

하이브리드 타입 에너지 저장장치의 교류 고속철도 적용

(Applying Hybrid Type Energy Storage System in AC High Speed Railway)

전용주* · 강병욱 · 채희석 · 김재철**

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

Abstract

In case of DC railway, value of ESS(Energy Storage System) is already approved. Whereas AC railway system, there are a lot of differences such as system design and operation pattern. Therefore there is doubt about AC ESS usefulness. Especially, regenerative energy can return to the source. So in case of AC 25kV system, it is necessary to consider different operation algorithm compare to DC railway system.

In this paper ESS which is installed in AC high-speed railway was introduced. Power consumption pattern of High speed trains were analyzed, proper storage material was reviewed and operation algorithm was suggested. Super capacitor and Battery was used with hybrid type. Super capacitor was used to handle short term energy movement because of its prompt response and battery was used to handle long term energy movement because of its high energy density.

Also in case of operation algorithm, phase control method was upgraded compare to voltage magnitude detection method.

Key Words : ESS, Electric Railway System, Hybrid, High Speed

1. 서 론

최근 저탄소 녹색성장을 위해 전 세계적으로 에너지 사용의 최적화를 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 스위칭 소자의 비약적인 발전으로 철도차량 제동 시 회생 에너지 발생이 보편화되어 직류를 중심으로 에너지 저장시스템 적용이 활발하게 이루어지고 있다.

직류는 짧은 변전소간의 거리 및 빈번한 열차의 기동 및 정차 특성으로 회생 에너지 발생 및 재활용도가 높아 철도선진국을 비롯하여 국내에서도 이미 적용 운영 중이다[1-5]. 반면 교류의 경우는 직류대비 회생

* 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 6월 24일
1차심사 : 2014년 6월 26일
심사완료 : 2014년 7월 21일

에너지의 활용도가 낮고, 추가적 설비가 요구되어 경제적 불리함으로 인한 적용이 쉽지 않다. 그러나 KTX를 운행하는 경부고속선의 경우는 대용량부하(13,560kW)의 운영으로 공급구간의 말단에는 전차선 전압강하의 증가로 차량의 입력 전압 저하 및 전압변동 심화의 문제가 발생될 수 있다. 이는 차량의 전장품 고장의 원인 및 차단기의 오동작을 유발하므로 주의가 필요하다.

따라서 교류용 에너지 저장시스템은 최대전력 억제 및 전압변동 안정화를 주요 설치목적으로 하며, 더불어 회생에너지를 재활용할 수 있도록 구성된다.

본 논문에서는 국내 KTX 운영노선을 대상으로 설치된 에너지 저장시스템에 대한 기술적 특징과 설치효과 및 활용 가능성을 확인하였다.

2. 교류용 에너지 저장 시스템의 구성

AC구간에 설치된 에너지 저장 시스템의 주요설비는 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째는 고압측 55,000V를 980V로 강압시켜주는 주변압기 부이고, 두 번째는 AC/DC 및 DC/DC 양방향 컨버터 부이며, 세 번째는 에너지 저장 매체부로서 이를 그림1과 그림 2에 나타내었다.

2.1 인버터 및 컨버터

변압기 2차측의 컨버터는 AC 980V를 DC로 변환하고, 이를 다시 DC 1500V로 변환한다. 컨버터는 단상 2병렬로 구성하였다.

DC/DC 양방향 컨버터는 양방향 전류의 흐름이 가능하며 직접적으로 저장매체의 충전과 방전을 수행한다. 슈퍼커패시터와 배터리를 충전할 때에는 Buck 컨버터로 동작하고 슈퍼커패시터와 배터리에 저장된 에너지를 가선으로 공급할 때에는 Boost 컨버터로 동작한다.

초기 충전 모드는 유지 보수나 초기 시스템 기동시 슈퍼커패시터를 운용 가능한 전압까지 충전하기 위한 모드이다. 초기 충전 모드에서는 일정 전류로 슈퍼커패시터를 충전하는 정전류 제어 기법을 사용한다. 배

터리와 달리 슈퍼커패시터의 경우 초기 상태가 이론적으로 단락회로로 증가화되기 때문에 전류는 무한대에 가까워진다. 이를 방지하기 위한 소프트 스타트 기법을 사용하였다. 소프트 스타트 기법은 초기 충전 시에 약 1.2초간 IGBT 스위칭 소자를 최소한의 펄스만을 내보내어 전류의 제한을 둔다. 이렇게 최소한의 펄스로 충전을 하면 슈퍼커패시터에 일정 전압이 충전되고, 이후로는 전류의 급격한 상승이 없어 정전류 제어의 수행이 가능해진다.

