

전압형 컨버터와 EDLC의 협조 제어에 의한 직류전기철도 회생에너지 이용률 및 전압 제어 능력 향상

Improving Regenerative Break Energy Efficiency and Voltage Regulation Capability of DC Electric Railway by Coordination of VSC and EDLC

전 고 운* · 유 형 준* · 박 재 세†
(Go-Woon Jeon · Hyeong-Jun Yoo · Jae-Sae Park)

Abstract - In the DC electric railway system, the effective use of regenerative break energy is an important issue. Since regenerative break energy causes voltage rise or drop in the system, it should be also solved effectively. To solve the problems, applying electric double layer capacitor (EDLC) or voltage source converter (VSC) to the DC electric railway system has been studying. In this paper, the coordination of EDLC and VSC is proposed to solve the problem effectively with its coordinated control algorithm. The proposed method is tested to show its feasibility using Matlab/Simulink.

Key Words : Electric railway system, Electric double layer capacitor (EDLC), Voltage source converter (VSC), Regenerative break energy, Energy storage system (ESS)

1. 서 론

전기철도는 인구의 증가에 따라 경량전철부터 중전철까지 다양하게 발전해왔으며, 전기철도의 전력사용량이 증가함에 따라 전기철도의 회생에너지 사용에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다[1-3].

전기철도는 기동 시 전동기로 동작하여 전력을 소모하고, 정지 시에는 발전기로 동작하여 회생에너지를 출력한다. 이 때, 전력을 소모하는 기동 시 전차선에 전압강하가 발생하고, 회생에너지가 발생하는 정지 시 근처에 기동하는 전철이 존재할 경우 기동 전력으로 사용할 수 있으나 그렇지 않은 경우에는 전차선의 가선전압을 상승시킬 수 있다. 이런 가선전압 변동은 전기제동 능력을 저하시키고 기계 제동으로 전환되어 브레이크 유지보수 비용이 증가하는 등 여러 문제가 발생하므로 가선전압을 일정하게 유지해야 한다[4-6].

현재 국내에서 회생에너지 및 부하변동에 따른 전차선의 가선전압 변동을 방지하기 위하여 일반적으로 회생에너지를 열로 소모할 수 있는 저항을 이용하지만 서울시 7호선 연장 구간에서는 발생하는 회생에너지를 충/방전하여 전차선의 가선전압을 제어할 수 있는 EDLC(electric double layer capacitor)가 적용되고 있

다. 그러나, EDLC 적용 시에는 EDLC가 완전 충전되어 있을 경우, EDLC를 이용한 회생전력 충전이 어렵고, EDLC가 완전 방전되어 있을 경우, 전압강하에 따른 방전이 불가능하여 철도 급전 시스템의 전압변동이 불가피하다. 또한, 회생에너지 이용을 위한 전압형 컨버터 적용은 발생하는 회생에너지를 모두 이용하기 위해서 용량을 크게 적용해야 하는 한계가 있다.

본 논문에서는 회생에너지의 이용률을 향상시키기 위하여 EDLC와 전압형 컨버터를 협조하는 구성 및 협조 제어 알고리즘을 제안하였고, 부하변동 시 발생하는 전압변동에 응동하여 전차선의 가선전압이 항상 일정하도록 제어하고자 한다. 이를 검증하기 위하여 MATLAB/ SIMULINK를 이용하여 DC 전기철도 급전 시스템, 전압형 컨버터, EDLC를 모델링하고, 가변부하를 적용하였다.

2. DC 철도 급전시스템

국내의 DC 철도 급전시스템은 그림 1과 같이 3상 22.9kV를 강압하는 변압기, AC/DC 전력변환이 가능한 다이오드 정류기, DC 철도로 구성되어 있으며, 국내의 전기 철도 급전시스템은 DC 1500V 또는 750V로 운용된다. 이와 같은 다이오드 정류회로는 제어가 불가능하여 전기 철도 부하 변동에 따른 전압변동이 발생하게 되고, 순방향 전력변환 특성을 가지고 있어 회생에너지 발생 시 AC 계통으로 회생에너지 전달이 불가능하다. 이러한 이유로 회생에너지를 이용한 별도의 장치가 없을 경우에는 저항을 이용하여 회생에너지를 소비하는 방법을 사용한다[2, 3].

