

VRFB-LFPB 하이브리드 배터리 기반의 ESS 개발에 관한 연구

천영식¹, 박진수¹, 유진호^{2,a}, 이 진³

¹ 한전KPS 기술연구원

² 목포대학교 융합소프트웨어학과

³ 목포대학교 전기공학과

Development of ESS Based on VRFB-LFPB Hybrid Batteries

Young Sik Cheon¹, Jin Soo Park¹, Jinho You^{2,a}, and Jin Lee³

¹ Institute of R&D Center, KEPCO KPS, Naju 58326, Korea

² Department of Software Convergence Engineering, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

³ Department of Electrical Engineering, Mokpo National University, Mokpo 58554, Korea

(Received October 31, 2017; Revised November 11, 2017; Accepted November 13, 2017)

Abstract: High-power lithium batteries are suitable for equipment with high power output needs, such as for ESS's initial start-up. However, their management cost is increased by the installation of air-conditioning to minimize the risk of explosion due to internal temperature rise and also by a restriction on the number of charge/discharge cycles. High-capacity flow batteries, on the other hand, have many advantages. They can be used for over 20 years due to their low management costs, resulting from no risk of explosion and a high number of charge/discharge cycles. In this paper, we propose an ESS based on hybrid batteries that uses a lithium iron phosphate battery (LiFePO₄) at the initial startup and a vanadium redox flow battery (VRFB) from the end of the transient period, with a bi-directional PCS to operate two batteries with different DC voltage levels and using an efficient energy management control algorithm.

Keywords: ESS (energy storage system), BMS (battery management system), PMS (power management system), Vanadium redox flow battery (VRFB), Lithium iron phosphate battery (LiFePO₄)

1. 서론

현재 한 종류의 배터리기반 ESS (energy storage system)는 활발하게 연구되고 있으나, 다수 개의 배터리를 통합 운용하는 하이브리드 배터리 ESS에 대해서는 아직 많은 연구가 되어 있지 않고, 상용화를 이루기 위해서는 배터리 원천 기술뿐만 아니라 운영 기술

에 대해서 선행 연구 및 실증 연구가 필요하다.

최근 전 세계에서 플로우 배터리 기반 ESS 설치 사례가 나타나고 있다. 미국 한 고등학교에 3 MWh 용량의 플로우 배터리 기반 ESS를 설치했고 영국, 호주 대학교에 플로우 배터리와 리튬이온 배터리를 결합한 1 MWh급 하이브리드 ESS를 구축한 사례가 있다.

바나듐 레독스 플로우 배터리(vanadium redox flow battery, VRFB)는 출력을 담당하는 스택에 전해액이 흐르면서 전기화학 반응을 일으켜 충·방전을 반복하는 원리로 작동한다. 리튬이온 배터리는 출력(kW)과 용량(kWh)이 전극 소재에 의해 결정되기 때문에 용량을 높이려면 면적이나 개수를 늘려야 하지만 레독스

a. Corresponding author; jhyou@mokpo.ac.kr

Copyright ©2018 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

플로우 배터리는 전해액 양을 늘리기만 하면 된다. 출력은 스택 개수에 그리고 저장 용량은 전해액의 양에 따라 결정된다. 또한 용량이 높아질수록 킬로와트(kW) 당 단가가 저렴해지는 구조이다 [1].

고출력 리튬 배터리는 초기 기동과 같은 고출력 요구에 적합하지만 배터리 내부온도 상승으로 인한 폭발 위험에 대비한 공조시설 설치 및 충·방전 횟수의 제한 등으로 인한 관리 비용이 증가하는 반면, 대용량 플로우 배터리는 리튬에 비해 폭발 위험이 없어 관리 비용이 저렴하고 충·방전 횟수가 길어 20년 이상 사용될 수 있기 때문에 대용량 ESS 시스템에 적합하다.

통상적으로 장단주기 ESS는 특정 목적의 방전 시간을 기준으로 정전 또는 피크 저감의 장주기와 전력품질용 단주기로 나누고 있다 [1].

