

0D 하이브리드 차량 시뮬레이션을 통한 에너지 매니지먼트 제안

원 현 우*

대진대학교 IT기계공학과

Development of 0D Model on Hybrid Electric Vehicles for Energy Managements

Hyun-Woo Won*

Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea
(Received 19 February 2024 / Revised 18 March 2024 / Accepted 22 March 2024)

Abstract : Currently, hybrid electric vehicles(HEVs) are attracting attention as an alternative to supplement the driving range limitations of battery systems and meet increasingly stringent emissions regulations. However, more strategic energy management development is required for HEVs to be considered effective in addressing real global environmental pollution and energy shortages. Thus, to locate the neglected problems and deficiencies in past research, this paper offers solutions that specify how to further improve vehicle energy efficiency with new technology. Specifically, this article introduces a methodology to direct hardware design on their various sub-system components, improve the energy efficiency of hybrid vehicles, and make these vehicles more sustainable. Simulations help develop virtual prototypes that make it possible to rapidly see the effects of design modifications. This paper is organized as follows: Section 2 describes the development of the HEV model. Then, section 3 illustrates the energy management topologies for each HEV's architecture. Section 4 details some examples of simulation results of HEVs, and section 5 presents the paper's conclusions.

Key words : Electrified vehicle(전동화차량), Vehicle simulation tool(차량 시뮬레이션), Energy management strategy(에너지 매니지먼트), Rule-based topology(규칙기반기술)

Subscripts

BEV : battery electric vehicle
EM : electric motor
EMS : energy management strategy
FCEV : fuel cell electric vehicle
GHG : greenhouse gases
HEV : hybrid electric vehicle
ICE : internal combustion engine
SOC : state of charge (Battery)
VST : vehicle simulation tool
WLTC : worldwide harmonized light vehicles test cycle

1. 서론

지구 온난화 방지를 위한 탄소중립화에 대한 노력은 많은 부분에서 진행되어지고 있다. 특히 전체 GHG (Greenhouse Gas) 배출의 25%가 운송과 수송 수단에 의한 결과이고 이 중에 상당 부분(70%)이 지상 수송 수단에 의한 것으로서,^{1,2)} 재생 에너지를 사용하는 차량 개발과 함께 차량의 전동화는 불가피한 상황이라 하겠다. 이러한 과도기적 상황에 배터리를 사용하는 배터리 전기 자동차(BEV) 이외에도 내연기관과 전기차가 혼합된 하이브리드 전동화 차량(HEV)과 수소 연료 전지를 사용하는 수소전기차량(FCEV)이 관심을 받고 있다.³⁻⁶⁾ 일부 정부의 노력에도 불구하고 당분간은 내연기관과 차량 전동화는 공존할 것으로 예상되어진다. 이런 관점에서 두가지 이상의 에너지를 사용하는 HEV의 기술적인

*Corresponding author, E-mail: energy@daejin.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

성능 평가와 함께 에너지 활용면에서의 평가가 함께 진행되어야 하겠다. 현재 HEV은 배터리 시스템의 주행거리 한계를 보완하기 위해 그리고 계속적으로 강력해지는 배출가스 규제를 충족하기 위한 대안으로 주목받고 있다. 하지만 HEV가 실질적인 지구 환경 오염과 에너지 부족을 해결하는 효과적인 방법으로 간주되기 위해서는 보다 전략적인 에너지 관리 개발이 요구된다. 이는 자칫 HEV가 효율적 에너지 사용을 무시한 채 환경규제를 위한 수단으로 사용될 경우, 단거리 도시 주행에서 엔진(ICE)을 적제하고 이동하는 전기차, 장거리 운행시 무거운 배터리를 적제하고 운송되는 내연기관 차량으로 전략될 수도 있기 때문이다.

원래, 에너지 관리 시스템(EMS, Energy Management Strategy)의 목적은 여러 전원의 조화로운 작동을 제어하고 차량 작동 상태, 전원 충전 상태, ICE 성능, 차량 속도 및 기타 요소를 종합적으로 고려하여 두 전원 사이에 필요한 전력 분배를 실현하는 것이다.⁷⁻¹³⁾ 이런 관점에서 EMS는 HEV의 관리 및 적용을 위한 핵심 요소이다. 불합리한 에너지 분배는 시스템의 작동 효율성을 저하시키고, 차량의 수명을 단축시키며, 심지어 주행 안전에도 영향을 미친다. 두 가지 에너지원으로 구성된 HEV 시스템은 주행 상황에 따라 ICE와 배터리의 운용 전략이 요구되며 이로 인해 같은 배터리 및 연료 용적량을 갖더라도 동일 사이클을 주행했을 때 소모하는 에너지량이 달라지게 된다. 대표적으로 에너지 관리 최적화를 위해 전기 사용량과 연료 사용량을 최소화하여 평가하는 에너지 사용 최소화 전략(ECMS, Energy Consumption Minimizing Strategy)이 활용되고 있으며 주행 중 배터리 SOC(State of Charge) 밸런스를 위해 SOC 오차에 대한 페널티를 부여하거나 전기 에너지의 가치를 조절하여 구성하는 적응형 에너지 최소화 전략(Adaptive - ECMS)이 적용되어 왔다.¹⁴⁾ ECMS 또는 AECMS는 SOC를 기준으로 제어 전략을 구성하기 때문에 실시간 제어 적용은 가능하지만 주행 상황 변화에 따른 대응에 적절하지 않을 수 있다. 이런 이유에서 본 논문에서는 HEV EMS의 새로운 방식을 제안한다. HEV 운영 모드의 선택적인 측면에서 본 개발자가 제안하는 파라미터(차량 속도, 출력, SOC)를 기반으로 사용자가 원하는 최적화 목적치(최소 에너지 소비, 연료량, CO₂ 규제 등)를 규정하고 이를 기반으로 상태 매개변수 값들을 최적화하는 방식으로 EMS가 진행되는 방식이다. 특히, 본 논문에서 사용하는 제어 방식은 Rule-based EMS를 기본으로 한 제어 방식이다. 배터리 충전 상태(SOC), 순간 전력 수요 등의 상태 매개변수를 통해 임계값을 설정한 후 “if else” 조건을 통해 전력 시스템의 출력 전력에 대한 에너지 사용 규칙을 Flow-charts

