

초소형 전기차용 8kW 슈퍼커패시터 배터리팩을 위한 급속충전기 개발

김영규*¹, 김진우**¹, 박규오**², 최대영*², 강태창**³

Development of a Fast Charger for Micro-Electric Vehicles' 8-kW Supercapacitor Battery Pack

Young-Kyu Kim*¹, Jin Woo Kim**¹, Gyu O Park**², Daeyoung Choi*², and Tae Chang Kang**³

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 '국가혁신융복합단지지원 지역혁신클러스터육성(R&D)' 사업의 연구비지원(P0015321)으로 수행된 연구결과입니다

요 약

최근 슈퍼커패시터를 마이크로 모빌리티(Micro mobility)를 위한 주-배터리(Main battery)로 사용하려는 연구들이 진행되고 있다. 본 논문은 슈퍼커패시터 기반 배터리팩을 10분 이내에 90% 이상 충전할 수 있는 급속충전기를 목표로 개발하였다. 배터리팩의 총 용량은 8kWh이며 10S14P(10 series 14 parallel) 배터리 모듈 4 개가 직렬 및 병렬로 연결되어 있다. 급속충전기는 고속 충전을 구현하기 위해 슈퍼커패시터 병렬 라인 각각을 동시 충전하는 방식으로 설계되었으며, 이를 위해 총 40개의 충전 채널로 구성된다. 충전 채널 하나는 파워모듈 및 전류보드, 제어보드, 마이크로프로세서보드로 구성되며 최대 4.2V 300A 출력을 가진다. 충전 실험 결과 8kWh 슈퍼커패시터 배터리팩을 10분 이내 90% 이상 충전하였다.

Abstract

Recently, projects to employ supercapacitors as a main-battery of micro mobilities have been researched. This paper developed a fast charger for supercapacitor based battery packs. The goal of the charger is to charge more than ninety percent within ten minutes. The battery pack has 8 kWh for a total capacity. Four 10S14P (10 series 14 parallel) battery modules are connected in the battery pack by series and parallel formats. The fast charger builds to simultaneous charging to supercapacitors' each parallel line in the battery pack, and the charger consists of forty charging channels. Each charging channel contains a power module, two current boards, a control board, and a microprocessor board. The Charging channel has 4.2 V and 300 A to maximum output. As a result of the charging test, the fast charger makes an 8 kWh supercapacitor based battery pack to over ninety percent charge in under ten minutes.

Keywords

fast charger, supercapacitor, battery pack, e-mobility, micro EV

* 경북IT융합산업기술원 융합연구팀
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-8328-0671>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-7993-9947>
** (주)대류 개발팀(**³ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-4875-8833>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-7959-5224>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-3539-9133>

• Received: Nov. 10, 2022, Revised: Dec. 19, 2022, Accepted: Dec. 22 2022
• Corresponding Author: Tae Chang Kang
DAERYU Co., Ltd, 149-40, Yuram-ro, Dong-gu, Daegu, Republic of Korea
TEL: +82-53-591-4106, Email : tckang@bigwave.co.kr

1. 서 론

내연기관 자동차는 환경문제에서 자유롭지 못하다. 그림 1에서 보면 전 세계 이산화탄소(CO₂)발생량 중 화석연료 기반의 이동수단이 차지하는 비율은 2020년 기준 약 41%로 보고되었다. 이에 따라 화석연료기반 이동수단을 재생에너지 기반 이동수단으로 전환하려는 시도가 이루어지고 있으며, 전기차(EV, Electric Vehicle)는 온실가스감축을 위한 가장 효과적인 방안으로 고려되고 있다[1][2]. 우리나라 또한 2030년까지 300만대 전기차 누적보급을 목표로 다양한 정책을 통해 전기차 이용 확대에 노력하고 있다[3].