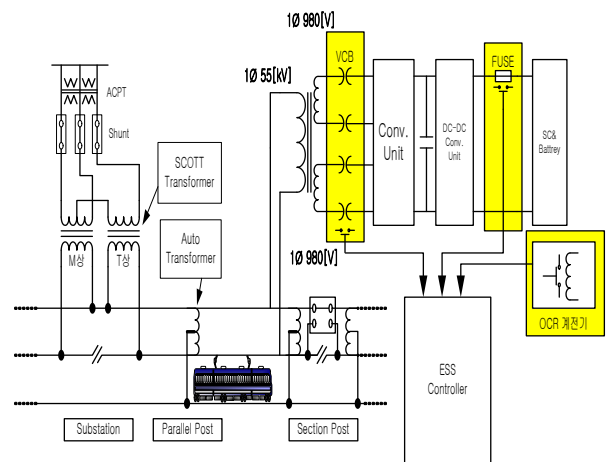


그림 1. 구분소에 설치된 에너지 저장 시스템 블록도
Fig. 1. System Block diagram for ESS at SP

2.2 에너지저장 매체

에너지 저장 시스템에 사용되는 저장 매체로는 슈퍼커패시터와 리튬 폴리머 배터리가 사용되었다. 슈퍼커패시터는 순간적인 응답은 빠르지만 정전 용량이 작아 역행이나 회생시간이 긴 KTX 고속 전철의 에너지를 보상하기에는 부족하다. 하지만 리튬 폴리머 배터리의 경우 응답 속도는 슈퍼커패시터에 비해 느리지만 정전 용량이 크기 때문에 슈퍼커패시터의 부족한 정전 용량을 보완 하여 장시간 충/방전이 가능하다 [5-6]. 따라서 시험개소에 설치된 에너지 저장 시스템에는 슈퍼커패시터와 리튬 폴리머 배터리를 병렬 연결하여 하이브리드 에너지 저장 시스템을 구축하였다. 두 가지의 저장 매체를 병렬 운용 하면서 순간적인 전력 보상뿐 아니라, Peak 전력을 감소시키거나 Shift

하이브리드 타입 에너지 저장장치의 교류 고속철도 적용

시키는 효과를 얻을 수 있다. 두 저장매체는 설정된 전압값과 위상에 따라 충·방전을 시행하게 된다.

슈퍼커패시터 모듈은 2.7V/3,000F의 단위 셀이 직렬로 18개가 접속되어 총 전압 및 용량은 48.6V/165F로 구성되어 있다. 이러한 모듈을 직·병렬로 결선하여 총 29.7MJ로 설계하였다. 슈퍼커패시터의 출력단에는 유사시나 시스템 정비 시에 슈퍼커패시터에 저장된 에너지를 소비할 수 있는 방전 저항을 연결하였다. 배터리 3.7V/200Ah 264직렬로 총 200kWh로 설계하였으며, 운용 효율성을 위해 관리시스템(BMS : Battery Management System)을 설치하여 배터리의 상태를 실시간으로 감시하도록 하였다.

