ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 8, pp. 1159~1163, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.8.1159

직류도시철도 시스템에서 저장장치 단위 용량 당 에너지 절감 효과 분석 연구

Efficiency Improvement Effect Analysis for Marginal Storage Capacity in DC Electric Railway Systems

이 한 상* · 윤 동 희** · 김 형 철*** · 주 성 관§ · 정 호 성†
(Hansang Lee · Donghee Yoon · Hyungchul Kim · Sung-Kwan Joo · Hosung Jung)

Abstract - This paper have been dealt with the analysis for energy efficiency improvement effect of unity storage capacity as a part of the energy storage application study to improve energy efficiency in the electric railway systems. Especially, in order to estimate the amount of energy saving according to the variation of power capacity of each storage, the current limit module was mounted on an existing DC electric railway loadflow program which is based on the analysis model for railway system and storages, and combined optimization algorithm to determine optimal voltage boundary.

Key Words : Energy storage systems, DC electric railway systems, Regenerative energy

1. 서 론

스마트그리드 환경에 대한 에너지 산업계의 다양한 관심이 고조됨에 따라 보다 친환경적이고 효율적인 도시철도시스템의 구현을 위하여 에너지 저장장치 활용 연구의 필요성이 높아지고 있다. 도시철도시스템은 일반적인 전력시스템의 부하와 달리, 부하의 시공간적 변화가 있으며, 특히 특정 조건에서 전력을 발생시키는 회생운전을 한다는 점은 에너지 저장장치의 활용 필요성을 강조하는 요인이다. 기존 국내의 도시철도차량의 경우는, 제동 시 발생하는 회생에너지는 저항회로를 통하여 강제적으로 소비하고 있는 실정이다. 회생에너지의 이러한 소비는 경제적 전력소비에 반하는 형태로 볼 수 있으며, 에너지 저장장치를 활용할 경우 경제성을 상당히 높일 수 있음을 암시하는 것이라 볼 수 있다.

에너지 저장기술은 철도부하의 감속 시에 발생하는 회생에너지를 저장하고, 기동 시에 방출하여 기동에 필요한 에너지를 줄이거나 후속 차량에 에너지를 공급하는 기본 활용방안에 가지고 있다[1-3]. 또한 기동, 제동에 따른 가선 전압의 변동을 안정한 범위 이내로 제한함으로서 도시철도시스템의 안정적 운전을 구현할 수 있다. 그러나 모든 회생에너지를 저장, 활용할 정도의 규모인 저장장치는 그 설치비용과 유지보수 비용이 매우 높기 때문에 경제성을 고려한 설치에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 차량에서 발생하는 모든 회생에너지의 활용을 전제로 한 규모의 저장장치를 기준으로 순시용량을 변동시켰을 때 저장장치의 단위 용량 당 에너지 효율 개선 효과를 분석함으로써 도시철도 시스템에 대한 저장장치의 경제성 분석에 대한 기초연구를 수행하였다. 이를 통해 도시철도 시스템의 경제성 극대화를 구현하고, 다른 산업 분야에서의 에너지 저장장치 활용 방안 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 에너지 저장장치 연계 도시철도 모델

철도차량이 제동 시에 발생시키는 회생전력은 회전기의 제동 시에 발생하는 역기전력에 의하여 발생한다. 철도부하처럼 기동과 제동이 잦은 부하는 소비전력에 비해 상당히 많은 양의 회생전력을 발생시킨다[1]. 도시철도시스템에서 n번째 차량이 제동하는 시점에 n-1번째 또는 n+1번째 차량이 기동 또는 역행 운전을 하는 경우는 n번째 차량에서 발생한 회생전력을 활용할 수 있지만, 인근 차량이 타행 또는 제동운전을 하는 경우 발생한 회생전력은 인근 차량에서 소비되지 못하고 가선전압을 상승시키고 초퍼 저항을 통해 열로 소비된다. 이러한 철도시스템의 특성에 기반하여, 에너지 저장장치를 활용하여 발생하는 회생전력을 저장하고 기동 시에 활용함으로써 철도시스템의 에너지 효율을 개선할 수 있다[4].