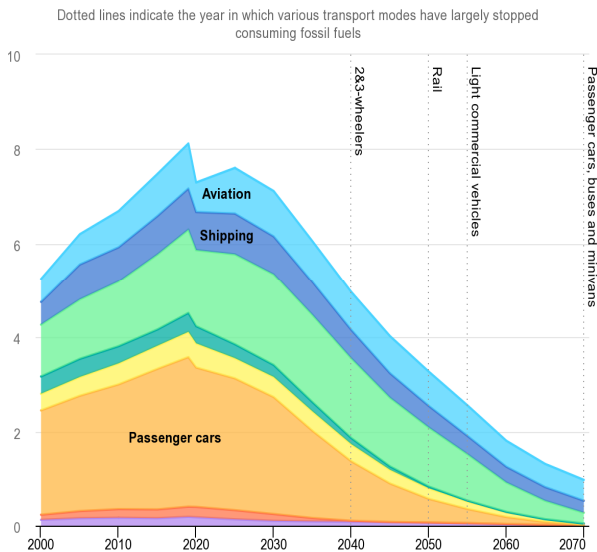


그림 1. 2000-2007 지속발전가능 시나리오에 따른 교통수단별 세계 CO₂ 생산량[1]

Fig. 1. Global CO₂ emissions in transport by mode in the sustainable development scenario, 2000-2070[1]

국토교통통계누리에 의하면 우리나라 전기차 보급대수는 2018년에 2.6천여 대에 불과했는데 2022년 7월에는 31.4천여 대로 보급되어 증가율이 1,088%, 약 12배 이상 성장하였다. 이는 같은 기간 휘발유 및 경유 내연자동차가 각각 15%, 2% 증가율을 기록한 것과 비교하면 전기차 증가율은 매우 높다 [4][5]. 하지만 전기차가 환경 친화적임에도 불구하고 제한된 주행거리와 매우 긴 충전시간은 소비자로 하여금 구매를 주저하게 만드는 치명적인 단점이다[6].

전기차의 단점을 극복할 수 있는 방안 중 하나로 급속충전기가 있다. 급속충전기는 완속충전기 보다 높은 전압과 전류를 전기차에 공급할 수 있기 때문에 충전 시간을 상당 시간 단축할 수 있는 충전기이다. 특히 최근에는 배터리 가격 하락 및 에너지 밀도 증대에 따라 소비자들의 전기차 배터리 용량 및 운행거리에 대한 기대 또한 높아지고 있으며, 이로 인해 고효율 급속충전기에 대한 요구가 더욱 높아지고 있는 추세이다[6][7].

미래 교통은 출발지에서 목적지까지 단 하나의 교통수단을 이용하지 않고 다양한 종류의 수단을 이용하는 허브 앤 스포크(Hub&spoke) 방식이 될 것이라 예견한다[8]. 다양한 교통수단 중 최하위 이동은 도심 내부의 이동에 해당되며, 최하위 모빌리티는 친환경성 및 경제성을 갖춘 적정 속도의 초소형 전기차(Micro-electric vehicles)가 중심이 될 것으로 보고 있다[9]. 초소형 전기차는 승용기준 공차중량 600Kg 이하, 모터 정격 출력 15kW 이하인 전기차이다. 초소형 전기차는 개인 운송 수단 뿐만 아니라 물류 분야에서도 각광받고 있으며, 공유형 서비스를 통한 공유 교통수단으로 이용하려는 연구가 주목받고 있다[10]. 하지만 초소형 전기차 역시 주행거리에서 자유로울 수 없다.

공차중량 제한을 받는 초소형 전기차는 배터리 용량을 늘리는데 한계가 있으며, 초소형 전기차의 원활한 도심 운행을 위해서는 급속충전기의 보급이 무엇보다 중요하다. 하지만 최근 보급되고 있는 초소형 전기차 대부분은 완속충전기에 의존하여 배터리를 충전하며 급속충전을 할 수 없다. 또한 초소형 전기차를 위한 급속충전기의 보급 사례는 찾아보기 힘들다[6]-[8]. 이에 본 논문은 초소형 전기차를 위한 급속충전기를 설계하고 구현하였다. 본 논문의 급속충전기는 8kW 배터리팩을 10분 이내에 90% 이상 충전하는 것을 목표로 구현하였다.

