

교류 고속철도계통에서 BESS의 도입을 위한 전력소비 및 충·방전효과 분석에 관한 연구

(Study on Analysis for Power Consumption and Charge/Discharge Effect
with BESS in AC High-Speed Electric Railway System)

전용주* · 강병욱 · 채희석 · 김재철**

(Yong-Joo Jeon · Byoung-Wook Kang · Hui-Seok Chai · Jae-Chul Kim)

Abstract

The power consumption pattern of high-speed railway has rarely during night time. But, during service time, the power is consumed irregularly related to train operation. Especially certain unusual about 1-2 days of service time interval to indicate the power consumption is rapidly growing phenomenon, which causes the capacity of the power contract is the annual electricity bill to rise rapidly as the cause. Normally, amount of peak power consumption bill rate at railway substation is over 20% of total electrical bill. Therefore, high-speed railway substation is expected to be considerably larger savings by reducing the peak power of the default charge(demand power).

Key Words : BESS, Electric Railway System, Peak cut, Energy, PCCS

1. 서 론

세계적으로 한정된 에너지 자원을 어떻게 활용할 것인지에 대해 지속적인 관심을 갖고 있으며, 특히 환경

오염 및 파괴에 대한 대책의 중요성이 절실히 요구되어 교토의정서와 같이 국가 간의 정치적인 현안으로 거론되고 있다. 특히 국내에서의 전기사용량은 나날이 갈수록 급증하여 최근에는 매 년마다 피크전력을 기록하여 예비 전력이 현저히 부족한 상황에 이르렀다. 그러므로 전기에너지를 유용하게 활용하는 것이 반드시 필요하다[1].

전기에너지의 가장 큰 특징은 생산과 동시에 소비가 이루어지며, 소비하지 않는 에너지는 저장되지 않고 소멸 된다. 따라서 에너지 저장장치를 사용하여 적절히 충전과 방전을 반복한다면 전력을 효율적으로 사용할 수 있다. 일반적인 에너지 저장장치의 기능은 부하 평준화(Load leveling) 및 첨두부하 절감(Peak shaving)으로 나뉜다. 부하 평준화는 전력 소모가 적

* 주저자 : 한국철도공사 전기기술단 과장
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 교수
* Main author : Section Chief of Department of Electrical Technology in KORAIL(Korea Railroad Corporation)
** Corresponding author : Professor of Department of Electrical Engineering at Soongsil University
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2014년 5월 1일
1차심사 : 2014년 5월 10일, 2차심사 : 2014년 6월 24일
심사완료 : 2014년 7월 1일

은 시간대에 부하를 증가시켜 부하의 변동량을 고르게 하는 방법이며, 첨두부하 절감은 시간적 또는 계절적으로 변동하는 부하 중 가장 높은 경우(최대 수요전력)를 목표로 하는 전력값으로 낮추게 하는 방법이다.

고속열차는 정격 13,560kW의 대용량 부하로서, 운행되는 고속열차에 필요한 전력은 고속철도 각 구간에 설치된 고속철도 변전소에서 공급된다. 고속철도는 빠른 속도와 정시성 등 편리성, 접근성 제고를 위한 연계교통망 확충 등으로 매년 이용객이 증가함에 따라 매년 열차 운행횟수를 점차적으로 확대해 나가고 있고, 고속철도 변전소의 피크전력 또한 점진적으로 증가하고 있다. 이러한 피크전력 증가로 인하여 고속철도 변전소 변압기 증가 등의 설비비용이 증가되며, 철도 운영기관의 전기요금도 크게 증가하고 있다. 이에 대한 대안으로서 에너지 저장 장치를 이용하여 전차선로의 부하가 적을 때 에너지를 충전하고, 전차선로의 부하가 많을 때는 저장시스템으로부터 에너지를 방전하여 고속철도 변전소의 최대부하를 감소시켜 전기요금을 절감하는 방식이 연구되고 있다. 때에 따라서는 값이 싼 시간대에 전력을 저장했다가 비싼 시간대에 소비하여 전기요금을 경감시키는 목적으로도 사용하여 에너지 저장장치의 이용률을 증가시킬 수 있을 것이다[2-3].

