

철도차량 용 리튬폴리머 축전지 제어의 효율적 운용 방안

Efficient Management Plan of Lithium-Polymer Battery Control for Rail Vehicles

박상헌*[†], 이준일*, 박종익*, 이상준*

Sang-heon Park*[†], Jun-il Lee*, Jong-ik Park*, Sang-jun Lee*

Abstract Railway vehicle has a battery system to supply a minimum power source to control the vehicle in case that vehicle control power is not fed from the power conversion device or the auxiliary power supply due that catenary power is not available for or vehicle is in process of starting –up. This kind of battery system is the secondary cell battery rechargeable, such as the lead storage battery or Ni-cd battery, which have been selectively applied according to demanded usage. Also the Lithium-Polymer battery is stated up to be applied according to client's requirements with continuing development of the secondary cell battery technology in these days. In this connection, the method of efficient operation to control the Lithium-Polymer battery in railway vehicle will be handled in this paper.

Keywords : Battery, Lithium-Polymer, Secondary cell battery, Minimum power source

초 록 철도차량에는 차량 기동 시와 가선전원 부재 시 전력변환장치 또는 보조전원공급 장치로부터 차량 내 제어 전원을 공급할 수 없는 경우 차량에 최소한의 제어 전원을 공급하기 위해 축전지 시스템이 설치된다. 이러한 축전지 시스템은 충방전이 가능한 이차 전지를 적용하고 있으며, 근래에는 이차 전지 기술의 지속적인 발전에 따라 기존 축전지들의 설치 공간적인 제약과 충방전 수명이 개선된 리튬폴리머 축전지 등으로 적용 가능한 축전지 사양이 확장되고 있으며 이러한 리튬폴리머 축전지가 수요처의 요구에 따라 차량에 적용되고 있다. 본 논문에서는 근래에 철도차량에 적용되기 시작한 리튬폴리머 축전지에 대해서 차량 내에서 안정적인 제어를 위한 효율적인 운용 방안에 대해 논하고자 한다.

주요어 : 축전지, 리튬폴리머, 이차 전지, 최소한의 제어 전원

1. 서 론

철도차량에서 축전지 시스템은 차량 기동 시 판토타프를 상승하고 보조전원장치가 활성화 되기 전까지의 기동 전원을 공급하게 된다. 또한 영업운행 중 보조전원공급장치를 정상적으로 출력 구동하기 위한 가선전원이 없는 경우 축전지 시스템은 비상부하를 감당하는 역할을 수행하기 위한 비상전원 시스템으로서의 기능을 함께 수행하게 된다.

이러한 축전지 시스템은 충전과 방전이 가능한 이차 전지를 선택하여 사용하고 있다. 철도차량의 축전지 시스템은 과거 납과 황산 전해액을 사용하는 연축전지를 주로 사용하였으나 축전지 기술의 발달로 근래에는 활물질로 니켈, 카드뮴 합금철과 수산화칼륨 전해액을 사용

† 교신저자: 현대로템주식회사 철차연구3팀(sogoodjesus@hyundai-rottem.cp.kr)

* 현대로템주식회사 철차연구3팀

하는 니켈카드뮴 축전지를 사용하고 있으며 또한 기존의 설치 공간적인 제약과 중량, 유지 보수성 및 축전지 수명과 또한 환경(중금속)적인 측면에서 보다 개선된 건식 이차 전지인 리튬폴리머 축전지로 사양을 확대하여 선택적으로 적용하고 있다.

본 논문에서는 근래에 철도차량에 적용되기 시작한 리튬폴리머 이차 전지 축전지 시스템에 대해서 철도차량에 안정적으로 적용하기 위한 제어 범위와 관련하여 효율적인 운용 방안에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 리튬폴리머 축전지의 기본 특성

2.1.1 리튬폴리머 이차 전지

전기화학적으로 리튬을 삽입할 수 있는 양극 및 음극재료, 리튬이온을 이송할 수 있는 매질로써 비 양성 자성극성 유기용매를 사용한다. 양극에는 코발트산 리튬, 음극에는 흑연을 사용한다. 코발트산 리튬을 양극재료로 사용하는 리튬이온 전지의 셀당 기전압은 3.7V로 기존의 연축전지나 니켈카드뮴 축전지 보다 높은 전위를 나타낸다.

2.1.2 충전 원리

리튬이온 전지 양단에 충전 전원을 인가하면 양극의 리튬이온이 분리막을 통과해 음전위로 대전된 음극으로 이동하여 음극의 탄소와 결합하여 안정화 한다.

2.1.3 방전 원리

음극의 탄소와 결합된 리튬이온이 분리막을 통해 양극으로 이동하여 양극물질과 재 결합 한다.

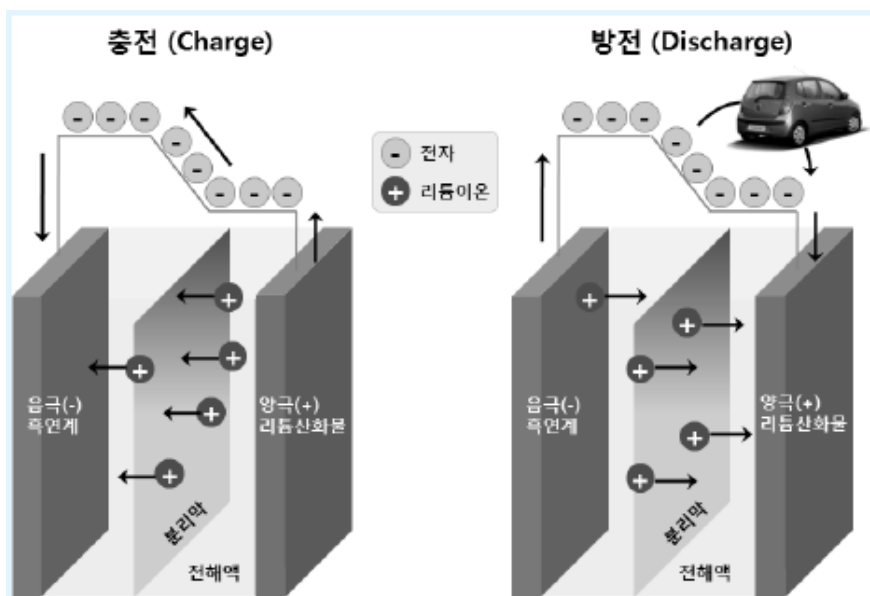


Fig. 1 리튬이온 전지의 충전 방전 원리도

2.2 온도 조건과 충/방전의 관계

2.2.1 리튬폴리머 이차 전지의 온도 특성

온도와 SOC에 따라서 방전 또는 충전이 가능한 전류제한이 있으며 충전과 방전 전류제한치 이하로 운용하여야 수명의 단축을 막을 수 있다.

2.2.2 온도와 SOC 조건 별 충/방전 제한

아래 Table.1과 Table.2 에서 리튬폴리머 이차 전지의 온도와 SOC에 따른 최대 충전 또는 방전 가능한 전류의 량을 기록하였다. 제한 값을 초과하지 않도록 충전 / 방전 하여야 한다. 1C는 1시간 동안 연속적으로 방전 할 수 있는 전류량을 의미한다. 예를들어 1[Ah]라고 표현되는 경우는 1[A]를 1시간 방전할 수 있는 의미로 1C=1[A] 이다.

Power SOC/%	T/°C															
	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	0.2C	0.5C	0.7C	0.6C	0.6C	0.5C	0.4C	0.4C	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C	0.1C	0.1C	0.1C	0.0C
90	0.4C	0.8C	1.1C	1.0C	0.9C	0.9C	0.8C	0.6C	0.5C	0.4C	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C	0.1C	0.1C
85	0.5C	1.0C	1.6C	1.4C	1.3C	1.2C	1.1C	0.9C	0.7C	0.5C	0.4C	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C	0.1C
80	0.7C	1.3C	2.0C	1.8C	1.7C	1.5C	1.4C	1.1C	0.9C	0.7C	0.6C	0.4C	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C
75	0.8C	1.6C	2.3C	2.1C	2.0C	1.8C	1.7C	1.3C	1.1C	0.9C	0.7C	0.5C	0.4C	0.3C	0.2C	0.1C
70	0.9C	1.8C	2.7C	2.5C	2.3C	2.1C	1.9C	1.6C	1.3C	1.0C	0.8C	0.6C	0.5C	0.4C	0.3C	0.2C
65	1.0C	2.0C	3.0C	2.8C	2.6C	2.4C	2.2C	1.8C	1.5C	1.2C	1.0C	0.8C	0.6C	0.4C	0.3C	0.2C
60	1.1C	2.3C	3.4C	3.1C	2.9C	2.7C	2.4C	2.0C	1.7C	1.4C	1.1C	0.9C	0.7C	0.5C	0.4C	0.3C
55	1.3C	2.5C	3.8C	3.5C	3.2C	2.9C	2.7C	2.2C	1.9C	1.5C	1.3C	1.0C	0.8C	0.6C	0.4C	0.3C
50	1.3C	2.5C	3.8C	3.8C	3.5C	3.2C	3.0C	2.5C	2.1C	1.7C	1.4C	1.1C	0.8C	0.6C	0.4C	0.3C
45	1.3C	2.5C	3.8C	3.8C	3.7C	3.4C	3.1C	2.6C	2.2C	1.8C	1.5C	1.2C	0.9C	0.6C	0.4C	0.3C
40	1.2C	2.5C	3.7C	3.7C	3.7C	3.6C	3.3C	2.7C	2.3C	1.9C	1.5C	1.2C	0.9C	0.6C	0.5C	0.3C
35	1.2C	2.5C	3.7C	3.7C	3.7C	3.7C	3.4C	2.8C	2.3C	1.9C	1.6C	1.3C	0.9C	0.7C	0.5C	0.3C
30	1.2C	2.5C	3.7C	3.7C	3.7C	3.7C	3.4C	2.9C	2.4C	2.0C	1.6C	1.3C	1.0C	0.7C	0.5C	0.3C
25	1.2C	2.5C	3.7C	3.7C	3.7C	3.7C	3.5C	2.9C	2.4C	2.0C	1.6C	1.3C	1.0C	0.7C	0.5C	0.4C
20	1.2C	2.4C	3.7C	3.7C	3.7C	3.7C	3.5C	2.9C	2.4C	2.0C	1.6C	1.3C	1.0C	0.7C	0.5C	0.4C
15	1.2C	2.4C	3.6C	3.6C	3.6C	3.6C	3.4C	2.9C	2.4C	2.0C	1.6C	1.3C	1.0C	0.7C	0.5C	0.4C
10	1.2C	2.4C	3.6C	3.6C	3.6C	3.6C	3.5C	2.9C	2.5C	2.1C	1.7C	1.4C	1.0C	0.8C	0.5C	0.4C
5	1.2C	2.4C	3.5C	3.5C	3.5C	3.5C	3.5C	3.1C	2.6C	2.2C	1.9C	1.6C	1.1C	0.8C	0.6C	0.4C
0	1.2C	2.3C	3.5C	3.5C	3.5C	3.5C	3.5C	3.0C	2.6C	2.2C	1.9C	1.6C	1.2C	0.8C	0.6C	0.4C

Table. 1 리튬폴리머 전지의 충전 제한

Power SOC/%	T/°C															
	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
100	1.2C	2.5C	3.7C	3.7C	3.7C	3.6C	3.6C	3.4C	3.3C	3.1C	2.9C	2.7C	2.4C	2.1C	1.8C	1.5C
95	1.2C	2.5C	3.7C	3.6C	3.6C	3.5C	3.5C	3.4C	3.2C	3.1C	2.9C	2.7C	2.3C	2.0C	1.7C	1.4C
90	1.2C	2.4C	3.6C	3.6C	3.5C	3.5C	3.4C	3.3C	3.2C	3.0C	2.9C	2.6C	2.3C	1.9C	1.6C	1.3C
85	1.2C	2.4C	3.6C	3.5C	3.5C	3.4C	3.4C	3.3C	3.1C	3.0C	2.8C	2.6C	2.2C	1.8C	1.5C	1.3C
80	1.2C	2.3C	3.5C	3.5C	3.4C	3.4C	3.3C	3.2C	3.1C	2.9C	2.8C	2.5C	2.1C	1.7C	1.4C	1.2C
75	1.2C	2.3C	3.5C	3.4C	3.4C	3.3C	3.3C	3.2C	3.0C	2.9C	2.7C	2.4C	2.1C	1.7C	1.5C	1.2C
70	1.1C	2.3C	3.4C	3.4C	3.4C	3.3C	3.2C	3.1C	3.0C	2.8C	2.7C	2.3C	1.9C	1.6C	1.4C	1.1C
65	1.1C	2.3C	3.4C	3.4C	3.3C	3.3C	3.2C	3.1C	3.0C	2.8C	2.6C	2.2C	1.8C	1.5C	1.3C	1.0C
60	1.1C	2.2C	3.4C	3.3C	3.3C	3.2C	3.2C	3.1C	2.9C	2.7C	2.5C	2.1C	1.7C	1.5C	1.2C	1.0C
55	1.1C	2.2C	3.4C	3.3C	3.3C	3.2C	3.1C	3.0C	2.9C	2.7C	2.3C	1.9C	1.6C	1.3C	1.1C	0.9C
50	1.1C	2.2C	3.3C	3.3C	3.2C	3.2C	3.1C	3.0C	2.8C	2.6C	2.2C	1.8C	1.5C	1.2C	1.0C	0.8C
45	1.1C	2.2C	3.3C	3.3C	3.2C	3.2C	3.1C	2.9C	2.8C	2.4C	2.0C	1.6C	1.3C	1.1C	0.9C	0.7C
40	1.1C	2.2C	3.3C	3.2C	3.2C	3.1C	3.1C	2.9C	2.7C	2.2C	1.8C	1.4C	1.1C	0.9C	0.7C	0.6C
35	1.1C	2.2C	3.3C	3.2C	3.1C	3.1C	3.0C	2.9C	2.7C	2.3C	1.8C	1.5C	1.0C	0.6C	0.4C	0.2C
30	1.1C	2.1C	3.2C	3.2C	3.1C	3.0C	3.0C	2.8C	2.7C	2.3C	1.9C	1.6C	0.9C	0.5C	0.3C	0.1C
25	1.1C	2.1C	3.2C	3.1C	3.0C	2.9C	2.9C	2.7C	2.3C	1.9C	1.6C	1.3C	0.7C	0.4C	0.2C	0.1C
20	1.0C	2.1C	3.1C	3.0C	3.0C	2.9C	2.8C	2.5C	2.0C	1.6C	1.3C	1.0C	0.6C	0.3C	0.2C	0.1C
15	1.0C	2.0C	3.0C	2.9C	2.7C	2.5C	2.1C	1.7C	1.4C	1.1C	0.9C	0.7C	0.4C	0.2C	0.1C	0.1C
10	0.9C	1.9C	2.8C	2.5C	1.9C	1.4C	1.1C	0.9C	0.8C	0.7C	0.6C	0.5C	0.3C	0.2C	0.1C	0.1C
5	0.5C	1.0C	1.4C	1.3C	1.2C	1.0C	0.9C	0.7C	0.5C	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C	0.1C	0.1C	0.1C
0	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C	0.0C

Table. 2 리튬폴리머 전지의 방전 제한

2.2.3 충전 전압과 배터리 수명의 관계

리튬폴리머의 이차 전지의 표준 충전 전압은 4.15V로 CC/CV (Constant Current/Constant Voltage) 모드로 충전한다. 리튬폴리머 이차 전지의 수명으로 정의하는 EOL (End of Life)은 일반적으로 초기용량 (Begin of Life)의 80%가 될 때까지로 정의하며 1C/1C 조건의 충/방전으로 방전 심도(DOD: Depth of discharge)의 100% 기준 하에 2,000cycles의 수명을 가진다.

DOD 60% 이하로 방전하는 경우는 전기 화학적 성질이 변화하여 사용하지 않는 것이 좋다는 주요 제조사의 권고 사항이다.

상기 조건에서 리튬폴리머 이차 전지의 수명을 기준 수명인 재충전 2,000cycles보다 길게 사용할 수 있는 방법으로 아래 3가지의 경우를 제시할 수 있다.

- ✓ 1C 보다 작은 충/방전 조건 적용: 0.5C/0.5C 충/방전 시 약 2,500cycles 재충전
- ✓ 작은 비율의 DOD로 충/방전 조건을 정의하는 방법: 예를들어 DOD 80% 정도로 방전부하를 제한하여 사용할 경우 약 3,000cycles 재충전
- ✓ EOL을 BOL의 70%까지 사용하는 방법: DOD 70% 조건으로 약 4,000cycles 사용

또한, 과 충전이 리튬폴리머 이차 전지의 수명과 안정성에 직접적으로 영향을 주는 조건이므로 리튬폴리머 이차 전지의 충전 전압을 SOC 100% 기준인 4.15V보다 일정 비율 낮은 수준으로 운용 및 제어하는 조건을 적용하는 경우에 리튬폴리머 이차 전지의 방전 심도 (Depth of Discharge)도 함께 낮은 수준으로 충/방전 할 수 있는 조건이 되므로 기준 수명보다 더 길게 사용하는 것이 가능하다.

2.2.4 충전 전류와 배터리 수명의 관계

리튬폴리머 이차 전지의 온도와 충/방전 전류에 따른 용량관계는 아래 Table. 3과 같다. 주위 온도 조건이 리튬폴리머 이차 전지의 충/방전 성능에 영향을 미치는 요소로서 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

C-rate	45℃	25℃	0℃	-20℃
0.2	102.2%	100.9%	97.8%	88.7%
0.5	101.7%	100.5%	96.5%	82.7%
1	101.4%	100.0%	94.9%	74.9%
2	100.8%	99.2%	94.9%	63.8%
3	100.1%	97.2%	94.6%	48.0%
4	99.5%	95.0%	92.7%	5.3%

Table. 3 리튬폴리머 이차 전지의 온도와 충/방전 전류에 따른 용량

상온의 온도 조건 하에서 방전 심도가 상대적으로 낮은 수준일 수록 리튬폴리머 이차 전지의 충/방전 용량에 대해서는 기대하는 축전지로서의 성능(방전 기대 시간)을 얻어낼 수 있음을 보여준다.

- ✓ 1C 조건의 DOD로 상온 25℃에서 충/방전 할 경우 100%의 성능을 발현
- ✓ 0.5C 조건의 DOD로 상온 25℃에서 충/방전 할 경우 100.5%의 성능을 발현
- ✓ 0.2C 조건의 DOD로 상온 25℃에서 충/방전 할 경우 100.9%의 성능을 발현

3. 결론

리튬폴리머 이차 전지 축전지 시스템의 최대의 성능과 재충전 수명을 기대하기 위한 최적의 운용조건에 대해서 아래와 같은 결론을 도출 하였다.

- ✓ DOD를 80% 이하로 운용
- ✓ 충전을 90%이하로 관리하고 방전을 10% 이상으로 운용
- ✓ 주위 온도 조건을 $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 관리

따라서, 리튬폴리머 이차 전지의 성능과 수명 증대를 위한 상기 조건에 따라 저온을 고려한 용량으로 설계하고 여유율을 120% 이상 설계하는 경우, 상온 25℃에서의 부하는 설계 용량의 약 50% 수준이 되고 발생의 빈도가 적은 저온 조건에서는 약 DOD 80% 수준으로 운용하는 조건을 제시하는 것이 가능하다.

리튬폴리머 이차 전지의 최대 수명과 성능을 보전하기 위한 목적으로 과 충전/ 과 방전 보호 및 고온/저온 보호, 과 전류 보호를 위한 별도의 Battery Management System을 적용하여 관리하는 것도 필요한 부분이다.

다만, 상기 결론 사항과 같은 수명 고려설계는 경제적 저해 요소인 리튬폴리머 축전지 팩의 공급 단가에 대해서는 별도의 대안이 필요하다.

철도차량에 적용되는 축전지 시스템이 감당하는 방전 부하의 종류와 적용 요구조건이 공급자 측면에서만 유연하게 선택하여 적용할 수가 없는 부분이 있고, 사용자의 요구사항을 만족하도록 지정된 경우가 대부분이다. 하지만 차량의 제어 시퀀스를 적절히 조정하여 방전 부하의 조건을 최적화하고, 더불어 리튬폴리머 이차 전지의 상대적 장점을 부각하여 철도차량의 제어 및 운용과 그에 대한 유지 보수 운영의 측면에서 기존의 제한적인 요소를 극복하는 최적화한 지침과 절차를 사용자 측에 제안할 필요도 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 박정기 (2010) 리튬이차전지의 원리 및 응용, 홍릉과학출판사, 서울특별시 강북구 인수동 455-60, pp. 185-212
- [2] 이준용, 김용주 (1998) 전기.전자재료, 동일출판사, 서울특별시 중구 충무로5가 19-3.
- [3] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Steven M. Durbin (2013) Engineering Circuit Analysis, 8th Edition, *Mc Graw Hill Higher Education*, New York, USA.
- [4] 이영일 (2005) 리튬 2차전지 개론, 울산대학교출판부, 울산광역시 남구 대학로 102 울산대학교 출판부 (과학대 산학협력관 304-1호).
- [5] Thomas Reddy, Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition, *Mc Graw Hill Higher Education*, New York, USA.