

전기자동차의 회생제동에 따른 배터리 SOC 추정방법에 대한 연구

정 춘 화¹⁾ · 박 영 일²⁾ · 임 원 식³⁾ · 차 석 원^{*4)}

서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계공동연구소¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계설계자동차공학부²⁾ ·
서울과학기술대학교 자동차공학과³⁾ · 서울대학교 기계항공공학부⁴⁾

A Study on Battery SOC Estimation by Regenerative Braking in Electric Vehicles

Chunhua Zheng¹⁾ · Yeong-il Park²⁾ · Wonsik Lim³⁾ · Suk Won Cha^{*4)}

¹⁾Department of Mechanical and Aerospace Engineering/SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

⁴⁾Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 14 March 2011 / Revised 5 May 2011 / Accepted 16 May 2011)

Abstract : In traditional vehicles, a great amount of energy is dissipated by braking. In electric vehicles (EVs), however, electric motors can be controlled to operate as generators to convert kinetic and potential energy of vehicles into electrical energy and store it in batteries. In this paper, the relationship between regenerative braking factor and battery final SOC is derived and the final SOC from the relationship is compared to that from simulation. Two types of braking algorithms are introduced and applied to an EV, and the final SOC derived from simulation is compared to that derived from the relationship.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Regenerative braking(회생제동), Battery SOC(배터리 SOC), Braking algorithm(제동 알고리즘)

1. 서 론

지구온난화와 화석연료 자원의 위기로 인해 전기자동차가 많은 업체와 연구자들 사이에서 이슈가 되고 있다. 하지만 전기자동차의 핵심 부품인 배터리에는 아직도 여러 가지 문제가 존재하고 있으며 주행과정에서 배터리의 에너지 소모량을 최대한 줄이는 것이 중요한 문제로 되고 있는데 회생제동이 그 한 가지 해결책으로 될 수 있다. 전기 차량은 기존의 차량과 달리 주행 중에 전기모터를 발전기로 작동하도록 제어할 수 있어 감속과정이나 내리막

주행 시 차량의 운동에너지나 위치에너지를 전기에너지로 변환시켜 배터리에 저장할 수 있다. 이는 전기자동차의 큰 장점이라고 할 수 있는데 주행 중에 얼마만큼의 에너지를 회수하는가에 따라 배터리 SOC의 최종 값도 다르게 된다. 본 연구에서는 이 두 가지 량의 관계를 분석하고 정리하였으며 이 관계로부터 얻은 배터리 SOC의 최종 값을 시뮬레이션에서 얻은 값과 비교하였다. 또한 두 가지 제동 알고리즘을 전기자동차 시뮬레이션에 적용하여 각각의 회생제동량과 배터리 SOC의 최종 값을 얻었으며 이를 회생제동과 배터리 SOC의 최종 값의 관계에서 얻은 결과와 비교하였다.

*Corresponding author, E-mail: swcha@snu.ac.kr

2. 전기자동차의 회생제동과 배터리 SOC

기존의 차량은 주행 중에 상당히 많은 량의 에너지를 제동에 의해 낭비하게 되지만 전기자동차는 회생제동이라는 장점을 가지고 있다.¹⁾ Fig. 1은 FTP75 urban 주행사이클에서 75%의 회생제동을 한다고 가정 하였을 때 배터리가 제공한 구동 에너지와 배터리에 회수된 제동 에너지를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 구동 에너지의 대략 24%에 상당하는 에너지가 회생제동을 통해 배터리에 저장될 수 있게 된다.

전기자동차의 회생제동과 배터리 SOC의 관계에 앞서 주행 중에 회생제동이 없고 배터리 SOC가 일정한 범위내에서 변화한다고 가정할 때 차량에 필요한 에너지와 배터리 SOC의 관계는 배터리의 내부저항 모델과 배터리 SOC의 정의에 의해 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{d(SOC)}{dE} = -\frac{1}{Q_0 V_c} \quad (1)$$

여기서 E 는 차량에 필요한 에너지를 나타내고 Q_0 는 배터리의 용량, V_c 는 배터리의 전압 그리고 η 는 배터리로부터 휠 사이의 동력전달계의 효율을 나타내는데 주로 모터의 효율과 중감속 기어의 효율을 포함한다. 이 관계에 의해 임의의 주행사이클이 주어졌을 때 그것으로부터 E 값을 구하고 그에 따른 배터리 SOC의 최종 값을 구할 수 있다.

