

# 회생에너지 저장시스템이 제동 브랜딩 안정화에 미치는 영향

김규중 · 이근오<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 안전공학과  
(2010. 7. 30. 접수 / 2010. 10. 25. 채택)

## The Effect of Regenerative Energy Storage System on Stabilization of Electro-Pneumatic Braking Blending

Kyu-Joong Kim · Keun-Oh Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received July 30, 2010 / Accepted October 25, 2010)

**Abstract** : Regenerative Energy Storage System(ESS) is a system that saves regenerative energy which generated instantly in the regenerative braking of Electric Multiple Unit(EMU) and disappear, and reuse the stored energy when EMU is in powering. Such system related to a research field of renewable energy which emerged concerning climate change and high oil prices. In the case of existing domestic rolling stock, about 25% to 30% of generated regenerative energy is restored to power source and is regarded as direct factor of raising catenary voltage. Such rapid change of catenary voltage is a cause of the failure of EMU's electronic equipment and lowering its reliability and is also a cause of train's fault occurred by tripping circuit breaker. In this paper, we intend to investigate the effect on blending characteristics of electric-braking and pneumatic-braking whether the regenerative energy storage system is used or not in urban transit DC 1,500V feeding system, while trains run. And we also intend to investigate its effect on stabilization of the blending, fluctuation of catenary voltage and various electric equipments.

**Key Words** : regenerative energy storage system(ESS), electric multiple unit(EMU), braking blending

### 1. 서론

환경오염에 의한 오존층 파괴로 지구의 평균 온도는 역사 이래 최근 50년간 가장 빠른 속도로 상승했으며 기온상승으로 인한 폭서, 빙하감소로 인한 해수면 상승, 홍수, 가뭄 등 기후변화로 인한 자연재해가 최근 전 세계에서 계속 발생하고 있다. 석유, 석탄 등의 화석에너지 고갈과 환경오염에 의한 지구 기후변화의 규제 및 방지에 관한 국제연합규약인 교토의정서가 발효됨에 따라 우리나라도 2008년부터 점진적으로 교토의정서의 이행의무를 지게 되어 에너지의 사용효율을 높이고 대체 에너지 개발이 시급한 과제로 급부상하고 있다<sup>1)</sup>.

전기에너지를 사용하는 대도시 도시철도시스템은 자동차 등 타 교통수단보다 신속·안전하고 에너지효율성이 높은 대중교통수단이며, 또한 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 등의 공해물질 배출 면에서도 가장 우수

한 청정에너지 절감시스템이다. 이러한 장점 때문에 우리나라 각 대도시에서 약 7,000량 이상의 도시철도 전동차들이 현재 운행하고 있으며, 대부분의 전동차는 회생이 가능한 시스템이다. 회생에너지는 운행하는 전동차가 감속할 때 발전기로 동작하여 만들어 내는 전기에너지로써 전동차 역행 시 소비되는 에너지의 약 45%가 회생에너지이다<sup>2)</sup>.

그러나 직류 도시철도 변전소 시스템은 대부분이 순방향 다이오드 방식으로 회로가 연결되어 전동차의 회생전력이 전원 측으로 반환되지 않는 구조라서 제동할 때 순간적으로 발생된 회생에너지는 그대로 전차선 전압을 상승시켜 전력시스템을 불안정하게 할 뿐만 아니라 전동차고장의 원인이 되고 있다<sup>3)</sup>.

실제적으로 회생에너지는 회생 전동차와 역행 전동차의 순간적인 오버랩을 제외하고는 전동차 내 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라지게 된다. 즉 소비에너지의 45%인 회생에너지 중 주변 전동차에 1/3만 활용되고 나머지 2/3는 전차

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
leeko@snut.ac.kr

선에서 열로 사라진다는 것이다<sup>4)</sup>.

직류 도시철도 시스템에서 공기 및 전기제동을 동시에 수행하는 전동차 동력차량(M-Car)의 브랜딩 제어는 VVVF 인버터에 의한 전기제동을 우선적으로 실시하나 전기제동을 수용할 수 있는 가선전력 시스템이 있을 경우에만 가능하며, 다이오드를 이용한 정류회로의 전력공급 시스템에서는 전기제동 사용이 제한적이며 대부분 공기를 이용한 기계(마찰)제동을 사용하게 된다. 전기제동을 최대한 사용할 경우 제동 및 ATO 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 브레이크슈의 사용을 줄여 전동차 유지보수비용을 줄일 수 있으며, 또한 지하공간에서 브레이크 슈 마모에 의한 미세먼지를 줄이고 터널 내의 온도상승을 막을 수 있다<sup>5)</sup>.