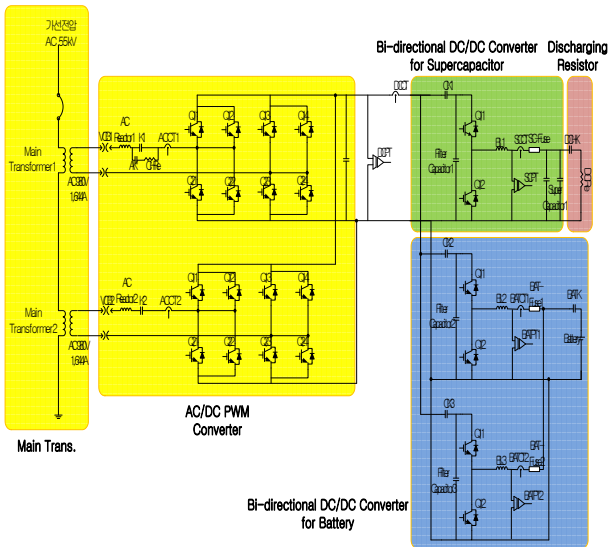


그림 2. 에너지 저장 시스템 회로도
Fig. 2. One line diagram of ESS

3. 에너지저장장치의 알고리즘 제한

고속선에 설치된 에너지 저장 시스템은 차량의 운행과 가선전압의 상태에 따라서 충전과 방전을 반복한다. 또한 초기 기동 시에 슈퍼커패시터의 운용을 위한 초기 충전 모드가 있고, 배터리의 상태를 파악하여 저전류로 충전하는 내부충전 모드가 존재한다.

에너지 저장 시스템의 저장매체인 슈퍼커패시터와 배터리는 각각 다른 동작 조건을 가지고 있다. 충전과 방전을 위한 전압 레벨과 충/방전 전류를 표 1에 정리

하였다.

표 1. 저장매체별 동작 특성
Table 1. Operation characteristic of storage material

구 분	슈퍼커패시터	배터리
동작 최저 전압	550V	900V
동작 최고 전압	1000V	1080V
충전 전류	100A	180A
방전 전류	100A	200A

3.1 차량의 운행모드 검출

KTX 고속철도의 경우 가선전압이 AC이고 회생 시에 가선전압의 상승이 없기 때문에 충/방전을 위한 차량의 운행 모드가 가선전압만으로는 파악이 쉽지 않다. 따라서 가선전압과 더불어 가선 전류를 검출하여 가선전압과 전류의 위상차를 이용하여 차량의 역행, 회생 상태를 판별한다.

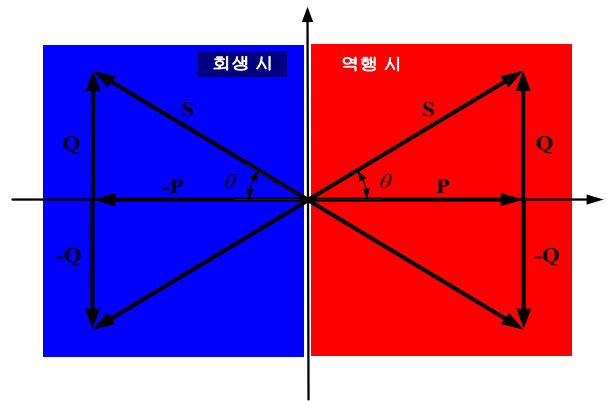


그림 3. 운행열차의 역·회생시 전력분포
Fig. 3. Power Consumption related to Train accelerating and braking

그림 3에 운행열차의 역행 및 회생 시 전력 분포를 도시하였다. 차량이 역행 시에는 전력 소비가 일어나기 때문에 가선전압과 전류의 위상이 1,4사분면에서 움직인다. 반대로 차량이 회생할 때에는 가선 전류의 위상이 2,3사분면에서 발생된다. 에너지 저장 시스템에서는 이러한 차량의 운행 모드에 따른 가선전압과

전류의 위상을 이용하여 충전 및 방전 모드를 결정하고 수행한다.

3.2 유 · 무효전력 보상 및 역률개선

가선에서 발생하는 무효전력을 보상하여 역률을 개선하고 동시에 유효전력도 보상할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 역행 시 가선전압과 전류는 선로 임피던스로 인해 위상차가 발생하고, 이러한 위상차로 인해 무효전력 성분을 야기시킨다. 발생된 무효 전력 성분은 역률을 저해하는 요인으로 작용하게 된다.

가선의 환경(역행/회생)과 에너지 저장 시스템의 환경(충전/방전)에 따라 4가지 모드로 나눌 수 있고, 이에 따른 효과는 그림 4와 같다. 차량의 역/회생 시에 에너지 저장 시스템이 충/방전을 수행하면서 무효전력성분이 보상되는 것을 알 수 있다.