회생제동을 고려할 시 관계 (1)은 (2)와 같이 변화

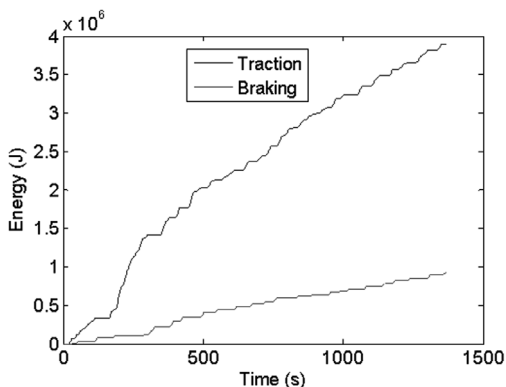


Fig. 1 Traction and braking energy in FTP75 urban driving cycle (regenerative braking factor = 0.75)

하게 된다. 여기서의 E 즉 주행 중 차량에 필요한 에너지는 회생제동에서 얻은 에너지를 고려한 량이고 나머지 량들은 식 (1)에서와 같다.

$$\frac{d(SOC)}{dE} = -\frac{\eta}{Q_0 V_c} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 차량에 적용하기 위하여 Table 1²⁾과 같은 차량 파라미터들을 선정하였다. 배터리는 70Ah를 선택하였고 배터리 전압은 대략 72V 그리고 모터의 평균 효율은 95%이다. Fig. 2는 Table 1의 차량이 FTP75 urban 주행사이클을 달렸을 때 차량에 필요한 에너지와 배터리 SOC의 최종 값의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 배터리 SOC는 0.6에서 시작하여 떨어지는데 1번 그래프는 식 (1)에 해당되고 2번 그래프는 식 (2)에 해당된다. 회생제동이 진행되지 못할 때는 1번 그래프에 의해 배터리 SOC의 최종 값이 a점까지 떨어지고 회생제동이 진행될 때는 2번 그래프에 의해 배터리 SOC의 최종 값이 결정되는데 100% 회생제동이 진행된다고 가정하면 SOC 최종 값은 b점에 의해 결정된다. 회생제동이 더 많이 진행될수록 차량에 필요한 에너지가 적게 되며 따라서 배터리 SOC의 최종 값이 크게 된다. Table 2는 0부터 100% 사이의 회생제동 량에 의한 차량에 필요한 에너지를 식 (2)에 대입하여 구한 배터리 SOC의 최종 값을 시뮬레이션에서 얻은 값과 비교한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 식 (2)에 의해 구한 값은 시뮬레이션 결과를 잘 예측하고 있다. 따라서 차량과 주행사이클이 주어졌을 때 주행사이클과 회생제동량에 의해 E 값을 구하고 배터리의 데이터와 평균 효율 데이터를 식 (2)에 대입하면 시뮬레이션을 진행하지 않고서도 배터리 SOC의 최종 값을 얻을 수 있다.

Table 1 Parameters of the vehicle

Item	Value
Vehicle total mass (kg)	1000
Final drive gear efficiency (%)	90
Tire radius (m)	0.318
Aerodynamic drag coefficient	0.294
Vehicle frontal area (m ²)	1.5
Air density (kg/m ³)	1.23
Rolling resistance coefficient	0.01

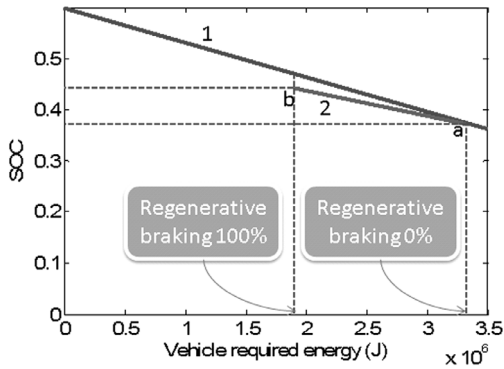


Fig. 2 Battery final SOC for different regenerative braking factors (FTP75 urban driving cycle)