본 논문에서는 장주기의 대표이며 대용량 배터리인 레독스 플로우 배터리(VRFB)와 단주기를 대표하는 고출력 인산철 배터리(LFPB, LiFePO₄ battery)를 혼합한 배터리 시스템을 구성하고, 초기 기동 시 LFPB로 운용하고 과도기간이 종료되는 시점에서 장시간 동안 VRFB가 동작하며, 부하의 순간 고출력 요구 시 VRFB와 LFPB가 동시에 방전이 가능한 하이브리드 배터리 ESS를 설계하고, 피크부하 대응과 함께 전기사용 요금 최소화와 정전 대비 충전량을 최대화하는 혼합 목표로 하이브리드 배터리 충방전을 효율적으로 운영하는 하이브리드 ESS 운용 알고리즘을 제안한다.

2. 실험 방법

2.1 하이브리드 ESS용 양방향 PCS 개발

ESS는 일반적으로 배터리관리시스템(BMS), 전력변환장치(PCS), 에너지관리시스템(EMS 또는 PMS)으로 구성되며 BMS는 배터리의 SoC 등과 같은 정보를 PMS에 전송하여 PCS 제어 및 운용에 활용한다.

하이브리드 배터리 ESS를 효율적으로 운용하기 위해 공통 DC-Link 구조의 양방향 DC-DC 컨버터들과 양방향 DC-AC 인버터로 PCS를 구성하는 것이 효과적이다 [2]. 본 논문에서 제안한 하이브리드 ESS에서는 공통 DC-Link 구조에 전압레벨이 서로 다른 배터리를 위한 두 DC-DC 컨버터를 연결 구성하고, DC-Link 전압 유지와 배터리별 충방전 출력을 분담하는 제어 알고리즘을 운영한다.

2.1.1 하이브리드 배터리 ESS용 PCS 구성

그림 1은 제안한 하이브리드 배터리 ESS 구성도이며 이종의 배터리들 간의 전압 차를 수용하기 위해 각각의 DC-DC 컨버터들과 한 대의 인버터로 구성하였다 [3].

본 논문에서 제안한 하이브리드 배터리 ESS용 PCS의 회로는 그림 2와 같이 두 개의 양방향 하이브리드 DC-DC 컨버터와 full-bridge 기반 양방향 DC-AC 인버터로 구성된다.

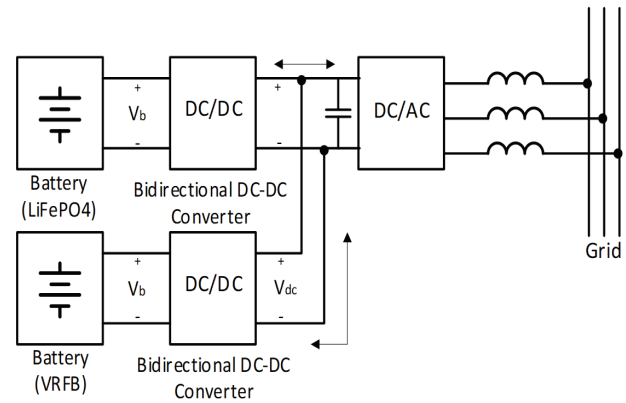


Fig. 1. Structure of PCS for hybrid battery based ESS.

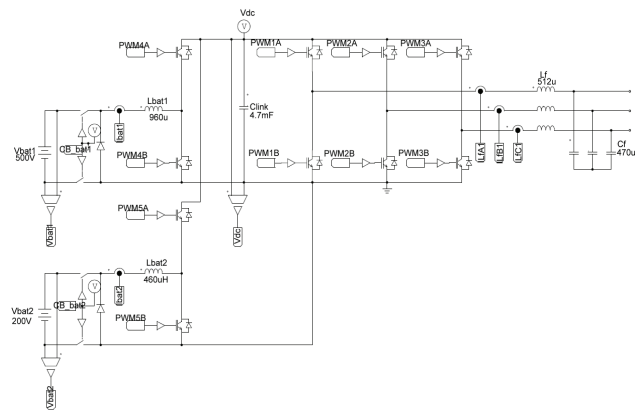


Fig. 2. Simulation schematic of PCS for hybrid battery based ESS.

