

연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 알고리즘에 관한 연구

이예빈, 이민행, 정재범, 광춘근, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:yeab10@koreatech.ac.kr

An Operation Algorithm of the Hybrid Electric Wheelchair Using Lead-acid Battery and Super Capacitor

Ye-Bin Lee, Min-Haeng Lee, Jae-Beom Jung, Chung-Guen Kwak, Dea-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

최근, 인구 고령화에 따른 교통 약자가 증가로 인하여, 이동의 편리성 향상을 위해 전동 휠체어의 보급이 가속화되고 있다. 일반적으로 전동 휠체어는 연축전지를 사용하며, 순간적인 고출력, 시동 꺼짐, 방지턱 걸림, 등과 같은 문제점으로 인하여, 이용자들의 안전성과 연축전지의 수명에 악영향을 미치고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안으로 수명과 출력 특성이 우수한 리튬이온전지가 주목받고 있지만, 국민건강보험공단에서 지급하는 노약자 및 장애인 보조기기 급여 지원에서 안전상의 이유로 제외되고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 기존에 사용되는 연축전지와 출력특성이 우수한 슈퍼커패시터를 결합한 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 알고리즘을 제안하고, 배터리부, 제어장치부, 부하장치부로 구성된 하이브리드형 전동 휠체어를 구현한다. 이를 바탕으로 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성을 분석한 결과, 고출력 상황에서 출력 특성이 우수한 슈퍼커패시터를 사용해 하이브리드형 전동 휠체어를 구동시켜, 기존의 방식보다 높은 c-rate의 전류로 전동 휠체어를 동작시킬 수 있음을 알 수 있고, 연축전지에서 높은 c-rate의 전류의 방전을 방지할 수 있어, 연축전지의 수명 및 전동 휠체어 이용자의 안전성을 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 인구 고령화 추세에 따른 후천적 교통 약자가 증가하고 있으며, 이에 따라 노약자와 장애인의 이동 편리성이 주목받으면서 전동 휠체어의 보급 및 보험 급여 건수가 지속적으로 증가하고 있다[1]. 전동 휠체어는 교통 약자의 이동성 향상의 목적으로 많이 이용되고, 이용자의 안전 우선으로 한다. 높은 에너지 저장 능력, 긴 수명 등의 특성을 가진 리튬이온전지는 화재 안전상의 이유로 국민건강보험공단에서 지급하는 노약자 및 장애인 보조기기 급여 지원에서 제외되며, 일반적으로 전동 휠체어 제품 모두 연축전지를 이용하도록 규정된다. 하지만, 연축전지는 높은 c-rate로 출력하는 경우, 방지턱 걸림, 경사 이동 시 정지 등의 문제점 발생하고, 연축전지의 수명에 악영향을 미쳐 전동 휠체어의 배터리 교체 주기 단축시킨다. 국가에서 지원하는 배터리 교체 지원 보험 급여는 1년 6개월 주기로 수령 가능하지만, 전동 휠체어 사용자의 대부분은 1년 주기로 배터리 교체하며, 교체 비용에 부담을 느끼는 이용자가 다수 존재한다.

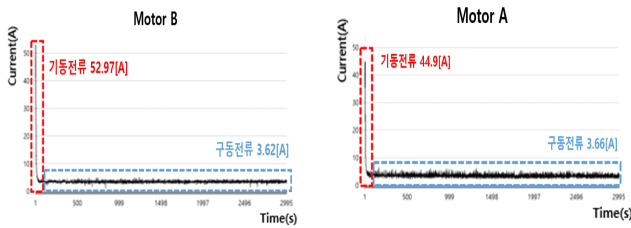
따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 연축전지와 슈퍼커패시터의 c-rate 별 방전 특성 시험을 진

행하며, 배터리 전환 기준전류를 선정하고, 연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 알고리즘을 제안하고, 배터리부, 제어장치부, 부하장치부로 구성된 하이브리드형 전동 휠체어를 구현한다. 연축전지의 방전전류가 기준전류 이상인 경우, 릴레이 제어를 통해 전동 휠체어의 전원이 연축전지에서 슈퍼커패시터로 전환되어 운용해 연축전지에서 높은 c-rate의 전류를 방전하는 것을 방지할 수 있다. 따라서, 하이브리드형 시스템의 운용 특성을 분석한 결과 전동 휠체어용 연축전지의 수명 및 이용자의 안전성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