하지만 교류철도계통에서의 가장 큰 문제점은 최대 부하가 나타나는 시간대가 항상 같지 않으며, 그 때의 피크전력도 상이하다는 점이다. 이는 열차는 현장 상황에 따라 운행 패턴을 달리하기 때문이다. 따라서 최대전력의 예측은 과거 데이터를 기준하여 최근 발생된 최대전력을 분석하고 예측 알고리즘을 구현하는 방법이 타당할 것이며, 본 논문에서는 이에 대한 타당성을 파악하기 위해 과거데이터를 분석하여 절감을 유도하였다[4].

2. 최대수요전력의 개요

최대수요전력이란 정해진 수요시한 내의 평균전력을 의미하며, 우리나라에서는 수요시한을 15분으로 두었다. 이를 수식화하면 아래와 같으며, 한국전력공사 전기공급약관 중 기본공급약관 제68조(요금적용전력

의 결정)에서는 “최대수요전력계를 설치한 고객에 대하여는 검침 당월을 포함한 직전 12개월 중의 최대수요전력을 요금적용전력(계약전력)으로 한다.”라고 명시되어 있다.

$$\begin{aligned} \text{최대수요전력} &= \frac{\text{시한내의 사용전력량 [kWh]}}{\text{수요시간 [h]}} \quad (1) \\ &= \frac{\text{시한내의 사용전력량 [kWh]}}{0.25[h]} \end{aligned}$$

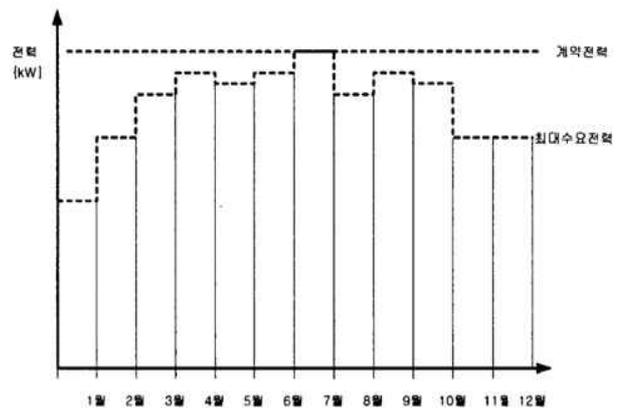


그림 1. 최대수요전력의 개요
Fig. 1. Concept of maximum demand power

최대전력 관리장치의 기본원리는 수요시한 동안의 평균전력이 최대수요 전력이므로 부하가 순간적으로 많은 전력을 소비하여도 그 수요시한의 나머지 시간 동안에 미리 선정된 부하의 전력을 차단하게 되면 부하의 소비전력을 목표전력 값에 맞출 수가 있다. 만약 부하 변동이 있는 경우에는 소비전력의 추이가 목표전력을 초과하게 된다. 따라서 목표전력 값을 초과하지 않기 위해서는 수요시한 동안에 부하전력이 목표전력보다 높은 부분의 면적과 낮은 부분의 면적이 같아지도록 부하전력을 가감하면 된다.

3. 변전소의 전력소모 패턴

대상선정은 현재 철도공사에서 운영중인 고속 전철 변전소 한 개를 선정하였다. 대상 변전소는 3상 154kV를 수전받아 2상 50kV로 변환하며 계약 전력현황은 95,000kW, 계약종별은 산업용(을) 고압B 선택 II를 적

용하고 있다.

본 논문에서는 2012년 10월부터 2013년 9월까지의 A변전소 1년치 전력데이터를 상세 분석하고, 2011년도(28,244kW), 2013년도(27,752kW)의 최대전력 발생 시치를 참고하여 최대전력 변화량을 비교하였다.

먼저 피크전력 저감을 위한 목표 전력값(P_{target})은 1년치 전력데이터 중 최대 부하인 28,044.8kW (1월 5일)를 20% 절감한 약 22,400kW로 설정하였다. 이는 현재 추진중인 과제의 배터리용량 6MW를 기준하여 선정할 목표값이다. 전력사용량을 바탕으로 하여 그림 2와 같이 방전이 필요한 구간을 분석한 결과, 총 112구간에서 피크전력 저감을 위한 방전이 필요한 것으로 조사되었다. 이는 1년간 데이터 35,040개의 피크 데이터 중 약 0.3%에 해당하는 값으로 차량이 증편 운행되는 공휴일을 중심으로 최대값이 발생되었으며, 특히 하루에 최대 3회의 방전을 필요로 하는 날이 있는 반면에 대부분의 경우에는 피크전력 저감을 위한 방전을 필요로 하지 않는 부하 특성이 있어, 경우에 따라 강제방전을 시행함이 타당할 것으로 분석되었다.

