

울트라캐피터와 배터리를 보조 에너지원으로 사용하는 하이브리드 자동차의 다이내믹 프로그래밍을 이용한 최적 연비 계산

전 유광¹⁾, 박 영일²⁾, 이 장무³⁾

Fuel Economy of Ultracapacitor & Battery Hybrid vehicle Using Dynamic Programing

Youkwang Jeon, Younil Park, Jangmoo Lee

Key words : Dynamic programing(다이내믹 프로그래밍), Hybrid Electric Vehicle(HEV), Battery(배터리), Ultracapacitor(울트라캐피터), Prius(프라이어스)

Abstract : A battery is the primary energy source device presently used in hybrid electric vehicle. It can store much energy, but cannot provide enough current without inefficient units. However, an ultracapacitor can provide much current, but cannot store much energy. It will have better fuel economy by combining the two energy sources in parallel. The purpose of this paper is making the simulator of the two HEV systems. The one has only battery, the other have battery and ultracapacitor in parallel. To compare the fuel economy, dynamic programing was used for optimization and prius was used for HEV model.

subscrip

ba : battery
uc : ultracapacitor

1. 서론

현재의 배터리는 에너지 밀도가 큰 반면에 고출력을 내지 못하는 단점이 있다. Honda의 insight는 배터리의 출력 15C-rate 정도를 요구한다. 이는 배터리의 수명을 단축시키는 원인이기도 하다. 반면에 울트라 캐피터는 출력은 높지만, 에너지 밀도가 작다. 또한 충·방전 효율이 좋기 때문에 배터리를 대체하는 에너지원으로 고려되고 있다. 따라서 하이브리드 자동차에 이 두 가지 보조 에너지를 조합한다면 보다 효율적으로 에너지를 사용할 수 있을 것이다.

2. 각 시스템의 모델링

각 시스템은 울트라 캐피터를 제외하고 prius-I을 모델로 ADVISOR[1]에 있는 데이터 테이블을 사용하였다. 정상상태라는 가정을 하였고, 온도의 영향을 고려하지 않은 모델링을 하였다.

2.1 Engine

엔진은 토크와 회전속도 값에 따라 연료소비량을 계산한다.

-
- 1) 서울대학교
E-mail : beinglight@mailvib.snu.ac.kr
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)883-7142
 - 2) 서울산업대학교
E-mail : yipark@snu.ac.kr
Tel : (02)970-6352
 - 3) 서울대학교
E-mail : leejm@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7147 Fax : (02)883-7142

2.2 Motor & Generator

모터와 제너레이터에서 필요한 토크와 회전속도가 입력이 된다. 이때 모터와 제너레이터의 효율을 포함하는 파워값을 계산하여 배터리의 입력이 된다.

2.3 Power Split Unit

각 유성기에 전달되는 토크관계식과 그 토크의 비는 다음과 같다.[2][3]

$$T_c = T_r + T_s \quad \text{수식(1)}$$

$$T_c : T_s : T_r = 1 : \frac{R}{1+R} : \frac{1}{1+R} \quad \text{수식(2)}$$

$$R = \frac{\text{Teeth}_{sun}}{\text{Teeth}_{ring}} = \frac{30}{78} \quad \text{수식(3)}$$

엔진의 회전속도는 모터와 제너레이터의 회전속도에 의해 결정되는 다음 식을 따른다.

$$\omega_{engine} = \frac{\omega_{motor} + R \times \omega_{generator}}{1+R} \quad \text{수식(4)}$$

2.4 Battery

배터리는 제너레이터, 모터와 연결되어 있다. 배터리는 제너레이터가 주는 동력이나 모터가 필요한 동력이 입력으로 주어지면 그 값에 해당되는 전류를 계산해준다. 이 때, 계산된 전류를 사용하여 SoC 값을 계산할 수 있다.

시뮬레이션은 간단한 모델링인 Fig. 4 와 같은 등가회로모델을 사용했다. 이 모델에서 내부저항 R_{int} 에서 소모된 전력을 제외한 식은 다음과 같다.

$$P_b = I \cdot V_{OC} - I^2 R_{int} \quad \text{수식(5)}$$

배터리에서 요구되는 전력 P_b 를 입력변수로 배터

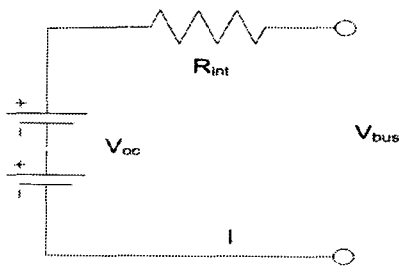


Fig. 1 배터리 전기 회로 모델

리에서 나오는 전류 I를 출력변수로 식을 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$I = \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4R_{int} \cdot P_b}}{2R_{int}} \quad \text{수식(6)}$$