2. 전동 휠체어의 사고사례 및 운용 특성

한국소비자원이 조사한 전동 휠체어의 사고사례는 턱, 장애물 등에 걸림 사고가 41.2[%]로 가장 많은 것을 알 수 있고, 지면 상태에 따른 사고사례이며 경사면에서 41.2[%]로 가장 많은 것을 알 수 있다[1-2]. 따라서, 전동 휠체어의 사고는 턱 걸림 또는 경사면 및 고르지 못한 지형, 등과 같이 고출력이 필요한 경우에 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, 전동 휠체어 모터의 전류는 그림 1과 같이 기동전류와 구동전류로 구성된

다. 여기서, A 모터의 기동전류는 그림 1의 (a)와 같이 평균 구동전류 3.66[A]보다 12배 큰 44.9[A]이고, B 모터의 기동전류는 그림 1의 (b)와 같이 평균 구동전류 3.62[A]보다 14배 큰 52.97[A]임을 알 수 있다. 즉, 전동 휠체어는 턱 걸림, 경사면 이동 등과 같이 순간적인 고출력이 필요로 하는 경우 사고가 발생하고, 연축전지의 효율과 수명에 악영향을 준다. 따라서, 본 논문에서는 연축전지를 사용한 전동 휠체어의 안전성 및 출력 특성 향상을 위해 수명과 출력 특성이 우수한 슈퍼커패시터와 연축전지를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어를 제안한다.

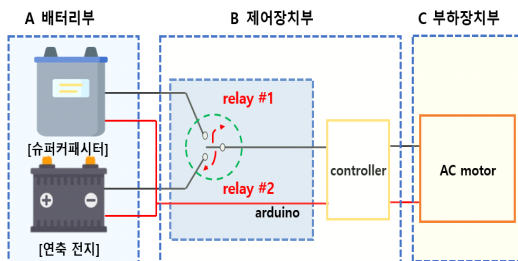


(a) 모터 A의 전류 특성 (b) 모터 B의 전류 특성
[그림 1] 전동 휠체어 모터의 전류 특성

3. 연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 알고리즘

3.1 하이브리드형 전동 휠체어의 구성

연축전지 사용 시 나타나는 전동 휠체어의 문제점들을 해결하기 위하여, 본 논문에서 제안한 연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드 운용 시스템은 그림 2와 같이 배터리부, 제어장치부, 부하장치부로 구성된다. 또한, 일반적인 출력이 발생하는 경우, 하이브리드형 전동 휠체어는 relay 2에 의해 연축전지가 방전되며, 고출력이 필요한 상황에서는 relay 1에 의해 슈퍼커패시터가 방전된다. 이때, relay 1과 relay 2는 아두이노 S/W에 의한 인터록 동작으로 동시에 동작하지 않도록 구성한다.



[그림 2] 하이브리드형 전동 휠체어의 구성도

3.2 하이브리드 시스템의 운용 알고리즘

[Step 1] 초기조건으로 부하장치의 최소동작전압과 기준전류

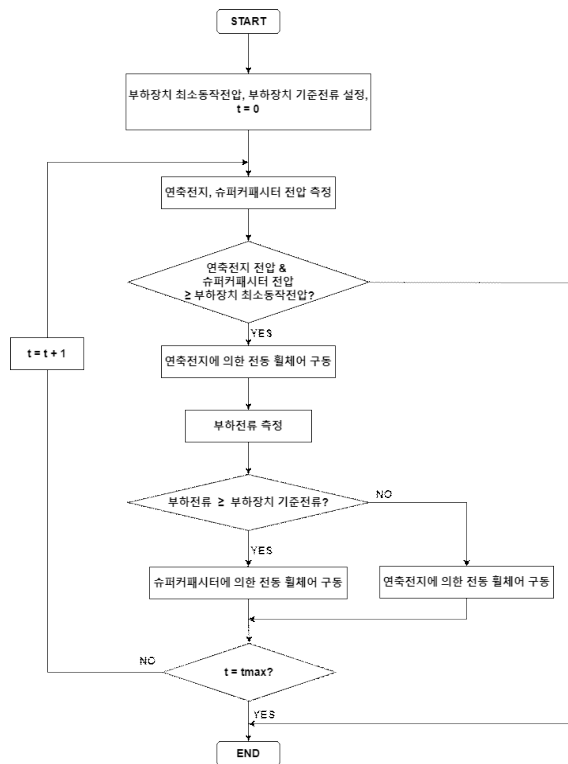
를 선정하고, 측정 시간대 t 를 초기값으로 설정한다.
[Step 2] t 시간대에 대하여, 연축전지와 슈퍼커패시터의 전압을 측정하고, 부하장치의 최소동작전압 이상인지 판단한다.