Table 2 Comparison of battery final SOC

Regenerative braking factor	0%	25%	50%	75%	100%
Energy required for the vehicle ($\times 10^6$ J)	3.3224	2.9639	2.6054	2.2469	1.8884
Final SOC (relationship)	0.3808	0.3976	0.4143	0.4311	0.4479
Final SOC (simulation)	0.3808	0.3975	0.414	0.4302	0.4461

3. 전기자동차의 제동 알고리즘과 배터리 SOC

이 부분에서는 두 가지 제동 알고리즘을 전기자동차에 적용하여 각 각의 회생제동량과 배터리 SOC의 최종 값을 확인하고 이를 Fig. 2에서 얻은 결과와 비교하였다. 이 두 알고리즘 중 하나는 앞 뒤 바퀴 축에 이상적인 제동력 분배를 적용한 것이고 다른 하나는 앞 뒤 바퀴 축의 제동력을 비례적으로 분배한 것이다.

Fig. 3은 제동과정에서 차량에 작용하는 힘들을 보여주는데 각 기호의 설명은 Table 3에서와 같다. Fig. 3에 근거하여 감가속도 j 는 식 (3)과 같이 표현될 수 있고 앞 뒤 바퀴와 그라운드의 접촉점에 대해 각 각 모멘트 평형을 취하면 식 (4)와 (5)를 얻을 수 있다. 이상적인 제동력 분배에서는 앞 뒤 바퀴축의 제동력이 각 각의 노말 로드 에 비례되어야 한다.⁴⁾ 그러므로 식 (4)와 (5)로부터 식 (6)이 성립되고 식 (3)과 (6)를 동시에 고려하면 이상적인 제동력 분배 곡선을 얻을 수 있다.³⁾

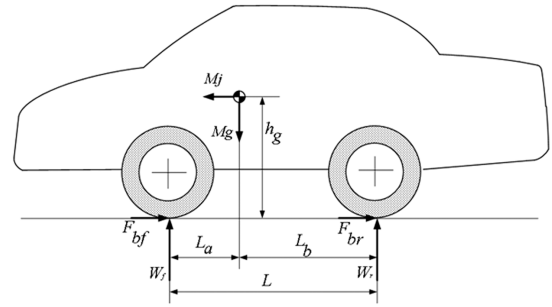


Fig. 3 Forces acting on the vehicle during braking³⁾

Table 3 Explanation of each symbol

Symbol	Explanation
M	Vehicle total mass
j	Vehicle deceleration rate
L	Wheel base
L_a	Distance from gravity center to front wheel center
L_b	Distance from gravity center to rear wheel center
h_g	Gravity center height
F_{bf}	Braking force acting on front axle
F_{br}	Braking force acting on rear axle
W_f	Normal load on front axle
W_r	Normal load on rear axle

$$j = \frac{F_{bf} + F_{br}}{M} \quad (3)$$

$$W_r = \frac{Mg}{L}(L_a - h_g \frac{j}{g}) \quad (4)$$

$$W_f = \frac{Mg}{L}(L_b + h_g \frac{j}{g}) \quad (5)$$

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b + h_g j/g}{L_a - h_g j/g} \quad (6)$$

Fig. 4의 알고리즘 2가 바로 Table 1의 차량의 이상적인 제동력 분배곡선이다. 이 곡선에 의해 앞 뒤 바퀴 축의 제동력을 분배하였을 때 제동과정에서 차량의 안전성이 보장된다. 알고리즘 1은 앞 뒤 바퀴 축의 제동력을 비례적으로 분배한 것이다. 앞 뒤 바퀴 축의 제동력을 분배한 다음 앞 바퀴 축에서 다시 회생제동량과 기계적 제동량을 분배하는데 이때에는 회생제동을 위주로 하며 부족한 부분을 기계적 제동으로 보충한다.⁵⁾ Fig. 5는 전반적인 제동 알고리즘의 순서도를 보여준다.

