

미니트램의 전력공급시스템 및 에너지저장매체 개발



김보경 | 한국철도기술연구원 도시교통실용화연구팀
정락교 · 강석원 | 한국철도기술연구원 미래교통시스템연구실
서동관 | (주)동원OLEV

1. 서 론

미니 트램은 승객수요의 한계로 철도나 경전철 등이 미치지 못하는 지역에서 4~6인승 규모, 5 km 이내 단거리 수송서비스를 제공하는 소형전기자동차 기반의 교통수단이다. 전차선이 없는 전용궤도를 따라 운행하는 미니트램은 무선유도급전을 통해 공급된 전력으로 차량 내 독립적인 에너지저장장치를 충전하여, 이를 주행 및 전장품의 작동 등에 사용하는 전력공급시스템으로 운영된다 (그림 1).

미니트램의 전력공급시스템은 고효율 에너지저장매체를 활용한 전기구동 방식이므로 소음과 매연을 줄이고, 이산화탄소 배출량을 감축시키는 친환경 수송시스템일 뿐만 아니라, 전차선을 제거함으로써 도시미관을 해치지 않는 장점을 가진다.

미니트램의 전력공급시스템의 핵심기술로는 차량 내 탑재되는 하이브리드 커패시터 기반의 에너지저장매체기술과 주행 및 역정차 중 무선충전을 수행하는 무선유도급전기술이 있다.

미니트램, 전기자동차 및 무가선트램 등을 포함한 에너지저장매체 기반 소·경량형 전기구동 수송시스템의 경우, 이차전지 (리튬이온 전지 등) 및 슈퍼커패시터 (전기이중층커패시터, 리튬이온커패시터 등) 등의 매체를 중심으로 개발경쟁이 가속화되고 있다.

캐나다의 철도업체 Bombardier는 리튬이온배터리, 전기이중층 슈퍼커패시터, 니켈전지 등 다양한 저장매체를 활용하여 경량철도를 제작하여 현재 중국, 독일 등에서 운영 중이다. 또한 독일의 Epcos, 미국의 Maxwell, GE, ISE와 일본의 Matsushita, NEC Tokin, JEOL, Shoei Electronics, FDK 등

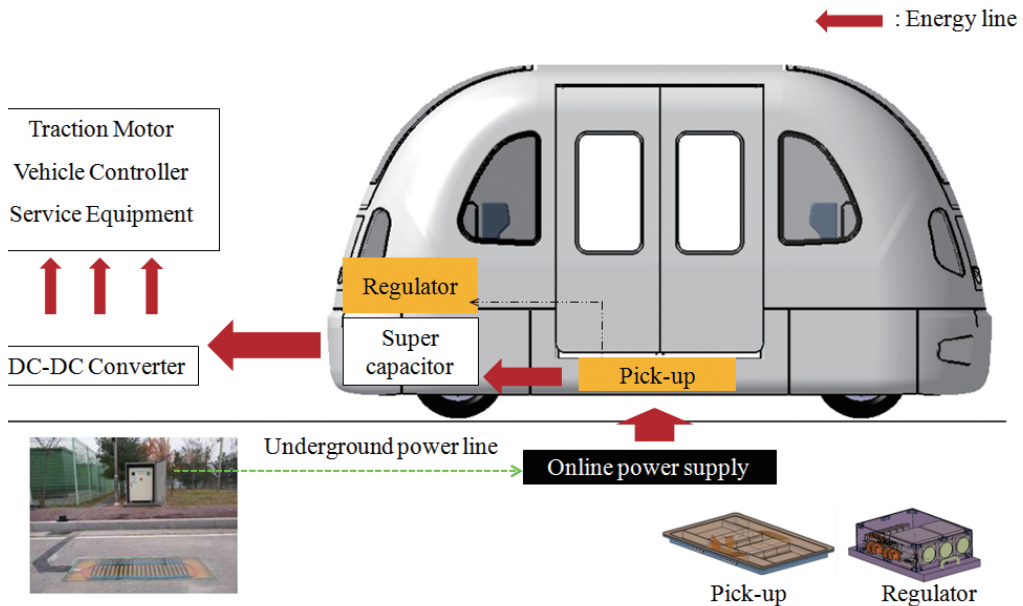


그림 1. 미니트램의 전력공급시스템

의 업체들도 수송시스템용 대용량 에너지저장매체를 개발하여 수송용 전력공급시스템에 활용하고 있으며, 러시아의 ELTON은 커패시터용 전극을 상품화하여 효율과 수명을 향상시켰다. 특히 상기 업체들 및 우크라이나의 Yunasko 등은 리튬이온과 슈퍼커패시터를 하이브리드화한 제품을 지속적으로 개발하여 저장매체의 성능을 향상시키고 있다.