2.1.2 양방향 하이브리드 DC-DC 컨버터

그림 3은 본 논문에서 제안하는 하이브리드 ESS의 구성요소인 비절연형 half-bridge 양방향 DC-DC 컨

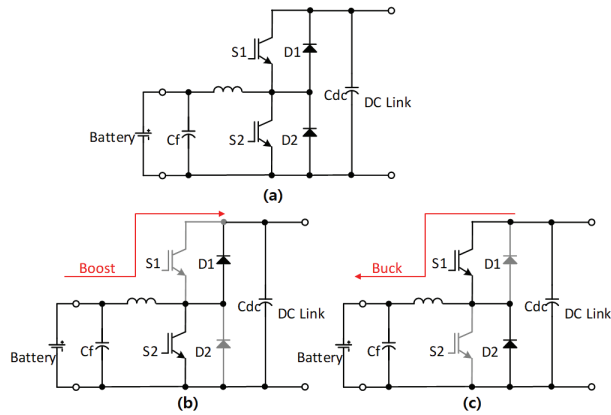


Fig. 3. (a) Topology of bi-directional DC-DC converter, (b) boost mode, and (c) buck mode.

버터의 회로도 및 모드별 동작을 보여주고 있다. 방전 시에는 S2와 D1이 도통하여 boost 동작을 하게 되며, 충전 시에는 S1과 D2를 도통하여 buck 동작을 하게 된다. 배터리 방전의 경우 양방향 DC-DC 컨버터는 인버터에서 380 V 3상 전압을 출력하기에 충분하도록 배터리 전압을 600 V DC 전압까지 끌어올리는 boost 모드로 동작한다. 그러나 500 [Vdc] LFPB (셀: 144개)와는 달리 200 [Vdc] VRFB (스택: 4개) 배터리는 출력전압이 낮기 때문에 배전압이 가능한 스위칭 토폴로지를 채용했다. 충전의 경우 양방향 DC-AC 인버터는 PFC boost 기반 full-bridge 정류기로 동작하여 3상 교류 380 V를 직류 600 V로 변환하여 DC-link 단에 출력한다. 이때 두 대의 양방향 DC-DC 컨버터는 각 배터리 충전전압에 알맞은 레벨로 전압을 낮추는 buck 모드로 동작한다.

2.2 하이브리드 ESS 총·방전 운영 알고리즘

하이브리드 ESS는 장단주기 하이브리드 배터리를 기반으로 피크부하대응과 비상전원대응 운영을 목표로 설계하며, 정전에 의한 비상전원 시에 단주기 배터리는 즉시 구동이 가능하며 장주기 배터리가 구동을 준비하는 시간 동안에 부하를 담당하게 되고, 이후에는 장주기 배터리가 부하를 담당한다.

본 논문에서는 부하 전력량과 태양광 발전량에 대한 예측 데이터를 기반으로 피크부하 대응이 가능하고 전력 사용 요금을 최소화하는 에너지의 최적 운영방안을 고려한다. 즉, 한전계통의 정해진 피크전력을 넘지 않

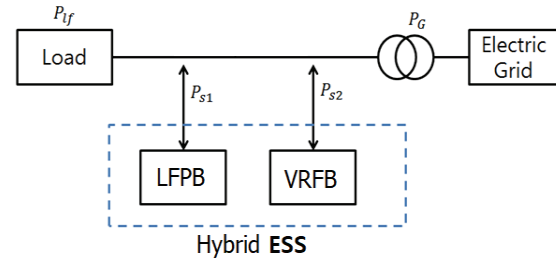


Fig. 4. Power flow scheme of the hybrid ESS with a short term battery (LFPB) and a long term battery (VRFB).

는 범위에서 계통전력을 사용하고, 한전전력 사용 요금은 최소화하며 배터리 충전량은 가급적 최대로 유지하는 하이브리드 ESS의 총방전 스케줄링 최적화 알고리즘을 제안한다.

충·방전 스케줄링을 위한 하이브리드 ESS의 모형은 그림 4와 같다 [4]. 총방전 스케줄링을 위한 최적화 알고리즘은 부하예측(P_{lf}) 정보를 기반으로 진행한다. P_{peak} 는 피크전력이고, P_G 는 한전계통에서 오는 전력을 나타낸다. 최적화 알고리즘은 P_{lf} 를 바탕으로 $P_{peak} \geq P_G$ 를 만족하는 범위에서 총방전 스케줄링의 해(P_{s1}, P_{s2})를 찾는 것이 목표이다. 총방전 스케줄링 샘플 인덱스는 $k=1, \dots, N$ 이고, 배터리의 에너지 상태 E_{s1} 과 E_{s2} 은 아래와 같이 정의한다.

$$E_{s1}^k := E_{s1}^o - \sum_{i=1}^k P_{s1}^i \Delta t, \quad E_{s2}^k := E_{s2}^o - \sum_{i=1}^k P_{s2}^i \Delta t \quad (1)$$

