

회생 제동을 사용하는 전기자동차 시스템 구성 설계

진영근 · 김의정*

충남도립 청양대학, *공주대학교

Full Electric Vehicle Power System simulation with regenerative braking

young-Goun Jin · Eou-Jung Kim*

Cheongyang college · *Kongju University

E-mail : ygjin@cyc.ac.kr

요 약

순수 전기에너지로 움직이는 전기자동차는 저장에너지 시공간의 한계로 인하여 회생제동은 필수적이다. 본 연구에서는 전기자동차의 시스템 설계의 중요한 부분인 축전지 용량 크기와 수명에 영향을 미칠수 있는 회생 제동에 의한 에너지 효율 및 회생제동 순간 에너지 저장을 위한 울트라 캐패시터의 사이징에 대한 상관관계를 분석하여 효율적인 전기 자동차의 시스템 설계에 활용하고자 한다. 미국의 도심주행 코스를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 축전지 사이징과 회생제동의 효율, 울트라 캐패시터의 사이징에 대한 효율 관계를 제시하였다.

ABSTRACT

Full Electric Vehicle needs regenerative braking system by it's limitation of energy storage capacity. In this study, we suggest the system trade-off strategy between regenerative braking system with ultra capacitor and vichile energy efficiency. Simulation with the UDDS scheduling show the relations of energy storage sizing, efficiency of regenerative braking system and ultra capacitor sizing.

키워드

전기차, 회생제동, 울트라 캐패시터, 축전지, 전기차시스템설계

1. 서 론

전기자동차는 미래의 화석자원고갈과 지구온난화를 줄일 수 있는 대안적인 수송 시스템이었으나 최근들어 석유류 가격의 폭등으로 시장성을 보이기 시작하고 있다. 도요타의 프리우스와 같은 전기모터와 내연기관을 사용할 수 있는 하이브리드카를 필두로 소형의 전전기자동차(Full Electric Vehicle)가 시장에 선을 보이고 있다. 대표적인 차종으로는 닛산의 리프(leaf), 미쓰비시의 아이미브, 씨트로앵 C-zero등이 있다. 이러한 전전기자동차들은 에너지원으로 축전지를 사용하기 때문에 고효율의, 고용량 축전지개발이 필수적이다. 현재 전전기자동차의 가격비중의 60%는 축전지가 차지하고 있으며 기존의 내연기관과 달리 수명년

한이 있어 몇 년주기로 교체가 필요하다. 축전지에 대한 많은 연구가 집중되고 있으며 에너지원인 전기를 효율적인 방법으로 이용하기 위한 연구도 진행 중이다. 에너지원으로 태양전지를 차체에 추가한다든지, 저 중량소재를 사용한 차체 개발등이 연구되고 있다. 또 차량이 주행할 때는 전기에너지를 소모하지만 브레이크를 작동하거나 내리막길에서는 차체의 운동에너지로부터 거꾸로 전기를 얻을 수 있는 회생제동에 대한 연구도 진행되고 있다.

미국의 교통국 통계에 따르면 약 미국의 85% 교통인구가 가벼운 근거리 교통을 하며 근거리 교통의 약 95%가 개인 차량을 사용하며 평균 교통 거리는 약 23km가 된다고 보고하였다.^[1] 한국의 경우도 사정은 비슷할 것으로 여겨지며, 이러

한 근거리 교통에 사용될 수 있는 전기자동차의 수요는 높을 것으로 여겨지며 화석연료의 비용이 증대될 가능성이 높아 이들 근거리 전기자동차의 수요는 충분히 존재할 것으로 예측할 수 있다. 특히 근거리의 경우 정지와 운행을 빈번하게 하므로 회생제동장치를 통한 운동에너지의 전기에너지로 변환 저장할 필요성이 있다. 회생제동장치를 통하여 발생하는 전기에너지는 제동하는 짧은 시간에 주로 발생되기 때문에 에너지의 저장 효율을 높이기 위하여 기존의 전기화학 축전지보다는 울트라 캐패시터를 사용하는 것이 효율적이다.