표 1. 하루 2회 이상의 방전을 필요로 하는 일자
Table 1. Required discharge period at least twice a day

방전 횟수	날짜 및 부하 (kW)	
3회 방전	1월 6일 - 11시 00분 : 23,027.2 14시 45분 : 23,027.2 20시 00분 : 22,579.2	
	3월 3일 - 14시 45분 : 24,102.4 18시 30분 : 23,564.8 20시 00분 : 23,744	
	5월 17일 - 10시 30분 : 25,088 14시 45분 : 22,937.6 18시 30분 : 23,923.2	
	5월 25일 - 10시 30분 : 23,744 14시 45분 : 24,729.6 18시 30분 : 23,833.6	
	2회 방전	2월 3일 - 11시 00분 : 24,819.2 14시 45분 : 25,267.2
		2월 8일 - 11시 00분 : 23,116.8 14시 45분 : 24,640

방전 횟수	날짜 및 부하 (kW)	
1회 방전	3월 17일 - 11시 00분 : 22,668.8 14시 45분 : 24,550.4	
	4월 26일 - 10시 30분 : 23,206.4 18시 30분 : 23,206.4	
	5월 3일 - 14시 45분 : 22,489.6 18시 30분 : 23,116.8	
	5월 5일 - 10시 30분 : 22,579.2 11시 00분 : 22,848	
	5월 11일 - 14시 45분 : 23,744 18시 30분 : 22,668.8	
	5월 16일 - 18시 30분 : 24,192 20시 00분 : 23,027.2	
	5월 18일 - 11시 00분 : 24,102.4 14시 45분 : 26,611.2	
	5월 24일 - 10시 30분 : 23,923.2 18시 30분 : 22,848	
	6월 1일 - 11시 00분 : 24,550.4 14시 45분 : 25,446.4	
	6월 8일 - 14시 45분 : 25,267.2 18시 30분 : 23,296	
	6월 9일 - 10시 30분 : 22,848 18시 30분 : 22,489.6	
	6월 21일 - 18시 30분 : 23,833.6 20시 00분 : 23,027.2	
	6월 22일 - 10시 30분 : 22,489.6 14시 45분 : 26,432	
	2회 방전 (계속)	6월 29일 - 11시 00분 : 23,296 14시 45분 : 27,328
		7월 12일 - 10시 30분 : 23,833.6 18시 30분 : 25,984
		9월 13일 - 12시 45분 : 22,937.6 20시 00분 : 22,758.4
		9월 19일 - 10시 30분 : 22,579.2 11시 00분 : 23,833.6
		9월 21일 - 10시 30분 : 22,489.6 11시 00분 : 22,758.4

효율적인 에너지저장시스템 운영을 위해 A변전소에 적용되고 있는 한국전력공사의 전력요금표를 조사하였으며 이를 표 2에 나타내었다. 또한 표 3에는 시간대별 요금을 나타내었다.

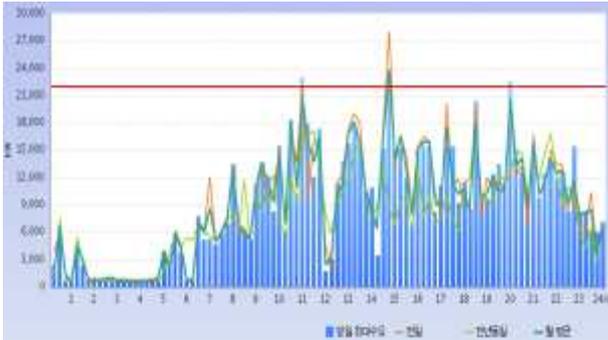


그림 2. 방전을 필요로 하는 구간 산정 방법
Fig. 2. Method that required discharge period

표 2. 모델 변전소의 적용 전기요금
Table 2. Industrial high voltage electricity charges

구분	기본요금 (원/kW)	전력량 요금(원/kW)			
		시간대	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
고압B	선택 I 6630	경부하	60	60	67
		중간부하	112.3	82.3	112.3
		최대부하	193.5	112.6	168.5
	선택 II 7380	경부하	56.2	56.2	63.2
		중간부하	108.5	78.5	108.5
		최대부하	189.7	108.8	164.7
선택 III 8190	경부하	54.5	54.5	61.6	
	중간부하	106.8	76.9	106.8	
	최대부하	188.1	107.2	163.0	