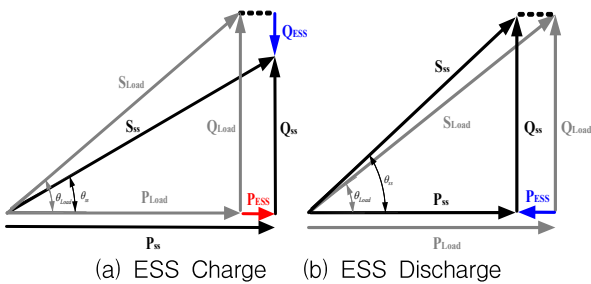


그림 4. 운행열차의 역행 시 ESS 동작
Fig. 4. ESS Phase diagram while train running

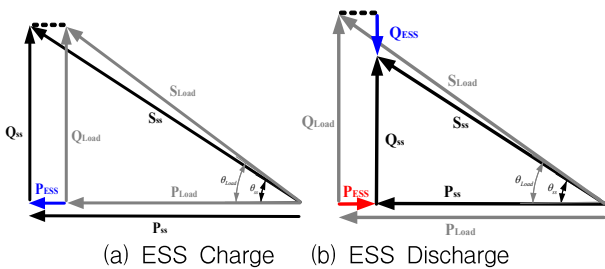


그림 5. 운행열차의 회생 시 ESS 동작
Fig. 5. ESS Phase diagram while train regenerating

최초 기동 시에 초기 충전이 완료된 후, 차량의 역행과 회생이 있을 시 충 · 방전이 시행되며, 충전 모드는

슈퍼커패시터가 완전 충전될 때까지 Mode 1과 Mode 3의 동작을 수행하고, 슈퍼커패시터가 완전 충전이 된 후에는 Mode 2와 Mode 4의 동작으로 완전 방전을 수행한다. 완전충전은 슈퍼커패시터의 정격전압까지 충전을 의미하고 완전방전은 슈퍼커패시터의 정격전압의 1/2까지 방전을 의미하며 에너지 량으로는 전체용량의 75%에 해당한다.

표 2에 저장매체별 동작 특성을 나타내었다. Mode 1에서는 유효전력을 공급받아 무효전력을 보상하게 됨으로 역률 개선효과는 다른 모드에 비해 상당히 높은 반면 가선으로부터 유효전력을 공급받아야 하는 단점을 가진다. Mode 2는 부하에 유효전력을 공급함으로써 변전소에서 공급해야 할 유효전력을 감소시켜주지만 역률은 상대적으로 저감되는 효과를 보인다. Mode 3에서는 회생에너지에 의해 발생된 유효전력을 에너지저장시스템이 흡수함으로써 회생 시 유효전력을 감소시키지만, 반면 역률은 개선된다. Mode 4에서는 회생 시 유효전력 성분을 에너지 저장시스템이 공급함으로써 변전소로 유입되는 유효전력의 양을 증가시킬 뿐 아니라 역률을 개선시키는 장점을 가진다.

표 2. 저장매체별 동작 특성
Table 2. Operation characteristic of storage material

Mode	역률	비고
1	$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_{Load} - Q_{ESS}}{P_{Load} + P_{ESS}} \right) \right]$	유효전력 증가 역률 개선
2	$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_{Load}}{P_{Load} - P_{ESS}} \right) \right]$	유효전력 감소 역률 하락
3	$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_{Load} - Q_{ESS}}{-P_{Load} + P_{ESS}} \right) \right]$	유효전력 감소 역률 개선
4	$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q_{Load}}{-P_{Load} - P_{ESS}} \right) \right]$	유효전력 증가 역률 개선

3.3 충 · 방전 모드 시퀀스

충전 모드는 차량이 회생 했을 때 발생하는 회생 에너지를 충전하는 경우와 무부하시 충전하는 경우 두 가지가 있다. 차량이 회생하게 되면 가선 전류가 흐르

게 되고 이때 흐르는 가선 전류와 가선전압의 위상차를 이용하여 차량이 회생하고 있음을 파악할 수 있다. 가선전압 안정화를 위해 가선전압이 900V(1차측 : 25,254V) 이상인 경우에만 충전 모드는 수행된다. 고속선 구분소의 경우 회생량 보다 방전량이 훨씬 많기 때문에 최대 수요 전력 저감과 가선전압 안정화를 위해서 무부하시 저장매체를 충전 시켜 방전 모드일 때 더 많은 양의 에너지를 공급해 준다.