† Corresponding Author : Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : hsjung@krri.re.kr
* School of Electrical & Railway Engineering, Kyungil University, Korea
** Department of New & Renewable Energy, Kyungil University, Korea
*** Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
§ School of Electrical Engineering, Korea University, Korea
Received : October 11, 2013; Accepted : July 22, 2014

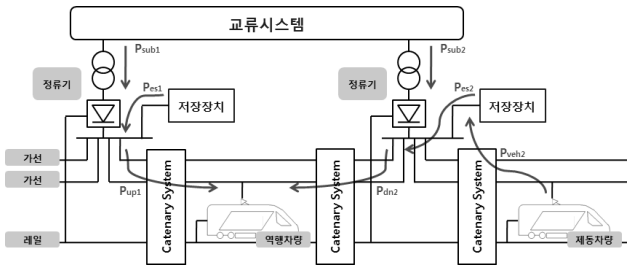

그림 1 도시철도 시스템과 저장장치의 운전 개념도

Fig. 1 Interconnected operation concept of electrical railway system and energy storage system

이러한 목적으로 에너지저장장치를 활용한다면, 어떠한 제어 목적으로 저장장치를 운전할 것이며, 순시용량과 저장용량은 어느 정도가 되어야 하는지에 대한 사양을 결정할 필요가 있다. 에너지저장장치의 사양은 도시철도시스템 전력조류계산 알고리즘에 저장장치 연계 해석 모듈을 추가함으로서 가능하다. 제동하는 차량에서 발생한 회생전력으로 인하여 철도계통에서 나타나는 가장 큰 특징은 가선전압의 변동이다. 1,500 [V] 정격으로 설계된 도시철도시스템은 기동 시에 많은 전력을 소비한다는 것과 회생전력이 발생하는 것에 기인하여 1,300~1,800 [V] 사이에서 크게 변동한다[5].

저장장치가 변전소에 설치되는 것을 고려하며, 전류원으로 모델링된 에너지 저장장치를 고려한 철도계통 등가회로를 그림 2에 나타내었다. 노턴등가 전류원으로 직류도시철도변전소는 저장장치전류(I_{ES1}, I_{ES2})와 내부컨덕턴스(g_{ES1}, g_{ES2})의 병렬 구성으로 등가화가 가능하며 이를 바탕으로 시스템 행렬은 식 (1)과 같이 구성할 수 있다. 변전소 모델에서, 노턴등가컨덕턴스는 측정을 통하여 구할 수 있지만, 용량이 정해지지 않은 저장장치 내부컨덕턴스의 경우 측정을 통하여 해당 파라메터를 결정하는 것이 불가능하다. 또한 내부컨덕턴스은 순시용량에 따라 달라지지만, 비례하지는 않기 때문에 해당 값을 설계 단계에서 결정하는 것은 불가능하다. 그러나 내부컨덕턴스는 충방전 손실의 원인이기 때문에, 95 [%]의 변환 효율을 가정하여 저장장치의 충전 및 방전전류의 계수를 다르게 하는 방법으로 하여 내부컨덕턴스를 반영하였고 그 수식은 식 (2)와 같다.

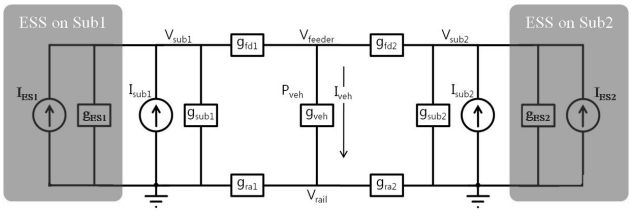

그림 2 저장장치가 연계된 철도시스템의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of railway system interconnected with energy storage

$$\begin{bmatrix} g_{sub1}+g_{fd1}+g_{ES1} & 0 & -g_{fd2} & 0 \\ 0 & g_{sub2}+g_{fd2}+g_{ES2} & -g_{fd2} & 0 \\ -g_{fd1} & -g_{fd2} & g_{fd1}+g_{fd2} & \\ 0 & 0 & & g_{ra1}+g_{ra2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sub1} \\ V_{sub2} \\ V_{feeder} \\ V_{rail} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sub1}+I_{ES1} \\ I_{sub2}+I_{ES1} \\ -I_{veh} \\ I_{veh} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} g_{sub1}+g_{fd1} & 0 & -g_{fd2} & 0 \\ 0 & g_{sub2}+g_{fd2} & -g_{fd2} & 0 \\ -g_{fd1} & -g_{fd2} & g_{fd1}+g_{fd2} & \\ 0 & 0 & & g_{ra1}+g_{ra2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sub1} \\ V_{sub2} \\ V_{feeder} \\ V_{rail} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sub1}+\alpha \cdot I_{ES1} \\ I_{sub2}+\alpha \cdot I_{ES1} \\ -I_{veh} \\ I_{veh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