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea
E-mail : js8700@incheon.ac.kr
Received : October 31, 2014; Accepted : December 23, 2014

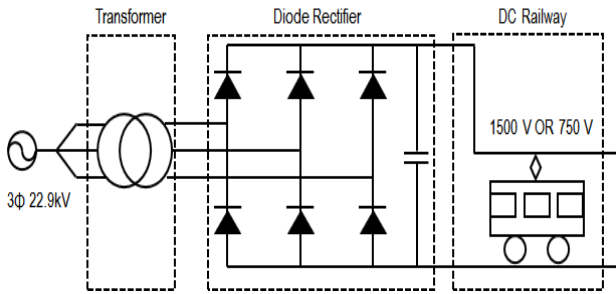


그림 1 DC 전기 철도 급전시스템
Fig. 1 DC electric railway system

서울도시 철도 일부구간에서는 회생에너지 이용률 향상을 위하여 그림 2와 같이 기존의 DC 전기 철도 급전시스템에 EDLC를 적용하고 있다.

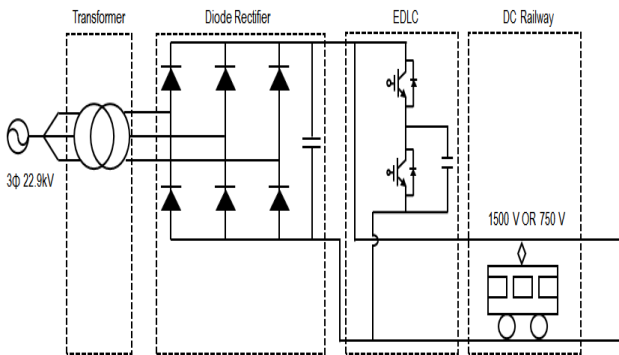


그림 2 EDLC를 적용한 DC 전기 철도 급전 시스템
Fig. 2 DC electric railway system by using EDLC

또한, 회생에너지 이용률을 향상시키기 위하여 기존의 DC 전기 철도 급전시스템의 다이오드 정류기에 그림 3과 같이 병렬로 AC/DC 양방향 전력변환이 가능한 전압형 컨버터를 적용하는 연구도 수행되었다[2, 7].

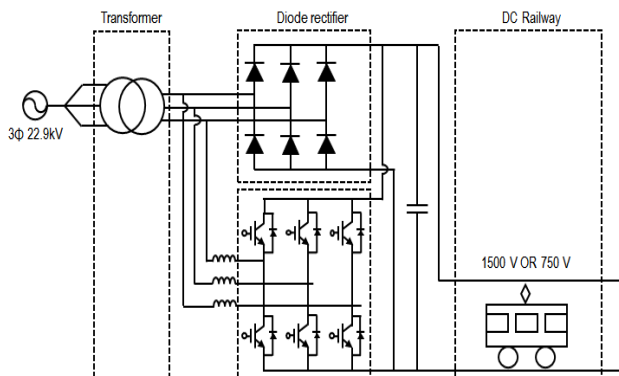


그림 3 전압형 컨버터를 적용한 DC 전기 철도 급전 시스템
Fig. 3 DC electric railway system by using VSC

3. 전압형 컨버터 와 EDLC를 이용한 DC 전기 철도 급전시스템

본 논문에서는 회생에너지 이용률을 향상시키기 위하여 DC 전기철도 급전시스템에 회생에너지용 전압형 컨버터와 EDLC를 적용하였다. 세부적인 모델링은 다음과 같다.

3.1 전압형 컨버터

그림 4와 같이 AC/DC 양방향 전력변환이 가능한 전압형 컨버터를 이용하여 전차선의 가선전압 및 회생 에너지 제어를 수행한다.