위 첨자 k 와 o 는 각각 샘플 인덱스와 초기 값을 나타낸다. Δt 는 샘플링 주기를 나타낸다. 수식 (1)에서 E_{s1}^o 와 E_{s2}^o 는 배터리의 SoC(State of Charge)를 추정하여 계산한다. 최적화 문제의 제약조건은 배터리의 총방전량 한계와 에너지 상태의 제약조건 등을 포함하며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{s1}^{\min} &\leq P_{s1}^k \leq P_{s1}^{\max}, & P_{s2}^{\min} &\leq P_{s2}^k \leq P_{s2}^{\max} \\ E_{s1}^{\min} &\leq E_{s1}^k \leq E_{s1}^{\max}, & E_{s2}^{\min} &\leq E_{s2}^k \leq E_{s2}^{\max} \\ 0 &\leq P_G^k \leq P_{peak}, & \forall k &\in 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

P_G^k 는 다음과 같이 정의한다.

$$P_G^k := P_{lf}^k - (P_{s1}^k + P_{s2}^k) \quad (3)$$

수식 (2)의 부등식에서 위 첨자 min과 max는 총·방전량이나 에너지 상태의 한계를 의미한다.

본 논문에서는 수식 (2)로 표현되는 한전계통 전력이 피크전력을 넘지 않으면서 배터리 총·방전 전력 제한 범위와 배터리 충전량 제한 범위를 넘지 않는 총·방전 스케줄링 집합 중, 한전전력 사용 요금은 최소화하고 배터리 충전량은 최대화하는 총·방전 스케줄을 찾는 선형계획법 알고리즘을 제안한다.

총·방전 스케줄 선형계획법에 대한 다음 목적함수 f_1 는 한전계통으로부터 사용한 전력 요금이며 제안한 총·방전 알고리즘은 이 값을 최소화하는 방향으로 스케줄 해를 찾는다.

$$f_1 = \sum_{k=1}^N C^k P_G^k \Delta t \quad (4)$$

여기서, C^k 는 각 단계별 전력요금

그리고 수식 (3)을 적용하면 f_1 최소화는 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{P_{s1}, P_{s2}} f_1 &= \operatorname{argmin}_{P_{s1}, P_{s2}} f_1' \\ f_1' &= - \sum_{k=1}^N C^k (P_{s1}^k + P_{s2}^k) \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

다음 목적함수 f_2 는 총·방전 스케줄 최종 단계에서 두 배터리의 충전량을 최대로 유지하기 위한 것으로 f_2 역시 최소화한다.

$$f_2 = (E_{s1}^{\max} - E_{s1}^N) + (E_{s2}^{\max} - E_{s2}^N) \quad (6)$$

그리고 f_2 의 최소화는 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{P_{s1}, P_{s2}} f_2 &= \operatorname{argmin}_{P_{s1}, P_{s2}} f_2' \\ f_2' &= -(E_{s1}^N + E_{s2}^N) \end{aligned} \quad (7)$$

위 두 목적함수의 혼합으로 다음과 같은 목적함수 f 를 정의한다. 여기서 C_{mean} 는 시간대별 평균 전력요금이다.

$$f = w \frac{f_1'}{C_{mean}} + (1-w)f_2' \quad (8)$$

$w \in [0, 1]$ 는 f_1 과 f_2 에 대한 최적화 비중을 나타내며 w 를 조절함으로써 전력사용 요금 최소화 목표와 충전량 최대화 목표 전략 우선순위가 조절된다. 종합하여 총·방전 최적화를 위한 선형계획법 문제는 다음과 같이 정의할 수 있으며 일반적인 선형계획법 알고리즘으로 최적 총·방전 스케줄 해를 구할 수 있다 [5].

$$\operatorname{argmin}_{P_{s1}, P_{s2}} \left\{ w \frac{f_1'}{C_{mean}} + (1-w) \frac{f_2'}{N} \right\} \text{ such that} \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 하이브리드 ESS 실증 시스템 구성

비상발전대응 및 피크부하 대응 효과를 검증하기 위하여, 그림 5에서와 같이 건물의 실 전력계통에 연결하여 실증시험을 수행하였다. 대상 건물은 설비용량 500 kW 수전을 통하여 지하부터 지상 8층까지 건물 부하와 비상부하로 공조설비 및 엘리베이터 그리고 비상전등 부하로 구성되어 있으며, 160 kW급 비상 디젤 발전기가 구비되어 있다. 본 논문에서는 비상부하를 전부 감당하기는 제한된 배터리 용량적인 문제 해결하기 위해 ATS2의 부하인 전등부하만 고려하여 최대부하 50 kW급을 설계에 반영하였다.

