

배터리 탑재 열차주행시뮬레이션 개발 연구

A Study on the Development of Battery-mounted Train Driving Simulation

이한민^{*†}, 박종영^{*}, 조환희^{*}, 김재원^{*}, 정호성^{*}

Hanmin Lee^{*†}, Jong-young Park^{*}, Hwanhee Cho^{*}, Jaewon Kim^{*}, Hosung Jung^{*}

초 록 배터리 탑재 열차는 친환경적이고 에너지 효율적인 철도 시스템 구현을 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 특히 전력공급 인프라가 미비한 구간이나 도심 내 저소음·무배출 운행이 요구되는 구간에서의 활용 가능성이 높다. 그러나 배터리 기반 열차는 주행 중 에너지 소모 패턴이 기존과 상이하며, 실제 운행 조건에서 배터리의 충·방전, 주행 거리 예측 등의 요소들이 복합적으로 작용한다. 이에 따라, 다양한 운행 조건과 열차 구성에 따른 배터리 시스템의 운용 성능을 사전에 검토하고 최적화할 수 있는 시뮬레이션 기반 연구가 필수적이다. 본 연구는 배터리 탑재 열차의 효율적 운용 및 설계 방향을 도출하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 실제 운행 조건을 반영한 에너지 흐름 분석을 통해 열차 성능을 예측·평가하고자 한다.

주요어 : 배터리, 열차주행시뮬레이션, 트램

1. 서 론

최근 회생에너지 대부분을 활용하기 위해 철도차량에 배터리팩을 탑재하는 방식으로 기술개발이 진행되고 있다. 서울 위례선, 동탄 트램 등의 경우 배터리를 탑재한 전동차가 향후 운행될 예정이다.

현재 트램과 같은 열차에 배터리가 도입되고 있으므로, 이와 관련된 해석이 필요하다. 배터리 탑재 전동차를 대상으로 주행시 사용 및 회생전력, 배터리 충방전 전력상태의 해석을 위한 플랫폼 개발이 지금까지 진행된 바 없었다. 따라서 한국철도기술연구원은 전동차 역행 및 회생에너지와 이차전지의 SOC 및 전압 특성을 기반으로 배터리 탑재시 에너지 충방전을 해석이 필요하게 되었다. 본 연구는 배터리 탑재 열차주행시뮬레이션 알고리즘 개발 및 해석 결과를 제시한다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 전철전력연구실(hanmin@ktrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 전기신호본부

2. 배터리 탑재 전동차 동향

일반적으로 트램은 도로 위에 깔린 레일 위를 주행하는 노면전차로 유럽, 일본 등 50여개 나라에서 교통수단으로 활용되고 있다. 국내의 경우, 현재 트램을 운영하고 있는 도시는 없으나 배터리를 탑재한 트램을 위례, 대전, 동탄, 성남, 수원 등에서 도입을 진행하고 있으며, 울산, 부산, 대구, 전주 등에서도 다양하게 검토되고 있다.

시·도별 도시철도망 구축계획 상 트램 반영 현황

주선 단계	도시	노선명	연장 (km)	비용 (억 원)	진행 상황
기본 계획	대전	대전2호선	32.4	5,481	▶ 시립 계획 수립 중
수립 등	서울	위례 선	5.4	1,800	▶ 기본 계획 수립 중
	부산	오목도 선	1.9	470	▶ 기본 계획 수립 중
	경기	동탄 도시철도	32.4	9,967	▶ 기본 계획 수립 중
		성남1호선	10.4	2,392	
경기		성남2호선	13.7	3,439	▶ 경기도 도시철도망 구축 계획 반영('19.5)
		오이도연결선	6.6	1,761	
		송내-부천선	9.1	2,381	· 성남2호선 예타 중
		수원1호선	6.2	1,764	
상위 계획 반영		수인트리비노선	15.2	3,666	
	인천	인천남부순환선	29.4	17,711	
		IN-Tram	22.3	5,440	▶ 인천광역시 도시철도망 구축계획 반영('18.12)
		영종내부순환선	14.8	4,420	
부산		송도내부순환선	7.4	1,592	
		강서선	21.3	5,241	
		정관선	12.8	3,755	▶ 부산광역시 도시철도망 구축계획 반영('17.6)
		송도선	7.4	3,732	
		C-Bay~Park선	9.1	5,002	

Fig. 1 Tram promotion status

3. 배터리 탑재 TPS 알고리즘

철도 차량의 대부분은 기동 - 타행 - 제동 - 타행 - 정지의 단순한 패턴을 유지하며 아래 그림과 같은 표준운전곡선에 근거하여 운행된다. 전동차는 속도 및 위치에 따라 역행 및 회생전류를 발생하며, 그에 따른 가속도·감속도를 얻어 다음의 운전 상태와 속도를 결정한다.