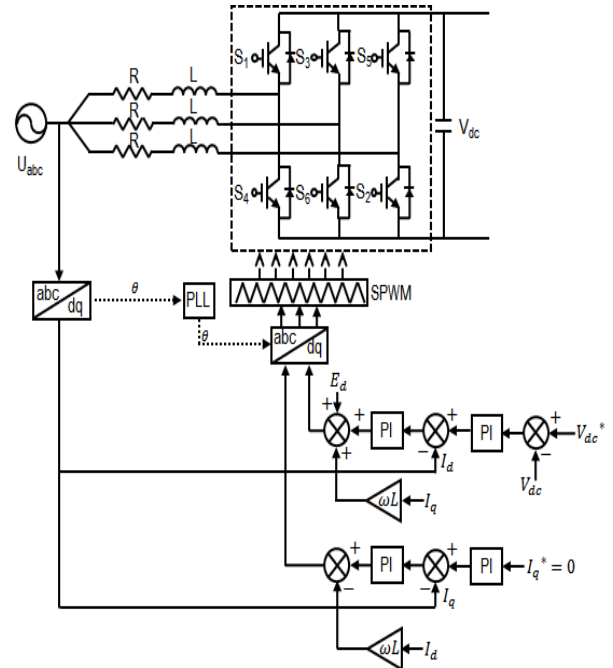


그림 4 전압형 컨버터 구조 및 제어 블록도
Fig. 4 Structure and control block diagram of voltage source converter (VSC)

이때, d-q변환을 적용한 컨버터의 수리적 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$U_{dq} = R i_{dq} + L \frac{di_{dq}}{dt} + V_{dq} \quad (1)$$

- 여기서, U : 계통전압
- R : 저항
- L : 인덕턴스
- V : 컨버터 출력전압

이는 식 (2)와 같이 d, q축의 식으로 각각 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 전류제어기를 설계할 수 있다.

$$U_d = R\dot{i}_d + L\frac{di_d}{dt} - wLi_q + V_d \quad (2)$$

$$U_q = R\dot{i}_q + L\frac{di_q}{dt} + wLi_d + V_q$$

3.2 EDLC

EDLC를 DC 전기철도에 적용하기 위해서는 충/방전을 하고, 전압레벨을 맞추기 위한 양방향 DC-DC 컨버터를 필요로 하며 그림 5와 같이 모델링하였다.

그림 5와 같이 모델링한 양방향 DC-DC 컨버터는 충전시에는 buck 컨버터로 동작하며, 방전시에는 boost 컨버터로 동작하여 충/방전을 수행한다. Buck/boost 동작 시 입/출력 관계식은 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다[11-13].

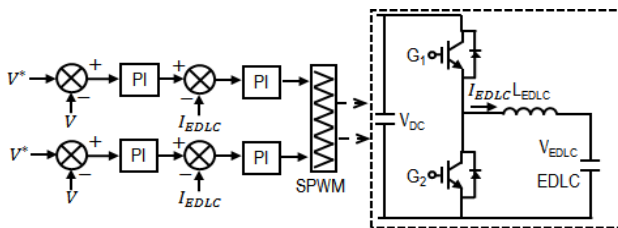


그림 5 EDLC 모델
Fig. 5 EDLC model

$$V_{DC} = D \times V_{EDLC} \quad (3)$$

$$V_{DC} = \frac{V_{EDLC}}{1-D} \quad (4)$$

여기서, V_{DC} : DC링크 전압
 V_{EDLC} : EDLC 전압
 D : 듀티비

또한, 양방향 DC-DC 컨버터는 충전모드에서 방전모드로 전환하거나 방전모드에서 충전모드로 전환 시 식 (5)와 (6)에서와 같이 과도 시간이 발생한다. 이를 고려하여 양방향 DC-DC 컨버터는 항상 전류가 연속모드로 동작할 수 있도록 L값을 산정해야 한다[9-11].

$$\Delta t = \frac{L_{EDLC}}{V_{EDLC}} (I_{buck} + I_{boost}) \quad (5)$$

$$\Delta t = \frac{L_{EDLC}}{V_{DC} - V_{EDLC}} (I_{buck} + I_{boost}) \quad (6)$$

여기서, L_{EDLC} : 인덕턴스
 I_{buck} : 충전전류
 I_{boost} : 방전전류

본 논문에서 모델링한 EDLC는 다음과 같은 과정을 통하여 용량을 산정하였다. 이때, 전기철도에서 발생하는 회생전력량은 식 (7)을 이용하여 산출할 수 있고, 방전전력량은 기저부하 보정을

