

에너지저장시스템의 충, 방전
Auto Level-Tuning 알고리즘에 관한 연구
Study for Charge-Discharge Auto Level-Tuning Algorithm
of Energy storage system

백승길† 임지영* 차준일* 김길동** 권경민*
Seoung-Gil Baek Ji-Young Lim Joon-il Cha Kil-Dong Kim Kyoung-Min Kwon

ABSTRACT

This paper is about control algorithms that bi-direction DC-DC Converter using Super Capacitor and regenerative power from DC feeding system in train. In order to take advantage of regenerative energy efficient, charge and discharge level value of energy storage system serve as an important factor. Respect to output fluctuations of the substation and catenary voltage changing, we offers Charge-Discharge Auto Level Tuning Algorithms to improve system following of Energy Storage System.

Key Words : Bi-direction DC-DC converter, Energy storage system, Auto Level Tuning

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화로 상징되는 환경위기와 고유가로 대표되는 자원위기에 동시 직면하였고 석유 에너지의 고갈과 환경오염에 의한 지구온난화를 방지하기 위한 도쿄의정서가 발효됨에 따라 CO₂ 배출을 억제하기 위한 신재생에너지 및 개발이 시급한 과제로 급부상하고 있다.

에너지저장시스템은 도시철도 운행전동차의 제동시 발생하여 허공으로 사라지는 회생에너지를 낭비하지 않고 에너지 저장매체에 저장한 후, 차량 운행(역행)시 재사용하는 시스템으로 전력에너지 사용량 절감과 CO₂배출가스 저감효과, 환경 친화적이고 효율적인 전력 활용에 이바지 할 수 있으며 회생실효방지 및 에너지 절약에 크게 기여할 수 있다.

회생에너지를 효율적으로 활용하기 위해서는 에너지저장시스템의 충, 방전 레벨 값이 중요한 요소로 작용하는데 진철 변전소 출력전압 변동 및 차량운행에 따른 가선전압의 변동으로 인하여 시스템을 효율적으로 활용하기 어려운 실정이다.

본 논문에서는 직류 지하철 급전시스템에서 발생하는 회생전력을 활용하기 위한 회생전력 제어용 DC-DC컨버터의 제어 알고리즘과 변전소의 출력변동 및 차량의 운행에 따른 가선변동에 따라 시스템의 추종성 및 전력 절감량을 향상시키고자 시스템의 충, 방전 Auto Level Tuning 알고리즘을 적용하여 에너지저장시스템의 최적 효율화 방안을 제안하였다.

2. 직류 전철변전소의 가선변동

2.1 직류 전철 변전소의 급전시스템

† 정회원, 대전도시철도공사, 연구개발센터
E-mail : baeker@naver.com
TEL : (042)539-3564 FAX : (042)539-3679
* 비회원, 대전도시철도공사, 연구개발센터
** 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단
* 비회원, 우진산전, 전장개발팀

변전설비는 2500kW 12pulse 정류기로 구성되어 있으며, 2500kW 정류기는 교류전원을 직류전원으로 변환하는 기능을 갖는다. 다음 도표 1은 변전설비의 정류기 정격에 대하여 나타내고 있다.

도표 1. 변전설비 정류기 정격

목 록	전 압
정격 DC전압	1500[V]
정류기용 변압기 2차측 전압	600[V]
3상 전파 정류기 전압계수	1.35
정류기 2차측 전압	810[V]
12pulse 정류기 2차측 전압	1620[V]

2.2 직류 변전소의 가선 변동분석

직류 지하철 급전시스템에서 변압기와 정류기를 통한 가선전원은 한전 전원의 변동에 의해 결정이 된다. 한전에서의 공급전원의 변동은 $\pm 3\%$ 까지 허용이 되고, 실제 측정결과 정류기 후단의 가선전압은 일정한 패턴이 없이 1625[V]를 기준으로 1612~1640[V]범위까지 변동이 됨을 확인하였다. 그림 1은 열차 운행 시에 DCPT를 이용하여 정류기 후단의 모선을 측정한 결과로서 측정라인이 두껍게 유지되는 윤곽을 보면 가선이 열차의 운행에 관계없이 흔들리고 있는 모습을 확인 할 수 있다. 여기서 날카롭게 나타나는 측정전압은 열차의 역행과 회생시에 나타나는 전압이다.

