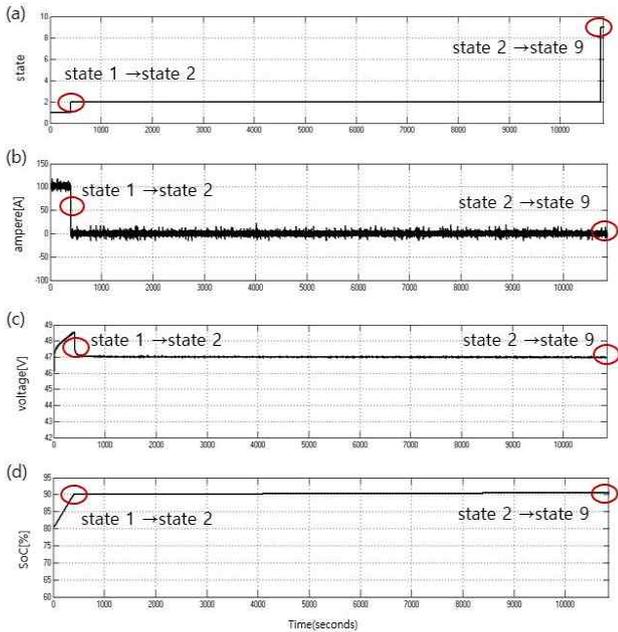


그림 13 0~10,800초 구간 실험 결과(계통연계모드): (a) state, (b) 배터리 전류, (c) 배터리 전압, (d) 배터리 SoC
Fig. 13 Experimental result(during 0~10,800 seconds, grid-connected mode): (a) state, (b) battery current, (c) battery voltage, and (d) SoC

그림 14는 비상 운전 시나리오 실험 결과이다. 정상 시에는 계통연계운전을 하다가 15시부터 19시까지 4시간에 해당하는 18,000초에서 22,800초 동안은 비상운전을 하고 22,800초에 계통이 정상으로 돌아와 계통연계운전을 하도록 하였다. 비상 운전 시나리오 실험 시 계통 고장 상태 이외 부분은 계통 연계 시나리오 실험과 동일하므로 그림 15에서 비상 운전시인 18,000초~22,800초 부분만 확대해서 나타냈다. 18,000초 때 state 5에서 state -2로 변환은 계통 연계 모드에서 비상 운전 모드로 바뀌었음을 나타내고 이 때 state -2가 나타나는 것은 PV 발전량이 비상 부하량보다 많아 배터리는 비상 부하에 전달하고 남은 발전량으로 충전을 진행하고 있음을 나타낸다. 18,700초에 state -1로 전환되어 있는데 이는 PV 발전량이 비상 부하량보다 적은 경우로 필요로 하는 비상 부하량 만큼 방전하고 있음을 뜻한다.

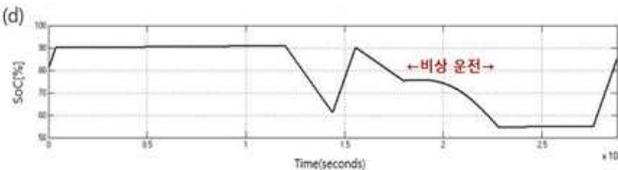


그림 14 실험 결과(비상 운전 모드): (a) state, (b) 배터리 전류, (c) 배터리 전압, (d) 배터리 SoC
Fig. 14 Experimental result of emergency mode: (a) state, (b) battery current, (c) battery voltage, and (d) SoC

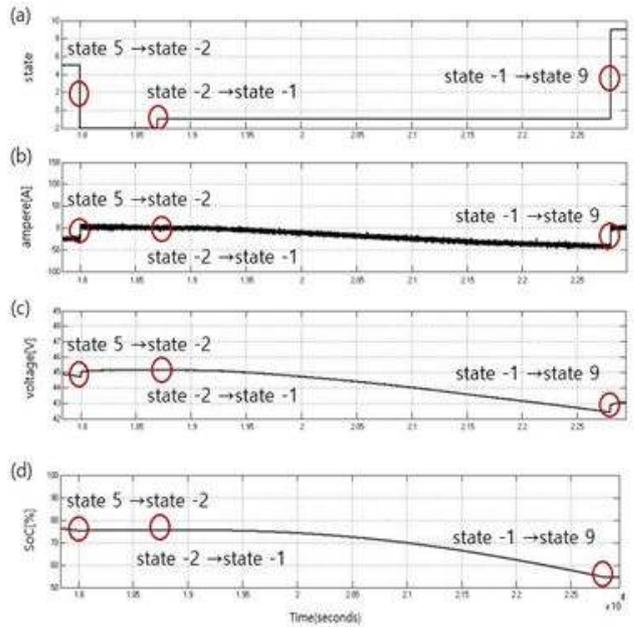
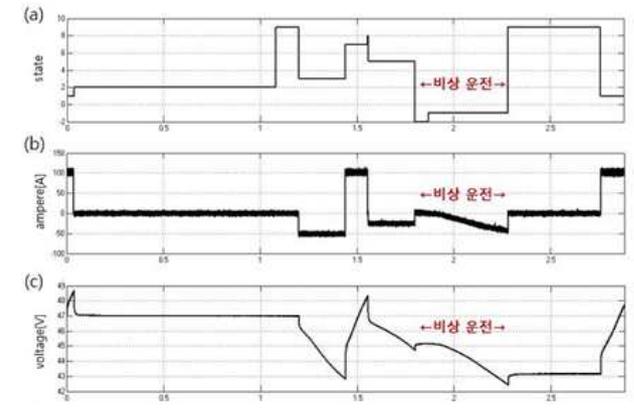