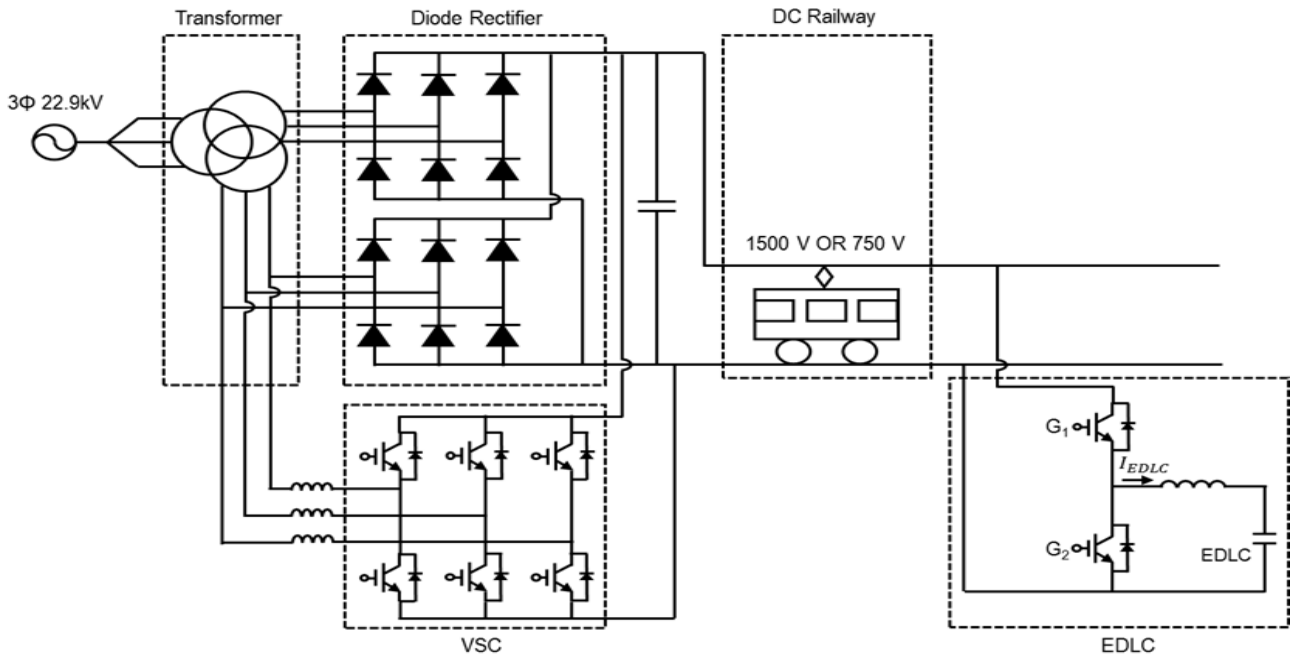


그림 6 VSC와 EDLC를 적용한 DC 전기 철도 급전시스템
Fig. 6 DC railway system with VSC and EDLC

위하여 30% 여유를 고려하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)과 (8), 설계여유 110%를 고려했을 때, EDLC 용량을 식 (9)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$W_L = \text{회생에너지발생량[kWh]} \times 3.6 \div \text{시간당 운행편성} \quad (7)$$

$$W_C = \frac{3}{8} CV^2 \quad (8)$$

$$\frac{8}{3} \times W_L \times 1.1 / V^2 \text{ [F]} \quad (9)$$

3.3 전압형 컨버터와 EDLC를 이용한 DC 전기 철도 급전시스템

전압형 컨버터와 EDLC를 적용한 DC 전기철도 급전시스템은 그림 6과 같은 구성으로 모델링되었다.

3.4 전압형 컨버터와 EDLC의 협조 제어 알고리즘

전압형 컨버터와 EDLC는 그림 7과 같은 협조 제어 알고리즘에 의하여 전기철도 전차선의 가선전압을 제어하며, 세부적인 내용은 다음과 같다. 이때, EDLC의 과충전과 과방전을 방지하기 위하여 SOC의 값을 5% 및 95%의 비교값으로 설정하였다.

$P_{Load} > 0$: 전기철도가 부하로 작동하는 경우

EDLC의 충전량을 확인하고 EDLC의 충전량이 5%이상일 경우 EDLC의 방전을 이용하여 전차선의 가선전압을 제어하고, EDLC의 충전량이 5%이내일 경우 EDLC는 동작을 멈추고, 전압형 컨버터에 의하여 전압제어를 수행한다.