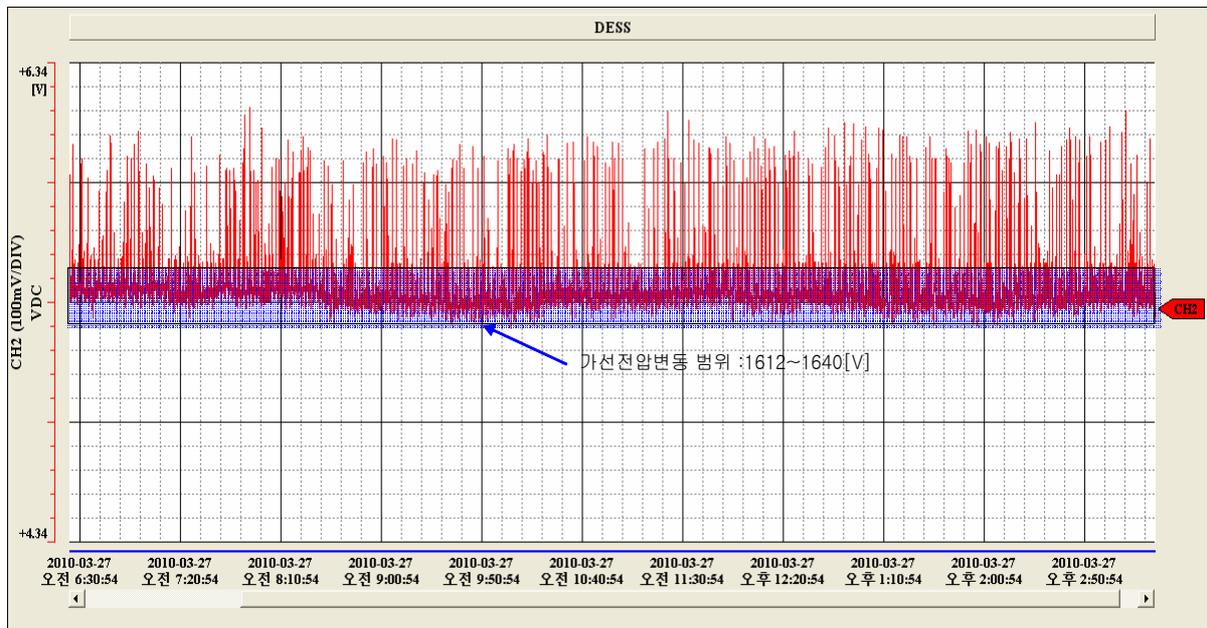


그림 1. 가선 전압변동 분석 (레코더 스케일 300[V]:1[V])

일반적으로 사용하고 있는 에너지저장시스템은 가선의 전압이 일정하다는 전제하에 가선전압보다 일정전압 이상 상승 혹은 하강하였을 때 에너지저장 시스템을 충전 혹은 방전하도록 설정하게 된다. 하지만 변전 설비의 용량이 증대됨에 따라 역행 시 발생하는 가선전압의 전압강하가 매우 작은 현실에서는 에너지 저장장치의 방전을 개시 시키는 전압을 일정전압으로 설정하는 것이 매우 어렵게 된다.

또한 다른 문제로 이러한 역행 시 발생하는 전압강하가 15[V]이하인데 반해 가선의 전압은 30[V]이상의 변동폭을 가지게 되어 실제 에너지 저장장치의 충,방전의 수행은 원활하지 못하게 될 수 있다. 이러한 이유에서 가선전압의 변동에 따른 에너지 저장장치의 충방전 개시전압 및 유지 전압에 변동을 시켜야 할 필요성이 있다. 하지만 가선전압의 변동은 어떠한 시간이나 열차의 운행패턴에 의한 일정한 패턴을 가지는 것이 아니므로 가선전압의 변동을 트래킹하기란 매우 어려운 실정이다.

3. 에너지저장시스템의 구성

3.1 양방향 DC-DC 컨버터의 구성

에너지저장 시스템의 변환장치는 그림 2에서 보는 것과 같이 Bi-direction DC-DC 컨버터를 적용하여 듀티비에 따라 양방향으로 에너지를 충, 방전할 수 있도록 구성하였다. 시스템 구성은 먼저 가선의 전원과 변환장치 간에 스위칭에 의한 고조파를 제거하기 위한 DC-link단의 필터 리액터와 캐패시터, 양방향 DC-DC 컨버터 그리고 저장을 하기위한 매개체인 슈퍼캐패시터로 구성되어진다.