표 3. 계절별 시간대별 전력 요금
Table 3. Electricity charges for seasonal and hourly

구분	여름철, 봄, 가을철 (6~8월), (3~5월, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
	경부하시간대	23:00~09:00
중간부하시간대	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00 17:00~23:00	12:00~17:00 20:00~22:00
최대부하시간대	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	17:00~20:00 22:00~23:00

현재의 요금체계는 시간대에 따라 최대 3배 이상 차이를 확인할 수 있었으며, 국가 정책에 따라 이 편차는 향후 더욱더 확대될 것으로 예상된다. 따라서 비교적 전기요금이 낮은 경부하시간에 에너지를 저장하고 최대부하시간대에 방전을 시행한다면, 최대전력 억제 이외에 수용가의 전력요금 절감에 기여할 수 있을 것이다.

4. 에너지 저장장치의 알고리즘

부하 분석결과 최대전력은 일 3회 발생 가능하고, 최대부하시간과, 경부하 시간대의 전력요금이 3배 이상 차이나는 특징을 고려할 때 매 1분마다 전력량을 누적하여 10분간 적산하고 이 값이 선정한 최대 전력값을 초과할 것으로 예상될 때 3C 방전량으로 5분 방전을 시행하도록 하였다. 무엇보다도 시간동기가 중요한 만큼 전력량계의 시간을 알고리즘에 적용하였다. 배터리는 리튬계열의 특성을 반영하여 3C를 고려하였으며, 기타 성능과 용량은 이상적인 경우를 가정하고 최대 방전량으로 3개의 최대전력을 억제할 수 있는 시스템을 기준으로 하였다[6].

그림 3은 에너지 저장장치의 알고리즘을 상세하게 나타낸 것이다. 최초 에너지 저장장치의 SOC(State of Charge)를 확인하여 만충 되었는지를 확인한다. 이는 보통 심야시간대에 이루어지는 알고리즘으로, 값이 싼 경부하 시간에 충전하여 피크전력 저감 및 에너지 절감을 수행하기 위함이다. 체크가 완료되었으면 알고리즘에서 설정할 값을 입력받는다. 여기에서는 저감하고자하는 목표 전력값을 설정할 수 있으며, 때에 따라서 강제 충전 및 방전을 수행할 수 있는 상황을 모의하였다[5].

현재 상태에서의 에너지 저장장치의 충/방전을 결정하기 위해서 1분 전의 데이터를 바탕으로 하여 목표 전력값을 넘겼을 경우에는 방전을 수행하며, 그렇지 않은 경우에는 스탠바이 상태를 유지하게 된다. 필요에 따라서 에너지 저장장치의 방전을 필요로 하는 구간이 많은 경우에는 전기요금이 다소 비싼 경우라도 강제 충전을 수행하여 기본요금인 피크 전력을 저감할 수 있도록 모의하였다.