또는 Fuzzy Logic Toolbox™를 이용하여 규정한다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 규칙의 설정 및 경계값들은 GS 최적화(Global search optimization)를 통해 최적화되어진다. 즉 Global 최적화를 기반으로 한 EMS 방식으로써, 전문가의 경험에 의존하지 않기 때문에 결정론적 규칙을 기반으로 복잡한 운전 환경에 적응이 가능하다고 하겠다. 본 도구의 예측 제어 전략은 실시간 예측과 하위 시스템을 수정 및 최적화할 수 있는 기능을 갖고 있으며, 사용자가 하위 시스템의 성능과 내구적인 측면에서의 전략을 규정하고 논리 알고리즘을 적용할 수 있다.

2. 0D 차량 시뮬레이션 모델의 개발

HEV의 에너지 전략을 구현하기 위하여 MATLAB® Simulink®를 사용하였다. 사용 프로그램이 다양한 제어 및 에너지 관리 전략을 선택할 수 있는 부분과 HEV와의 호환성에 장점이 있다. 현재 많은 프로그램들이 광범위한 HEV 토폴로지를 제공하므로 사용자는 향상된 유연성을 갖고 개발된 다양한 프로그램을 선택할 수 있을 것이다. 본 연구의 규칙 기반 토폴로지를 갖춘 도구의 개발은 HEV의 다양한 제어 이론과 에너지 관리 전략의 한 형태를 보이고자 한다. 본 세션에서는 에너지 관리 전략을 위한 HEV 부품들의 제어 이론을 소개한다.

2.1 차량의 요구 출력 계산

차량 시뮬레이션의 입력값은 기존 계산 방식을 사용한다. 이는 차량의 제원과 운영 조건의 규정이 우선되어야 한다. 차량의 속도 데이터는 일반적으로 NEDC(New European Driving Cycle), WLTC(Worldwide harmonized light vehicles test cycle), RDE(Real Driving Emissions) 등과 같은 규제 사이클을 이용하거나 도시주행, 고속도로 운전 주행 등의 사용자가 설계한 운영 조건의 사용이 가능하다. 속도 프로파일을 기반으로 도구는 바퀴의 회전 속도, 가속도, 차량 동역학 방정식을 사용한 총 힘, 공기 저항력, 구름 마찰 손실, 추진력, 오르막 추진력을 계산하게 된다. 다음 식들은 본 시뮬레이션에 사용한 차량의 요구되는 총 힘의 계산예를 나타낸다.

$$\text{Total Force} = F_{\text{Aerodynamic}} + F_{\text{Rolling}} + F_{\text{Acceleration}} + F_{\text{Gradient}} \quad (1)$$

$$F_{\text{Aerodynamic}} = 0.5\rho C_D V^2 A \quad (2)$$

$$F_{\text{Rolling}} = C_R m g \mu \cos \theta \quad (3)$$

$$F_{\text{Acceleration}} = m_v a \quad (4)$$

$$F_{\text{gradient}} = mg \sin \theta \quad (5)$$

여기에서 V 는 차량 속도 [m/s], a 는 차량 가속도 [m/s²], ρ 는 공기 밀도 ($\approx 1.2 \text{ kg/m}^3$), A 는 차량 전장 면적 [m²], C_R , C_D 계수, m_v 차량 무게 [kg], g 는 중력가속도 [9.81 m/s²], μ 는 마찰계수 [≈ 0.01], α 는 주행 경사도 [rad]이다.

2.2 전기 모터 및 배터리 모델

EM 모델은 MATLAB® & Simulink® 라이브러리를 이용하거나 사용자가 정의한 실험치의 적용이 가능하다. 전압 및 효율 선도를 이용하여 2.1 세션에서 계산한 차량의 토크 및 속도를 사용하여 EM 모델에서 필요한 전류를 계산하게 된다. 뿐만 아니라 발전기는 외부 회로에서 사용하기 위해 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 것으로서 감속에 의한 회생 에너지나 ICE로부터 배터리 충전을 위한 생성 전류를 계산하는데 사용된다. 다음 식은 전기 모터와 발전기의 전류 계산 식을 보여준다.

$$\eta_{EM} = \frac{T_{Veh} \cdot \omega_{Veh}}{V \cdot I} \quad (6)$$

$$\eta_{Gen} = \frac{V \cdot I}{T_{ICE} \cdot \omega_{ICE}} \quad (7)$$

여기에서, T_{Veh} 는 차량 토크 [Nm], ω_{Veh} 는 차량 각속도 [rad/s], V 는 EM/발전기 전압 [V], I 는 EM/발전기 전류 [A], T_{ICE} 는 ICE 토크 [Nm], ω_{ICE} 는 ICE 각속도 [rad/s]이다.

