

철도차량 회생에너지 활용기술별 가선 손실 저감 효과 비교 분석 연구

이한상*, 김진학*, 김 현**
 경일대학교*, 한국교통연구원**

Electric Power Loss Comparison Study for Regenerative Utilization Technologies in DC Electric Railway Systems

Hansang Lee*, Jinhak Kim*, Hyun Kim**
 Kyungil University*, Korea Transport Institute**

Abstract - Regenerative power utilization is one of the most interesting issue in electric railway systems. Generally, technologies to utilize regenerative power from railway vehicles are railway substation with regenerative inverter, on-station energy storage systems, and on-board energy storage systems. In this paper, the electric power loss for those technologies is calculated and compared using DC electric railway system analysis algorithm.

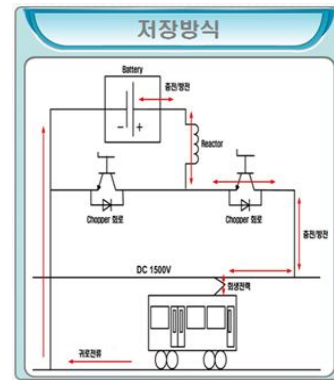
음으로 인해 발생하는 가선전압의 문제점을 해결할 수 있는 기술로 그림 2와 같은 방식으로 회생전력을 교류계통으로 제공급하는 동작을 수행한다.

1. 서 론

전기 철도시스템에서 회생에너지는 철도 차량이 역에 도착하여 제동하는 과정에서 발생하는 기계적 관성에너지의 변환된 에너지로서 철도 차량 전동기에 역기전력을 가하면서 발생하는 전기에너지를 말한다. 철도 차량에서 발생하는 회생에너지는 발생 차량 인근에서 기동하는 차량에서 일부 소비되고 나머지는 저항기를 통해 소비된다. 전기에너지를 공급하여 가속된, 즉, 기계적 운동에너지를 가지고 있는 철도차량의 제동 과정에서 발생하는 운동에너지의 '시간에 따른 감소분'을 모두 활용하지 못하는 것은 에너지의 경제적 소비 측면에서 적절하지 못하다 [1]. 이러한 이유로, 회생인버터, 지상저장장치, 차상저장장치 방식의 회생에너지 이용기술의 필요성이 높아지고 있는 가운데, 장치의 개발과 시범설치, 검증의 연구가 다양하게 진행되고 있다.

2.2 에너지 저장장치 방식

에너지 저장장치를 이용하여 회생에너지를 저장-제공급하는 시스템의 경우는 저장장치의 설치 위치에 따라 지상저장방식(on-station)과 차상저장방식(on-board)으로 나눌 수 있다. 저장장치의 설치위치는 가선전류의 크기에 크게 관여하며 이것은 전력손실에 매우 큰 영향을 미치게 된다.



〈그림 3〉 에너지 저장장치 활용 방식

2. 회생에너지 활용 기술

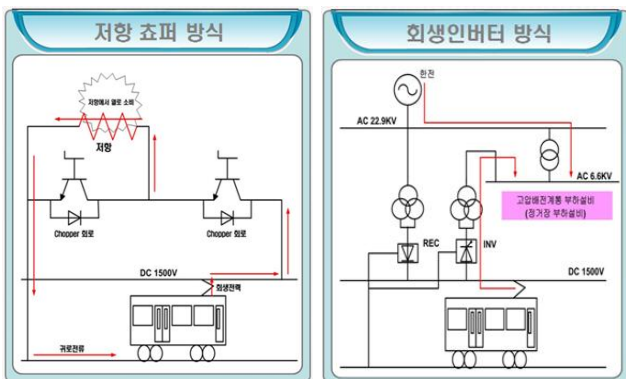
현재 운행 중인 도시철도에서, 인근 가속차량에서 소비되고 남은 회생 에너지는 가선의 전압을 매우 높게 만드는 주원인이 된다. 저전압-고전류의 철도시스템의 특성상 전류의 변화에 대해 가선전압의 변화가 큰 것을 감안하여 시스템이 설계되지만, 회생에너지에 의한 가선전압의 상승은 설계를 상회하는 가선전압 상승을 유발한다 [2]. 가선전압의 상승은 가선에 연계하여 운전 중인 계통 설비의 오/부동작을 유발할 수 있기 때문에 현재 운행 중인 도시철도 시스템은 그림 1과 같이 저항초퍼를 이용하여 회생전력을 소비하는 방식을 채택하고 있다.

2.2.1 지상저장장치(on-station) 방식

지상저장방식은 전철변전소 정류기 2차측 모선에 ESS를 설치하여, 특정 전압(충전전압) 이상에서 회생에너지를 흡수, 저장하고 특정 전압(방전전압) 이하에서 저장된 에너지를 공급하는 방식을 채택하고 있다.

2.2.2 차상저장장치(on-board) 방식

차상저장방식은 차량 내부에 ESS를 탑재하는 방식으로, 직류의 차량 전류의 방향을 감지하여 충방전을 수행하는 방식을 채택하고 있다.