그림 15 18,000~22,800초 구간 실험 결과(비상 운전 모드): (a) state, (b) 배터리 전류, (c) 배터리 전압, (d) 배터리 SoC
Fig. 15 Experimental result of emergency mode during 18,000~22,800 seconds: (a) state, (b) battery current, (c) battery voltage, and (d) SoC

22,800초 때 state -1에서 state 9로 변환은 비상 운전 모드에서 계통 연계 모드로 바뀌었음을 나타낸다. 현재 본교에서 운영되는 시나리오는 본 논문에서와 같은 시나리오로 계통 연계 모드로 운전 중이며 모니터링 결과는 아래 그림과 같다. 그림 16는 UI 화면이다. SoC 및 PCS의 충·방전 동작 상태 등을 모니터링하고 있다. HILS 실험에서와 차이는 SoC의 상한값을 90%가 아닌 100%로 운영되고 있으며 나머지 동작은 동일하게 경부하시간 23:00~09:00과 중간부하 시간 중 최대부하 시간 사이에 있는 12:00~13:00에는 충전을 진행하며 최대부하시간 10:00~12:00, 13:00~17:00에는 방전을 수행하고 있음을 그림 17에서 볼 수 있다. 그림 17에서 붉은색 막대는 시간당 방전전력량, 파란색 막대

는 시간당 충전전력량을 나타낸다.

그림 18은 ESS 배터리의 SoC의 그래프이다. HILS 실험결과와 동일함을 볼 수 있다. 실험에 적용한 시나리오인 여름(6월~8월)을 기준으로 실험결과를 ESS에 적용 시 예상 되는 요금 절감액은 1달(30일) 기준으로 표 1, 2를 통해 계산하면 아래와 같다. 아래 값에 태양광 발전량을 포함시킨 경우 절감액은 더 커진다. 또한 2시간 이상의 비상 운전이 가능함을 확인함에 따라 디젤 비상 발전기를 대체할 방안으로 ESS가 가능함을 확인하였다.

- 경부하 충전량 : ESS 용량의 31.4%(155.7 kWh)
- 중간부하 충전량: ESS 용량의 30%(150 kWh)
- 최대부하 방전량: ESS 용량의 58.9%(294.7 kWh)
- 요금 절감액 : 761,715원/월(30일)



그림 16 본교에서 운영 중인 ESS의 모니터링 화면
Fig. 16 The ESS monitoring screen



그림 17 ESS의 충전량(청색)과 방전량(적색) 데이터
Fig. 17 Amount of charging(blue colored bar) and discharging (red colored bar) power of the ESS operated in our school



그림 18 본교에서 운영 중인 ESS의 SoC 상태 파형
Fig. 18 SoC waveform of the ESS operated in our school

4. 결 론

본 논문에서는 최근 적용이 증가하고 있는 ESS에 대한 제어 시나리오 개발을 위한 HILS의 구성 및 모델을 제안하였다. 배터리의 SoC 상태, 신재생 에너지원의 발전량, 전원 상태를 고려하여 ESS의 운영 알고리즘이 제안되었으며, 이를 HILS를 통해 개발하고 검증하였다. HILS를 이용한 실험 결과를 통해 계통연계 운전시 ESS의 고유 기능인 피크전력 저감을 통해 전력 요금을 낮출 수 있음을 확인하였고 비상운전 시 비상 부하 전력 요구량과 PV 발전원의 발전량을 고려한 ESS의 운영 알고리즘을 확인한 결과 목표치인 비상부하운전시간 2시간 이상 운전이 가능함을 확인하여 디젤 발전기를 대체한 비상발전기로서의 역할 수행이 가능함을 확인하였다.