수송차량 내 에너지저장장치를 충전하는 방식 중 무선유도 급전기술은 정거장 또는 주행로 내에서 짧은 시간 동안 급속으로 전기를 공급할 수 있으며, 미관상 외부에 돌출되는 시설이나 장치가 없다는 장점을 가진다.

본 기고에서는 미니트램의 차량사양 및 주행시뮬레이션을 통한 에너지 소모량을 산출하고, 이를 기반으로 미니트램에 최적화된 에너지저장매체 및 무선유도급전시스템 기술 개발에 대해 소개하고자 한다.

2. 미니트램의 에너지 소모량 산출

미니트램의 최적 전력공급시스템의 설계를 위해 차량사양(표 1) 및 주행 시뮬레이션을 통한 km당 에너지 소모량을 산출하였다.

비교적 에너지 소모가 큰 조건을 기반으로 다음과 같은 가

표 1. 미니트램 차량 사양

항 목		특 성
승객 정원 [좌석]		4~6(성인 4명+소아 2명)
중량 [ton]	공차	1.2
	만차	1.6
감속도 [m/s/s]		정상 1.4, 비상 3.3
최고운행속도 [km/h]		50
최대구배 [%]		100
차량 폭 [m]		1.8
차량 높이 [m]		2.0
전동기 용량 [kw]		7.0

정에 따라 미니트램의 왕복주행에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

- (1) 역사 간격: 500m의 가상 노선;
- (2) 200m마다 50m의 1% 구배구간;
- (3) 차량의 관성 질량: 107%;
- (4) 추진시스템의 효율: 80% (일반 전기철도 차량은 85%~90%);
- (5) 차량의 평균 보조 동력: 400W;
- (6) 차량의 주행저항 (R) : 일반 승용차에 적용하는 공식 (식 1) 적용,

가상노선 TPS

차 량 Type : '1' = 전철(고무바퀴) , '2' = 전철(철제바퀴)

TPS 결과보고

1 요약 보고

총 주행거리= 1000[m]
 총 주행시간= 132.90[s]
 표정속도=27.09[kn/h]
 역행 에너지= 0.13[kwh]
 역행시의 I_{rms} =131.95[A]
 역행시 평균전류= 73.69[A]
 총 회생에너지= 0.04[kwh]
 회생시 I_{rms} =49.22[A]
 회생시 평균전류 =-23.28[A]
 총 Aux. 에너지 = 0.028[kwh]
 Peak 전류 =312.01[A] at location 857[m]

2 구간 요약 보고

구간	위치 [m]	역간거리	정차시간 [s]	운행시간 [s]	누계	역행	회생	보조	계
구간_101-->역사_102	500	500	0.0	67.29	67.29	0.063	-0.020	0.014	0.057
구간_102-->역사_101	1000	500	0.0	65.61	132.90	0.068	-0.021	0.014	0.061

그림 2. 에너지 성능 시뮬레이션 결과

(식 1)

$$R=(74.5+1.98v) \times M+0.26Av^2 \text{ [N]}$$

v: 차량의 속도 [m/s];

A: 차량전면의 면적 = 3.6 m²;

M: 차량의 만차 중량 = 1.6 ton

성능 시뮬레이션 수행결과 (그림 2), 미니트램의 최대 에너지 소모량은 0.158 kwh/km로 계산되었다.

3. 초고용량 슈퍼커패시터 기반 에너지저장매체 기술

미니트램은 전차선이 없는 궤도를 운행하며 차량 내 독립적인 에너지 저장장치를 갖춘 전기자동차용 무인자동 교통수단이다. 2장에서 산출된 미니트램의 에너지 소모량과 운행환경 및 차량시스템의 특성을 고려하여, 리튬이온 배터리와 전기이중층 커패시터 및 리튬이온 기반 하이브리드 커패시터를 적용하여 시험하고, 미니트램에 최적화된 에너지 저장매체를