배터리 모델은 MATLAB® & Simulink®의 배터리 모델을 사용하였다.^{18,19} 배터리 블록은 가장 널리 사용되는 충전식 배터리 유형을 나타내는 동적 모델이고 모델 매개변수는 방전 특성에서 파생된다. 함수는 충전 및 방전 주기 동안 배터리의 종류, 즉 납산, 니켈-카드뮴(Ni-CD), 니켈-수소화물(NiMH) 및 리튬 이온(Li-ion) 배터리에 대한 데이터를 바탕으로 설계되었고 본 연구에서는 리튬 이온 배터리 모델이 주로 사용되었다. 리튬이온 배터리 셀은 2개의 상수 등가회로 셀 모드를 사용하여 모델링되고 배터리 충전 상태인, SOC(%)는 아래 공식으로 계산된다 (단, $i(t) = dq/dt$).

$$SOC = 100 \left[1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right] \quad (8)$$

2.3 HEV의 작동 방식

HEV의 EMS에 앞서 차량의 작동 모드를 규정하는 것이 중요하다. 이는 제어 시스템이 결정하게 될 매개변수로써, 구동 사이클의 요구 전력에 따라 모드를 결정하고 다양한 요청을 충족함과 동시에 최상의 결과를 얻어야 하기 때문이다. 시스템이 한 전환에서 다른 전환으로 이동하기 위한 입력으로 간주되고 최상의 결과를 얻기 위해 이러한 값을 적절하게 수정할 수 있어야 한다. 이런 부분에서 HEV의 작동 모드를 이해하는 것은 HEV 제어 시스템 설계에 있어 중요한 부분이다. 본 차량 시뮬레이션 도구는 총 9가지의 가변 주행 모드를 정의하고 이들의 선택과 전환을 HEV의 조건에 맞추어 사용자가 규정하고 사용할 수 있도록 설계하였다. 제어를 위한 본 프로그램의 구동 모드는 다음과 같이 정의되고 Fig. 1은 HEV 모드와 HEV 아키텍처와 모드 적용의 예를 보여준다. IDLE 모드와 IDLE(GEN) 모드는 차량이 정지된 상태이다. 우선 IDLE 모드는 전체 시스템이 전력 생산 없는 정지 상태이다. IDLE(GEN) 모드는 차량은 정지 상태지만 배터리 SOC의 고갈로 인해 ICE가 발전기를 통해 배터리를 충전하는 상태이다. 배터리가 요구 SOC 수준에 도달하거나 주행 사이클에서 전력 요청이 있을 때까지 활성 상태로 유지된다.

주행 사이클 중에 ICE가 작동되지 않고 EM만으로 구동되는 모드는 다음과 같다. 우선, EV(Electric Vehicle의 줄임말) 모드는 차량 구동에 있어 요구 전력을 차량의 배터리 전기 전력만으로 충당하는 경우이다. 공급되는 전력을 통해 정지 상태에서 출발하고, ICE와 발전기는 정지 상태로 유지된다. E-drive 모드 또는 배터리 전용 모드라고도 한다. 이는 배터리의 전원만 EM에 공급되는 상태이고 이와 반대로 EM를 통해 회생 에너지를 이용해 발전하여 음의 전력을 회수함으로써 배터리 충전 상태를 제동(GEN) 모드라고 한다. 이 상태는 차량의 승차감을 위해 설계자가 규정할 수 있는데, 감속 시 차량의 회생 에너지 또는 제동력으로 인한 기계식 브레이크를 추가로 사용할지 여부를 결정하게 된다.

ICE와 EM이 동시에 작동하는 모드는 다음과 같고 이는 HEV의 아키텍처를 결정한다. ICE + GEN 모드 및 ICE + EM 모드의 경우 EM이 있는 ICE는 바퀴에 기계적으로 결합되어 병렬 HEV에 동력을 제공하는 방식이다. 이 상태에서 ICE에서 생산된 잉여 전력은 배터리 충전에 사용되며(ICE + GEN 모드), 필요한 추가 전력은 EM(ICE + EV 모드)을 통해 배터리에서 공급받게 된다. 이외에 ICE(Only) 모드는 병렬식 HEV의 경우만 가능하고 기존의 ICE 차량처럼 차량이 운행되는 상태이다.

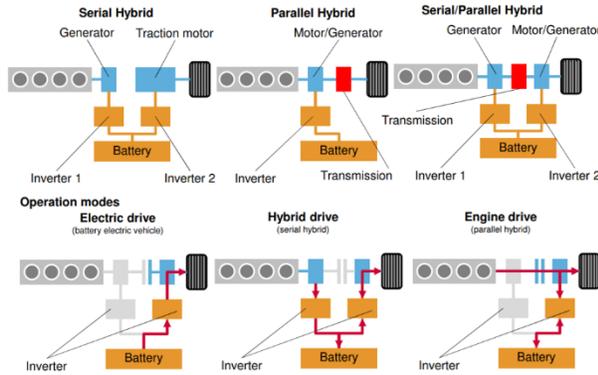


Fig. 1 Different mode cases and different HEV architectures

반면에 직렬 HEV의 경우, 주행 사이클의 차량 요구 전력, ICE 운전 영역에서의 출력을 바탕으로 설계자의 전략에 따라 모드와 운전 영역을 결정하게 된다. 일반적으로 요구 전력이 ICE 기대 전력만으로 충당이 가능한 경우, ICE(GEN) 모드를 사용한다. 직렬식의 경우, ICE와 발전기가 동일한 축에 결합되어 있기 때문에 발전기의 동력이 전기 기계에 전달되어 차량을 구동하게 된다. 이로 인해 ICE 운전영역이 병렬식보다 자유롭지만 효율이 저하되는 단점이 있다. 이로 인해 ICE가 제공하는 고부하 고효율 운전 영역에서 전력을 생성하고 남은 전력은 배터리에서 공급하는 방식으로 운영된다. 만약 차량에서의 요구 전력이 매우 높은 경우 ICE 전력으로만 감당할 수 없기 때문에 ICE와 EM이 병합된 형태로 운영되고 이는 ICE(GEN) + EV 모드이다. HEV 아키텍처에 따라 사용되는 HEV 모드는 위에서 설명한 총 9개 모드 중 6개 또는 7개 상태로 표현될 수 있다. 예를 들어 병렬 HEV에서는 7가지 모드(1-7)가 사용되고, 직렬 HEV에서는 6가지 모드(1-4, 8, 9)가 사용되고, 직렬/병렬(2 모드) HEV에서는 7가지 모드(1-4, 5)가 일반적으로 사용된다.