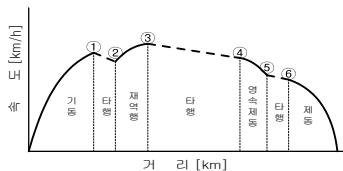


Fig. 2 Standard operation curve

견인력 및 제동력을 아래와 같은 수식을 적용하여 계산한다.

$$F[kN] = M[ton] \times a[m/s^2] + R[kN]$$

M : 관성질량을 포함한 열차의 만차 중량[ton]

R : 열차 저항[kN]

배터리팩의 최대전압과 최소전압을 결정하고 배터리팩 운용 최대 용량 및 최소 용량을 결정하면 배터리팩은 용량 및 전압 범위 안에서 충방전이 된다.

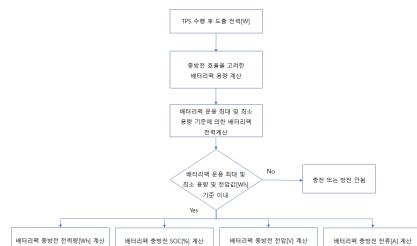


Fig. 3 Battery charge/discharge algorithm

4. 사례 연구

대전 2호선을 대상으로 배터리 탑재 열차주행시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션

결과를 그래프로 나타내었다. 속도 그래프는 가로축은 시간(sec)이고 세로축은 속도(km/h)를 나타낸다. 전력 그래프는 가로축은 시간(sec)이고 세로축은 전력(kW)를 나타낸다.

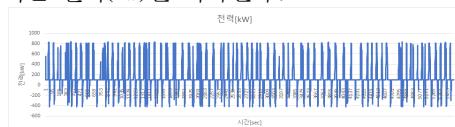


Fig. 4 Power simulation

대전 2호선 구간 1회 왕복시 배터리 SOC80[%]에서부터 63.1[%]까지 방전이 되었다. 전압은 팩 운용 최대전압 720[V]에서 693[V]로 방전되었다.

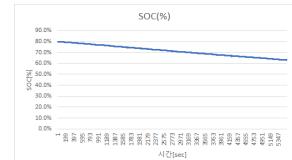


Fig. 5 SOC

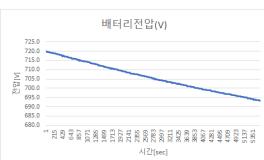


Fig. 6 Voltage

용량은 SOC 80[%]의 운용용량 1,414[khW]에서 1,114.7[kWh]로 방전되었다. 전류는 충전과 방전 상황에 따라 동작하였다.

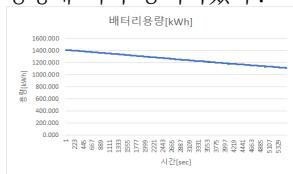


Fig. 7 Capacity



Fig. 8 Current

5. 결 론

자동차가 기존 내연기관에서 배터리 차량으로 변해 가듯이 배터리를 탑재한 철도차량이 앞으로 시장에 많이 확대될 것으로 예상된다. 앞으로 철도차량의 주행구간이 가선구간과 배터리팩이 적용되는 무가선 구간으로 구분되어 운행될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 해석하기 위해 전동차의 운동방정식을 기반으로 계산된 전동차 역행에너지와 회생에너지통해 배터리 탑재시 에너지 충방전 특성을 모델링하고 해석하였다.

참고문헌

- [1] 이성준, (2018). “일산선 전동차 전력사용량 측정 및 에너지 저장장치 설치 방안 연구”, 석사학위논문, 우송대학교
- [2] 김행구, 강병관, 김동일, 엄경수, 김국진, (2013). “무가선 저상트램 개발 및 시험 현황”, 한국철도학회, vol 13, pp.1,396-1,402
- [3] 한국산업기술평가관리원, (2018). “철도차량 주행용 1500Vdc 메가와트급 급속충전 하이브리드 배터리팩 개발”, 기획보고서