

전기철도 전력저장시스템 동향

이한민 <한국철도기술연구원>

1 서론

전력은 수요와 공급을 일치시켜 소비 전력에 적합한 공급을 상시 실현함으로써 오늘날의 안정된 시스템을 성립시키고 있다. 그러나 국내·외 전력 판매의 자유화, 또 태양광 발전과 풍력 발전, 연료 전지 등 분산형 전원의 진출로 향후에는 복잡한 시스템의 운용이 과제가 된다.

한편 화석 에너지 소비 증대로 인한 지구 온난화 방지로는 러시아가 교토의정서를 비준함으로써 1997년의 지구 온난화 방지 교토회의 (COP3) 로부터 7년을 경과하여 실효적인 움직임이 시작된다. 2010년을 목표로 하는 이산화탄소 등 온실 효과 가스 배출 삭감에는 각종 실질적으로 유효한 대책이 거듭 필요해진다.

이들의 움직임에서, 전력 저장에 의한 에너지 이용률 향상이 주목되는데 역사적으로는 대규모의 양수발전으로 대표되며, 또한 근년에는 전원 분산화에 대응해서 플라이휠, 2차 전지, 대용량 커패시터 등 중소규모 시설의 연구와 실용화가 추진되고 있다.

전기 철도는 간헐 부하인 점, 전력 회생 브레이크에 의한 에너지 반환이 가능하며 차량의 전력 규모도 커지는 점에서, 중소 용량의 전력 저장에 적합하다. 국내·외에서 장래를 지향한 연구 개발이 이루어지고 있는데 이들의 동향에 대해 이하에 기술하고자 한다.

2. 전력저장기술의 일반 분류

현재 실용화되어 있는 것과 연구개발 도상에 있는 전력저장의 일반적인 형태 분류를 그림 1에 나타내었다.

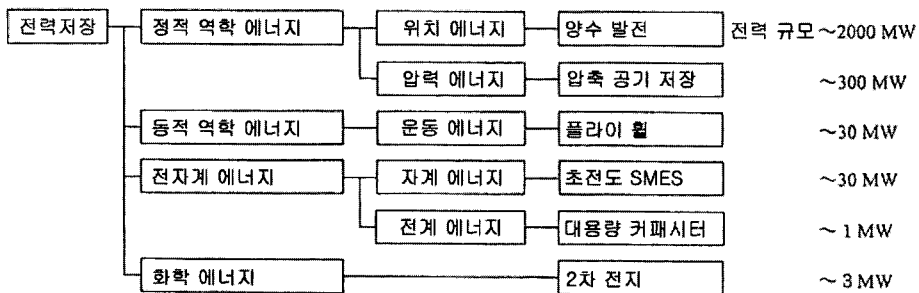


그림 1. 전력 저장의 형태

전력의 저장 형태는 역학 에너지, 전자계 에너지, 화학 에너지로 크게 분류된다. 양수발전, 압축공기 저장, 초전도 전력저장 (SMES)은 집중형 대규모 시스템에, 그리고 플라이휠, 대용량 커패시터, 2차 전지 및 초전도 응용의 일부는 분산형 중소규모의 저장에 적합하다.

2.1 양수 발전

양수 발전은 화력 등에 비해 수 분 정도로 변동에 대응할 수 있는 것이 특징이며, 또한 최근에는 양수 운전시에 전동기의 가변속 운전으로 부하 조정기능을 갖게 하는 방법과, 무효전력 조정에 의한 계통 전압 안정화 등을 실현하고 있다. 근년에는 전력 수요의 둔화와 환경 보전 면에서 산간부로의 건설보다도 해수 응용과 지하 건설 등의 연구 개발이 진행되고 있다.

2.2 압축 공기 저장

기밀성이 매우 높고 가공이 용이하며 건설비가 저렴한, 지하 수 백 [m]의 암염층에 공기 저장이 가능한 독일과 미국에서는 압축공기저장 (Compressed Air Energy Storage: CAES) 과 가스 터빈 발전기를 편성한 100~300[MW] 규모의 CAES-G/T 시스템을 실용화하고 있다. 야간 전력으로 공기를 압축하고, 가스 터빈 운전 시에는 압축 공기로 연료를 보조하여 에너지 저장을 실현한다. 국내는 암염층이 없어 건설 비용이 커지기 때문에 아직 연구 단계에 있다.