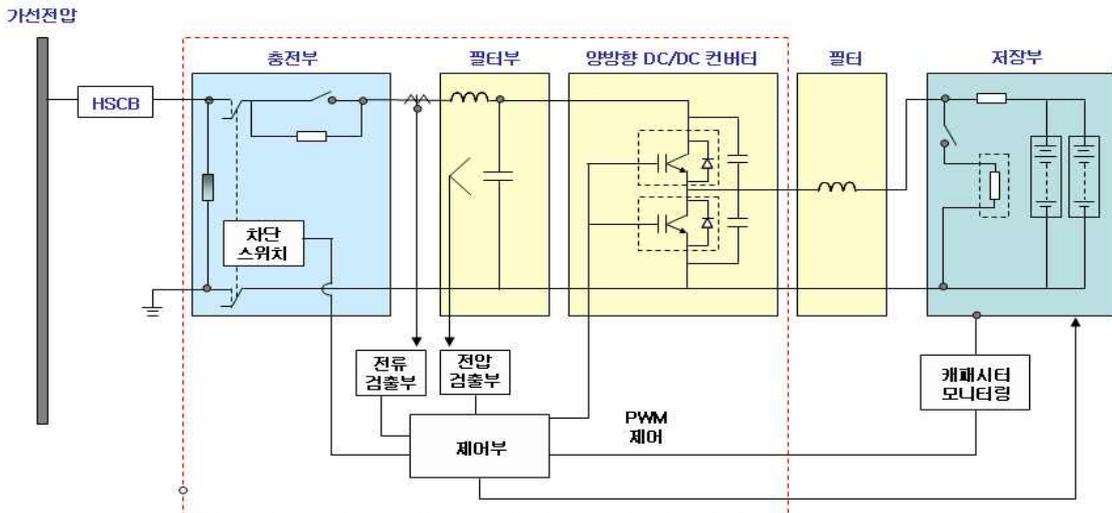


그림 2. 에너지 저장 시스템의 장치 구성도

3.2 시스템 제어기구성

에너지저장 시스템의 제어기는 초기 슈퍼캐패시터의 정전류 충전을 위한 초기충전 제어기와 초기 충전완료 후 열차의 역행, 제동시 발생하는 회생 에너지를 이용하여 가선전원을 안정화 시키기 위한 전력 제어기로 구성하였으며, 각 제어기의 구조는 PI-PI의 2중 루프 제어기로 설계 하였다.

초기 충전제어기는 초기 슈퍼캐시터를 충전하기 위한 제어기로 슈퍼캐패시터가 완전 방전되었을 때에 dv/dt 성분에 의한 돌입전류를 방지할 위한 소프트 스타트 제어기와 정전류 제어를 위한 전류제어기 그리고 전류제어기의 출력 값에 따라 듀티비를 제어하기 위한 전압제어기로 구성하였다.

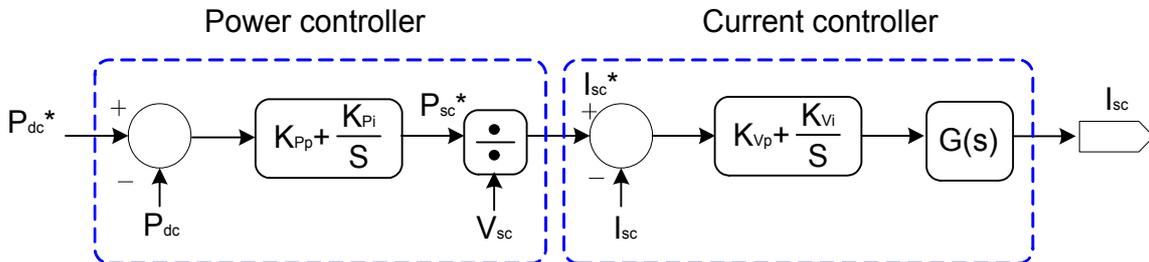


그림 3. 전력모드 제어기 구성

그림 3.은 시험에 적용한 전력모드 제어기의 간략화한 구성도이다. 전력모드 시 내부 루프인 전류제어기는 초기충전모드일 때와 달리 내부루프에 위치하게 되어 외부루프인 전력제어기의 절점주파수보다 빠른 절점주파수를 가지게 된다.