매 초 차량의 위치와 운전모드에 대한 조류해석을 우선 수행한 후, 각 변전소 전압 결과 수치가 입력된 전압 제한치를 벗어나는지의 여부를 검사하여 저장장치의 충방전 운전 여부를 결정한다. 또한 저장장치의 충전 및 방전을 수행하는 전압 범위는 최적화 알고리즘을 이용하여 각 저장장치에 누적에너지가 없도록 하는 전압범위로 정한다[2]. 발생하는 모든 회생전력을 저장하기 위하여 회생전력의 최대치에 해당하는 순시용량을 가진 저장장치를 적용하는 경우 회생에너지의 이용율을 최대로 높일 수 있다는 장점이 있지만, 자주 발생하지 않는 높은 용량의 회생에너지까지 모두 저장하기 위하여 전력변환장치의 용량을 높일 필요가 있는지에 대한 연구를 진행할 필요가 있다. 이에 대한 분석을 위하여 최대 순시용량보다 작은 용량의 저장장치의 연계에 따른 에너지 효율 개선 효과의 분석을 수행할 필요가 있으며 분석 방법론은 다음과 같다.

기존의 저장장치 연계 해석 알고리즘에서 저장장치의 동작 모드는 충전, 홀드, 방전의 세 가지 동작모드만을 고려하고 있다[1-3]. 본 논문에서 제시하는 일부 용량만의 설치에 따른 에너지 효율 분석을 위해서 그림 3과 같이 저장장치는 5개의 동작모드를 가져야 한다. 가선전압을 모니터링하여 저장장치의 동작모드가 결정이 되는데, 충전전압과 방전전압을 기준으로 가선전압이 두 전압 사이에 존재하는 경우 저장장치는 현재 에너지 상태를 유지하도록 운전한다. 방전전압 이하로 가선전압이 낮아지게 되면, 저장장치는 차량 또는 차량군에서 요구하는 크기의 전력공급을 수행한다. 차량 또는 차량군에서 저장장치의 순시용량 이상의 전력공급을 요구하는 경우, 저장장치는 공급 최대치인 순시용량만큼의 전력공급을 수행하고 부족분은 전철변전소 정류기를 통해 추가적인 전력의 공급이 이루어져야 하며, 이 경우 저장장치는 완전방전모드 즉, 공급할 수 있는 최대의 전력을 공급하는 모드로 동작하게 된다. 이와 반대로, 차량 또는 차량군에서 발생한 회생전력이 저장장치의 순시용량 이내의 크기로 공급이 되는 경우 저장장치는 충전모드로 동작하여 유입되는 회생전력만큼을 충전하도록 제어된다. 그러나 저장장치의

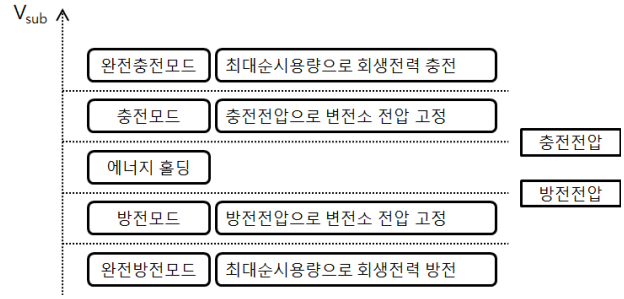

그림 3 변전소 전압 변화에 따른 저장장치 운전 모드 구분

Fig. 3 Storage operation mode according to variation of the catenary voltage

순시용량 이상의 회생에너지에 대하여 저장장치는 최대용량 만큼의 회생전력만을 충전하고 이를 초과하는 회생전력은 다른 변전소 방향으로 흘리도록 제어된다. 즉, 저장장치가 완전충전모드로 동작하게 되면 발생하는 모든 회생전력을 충전할 수 없기 때문에 완전충전모드로 동작하는 시간이 길수록 회생전력의 이용율이 낮아지게 된다.

3. 사례연구

앞에서 설명된 알고리즘을 적용하여, 서울메트로 7호선에 대한 사례연구를 수행함으로서 저장장치에 의한 에너지 효율 개선 효과 검증 및 단위 용량 당 효율 개선 효과를 모의하였다. 각 저장장치의 순시용량을 매우 크게 설정하여 모의함으로써 회생전력를 최대로 이용하는 경우를 기준으로 각 변전소에 설치된 저장장치의 순시용량을 50 [%], 25 [%], 10 [%]로 제한하였을 때의 효율개선 효과 및 단위용량 당 에너지 절감효과를 모의하였다.