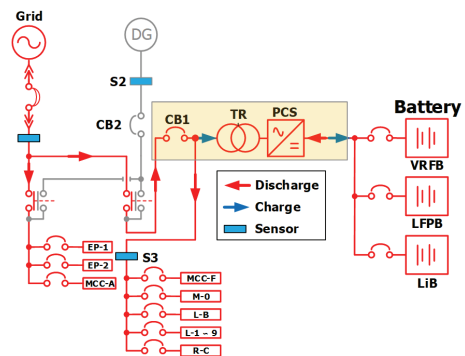


Fig. 5. Power system scheme of the building under test.

3.2 하이브리드 PCS 성능 실험

본 논문에서 제안한 하이브리드 배터리기반 ESS의 성능 검증을 위한 실증 시험을 수행하였다. 그림 6은 정전

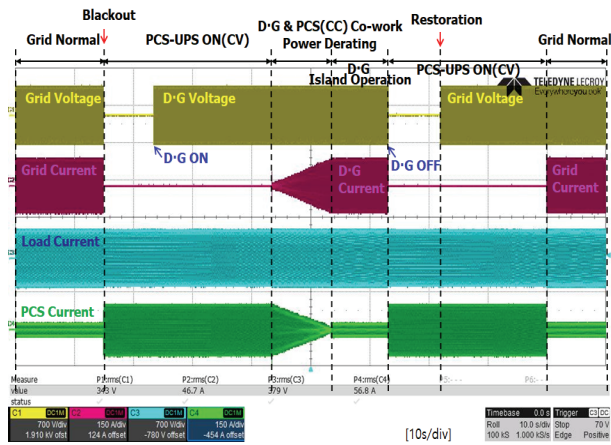


Fig. 6. Blackout response experiment of the proposed hybrid ESS.

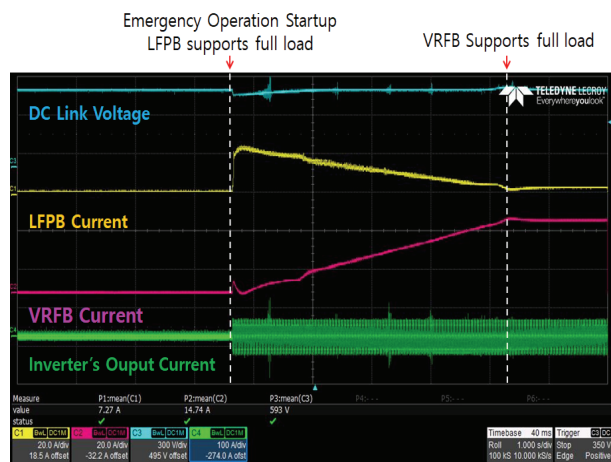


Fig. 7. Power sharing transfer experiment from short term battery to long term one.

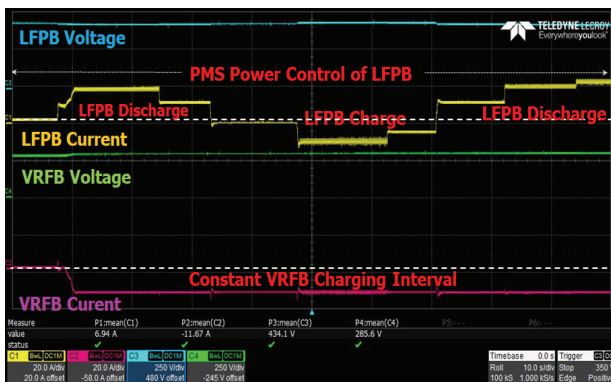


Fig. 8. Experiment of charge and discharge controls of hybrid batteries by PMS (1 minute unit command).