이러한 전기제동의 장점에도 불구하고 에너지 재활용의 최적조건이 유지되지 않아 쓸모없이 사라지는 회생에너지를 더 효율적으로 재활용하기 위해 설치하는 회생에너지 저장시스템은 가선 전압의 안정화 및 에너지 효율을 높일 수 있는 방법으로써 저탄소 녹색성장에 따른 에너지 절감과 지구 온난화 방지를 위하여 최근 각광받고 있는 연구 분야다.

본 논문은 DC 1,500V 도시철도 급전시스템에서 전동차 운행 중 회생에너지저장시스템 가동 유무에 따른 제동 브랜딩 특성에 미치는 영향과 브랜딩 안정화, 가선전원의 변동, 각종 전기기기 및 지하 공기질에 미치는 영향에 대하여 연구하고자 한다.

## 2. 회생에너지 저장시스템

회생에너지 저장시스템은 직류 도시철도 구간에서 전동차 제동 시 발생한 회생에너지를 배터리, 리튬이온, 슈퍼 캐패시터와 같은 에너지 저장매체에 저장했다가, 역행 시 저장된 에너지를 다시 공급하는 회생에너지 재활용 시스템이다. 두 대의 전동차에서 감속과 역행이 동시에 실행되어 별도의 에너지 저장과정을 거치지 않고도 감속하는 전동차에서 발생된 에너지가 역행하는 전동차에 전달되어 전력이 소모되면 가장 최적이지만, 오버랩이 완벽하게 되지 않는 경우에는 전력소비가 많아지게 된다. 이러한 문제점을 해결할 회생에너지 저장시스템은 변전소의 모선에 연결되어 전동차가 회생할 때 전동차에서 발생된 전력에 의해 전차선 전압이 올라가면 회생에너지는 에너지 저장매체에 저장되고, 다시 전동차가 역행을 하면 전차선 전압이 내려가

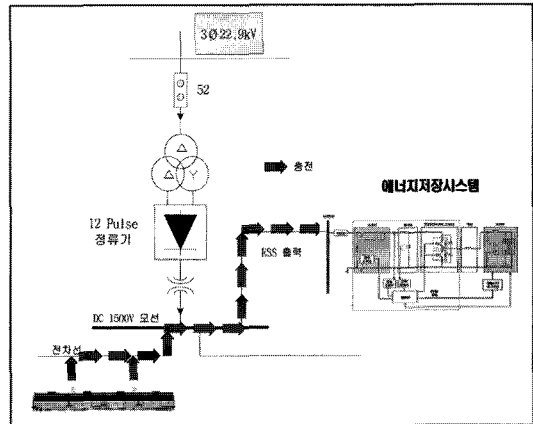


Fig. 1. Charging regenerative energy.

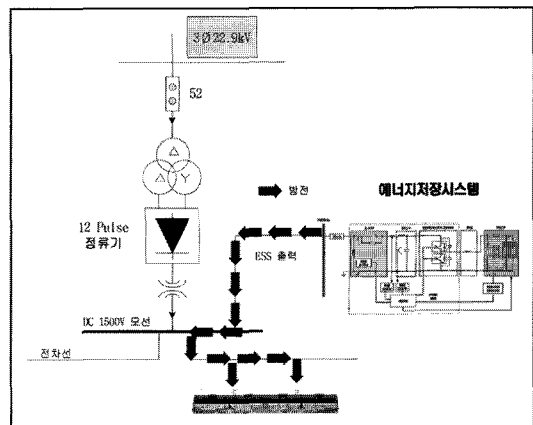


Fig. 2. Discharging regenerative energy.

므로 에너지 저장시스템은 이 저장된 회생에너지를 전차선을 통해 전동차에 공급하게 되어 에너지절감이 가능하다<sup>6)</sup>.