표 1은 저장장치를 고려하기 전과 비교한 전보상 조건에서의 저장장치 적용 효과를 나타낸 것이다. 기존 65.6 [%]의 에너지 효율은 90.8 [%]로 개선되었음을 확인할 수 있다. 전보상 조건에서 각 저장장치의 순시용량 및 충전 또는 방전 시의 최대전류는 표 2에서 보는 바와 같다.

표 1 전보상 조건에서의 에너지 효율 개선 효과 분석

Table 1 Analysis for energy efficiency improvement with full compensation storage condition

		No ESSs	ESSs
		Case 0	Case 1
E_i	총 공급량 [MWh]	25.471	18.397
Ld_i	총 부하 [MWh]	16.706	16.706
η_i	에너지 효율 [%]	65.588	90.808
S_i	에너지 절감량 [MWh]	-	7.074
SR_i	에너지 절감율 [%]	-	27.773
SC_i	저장장치 필요 용량 [kWh]	-	478.29

- 에너지 효율: $\eta_i = \frac{Ld_i}{E_i} \times 100[\%]$
- 에너지 절감량: $S_i = E_o - E_i$

표 2에서 보는 바와 같이, 가장 큰 순시용량과 저장용량으로 계산된 상봉변전소에 대하여 변전소 전압 모의결과와 저장장치 충방전 전류 및 순시용량에 대한 모의 결과를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 저장장치의 충방전 동작으로 인해 충전 시에는 충전전압으로, 방전 시에는 방전전압으로 변전소 전압이 유지됨을 볼 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 저장장치를 전보상조건에서 운전함에 있어 최대전류는 방전 모드에서 7,591 [A]이며 이때의 최대 순시용량은 3,376 [kW]이다.

상봉변전소의 가선전압을 나타낸 그림 6에서 보는 바와 같이, 저장장치는 방전 시 부하전류에 기여하거나 충전 시 회생전류에 대한 부하역할을 함으로써 가선전압의 변동폭을 감소시키는 작용을 한다. 저장장치의 설치 전과 비교하였을 때, 전보상 조건에서의 가선전압의 변동폭은 크게 개선되었음을 볼 수 있다. 전보상 조건의 저장장치 순시용량(3.376

표 2 전보상 조건에서의 최대전류, 순시용량, 저장용량 모의 결과

Table 2 Simulation results for maximum current, power capacity and storage capacity of full compensation storage

변전소 명	최대전류 [A]	순시용량 [kW]	저장용량 [kWh]	방전전압 [V]
수락산	4602.21	2022.72	21.10	1582.24
중계	3005.45	1377.50	16.87	1610.42
태릉	6356.97	2828.11	36.83	1601.58
상봉	**7591.43**	**3375.85**	**71.59**	**1600.89**
중곡	5387.93	1469.47	45.01	1608.79
건대입구	3524.56	1615.42	16.96	1610.95
청담	3759.61	1723.15	34.36	1612.65
논현	6846.44	3052.84	49.14	1602.79
내방	3710.72	1700.75	42.57	1609.33
남성	3267.59	1465.30	18.70	1614.36
상도	4926.81	2258.12	31.86	1595.05
보라매	5332.50	2386.65	14.10	1611.24
남구로	5609.35	2570.95	42.18	1612.22
철산	3169.40	1409.09	14.21	1600.53
정왕	3189.61	1435.61	11.33	1620.32
온수	3610.34	1635.14	13.48	1630.46