전력모드에서 외부루프인 전력제어기는 DC링크단의 전력을 제어하는 것으로 DC링크단의 임피던스는 추종값과 실제값이 항상 같게 됨으로 결국 V_{dc}^2 에 의한 에러값을 보상하는 결과와 동일하게 계산되어진다.

전력제어기에 있어서 시스템 전달함수 $G(s)$ 는 식(1)의 관계에 의해 식(2)과 같은 시스템 전달함수로 계산된다.

$$P_{dc} \approx P_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 = V_{sc} I_{sc} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{P_{dc}(s)}{I_{sc}(s)} = V_{sc}(s) = \frac{1}{s C_{sc}} \quad (2)$$

3.3 충전, 방전 Auto Level Tuning 알고리즘

에너지저장 시스템구성 및 제어기 설계는 가선의 전원이 일정한 환경이라는 가정에서부터 설계 되어 졌다. 하지만 실제 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 이렇게 이상적인 환경의 가선은 존재하지 않는다. 다시 말해 충전과 방전을 시행할 때 반드시 고려되어야 할 사항으로 가선의 변동폭 및 그에 따른 충전과 방전의 개시, 유지전압의 변동은 필수라고 할 수 있다.

에너지저장시스템은 변전소 정류기 출력전압의 유동을 면밀하게 분석하여 시스템 충전시 변전소 전원으로 충전되면 안되며, 방전 개시전압을 너무 높게 선정하여 상시방전 체계로 선정하여서는 안된다. 따라서, 에너지저장시스템의 충전, 방전 개시전압을 고정하게 되면 변전소 전원의 변동 및 열차운행에 따라 슈퍼캐패시터는 충전량에 비해 방전량이 많아지거나 방전량에 비해 충전량이 많아져 과충전, 과방전상태에 머물게 되므로 에너지 절감율은 떨어질 수 밖에 없게 된다.

다음은 Auto Level Tuning 알고리즘을 적용한 에너지저장시스템의 충전, 방전 제어블럭도를 나타낸다.