$P_{Load} < 0$: 회생에너지가 발생하는 경우

EDLC의 충전량을 확인하고 EDLC의 충전량이 95%이상일 경우 EDLC는 충전이 불가하므로 전압형 컨버터에 의하여 회생에너지를 AC계통으로 전송하여 전차선의 가선전압을 제어하고, EDLC의 충전량이 95%이내일 경우 EDLC에 회생에너지를 충전하여 전차선의 가선전압을 제어한다.

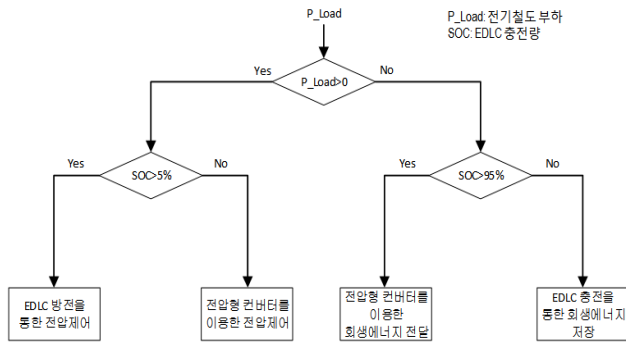


그림 7 협조 제어 알고리즘

Fig. 7 Algorithm of coordination regulation

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameter

입력전압	3Φ 22.9kV
변압기 용량	2500kVA
정류기 용량	2000kW
전차 가선전압	DC 750V

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 인천 지하철 2호선 데이터를 기반으로 DC 전기철도 급전시스템을 모델링하였고, 각각의 세부 파라미터는 표 1과 같다.

또한, 인천 2호선의 열차주행 시뮬레이션 의한 구간별 회생에너지 분석결과에 따르면 2량, 2, 8분 시격을 기준으로 했을 때 각 운행 구간에서 발생하는 회생에너지는 1.6 - 8.3kWh이다.

인천 2호선의 전차 가선전압은 750V 이므로 EDLC의 충전 전압은 560V, 보상시간은 10초로 산정함으로써 시스템을 설계하였고, EDLC 모듈의 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 EDLC 파라미터

Table 2 EDLC parameter

전압	50.4 V
용량	55.5 F
구성	2.8V 1,000F 18직렬

EDLC의 용량은 3.2절에서 언급했던 방법을 이용하여 산정하였고, 세부 용량계산은 아래와 같다.

$$560[V] / 50.4[V] = 11.11 \approx 12 \text{ 개 직렬}$$

$$55.5[F] / 12 = 4.625[F]$$

$$W_L = 8.3[kWh] \times 3.6 \div 60 \text{분} / 2 \text{분} = 0.996[MJ]$$

$$W_C = \frac{8}{3} \times (0.996 \times 10^6) \times 1.1 / 560^2 = 9.316[F]$$

$$9.316[F] \div 4.63[F] \approx 2[EA]$$

$$4.63[F] \times 2 \text{ 병렬} = 9.26[F]$$

$$\frac{3}{8} \times 9.26 \times 560^2 = 1.089[MJ]$$

$$1.089[MJ] \div 10[s] = 0.1089[MW] = 108[kW]$$

본 논문에서는 전압형 컨버터와 EDLC의 협조 제어 효과를 검토하기 위하여 그림 8과 같이 전기철도의 부하변동을 나타내었다. 전기철도는 2초부터 15초까지 정차하는 과정에서 발생하는 회생에너지를 나타내었고, 22초부터 35초까지는 출발하는 과정에서 소모되는 부하 전력을 나타내었다.

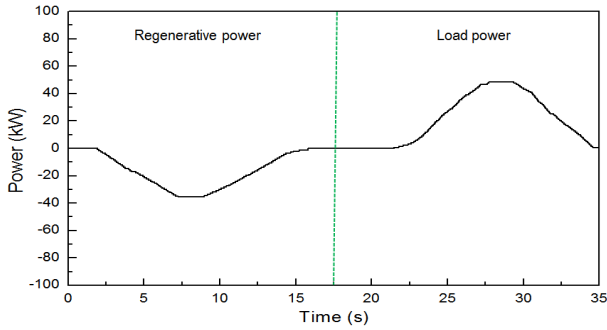


그림 8 직류 전기철도 부하량
Fig. 8 Load of DC railway

4.1 회생 전력 발생 구간

회생전력 발생 초기에는 EDLC를 충전하며, EDLC의 SOC(state of charge)가 100%가 되면 전압형 컨버터에 의하여 회생에너지를 AC 계통 측에 전달하게 된다.