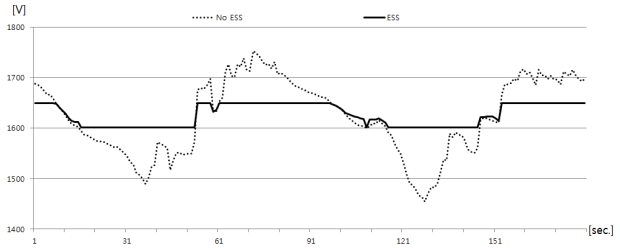

그림 4 전보상 조건의 저장장치 설치 전후의 상봉 변전소 가선전압

Fig. 4 Catenary voltage in Sangbong substation

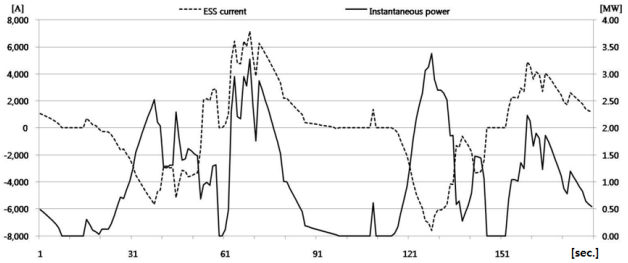

그림 5 상봉 변전소 저장장치의 순시전류와 순시용량

Fig. 5 Instantaneous current and power of the Sangbong installed energy storage

[MW])을 기준으로 50%, 25%, 10%의 순시용량을 가지는 저장장치의 설치에 의한 가선전압은 해당 저장장치의 순시용량까지 전류에 기여하고 그 이상의 부하전류 및 회생전류에 대해서는 충전 또는 방전 능력이 없기 때문에, 해당 용량까지 전압을 보상하고 그 이상 또는 이하의 전압에 대해서는 보상하지 못한다. 즉, 순시용량이 커짐에 따라 기여할 수 있는 전류의 크기가 커지기 때문에, 저장장치의 순시용량이 작아질수록 가선전압의 변동폭이 커지게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 각 모의조건에서 저장장치의 충방전전류를 나타낸 그래프이다. 전보상 조건에서의 최대전류(7,591 [A])에 비교하여 순시용량 모의조건 비율에 해당하는 전류값으로 제한됨을 볼 수 있다. 각 모의조건별로 전류값이 최대 또는 최소값의 평평한 결과로 나타나는 부분은 해당 저장장치가 최대충전모드 또는 최대방전모드로 동작하고 있음을 의미한다. 최대 충방전 모드에서 각 저장장치는 추가적인 방전전류 또는 저장전류의 여유가 없기 때문에, 그림 6에서와 같이 더 이상 전압을 제한할 수 없게 된다.

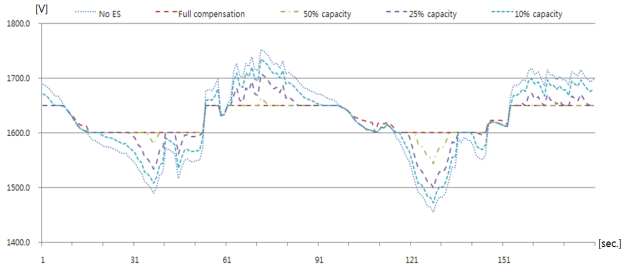

그림 6 순시용량 변화에 따른 상봉변전소 전압 변동

Fig. 6 Catenary voltage in Sangbong substation according to the variation of storage power capacity

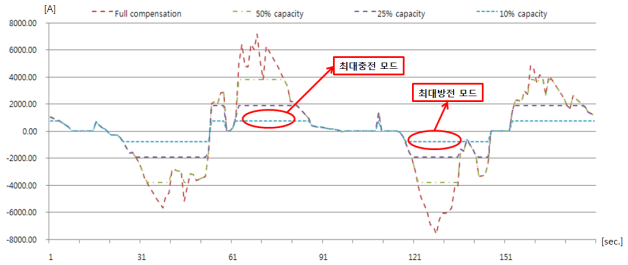

그림 7 상봉변전소 저장장치의 충방전전류

Fig. 7 Charging and discharging current of Sangbong installed energy storage for each case

그림 6과 7에서 설명된 바와 같이, 전보상 조건의 순시용량보다 작은 용량의 저장장치를 고려하는 경우, 충전전류의 제한으로 인해 각 변전소로 유입되는 회생에너지를 100 [%] 저장할 수 없다. 즉, 저장할 수 있는 회생에너지가 제한됨에 따라 재공급하는 에너지의 양도 전보상 조건 대비 낮아지게 된다. 이것은 표 3에서 보는 바와 같이, 에너지 절감량과 절감율이 낮아지는 결과로 나타난다. 그러나 전보상조건인 Case 1의 7.074 [MWh]의 에너지 절감량을 구현하기 위해

표 3 순시용량 변화에 따른 효율 개선 효과 분석 [2], [5]

