

하이브리드 차량의 SOC 유지전략 방법

*변 상민¹⁾, 김 범수²⁾, **차 석원³⁾

Deterministic rule-based control classification for HEV

*Sangmin Byun, Beomsoo Kim, **Suk-Won Cha

Key words : RBC, supervisory control, BCS, state-machine, SOC, HEV, SOC sustaining strategy

Abstract : There are many control strategies for HEV in today. Expanding motor-driving and operating at good-efficient point in engine is the key of the HEV control to increase fuel economy. There are two types of HEV supervisory control. One is rule-based control and the other is optimization control. MAX-SOC control, thermostat control, baseline status control and state-machine control are in deterministic RBC. It is simple, but powerful and easy to apply in real-time circumstance. In this study, we analysis these four control strategies in RBC (Rule-based control) and identify the each advantage and disadvantage.

Nomenclature

- P_L : load power, traction or braking
- P_m : motor traction power
- P_e : engine power
- P_{mb} : motor braking power
- V_{eb} : engine start velocity
- P_{mc} : battery charging power
- P_{mf} : mechanical braking power
- $\eta_{t,m}$: motor traction efficiency
- $\eta_{t,e}$: engine traction efficiency
- $\eta_{t,e,m}$: engine-motor efficiency
- η_m' : generator efficiency

subscrip

- HEV : hybrid electric vehicle
- RBC : rule-based control
- BCS : base-line status control strategy

1. 서 론

최근, 유가에 대한 관심이 늘어나면서, 점차 환경 친화적이고 효율 성능이 우수한 하이브리드 차량에 대한 관심이 높아지고 있다. 하이브리드 차량은 2가지 이상의 동력원(엔진, 모터)을 사용하며, 배터리(혹은 울트라 캐패시터)와 같은 전기 에너지 저장시스템을 사용한다.

하이브리드 차량의 제어 핵심은 주행 중, 모터

의 사용을 최대화하고, 엔진을 최대한 효율이 좋은 영역에서 작동시키면서, 연료를 최대한 절감하는 방향으로 제어하는 것이다. 오늘날, 하이브리드 차량의 성능 연비를 향상시키기 위해, 다양한 제어기법들이 등장하고 있다. 본 논문에서는 하이브리드 차량에 사용되는 제어 중 룰 기반 제어(RBC: Rule-Based Control)에 대한 연구를 수행하였다.

2. HEV 상위 제어

HEV 상위제어는 크게 룰 기반으로 한 제어전략(RBC : Rule-Based Control)과 최적화 기반으로 한 제어전략(Optimization)으로 나눈다.

룰 기반 제어는 정해진 룰을 통해, 하이브리드 파워 트레인 내의 파워를 모터와 엔진에 분배하여, HEV의 주행모드를 결정하는 방법이다. 대표적인 제어방법으로는 결정론적 룰 기반 제어(Deterministic RBC)와 퍼지 기반으로 한 제어(Fuzzy RBC)로 구분한다.

최적화 기반으로 한 제어전략은 차량의 연료 소비량이나 배기량, 에너지 등을 목적함수로 두고, 이를 최소화 하는 방향으로 제어하는 기법이

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : bluemetal7@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1969
 - 2) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : zeppelin9@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8050 Fax : (02)880-1969
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : swcha@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1700

다. 대표적인 제어방법으로 실시간 최적화 제어 (Real-Time optimization)와 전역 최적화 제어 (global optimization)가 있다. Fig.1은 HEV 상위제어 종류를 나타낸 것이다.

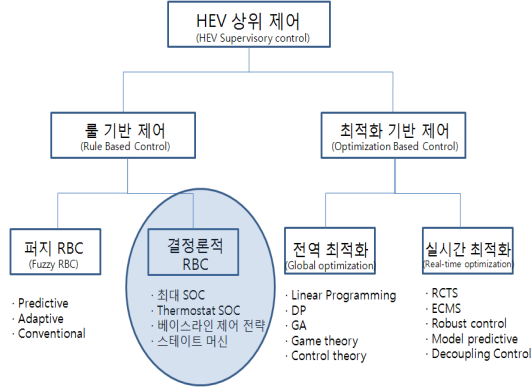


Fig. 1 HEV supervisory control

3. SOC 유지전략 방법

3.1 MAX SOC of PPS 제어

HEV 차량이 정체상태의 도심구간을 주행할 경우, 모터 주행 모드를 통해서, 배터리를 빨리 방전시킨다. 도심주행의 경우, 모터주행모드의 비중이 많기 때문에, SOC를 가능한 높게 유지하는 제어전략이 적절하다. MAX SOC of PPS 전략은 제어는 이와 같이, 모터사용이 잦은 도심이나, 정체구간 상태일 경우 적용하기 유리한 제어전략이다. FIG2는 차량의 요구파워에 따라 HEV 작동모드를 결정하는 그림이다.