3. HEV 에너지 매니지먼트 전략

HEV 설계에 있어 다양한 하위 시스템 구성 요소와 해당 아키텍처를 결정하는 것과 함께 이를 통한 에너지 매니지먼트 전략을 수립하는 것이 중요하다. 이는 HEV 성능과 직접적인 영향이 있기 때문이다. 본 논문에서는 각 아키텍처의 상태를 고려한 맞춤 전략과 Fuzzy Logic Toolbox™(직렬식 HEV), Flow-charts(직/병렬식 HEV)의 사용 예와 GS 최적화를 통한 매개변수 계산 결과 방식을 보인다. 본 연구에서는 아키텍처마다 매개변수 규정과 최적화 방식을 설명하고 사용의 예를 보여준다.

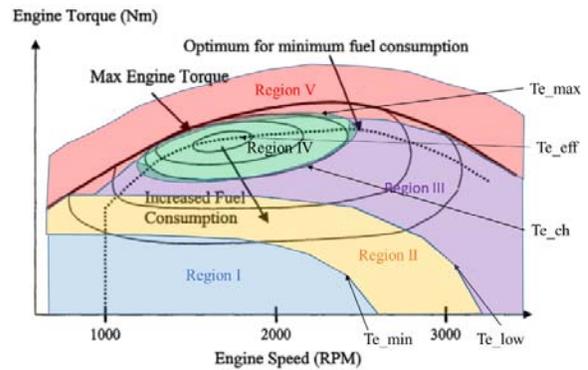


Fig. 2 Operation region divisions from ICE map for parallel HEVs

3.1 병렬식 HEV 경우

HEV 아키텍처 특성상 병렬식 HEV는 ICE와 차량구동축의 기계적인 연결이 가능한 형태이다. 이로 인해 ICE 운전 영역에 높은 영향을 받는 방식이라고 하겠다. 본 논문에서 소개하는 EMS 방식은 ICE의 출력, SOC를 매개변수로 사용하는 경우이다. 차량의 요구 출력에 따라 SOC를 고려하여 ICE와 EM출력 배분을 조절하는 방식이라고 하겠다. 병렬식 HEV에서는 일반적으로 7개의 작동 모드(Ch.2.3의 9 모드 중에서)가 운전 방식으로 사용된다.

Fig. 2는 운전 방식 선택을 위한 ICE의 운전 영역을 보인다. T_{e_low} 는 최소 토크이고, T_{e_ch} 는 충전 모드 토크의 한계를 나타낸다. 영역 IV(녹색)는 엔진의 최적 운전 구간으로써 주어진 차량의 출력 당 연료 소비가 가장 적은 영역이다. 점선 " T_{e_eff} "는 주어진 ICE 속도 별 최적 연비 영역을 나타내고 " T_{e_max} "는 엔진의 실질적인 최대 출력이다. 보다 높은 출력 요구 시 ICE와 EM의 조합이 필요하다고 하겠다. ICE 구간의 결정은 엔진의 출력과 효율에 따라 사용자가 구간의 숫자를 설정하고 최적화 작업을 통해 구간의 수치들을 결정하게 된다. 예를 들어 Fig. 2의 EV 모드(Region I), EV 또는 엔진 구동 모드(Region II), 충전 모드(Region III), 엔진 적극 활용 모드(Region IV), 엔진과 EM 하이브리드 모드(지역 V)등으로 구분하였다. 병렬식 HEV의 제어 전략을 공식화하기 위해 배터리 SOC와 차량 속도라는 두 가지 다른 매개변수가 고려된다. ICE의 가용 출력과 연비 효율을 고려하고 SOC의 상태에 따라 구역별 운전 방식을 제안함으로써 운전 모드를 선택하게 된다. SOC 또한 주요 매개변수로서 본 예시에선 5가지 레벨로 구분하였다. " SOC_min "은 배터리 기능에 대한 SOC의 최소 레벨이고 " SOC_low "는 최적화 측면에서의 낮은 SOC 레벨을 나타내는 레벨이다. " SOC_init "은 시뮬레이션 시작 SOC이고 " SOC_high "

는 높은 수준의 충전률을 나타낸다. 마지막으로 “SOC_max”는 더이상 충전이 불가능한 배터리의 최대 충전률을 나타낸다. 원칙적으로 사용자는 HEV 모델 도구를 이용하여 본인의 Rule-based 제어 토폴로지를 직접 설계할 수 있다. Fig. 2와 같이 각 작동 상태에 대한 판단 조건이 설정되면 요청에 따라 EV와 ICE의 목표 토크를 변경할 수 있다. 간단히 예를 들면, Region I은 연료 소비를 최소화하기 위해 EV 모드가 주로 사용되는 경제 구역이지만 엔진은 SOC가 정해진 값보다 낮은 위치에 도달한 경우에는 작동하게 된다. Region II는 SOC에 따라 EV 모드와 ICE 작동이 병행하는 구간으로써 ICE 작동시에는 잉여 전력으로 배터리를 충전하게 된다. Region III에서는 배터리가 충전되는 동안 휠에서 필요한 토크를 관리하기 위해 ICE가 고효율 영역에서 주로 작동하는 구간이다. EV 모드는 해당 지역의 SOC가 SOC_high 이상인 경우에만 운영된다. Region IV에서는 기본적으로 HEV가 기존 ICE 차량과 거의 동일하게 작동하며 ICE 맵에서 가장 높은 효율을 보이는 구간이다. Region V처럼 ICE 단독으로 요구 출력 달성이 불가능한 경우 EM과 ICE가 하이브리드 모드로 운용되게 된다. 위의 매개변수의 단계와 ICE 지역의 경계값들은 주어진 하부 시스템(배터리, EM, ICE, Gear box 등)의 크기와 성능에 따라 HEV 운전 조건(Driving cycle 등)에 따라 최적화를 통해 변화되어지는 값으로써^{20,21)} 본 EMS 기술의 주요 변수라 하겠다.