따라서 가선전압이 930V(1차측 : 26,100V)이상이고 가선에 전류가 흐르지 않을 경우에 충전 모드로 동작하여 저장 매체를 충전 시켜준다. 충전 모드에 들어가 양방향 DC/DC 컨버터가 동작하기 전에 AC/DC 컨버터가 먼저 동작하여 DC Link 전압을 1500V로 유지시켜준다.

방전 모드는 차량이 역행 했을 때 가선에 저장된 에너지를 공급해주는 모드와 가선전압이 900V(1차측 : 25,254V) 이하로 떨어졌을 때 이를 보상해 주기 위해 방전하는 두 가지 모드가 있다.

차량의 역행은 가선전압과 전류의 위상차를 이용하여 판별하고 가선전류의 RMS값이 50A 이상일 때 전력 소비가 있다고 판단하여 저장매체에 저장된 에너지를 공급하여 준다.

4. 현장시험 결과

교류시스템은 직류와 달리 전압 전류의 위상 변화에 따라 에너지의 흐름의 변화가 발생한다. 따라서 역행 시와 회생 시에 따라 위상의 변화를 관찰하고 저장 모드 설정에 반영해야 한다. 차량 역행 시(전력 소비 시) 일반적인 가선전압과 전류 파형을 그림 6에 나타내었다.

가선전압은 변압기 2차측의 컨버터 입력 전류를 측정하였고, 가선 전류는 CT를 사용하여 측정하였다. 차량이 역행하여 전력을 소비하게 되면 인덕턴스 부하에 의해 전류의 위상이 전압에 비해 뒤쳐지는 것을 확인할 수 있다.

반면 차량이 제동을 수행하면 회생에너지가 발생하게 되고 이때의 가선전압과 전류의 위상은 대략 180° 차이를 두고 발생하며 이를 그림 7에 나타내었다. 에너지 저장 시스템은 차량의 역/회생 판별을 위와 같은

가선전압과 전류의 위상차를 이용하여 판단하도록 하였다.

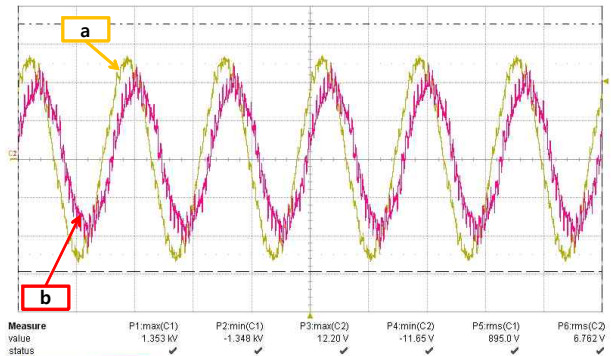


그림 6. 운행열차의 역행시 전압, 전류 파형
Fig. 6. V, I Phase diagram while Train running

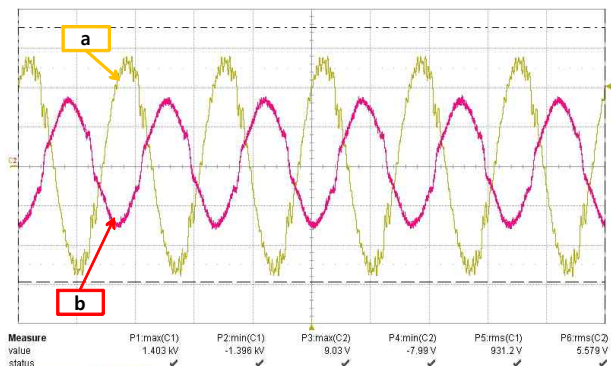


그림 7. 운행열차의 회생시 전압, 전류 파형
Fig. 7. V, I Phase diagram while Train regenerating

슈퍼 커패시터는 초기 충전을 제외 하고는 550V에서 1,000V의 전압 레벨에서 동작한다. 이는 방전 모드에서 슈퍼커패시터의 전압을 승압하여 가선으로 전달하는데 안정적인 운용을 위해 최저 전압을 550V로 제한하기 때문이다. 설계한 운용 레벨인 550V에서 최대 전압인 1,000V까지 100A로 충전하는데 걸리는 총 시간은 82초이다. 반면 방전 전류는 100A이고, 완전 충전 전압인 1,000V에서 방전 제한 레벨인 550V까지 방전하는 시간은 84초이다.