Fig. 1은 전동차가 감속할 때 VVVF 인버터시스템이 발전기로 동작하여 에너지를 발생하면 가선전압을 상승시켜 전력 시스템을 불안정하지 않도록 에너지 저장시스템에 전력을 저장하는 방식을 나타내고 있다. 또한 Fig. 2는 전동차가 역행할 때 가선전압이 일정전압 이하로 낮아질 경우 에너지 저장시스템으로부터 가선으로 저장된 전력을 공급하는 방식을 나타내고 있다.

## 3. 전동차 제동시스템

전동차의 제동브랜딩 특성을 모델링하기 위한 TCMS(Train Control Monitoring System) 전동차의 기본적인 제동 시스템 주요사항은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Brake system Specification of EMU

Classification		Main Content
Configuration of EMU		Tc - M - M - Tc
Catenary voltage		DC 1,000V~1,800V
Deceleration	Service	3.5[km/h/s] (+5%, -10%)
	Emergency	4.5[km/h/s] (+5%, -10%)

Fig. 3은 열차시스템 블록도를 나타내고 있다. 자동운전(ATO) 전동차의 ATO 장치는 속도센서를 통해 실시간으로 전동차의 속도를 수신하여 차량의 종합제어장치(TCMS)에 추진 및 제동명령을 아날로그 신호로 지령하는 것을 나타낸다. 이 제동명령을 TCMS의 TC는 Train Bus를 통하여 각 량에 위치한 CC(Car Computer)에 Torque 수치로 전송하고 TC Car와 M Car에 지령한다. 차량제어컴퓨터(CC)의 지령을 받은 제동시스템과 VVVF 인버터장치가 각각 공기제동과 전기제동을 실시하여 ATO 지령에 맞게 전동차를 감속시키도록 설계되어 있다<sup>7)</sup>.

공기제동 및 전기제동을 담당하는 M Car의 제동 브랜딩 특성 곡선은 Fig. 4와 같다. VVVF 인버터에 의한 전기제동을 우선으로 실시하나, 가선 전력 시스템의 회생전력 수용 불가 시에는 공기제동으로 즉각적으로 대체한다. 그러나 이러한 제동 브랜딩 패턴은 다이오드를 이용한 정류회로의 전력 공급장치의 시스템에서는 전기제동의 사용이 제한적이어서 얻어진 회생에너지가 실효됨은 물론이고 전기제동의 부족분을 기계제동력(공기제동)으로 보충해야만 하므로 브레이크슈 마모라는 2차적인 손실이 뒤따르게 된다.

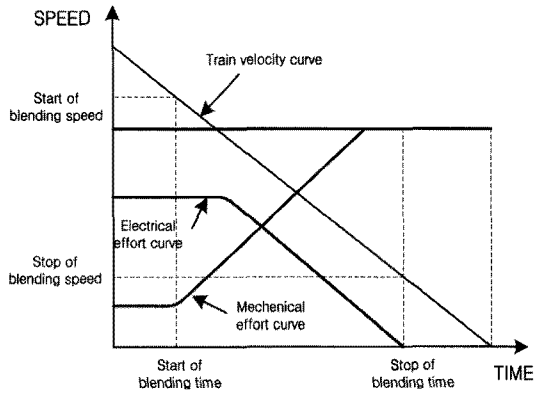


Fig. 4. Characteristic curves of brake blending (M-car).

## 4. 시험결과

### 4.1. 제동 브랜딩 특성

회생에너지 저장시스템이 전동차 운행 중 제동 브랜딩 특성에 주는 영향을 분석하기 위하여 Train Computer에 전송되는 M-Car의 제동 브랜딩 데이터를 수집하였다. 측정장비 및 방법은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Measurement method of brake blending data

Classification	Specification
Laptop Computer	Model No. HP NC8000
Speed Sensor	Model No. TS2802N12E1
Software	TDIC (Train Diagnostic Information Computer)
Sampling Time	200ms