본 연구에서는 전기차 시스템 설계측면에서 회생제동의 효율 및 울트라캐패시터의 사이징에 대한 상관관계를 분석하여 전전기자동차 시스템 구성설계에 도움이 되고자한다.

II. 본 론

전전기자동차는 기존의 내연기관 자동차보다 상당한 부품수를 줄일 수 있으며 친환경적인 수송수단이 될 수 있다. 전전기자동차는 차체등 기계적인 부분을 제외하면 크게 전기에너지원인 축전지와 전기에너지를 운동에너지로 변환하는 모터 그리고 이들을 제어하는 제어장치로 구성된다. 전기자동차시스템에서는 에너지의 효율성을 높이기 위하여 브레이크 작동시나 내리막길에서는 운동에너지를 역으로 전기에너지로 변환하여 운동에너지를 줄이는 회생제동시스템이 도입되어있다. 그러므로 회생제동시스템에서 역으로 충전할 수 있는 전기에너지를 얻을 수 있다. 이러한 회생제동 시스템에서 발생하는 전기에너지를 효율적으로 저장하기 위해서는 빠른 충전이 가능한 에너지 저장원이 필요하다. 현재의 리튬이온이나 납축전지는 전기화학적 반응 때문에 충전시간이 많이 걸리게 된다. 울트라 캐패시터는 축전지에 비하여 빠른 시간에 에너지를 저장하거나 방출할 수 있으므로 회생제동시스템에서 만들어지는 전기에너지를 빨리 저장할 수 있다. 전전기 자동차에서 울트라 캐패시터와 축전지 조합을 사용하면 그 외 다음과 같은 장점도 있다.

- * 축전지의 충방전 스트레스 감소
- * 축전지의 수명 연장
- * 저온에서 안정된 작동 보장
- * 안정된 에너지 관리 및 효율 향상

에너지 저장원으로서의 울트라 캐패시터와 현재 주목을 받고 있는 리튬이온 축전지의 특성들은 아래 표와 같다. 전전기자동차의 에너지원으로서의 축전지의 중요 파라메타는 용량, 그리고 방전 특성 및 안전성이다. 방전 특성은 축전지로부터 에너지를 끌어내기 위한 전기 부품들의 동적 응답을 결정하는 주요 요소가 된다. 축전지의 선

표 1 축전지와 캐패시터의 특성^[2]

특성	리튬이온 축전지	울트라캐패시터
충전시간	~ 3 - 5분	~ 1 초
방전시간	~ 3 - 5분	~ 1 초
충방전수명	< 5,000@ 1C	> 500,000
비에너지	50 - 100	5
비전력	1 - 2	5 - 10
충방전효율	< 50% ~ > 90%	< 75% ~ > 95%
비용/Wh	\$0.5 - 1 /Wh	\$10-20/Wh
비용/kW	\$50 -150/kW	\$15-30/kW

택에 있어 목표 주행가능거리를 지원할 수 있는 축전지의 비에너지(specific energy)는 중요한 키 파라메타가 된다. 비전력(specific power)은 원하는 가속이나 등판능력을 결정하는 키 파라메타가 된다. 충전 상태(SOC)는 축전지의 잔여 용량을 나타내는 수치로, 완전히 빈 0으로부터 전체 충전 1 사이의 값이 된다. SOC를 실제 축전지에서 정확히 직접적으로 측정할 수는 없지만 일반적으로 리튬이온 축전지나 리드액시드 축전지의 경우에는 축전지의 전압과 밀접한 관계에 있다.