I : current,

V_{oc} : open circuit voltage,

V_{bus} : bus voltage,

R_{int} : internal resistance,

P_b : output power

2.5 Ultracapacitor

울트라 커패시터는 배터리와 병렬적으로 연결되어 있다. 따라서 모델링을 제외한 기능이 배터리와 동일하다. 울트라 커패시터 모델은 Fig. 5 와 같은 등가회로모델을 사용했다. R_s 에서 소모된 전력을 제외한 식은 다음과 같다.

$$P_b = I \cdot V_C - I^2 R_s \quad \text{수식(7)}$$

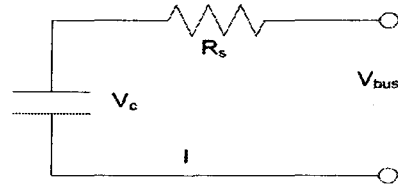


Fig. 2 울트라커패시터 등가 모델

$$Q = CV_C \quad \text{수식(8)}$$

윗 식을 대입하여 배터리와 같이 식을 변경하면 다음과 같다.

$$I = \frac{Q - \sqrt{Q^2 - 4 \cdot C^2 \cdot R_s \cdot P_b}}{2 \cdot C \cdot R_s} \quad \text{수식(9)}$$

I : current,

V_c : ultracapacitor voltage,

V_{bus} : bus voltage,

R_s : series resistance,

P_b : output power,

Q : ultracapacitor charge,

C : capacitance

시뮬레이션은 Nesscap^[4]의 ESHSP-1700CO-002R7인 cell을 병렬로 2 개 연결, 이를 다시 10개 직렬로 연결하여 총 20개의 cell을 사용했다.

이 외의 값들은 모두 ADVISOR의 값을 사용했다.

3. 시뮬레이션

3.1 Battery Only

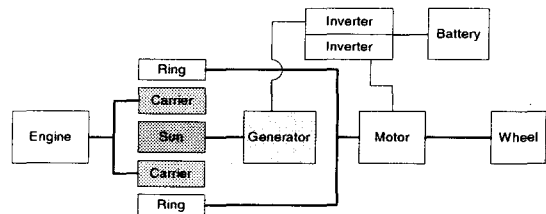


Fig. 3 Prius using Battery only

시뮬레이션은 다이나믹 프로그래밍을 이용했다. 다이나믹 프로그래밍을 이용하기 위해 주행조건을 FTP-72 cycle 사용하였다. 시간에 따른 속도와 토크를 이용하여 prius 바퀴에 요구되는 회전속도와 요구토크로 입력받도록 했다. 목적함수로는 연료소모량(fuel)과 SoC의 양을 이용한 다음의 식이다.

$$Object = fuel + \text{수식 (10)}$$

$$\alpha \times |SoC - SoC_f|$$

연비계산을 위해서 SoC의 처음과 끝 값이 같아야 하기 때문에, 목적함수의 SoC 항을 위와 같이 사용하였다.

시뮬레이션은 매 스텝마다 목적함수의 값이 최소가 되게끔 엔진의 토크와 엔진의 회전속도를 결정하도록 하였다.

3.2 Battery & Ultra-Capacitor

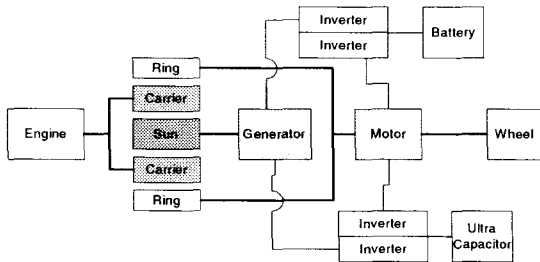


Fig. 4 Prius using Battery & Ultracapacitor

이 모델은 배터리와 울트라 커패시터를 병렬형태로 장착한 구조이다. 따라서 제어변수가 Fig. 3의 구조보다 더 필요하다. 시뮬레이션 시간을 줄이기 위해서 Generator에서 받는 충전에너지는 울트라 커패시터의 SoC가 0.9를 넘지 않는다면 모두 울트라 커패시터로 흐르도록 하였다. 반면 모터에서 배터리와 울트라 커패시터로 흐르는 충·방전 에너지의 비율을 또 하나의 제어변수로 설정하였다.

Fig. 4의 구조는 Fig. 3의 구조와 다르게 울트라 커패시터를 추가하였기에 차체 무게가 더 증가하도록 하였다.