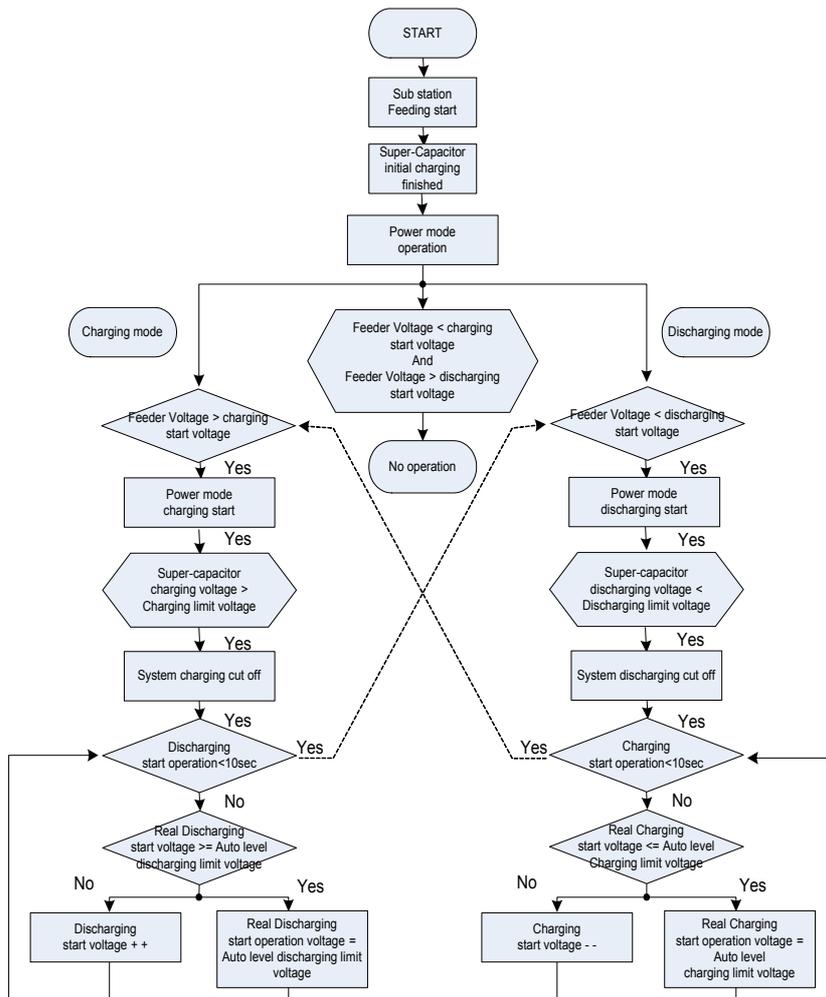


그림 4. 충전, 방전 value Auto Level Tuning 제어블럭도

그림 4. 충, 방전 Auto Level Tuning 순서도에서 알 수 있듯이 모선 전원의 변동에 따라 슈퍼캐패시터의 과방전 또는 과충전 상태에서 일정시간동안 충전 또는 방전동작이 개시되지 않을 경우 가선의 Normal 전압이 변동된 것으로 예측, 판단하여 충, 방전개시전압을 단계별로 상승 또는 하강시켜 충전과 방전을 개시하도록 하게 된다. 결과적으로 충, 방전의 횟수를 증가시켜 에너지저장시스템의 이용율을 높임으로서 시스템의 효율을 극대화 할 수 있다.

4. 시험

4.1 시험 조건

도표 2. 는 시험에 적용한 에너지저장시스템의 충, 방전조건 및 슈퍼캐패시터의 충,방전 제한용량에 대하여 나타내며, 슈퍼캐패시터에 흘릴 수 있는 전류는 200[A]로 제한 하였다.

도 표 2. 에너지저장시스템 충, 방전 조건

구 분	Auto Level Tuning 미적용	Auto Level Tuning 적용
충전개시전압	1660[V]	1645[V]~1660[V]
방전개시전압	1615[V]	1615[V]~1624[V]
슈퍼캐패시터 과충전 제한전압	1050[V]	1050[V]
슈퍼캐패시터 과방전 제한전압	450[V]	450[V]
슈퍼캐패시터 충,방전 전류제한	200[A]	200[A]

4.2 시험 파형

그림 5.는 Auto Level Tuning 미적용 시 에너지저장시스템의 충, 방전파형으로 가선전압이 전체적으로 낮아 슈퍼캐패시터 측에서는 과방전 영역에서 동작하게 된다. 확대된 파형에서 알 수 있듯이 슈퍼캐패시터의 과방전 레벨(450[V])에 도달 후부터 가선전압이 방전개시전압인 1615[V]가 되어도 방전을 해주지 못하고 있다. 이는 가선전압의 Normal 전압이 낮아진 상태에서 동작하고 있을 때 발생된다.