시 하이브리드 PCS가 LFPB 기반 방전 출력을 통해 부하 소요전력 약 10 kW를 끊임 없이 공급하고, 이 후 디젤 발전기에 전력분담을 이동시키는 모습을 보여준다. 그림 7은 LFPB와 VRFB 두 배터리 간 전력 배분 동작을 나타내며 정전 시 초기 LFPB가 DC 500 V, 20 A 출력을 분담하다가 점진적으로 VRFB의 DC 200 V, 50 A 분담으로 전력 배분을 연속적으로 이동하는 것을 보인다. 그림 8은 PMS의 하이브리드 배터리에 대한 1분 단위 총·방전 제어 실험을 나타내며, VRFB는 이 구간에서 지속적으로 약 10 A를 충전하고 LFPB는 20 A, 10 A 방전 및 정지 후 10 A 충전을 수행하고 있다.

3.3 하이브리드 ESS 총방전 최적화 알고리즘 성능 실험

본 논문에서 제안한 하이브리드 ESS 총방전 스케줄링 선형계획법의 해를 구하고 결과를 비교하기 위해 가상의 데이터를 생성해서 시뮬레이션을 수행한다. 최적 총·방전 스케줄 해는 잘 알려진 전형적인 선형계획법 알고리즘을 이용하여 계산할 수 있다 [5]. 최적화를 진행하는 전체 주기는 24시간으로 가정하며, 샘플

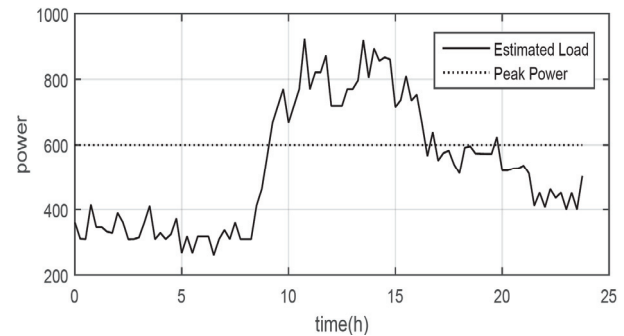


Fig. 9. Power load estimation data.

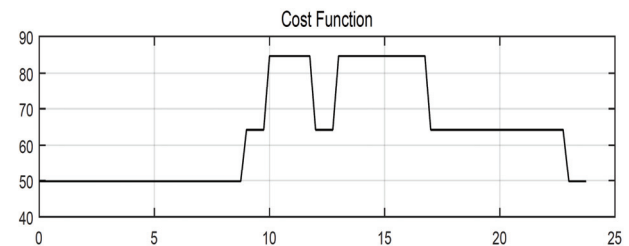


Fig. 10. Electricity prices per hour.

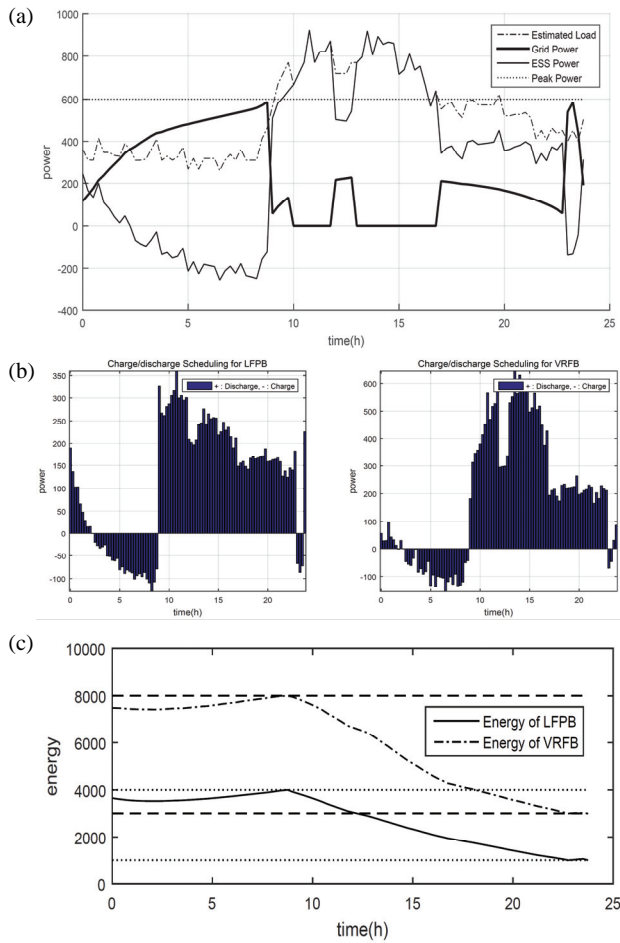


Fig. 11. Solution of charge & discharge schedule by linear programming ($w = 1$). (a) Grid power usage and operations of charge and discharge by ESS, (b) charge & discharge schedule of LFPB and VRFB, and (c) SoC of LFPB and VRFB.