울트라 캐패시터 또는 슈퍼캐패시터는 표면적이 큰 활성탄사용과 유전체의 거리를 근접시켜 작은 부피로 큰 캐패시터 용량을 구현한 제품이다. 표 1에 보여주듯이 충전시간이 빠르고 과충전, 과방전에도 안정적이며 충방전 수명이 현재의 축전지보다 매우 큰 특성이 있다. 울트라 캐패시터의 사이징은 비에너지가 2.5 ~ 5 Wh/kg 까지 있으며 질량에 따라 약 70 ~ 150Wh 요구사항을 가지면 대부분의 전전기자동차의 드라이브라인이 요구하는 용량을 만족한다.^[3]

대표적인 고속 전기자동차인 테슬라의 로드스타도 회생제동장치를 사용하여 에너지의 일부를 재생한다. 축전지의 전기화학반응으로부터, DC에서 AC 컨버팅, 그리고 모터에 의한 운동에너지로 변화되는 과정 즉 축전지로부터 휠까지 80%의 효율을 가지므로 재생되는 에너지가 다시 축전지 또는 울트라 캐패시터에 저장된다고 한다면 $80\% \times 80\% = 64\%$ 의 효율을 가진다.^[4] 일반적으로 가솔린자동차의 기름에서 운동에너지의 변환 효율은 약 20%가 된다. 80%가 마찰에 의한 열로 변환되어 사라진다. 회생제동장치를 사용하면 소모되는 반 정도의 에너지를 회수할 수 있다.^[5]

차량의 중량 및 일부 저항력을 고려한 전기자동차의 속력과 전력과의 관계식은 다음 식과 같다.^[6]

$$P(v) = \text{공기저항} + \text{롤저항손실} + \text{관성력} + \text{도로의 경사도}$$

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho C_d A v^3 + C_{rr} m g v + m \frac{dv}{dt} v + m g Z v$$

여기에 사용된 계수들과 본 연구에 사용된 숫자들은 다음 표 2와 같다.

표 2 시뮬레이션에 사용된 상수들

	계수	숫자 및 단위
차량의 중량	m	1,200kg
공기저항계수와 전면적	$C_d A$	$0.3m^2$
롤링저항계수	C_{rr}	0.01
중력가속도	g	$9.8m/s^2$
공기밀도	ρ	$1.17kg/m^3$
경사도	Z	0

그림 1 미국 UDSS 도심구간

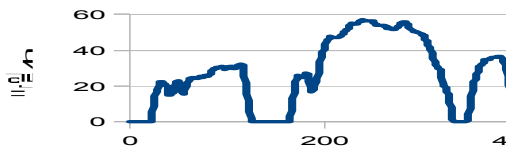


그림 2 전력 요구량

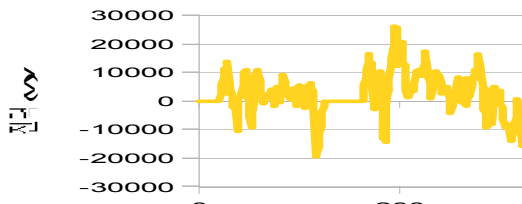


그림 3 울트라 캐패시터 충전량

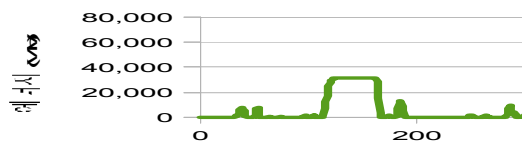


그림 4 회생제동 효율 0.3

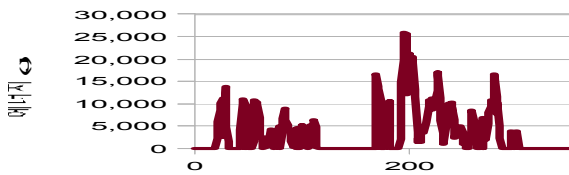


그림 5 회생제동 효율 1

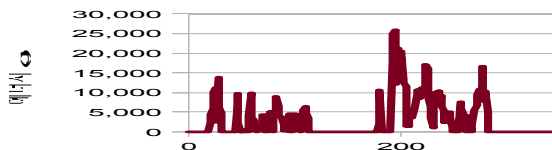
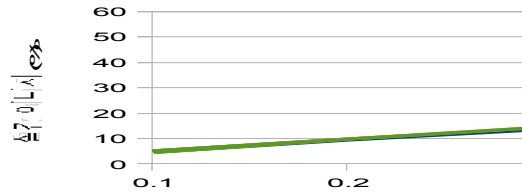