Table 3 Analysis for energy efficiency improvement for each simulation case

Cases		Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
		–	100%	50%	25%	10%
E_i	총 공급량 [MWh]	25.471	18.397	18.900	20.576	22.590
Ld_i	총 부하 [MWh]	16.706	16.706	16.706	16.706	16.706
η_i	에너지 효율 [%]	65.588	90.808	88.439	81.190	73.953
S_i	에너지 절감량 [MWh]	–	7.074	6.582	4.895	2.426
SR_i	에너지 절감율 [%]	–	27.773	25.841	19.220	9.522
SC_i	저장용량 [kWh]	–	478.29	401.15	259.07	117.49
UE_i	단위용량당 절감효과	–	14.876	16.408	18.897	20.644

- 에너지 절감율: $SR_i = \frac{S_i}{E_0} \times 100[\%]$

- 단위용량 당 절감효과[MWh/kWh]: $UE_i = \frac{S_i}{SC_i}$

필요한 478.29 [kWh]의 총 저장용량의 비를 나타낸 14.876 [MWh/kWh]의 단위용량당 절감효과와 비교할 때, Case 2~4는 더 높은 절감효과를 나타냄을 볼 수 있다. 이것은 회생에너지의 밀도는 무부하전압에 가까울수록 높고, 순시용량을 1 [kW]씩 증가시킨다고 가정했을 때 한계용량에 대한 에너지 효율 개선 효과가 점점 감소함을 의미한다.

4. 결 론

도시철도 시스템과 저장장치 연계 운전에 대하여, 저장장치의 순시용량 변화에 따른 에너지 효율 개선 효과를 모의해석하였다. 회생에너지의 활용율을 극대화하는 전보상 조건에 대한 각 변전소에 설치되어야 하는 저장장치의 순시용량을 산정하였고, 이를 기반으로 각 변전소 저장장치의 순시용량을 전보상 용량의 50 [%], 25 [%], 10 [%]로 각각 상정하여 모의를 수행하였다. 저장장치의 제한된 순시용량은 회생에너지를 충전하기 위한 충전전류의 크기를 제한하여 낮은 회생에너지 이용율과 에너지 효율 개선 효과의 감소를 나타내지만, 필요한 총 저장용량 대비 절감효과 즉, 단위 저장용량에 대한 에너지 절감효과가 증가함을 모의를 통하여 검증하였다. 이것은 한계용량에 대한 한계에너지절감효과의 감소를 의미하며 도시철도시스템과 에너지 저장장치 연계 운전에 대한 경제성 해석 연구에 있어 큰 의미를 가진다. 본 논문에서 진행된 연구를 기반으로, 초기설치비용과 유지보수비용을 고려한 경제성 분석 연구가 진행되고 있으며, 이를 통한 최적의 에너지 저장장치 용량 산정 방안이 구축될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(14RTRP-B067916-02)에 의해 수행되었습니다.

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1017114)

This research was supported by a grant (14RTRP-B067916-02) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2012R1A1A1017114)

References

[1] Hansang Lee, Hanmin Lee, Changmu Lee, Gilsoo Jang, Gildong Kim, “Energy Storage Application Strategy on DC Electric Railroad System using a Novel Railroad Analysis Algorithm,” JEET, Vol. 5, No. 2, pp. 228~238, 2010

[2] Hansang Lee, Jiyoung Song, Hanmin Lee, Changmu Lee, Gilsoo Jang, Gildong Kim, “Capacity Optimization of the Supercapacitor Energy Storages on DC Railway System Using a Railway,” International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, No. 5, pp. 2739-2753, 2011

[3] Hansang Lee, Yoonsung Cho, Hyungchul Kim, Hosung Jung, “Study for Power Management System using Regenerative Energy in Electric Railway Systems,” Transactions on KIEE, Vol. 63, No. 1, pp. 191-196, 2014

[4] Technical report, ‘Optimal analysis program development research for electric railway power simulation,’ Korea university, 2010

[5] Technical report, ‘Powerflow analysis study for energy storage interconnected electric railway systems,’ Korea university, 2009

저 자 소 개

이 한 상 (李 漢 相)

1980년 1월 생. 2003년 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경일대학교 철도전기공학부 조교수.

윤 동 희 (尹 棟 熙)

1981년 4월 생. 2004년 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 경일대학교 신재생에너지학과 조교수

김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월생. 1991년 고려대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2003년 Texas A&M 졸업(공학박사). 2004년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

주 성 관 (朱 成 官)

1971년 7월생. 1995년 고려대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1999년 University of Washington 전기공학과 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 고려대학교 전기전자공학부 부교수

정 호 성 (鄭 澔 聖)

1998년 성균관대 공과대학 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 2002년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원