링 주기 Δt 는 15분으로 설정한다. 이에 따라 최대 샘플 인덱스 $N=96$ 이 된다. P_{ij} 는 부하 사용량 예측 알고리즘으로 예측한 데이터를 기반으로 사용한다. 실험에 사용한 부하예측 데이터는 그림 9와 같다.

LFPB의 용량은 5 KWh, 최대 방전전류는 2 C, 최대 충전전류는 0.3 C, SoC 운용범위는 20~80%, VRFB의 용량은 10 KWh, 최대 방전전류는 1 C, 최대 충전전류는 0.3 C, SoC 운용범위는 30~80%로 설정하였으며, 피크부하는 600 KW로 설정하고, 시간대별 전기요금은 그림 10과 같이 설정하였다.

P_{ij} 부하전력 예측량을 기반으로 본 논문에서 제안한 선형계획법으로 설계한 충·방전 스케줄링 최적화문제의 시뮬레이션 결과는 그림 11~13과 같다. 각 시뮬레

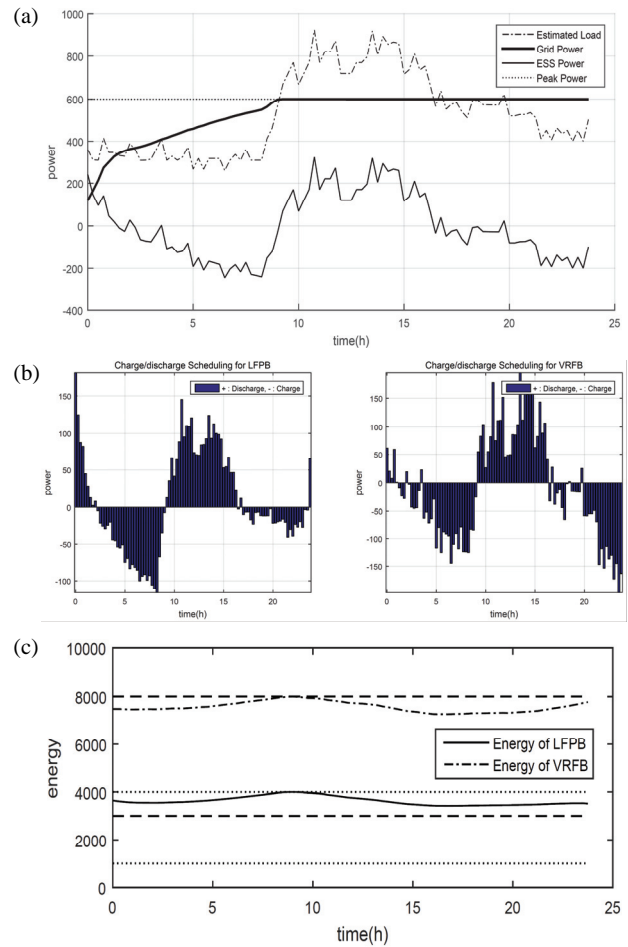


Fig. 12. Solution of charge & discharge schedule by linear programming ($w = 0$). (a) Grid power usage and operations of charge and discharge by ESS, (b) charge & discharge schedule of LFPB and VRFB, and (c) SoC of LFPB and VRFB.

이션은 $w = 1, 0, 0.43$ 에 대하여 수행하였다. 그림 11은 $w = 1$ 인 경우로 사용 전기요금을 최소화하는 데만 목표를 두고 있으며 필요시 충전하고 전기요금 최소화를 위해 방전하려는 경향을 보임을 알 수 있다. 특히 전기요금이 비싼 구간에서 배터리 전력을 적극 사용하고 쌀 때 충전하는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 $w = 0$ 인 경우로 배터리 충전량을 최대화하는 데만 목표를 두고 있으며 피크부하 대응 시에 주로 방전하면서 최대 충전 상태를 유지하려는 경향을 보임을 알 수 있다. 그림 13은 $w = 0.43$ 인 경우로 전기요금 최소화과 배터리 충전량 목표를 혼합하여 제어하는 스케줄을 보인다. w 값을 조절하여 알맞은 충·방전 목표 운용 전략을 세울 수 있음을 보여준다.