〈그림 1〉 현재의 회생 초퍼 방식 〈그림 2〉 회생인버터 적용 방식

2.1 회생인버터 방식

회생인버터 방식은 차량에서 생산한 회생전력을 전차선을 통해 전달할 때 전차선 전압 강하가 발생하는 인근 변전소에 인버터를 설치해 일정 규모 이상의 전차선 전압을 교류 전력으로 전환하여 역사의 전동, 엘리베이터, 에스컬레이터 등 역사 내부시설의 에너지원으로 사용할 수 있도록 하는 회생에너지 활용시스템의 하나이다. 기존 12-pulse 다이오드 정류방식의 전철변전소는 철도계통에서 교류계통으로 역송을 할 수 없

3. 변전소 및 가선에서의 손실 계산

철도시스템에서의 손실은 조류계산을 통해 계산된 변전소 가선전압과 차량 가선전압, 그리고 각 요소들의 거리 차이에 의한 가선 임피던스를 이용하여 계산이 가능하다. 알고리즘 상에서 node ordering을 통해 Y-matrix를 구성하는 과정에서 변전소 또는 차량으로 구성되는 요소들의 배치 순서가 정해지는데, 이것은 알고리즘 상의 변수(tree)를 이용하여 구현된다 [3]. 특정 시점에서 변전소와 차량의 위치가 표 3과 같을 때, tree 변수를 이용한 node ordering 결과는 다음과 같다.

〈표 1〉 변전소와 차량 위치의 예시

구분		위치(m)	numbering
변전소	sub 1	1,600	1
	sub 2	6,400	2
차량	veh 1	15	3
	veh 2	1,470	4
	veh 3	3,560	5
	veh 4	5,570	6
	veh 5	8,400	7

<표 2> tree 변수를 이용한 node ordering 결과

tree(veh 1) = veh 2	tree(3)=4	tree(1)=5
tree(veh 2) = sub 1	tree(4)=1	tree(2)=7
tree(sub 1) = veh 3	tree(1)=5	tree(3)=4
tree(veh 3) = veh 4	tree(5)=6	tree(4)=1
tree(veh 4) = sub 2	tree(6)=2	tree(5)=6
tree(sub 2) = veh 5	tree(2)=7	tree(6)=2

이것은 전기적으로 직접적인 연결이 있는 요소들을 나타내기 위해 사용되는 변수로, 가선에서의 손실을 계산하는 데에 사용될 수 있고 그 수식은 다음과 같다. 해석의 대상이 되는 노선은 n개의 변전소와 m대의 차량을 포함하고 있을 때에 대한 가선손실을 나타낸다.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n+m-1} \frac{(V(tree(i)) - V(i))^2}{R_{cat} \times (Loc(tree(i)) - Loc(i))} \quad (1)$$

여기서, V(i): i번째 요소의 가선전압
 Loc(i): i번째 요소의 위치
 Rcat: 가선의 단위길이상 임피던스

직류철도시스템에 대한 조류계산 해석이 매 초 이루어진다고 가정할 때, 전체 시뮬레이션 시간(T)동안에 발생하는 가선손실 에너지는 식 (51)과 같이 계산된다.

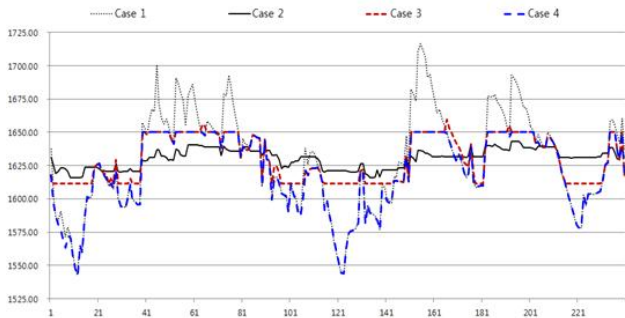
$$E_{loss} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{t,loss}}{3600} [Wh] \quad (2)$$

4. 사례연구

총 19개 역, 5개소의 변전소로 구성된 서울 지하철 8호선을 대상으로 각 회생전력 활용기술별 전력손실 비교 연구를 수행하였다. 회생전력 활용기술 적용 전(Case 1), 차상저장장치 적용(Case 2), 지상저장장치 적용(Case 3), 그리고 회생인버터 적용(Case 4)에 대한 결과를 다음에 나타내었다.

4.1 변전소 전압 변동률

5개 변전소 중 큰 공급전력량을 나타내는 천호 변전소에 대하여, 그림 4와 같이 변전소 가선전압을 나타내고 표 3에 각 변전소의 전압 해석 결과를 요약하여 나타내었다. Case 1에 비해 전압변동폭이 현저히 작아졌음을 확인할 수 있고, 이것은 가선에 흐르는 전류의 크기가 작아졌음을 의미한다.