본 논문의 2장에서는 급속충전기의 주요 회로들을 설명하고 제작한 충전기 부품들의 설계도면을 제시한다. 3장에서는 실제 구현된 급속충전기의 각 채널과 급속충전기 실물 사진들을 보이고 충전 실험 결과를 통한 충전기 성능을 제시한다. 4장에서는 본 논문의 결론을 서술한다.

II. 급속충전기 설계

2.1 배터리팩

본 논문에서 사용하는 배터리팩은 슈퍼커패시터(Supercapacitor) 기반 배터리팩으로서 초소형 자동차용으로 개발된 것이다[11]. 배터리팩은 그림 2와 같이 총 4개의 배터리 모듈이 2S2P(2 series 2 parallel) 구조로 연결되어 있으며, 배터리 모듈 각각의 셀(cell)들 간 토폴로지(Topology)는 그림 3과 같다.

슈퍼커패시터 셀 하나의 전기적 특성은 약 4.2V 3.57Ah이다. 배터리 모듈 하나는 그림 3과 같이 10S14P 토폴로지로 구성되어 있기 때문에 약 42V, 50Ah의 전기적 특성을 가진다.

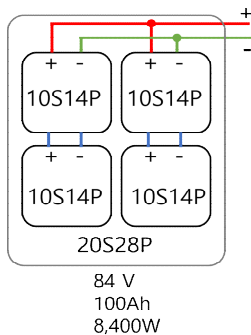
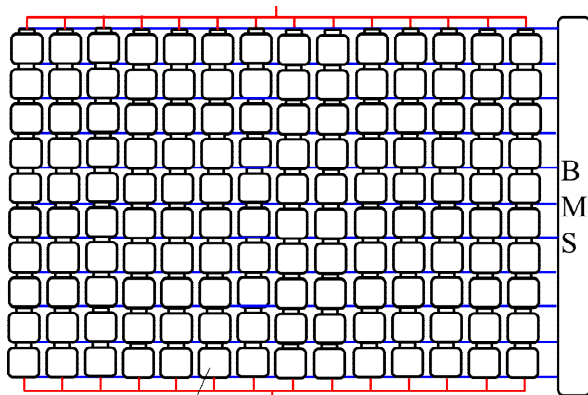


그림 2. 슈퍼커패시터 기반 배터리팩 구조
Fig. 2. Structure of a battery pack based on supercapacitors



Super capacitor 10S14P = 42 V
4.2 V, 3.57 Ah 49.98 ≈ 50 Ah

그림 3. 슈퍼커패시터 배터리 모듈 토폴로지
Fig. 3. Topology of a battery module based on supercapacitors

그림 4는 구현된 배터리 모듈의 PCB(Printed Circuit Board) 설계도면이다. 따라서 배터리팩 하나는 약 84V, 100Ah의 전기적 특성을 가지며 약 8kWh의 용량을 가지게 된다.