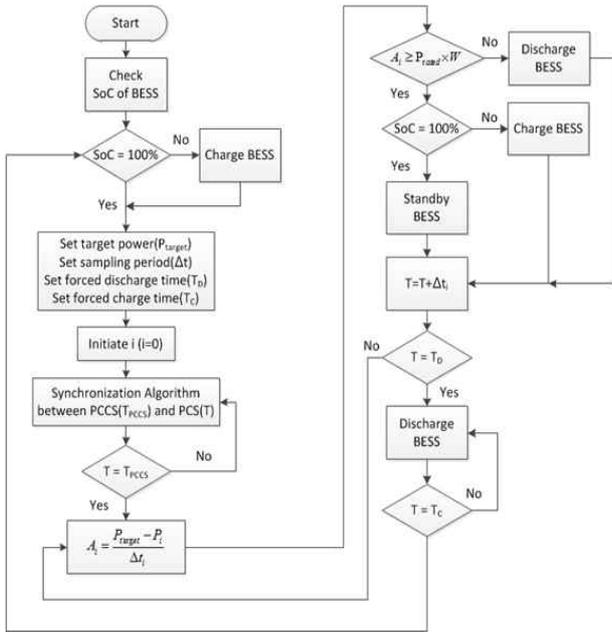


그림 3. 에너지 저장장치의 알고리즘
Fig. 3. Algorithm of energy storage system

마지막으로 심야시간 이전에 에너지 저장장치 내에 잔량이 존재한다면 강제 방전을 수행함으로써 에너지를 소비할 수 있으며, 충전은 그 다음날 새벽 심야시간대에 수행하게 된다.

5. 도입한 알고리즘을 통한 결과 분석

5.1 초기 조건

본 알고리즘에서 피크 전력의 20%를 경감하기 위하여 22,400kW를 목표 전력값으로 하여 이보다 높게 나타난 경우에는 저감을 하도록 수행하였다.

데이터는 매 1분마다 데이터를 받아 충/방전을 결정하도록 하였고 한국전력공사의 전력포탈서비스 PCCS(Power Consumption Consulting System) 데이터를 활용하였다. PCCS에서 최대전력 데이터는 15분마다 현시되므로 각 1분마다의 데이터를 임의로 만들기 위해서 약 45%의 편차를 두었으며, 이 편차는 A 변전소의 실제 데이터를 바탕으로 심야시간을 제외한 나머지의 dP/dt 를 계산하여 도입한 것이다.

여기에서는 심야시간에 1회 충전한 에너지를 이용

하여 다음 심야시간이 오기 전까지 다시 충전하지 않도록 구현하였으며, 잔량이 존재하는 경우 또는 목표 전력값에 도달하지 않아 방전을 하지 않은 경우에는 강제 방전을 통하여 상대적으로 비싼 중간부하 또는 최대부하 시간에 전력을 공급하도록 하였다. 이때의 시간은 21시~23시 사이에 방전하는 것으로 설정하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Matlab을 사용하였다.

5.2 결과 분석

① 목표 전력값에 도달하지 않는 경우

그림 4는 목표 전력값에 도달하지 않는 경우인 2012년 10월 15일 데이터를 바탕으로 에너지 저장장치 알고리즘을 수행하였을 때의 결과를 나타낸다. 이날의 피크전력은 15,859.2kW로써 목표 전력값인 22,400kW에 한참 미치지 못하므로 피크전력을 저감하기 위한 에너지 저장장치 동작을 수행하지 않는다. 이와 같은 경우에는 21시 이후에 충전되어 있는 에너지를 방전하여 에너지 측면에서의 전력 요금을 경감하는 방안으로 수행한 것이다.

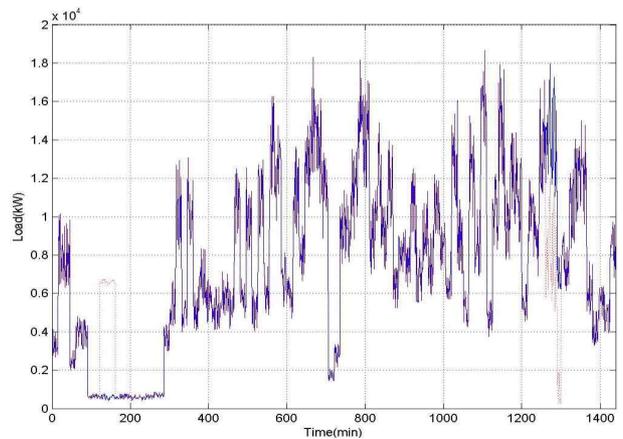


그림 4. 사례 ①에서 에너지 저장장치의 유무에 대한 부하 전력

Fig. 4. Case ① load power for with/without BESS

여기에서 파란색이 기본 부하 전력이며, 빨간색이 에너지 저장장치를 도입하였을 때의 부하 전력이다.

그림 5 및 그림 6은 에너지 저장장치의 충/방전 전력 및 SoC를 나타낸다.