2.3 플라이휠

플라이휠은 발전기와 직결되기 때문에 전기 에너지의 수수가 용이하며, 베어링 부분의 유지 보수 이외에는 수명이 길다는 등의 특징이 있다. 국내의 한국원자

력연구소는 직경 3.5[cm], 두께 2.5[cm]의 고온초전도 단결정을 제작하여 수 [kg]의 디스크형 알루미늄 회전체를 부상시킨 수직축 초전도 베어링을 제작하는데 성공하였고 이를 이용한 소형 고온초전도 플라이휠을 제작하여 공기 중에서 일만 [rpm]의 회전속도를 기록하였다. 현재 설계 기준으로 20,000 [rpm]에서 저장용량이 300[Wh]급인 직경 30 [cm], 20[kg] 중량의 알루미늄 회전 디스크를 진공에서 3,000[rpm] 회전시키는데 성공하였고 무접촉 구동 및 전력 저장 시스템을 시험 중이다.

또한 한국전력공사 전력연구원은 특수한 자석배열과 Y계 고온초전도 단결정들을 원통형으로 배열한 수평축 초전도 저어널 베어링을 개발하고, 이 베어링에 직경 40[cm], 중량 16[kg]의 휠을 장착하여 설계기준(진공 10,000[rpm])으로 1[kWh]이고 상용기준(무진공 3,000[rpm])으로 7[Wh]급 프로토타입의 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하여 성능 시험을 수행하였다. 현재 30[kg]의 휠을 부양할 수 있는 초전도 베어링과 액체질소 자동공급 시스템 1[mtorr] 진공, 그리고 40,000[rpm]까지 구동하고 1[kW]급의 부하를 사용할 수 있는 무접촉 모타 발전기를 장착한 300[Wh]급의 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하여 성능시험 중에 있다.

2.4 초전도 전력저장

초전도 전력저장은 일반적으로 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)라 불리며, 1970년대부터 국내외에서 연구 개발이 이루어져 왔다. GWh급의 대용량 설비에서부터 [kWh]급의 순시 전압저하 보상용까지 몇 개의 단계가 있으며, 미국에서는 후자의 예로서 최대 3[MW]를 출력하는 D-SMES 등이 상품화되어 있다. 국내에서도 대용량 설비를 목적으로 한 연구가 진행되고 있는데 비용 저감 등의 방책이 과제이다.

2.5 대용량 커패시터

대용량 커패시터는 전기 이중층을 응용한 것이 중소 규모의 전력 저장용으로서 주목을 받고 있다. 2차 전지와 비교에서는 화학 변화가 없기 때문에 반복 충방전에서의 수명이 길며, 2~3[V]의 저전압 셀 단위에서는 메모리 백업용 등으로서 실적이 길다.

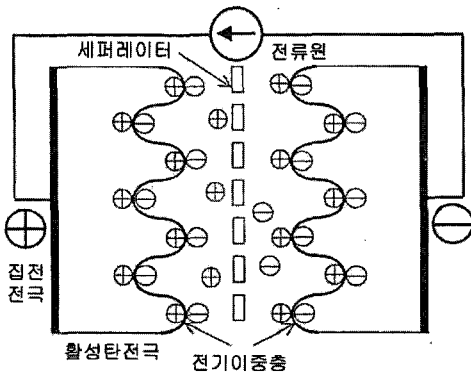


그림 2. 전기 이중층 커패시터 모식도

그림 2는 내부의 모식도에서 활성탄 전극과 전해액의 계면에 전기 이중층이 구성되어 유전체로서 움직이는 것을 나타낸다. 전력용으로는 이제 시작 단계에 있으나, 하이브리드 트럭의 일시전력 저장용, 연료 전지 전기 자동차의 가속 에너지 보완과 브레이크 에너지 흡수용으로 실용화되어 있다.