목적함수는 배터리만 사용한 것과 유사하게 다음의 식을 사용하였다.

$$Object = fuel + \text{수식 11}$$

$$+ \alpha \times |SoC - SoC_f|_{ba}$$

$$+ \beta \times |SoC - SoC_f|_{uc}$$

4. 시뮬레이션 결과

4.1 Battery Only

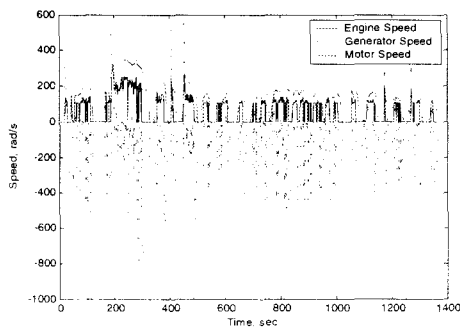


Fig. 5 Speed

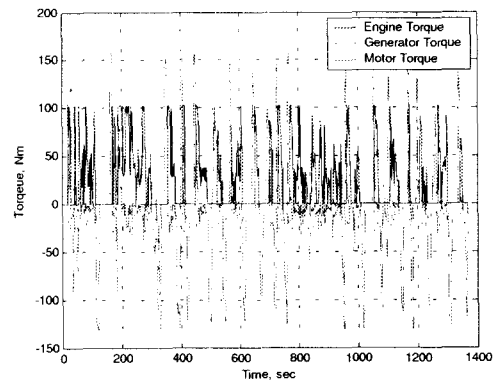


Fig. 6 Torque

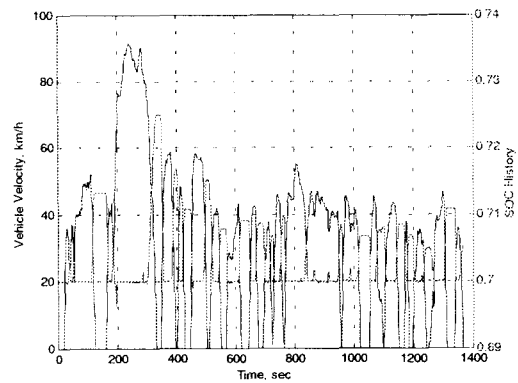


Fig. 7 Vehicle Velocity & SoC

4.2 Battery & Ultra-Capacitor

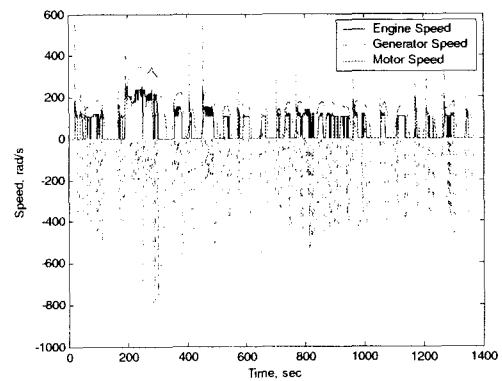


Fig. 8 Speed

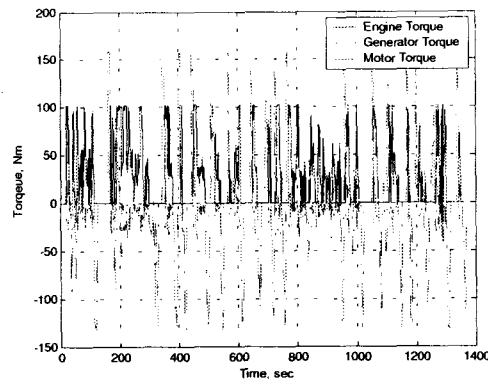


Fig. 9 Torque

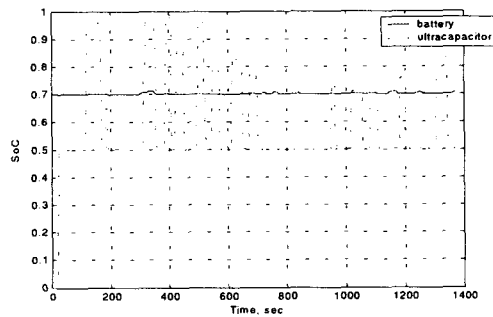


Fig. 10 SoC (battery & ultracapacitor)

연비를 비교하면, battery 만 사용한 systme이 30.2154km/ 이고, battery 와 ultracapacitor를 같이 사용한 차량은 32.5688km/1 이다.

5. 결론

울트라커패시터와 배터리를 병렬적으로 장착한 HEV system을 모델링하였고, 이를 다이나믹 프로그래밍을 사용하여 최적화 시뮬레이션을 수행했다. 이를 통해 배터리만 장착한 하이브리드 시스템보다 두 가지 보조 에너지를 병렬적으로 장착한 하이브리드 시스템이 연비면에서 우수함을 볼 수 있었다.

References

- [1] National Renewable Energy Laboratory. ADVISOR Documentation . Golden, CO. [Online] <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/>
- [2] H. I. Kim, J. H. Kong, W.S. Lim, J. M. Lee, "Comparison of HEVs fuel economies using Dynamic Programing". Proceeding of KSAE, Vol 1, pp499-504,2003
- [3] Kuang, M.L., Hrovat, D., "Hybrid Electric Vehicle Powertrain Modeling and Validation". Proc. of EVS 20, November, 2003
- [4] NESSCAP@Ultracapacitor Datasheet