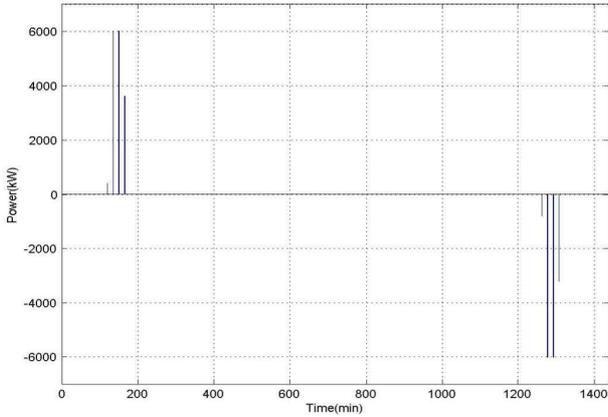


그림 5. 사례 ①에서 에너지 저장장치의 충/방전 전력
Fig. 5. Case ① charge/discharge of BESS

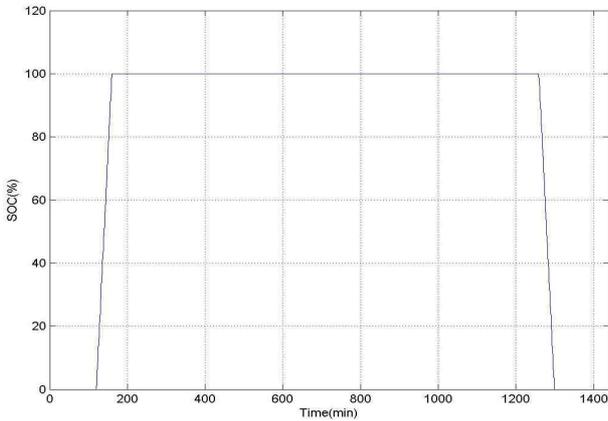


그림 6. 사례 ①에서 에너지 저장장치의 SOC
Fig. 6. Case ① SOC(State of Charge) of BESS

② 목표 전력값이 1회 도달하는 경우

그림 7은 목표 전력값에 1회 도달하는 경우인 2013년 1월 5일 데이터를 바탕으로 에너지 저장장치 알고리즘을 수행하였을 때의 결과를 나타낸다. 이 날의 피크 전력은 28,044.8kW로써 목표 전력값인 22,400kW를 초과하므로 피크전력을 저감하기 위한 에너지 저장장치 동작을 수행해야한다. 또한 1회 방전 후 에너지 저장장치 내에 잔량이 존재한다면 21시 이후에 충전되어 있는 에너지를 방전한다. 여기에서 파란색이 기본 부하 전력이며, 빨간색이 에너지 저장장치를 도입하였을 때의 부하 전력이다.

그림 8 및 그림 9는 에너지 저장장치의 충/방전 전력 및 SoC를 나타낸다.