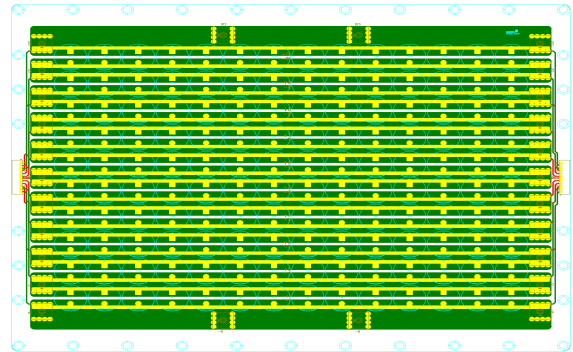


그림 4. 배터리 모듈 PCB 설계도면
Fig. 4. PCB artwork for the battery module

2.2 급속충전기 전류제어 회로

본 논문에서 구현하는 급속충전기는 10분에 90% 이상 충전 목표를 달성하기 위해 라인(Line) 당 충전 방식을 취하였다. 배터리 팩은 총 4개의 모듈로 구성되어 있고, 배터리 모듈 각각은 총 10개의 라인을 가지기 때문에 구현된 급속충전기는 그림 5와 같이 총 40개의 충전채널(Channel)을 가진다. 배터리 라인 하나는 슈퍼커패시터 14개가 병렬로 연결되어 있으므로 약 4.2V, 50Ah가 되며, 충전 채널 하나는 6C 충전이 가능한 4.2V, 300A의 출력 특성을 가진다.

각 채널은 정전류 충전 방식(Constant current mode)을 사용하며 전류제어를 위한 회로는 그림 6과 같다. 그림 6의 회로는 정전류를 안정적으로 보정해주는 기능을 수행하는데, SET_C 포트(Port)에 입력되는 전압 값을 DAC(Digital to Analog Converter)를 통해 제어하여 FET(Field Effect Transistor)의 소스(Source)와 드레인(Drain)에 흐르는 전류를 안정적으로 유지한다. 하지만 FET 하나가 허용하는 전류만으로는 10분 급속 충전에 필요한 크기의 전류를 얻을 수 없기 때문에 그림 6의 회로를 32개 병렬로 연결하여 300A 전류를 출력할 수 있는 전류보드를 구현하였다. 제작한 전류보드의 PCB 설계도면은 그림 7과 같다.