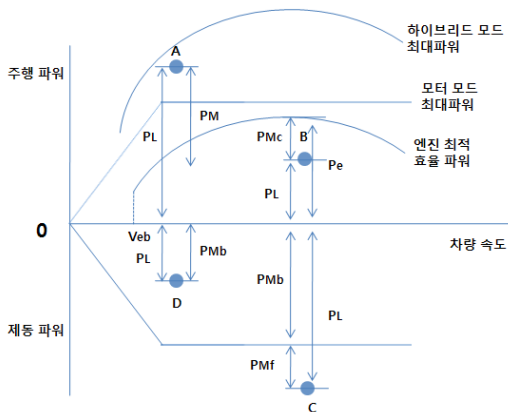


Fig. 2 Various HEV mode based on Power demand

모터 주행모드 Fig.2 에서 차량 속도가 V_{eb} 보다 작으면, 엔진이 최적점에서 작동할 수 없으므로, 이 구간에서는 모터로 주행한다. 모터 주행모드에서는 모터 단독으로 차량에 구동파워를 전달하고, 엔진은 멈춰있거나, 공회전을 한다.

$$P_e = 0 \quad (1)$$

$$P_m = \frac{P_L}{\eta_{t,m}} \quad (2)$$

하이브리드 주행모드 Fig.2 에서 요구파워가 A 점에 있는 경우, 모터와 엔진이 동시에 작동해서 요구파워를 만족한다. 이 경우, 엔진파워는 최대 파워를 내는 동시에 효율이 좋은 P_e 를 내며, 남은 파워는 모터를 구동해 충족한다.

$$P_m = \frac{P_L - P_e \eta_{t,e}}{\eta_{t,m}} \quad (3)$$

배터리 충전모드 Fig.2 에서 요구파워가 B점에 있는 경우, 엔진의 최적효율 파워선보다 낮은 곳에 있다. 따라서, SOC가 최고점보다 낮은 부분에 있다면, 엔진의 남은 파워를 이용하여, 배터리를 충전한다.

$$P_m = (P_e - \frac{P_L}{\eta_{t,e}}) \times \eta_{t,e,m} \eta_{m'} \quad (4)$$

엔진 주행모드 배터리 충전모드와 마찬가지로, 요구파워는 B에 있고, SOC가 최고점에 이른 경우, 모터는 꺼진 상태에서, 엔진 파워만 이용하여 주행한다.

$$P_e = \frac{P_L}{\eta_{t,e}} \quad (5)$$

$$P_m = 0 \quad (6)$$

회생 제동모드 차량이 제동하는 경우, Fig.2에서 요구파워가 D와 같이 모터의 최대 회생 제동파워 곡선보다 작으면, 모터는 발전기로서, 배터리를 충전하게 된다.

$$P_{mb} = P_L \eta_{t,m} \eta_{m'} \quad (7)$$

하이브리드 제동모드 요구제동파워가 모터의 최대 회생 제동파워 곡선보다 크면, (요구파워가 C 점 있다면,) 기계적인 브레이크 힘이 더해져야 차량 제어가 가능하다.

$$P_{mb} = P_{mb,max} \eta_{m'} \quad (8)$$

3.2 Thermostat 제어(엔진 ON-OFF)

Thermostat 제어는 배터리의 SOC 충전상태에 따라서, 엔진의 작동여부를 결정하는 제어방법이다. 우선, 배터리의 온도와 충전 효율 등을 고려하여, SOC의 작동범위를 결정한다. 그리고 SOC가 가장 낮은 점에 도달하면, 엔진을 작동시키고, 가장 높은 점에 도달하면, 엔진은 정지하거나 공회전 상태로 작동한다.