[Step 3] 배터리의 전압이 모두 부하장치의 최소동작전압 이상인 경우, 연축전지를 사용해 전동휠체어를 구동시킨다.

[step 4] 부하전류가 부하장치의 기준전류 이상인 경우, 슈퍼커패시터를 사용해 전동 휠체어를 구동한다. 한편, 부하전류가 기준전류 미만인 경우, 연축전지를 사용해 전동 휠체어를 구동한다.

[Step 5] 연축전지와 슈퍼커패시터의 전압이 모두 부하장치의 최소동작전압 이상이고, t 가 t_{max} 가 아닌 경우, [step 2]로 돌아간다. 한편, 연축전지와 슈퍼커패시터의 전압이 모두 부하장치의 최소동작전압 미만인 경우, 회로를 차단시킨다.

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 그림 3과 같다.

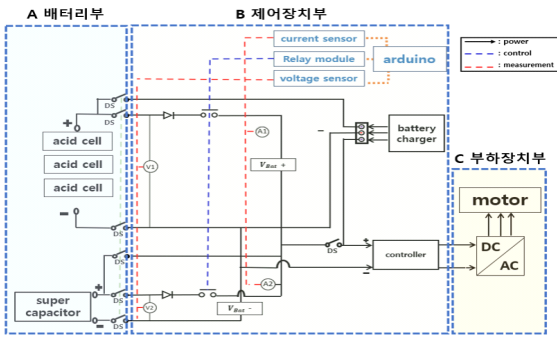


[그림 3] 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 알고리즘

4. 연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 전동 휠체어의 구현

4.1 H/W 장치 구현

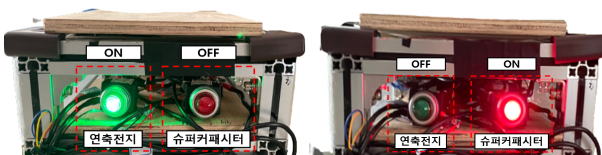
연축전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어는 H/W와 S/W로 구성되는데, 먼저 H/W 장치는 그림 4와 같이 배터리부, 제어장치부, 부하장치부로 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리부는 연축전지와 슈퍼커패시터를 비롯하여, 비상 상황 시에 회로를 차단할 수 있는 차단기 등으로 구성되며, 제어장치부는 아두이노 메가, 전류센서, 전압센서, 릴레이, 다이오드, controller 등으로 구성된다. 즉, 아두이노 메가는 전압, 전류센서에 의해 측정된 전동 휠체어의 전압, 전류값을 비교한 후 신호를 릴레이에 송신하고, 릴레이는 전압 및 전류 상황에 따라 연축전지와 슈퍼커패시터를 동작시킨다. 또한, 다이오드는 연축전지와 슈퍼커패시터를 순간적으로 전환시킬 경우, 의도하지 않은 에너지 흐름을 방지하기 위하여 사용한다. 한편, 부하장치부는 전동 휠체어의 구동 전력으로, DC/AC 인버터와 모터 등으로 구성된다.



[그림 4] 하이브리드형 전동 휠체어의 회로도

4.2 S/W 장치 구현

하이브리드형 배터리를 이용한 제어 기능을 수행하기 위하여, 전동 휠체어의 S/W 장치는 아두이노를 이용하여 구현한다. 구체적으로, 연축전지와 슈퍼커패시터의 전압을 측정하여, 부하최소 동작전압 이상인지 평가하고, 전동 휠체어를 구동시키는 배터리의 전압이 부하최소 동작전압 이하인 경우 회로를 차단한다. 또한, 부하장치부가 고출력을 필요로 하는 경우, 연축전지에서 슈퍼커패시터로 전환하여 전동 휠체어를 구동한다. 한편, 아두이노 S/W에 의한 릴레이 제어를 통하여, 하이브리드형 시스템의 배터리 전환은 그림 5와 같이 파일럿 램프를 사용해 시각적으로 확인할 수 있다. 여기서, 그림 5의 (a)는 연축전지의 동작 상태, 그림 5의 (b)는 슈퍼커패시터의 사용 상태를 나타낸다.