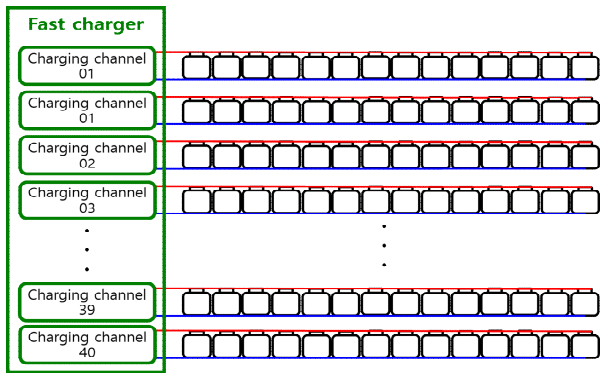


그림 5. 급속충전기 채널
Fig. 5. Channels in the fast charger

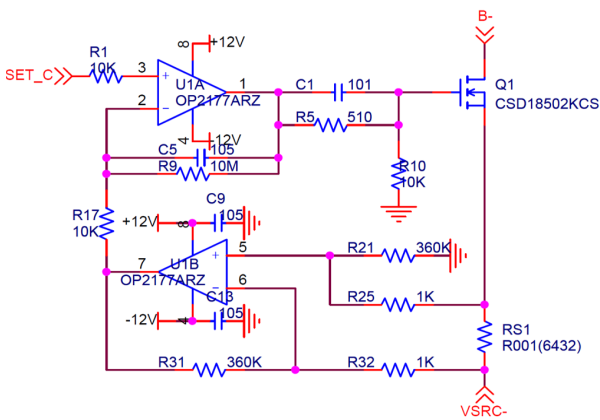


그림 6. 급속충전기 전류 제어 회로
Fig. 6. Circuit of the current control for the fast charger

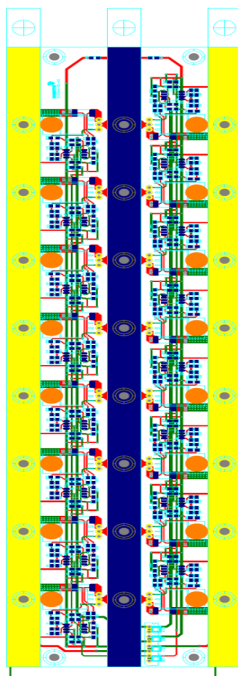


그림 7. 전류보드의 PCB 설계도면
Fig. 7. PCB artwork for the current board

전류 제어를 위한 회로 외에, 충전기 출력 전압 및 배터리의 상태를 검사하기 위한 증폭기 회로 및 ADC 회로 등을 설계하여 제어보드를 제작하였으며, BMS(Battery Management System)와의 RS-485통신, 충전 상황의 복잡한 조건들은 마이크로프로세서(Micro-processor) 및 펌웨어(Firmware)를 이용해 처리하였다. 제어보드의 PCB 설계도면은 그림 8과 같으며, 마이크로프로세서 주변 회로는 제어보드와 결합할 수 있게 별도의 보드로 제작하였으며 PCB 설계도면은 그림 9와 같다.

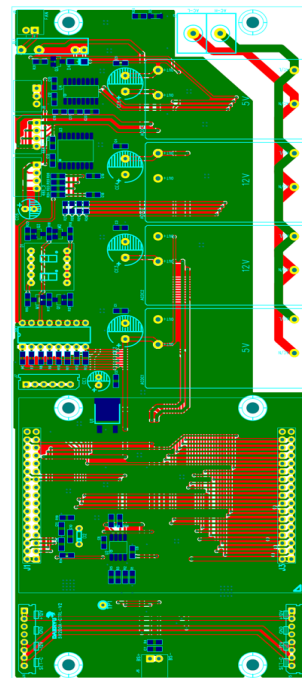


그림 8. 제어보드의 PCB 설계도면
Fig. 8. PCB artwork for the control board

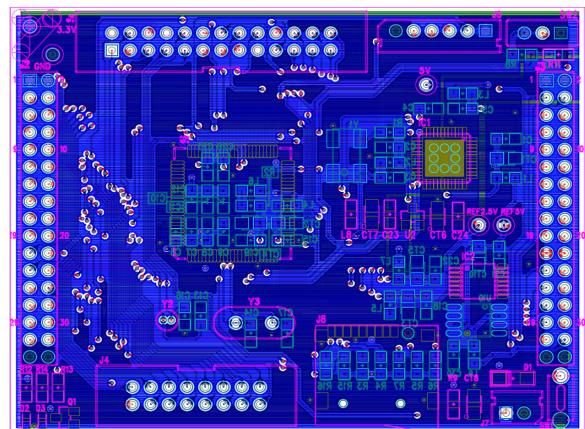


그림 9. 마이크로프로세서보드의 PCB 설계도면
Fig. 9. PCB artwork for the micro-processor board

기존 급속 충전기들은 정전류 방식과 정전압 방식(Constant voltage mode)을 혼용하여 사용하는 것이 일반적이다[12]. 하지만 정전압 방식은 충전 속도가 느리기 때문에 본 논문은 정전류 방식만을 사용하였다. 정전류 방식의 가장 큰 문제는 충전이 완료되어 가는 시점에서 과전압으로 인해 발생하는 심각한 발열 증상이다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 충전의 마지막 단계에서 SET_C 포트를 제어하여 충전 전압을 스위칭(Switching)하는 방식으로 발열을 해결하였다.

III. 급속충전기 제작 및 성능

3.1 슈퍼커패시터 배터리팩 구현

그림 10은 앞장에서 설명했던 8kW 슈퍼커패시터 배터리팩이다. 슈퍼커패시터는 리튬배터리와 달리 양극(+)과 음극(-)이 셀의 한 면에 함께 있다. 따라서 PCB 설계 및 배터리팩 배선 작업은 단순해지는 장점이 있지만 모듈들을 케이스에 적재 시 PCB 들간의 합선에 주의해야 한다. 그림 10은 배터리팩 케이스에 4개의 모듈이 절연소재로 절연되어 삽입되어 있는 사진이며 각 라인마다 충전을 위한 케이블이 외부 커넥터에 연결되어 있는 모습이다. 각 라인의 충전 케이블은 이론적으로 두 가닥이면 되지만, 충전 전류와 케이블의 전기적 특성을 고려해서, 20가닥의 전선을 14개 셀 사이사이에 일정한 간격으로 연결해 두었고, 접지(GND) 선도 같은 방식으로 외부 커넥터와 연결하였다.