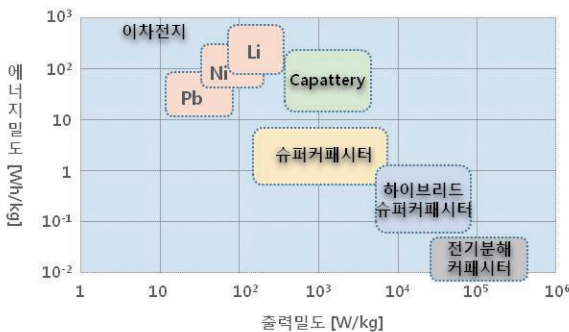
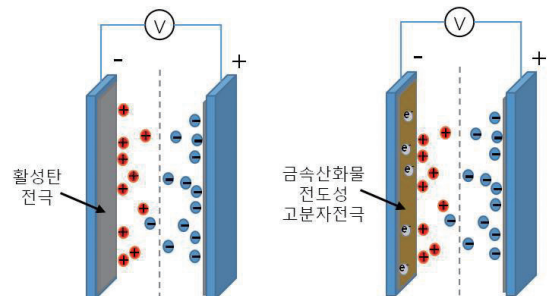


그림 3. 저장매체 별 에너지밀도-출력밀도 특성

선정하고자 하였다. 그림 3 은 다양한 에너지 저장매체별 에너지밀도와 출력밀도 특성을 비교하여 나타내고 있다.

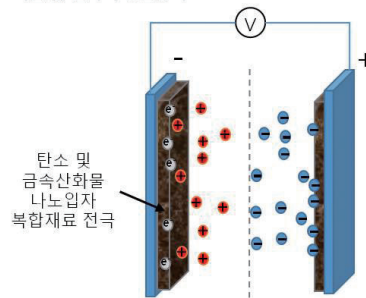
대표적인 이차전지인 리튬이온전지는 에너지밀도가 높아 휴대전화, PC 및 전기자동차의 전원으로 널리 활용되고 있다. 하지만, 충전속도가 느리고, 안전성 문제와 낮은 수명특성은 미니트램의 운행 시 불리하며, 유지보수 비용을 증가시킨다.

이차전지에 비해 높은 출력 및 고속 충전 성능을 가지는 슈퍼커패시터는 크게 1세대 전기이중층 커패시터 (Electric double layer capacitor, EDLC)와 2세대 유사 커패시터 (또는 초고용량 커패시터, Pseudocapacitor)로 구분된다. 전기이중층 커패시터는 활성탄 전극표면과 전해질 계면의 전기 이중층을 이용하는 반면, 유사 커패시터의 경우 EDLC에 비해 충전속도는 다소 낮아지더라도 금속산화물 전도성 고분자 전극 상의 Redox 반응을 이용하여 에너지 밀도를 향상시키는 방식이다. 또한, 3세대 하이브리드 커패시터는 EDLC의 우수한 전도성과 유사커패시터의 높은 저장용



전기이중층 커패시터
이온 및 전하의 단순흡착

유사 커패시터
산화환원반응 동반



하이브리드 커패시터
나노소재를 통한 빠른 전하이동

그림 4. 슈퍼커패시터 반응원리

표 2. 슈퍼커패시터의 분류

	유형	용량(/g)	전압	특성
Electrostatic Capacitors	Plastic/Metalized Film Capacitor	0.001~100 μ F	~1.5 kV	High voltage and density Low energy
Electrolytic Capacitors Electrolytic Capacitors	Aluminium Electrolytic Capacitor	0.68 μ F~0.22 F	~350 V	Ion adsorption, noxiousness Ion adsorption, noxiousness
	Tantalum Electrolytic Capacitor	0.001 μ F~1000 μ F	6~120 V	
Hybrid Supercapacitor	Aluminum/Tantalum + Carbon/Metal-oxide	~100 F	~600 V	
Supercapacitor/ Ultracapacitor Supercapacitor/ Ultracapacitor	EDLC	~150 F	0.8~3.0 V	Fully reversible chemisorption, Long life time, High power density, Environmental-friendly Fully reversible chemisorption, Long life time, High power density, Environmental-friendly
	Redox Capacitor	~750 F	0.8~3.0 V	
Capattery	Metal + Carbon	~2000 F	~3.0 V	Hybrid type of battery and supercapacitor

량을 구현하기 위해 탄소 및 금속산화물 나노입자 복합재료 전극을 활용하는 기술이다. 대표적인 하이브리드 커패시터인 리튬이온 커패시터 (Lithium-Ion Capacitor, LIC)는 주로 일본의 JM Energy, FDK, NEC 등에서 기술을 선도하고 있으며, 기존 커패시터의 3배 (20Wh/L)까지 에너지 밀도를 향상시켰다. 그림 4 및 표 2는 유형에 따른 슈퍼커패시터의 원리 및 특성을 각각 보여준다.