그림 8에 충/방전 모드 수행 시 배터리의 전류 (a)와 슈퍼커패시터의 전류 (b), 전압 (c)의 파형을 나타내었다. 슈퍼커패시터의 경우 100A로 충/방전을 수행하고 배터리의 경우 충/방전 모드에서는 DC/DC 컨버터

1군당 100A, 총 200A로 충전 및 방전을 수행한다. 상시 충전에서는 50A로 충전을 수행한다. d지점에서 슈퍼커패시터는 완전 충전되어 충전을 멈추지만 배터리는 더 많은 양의 에너지를 저장할 수 있기 때문에 충전이 계속되는 것을 확인할 수 있다. 방전 시에도 역시 배터리가 더 많은 시간을 방전할 수 있다.

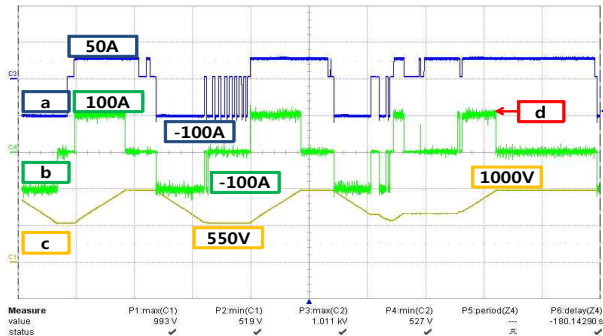


그림 8. 충·방전시 슈퍼커패시터 전압, 전류 및 Battery 전류

Fig. 8. Supercapacitor V, I and Battery I while operating(a : Battery I, b : Supercapacitor I, c : Supercapacitor V)

5. 에너지저장 시스템 설치효과

에너지 저장 시스템을 설치하여 운영함으로써 얻을 수 있는 효과는 첫 번째는 차량의 회생에너지를 저장하여 공급함으로써 소비전력을 저감 및 역률개선 효과이며, 두 번째는 최대전력 저감 및 가선전압 안정화 효과를 포함한 전력품질 개선효과를 기대할 수 있다. 특히 최근 열차운행 횟수 증대에 따른 고속전철변전소의 부하량 증가로 말단개소 순간전압강하 저하 등 시스템 보완에 대한 관심이 증대되고 있다.

5.1 소비전력 저감 효과

에너지 저장시스템에 의한 소비전력 저감 효과를 확인하기 위하여 시스템을 설치 운전하며 일주일의 간격을 두고 에너지 저장 시스템을 기동 하였을 때와 기동하지 않았을 때의 데이터를 비교하여 분석해 보았다. 2014년 2월~3월의 측정결과를 그림 9의 그래프에 표시하였다. 에너지 저장 시스템을 기동 하였을 때 유

효전력과 무효전력이 모두 감소하였으며, ESS로부터 유효전력기준으로 약 1,200kWh/일 정도 방전하고 있음을 알 수 있었다.

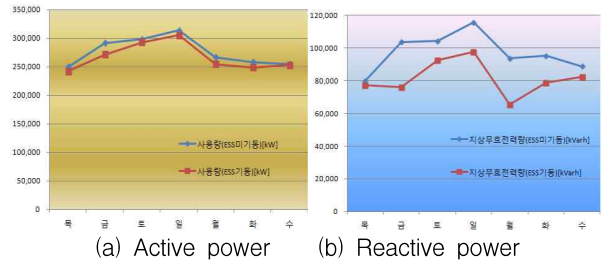


그림 9. ESS 기동 여부에 따른 유/무효 전력
Fig. 9. Active and reactive power related to ESS operation

5.2 가선전압 안정화

가선전압이 무부하시 전압보다 떨어지게 되면 저장된 에너지를 공급하여 가선전압을 보상하여 주는 효과를 얻을 수 있다. 전철변전소는 열차의 이동에 따라 가선전압이 수시로 변동하게 된다.