그림 10. 슈퍼커패시터 배터리팩
Fig. 10. Supercapacitor battery pack

3.2 급속충전기 채널 구현

전류보드는 앞서 설명한 바와 같이, 총 300A의 전류를 제어해야 한다. 전류보드의 전류제어회로에 사용된 FET 하나가 제어할 수 있는 최대 전류는 약 10A이기 때문에, 안정성을 위한 여유 값을 고려하여 총 32개의 전류제어회로를 병렬로 연결하여 300A 전류 제어를 가능하게 만들었다. 따라서 급속 충전기 채널의 구조와 트랜지스터 방열을 고려하여, 하나의 전류보드에 16개의 전류제어회로를 담았으며, 채널당 전류보드 2개를 병렬로 연결하여 사용하였다. 전류보드는 그림 11과 같이 방열 구조물 양측에 결속시켜 발열현상을 완화시켰다.



그림 11. 전류보드 및 급속충전기 채널
Fig. 11. Current board and a channel of the fast charger

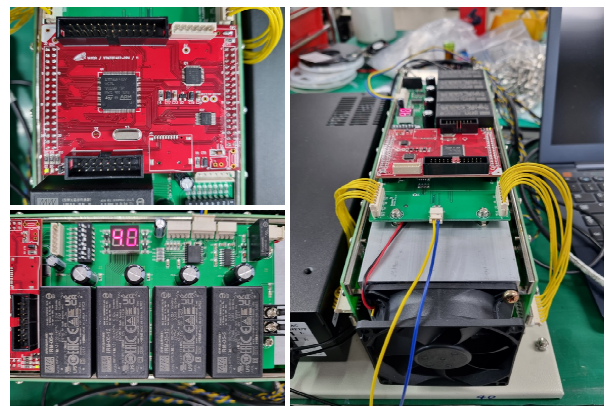


그림 12. 제어보드 및 급속충전기 채널
Fig. 12. Control board and a channel of the fast charger

그림 12는 마이크로프로세서보드와 제어보드, 그리고 채널에 조립되어 있는 제어보드 전체에 대한 사진이다. 마이크로프로세서 보드는 펌웨어 설계 및 유지보수, 그리고 PCB 설계의 간결함을 위해 별도의 보드로 제작하였고, 소켓(Socket)을 사용하여 제어보드에 조립할 수 있게 만들었다. 제어보드에는 동일한 두 개의 커넥터가 있으며, 두 개의 전류보드 각각에 연결되어 전원 및 제어 신호를 보낸다.



그림 13. 급속충전기 채널
Fig. 13. Channel of the fast charger

그림 13은 완성된 급속충전기 채널의 실물 사진으로서, 하나의 채널은 전류보드 2개, 제어보드 1개, 그리고 별도로 제작된 파워모듈 1개로 구성된다. 전류보드의 발열을 완화하기 위해 방열 구조물에 전류보드 2개, 제어 보드 1개가 결합되고, 방열 구조물은 팬(fan)으로 방열 효율을 향상시켰다. 전류보드 2개는 그림 13과 같이 서로 병렬 연결되어 있다. 배터리팩의 양극 단자는 채널의 파워모듈과 직접 연결된다. 반면, 배터리팩은 음극 단자는 채널의 전류 보드를 거쳐서 파워모듈과 연결된다. 따라서 전류 보드는 FET를 통해 배터리팩의 음극단자에 흐르는 전류를 제어하여 정전류 방식 충전을 수행한다.