(a) 연축전지 (b) 슈퍼커패시터

[그림 5] 배터리 전환 상태 확인 램프

5. 시험결과 및 분석

5.1 시험 조건

본 논문에서 제안한 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성을 분석하기 위한 시험 조건을 나타내면 표 1과 같다. 여기서, 연축전지의 정격전압은 12[V], 정격용량은 24[Ah]이고, 슈퍼커패시터의 정격전압은 32.4[V], 정격용량은 1.124[Ah]이다. 또한, 각 배터리의 특성을 평가하기 위한 방전 시험은 제조사에서 제공한 중지전압까지 방전시키며, 연축전지는 0.2, 0.5[c], 슈퍼커패시터는 0.5, 1, 2[c]의 조건으로 방전 시험을 수행한다. 한편, 하이브리드형 전동 휠체어의 배터리 전환 기준전류는 4.8[A]이며, 연축전지 및 슈퍼커패시터는 각각 3s1p, 1s1p로 구성한다.

[표 1] 시험 조건

| 항목 | 내용 | | |
|-----------|------------------------|--------------|--------------------------|
| 배터리 사양 | 연축전지 | 공칭전압 | 12V |
| | | 중지전압 | 10.5V |
| | | 정격용량 | 24Ah |
| | 슈퍼커패시터 | 정격전압 | 32.4V |
| | | 중지전압 | 0.8V |
| | | 정격전력량 | 36.5Wh |
| 배터리 방전 시험 | 연축전지 | 방전 중지 전압 | 10.5V |
| | | 방전 C-rate | 0.2C 0.5C |
| | 슈퍼커패시터 | 방전 중지전압 | 0.8V |
| | | 방전 C-rate | 0.5C 1C 2C |
| | 하이브리드형 전동 휠체어 운용 특성 시험 | 배터리 전환 기준 전류 | 4.8A |
| | | 배터리의 결선 방식 | 연축전지 3S1P 슈퍼커패시터 1S1P |

5.2 연축전지와 슈퍼커패시터의 c-rate별 방전 특성

상기에서 제시한 5.1절의 시험 조건을 바탕으로 연축전지의 방전 특성을 분석하면 표 2와 같다. 여기서, 연축전지의 전류 및 전력 효율은 C-rate가 0.2에서 0.5로 증가함에 따라 각각 88.8[%]에서 77.2[%], 77.3[%]에서 66.1[%]로 감소하며, c-rate가 증가할수록 전류 및 전력 효율이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

[표 2] c-rate 별 연축전지의 방전용량 및 효율

| c-rate[c] | 방전용량 [Ah] | 전류효율 [%] | 방전전력량 [Wh] | 전력효율 [%] |
|-----------|-----------|----------|------------|----------|
| 0.2 | 18.52 | 88.8 | 218.56 | 77.3 |
| 0.5 | 16.10 | 77.3 | 186.9 | 66.1 |

한편, 슈퍼커패시터의 방전 특성을 나타내면 표 3과 같다.

여기서, 여기서, 슈퍼커패시터의 c-rate가 0.5[c]에서 2[c]로 증가하는 경우, 전류 및 전력 효율은 각각 99.95[%]에서 99.66[%], 99.73[%]에서 99.13[%]로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 슈퍼커패시터는 방전전류의 c-rate가 증가해도 전류 효율 및 전력효율의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

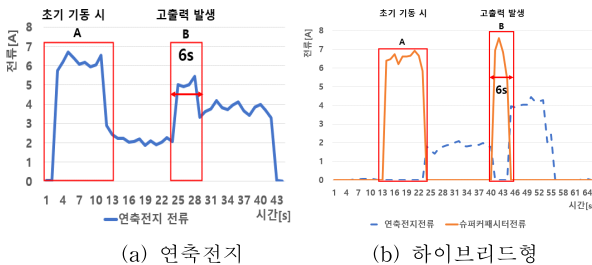
[표 3] c-rate 별 슈퍼커패시터의 방전용량 및 효율

| c-rate[c] | 방전용량 [Ah] | 전류효율 [%] | 방전전력량 [Wh] | 전력효율 [%] |
|-----------|-----------|----------|------------|----------|
| 0.5 | 1.125 | 99.95 | 38.48 | 99.63 |
| 1 | 1.123 | 99.86 | 38.4 | 99.30 |
| 2 | 1.12 | 99.66 | 38.3 | 99.13 |