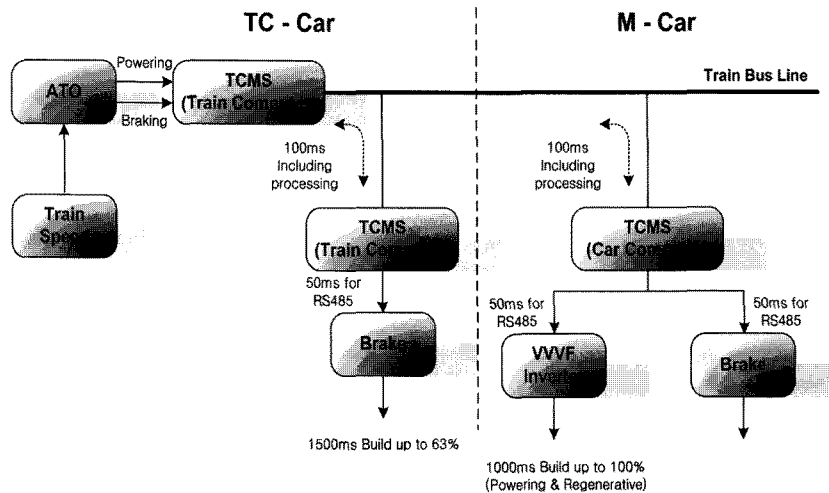


Fig. 3. Block Diagram of Train System.

현재 대부분의 도시철도 역사에 PSD 설비가 도입됨에 따라 정위치 정차의 중요성과 이를 안정적으로 제어하기 위한 기술연구가 활발히 진행 중이다. 차량의 특성, 운영노선 및 승객수의 변화 등의 요인을 고려하여 신뢰성 높은 정위치정차율을 달성하기 위해서는 전동차 주요 장치인 TCMS와 추진장치, 제동장치 간에 상호 인터페이스의 구분과 시간적인 특성 분석이 명확히 이루어져야 한다<sup>8)</sup>.

지령 받은 제동명령에 대해 정확히 전기 및 공기 제동력을 처리하기 위하여 개통 전 수개월에 걸쳐 시험한 시운전 결과를 분석하여 공기제동이 시작되는 시점(브랜딩 시작점)이 11km/h에서 시작되어 전기제동이 완전히 Fade-out되어 공기제동만 수행되는 브랜딩 끝점을 4km/h의 속도로 최적화한 제어패턴을 프로그램화하여 대전도시철도 1호선 전동차는 개통 이후 현재까지 운행하고 있다. 그러나 이러한 제동 브랜딩 패턴도 발생된 회생에너지를 가선 또는 역행조건의 차량에서 수용할 수 있는 경우에만 가능하며, 전기/공기제동의 브랜딩 실패로 인한 제동력 부족분 전부를 공기를 이용한 기계(마찰)제동으로 처리하게 된다.

Fig. 5는 회생에너지 저장시스템이 가동되지 않는 본선구간에서 측정된 제동 브랜딩 파형으로 공기제동의 시작점인 11km/h 속도에서 회생에너지의 수용성 부족으로 더 이상 제동 브랜딩 패턴을 수행치 못하고 정지하는 시점까지 필요한 제동력 모두를 공기(마찰)제동으로 처리하는 것을 나타내고 있다.

Fig. 6은 회생에너지 저장시스템이 가동되는 구간에서 측정된 제동 브랜딩 파형으로, 인버터장치

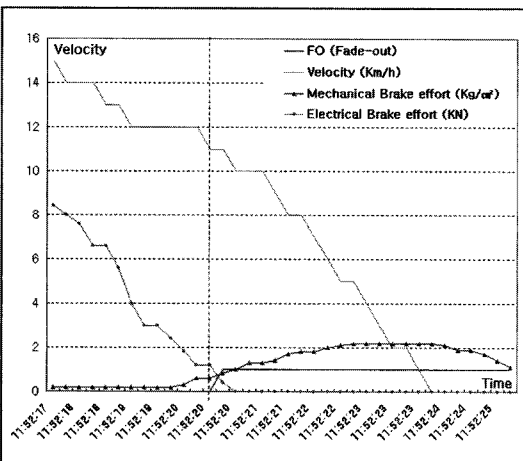


Fig. 5. Realistic characteristic curves of brake blending(without ESS).