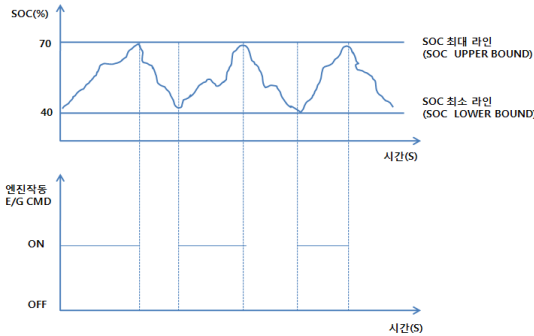


Fig. 3 HEV thermostat SOC control

Fig. 3은 SOC의 충방전 상태에 따른 엔진의 작동 명령을 그림으로 나타낸 것이다. 이 제어전략은 고속도로와 같이 가속 없이 일정 속도, 낮은 토크로 주행하는 경우, 엔진에 의해 SOC가 쉽게 충전될 수 있는 상황에서 적용하는 것이 효과적이다.

3.3 Base-line 제어(BCS)

BCS 제어는 SOC의 충방전 상태에 따라 엔진 작동점을 결정하여, 균형 있는 SOC와 연비향상의 효과를 끌어내는 제어방법이다. 배터리의 SOC가 낮을 경우, 배터리 충전을 위한 모드로 작동하고, SOC가 높은 경우, 요구 작동점에 따라서, HEV의 주행모드를 결정한다.

모터주행모드 Fig. 4에서 요구 엔진 속도가 V_e 보다 작으면, 모터로 주행한다. 요구토크가 엔진 OFF 토크보다 작은 경우에도, 모터로 주행한다. 이는 속도에 따른 엔진과 모터토크의 곡선의 성질에 따른 것이다.

하이브리드 주행모드 Fig. 4에서 요구토크가 최대토크 보다 큰 경우, 부족한 토크는 모터토크로 보충한다.

회생 제동모드 회생제동을 통해서 외부에서 전달되는 토크를 통해 배터리를 충전한다.

배터리 충전모드 Fig.5에서 배터리 SOC가 낮은 영역에 경우, 엔진은 효율이 좋은 토크 선상에서 작동하거나 요구토크보다 더 큰 토크를 발생시키면서, (엔진 OFF 토크) 잉여 토크를 이용하여, 배터리를 충전한다.

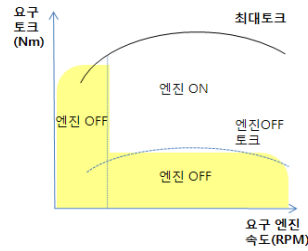


Fig. 4 BCS in high SOC

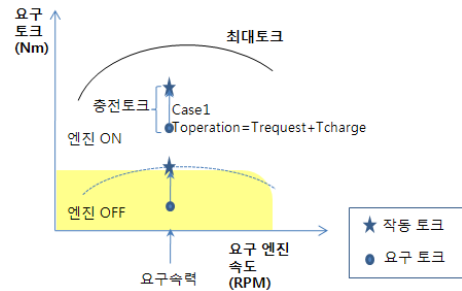


Fig. 5 BCS in low SOC

BCS에서 모터는 보조동력원의 역할로, 발진, 저속 주행모드에서는 모터주행 모드, 가속모드에서는 하이브리드 모드로 엔진을 보조하는 역할을 담당한다.

3.4 State-machine 제어

State-machine은 각각의 상태를 어떤 조건에 따라서 연결한 것을 의미한다. Fig. 6은 엔진 작동 상태를 State-machine을 통해 간단히 나타낸 것이다.

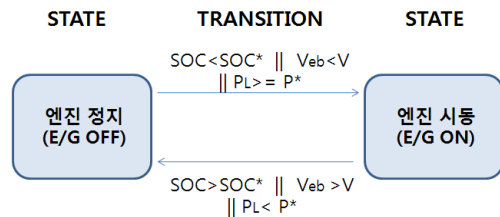


Fig. 6 HEV state-machine example

HEV에서 State-machine을 이용한 제어는 HEV 각각의 작동모드를 상태(state)로 정의하고, 모드간에 조건(condition)을 통해서, 다른 작동모드(next state)로 이동시키는 방법으로 제어한다.

HEV에서 State-machine을 이용하면, HEV의 주행모드 뿐 아니라, 배터리, 모터, 엔진 등 서브시스템을 포함한 상태를 변화할 때도 유용하다. 또한, 제어기를 구성함에 있어서, 이해하기 쉽고, 상태만 추가 혹은 삭제함으로써 구성이 편리하다.