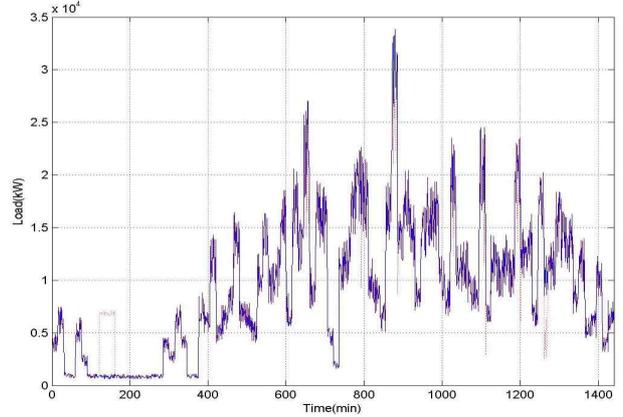


그림 7. 사례 ②에서 에너지 저장장치의 유무에 대한 부하 전력

Fig. 7. Case ② load power for with/without BESS

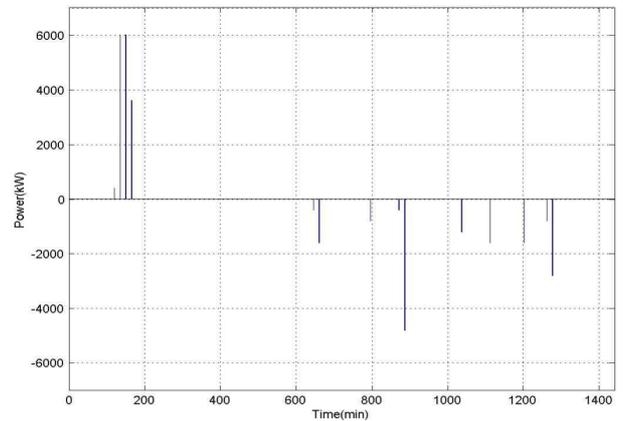


그림 8. 사례 ②에서 에너지 저장장치의 충/방전 전력
Fig. 8. Case ② Charge/discharge of BESS

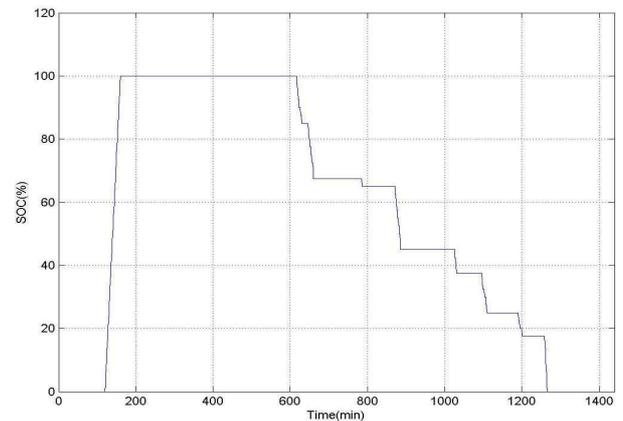


그림 9. 사례 ②에서 에너지 저장장치의 SOC
Fig. 9. Case ② SOC(State of Charge) of BESS

③ 목표 전력값이 2회 도달하는 경우

그림 10은 목표 전력값에 2회 도달하는 경우인 2013년 5월 18일 데이터를 바탕으로 에너지 저장장치 알고리즘을 수행하였을 때의 결과를 나타낸다. 이 날 목표 전력값인 22,400kW를 초과하는 전력은 24,102.4kW(11시 00분) 및 26,611.2kW(14시 45분) 이므로 피크전력을 저감하기 위한 에너지 저장장치 동작을 수행해야한다. 또한 2회 방전 후 에너지 저장장치 내에 잔량이 존재한다면 21시 이후에 충전되어 있는 에너지를 방전한다. 여기에서 파란색이 기본 부하 전력이며, 빨간색이 에너지 저장장치를 도입하였을 때의 부하 전력이다.

그림 11 및 그림 12는 에너지 저장장치의 충/방전 전력 및 SoC를 나타낸다.

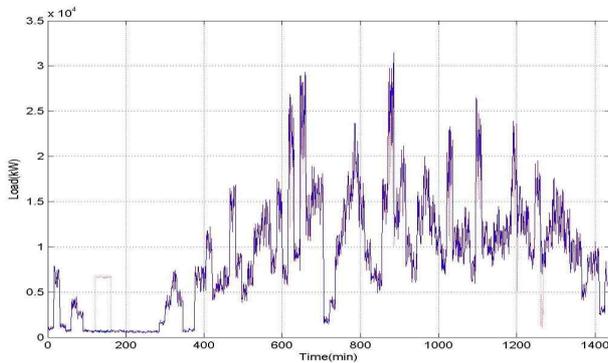


그림 10. 사례 ③에서 에너지 저장장치의 유무에 대한 부하 전력
Fig. 10. Case ③ load power for with/without BESS