현상의 에너지 밀도는 2차 전지보다 한 자리수 낮으나, 활성탄 이외의 비다공질 탄소 소재의 도입으로 에너지 밀도를 비약적으로 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

2.6 2차 전지

중(中)규모 정도 이하의 분산형 전력 저장이 목적인 2차 전지의 대표적인 것으로는, NaS(나트륨 유황) 전지 및 리튬 플로우(Reduction: 환원,

Oxidiazation: 산화, Flow: 환류의 합성어) 전지이다. 그리고 전기 자동차와 철도 차량 등 소규모의 것은 전력 회로용 리튬 이온(Li-ion) 전지의 개발도 이루어지고 있다.

NaS 전지는 에너지 밀도가 높아 충방전 효율이 뛰어나며, 다른 2차 전지에 비해 수명이 긴 점을 살려 계속 실용화를 추진 중이다. (-)극과 (+)극에 각각 액체의 나트륨과 유황을 이용, 중간에 전해질로서 고체의 β-알루미나를 배치한 구조이며, 파인세라믹의 β-알루미나를 나트륨 이온이 통과하여 충방전이 이루어진다. 전력회사를 중심으로 개발을 추진하고 있으며, 중규모 시설에서는 하계의 고부하 대책에 효과를 올리고 있다.

리튬스 플로우 전지는 바나듐(vanadium) 유산 수용액을 환류시켜 액체 속에 에너지를 저장하는 방식이다. 바나듐 자원은 풍부하며, 바나듐 유산 수용액이 셀 내를 순환할 때에 이온 가수가 변화하여 충방전이 이루어진다. 그림 3은 리튬스 플로우 전지의 원리를 나타낸 것이며, 바나듐 유산 수용액의 탱크 용량을 변화시킴으로써 전력 저장량을 자유로이 선정할 수 있는 이점이 있다. 전력회사가 설치를 추진하는 등 실용화 움직임이 계속 이루어지고 있다.

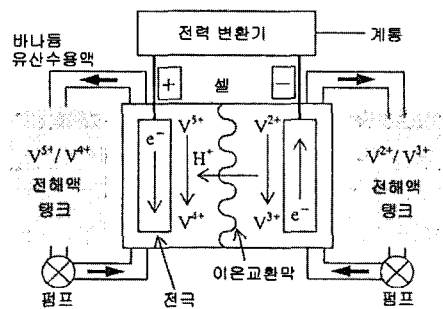


그림 3. 리튬스 플로우 전지의 원리

리튬 이온 전지는 2차 전지 중에서도 가장 에너지 밀도와 전력 밀도가 높으며, 부극에 탄소계 소재, 정

극(正極)에 $LiCoO_2$ 와 $LiMnO_2$ 등을 이용해서 리튬 염의 유기 전해액 안에 구성한다. 휴대 전화 등의 보급에 따라 성장하여 현재는 전력 회로용의 대표로서 하이브리드 차의 에너지 보안을 중심으로 한 전기 자동차용의 개발이 진행되고 있다. 하이브리드 전기 자동차는 에너지 밀도보다도 전력 밀도를 중시하기 때문에 철도에 적용하는 점에 있어서는 이 연장선상으로 생각할 수 있다. 철도 차량으로의 적용에 대한 연구 개발에 관해서는 뒷부분에서 논의하고자 한다.

3. 철도 시스템에서의 전력 저장 기술

3.1 전기철도 전력 저장의 특징

전기철도의 전력 소비 특징은, 차량의 가속시 단시간에 대전력을 소비하는 점과, 전력 회생 브레이크를 상시 사용하여 부하측에서 에너지 공급이 있는 점, 그리고 교류 전원 방식에서는 큰 단상 전력을 소비, 회생한다는 점 등이다. 그리고 차량의 소비 전력은 200[kW]에서부터, 고속열차 1편성의 약 12[MW] 정도까지의 독립된 분산 부하이며, 일반적으로 통근 열차를 구동하는 회로를 단위로 하면 1000[kW]의 배수의 규모로 생각할 수 있다.

이러한 점들에서 전기철도는 대규모 전력전량보다도 2차 전지와 대용량 커패시터, 그리고 플라이휠 등 중규모로 분산하는 방법이 적합하며, 현재 여러 가지 목적으로 실용화를 향한 개발이 이루어지고 있다. 이하에 이미 실용화된 방식도 포함해 철도용 전력저장의 동향을 기술할 것이다.