3.4.1 State-machine 단계

State-machine을 이용한 HEV 주행모드 결정 제어는 아래와 같은 단계를 통해 설계할 수 있다.

- 1) HEV 차량 가능 작동모드(state) 식별
엔진, 클러치, 모터 등 각각의 서브시스템의 작동상태를 바탕으로 가능한 HEV 작동모드를 식별한다.

Table 1 Possible HEV operation mode

상태	HEV 상태	엔진	C/L	모터
1	OFF	OFF	분리	OFF
2	모터 주행모드	OFF	분리	주행
3	회생 제동모드(저속)	OFF	분리	발전
4	회생 제동모드(고속)	OFF	결합	발전
5	엔진 주행모드	ON	결합	OFF
6	가속 모드	ON	결합	주행
7	충전 모드	ON	결합	발전
8	엔진 정지	OFF	분리	주행
9	엔진 시동	ON	결합	주행
10	모터 방전모드	ON	결합	주행
...

- 2) 모드간 전이 조건 식별
Table 1에서 나온 10가지 작동모드 간에 전이 조건들을 식별한다.

- 3) 전이 조건 분석 및 출력신호 계산
작동모드 간에 자연스러운 변환이 이루어 질 수 있도록 에러를 식별하고, 출력신호를 계산한다. 예를 들면, 시스템 에러 > 운전자 요구 > 연비향상의 우선순위를 두는데, 이는 똑같은 상태 조건에서 가속모드(운전자요구)가 모터방전모드 충전모드(연비향상)보다 우선적으로 작동해야 차량의 자연스러운 모드전환이 가능하다.

3.4.2 State-machine Battery model

State-machine 제어를 이용하여, 배터리 SOC 상태를 제어, 모터 출력과워를 결정하는 모델을 만들어 분석하였다. SOC 궤적을 입력값으로 넣고, SOC를 추적하면서, 모터 출력과워를 출력값으로 하였다. 여기서, State-machine을 통해 현재 SOC 상태와 입력값을 비교하여, 충전 상태(state)를 결정하도록 하였으며, 모터 출력과워를 계산하는 로직은 배터리의 내부저항모델을 이용하였다. Fig. 7은 MATLAB SIMULINK로 설계한 모델이고, Fig. 8은 결과값이다.

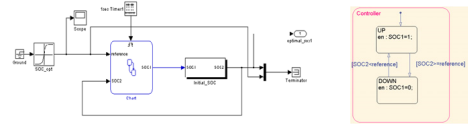
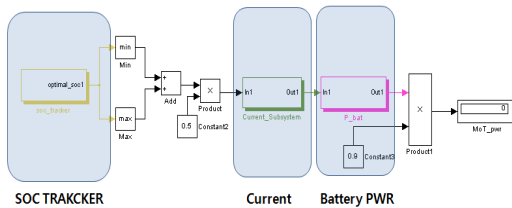


Fig. 7 State-machine model

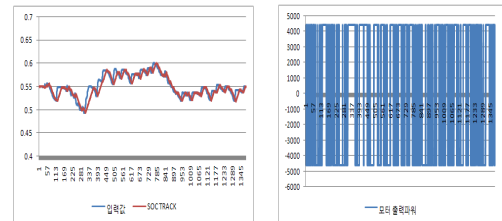


Fig. 8 SOC track value and motor power

4. 결론

본 연구에서는 HEV에 사용되는 제어 중 룰 기반 제어(RBC)에 대해서 연구를 수행하였다. 하지만, RBC의 경우, 현재 차량의 작동상태와 주행상태를 고려하지 않고, 단순한 배터리의 충전 상태 고려하기 때문에, 엄밀히 최고의 제어전략이라 하기 어렵다. 따라서, 오늘날 최적화를 기반으로 하면서, 실시간 제어전략이 가능한 다양한 제어기법에 대해서 연구가 이루어지고 있다.

앞서 연구한 RBC와 실시간 최적제어를 연비향상이 두드러지게 일어날 수 있는 특정 주행 사이클에 복합적으로 적용한다면, 더 나은 연비향상을 기대할 수 있을 것이다.

References

- [1] "Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles" Mehrdad sani...[et al], 2005.
- [2] Valerie H. Johnson, 2000, "HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions"