

배터리 온도를 고려한 병렬형 LDC 시스템의 방전 제어 기법

Discharge Control Method of Paralleled LDC System considering Battery Temperature

| | |
|--------------------|--|
| 저자 (Authors) | 신민호, 엄태호, 김준모, 이정, 김성훈, 이용석, 이정효, 원충연 Min-Ho Shin, Tae-Ho Eom, Jun-Mo Kim, Jeong Lee, Sung-Hoon Kim, Yong-Seok Lee, Jung-Hyo Lee, Chung-Yuen Won |
| 출처 (Source) | 조명전기설비학회논문지 31(3) , 2017.03, 77-83(7 pages) Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 31(3) , 2017.03, 77-83(7 pages) |
| 발행처 (Publisher) | 한국조명전기설비학회 The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers |
| URL | http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07127866 |
| APA Style | 신민호, 엄태호, 김준모, 이정, 김성훈, 이용석, 이정효, 원충연 (2017). 배터리 온도를 고려한 병렬형 LDC 시스템의 방전 제어 기법. 조명전기설비학회논문지 , 31(3), 77-83 |
| 이용정보 (Accessed) | 군산대학교 203.234.58.*** 2021/01/06 17:14 (KST) |

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

배터리 온도를 고려한 병렬형 LDC 시스템의 방전 제어 기법

(Discharge Control Method of Paralleled LDC System considering Battery Temperature)

신민호* · 엄태호 · 김준모 · 이 정 · 김성훈 · 이용석 · 이정효 · 원충연**

(Min-Ho Shin · Tae-Ho Eom · Jun-Mo Kim · Jeong Lee · Sung-Hoon Kim ·
Yong-Seok Lee · Jung-Hyo Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract

This paper proposes paralleled structure of LDC for an electrical vehicle, unlike conventional integral structure, paralleled structure of LDC controls each module of battery independently to solve the temperature unbalance problem among each module during discharging period. Temperature balance control between modules was performed by controlling the amount of discharging current for its corresponding temperature of each module of HVBAT, and temperature fluctuation was confirmed through a thermal camera. Data was collected by experiment about characteristic fluctuation of a battery according to temperature and validity of proposed control method is also proved by experiment.

Key Words : Low Voltage DC-DC Converter, Paralleled LDC System, Discharge Control Method, Active Clamp Forward Converter

1. 서 론

최근 환경 보존을 위한 이산화탄소 배출 규제가 강화되고 있다. 세계 각국에서 환경오염 문제를 해소하기 위하여 전기자동차의 보급 및 확산에 노력하고 있다. 또한 전기자동차의 장거리 주행을 위하여 배터리의 용량이 증가함에 따라 배터리 주

변 전력변환 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

전기자동차 내부의 모든 전장장치에 전력을 공급하고 LVBAT(Low Voltage Battery)를 충전하기 위하여 LDC(Low Voltage DC-DC Converter)를 통해 HVBAT(High Voltage Battery)의 방전을 수행한다. HVBAT는 전기자동차의 주 에너지원으로써 기존 일체형 LDC는 HVBAT의 열화 특성을 고려하지 않고 방전을 수행하기 때문에 배터리의 기대수명 저하와 이용률 감소 등의 문제가 발생한다[2-3].

본 논문에서는 온도에 따라 변동하는 배터리 특성을 고려하며 방전 제어를 수행하기 위해 HVBAT의 모듈마다 병렬형 LDC를 구성하였다. 고전압 배터리의 각 모듈 온도에 따라 부하로 전달하는 전류량

* Main author : Ph.D. Colleague of information and Communication Engineering, Sungkyunkwan Univ.

** Corresponding author : Professor, Colleague of Information and Communication Engineering, Sung kyunkwan Univ.

Tel : 031-290-7164, Fax : 031-290-7179

E-mail : smh5480@skku.edu

Received : 2017. 2. 10.

Accepted : 2017. 3. 4.

을 제어하여 적정온도에서 동작을 수행하도록 제어하였다. 제안하는 배터리 온도 변동을 고려한 방전 전류량 제어 방식은 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. 병렬형 LDC 개발

2.1 제안하는 병렬형 LDC 구성

그림 1은 기존 전기자동차의 일체형 LDC의 구성도를 나타낸다. 전기자동차용 충전기는 계통의 AC 전력을 다이오드 정류기와 절연형 DC/DC 컨버터를 통해 DC전력으로 변환한 뒤 HVBAT를 충전한다. 이후 LVBAT를 충전하기 위해 기존 시스템에서는 일체형의 LDC를 구성하여 전력변환을 수행한다[4].

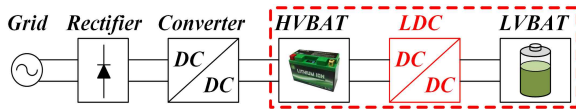


Fig. 1. Conventional configuration LDC diagram

일반적인 전기자동차의 HVBAT 사양은 300V, 20kWh 내외로 높은 정격을 감당하기 위해 LDC를 구성하는 소자들의 비용과 부피가 증가한다. 또한 12V의 LVBAT를 충전하기 위한 전력 변환 과정에서 발생하는 손실과 발열에 의한 특성 변동의 문제가 있다 [5].

기존의 일체형 LDC 구성에 의한 문제를 해결하기 위해 그림 2와 같이 병렬형 LDC 구성을 제안하였다. 소용량의 LDC를 병렬로 구성함으로써 변환하는 전력 부담을 줄이고, 소자의 정격 사양을 낮추어 비용과 손실 저감이 가능한 장점이 있다. 또한 저전력으로 분담하기 때문에 발열을 저감할 수 있다.

그림 3은 병렬형 LDC의 회로 구성을 나타낸다. 150W의 소용량 파워드 컨버터로 효율을 향상하기 위해 능동 클램프 회로를 추가 구성하였다. 추가한 클램프 회로를 통해 ZVS(Zero Voltage Switching)를 수행하여 스위치의 턴-온 손실을 저감하였다[7-8].

병렬형 LDC의 입력 측은 팩으로 구성된 HVBAT의

각 모듈마다 구성하기 때문에 배터리의 온도 불평형으로 인한 이용률 저감 문제를 해결할 수 있다. 그림 4는 HVBAT의 구성도를 나타내며, 여러 모듈의 직·병렬로 구성된 리튬-이온 배터리 팩이다.

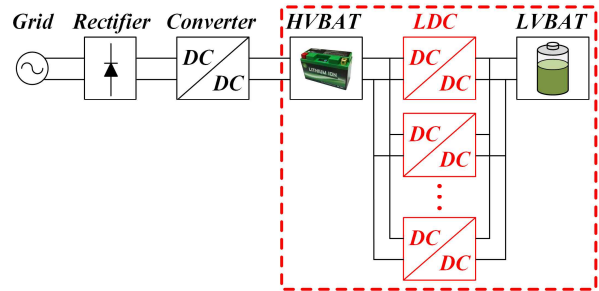


Fig. 2. Proposed paralleled LDC diagram

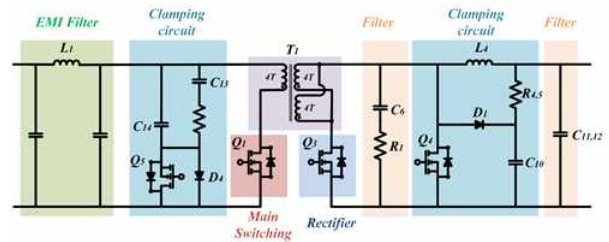


Fig. 3. Circuit configuration of paralleled LDC

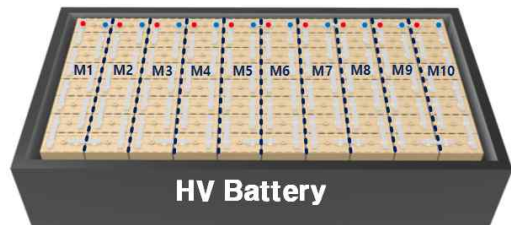


Fig. 4. Internal composition of HVBAT

2.2 배터리 온도 특성 분석

에너지 저장 매체로 사용되는 충·방전이 가능한 배터리는 물질 구성에 따라 표 1과 같이 구분된다. 최근 전기자동차의 주행 거리를 증가시키기 위하여 배터리 용량을 증가시키고, 리튬 계열의 배터리를 적용하였다. 또한 다른 종류의 배터리에 비하여 리튬-이온 배터리는 수명이 길고 셀 전압과 에너지밀도가 높은 특징으로 다양한 분야에 많이 이용된다[8].

Table 1. Battery type and characteristics

| 종류 | 전해액 | 전압 (V) | 에너지밀도 (Wh/L) | 수명 (Cycle) |
|--------|--------------------------------|--------|--------------|------------|
| 납 | H ₂ SO ₄ | 2.0 | 75 | 200~500 |
| 니켈-카드뮴 | KOH/H ₂ O | 1.2 | 160 | 1,000 |
| 니켈-수소 | KOH/H ₂ O | 1.2 | 240 | 1,000 |
| 리튬-이온 | Lix/ 유기용매 | 3.7 | 300~350 | 1,200 |
| 리튬-폴리머 | Lix/고분자 전해질 | 3.7 | 250~300 | 1,000 |

리튬-이온 배터리는 충·방전 동작 시 화학반응으로 인해 온도가 상승하며, 그림 5와 같이 구조적인 이유로 모듈간의 온도 불평형이 발생하게 된다. 측면의 모듈에서 발생하는 열은 공기 중으로 전달되기 때문에 내부 모듈에 비하여 온도가 낮으며, 내부 모듈의 온도는 주변 모듈의 영향으로 비교적 높게 된다.

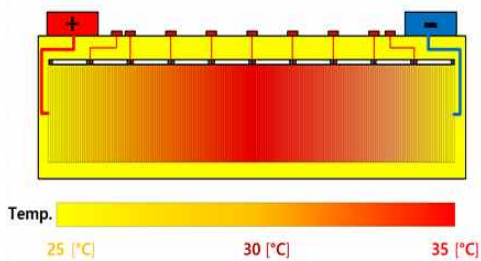


Fig. 5. Distribution of battery temperature during charge and discharge

리튬 배터리의 전기화학 반응은 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 여기서 p, q, r, s는 A, B, C, D의 화학종에 대한 각각의 양론계수이다[9].

$$pA + qB = rC + sD \tag{1}$$

리튬 배터리의 리튬이온에서 가지는 최대 에너지 용량(W_{rev})은 식 (2)와 식 (3)과 같이 최대 방전용량(W_{max})과 같고, 최대용량 일 때 전압인 OCV(Open

Circuit Voltage)는 깁스의 자유에너지 법칙을 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 배터리의 OCV는 150°C의 온도조건에서 이상적인 최대 전압을 나타내고, 정격 용량을 산출하는 25°C의 온도조건에서는 4.5V의 OCV를 갖는다.

$$W_{rev} = W_{max} \tag{2}$$

$$-W_{max} = \Delta G \tag{3}$$

$$E = \frac{-\Delta g_f}{2F} \tag{4}$$

OCV에서 배터리의 전압강하 특성인 내부 저항에 의한 전압강하와 활성화 분극의 온도에 의한 전압강하, 활물질 표면에서의 반응물질의 농도 차에 의한 전압강하를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 초기전압(E)에서 활성화반응(A)을 리튬이온의 초기 전류밀도(i_0)와 실제 전류밀도(i)로 나타낸다. 여기서 온도변화에 따른 전압강하인 활성화 분극에 의한 전압강하는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{BAT} = E - A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \tag{5}$$

$$A = \left(\frac{RT}{2\alpha F}\right) \tag{6}$$

그림 6은 리튬-이온 배터리의 온도 별 방전 특성을 나타내고 있다. 일반적인 리튬-이온 배터리의 공칭 전압은 3.7V이며, 동작 전압은 3.2V~4.2V 범위이다. 리튬-이온 배터리는 그림 6에 나타난 바와 같이 0°C의 미만의 저온에서는 용량이 급격히 감소하고 정격온도인 25°C이상에서는 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

또한 HVBAT의 모듈 간 온도 불평형이 발생할 경우 방전량이 불균등하기 때문에 배터리의 이용률 저감과 기대 수명이 단축되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 HVBAT의 모듈 온도에 따라 방전하는 전류량을 제어하여 온도 불평형 문제를 해결하였다.

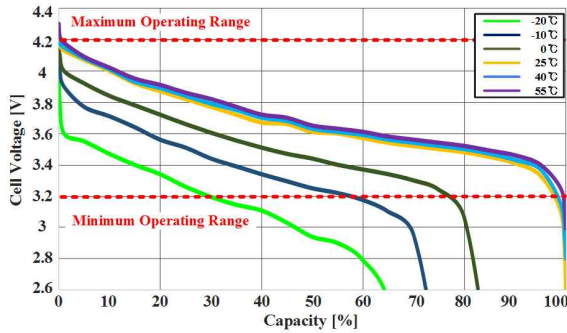


Fig. 6. Discharge characteristics depending on the temperature of the lithium-ion battery

2.3 제안하는 배터리 전류 제어 기법

리튬-이온 배터리의 내부 저항은 전극의 두께, 접촉 저항, 계면반응 부산물의 석출, 활물질 및 전해액의 열화 등 다양한 요인에 의하여 발생된다. 내부 저항에 의해 방전 시 전류량에 따라 그림 7과 같이 상승하는 온도가 변동하는 특성을 갖는다.

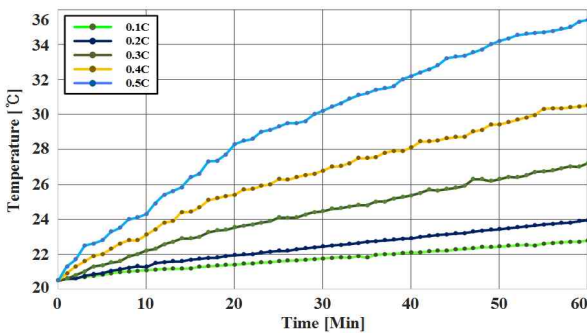


Fig. 7. Temperature characteristics depending on the amount of current of lithium-ion battery when discharged

그림 7과 같은 리튬-이온 배터리의 온도 특성을 고려하여 HVBAT의 모듈 별 온도에 따라 방전하는 전류량을 제어함으로써 최적의 온도를 유지할 수 있다.

그림 8은 병렬형 LDC와 HVBAT 모듈과의 결선 구조를 나타낸다. 병렬형 LDC를 통해 모듈 별 온도에 따라 LVBAT로 전달하는 전류량 제어를 수행한다. 모듈 3과 같이 높은 온도의 모듈에서는 LVBAT로 전달하는 전류량을 낮추어 온도 상승을 억제하고, 모듈 1과 같이 낮은 온도의 모듈에서는 전류량을 증가시켜

온도 상승을 유도함으로써 HVBAT의 온도 평형을 수행한다. 또한 방전을 수행한 뒤 모듈 간 SOC 밸런싱을 위한 평형제어를 통해 균일한 SOC로 제어하였다.

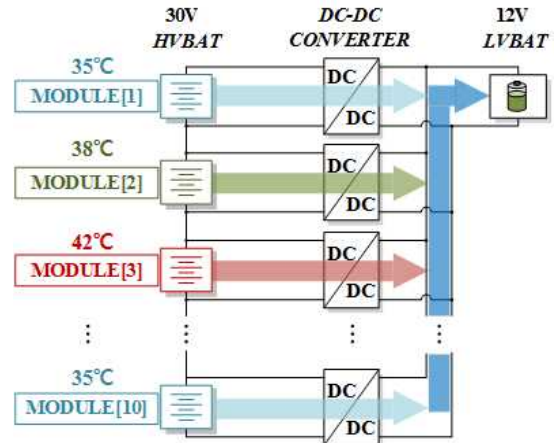


Fig. 8. Control of LCD depending on the amount of current according to HVBAT module temperature

3. 실험 결과

표 2는 HVBAT 모듈의 온도를 고려한 병렬형 LDC의 파라미터를 나타낸다. 150W용량의 LDC로 출력 측은 LVBAT로 구성되어 있다.

Table 2. Experiment parameters of paralleled LDC

| Parameters | Values | Parameters | Values |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| 시스템 정격 | 150W | 입력전압 | 30V _{DC} |
| 출력전압 | 12V _{DC} | 출력전류 | 12.5A |
| 스위칭 주파수 | 240kHz | | |

그림 9는 리튬-이온 배터리의 각 모듈에 병렬형으로 구성된 LDC의 하드웨어를 나타낸다. HVBAT는 모듈 당 8셀의 리튬-이온 배터리 모듈 3개로 구성하였다. LVBAT는 일반 차량용 12V, 60Ah의 배터리이며, MCU는 T1社 DSP(TMS320F28335)로 구성하였다.

그림 10은 기존의 전형적인 방법으로 각 모듈에서 동일한 전류를 방전 시 발생하는 온도 분포를 나타내고 있다. 방전량은 0.5 C-rate로 100분간 방전을 진행하였고, 모듈 간 온도 불평형을 확인하였다.

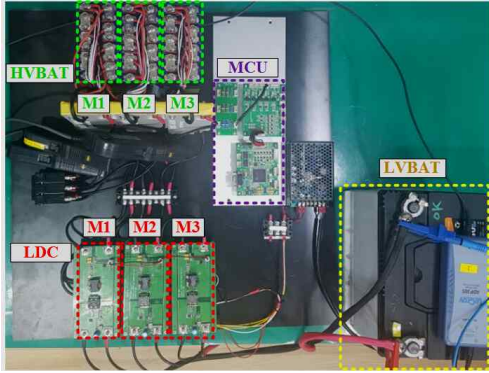


Fig. 9. Paralleled LDC hardware configuration

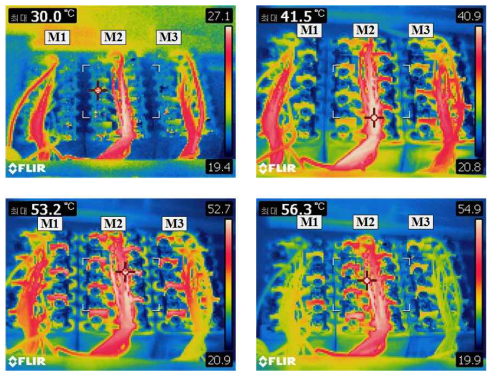


Fig. 10. Temperature of modules applied with existing control method

그림 11은 제안한 출력 전류량 제어기법을 적용하였을 시 발생하는 온도 분포를 나타낸다. 방전량은 0.5 C-rate로 100분간 방전을 진행하였고, 모듈 간 온도가 균일하게 발생하는 것을 확인하였다.

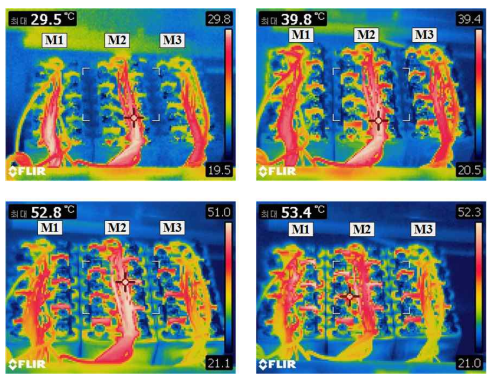


Fig. 11. Temperature of the Module applying proposed control method

그림 12와 그림 13은 100분간 0.5 C-rate로 방전 시 모듈 별로 발생하는 온도를 나타낸 상태기록 그래프이다. 기존의 전형적인 방법인 그림 12에서 배터리 모듈 간 온도 불평형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 제안한 기법을 적용한 그림 13에서는 모듈 간 온도가 비교적 균일하게 발생하는 것을 확인하였다.

표 3과 표 4를 통하여 기존 방식과 제안한 방식을 적용하였을 때 모듈 별 발생하는 온도 편차를 확인할 수 있다. 100분간 방전을 수행하였을 때, 기존 방식에서 2.85°C의 평균 온도 편차가 발생하였다.

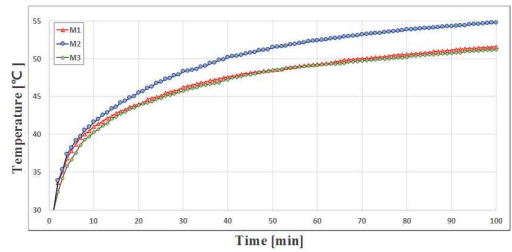


Fig. 12. Each battery module temperature change during discharging(before applying)

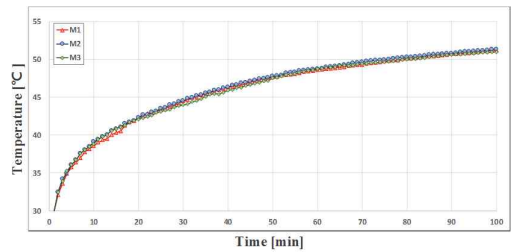


Fig. 13. Each battery module temperature change during discharging(after applying)

Table 3. Each module temperature of the conventional method

| Module | Temp_before | Temp_after |
|------------------|-------------|------------|
| M1 | 30.0°C | 52.2°C |
| M2 | 30.0°C | 54.9°C |
| M3 | 29.9°C | 51.9°C |
| ΔT_{avg} | 0.05°C | 2.85°C |

기존의 방식과 동일하게 100분간 방전을 수행하였을 때 제안한 방식을 적용하였을 경우, 0.45°C의 평균

온도 편차가 발생하였다. 기존의 방식에 비하여 약 2.4°C의 평균 온도 편차가 감소하여 비교적 일정한 온도로 제어됨을 확인할 수 있다.

Table 4. Each module temperature of the proposed method

| Module | Temp_before | Temp_after |
|------------------|-------------|------------|
| M1 | 29.6°C | 52.0°C |
| M2 | 29.5°C | 52.3°C |
| M3 | 29.5°C | 51.7°C |
| ΔT_{avg} | 0.05°C | 0.45°C |

그림 14는 LDC의 출력 측인 LVBAT의 전압과 각 모듈의 출력 전류를 나타내고 있다. 출력 전압은 12.4V~13.5V이며, 배터리 온도변동을 고려한 방전 전류량 제어 방식을 하지 않고 충전을 수행하였을 경우 모듈 간 온도 불평형에 의해 전류량이 불균등하게 되는 문제가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

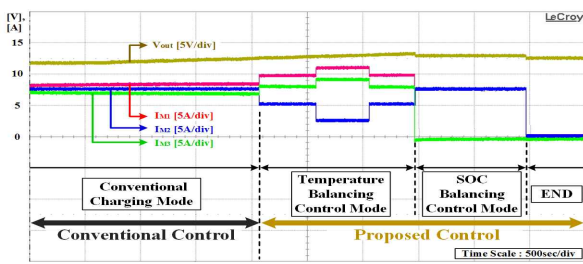


Fig. 14. Voltage and current waveforms during LVBAT charging

배터리 온도 변동을 고려한 방전 전류량 제어 방식을 적용하여 낮은 온도에서는 전류량을 증가시키고 높은 온도에서는 전류량을 증가시켜 모듈간 온도를 균일하게 제어한다. 또한, 온도평형 제어 후 배터리 모듈간 SOC를 동일하게 제어하기 위해 SOC 평형 제어를 수행하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차의 LDC를 기존의 일체형이 아닌 병렬형 구조로 제안함으로써 배터리를 최적

의 온도 조건으로 유지하도록 제어하였다. HVBAT의 모듈마다 병렬형 LDC를 구성하여 각 모듈의 온도에 따라 LVBAT로 전달하는 방전 전류량을 제어함으로써 온도 불평형 문제를 해소하였다. 또한 실험을 통해 모듈별 온도 불평형에 대하여 제안한 제어기법을 적용하여 방전 전류량 제어에 대한 타당성을 검증하였다.

본 연구의 결과로 기존 일체형 LDC에 대한 구조적 선입견을 벗어나 향후 전기자동차 개발에서 병렬형의 LDC 구조를 검토할 수 있을 것이라고 사료된다. 또한 배터리의 용량이 증가함에 따라 다양한 조건에서 배터리의 특성 변화에 대해 이해하고, 최적의 조건에서 배터리 이용률 및 수명에 관하여 응용될 수 있을 것으로 보인다. 향후 연구에서는 전기화학적 분석을 통하여 온도가 배터리 충·방전에 미치는 영향과 수명 연장을 위해 온도 변동에 따른 충전 제어 알고리즘에 대하여 분석한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2016년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Standard for Personnel Protection Systems for Electric Vehicle Supply Circuits: General Requirements, UL Standard 2231-1-2002.
- [2] G. Y. Choe, J. S. Kim, B. K. Lee, C. Y. Won, and T. W. Lee, "A bidirectional battery charger for electric vehicles using photovoltaic PCS systems," Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, Sep. 2010.
- [3] G. Pellegrino, E. Armando, and P. Guglielmi, "An integral battery charger with power factor correction for electric scooter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 3, pp. 751-759, Mar. 2010.
- [4] J. M. Choi, B. J. Byen, Y. J. Lee, D. H. Han, H. S. Kho, and G. H. Choe, "Design of Leakage Inductance in Resonant DC-DC Converter for Electric Vehicle Charger," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 11, pp. 4417-4420, 2012.
- [5] J. Mullan, D. Harries, T. Braunl, and S. Whitely, "Modelling the impacts of electric vehicle recharging on the Western Australian electricity supply system," Energy Policy, vol. 39, pp. 4349-4359, May 2011.
- [6] D. H. Park, H. J. Kim and Y. S. Sun, "A Development of the off-line Active Clamp ZVS Forward Converter for Telecommunication Applications," IEEE INTELEC 1997, pp.

- 271-276.
- [7] B. R. Lin, H. K. Ciang, C. E. Huang, K. C. Chen and D. Wang, "Analysis of an Active Clamp Forward Converter," IEEE Power Electronics and Drives Systems, vol. 1, pp. 140-145, 2005.
- [8] T. K. Dong, A. Kirchev, F. Mattera, J. Kowal, and Y. Bultel, "Dynamic modeling of Li-ion Batteries using an equivalent electrical circuit," J. Electrochem. Soc., Vol. 158, No. 3, pp.A326-A336, Jan. 2011.
- [9] S. Buller, M. Thele, T. W. A. A. A. Doncker and E. Karden, "Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications," IEEE trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 3, pp. 742-747, May/June. 2005.

Biography



Min-Ho Shin

He received B.S. degree in electrical engineering from Hanyang cyber University, Seoul, Korea, in 2008, and the M.S. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2011 and 2013, where he is currently working toward the Ph.D. degree. His research interests include converters for EV.



Tae-Ho Eom

He received B.S. degree in electrical engineering from Soonchunhyang University, Choongchung, Korea, in 2013, where he is currently working toward the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, His research interests are converters for EV.



Jun-Mo Kim

He received B.S. degree in electronics engineering from namseoul University, Choongchung, Korea, in 2016. Where he is currently working toward the M.S. degrees. His research interests are converters for EV.



Jeong Lee

She received B.S. degree in electronics engineering from University of Science and Technology, Kyunggi, Korea, in 2016. Where She is currently working toward the M.S. degrees. Her research interests are converters for EV.



Sung-Hoon Kim

He received B.S. degree in electronics engineering from Kwangwoon University, seoul, Korea, in 2017. Where he is currently working toward the M.S. degrees. His research interests are converters for EV.



Yong-Seok Lee

He received B.S. degree in electronics engineering from Hoseo University, choong chung, Korea, in 2017. Where he is currently working toward the M.S. degrees. His research interests are converters for EV.



Jung-Hyo Lee

He received the B.S. degree in electrical engineering from Konkuk University, Seoul, Korea, in 2006, and the M.S. and the Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 2008 and 2013, respectively. From 2013, he has been a senior researcher of automotive component R&D Team in LG Innotek. From 2016, he has been an assistant professor in Electrical engineering department of Kunsan National University. His research interests include converters and inverters for motor drive application.



Chung-Yuen Won

He received B.S. degree in electrical Engineering from Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, in 1978, and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Seoul National University, Seoul, Korea, in 1980 and 1987, respectively. From 1990 to 1991, he was with the Department of Electrical Engineering, University of Tennessee, Knoxville, TN, USA as a Visiting Professor. Since 1988, he has been with a member of the faculty of Sungkyunkwan University, where he is a Professor in the College of Information and Communication Engineering; also, in 2008-2013, he was the director of Samsung Energy Power Research Center. He was the President of the Korean Institute of Power Electronics in 2010. Since 2016, he has been a director of the DC distribution research center. His current research interests include the power electronic of electric machines, electric / hybrid vehicle drives, power converters for renewable energy systems. He is a member of the Korea Institute of Power Electronics.