미니트램의 경우, 소형화된 차량사양 및 5 km 이내의 수송 거리 등 운행특성을 고려할 때 고에너지밀도의 하이브리드 커패시터 계열 저장매체의 활용성이 높은 것으로 나타났다.

전기이중층 커패시터의 경우, 물리적 흡착현상에 의한 에너지 저장방식으로 충방전 수명이 길고, 고속충전 및 고출력의 장점을 가지지만, 에너지저장용량의 한계로 미니트램의 전원공급에 충분하지 않다.

슈퍼커패시터의 특성 및 성능은 전극소재의 원료 선정 및 성형 방식에 영향을 받는다. 전극소재의 표면적을 증가시키거나 전기 전도성이 우수한 소재를 적용함

으로써 에너지 밀도 및 출력밀도 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

4. 무선유도급전시스템

미니트램의 전원공급은 무선유도급전방식으로 정거장 앞 노면에 매설된 급전선로부터 유도된 전력(500V, 10kW)이 차량 내 픽업(Pick-up) 장치로 비접촉 방식에 의해 전송되고, 이후 차량에서 정류(135V) 및 감압(24V 및 80V)하여 각종 전장품에 에너지를 공급하게 된다.

그림 5에 나타난 것과 같이 전자유도에 의한 방식으로 지

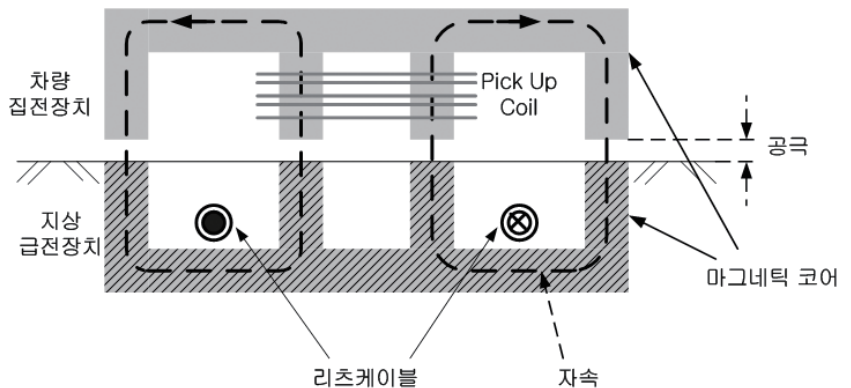


그림 5. 무선유도급전 시스템의 개념도

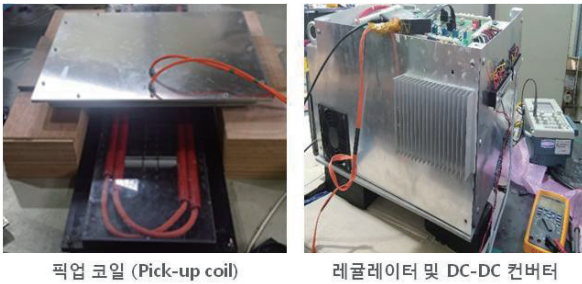


그림 6. 미니트램의 전원공급 모듈

상에 코일을 매설하여 자속을 발생시키고, 자속이 차량하부에 설치된 마그네틱 코어를 통하여 흐르도록 한다. 이 자속을 이용하여 마그네틱 코어에 감겨진 픽업 코일에 유도 기전력을 발생시킴으로써 지상의 전력을 차량으로 전송하는 방식이다.

시스템은 지상 급전선으로부터 전기를 수집하는 픽업(Pick-up)장치와 차량 내 전력 변환/공급을 위한 레귤레이터(Regulator), DC-DC 컨버터(Converter) 장치로 구성되어 있다(그림 6). 픽업코일 장치는 차량 하부 중앙에 설치되고, 차량의 유도 전력 발생을 위한 케이블이 노면 아래에 매설된다.

미니트램 하부에 설치된 픽업장치는 페라이트(Ferrite) 코어, 케이블 및 저장매체인 커패시터(Capacitor)로 구성되며 10kW급 출력을 낼 수 있도록 설계하였다. 또한 미니트램 차량에는 픽업 코일로부터 공급된 전력을 차량의 에너지 저장매체에 안정되게 공급할 수 있는 벅 컨버터(Buck converter) 토폴로지(Topology) 기반의 레귤레이터(Regulator)가 개발·설치된다. 출력은 10kW이며 입력 사양은 급전선로 및 픽업 사양에 종속되는 입력 전압을 가진다.