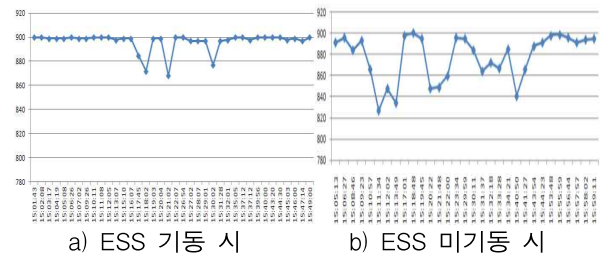


그림 10. ESS 기동 여부에 따른 가선전압 안정화효과
Fig. 10. Effect of line voltage stabilization related to ESS operation

무부하시 전압은 945V(1차측 : 26,500V) 정도이지만 최대 965V(1차측 : 27,000V)에서 850V(1차측 : 24,000V)까지 변동하게 된다. 또한 가선전압이 19.5kV까지 강압하게 되면 철도의 운행에 큰 차질이 생기게 된다. 에너지 저장 시스템은 가선전압을 실시간 검지하여 가선전압이 일정 기준 떨어질 때 저장된 에너지를 순시적으로 방전하여 가선전압의 강압을 방지하는 기능을 한다. 그림 10에 에너지 저장 시스템을 기동

및 미 기동 시에 따른 가선전압의 RMS값을 나타내었다. 측정은 객관적 비교를 위해 일정시간대를 상호 비교하였다. 에너지 저장 시스템을 기동하였을 때는 가선전압의 강압 횟수와 강압 폭이 미 기동 시에 비하여 적었다.

6. 결 론

AC전원을 사용하는 고속철도(KTX)의 경우는 역행, 회생 에너지가 일반적인 DC전원을 사용하는 도시철도와 차이가 있어, 교류 고속구간에 적합한 시스템의 설계와 알고리즘의 선택이 필요하였다. 시스템은 슈퍼커패시터와 배터리를 병용하는 하이브리드 타입으로 설치 운영하여 수 초 단위의 에너지 활용에는 충·방전 속도가 탁월한 슈퍼커패시터를 적용하였고 수 십 초 이상의 다소 긴 시간의 방전 시에는 에너지 밀도가 높은 배터리 방전 로직을 적용하였다. 알고리즘으로는 기존의 전압 크기만을 이용한 에너지 충·방전 로직 외에 추가로 위상제어를 기반으로 에너지를 충·방전할 수 있도록 적용하였다. 그 결과 시스템의 활용도가 향상하였으며 일평균 약 1,200kwh의 에너지 절감을 확보됨을 알 수 있었다. 경제적 측면만을 고려한다면 손익분기점에 도달하지 못하는 것으로 나타났으나, 고속 열차의 지속적 증편, 설비용량 한계, 급전전압 불안 등이 잠재적 위험요소를 고려시 효과는 지속적으로 확대될 것으로 판단된다.

AC용 에너지 저장시스템은 비용적인 절감측면에서의 접근보다는 말단개소에 설치하여 대용량 고속열차(KTX, KTX-산천) 등의 운행 시 급전전원 안정화(순간전압강하 보상 등)의 역할이 더욱 중요함을 알 수 있었다.

본 논문을 통하여 축적된 AC용 에너지 저장시스템의 효과가 향후 교류 25kV 시스템의 열차 운행 안정성과 효율성 향상에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] Bum-gon Kim et. al., "The possibility of applying Energy storage system in il-San lime ", Korail Research institute, 2011.12.

[2] Han-min Lee et al., "A study on technical application of recycle energy storage system for electric rail car", Korea institute of Electrical Engineers summer conference 2007.
 [3] Yoon-Chul Lee et. al., "The newest technology and market trend of secondary battery", Electronic and communication trend analysis Vol. 14, No.6, 1999. 12.
 [4] Takeshi Konishi et. al., "Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC", QR of RTRI, Vol. 45, No.2, May, 2004.
 [5] Seung-gil Baek, "A case study of using regenerative energy Daejeon metropolitan express transit corporation", DJET reserch center, 2011.3.
 [6] Hyun Kim, "Energy production and using method at Railway system", The korea transport institution, 2011.3.
 [7] Tae-Kyu Kim, "Applicaion case of regenerative energy at Japan railway", transportation policy reserch institute of Japan, 2011.3.

◇ 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.



채의석(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.