초기 EDLC에 충전되는 충전전력은 그림 9와 같고, 10초에 EDLC의 충전이 완료될 경우 회생 컨버터에 의하여 AC계통에 전달하는 전력은 그림 10과 같다.

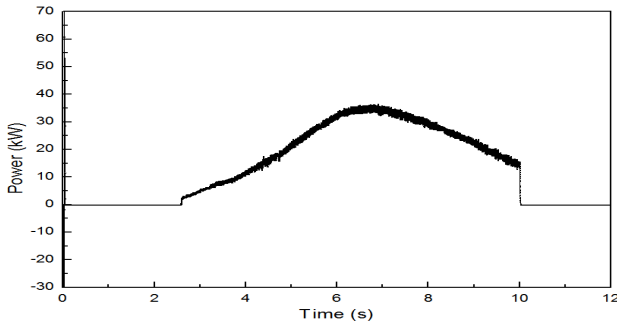


그림 9 EDLC 충전 전력
Fig. 9 Charge power of EDLC

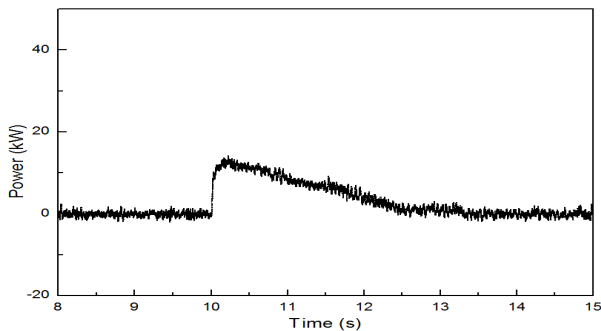


그림 10 회생 컨버터 전력
Fig. 10 Power of regenerate converter

4.2 부하 전력 소모 구간

DC 전기철도가 출발하거나 기동 중에는 전력을 소모하며, 이때 발생할 수 있는 전압강하는 그림 11과 같이 초기에는 충전되어 있는 EDLC의 방전에 의해서 전압이 보상된다.

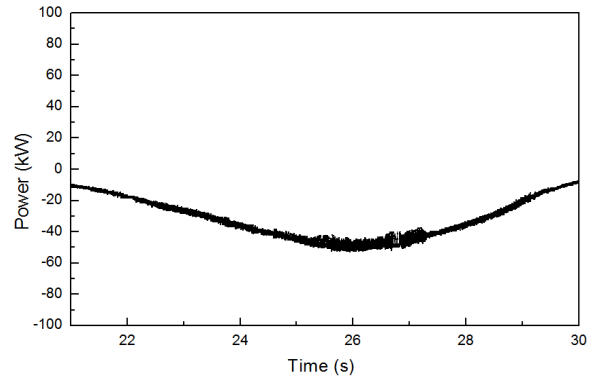


그림 11 EDLC 방전 전력
Fig. 11 Discharge power of EDLC

그림 12는 전기철도 급전시스템에 EDLC 및 전압형 컨버터를 적용하지 않았을 경우와 적용한 경우 개선전압을 나타낸 것이며, 이를 통하여 부하가 변동하여도 EDLC 및 전압형 컨버터에 의하여 전기철도의 개선전압이 항상 750V로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