3.3 급속충전기 구현 및 충전 성능

그림 14는 본 논문에서 구현한 급속충전기의 실물 사진이다. 급속충전기의 구조와 내부를 보이기 위해 덮개는 개방한 상태이며, 40개의 채널이 충전기 내부 선반에 장착되어 있다. 앞장에서 설명한 바와 같이, 충전기의 채널 각각은 배터리팩의 병렬 라인 각각과 연결되어 40 라인을 동시 충전 가능하며, 각 라인에 대한 독립적인 충전 관리가 이루어진다.



그림 14. 급속충전기 구현
Fig. 14. Implementation of the fast charger

구현한 급속충전기의 기능 검증 및 목표했던 10분 충전 달성을 위해 제작한 슈퍼커패시터 배터리팩을 이용하여 급속충전 실험을 실시하였다. 실험결과, 40개 라인 모두에서 10분 이내 90% 이상 충전이 완료되는 것을 확인 할 수 있었다. 40개 채널 각각의 충전시간 차이는 있었지만, 셀들의 상태에서 오는 차이 일뿐 의미 있는 차이점은 발견할 수 없었다.

그림 15는 급속충전기 1번 채널의 충전 상태를 1초 단위로 기록한 실험 결과이다. 그래프의 약 350 초를 경과하는 부분에서 정전류 충전방식의 발열문제를 완화하기 위해 충전 전압을 스위칭하면서 충전을 완료하는 것을 확인 할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 과제

초소형 전기차에 대한 사회적 기대가 증가하고 보급율도 가파르게 증가하고 있지만 충전 인프라는 부족한 실정이다.

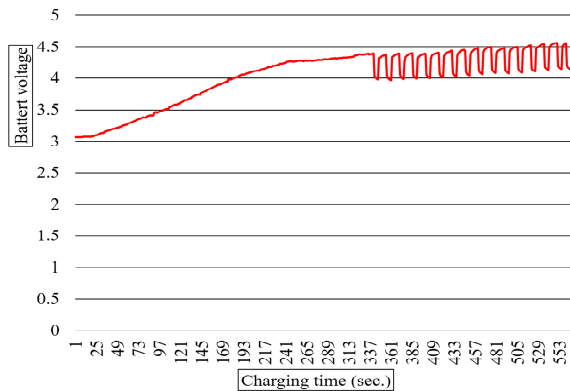


그림 15. 충전실험 결과

Fig. 15. Result of the charging test

이에 본 논문에서는 초소형 전기차용으로 제작된 슈퍼커패시터 기반 배터리팩을 10분 이내 90% 이상 급속 충전하는 것을 목표로 급속충전기를 설계하고 제작하였다. 제작된 급속충전기는 배터리팩의 토폴로지에 맞게 총 40개의 충전 채널을 가지고 있으며, 슈퍼커패시터 병렬라인 각각을 동시에 충전하면서 각각을 모니터링 및 관리할 수 있다. 충전 실험 결과, 40개 모든 채널에서 10분 이내 90% 충전을 달성하였으며, 그 중 하나의 채널에 대해 기록된 충전 상태 및 결과를 제시하였다. 이러한 연구결과들이 초소형 자동차의 급속충전 환경 개선에 크게 기여할 수 있기를 기대한다.