3.2 직렬식 HEV 경우

HEV 아키텍처 특성상 직렬식 HEV는 ICE와 차량구동축의 기계적인 연결이 완전히 분리된 형태이다. 이로 인해 ICE는 높은 자유도를 갖고 운영이 가능하다. ICE가 최적의 조건에서 운영될 수 있지만 기계적/전기적 에너지 변화의 손실은 무시할 수 없다. 구동축에 연결되는 EM의 경우, 차량의 전체 출력을 감당해야 하므로 높은 성능이 요구된다. 이런 측면에서 본 연구에서 소개하는 방식으로는 병렬식과 달리 EM의 출력과 SOC를 매개변수로 사용하는 경우이다. 예를 들어, 직렬식 HEV는 6개의 작동 모드(Ch.2.3의 9 모드 중에서)를 선택하여 운영 방식으로써 사용할 수 있고 SOC는 상태에 따라 병렬식처럼 5단계(SOC_min, SOC_low, SOC_initial, SOC_high, SOC_max)로 나눌 수 있다. EM은 직접 구동축에 연결되어 요구전력을 충족시켜야 하는데, SOC는 배터리와 ICE의 전력을 결정하는 변수로 사용했다. ICE에서 EM으로의 전력 공급적인 측면에서 사용자는 ICE의 운전 영역을 SOP(Single Operating Condition) 또는 다중 MOP(Multiple Operation Condition)로의 운영이 가능하며 이 선택은 구조와 제어의 단순성 및 효율성을 고려하여 결정하게 된다.

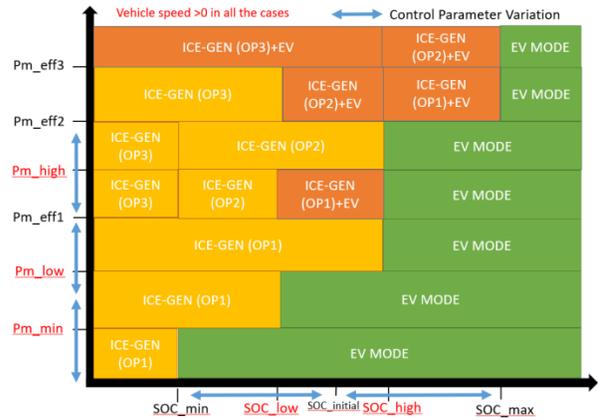


Fig. 3 A rule-based EMS for serial HEVs

다. Fig. 3은 MOP형 HEV의 모드 제어의 예를 보여준다. 일반적으로 직렬식 HEV의 제어 전략은 병렬식보다 비교적 간단하지만 MOP방식의 경우에는 ICE의 운전영역 다변화로 인해 보다 많은 선택권을 갖는다. 비교적 낮은 출력(Pm_min & Pm_low)이 요구되는 구간에서는 SOC가 SOC_min 또는 SOC_low 이하로 내려가지 않는 한 EM의 전력 수요에 따라 ICE는 정지 상태에 있고 SOC가 고갈되면 발전기를 통해 ICE의 전력으로 배터리가 충전되어진다. Pm_eff 이상의 요구출력 시에는 SOC에 따라 EM과 ICE의 출력을 결정하기 위해 많은 경우의 수가 존재한다.

Fig. 3은 ICE 운전 영역을 3부분으로 나눈 경우로써, OP2는 주어진 엔진맵에서 가장 효율적인 작동 조건이고, OP1은 토크와 속도가 낮고 상대적으로 효율이 높은 지점이며 OP3는 엔진의 최대 출력 구간이다. EM의 변위는 전력 수요에 따라 “Pm_min”부터 “Pm_OP3”까지의 범위로 나뉘고 “Pm_min”, “Pm_low”, “Pm_high”는 사용자의 요구에 따른 최적화값으로 정의하고 “Pm_eff1”, “Pm_eff2”, “Pm_eff3”은 OP1, OP2, OP3에서 ICE의 토크와 속도의 조합에 의해 계산된 EM 출력값이라 하겠다. 다음과 같은 전략과 함께, EV 모드는 주로 Pm_eff1(예: EM의 전력 수요에 따라 SOC_min, SOC_low 또는 SOC_initial) 보다 낮은 출력에서 연료의 소비를 최소화 하는데 사용되며, ICE는 SOC가 기준값보다 낮을 때만 배터리를 충전하기 위해 실행된다. Pm_eff1 이상의 출력에서는 EV 모드는 제약적이고 ICE는 운전 영역(OP)은 결국 요구 출력에 따른 SOC의 상태를 기준으로 정해진다고 하겠다. ICE와 배터리 전력이 함께 사용되는 ICE(GEN) + EV모드와 ICE로부터의 전력만을 이용하는 ICE(GEN)의 선택은 최적 효율을 고려한 설계자의 의견 수렴이 가능하다. 사용자가 정의한 이런 모든 규칙들은

Fuzzy logic toolbox로 규정되어진다. 이런 복잡한 제어와 구조에도 불구하고 MOP를 사용하는 목적은 ICE 작동의 유동성을 통해 최적의 연료 소비를 유지하고 운전과 정지의 빈도를 줄이는데 있다. 또한 시스템이 적절한 수준의 SOC를 유지하기 위한 다양성을 유지하기 위함이다. 본 연구에서의 예는 차량 시뮬레이션의 단순화와 효율성을 위해 1단 변속기 개념을 이용하였지만 더 많은 수의 기어의 사용 또한 가능하다.

반면에, 보다 단순한 제어 방식의 SOP(Single Operating Condition) HEV 설계도 가능하다. 운영 영역의 단순화로 인해 제어 전략은 비교적 간단하다. Fig. 3에서 같은 색깔이 모드의 변화를 나타낸다고 볼 수 있다. 이 경우, ICE와 발전기는 모두 가장 효율적인 영역에서 작동되어진다. SOP형 HEV는 RE(Range Extend)-HEV에 주로 사용되는 방식이고 본 제어전략은 FCEV에도 적용이 가능하다 하겠다. Fig. 4는 SOP 직렬식 HEV의 WLTC에서의 최적화를 통한 모드 변환의 설정 결과의 예를 나타낸다. 각 색깔들은 모드의 변환을 표현한다.