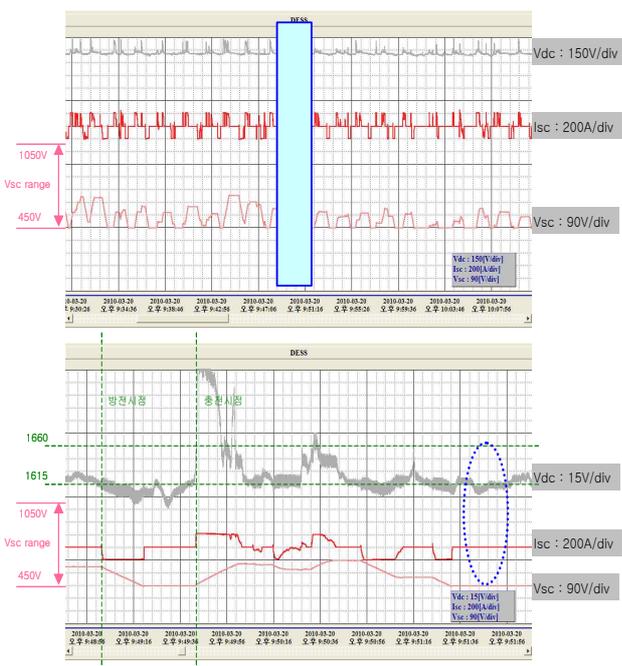


그림 5. Auto Tuning 미적용시 과방전 동작시험

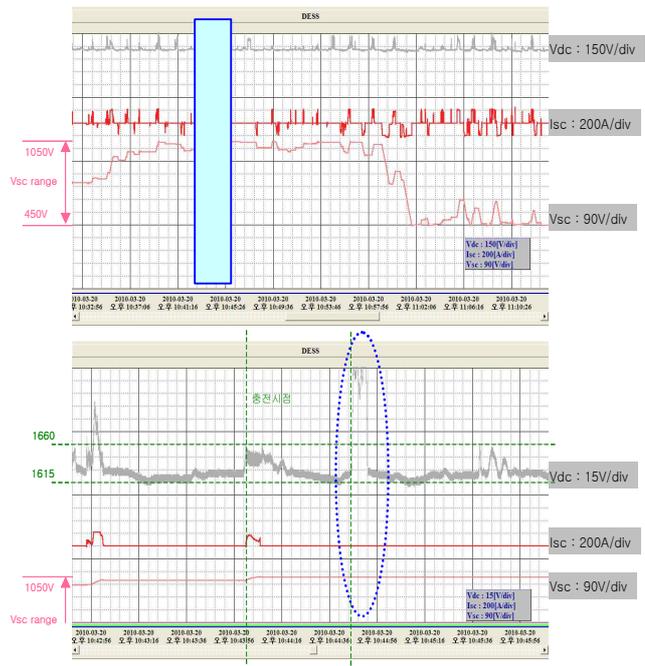


그림 6. Auto Tuning 미적용시 과충전 동작시험

그림 6.은 Auto Level Tuning 적용 시 에너지저장시스템의 충, 방전과형으로 가선전압이 전체적으로 높아 슈퍼캐패시터 측에서는 과충전영역에서 동작하게 된다. 확대된 파형에서 알 수 있듯이 가선전압이 충전개시전압인 1660[V] 이상되는 순간 충전을 시작한다.

그러나, 가선의 Normal 전압이 높아진 상태이므로 슈퍼캐패시터의 과충전 레벨(1050[V])에 도달 후부터 차량의 역행시에도 가선전압이 방전개시전압인 1615[V] 이하로 되지 못해 방전을 해주지 못하는 현상이 발생된다. 따라서, 차량운행 및 변전소 출력변동에 따른 가선전압이 방전개시전압이하로 떨어지기 전까지는 회생전력이 발생하여도 이를 충전하지 못하게 됨을 알 수 있다.