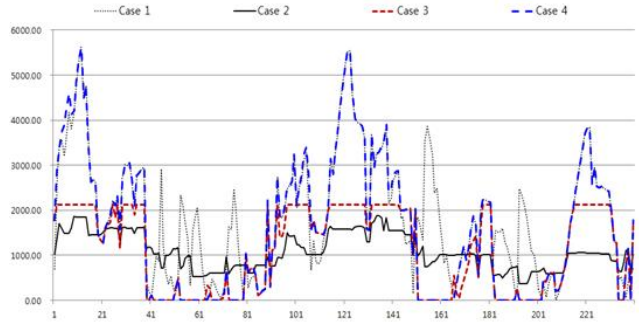
<그림 4> 천호 변전소 가선 전압 모의 결과

<표 3> 각 회생전력 활용기술 별 전압변동률

구분	천호	석촌	복경	단대 오거리	모란가지	
Case 1	최대전압(V)	1716.33	1700.52	1711.08	1702.8	1708.07
	최소전압(V)	1542.43	1569.16	1553.17	1556.71	1588.19
	변동률(%)	11.59	8.76	10.53	9.74	7.99
Case 2 (차상저장장치)	최대전압(V)	1643.39	1643.2	1642.59	1646.55	1648.16
	최소전압(V)	1615.71	1618.06	1621.74	1624.91	1629.88
	변동률(%)	1.85	1.68	1.39	1.44	1.22
Case 3 (지상저장장치)	최대전압(V)	1659.84	1656.43	1650.7	1656.92	1657.99
	최소전압(V)	1611.2	1610.91	1617.8	1620.67	1625.88
	변동률(%)	3.24	3.03	2.19	2.42	2.14
Case 4 (회생인버터)	최대전압(V)	1650	1650	1650	1650	1650
	최소전압(V)	1542.43	1569.16	1553.17	1556.71	1588.19
	변동률(%)	7.17	5.39	6.46	6.22	4.12

4.2 변전소 공급전력 및 손실전력

그림 4는 천호변전소에 대한 공급전력 모의 결과를 나타낸 것이다. 각 Case에 대하여 차량 요구 전력의 합과 변전소 공급전력 합의 차이를 손실로 정의하고, 1시간 동안의 손실량을 계산하였다. 그 결과 회생전력 활용시스템의 적용은 가선손실 저감 효과를 모두 포함하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 차상저장장치(Case 2)의 경우, Case 1에 비교하여 약 85%의 손실 저감 효과가 있는 것으로 해석되었는데, 이것은 차량에서 발생한 회생전력을 차량 내부에 탑재한 저장장치를 이용하여 저장하고 재공급하는 방식을 채택하였기 때문에 가선에서 흐르는 전류의 절대적 크기가 줄어든 것에 그 이유가 있다고 판단된다.



<그림 5> 천호 변전소 공급전력 모의 결과

<표 4> 각 회생전력 활용기술 별 전력해석 결과 요약

구분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
기동전력량(kWh)	819.27	819.27	819.27	819.27	
회생전력량(kWh)	517.7	517.7	517.7	517.7	
차량부하량(kWh)	301.57	301.57	301.57	301.57	
변전소 총 공급전력량(kWh)	542.31	308.21	320.7	450.31	
가선손실 전력량(kWh)	40.62	6.64	19.13	28.17	
에너지 절감량(kWh)	-	234.1	221.61	92	
에너지 절감율(%)	-	43.167	40.864	16.964	
회생에너지 이용율(%)	61.34	100	100	76.71	
피크전력(kW)	천호	5612.96	1874.25	2114.84	5612.96
	석촌	5612.96	1748.34	2130.26	5612.96
	복경	5087.74	1550.42	1762.29	5087.74
	단대오거리	4912.91	1379.19	1608.06	4912.91
	모란가지	3355.47	1109.38	1326.67	3355.47

5. 결 론

도시철도 시스템에서 회생전력 활용기술의 확대 적용을 위한 다양한 이슈가 존재하는 가운데, 회생전력 활용기술의 적용으로 인하여 회생전력 이용률 향상을 통한 에너지 효율 개선 효과 뿐만 아니라 가선 전류의 저감에 따른 가선손실 저감효과를 분석하기 위하여 세 가지 방식의 활용기술에 대한 전력해석을 기반으로 손실저감 효과를 비교 분석하였다. 해석 결과의 분석을 통하여 차상저장장치 방식의 회생전력 활용기술은 기존 케이스에 비교하여 약 85%의 손실을 줄일 수 있는 것으로 계산되어, 같은 회생에너지 이용률의 조건에 대하여 더 나은 전력환경을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 향후 본 논문에서 사용한 각 회생전력 활용기술에 대한 전력해석 알고리즘과 각 기술에 대한 비용을 고려하여, 경제성이 고려된 최적의 회생전력 활용기술 도출 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

[1] “철도부문의 에너지 생산과 활용방안”, 연구보고서, 2011
 [2] “에너지절감 및 회생전력 활용시스템 비교 분석”, 연구보고서, 2014
 [3] 장동욱, 김무선, 홍제성, 이한상, “도시철도 급안행 통합해석 알고리즘 개발에 관한 연구”, 전기학회논문지, 64권, 4호, pp. 646-652, 2015