3.3 직/병렬식 (2 mode) HEV의 경우

직렬식과 병렬식을 혼합한 2-mode HEV에서는 클러치 또는 동력 분할 기어 세트를 사용하여 한 구성에서 다른 구성으로(즉, 직렬 시스템과 병렬 시스템 간) 전환이 가능한 경우가 일반적이다. 구조의 복잡성과 기어 방식의 다양성 때문에 직렬/병렬식 HEV 구성과 동작 원리를 정확히 적용하는 것은 매우 복잡하다. 하지만 제어적인 측면에서의 단순화는 가능하고 앞서 설명한 직렬식 HEV의 제어 방식과 유사한 제어 전략을 갖는다. 차이점은 병렬식 HEV의 모드 중에서 ICE(only)와 같은 ICE와 차량의 기계적 연결이 가능한 것과 직렬식 HEV와 같이 전원(EM 및 발전기가 있는 ICE)을 조합할 수 있는 유연성이 있다는 것이다. 유연성이 향상되면서 HEV의 9가지 작동 모드(Ch. 2.3)가 사용이 가능하지만 일반적으로 저

속에서는 직렬 방식으로 장거리 고속 운전에는 병렬식 형태로 운영된다. Fig. 5는 직/병렬식 HEV 제어 전략의 한 예를 보여준다(7 모드의 사용).

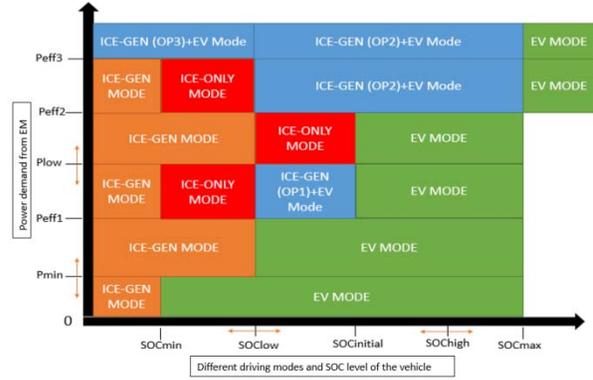


Fig. 5 A rule-based EMS using flow-charts for serial/parallel HEVs

속 및 저출력(직렬 하이브리드와 같이 P_{m_eff1} 미만)에서 차량은 EV 모드로 작동하며 ICE의 상태는 SOC 값에 따라 결정된다. 중간 출력 구간(직렬 하이브리드와 같이 P_{m_eff1} 과 P_{m_eff2} 사이)에서는 SOC에 따라 직렬 및 병렬 시스템이 혼용된다. 효율적인 측면에서 병렬식 시스템이 주로 사용된다. 제어적인 측면에서 하드웨어 구성에 따른 기어, 샤프트에 직접 작용하여 차량의 토크와 효율 등을 고려하여 출력을 보정하여야 한다. EMS는 EM과 ICE에 의해 생성되는 토크의 비율을 결정하게 된다.

4. HEV 모델 최적화와 검증

Rule-based EMS의 토폴로지는 속도, 토크, 전력 수요, 배터리 등의 특정 매개변수를 기반으로 규칙에 접근 방식으로 개발되었지만 몇 가지 중요한 결과를 달성하기 위해 매개변수의 최적화가 필요하다. 예를 들어, 에너지 사용 최적화, 연료 소비 최소화 또는 부품의 내구성을 위한 배터리 및 ICE 사용의 빈도 등에 관한 사항이다. 이는 HEV 도구 사용의 목적으로써 이를 통해 최적의 하드웨어 설계와 EMS의 설계가 가능하기 때문이다. 본 시뮬레이션 도구에서는 이전에 설명하였듯이 복잡한 운전 환경에서의 조건들을 규정하고 제어의 규칙을 설정하기 위해 Fuzzy Logic Toolbox™ 또는 flow-charts의 사용이 가능하도록 설계하였다. 이러한 규칙을 기반으로 GS (Global Search) 알고리즘을 사용하여 매개 변수의 최적화 설계 과정을 수행하게 된다.

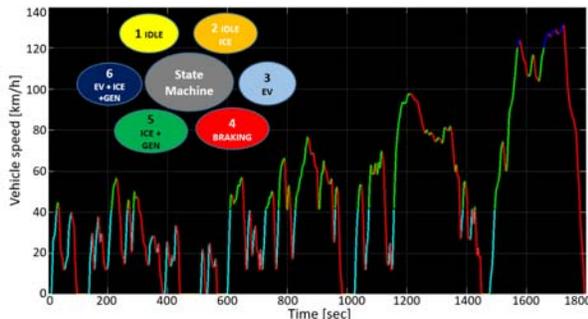


Fig. 4 A mode switching for a serial HEV(SOP) on WLTC

4.1 HEV 모델 최적화(GS 알고리즘)

최적화 작업은 EMS에 대한 모든 매개변수의 입력값을 최적화 도구로 정의하고 시뮬레이션 효율성과 관련된 사용자의 설정을 바탕으로 진행되어야 한다. GS 최적화 방식은 연속 문제와 이산 문제에 대한 최적의 솔루션을 찾고, 절충 분석을 수행함으로써 최적화 알고리즘과 응용 프로그램에 통합하는 다양한 해결책이 포함되어 있다. GS 최적화 방식의 한 예는 Subscript(Fig. 9)에서 보여준다. 이 예시는 HEV의 환경 규제(Non-plug in HEV)에 입각하여 주어진 유럽의 운전조건에서(WLTC) 시작과 최종점에서의 같은 SOC를 유지하는 상태에서의 HEV가 배출하는 최소의 이산화탄소를 계산하는 방식으로 진행하였다. 최적화 과정을 통해 주어진 하드웨어의 매개 변수값들을 산정하는 것을 목적으로 하며 최적화의 반복을 통해 주어진 하드웨어의 최적화 이외에 다양한 용량의 하위 시스템(배터리, EV, ICE, 기어 등의 용량)을 설계하는 데 최적화가 사용될 수도 있다.