3.2 전력 공급 시스템의 전력 저장

3.2.1 직류 전원으로의 납축전지 적용

직류전원 방식의 차량에 의한 전압강하 보상의 목적으로, 납축전지에 의한 시작품을 이용한 연구 개발

이 1979년부터 일본국철에서 이루어졌다. 직류 1500[V]의 전력 공급선에 초퍼 회로와 함께 396셀, 792[V]의 납축전지 회로 2군을 직렬 접속하고, 175[Ah]를 공급하는 것으로 배터리포스트라고도 불렀다.

차량 주행에 따른 전압 강하에 대해, 수십 초 간 전류를 공급해서 750[V]를 980[V]로 개선한 등의 결과가 있으나, 당시에는 축전지의 급속 충전전 내량 등의 기술적 과제가 있어 실용화에는 이르고 있지 않다.

3.2.2 직류 전원으로의 플라이휠 적용

일본에서는 1988년에 급행 전철의 직류전원 회로 말단의 전압 변동 보상과 전력 저장용으로서 실용화되었다. 플라이휠을 직결한 3상 유도 발전 전동기를 인버터로 회전수를 제어하고, 직류회로는 초퍼 회로를 통해 직류 1500[V]의 전력 공급선에 접속한다. 축적 에너지는 25[kWh](90[MJ]), 회전수는 3000[min^{-1}]이며, 각각 최대값으로 1800[kW] 및 3000[kW]의 에너지 축적과 방출이 가능하다. 플라이휠은 직경 1.5[m], 길이 4[m], 질량 16,100[kg]으로 대형이며, 980~1,780[V]의 전압 변동 범위를 1,200~1,650[V]로 개선하였다고 보고되고 있다.

유럽에서는 독일·켈른의 노면 전차용 전원 등에서의 시험(시도)이 있으며, 또한 영국·런던 지하철에서도 실용화가 이루어지고 있다. 2000년 10월에 설치한 플라이휠은 글래스 파이버, 자성분, 카본 파이버를 편성해서 회전체를 경량화하고, 100[kW] 용량이 3대이다. 내부 기압을 내려 회전수를 36,000[min^{-1}]로서 소형화하고, 1대 장치의 고유 스페이스는 한 변이 0.6[m], 높이 1.5[m]이며 질량은 800[kg]이다. 런던 지하철에서는 전압 변동 폭의 저감과 동시에 브레이크 전력의 회생에 따른 경제적 효과도 겨냥하고 있다.

3.2.3 직류 전원 방식의 전기 이중층 커패시터 적용

직류 전원방식의 차량에 의한 전압 강하 보상을 목적으로 전기 이중층 커패시터에 의한 전력 저장을 연구되고 있다. 일본에서는 시작품을 Enoshima 전철의 직류 600[V]의 전력 공급 설비에 가설하고, 전압 강하 보상의 기초 데이터를 발표하고 있다. 전기 이중층 커패시터는 500[V], 32[F]로 최대 축적 에너지는 400[kJ]이며, 2060[kJ]의 연속 에너지 방출이 가능하다. 입출력 부분에 초퍼 회로를 갖기 때문에 총 방전 효율은 73(%) 정도로 약간 낮으나, 최대 184[kW]의 출력으로써 전압 강하의 최저치는 50[V] 상승한다.

3.2.4 교류 전원 방식의 전기 이중층 커패시터 적용

일본 신칸센은 차량의 PWM 교류-직류 변환기의 역률 제어에 의해, 교류 전원 공급은 종래의 무효전력 보상을 대신하여 유효전력의 저장과 용통이 연구되고 있다.

소형 시작 장치를 이용한 연구 단계이나, 여객 철도에서는 3상 교류 전력을 2상 변환 후의 각 상에 PWM 변환기를 접속하고 직류 회로에 전력 저장 매체를 이용하는 검토를 하고 있다. 실험 회로의 직류 전압은 360[V] 때문에 납축전지를 적용하고 있으나, 향후 전기 이중층 커패시터에 의한 검토를 계획하고 있다.

3.3 차량의 전력 저장

철도 차량은 직류·교류의 전원 방식에 관계없이 전력 회생 브레이크에 의한 에너지 리사이클이 가능한 것이 특징이다. 이 점에서는 차량 내 전력 저장의 필요성에 대한 논의도 있다. 직류 전원방식에서는 대

도시권과 같이 운행 밀도가 높은 경우에 전력 회생 브레이크가 효율적으로 동작하나 그 이외의 교외에서도 반드시 그러한 것은 아니다.