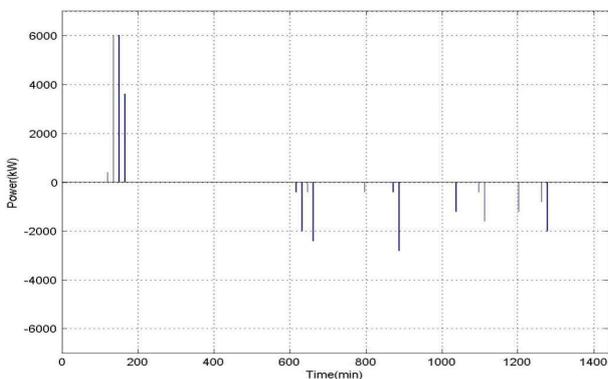


그림 11. 사례 ③에서 에너지 저장장치의 충/방전 전력
Fig. 11. Case ③ charge/discharge of BESS

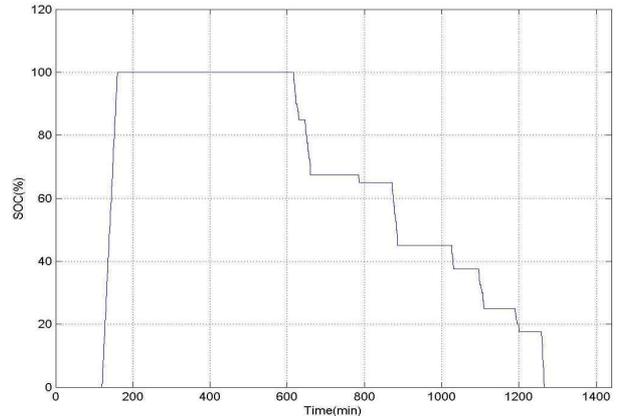


그림 12. 사례 ③에서 에너지 저장장치의 SOC
Fig. 12. Case ③ SOC(State of Charge) of BESS

그림 5, 8, 11의 경우 에너지 저장장치의 충/방전 횟수가 각각 1, 2, 3회보다 많이 나타났다. 이는 실제 데이터와 같이 편차가 심한 경우를 고려하였기 때문에 PCCS에서 특정 구간이 목표 전력값보다 낮은 경우라 할지라도 방전을 수행한 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 요금 산정에서 중요하게 차지하는 계약 전력 및 산업용 부하에서 비교적 높은 전기 요금을 갖는 시간대에서의 에너지 절감을 위해 BESS 알고리즘을 구현하였으며, 이를 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하였다. 시뮬레이션 결과 최대 3회의 방전을 필요로 하는 구간까지 모두 peak cut을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 알고리즘이 검증되었다고 판단하였다. 특히 최근 배터리 성능 향상으로 최대 방전량이 3C 이상으로 확대된 것을 고려한다면 충분한 효과가 있을 것으로 사료되며, 또한 시간대별 전력요금이 차등 적용되고 향후 점진적 확대가 예상되는 만큼 최대전력의 절감효과 이외에 전력요금 절감효과도 중요한 성과중 하나가 될 것으로 판단된다.

다만 교류철도계통에서의 부하 예측은 일반 계통과는 다르게 부하 패턴이 존재하지 않기 때문에 거의 불가능하다고 할 수 있으며, 기법을 적용하는 것이 매우 어렵다. 따라서 약간의 오차와 변수가 존재하나 변전소에서 계측한 과거의 많은 데이터를 분석하여 패턴

을 유추할 수 있다면 향후 에너지 저장장치를 운영함에 있어서 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Steiner. M, Scholten. J, Energy Storage on Board of Railway Vehicles, Power Electronics and Applications European Conference in Dresden, 2005.
- [2] Steiner. M, Mlohr. M, Pagiela. S, Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles, Power Electronics and Application European Conference on Aalborg, Sep. 2007.
- [3] M. Ogasa, Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies : Example with Hybrid Electric Railway Vehicles, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.3, No. 1, pp.15-20, Jan. 2008.
- [4] Ogawa. T, Yoshihara. H, Wakao. S, Kondo. K, Kondo. M, Energy Consumption Analysis of FC-EDLC Hybrid Railway Vehicle by Dynamic Programming, Power Electronics and Application European Conference on Aalborg, Sep. 2007.
- [5] Su-Gil Lee, A Study on Improvement to Train Power Quality for Dynamic Characteristic on Electric Railway Train, Doctor's degree dissertation of Soongsil University, Dec. 2009.
- [6] Han Ju electric. co. Ltd., et. al. "Manufacture Catalog and information data", 2014.

◇ 저자소개 ◇



전용주(全容胄)

1971년 10월 7일생. 1995년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2001년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국철도공사 전기기술단 과장.



강병욱(姜炳旭)

1985년 1월 21일생. 2010년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



채희석(蔡熙石)

1984년 10월 6일생. 2011년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정.



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대학교 전기공학과 교수. 본 학회 회장.