4.2 HEV 모델 보완

HEV 제어는 에너지의 적절한 사용 뿐 아니라 에너지 손실을 최소화하는 우수한 EMS를 통해 HEV 구성 요소의 효율성을 향상시키는 것에 있다. HEV는 변속기 또는 발전기와 연결된 ICE와 같은 구성 요소 간의 다중 연결을 통해 구동되고 배터리는 EM을 통해 전력을 제공하며 다양한 변속기/인버터를 사용하여 서로 결합되어 있다. 예를 들어, ICE는 높은 효율성을 위해 고효율 운전 영역에서 작동되어야 하지만 이것이 항상 최선의 경우는 아니다. HEV의 아키텍처에 따른 구성 요소에 따른 유연한 EMS도 매우 중요한 문제이기 때문이다.

본 도구에서는 ICE, 발전기, 기어 및 EM과 같은 구성 요소의 효율성을 주어진 하드웨어의 구성에 맞게 조정하여 EMS가 진행되도록 설계하였다. 배터리와 ICE를 통한 최종 출력, 회생 에너지와 ICE를 통한 추가적인 배터리의 충전 등과 같은 작동에서는 항상 에너지 손실이

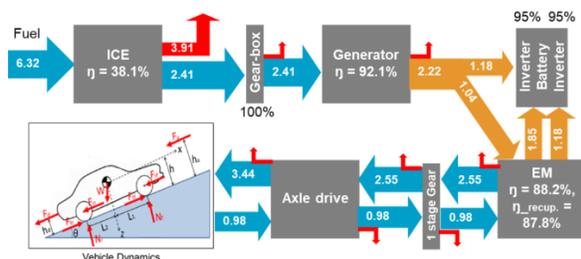


Fig. 6 Energy balance analysis for each component on a serial HEV simulation(all energies in kWh)

발생한다. 이런 손실은 HEV 아키텍처 및 구성 요소에 따라 다르다. 대표적인 예가 ICE의 출력 효율은 기계적으로 연결된 병렬식과 직렬식이 다른 것과 같은 경우이다. 또한 변속기는 주어진 출력에서 엔진의 최고 효율 라인에 가능한 한 가깝게 작업점을 조절하는 데 사용되는데 이로 인한 에너지 손실은 시뮬레이션에서는 Fig. 6의 예와 같이 각 구성 요소의 에너지 균형을 고려함으로써 보정하게 된다. 빨간색 화살표는 에너지 손실을 나타내고 기계적 에너지 전달은 파란색으로 표시되며 전기 에너지는 주황색으로 표현하였다.

4.3 HEV 모델 결과를 통한 검증

본 세션에서는 HEV 시뮬레이션 모델 사용을 설명하기 위해 일부 시뮬레이션 결과를 소개한다. 본 모델에 고려되는 차량은 전형적인 중형 유럽 C-segment 승용차이다. 본 시뮬레이션에 사용된 차량 매개변수는 배터리 없이 차량 중량 1500 kg, cw값 0.3, 전면 면적 2.28 m², A 및 동적 휠 반경 0.230 m였다. 배터리 무게는 14.4 kg/kWh로 간주되었고 시뮬레이션 중에 먼저 다양한 구성 요소에 대한 개별 모델의 검증 후 전체 모델을 완성하였다. 하이브리드 구성(예: EM, 기어 세트, ICE, 배터리 등)이 무작

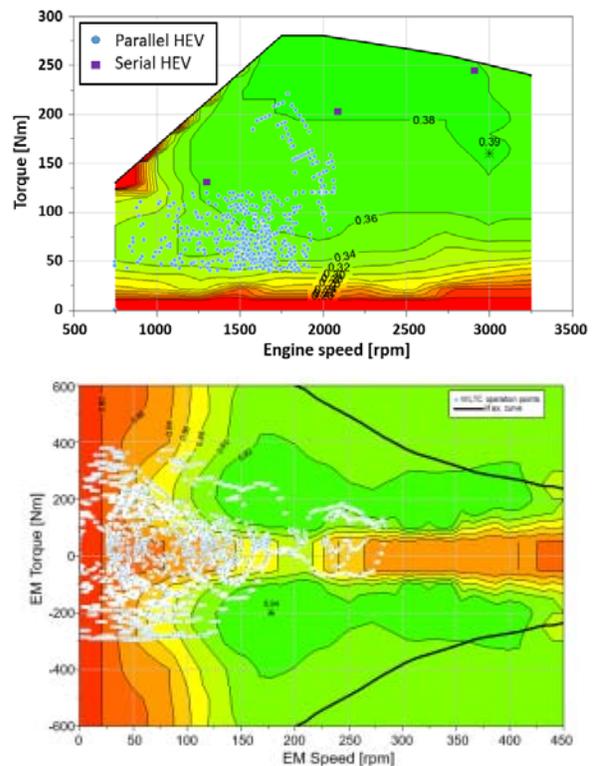


Fig. 7 Operating points of the ICE(top) and EM(down) for a parallel hybrid and a serial hybrid on WLTC

위로 선택되었으며, GS 최적화를 통한 시뮬레이션 결과를 기반으로 구성 요소 및 제어 로직이 업데이트되었음을 의미한다. 최적화 프로세스에서는 하이브리드 시뮬레이션의 복잡성, 배기가스 배출 및 연료 소비를 평가하기 위한 결과 비교가 가능하다. 시뮬레이션에 필요한 시간은 주행 사이클에 대한 하이브리드 시뮬레이션의 단일 지점 계산에 5초 미만이 소요된다. 예를 들어, 사용자가 매개변수에 대한 일부 관련 경계값을 관리하는 경우 다양한 매개변수 (전력 수요, SOC, 기어비, 목표 매개변수 e.g. CO₂ 등)에 대한 GS 최적화는 단시간에 가능하지만 HEV 구조 설계 즉 구성요소와 아키텍처에 대한 다양한 평가 시뮬레이션을 수행하는 데 약 3일이 필요함을 의미한다.