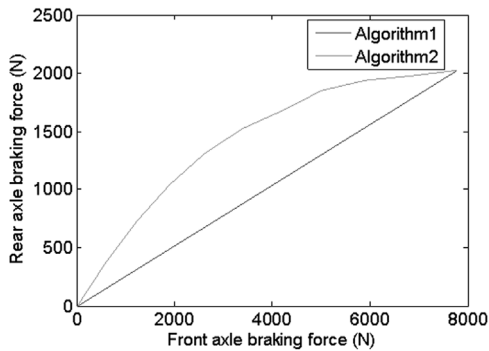


Fig. 4 Two types of braking algorithms

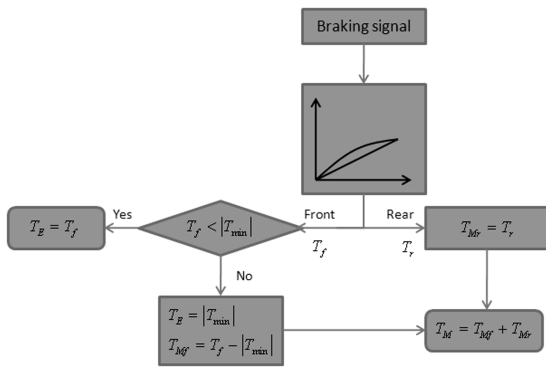


Fig. 5 Flowchart of braking algorithms

Table 4 Comparison of two braking algorithms

	Regenerative braking energy ($\times 10^6$ J)	Regenerative braking factor (%)	Battery final SOC
Algorithm1	1.1177	77.94	0.4264
Algorithm2	0.8476	59.12	0.419

Table 5 Comparison between simulation and relationship results

	Algorithm1	Algorithm2
Simulation	0.4264	0.419
Relationship	0.4331	0.4205
Error (%)	1.57	0.36

여기서 아래 첨자 f 은 앞 바퀴축을 나타내고 r 은 뒤 바퀴축을 나타내며 M 은 기계적 제동, E 은 회생제동, 그리고 T_{min} 은 모터의 최소 토크를 나타낸다.

Table 4는 Fig. 4의 두 가지 제동 알고리즘을 Table 1의 차량에 적용하여 FTP75 urban 주행사이클에서 시뮬레이션을 수행하였을 때 회생제동량과 배터리

SOC의 최종 값을 보여주고 있다. 여기서 Regenerative braking factor는 감속과정에서 전체의 운동에너지를 회수하는 경우를 100%로 할 때를 기준으로 하는데 알고리즘 1의 Regenerative braking factor는 대략 77.94%이고 알고리즘 2는 대략 59.12%이다. Table 5에서는 Table 4의 배터리 SOC의 최종 값을 Fig. 2에서 즉 식 (2)에서 얻은 결과와 비교하였다. 비교에서 볼 수 있듯이 두 가지 제동 알고리즘에서 식 (2)는 모두 시뮬레이션 결과를 잘 예측하였다.

4. 결론

전기자동차에서 회생제동과 배터리 SOC는 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 연구에서는 차량이 주행 중에 회생한 에너지를 차량에 필요한 에너지에 연관시켜 회생제동과 SOC의 관계를 수식으로 정리하였으며 이 관계로부터 얻은 배터리 SOC의 최종 값을 시뮬레이션에서 얻은 값과 비교해 보았다. 또한 이상적인 제동력 분배곡선을 적용한 제동 알고리즘과 비례적 분배를 적용한 제동 알고리즘을 전기자동차 시뮬레이션에 적용하여 각각의 회생제동량과 배터리 SOC의 최종 값을 확인하였으며 이를 수식에서 얻은 결과와 비교해 보았다. 결과적으로 이 두 가지 제동 알고리즘에서는 수식에서 얻은 결과가 모두 시뮬레이션 결과를 낮은 오차로 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0001276)과 지식경제부 전략기술개발사업(10031743, In wheel 구동시스템개발, 시스템 통합설계 및 평가기술 개발)의 일환으로 수행 되었습니다.

References

- 1) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., CRC Press, UK, pp.115-120, 2010.
- 2) C. Zheng, Y.-I. Park, W. S. Lim and S. W. Cha,

- “A Simulation Study for the Performance of Electric Vehicles,” The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2010.
- 3) C. Zheng, Y. Park, W. Lim and S. W. Cha, “A Simulation Study for the Performance of Electric Vehicles,” The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 2010.
- 4) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., CRC Press, UK, pp.53-65, 2010.
- 5) H. B. Jin, J. W. Huh, J. H. Shin and S. H. Hwang, “Development of Brake Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles to Improve Regenerative Braking Performance,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.2308-2313, 2007.