그림 6 회생제동 효율과 캐패시터용량 및 에너지 절감비율



시뮬레이션은 미국의 UDSS를 기준으로 하였으며 도로의 경사도는 0으로 하였다. 그림 1은 경량 UDSS로 도심구간의 주행자료이다. 회생제동은 정차가 자주 있는 도심구간에서 오히려 에너지 절감 효율이 크게 나타나는데 이것은 일반 차들이 정차 및 출발을 자주하면 연료 손실이 큰 것에 비하여 회생제동 장치가 있는 차들은 이드 손실을 줄여 에너지를 재생할 수 있기 때문에 효율이 높아진다. 그림 2는 주행에 필요한 요구전력을 나타내면 0 이하의 회생제동으로 에너지를 만들어 낼 수 있는 구간이다. 그림 3은 회생제동 효율 0.3에서 울트라 캐패시터에 충전되는 에너지를 표시한 것으로 출발시 우선적으로 캐패시터에 있는 에너지를 사용하도록 하였다. 그림 4는 회생제동 효율 0.3에서 축전지의 사용량을 표시한 것이며 그림 5는 회생제동을 1을 가정한 경우의 축전지 사용량으로 회생제동률이 높을수록 축전지의 스트레스는 줄어드는 것을 볼수 있다. 그림 6은 회생제동 효율과 울트라 캐패시터의 용량에 따른 에너지 절감율을 표시한 것이다. 시뮬레이션 결과 70Wh의 비에너지를 갖는 울트라 캐패시터의 경우 중량이 약 20 ~ 35kg 정도로 회생제동장치의 에너지 저장원으로 사용하는 경우 소형 전전기자동차의 효율을 30%정도 개선할 수 있으며 이외의 장점으로는 축전지의 스트레스를 줄여 수명 연장 및 저온에서 축전지의 네가티브 영향을 보조할 수 있으므로 울트라 캐패시터를 조합한 회생제동 장치의 실효성이 있는 것으로 볼수있다. 현재 국내에서도 고용량의 울트라 캐패시터 개발 시판되고 있어 가격비용도 저렴해지면 일반 자동차에서도 울트라 캐패시터를 사용한 회생제동을 도입할 필요성이 있는 것으로 볼수 있다.

III. 결 론

전전기자동차의 시스템 구성 설계를 돕기 위한 회생제동의 효율성과 회생제동 에너지를 저장하기 위한 울트라 캐패시터의 사이징에 대한 연구를 수행하였으며 회생제동 응용에 부합하는 적절한 울트라 캐패시터 용량의 도입으로 에너지를

절약할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 시스템 구성 설계를 위한 것으로 많은 상세한 파라메타들은 생략되어 있으며 전기자동차의 응용 및 주행 스케줄링에 따라 달라질 수 있다. 앞으로의 연구는 한국형 단거리 주행 전기자동차의 시스템 설계를 위한 모델링을 하여 보다 상세한 설계에 도움이 되고자 한다.

참고문헌

- [1] 2001 National Household Travel Survey, Bureau of Transportation Statistics, US Department of Transportation
- [2] John R, Miller, Electrochemical Capacitor Performance Compared with the Performance of Advanced Lithium ion Batteries, Proc. 17th International Seminar on Double Layer Capacitors and Hybrid Energy Storage Device, Dec. 2007
- [3] Andrew F. Burke, Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, proceeding of the IEEE, vol. 95 No. 4, April 2007
- [4] <http://www.tellamotors.com>
- [5] <http://www.hybridcars.com/related-technologies/hydraulic-hybrids.html>
- [6] C.R.Kyle, Racing with sun-The 1990 world solar challenge, Soc. Of Automotive Engineers Inc, 1991