또한 금후의 동향이 주목되는 디젤 하이브리드 전기 차량과 연료전지 차량 등은 브레이크 전력을 회수하기 위해 소규모 전력 저장의 연구 개발이 필요하다고 생각된다.

3.3.1 직류 전원 차량의 전기 이중층 커패시터 응용

전기 이중층 커패시터 적용의 시도로서, 철도에서는 직류 전원 차량의 전기 브레이크 에너지 회수를 목적으로 한 연구 개발을 하고 있다. 열차 밀도가 낮아, 전력 회생 브레이크가 유효하게 동작하지 않을 경우, 종래에는 기계 브레이크의 사용을 피하기 위해 에너지를 저항기의 열로서 처리하고 있다.

연구 내용은 직류 전원 전압 1500[V]에 대해 250[V] 정도의 소형 전원과 차량 구동 회로를 이용, 200[V], 13.5[F]의 전기 이중층 커패시터를 반도체 전력 회로와 함께 사용한 모의실험 결과로서 보고되고 있다. 또한, 이와 병행하여 실제 회로에 적용할 수 있는 직류 1500[V] 규모의 시작 장치에 의한 연구도 진행하고 있다.

한편, 유럽에서는 전기 이중층 커패시터 적용의 시작 장치에 의한 구체적 실험이 선행되고 있다. 독일·만하임의 노면 전차를 운행하는 MVV사는 95[kW]의 전동기 4대를 구동하는 규모의 차량에 대해 Bonbardie사제 Energy Saver를 2003년 9월부터 차량에 탑재해서 주행 실험을 계속하고 있다. 전기 이중층 커패시터는 45[F], 400[V]로 850[Wh]의 에너지를 축적한다. 주행 결과에 따르면 종래의 전력 회생 차량에 대해 일출 역행분의 30(%)에 상당하는 에너지의 재사용이 가능하며, 최대 소비 전력 저감과 전력 공급선의 손실 저감에도 효과가 크다고 보고하고 있다.

3.3.2 디젤 전기차량의 전기 이중층 커패시터 응용

국내에서도 비전화 구간은 디젤 엔진 발전기 출력의 전기 에너지에 의한, 하이브리드 전기 차량이 계속 개발되고 있다. 또한 일본에서는 철도에 차세대 하이브리드 차량으로서 직류 회로에 축전 장치를 탑재하는 시스템을 검토하고 있다. 축전 장치는 리튬 이온 등의 2차 전지와, 전기 이중층 커패시터의 가능성을 생각할 수 있으나, 향후 이중층 커패시터의 고에너지, 고밀도화 연구의 상황에 따라 적절한 방식이 선택될 것이라 생각된다.

또한 국외에서는 스위스의 공과대학에서 기복이 많은 로컬선의 디젤 전기 차량으로의 전기 이중층 커패시터 적용이, 노선의 특징을 살린 시뮬레이션 결과를 중심으로 제안되고 있다. 현재 상대 680[kW] 출력의 디젤 엔진에 대해, 1,700[kg]의 전기 이중층 커패시터를 탑재하면 500[kW], 3,000[kg]에서는 400[kW]로 된다고 산출하였다. 그리고 이 시스템을 적용하면 엔진 출력은 380[kW]인 경우에 종래에 비해 연료 소비량의 44[%]를 절약할 수 있다고 보고되고 있다.

3.3.3 무가선 차량으로의 전기 이중층 커패시터 적용

앞에서 논의한 독일·만하임 MVV사의 노면 전차에서도 전기 이중층 커패시터의 충전 에너지로 주행하는, 가선을 이용하지 않는 방식의 가능성을 시사하고 있으며, 프랑스에서도 가선을 없애 거리 속의 경관을 유지할 목적으로 연구 개발을 진행하고 있다. 프랑스 국철을 중심으로 하는 THALES 프로젝트는 역에서의 급속 충전과 에너지 운영관리에 의한 주행을 할 계획을 발표하고 있다.