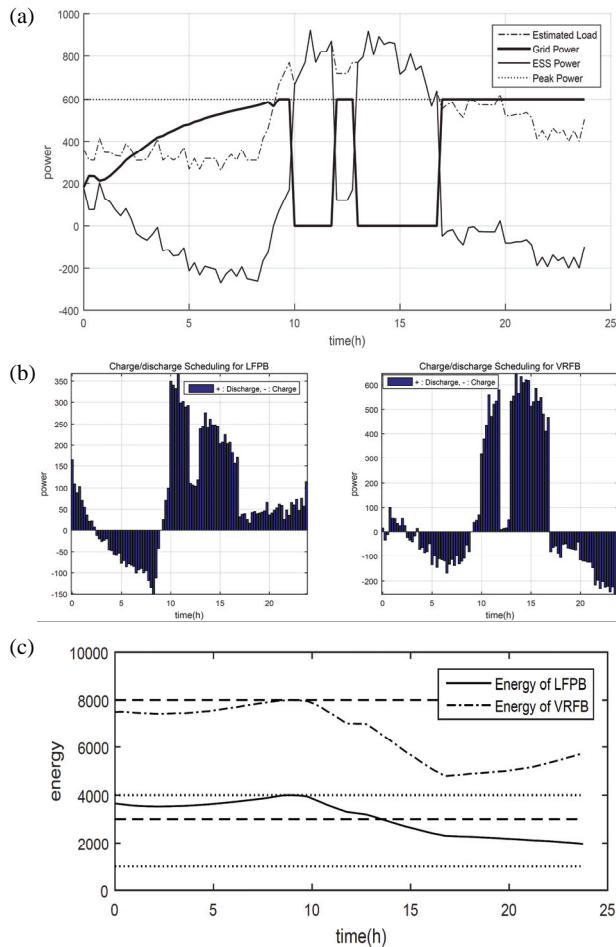


Fig. 13. Solution of charge & discharge schedule by linear programming ($w = 0.43$). (a) Grid power usage and operations of charge and discharge by ESS, (b) charge & discharge schedule of LFPB and VRFB, and (c) SoC of LFPB and VRFB.

4. 결론

본 논문을 통해 개발한 하이브리드 배터리 기반 ESS 시스템의 성능과 운영 방법의 타당성을 실증 시험과 시뮬레이션을 통해 확인하였으며 다음과 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 제안한 하이브리드 PCS는 초기 기동 시 리튬인산철 배터리와 이후 바나듐 레독스 플로우 배터리의 하이브리드 조합으로 끊임 없이 전력을 공급할 수 있도록 연속 전력제어가 가능하다.
- 2) 전압 레벨이 서로 다른 하이브리드 배터리의 특성을 고려한 DC-link 공유 기반 하이브리드 PCS가 효율적으로 잘 작동한다.
- 3) 전기요금 최소화와 충전량 최대화 목표를 혼합하여 운용할 수 있는 제안한 선형계획법 기반 하이브리드 배터리 충·방전 운용 알고리즘이 피크부하 대응 제약 조건을 만족하며 효율적인 충·방전 스케줄을 생성한다.

본 논문에서 제안한 하이브리드 배터리 기반 ESS 시스템은 대용량 ESS 시스템을 낮은 비용으로 구축할 수 있게 함으로써 향후 대용량 ESS 시장 활성화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] S. M. Schoenung and W. V. Hassenzahl, *Long- vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis*, No. SAND2003-2783, Sandia National Laboratories, 2003.
- [2] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M.A.M. Hendrix, *Proc. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications* (IEEE, Hong Kong, China, 2005) p. 2021. [DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2005.1518725>]
- [3] J. Y. Ahn, J. S. Park, J. H. You, I. H. Park, Y. S. Cheon, M. B. Kim, and J. Lee, *Proc. KIEE Annual Conference* (KIEE, Yongpyong, 2016) p. 997.
- [4] B. H. Lee, J. H. Son, H. Y. Park, H. S. Ahn, J. M. Lim, J. Y. Sim, J. S. Park, J. Y. Ahn, J. H. You, and I. H. Park, *Proc. KIEE Annual Conference* (KIEE, Yongpyong, 2016) p. 29.
- [5] G. B. Dantzig and M. N. Thapa, *Linear Programming I: Introduction* (Springer-Verlag, New York, 1997) p. 63. [DOI: <https://doi.org/10.1007/b97672>]