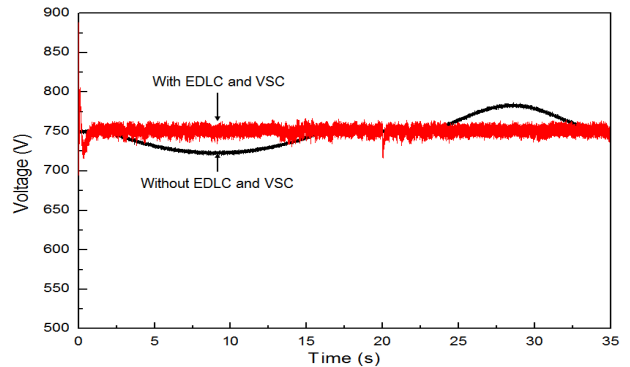


그림 12 전기철도 DC 전압
Fig. 12 DC voltage of DC railway

5. 결 론

본 논문에서는 DC 전기철도 시스템에 회생에너지 이용률을 향상시키기 위하여 EDLC와 전압형 컨버터의 협조 구성 및 협조 제어 알고리즘을 적용하였고, MATLAB/ SIMULINK를 이용하여 DC 전기철도 시스템과 전압형 컨버터 및 EDLC를 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 제안하는 협조 제어의 효과를 검증하였다. 시

물레이션 결과, -40kW ~ 40kW의 범위로 부하변동 시 발생하는 회생에너지를 EDLC와 전압형 컨버터의 협조 제어를 통하여 효과적으로 활용할 수 있었으며, 전기철도 가선전압이 750V로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

추후 회생에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 새로운 토폴로지개발에 대한 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] S. M. Jung, H. S. Lee, G. S. Hyun, S. H. Kwon, G. S. Jang, H. S. Jung, and H. C. Kim, "A Study of Improving Regenerative Energy Utilization in Urban DC Railway Systems Through Sharing Substations," KIEE Trans., Vol. 60, No. 12, pp. 2392-2396, 2011.
- [2] K. H. Cho, DC Feeder Railway Regenerative Inverter System with Voltage Drop Compensator, Thesis of M.S., SungKyunKwan University, 2008.
- [3] J. S. Lee and S. C. Se, "Study on Urban Rail DC Power Supply System of Energy Recycling," Proc. of KSR, pp. 853-859, 2012.
- [4] S. K. Shin, H. S. Jung, H. C. Kim, and J. Y. Park, "Analysis of Utilizing Regenerative Energy in Railway System Through a DC Power Supply Simulation," KIEE Trans. Vol. 63, No. 10, pp. 1479-1484, 2014.
- [5] S. D. Kim and K. H. Choi, "A Study on the Efficiency of Energy Storage System Applied to the Power Traction System of DC Electric Railway," Proc. of KSR, pp. 754-760, 2011.
- [6] C. H. Bae, M. S. Han, Y. G. Kim, and S. J. Jang, "Study on Capacity Calculation of Regenerative Inverter for DC Electrified Transit Substation," Proc. of KIEE, pp. 1607-1609, 2005.
- [7] C. H. Bae, M. S. Han, Y. K. Kim, S. Y. Kwon, and H. J. Park, "Determining the Capacity and Installation Positions of Regenerative Inverters at DC 1500V Electric Railway Substations," KIEE Trans. Vol. 55B, No. 9, pp. 478-484, 2006.
- [8] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power System, John Wiley & Sons, 2010.
- [9] H. J. Yoo and H. M. Kim, "Design of Coordinated Frequency Control Strategy applied to EDLC and BESSs for Microgrid in the Islanded Mode," KIEE Trans. Vol. 63, No. 6, pp. 1-8, 2014.
- [10] J. Leuchter, P. Bauer, and V. Rerucha, "Bi-directional DC-DC Converters for Supercapacitor based Energy Buffer for Electrical Gene-Sets," Proc. of Power Electronics and Applications, pp. 1-10, 2007.
- [11] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, and A. Huang, "A Review of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Station Application at Municipal Parking Decks," Proc. of Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1145-1151, 2010.
- [14] Incheon Metropolitan City, Report of the Execution Design of Incheon Metro Line 2, 2010.
- [15] H. Kim and Y. S. Jeong, Application of Regenerative Energy in the Transport Sector, The Korea Transport Institute, 2011.

저 자 소 개



전 고 운(Go-Woon Jeon)

1983년 1월생, 2006년 명지대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2006년 ~ 2008년 삼성 SDI PDP 사업부 전임연구원. 현재 인천광역시 공무원 및 인천대학교 석사과정.



유 형 준(Hyeong-Jun Yoo)

1987년 10월생. 2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



박 재 세(Jae-Sae Park)

1952년 1월생, 1975년 숭실대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 인천대학교 전기공학과 교수.