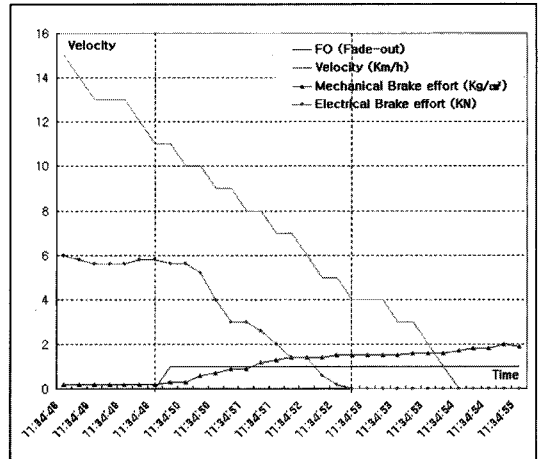


Fig. 6. Realistic characteristic curves of brake blending(with ESS).

의 전기제동에서 발생하는 전기에너지를 에너지저장시스템에서 충전을 통해서 안정적으로 수용함으로써 차량의 전기제동이 지속적으로 실시되어 브랜딩 시점인 11km/h의 속도로부터 Fade-out되는 4km/h까지 전기 및 공기제동의 브랜딩 제어가 정상적으로 수행되었으며, 이 결과로 감속하는 전동차에서 발생하는 회생에너지를 회생에너지저장시스템이 효율적으로 제어함으로써 전동차의 제동 브랜딩 패턴이 안정화됨을 확인하였다.

#### 4.2. 가선전압 변동

DC 1,500V 도시철도 급전시스템에서 회생에너지 저장시스템 가동 유무에 따른 가선전압의 변동 형태를 분석하고자 열차 운행 시 DCPT를 사용하여 정류기 후단의 모선전압을 회생에너지 저장시스템이 설치된 대전도시철도 1호선 대동역 변전소에서 측정하였다. Fig. 7은 발생된 회생전력을 저장할 수 있는 회생에너지 저장시스템이 가동하지 않았을 때의 가선전압의 변동형태를 측정된 파형으로 Normal 전압 1,617V 기준으로 회생 시 최대 피크전압이 1,830V까지 상승되었고, 역행 시에는 1,575V까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 하지만 회생에너지 저장시스템을 가동하였을 경우에는 회생 및 역행 시 최대 1,750V에서 최소 1,594V로 보다 안정화된 가선전압의 파형이 나타남을 Fig. 8에서 보여 주었다. 시험을 통하여 회생에너지로 인한 가선전압의 상승이 에너지저장시스템의 충전작용으로 안정화되었으며, 또한 부하증가로 가선전압이 급격히 하강하지 않도록 회생에너지를 방전함으로써 안정적인 전

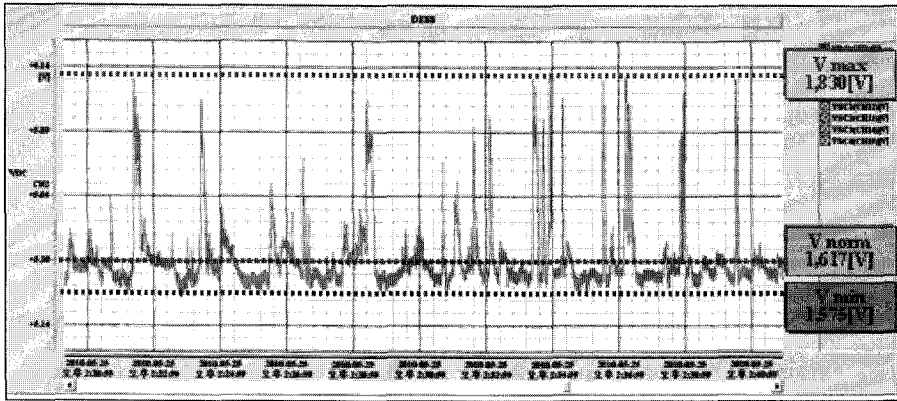


Fig. 7. Catenary voltage waveform on operating EMU (without ESS).

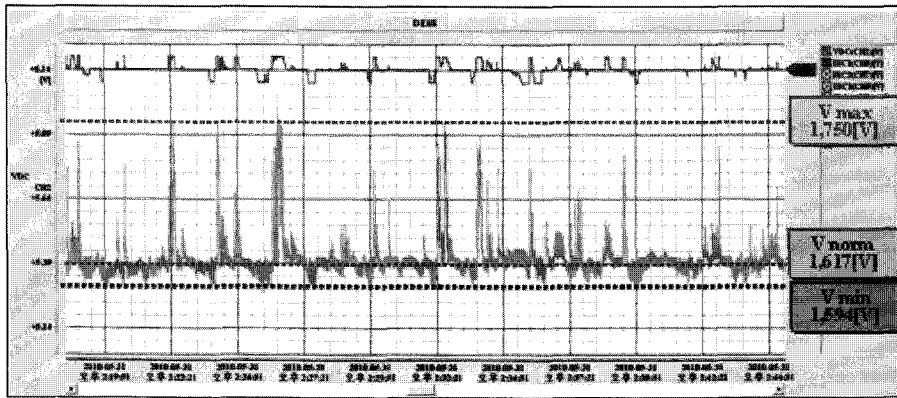


Fig. 8. Catenary voltage waveform on operating EMU (with ESS)

력제어가 가능함을 확인하였다.

### 4.3. 고조파 발생

고조파는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수를 말하는 것으로 전력계통이나 전력변환장치에서 발생하는 고조파는 지속적이고 잔류성분이 많아 다음 Table 3에서 보여주는 바와 같이 각종 전기기기나 선로에 미치는 영향이 매우 크다<sup>9)</sup>.

Table 3. Damage according to harmonic

Equipment	damages
콘덴서, 리액터	고조파 전류 유입에 의한 과열 소손
변압기	철심 내 자속의 왜곡, 철손과 동손 증가
유도전동기	토크회전의 주기적 변동, 철손과 동손 증가
케이블	과열로 인한 전기화재 발생
형광등	콘덴서의 과열 소손
통신선	전자유도장애에 의한 잡음 발생
컴퓨터장치	평활콘덴서 과열, 논리회로의 오동작 발생
전력퓨즈, NFB	과전류에 의한 오동작

Fig. 9는 에너지저장시스템이 가동하지 않았을 때 DC 1,500V 변전소 12펄스 정류기에 의한 12펄스 ripple 성분이 크게 나타남을 보여 주었으며, Fig. 10에서는 에너지저장장치 가동으로 가선전원에 나타나는 리플이 안정적으로 감소됨을 확인하였다.

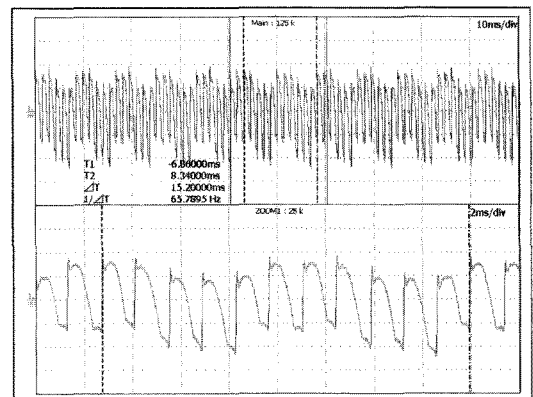


Fig. 9. Catenary voltage variation on operating EMU (without ESS).

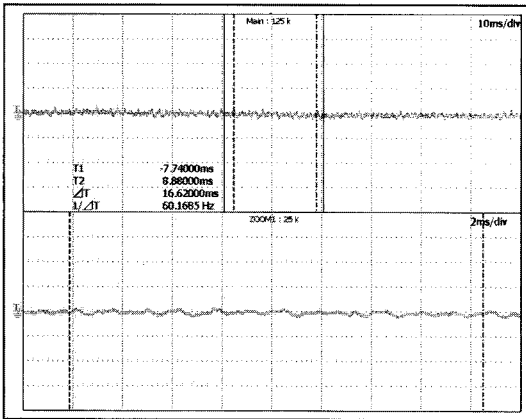


Fig. 10. Catenary voltage variation on operating EMU(with ESS).