부하 전원공급장치인 DC-DC 컨버터는 벅 컨버터(Buck converter)과 풀 브리지 컨버터(Full bridge converter)로 구성된다. 벅 컨버터는 모터를 비롯한 액추에이터(Actuator), 능동소자, 등화기 등 서로 다른 전원과 차량 상태 및 차량 기동 조건에 따라 부하가 급격히 가변되는 특성에 적응하고 안정적으로 전력을 공급할 수 있도록 설계/제작되었다. 또한 풀 브리지 컨버터는 출력 27Vdc의 정전압 전압으로 전력을 공급하기 위한 장치로 입력 전압 범위는 벅 컨버터와 같으며, 출력 전압은 1V 이내의 리플을 포함한 27Vdc이다. 그 외, 벅 컨버터와 동일하게 과전류로부터 장치를 보호하기 위한 퓨즈 및 전류 센서, 절연과 함께 감압을 유도하는 트랜스포머 및 출력단의 정류를 위한 다이오드 등이 사용되었다.

선로 상에는 별도의 집전을 위한 구조물이 노출되지 않으며,

차량이 정거장에 정차할 때, 유도전력 공급방식(Inductive power supply method)에 따라 에너지 저장매체로 일정 전력 충전 모드(Constant power supply mode)에 의해서 에너지가 급속(2분 이내) 충전되며, 차량은 추진 및 각종 서비스 기기에 요구되는 에너지를 소모하면서 주행한다. 이와 더불어, 차량의 제동 시 발생하는 회생에너지는 회생 전력으로 변환되어 에너지 저장장치에 재충전되도록 설계되었다.

미니트램의 무선 전력 공급 방식을 실제로 적용하기 위하여 시뮬레이션과 H/W, S/W를 제작하여 능동부하를 활용하여 시험을 수행한 결과, 전체 용량은 10kW급으로 각 세부 장치가 정해진 정격 사양대비 시험에서 목표사양 값에 만족하는 것을 확인하였으며, 공급전압 $500\pm Vdc$ 에서 안정된 정격 전력을 나타내었다. 향후 실제 차량에 적용한 상태에서 에너지 저장장치 및 테스트베드 내 충전 인프라와 연동한 종합시험이 수행될 예정이다.

5. 결 론

본 기고를 통해, 미니트램에 적용된 전력공급시스템 기술을 소개하였다. 최적 전원공급을 위해 주행시뮬레이션을 통한 에너지 소모량을 산출하고, 다양한 에너지저장매체를 선정하고자 하였다. 소형경량 차량인 미니트램이 5 km 이내 단거리 구간을 운행하는 동안 정차시 급속충전이 필요한 점을 고려할 때, 빠른 충방전 성능 및 에너지 밀도, 수명이 향상된 하이브리드 슈퍼커패시터가 적합한 저장매체로 판단되며, 무선유도급전시스템 기술을 통해 효율적인 전력공급이 가능하도록 개발하였다. 향후 지속적인 저장매체의 성능향상 연구 및 무선급전시스템의 테스트베드 연동 시험을 통해 미니트램의 전력공급시스템의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대한다. 

참 고 문 헌

- [1] 강석원 외, "PRT 차량의 무선급전 시스템 설계 및 구현", 디지털융복합연구지, 12(11), 289-298, 2014
- [2] 정락교 외, "소형·경량철도차량을 위한 고에너지 하이브리드 커패시터 및 시스템 적용 기술개발 기획", 한국철도기술연구원, 2014
- [3] 김백현 외, "PRT 차량의 전력 공급시스템 개발", 전기학회논문집, 62, 2013

- [4] 강석원 외, “미니트램 차량을 위한 탄소 나노소재 기반 하이브리드 커패시터 개발”, 2015년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2015
- [5] 정락교 외, “미니트램 차량의 주행 성능 분석을 통한 에너지 소모량 예측, 2015년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2015
- [6] Shen-Ming Chen 외, “Recent Advancements in Electrode Materials for the High-performance Electrochemical Supercapacitors: A Review” Int. J. Electrochem. Sci., 9, 4072-4085, 2014
- [7] 박수진 외, “Carbon Materials for Electrochemical Capacitors”, Carbon Science, 6(4), 257-268, 2005
- [8] 한정우 외, “에너지 저장 장치용 슈퍼커패시터 후막 적용 기술”, 세라미스트, 14(1), 7-14, 2011
- [9] 김기일, “고용량 하이브리드 슈퍼커패시터-LIC”, KISTI Market Report, 4(8), 3-6, 2014