또한 실제 실험을 진행하기 어려운 계통 고장과 같은 실험에서 실 상황에 테스트하기 전 HILS 실험을 통해 알고리즘 검증을 할 수 있음을 확인하였으며 제안된 알고리즘의 HILS 실험 결과와 본교의 실제 부하에 적용한 적용결과가 유사함을 볼 수 있어 HILS를 통한 알고리즘 개발의 유효성을 확인하였다. 본 논문에 제시한 HILS 구성 및 Matlab 모델은 ESS에서 중요 부품인 배터리의 테스트에 유용하게 활용될 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 “비상전원 기능을 갖는 수요관리용 전력저장시스템 개발 및 실증(No.20152010103540)” 과제의 일환으로 수행됨.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R17XA05-18).

References

- [1] F. Blaabjerg, F. Iov, T. Kerekes, and R. Teodorescu, "Trends in power electronics and control of renewable energy systems," *EPE/PEMC*, pp. 1-19, 2010.
- [2] H. YAN, Z. ZHOU, and H. LU, "Photovoltaic industry and market investigation," *IEEE conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 1-4, 2009.
- [3] Z. Xu, P. Yang, Y. Zhang, T. He, J. Peng, and Q. Zheng, "Control devices development of residential single-phase PV-ESS microgrid," *ISGT-Asia*, pp. 914-919, 2016.
- [4] S.M. Cho, "Optimal BESS sizing for customer using new model considering efficiency and life cycle," *Ph. D. Dissertation, Graduate School of Soongsil University*, 2012.
- [5] D. Wang and F.Z. Peng, "Smart gateway grid: A DG-based residential electric power supply system," *IEEE Trans. on*

Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 2232-2239, 2012.

[6] C. Yi and N. Liu, "Emergency energy management strategy for commercial building microgrid consisting of PV and energy storage," *ICIEA*, pp. 2049-2054, 2016.

[7] K.E. Yeager and J.R. Willis, "Modeling of emergency diesel generators in an 800 megawatt nuclear power plant," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 3, pp. 433-441, 1993.

[8] M.K. Kim, Y.S. Choun, H.O. Kwon, and J.M. Seo, "Evaluation of a spring-viscous damper vibration isolation system by measuring the vibration of the emergency diesel generator," *Proceeding of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Vol. 37, No. 17, pp. 1-2, 2005.

[9] G. Cai, B.M. Chen, T.H. Lee, and M. Dong, "Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulation system for small-scale UAV helicopters," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 7, pp. 1057-1066, 2009.

[10] M.A. Elsadig and M.A. Elbakri, "Design of autopilot platform using HILS approach," *International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering*, pp. 1-6, 2017.

[11] S.W. Choe, S.G. Ko, S.Y. Kim, and S.K. Sul, "Small scaled power hardware-in-the loop and control method of ship integrated power system with active front end converter and battery energy storage system using low cost multicore DSP," *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2014.

[12] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 96, No. 1, pp. 113-120, 2001.

[13] N.A. Windarko and J. Choi, "SOC estimation based on OCV for NiMH batteries using an improved Takacs model," *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 2, pp. 181-186, 2010.

[14] G. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs part 1: background," *Journal of Power Sources*, Vol. 134, pp. 252-261, 2004.

저 자 소 개



신 동 철 (Dong-Cheol Shin)

1989년 4월 28일생. 2017년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2017년~현재 동대학원 전자전기공학과 석사 과정.



전 지 환 (Jee-Hwan Jeon)

1992년 10월 3일생. 2015년 홍익대 기계시스템디자인공학과 졸업. 2017년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2017년~현재 홍익대 기계공학과 박사과정 재학 중.



박 성 진 (Sung-Jin Park)

1973년 8월 4일생. 1996년 서울대 기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2010년 미시간대 기계공학과 졸업(공학박). 1998년~2001년 고등기술연구원 엔진개발팀 연구원. 2001년~2003년 한국항공우주연구원 우주추진실 연구원. 2012년~현재 홍익대 기계시스템디자인공학과 조교수.



이 동 명 (Dong-Myung Lee)

1969년 8월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 조지아공대 ECE 졸업(공학박). 1996년~2000년 LG 전자 DA연구소 주임연구원. 2004년~2006년 삼성 SDI 중앙연구소 책임연구원. 2007년 한양대 BK21 연구교수. 2008년~현재 홍익대 전자전기공학부 부교수.