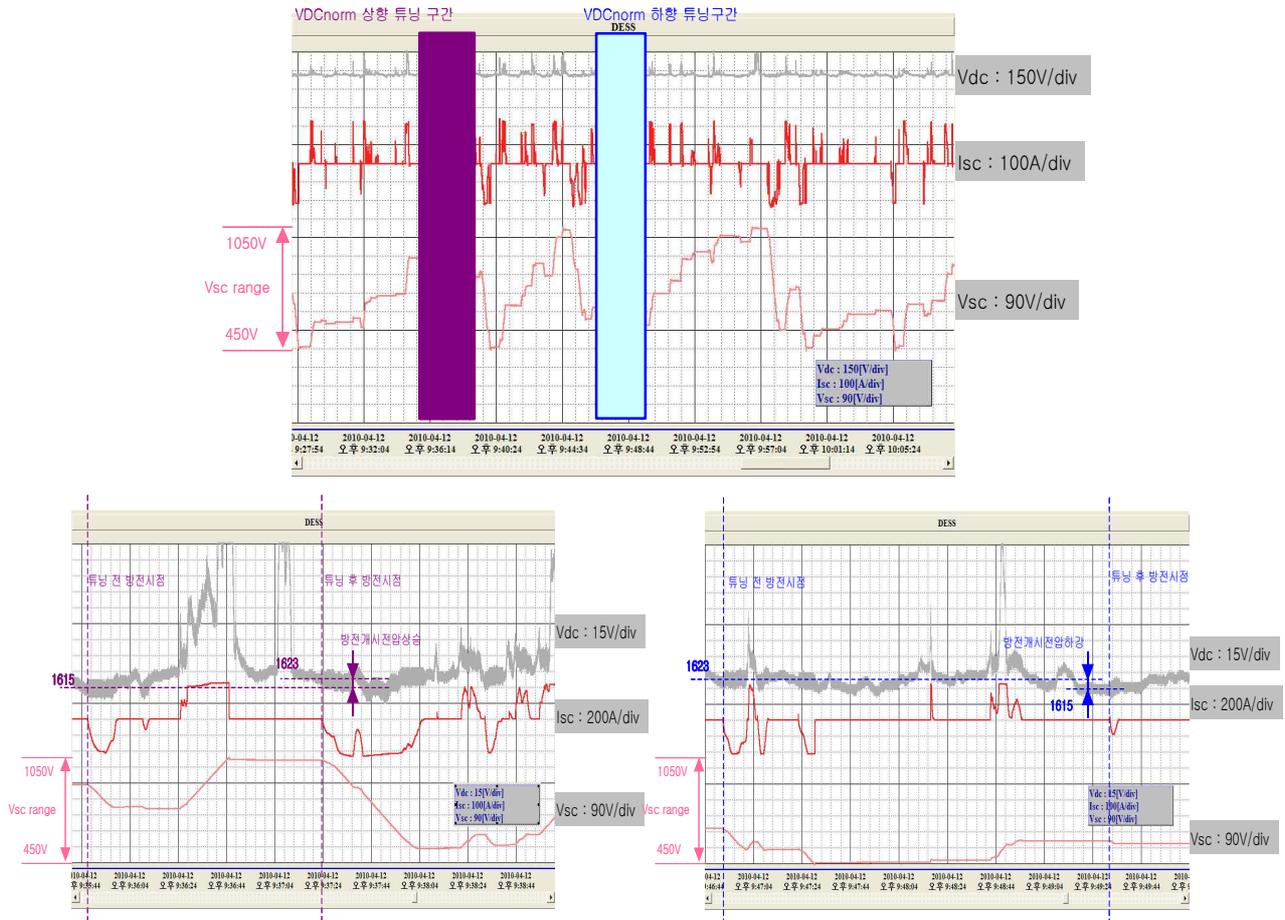


그림 7. Auto Level Tuning 알고리즘 적용시험

그림 7.은 충, 방전 Auto Level Tuning 제어 알고리즘을 적용한 파형이다. 확대된 파형에서 알 수 있듯이 차량운행 및 변전소 출력변동에 따라 슈퍼캐패시터의 과방전 상태에서 일정시간동안 충전동작이 이루어지지 않을 경우 가선의 Normal 전압이 낮아진 것으로 판단하여 충전개시전압을 단계별로 상승시켜 충전을 개시하도록 하게 된다.

또한, 과충전 상태에서 일정시간동안 방전동작이 이루어지지 않을 경우 가선의 Normal 전압이 높아진 것으로 판단하여 방전개시전압을 단계별로 상승시켜 방전을 개시하도록 하게 된다.

5. 결론

에너지저장시스템은 전동차 운행시 발생하는 회생에너지 재활용을 통하여 고유가 시대에 도시철도 운영기관의 전력비 절감을 향상시키고 전철 변전소 설비 및 가선전원의 안정화, 피크전력의 저감 및 CO2 배출가스 저감등의 효과가 기대되는 시스템이다.

본 논문에서는 직류도시철도의 회생에너지를 효율적으로 사용하고 가선전압의 안정화를 구현할 수 있는 양방향 DC-DC컨버터로 최적의 에너지 절감량 효과를 얻을 수 있는 중, 방전 Auto Level Tuning 알고리즘을 제안하였고, 실제 직류도시철도 시스템인 대전도시철도 1호선 변전시스템에 적용하여 제안된 기법의 성능은 시험을 통하여 그 효과를 분석하고 입증하였다. 추후에는 가선변동에 따른 에너지 저장장치의 효율적인 운영방안에 대하여 지속적인 알고리즘 개발이 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 안천현, “에너지저장시스템 적용에 의한 에너지절감 효과에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 12권, 4호, pp.582-589, 2009.
2. Takeshi KONISHI, "Verification Tests of Energy Storage System for DC Electrified Railways using ELDC," QR of RTRI, Vol.48, No. 2, May. 2007
3. Chan-Heung Park, "Design and Control Algorithm Research of Active Regenerative Bidirectional DC/DC Converter used in Electric Railway," The 7th International Conference on Power Electronics, October 22-26, 2007
4. J. Zhang, R. Y. Kim and J. S. Lai, “"High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional DC-DC Converter"”, IEEE PESC Conf. Rec., pp. 1-7, 2006.