References

- [1] Global CO₂ emissions in transport by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2070, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-in-transport-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2070>. [accessed: Dec. 22, 2022]
- [2] H. Sim, "Optimal Location of Public Fast Chargers for Electric Vehicle Supply in Seoul", *Journal of Climate Change Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 511-523, Jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.4.511>.
- [3] J. B. Yang, S. K. Kim, and G. B. Park, "A Study of EV Fast Charging Station on Highway", 2021 Fall Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Jul. 2021.
- [4] Total Registered Moter Vehicles(2018/1~2022/7), <https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&hFormId=5>. [accessed: Dec. 22, 2022]
- [5] B. Kim, G. W. Ahn, and H. C. Shin, "A Profitability Analysis to Promote Private Investment in Charging Infrastructure for Electric Vehicles", *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 40, No. 5, pp. 656-668, Oct. 2022. <https://doi.org/10.7470/jkst.2022.40.5.656>.
- [6] J. Park, Y. Jeon, J. Na, S. Cho, Y. Shin, W. Shin, and J. H. Kim, "Development of High Efficiency Power Module for Electric Vehicle Charger", *Transaction of The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 30, No. 10, pp. 785-792, Oct. 2022. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2022.30.10.785>.
- [7] S. S. Jeon and K. B. Lee, "Development and Introduction of the Electric Vehicle Fast Charger using a Power Electronics Technology", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 69, No. 5, pp. 10-15, May 2020.
- [8] P. C. Schuur and C. N. Kellermann, "Improving Transport Logistics by Aligning Long Combination Vehicles via Mobile Hub & Spoke Systems", *Logistics* 2022, Vol. 6, No. 8, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/logistics6010018>.
- [9] Y. S. Son, "Micro Electric Vehicle System", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 26, No. 5, pp. 34-38, Aug. 2021.
- [10] H. S. Lee, J. H. Kim, S. J. Seo, and M. A. Sim, "Study of Intention to Use by Satisfaction Level of Service Distinction on Shared Autonomous Vehicle", *The 86th Conference of Korean Society of Transportation*, Apr. 2022.
- [11] Y. K. Kim, S. W. Jung, J. W. Kim, G. O. Oark, T. C. Kang, J. E. Kim, and D. N. Kim, "Implementation of Super-Capacitors based a Battery Pack for E-Mobility", *Journal of Korean Institute Information Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 57-65, Mar. 2022.

[12] W. Shen, A. Kapoor, and T. T. Vo, "Charging algorithms of Lithium-ion Batteries: An Overview", IEEE Conference on Industrial Electronics and Application 2012, Singapore, Jul. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6360973>.

저자소개

김 영 규 (Young-Kyu Kim)



2005년 2월 : 경주대학교
전자공학과(공학사)
2011년 2월 : 경북대학교
모바일통신공학과(공학석사)
2016년 8월 : 경북대학교
전자공학부(공학박사)
2020년 ~ 현재 : (재)경북IT융합

산업기술원 선임연구원
관심분야 : SoC, 컴퓨터 아키텍처, 슈퍼컴퓨터, 드론

김 진 우 (Jin Woo Kim)



2003년 2월 : 동양대학교
전자공학과(공학사)
2019년 2월 : 경일대학교
메카트로닉스공학과(공학석사)
2004년 7월 ~ 현재 : ㈜대류
개발2팀 부장
관심분야 : 2차 전지, ESS,

연료전지

박 규 오 (Gyu O Park)



2008년 2월 : 대구카톨릭대학교
로봇응용학과(공학사)
2019년 2월 : 경일대학교
메카트로닉스공학과(공학석사)
2014년 6월 ~ 현재 : ㈜대류
개발2팀 차장
관심분야 : 배터리 충전 시스템

최 대 영 (Daeyoung Choi)



2014년 2월 : 영남대학교
생명공학부(공학사)
2018년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학석사)
2020년 ~ 현재 : (재)경북IT융합
산업기술원 연구원
2021년 9월 ~ 현재 : 경북대학교

전자공학부 박사과정
관심분야 : 컴퓨터 비전, 머신러닝

강 태 창 (Tae Chang Kang)



1988년 2월 : 대구미래대
전자계산학(전문학사)
2000년 1월 : 대류정보통신 대표
2010년 4월 ~ 현재 : ㈜대류
대표이사
관심분야 : 2차 전지, 측정 및 계측
기술, 메카트로닉스