Fig. 11, 12는 DC 1,500V 모선에서 회생에너지저장시스템 가동유무 조건에서 전동차 운행에 따른 고조파 발생형태를 나타낸 파형이다. Fig. 11은 DC

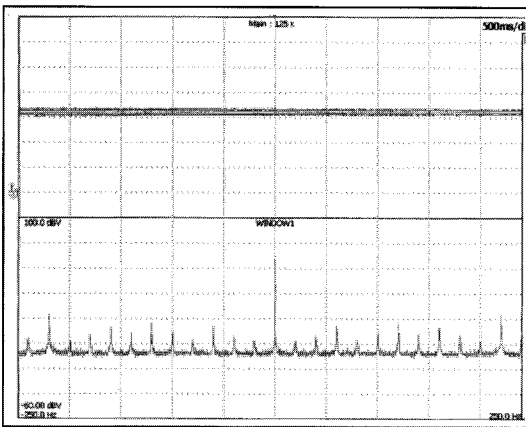


Fig. 11. Harmonics waveform(without ESS).

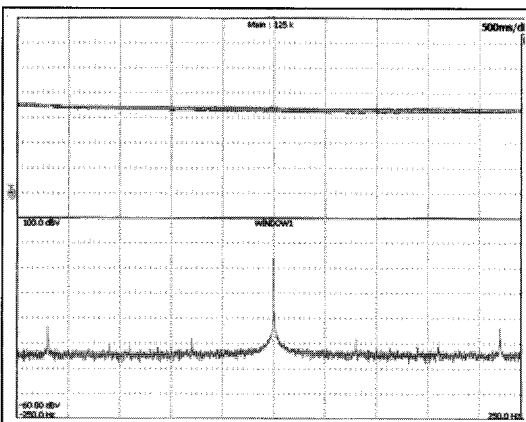


Fig. 12. Harmonics waveform(with ESS).

1,500V 가선전원에 나타나는 고조파에 전동차 운행으로 추진제어장치와 SIV가 기동됨으로서 6n±1의 고조파 성분이 증가되어 3, 11차 고조파가 추가로 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 12는 회생에너지저장시스템이 가동, 가선전원을 제어함으로서 고조파는 대부분이 상쇄, 소멸되고 7차 성분만 미미하게 나타남으로서 회생에너지저장시스템이 가선전원의 안정화에 기여함을 확인할 수 있다.

#### 4.4. 지하역사 공기질 측정

Fig. 13, 14는 회생에너지저장시스템 가동구간에서의 지하역사 내 승강장 및 대합실의 공기질을 측정하여 나타낸 그래프로써, 2009년에 비해 2010년 지하역사 내 공기질이 전반적으로 향상되었음을 알 수 있었다. 이 결과로 회생에너지저장시스템이 가동되어 전동차 전기(회생)제동이 최대한 사용됨으로써, 공기제동 마찰력에 의한 브레이크슈 사용

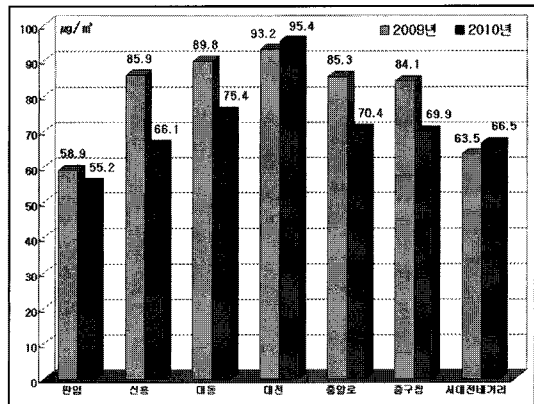


Fig. 13. Quantity of particulate matter(in Platform).

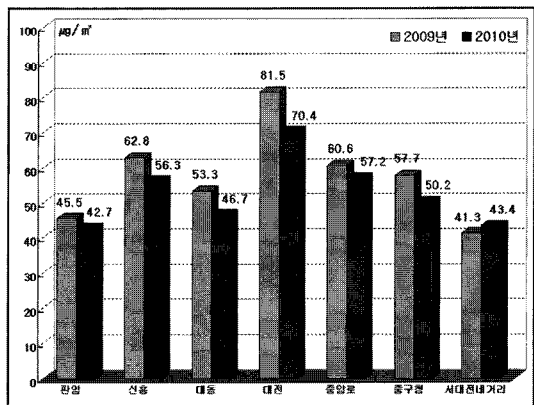


Fig. 14. Quantity of particulate matter(in Waiting lounge).