또한 일본에서는 소규모이긴 하지만 Yukigaya 제어 연구소에 의한 연구 결과가 보고되고 있다. 전장

518[m]의 실험 선로를 만들고, 운전자를 포함하는 500[kg]의 소형 차량에 300[F], 55[V], 200[A], 454[kJ], 52[kg]의 전기 이중층 커패시터를 탑재하여 주행 실험을 실시한다. 이후 전 질량 7000[kg] 정도 차량의 개발을 시도하고 있다.

3.3.4 디젤 전기 차량으로의 2차 전지 응용

일본 여객 철도에서는 장기적인 비전으로서 연료 전지에 의한 차량 구동도 구상하고 있으며, 당면한 연구 개발로는 디젤 하이브리드 전기 차량의 연구개발을 추진하고 있다. 이것은 330[kW] 디젤 엔진과 180[kW] 교류 발전기로 95[kW] 출력의 유도 전동기 2대를 구동하는 시리즈 하이브리드 방식으로, 직류 회로에 680[V], 10[kWh], 400[kg]의 리튬 이온 전지를 탑재한다. 이 차량 개발의 목적은 디젤 차의 브레이크 에너지 회수, 디젤 엔진 운전의 적정화에 의한 배출 가스의 저감, 전력 공급 설비의 간소화 등이다.

리튬 이온 전지는 망간계 재료를, 그리고 충·방전 제어에는 전기 자동차와의 공통 기술을 도입하여 장래를 생각한 비용 저감을 계획하고 있다.

3.3.5 무가선 차량으로의 2차 전지 적용

일본에서는 노면 전차를 개조해서 리튬 이온 전지를 주 에너지원으로 하는 차량의 주행 실험에 의한 연구개발을 진행하고 있다. 질량 19,700[kg], 2대의 60[kW] 출력 전동기를 갖는 차량에, 직류 전압 600[V], 전류 500[A], 출력 300[kW], 에너지 33[kWh] (11.9[MJ]), 셀 질량 605[kg]의 리튬 이온 전지를 탑재하고 있다.

최대 충전에서부터 1/3 방전 상태까지로 17.4[km]를 주행하고, 역행 전력량에 대한 브레이크에 의한 에너지 회수율은 44[%] 등의 결과가 보고되어 있다.

3.3.6 플라이휠의 적용

차량 내부에 플라이휠을 설치하는 검토는 독일 철도 등에서 행해지고 있으며, 표준형 전차를 겨냥하는 독일 Alstom사의 LIREX에 탑재 계획이 있다. 플라이휠은 직경 0.8(m), 최고 회전 수 25000(min⁻¹)의 고속 회전으로 6(kWh)의 에너지를 축적하여 최대 300(kWh)의 출력을 얻는다.

또한 일본에서도 철도 차량과 전기 자동차용을 목표로 한 9000(min⁻¹)의 저속형 플라이휠을 개발하고 있으며, 축적 에너지는 1.1(MJ), 출력은 42(kW)로 보고되어 있다.

4. 맺음말

지금까지 기술한 바와 같이 전기 철도의 전력 저장은 국내외에서 다양한 연구개발이 진행 중이다. 각각의 목적은 다소 다르나, 전반적으로는 에너지 문제에 대처하기 위한 이용률 향상을 목표로 하고 있다.

또한 구체적인 수단인 2차 전지와 대용량 커패시터의 연구 개발에 따른 급속한 성능 향상은 금후에도 상

향을 변화시킬 것으로 예상된다. 철도 규모의 부하 변동에서는, 2차 전지와 대용량 커패시터, 플라이휠에 의한 중소 규모 분산방식이 주류를 이룰 것으로 여겨진다.

금후 전기 이중층 커패시터는 신소재 적용으로 현재 상태보다 수 배 높은 에너지 밀도의 실현이 열쇠이며, 2차 전지는 수명 면에서 교환에 따른 라이프 사이클 비용 증대의 억제 방법이 논점이 될 것으로 판단된다. 이 점에서 라이프 사이클 비용의 개념이 일약 빨리 침투하고 있는 유럽의 연구개발 동향은 주목할 만하다.

◇ 저 자 소개 ◇



이한민 (李翰旼)

1973년 3월 27일생. 1997년 중앙대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 차세대전동차연구팀.