따라서, 연속전지는 c-rate의 변화에 따른 효율의 변화가 큰 것을 알 수 있어, 배터리 전환 전류는 연속전지의 전류를 기준으로 표준 방전율인 0.2[c]를 배터리 전환 기준전류로 상정하여, 연속전지의 전류가 4.8[A] 이상인 경우, 슈퍼커패시터로 전환되어 전동 휠체어를 운용한다.

5.3 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성

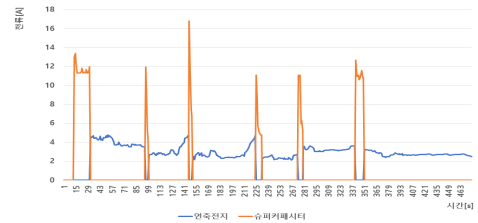
기존의 연속전지를 사용한 전동 휠체어와 하이브리드형 전동 휠체어의 전류 특성은 각각 그림 6의 (a), 그림 6의 (b)와 같다. 여기서, A 구간은 초기 기동 상황으로, 연속전지를 사용하는 경우 6.2[A], 하이브리드형 시스템의 경우 6.7[A]의 기동전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, B 구간은 고출력 발생 상황으로, 연속전지를 사용하는 경우는 5.5[A], 하이브리드형 시스템을 통해 운용하는 경우는 최대 7.6[A]의 전류가 방전되는 것을 알 수 있다. 따라서, 하이브리드형 시스템으로 구동하는 경우, 전동 휠체어의 운용 배터리가 슈퍼커패시터로 전환되는 것을 알 수 있다. 즉, 고출력을 필요로 하는 경우 본 논문에서 제안한 전동 휠체어가 기존 방식의 보다 동일한 경사면에서 동일한 시간동안 46[%] 증가된 고출력을 낼 수 있어, 이용자들의 안전성을 높일 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 전동 휠체어의 전류 특성

한편, 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 이 그림에서와 같이, 연속전지는 전동 휠체어 운용 시간의 90[%] 정도를 담당하며, 순간적으로 고출력이 발생하는 경우, 릴레이에 의해 슈퍼커패시터로 전환되어 전

체 운용 시간의 10[%] 정도 담당하는 것을 알 수 있다. 따라서, 출력 특성이 우수한 슈퍼커패시터와 연속전지를 결합한 하이브리드형 전동 휠체어를 운용하는 경우, 연속전지에서 높은 c-rate의 전류가 방전되는 것을 방지할 수 있어, 연속전지의 수명 단축을 방지하고, 전동 휠체어의 배터리 교체 주기를 늦출 수 있음을 알 수 있다.



[그림 7] 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성

6. 결 론

본 논문에서는 연속전지의 수명 및 안전성 문제를 해결하기 위해, 연속전지와 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드형 전동 휠체어를 구현한다. 이를 바탕으로, 하이브리드형 전동 휠체어의 운용 특성을 분석한 결과, 제안한 하이브리드형 전동 휠체어가 고출력 발생 상황에서 슈퍼커패시터로 전환되어 전동 휠체어를 구동시키고, 동일한 경사면에서 동일한 시간 동안 기존의 전동 휠체어보다 높은 c-rate의 전류를 출력할 수 있어, 이용자들의 안전성을 높일 수 있음을 알 수 있다. 또한, 연속전지에서 높은 c-rate의 전류가 방전되는 것을 방지할 수 있어, 연속전지의 수명을 증가시키고, 전동 휠체어의 배터리 교체주기를 늦출 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090 & No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 박수향, 신중일, “노인 환자들의 휠체어 사용 실태와 만족도 조사 연구”, 재활복지공학회논문지, 9(4), 257-263. 2015
- [2] 한국소비자원, “전동보장구(전동휠체어, 전동스쿠터) 이용 실태 조사”, 2015
- [3] 김영필, 함현주, 홍성희, 고석철, “실내용 전동 휠체어 구동 시나리오에 따른 배터리 성능 비교 분석”, 조명·전기설비학회논문지, 34(2), 19-26. 2020