량이 줄어 인체에 유해한 분진가루의 발생이 감소되었음을 확인하였다.

## 5. 결론

회생에너지저장시스템은 전동차 운행 중 발생되는 회생에너지를 재활용함으로써 가선전원의 안정화, 각종 전기기기의 보호 및 전력비 절감 등의 효과가 기대되는 신재생에너지시스템이다.

본 논문은 DC 1,500V 도시철도 급전시스템에 회생에너지저장시스템이 실제 설치되어 가동 중인 대전도시철도 1호선 대동역 변전소에서 시스템 가동 유무에 따른 전동차의 제동 브랜딩 특성, 가선전압의 변동, 고조파 발생 등을 측정하여 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었으며, 보다 정밀한 시스템 제어가 요구되는 무인운전시스템 차량의 경우도 회생에너지저장시스템을 활용한 제동 브랜딩 패턴에 대한 연구가 필요하리라 예상된다.

1) 운행하는 두 대의 전동차에서 감속과 역행이 동시에 실행되는 오버랩이 완벽하지 않는 경우에도 동력차량(M Car)에서 발생된 회생전력이 회생에너지저장시스템에 수용되므로, 전기(회생)제동을 최대로 사용함에 따라 기계적인 마찰제동(공기제동)이 최소로 사용되는 이상적인 제동 브랜딩 제어의 특성이 나타남을 확인하였다.

2) 전동차 운행 중 발생된 회생전력에 의한 가선전압 상승이 회생에너지저장시스템의 충전작용으로 안정화되었으며, 또한 부하증가로 가선전압이 급격히 하강하지 않도록 회생에너지를 방전함으로써 안정적인 전력제어가 가능함을 입증하였다.

3) 전동차 운행에 따른 고조파 성분의 증가로 인해 추가적으로 나타나는 고조파가 회생에너지저장시스템의 가동으로 고조파 성분 대부분이 상쇄, 소멸됨을 확인하였으며, 이러한 장점으로 각종 차량기기의 내구연한 연장 및 브레이크슈 마모의 최소화로 인체에 유해한 미세먼지가 줄어 지하역사 승강장 및 대합실의 공기질이 향상되었음을 알 수 있었으며, 전동차 유지보수비용의 절감도 가능하리라 판단된다.

감사의 글 : 본 논문은 한국철도기술연구원의 “차세대 첨단도시철도시스템 기술개발사업”의 일환으로 대전도시철도공사에 시범 설치한 회생에너지저장시스템을 활용하여 연구하였습니다.

## 참고문헌

- 1) 백승길, 임지영, 차준일, 김길동, 권경민, “에너지저장시스템의 충·방전 Auto Level-Tuning 알고리즘에 관한 연구”, 2010년 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 126, 2010.
- 2) 이한민, 김길동, 안천현, 장길수, 권세혁, “전기철도시스템에 에너지저장시스템 적용 해석에 관한 연구”, 2009년 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, pp. 34~36, 2009.
- 3) 안천현, 이한민, 김길동, 이희성, “에너지저장시스템 적용에 의한 에너지절감 효과에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제12권, 제4호, pp. 582~589, 2009.
- 4) 이한민, 김길동, 안천현, 김영규, 김태석, “도시철도용 에너지저장시스템 에너지 절감을 현장시험”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1461~1467, 2009.
- 5) 배창한, 장동욱, 김주락, 한문섭, 김용기, “직류 1500V 전철변전소의 회생전력량 측정 및 분석”, 한국철도학회 논문집, 제10권, 제6호, pp. 717~722, 2007.
- 6) 김길동, 이한민, “전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술”, 한국조명전기설비학회지 제20권, 제2호, pp. 10~15, 2006.
- 7) 이경복, 이희선, 명기환, 정인수, “차륜의 슬립/슬라이드 발생시 Multi Brake Modeling 분석을 통한 정지점 추적에 관한 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 3356~3364, 2009.
- 8) 이경복, 이희선, 김진수, 마상전, 김동수, “ATO 차량의 제동장치 유지보수 시스템 개발을 통한 정위치정차율 향상방안 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 359, 2010.
- 9) Thomas Blooming, Daniel J. Carnovale, “Application of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits” IEEE IAS Atlanta Section, 2007.