Fig. 7은 병렬식 HEV와 직렬식 HEV의 시뮬레이션 결과 ICE(1.6L CI ICE)의 WLTC 주행에서의 운전 영역과 직렬식 HEV에 대한 EM(80 kW)의 최종 에너지 가중 작동 지점을 보여준다. 병렬식 HEV 시뮬레이션 결과에 의하면 ICE의 평균 제동열효율(BTE)이 약 33 %로 하이브리드화가 적용되지 않은 기존 차량에 비해 상대적으로 높은 효율성을 보였다. 이는 기어비와 GS 최적화 프로세스를 통해 WLTC 운영 시, ICE에서만 약 2 % 더 높은 효율이 달성된 결과라 하겠다. HEV 모델은 EM, 발전기, 배터리 및 기어 세트와 같은 하이브리드 구성 요소의 설계와 선택에 적응적으로 사용될 수 있다. Fig. 7에서 보이듯이, 첫 시뮬레이션 시에 직렬식 HEV에 EM(80 kW)의 평균 효율은 약 87.8 % (인버터의 경우 83.4 %)였다. 최적화 과정에서는 변속비 변경 가능성을 포함하여 적응된 차축 구동 비율을 확인했을 때, 최적화를 통해 EM의 평균 효율이 최대 90 %까지 도달할 수 있었다. 이러한 과정은 구성요소와 기어 세트의 조정을 통해 고효율 영역으로 전환한 결과이고 추가적인 효율 향상을 위해서는 EM 또는 인버터의 교체 또한 설계과정에서 고려할 수 있다.

Fig. 8은 HEV 시뮬레이션(Non-Plug-in HEV)을 통해 얻은 ICE의 속도, 토크, 출력, 연료 소비에 대한 결과가

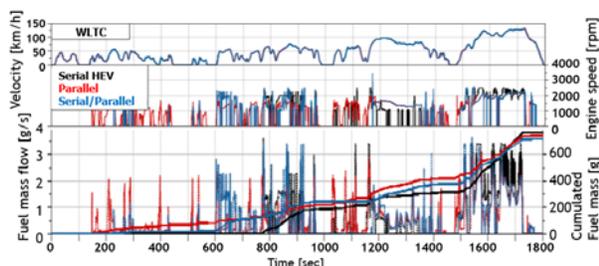


Fig. 8 Vehicle speed, engine speed and fuel consumption of ICE with different hybrid configurations(WLTC)

다. 모든 HEV의 하위 시스템은 2.0 kWh의 배터리, 80 kW의 EM 및 50 kW의 발전기로 규정하고 다양한 HEV 시스템의 운영 방식을 비교하였다(SOC의 초기와 최종값은 같다). 병렬식 HEV 경우, WLTC 운전 초반의 EV영역이 가장 짧고 배터리와 ICE의 전력 공유 기간이 더 길어진다. 이는 같은 사이즈의 배터리에도 불구하고 병렬식 HEV에서는 ICE의 기계적 동력과 배터리로부터의 동력의 적절한 조화가 보다 효과적이기 때문이다. 직렬식 HEV의 경우 SOC 유지를 고려한 최대의 EV 모드 구간이 WLTC 초기 저속 구간에 운영되며 후반부에는 배터리의 SOC(충전 상태) 값에 따라 내연기관(ICE)의 운전 상태가 결정된다. 직렬/병렬 HEV는 시스템 복잡성에도 불구하고 SOC 및 연료 소비 최소화를 위한 EMS에 더 많은 유연성을 제공한다. 연료 소비량 적인 측면에서 직렬/병렬식 HEV가 가장 낮은 연료 소비 결과를 갖는 이유이다.

5. 결론

본 논문에서는 규칙 기반 제어 전략을 기반으로 한 상세한 HEV 시뮬레이션 방법을 제시했다. 이 모델은 설계 엔지니어에게 부품 선택의 효과를 조사하고 HEV용 제어 시스템 및 자동 최적화 프로세스를 개발할 수 있는 능력을 제공하기 위해 도입되었다. ICE/변속기, EM/발전기 및 배터리 패키지를 포함하여 병렬, 직렬 및 직렬/병렬 하이브리드의 전체 드라이브트레인 시스템이 개발되었다. 모든 작동 모드 간의 상호 작용은 Fuzzy Logic Toolbox™ 또는 Flow-charts 통해 사용자의 논리 구현이 가능하고 매개 변수들은 GS 알고리즘을 사용하여 최적화하였다. 모델 개발 과정에서 모듈성, 유연성, 사용자 친화적인 인터페이스 측면이 강조되었다. 본 HEV 모델을 사용한 시뮬레이션 결과의 예는 HEV의 에너지 매니지먼트를 위해 본 모델이 유용함을 보여 주었다. 이 결과 병렬식 HEV는 ICE의 기계적 동력과 배터리로부터의 동력의 적절한 조화가 효과적인 특성이, 직렬식 HEV는 EV 모드 구간의 최대 활용이 효율적인 부분에서 중요함을 보였다. 뿐 아니라 직렬/병렬 HEV는 시스템 복잡성에도 불구하고 SOC 및 연료 소비 최소화를 위한 EMS에 더 많은 유연성을 제공하므로 연료 소비량 적인 측면에서 가장 낮은 연료 소비 결과를 갖을 수 있었다. 이 비교의 예를 통해 본 프로그램이 상용 HEV 차량들의 특성 비교와 설계에 유용함을 증명하였다.

References

- 1) European Commission, The European Green Deal, COM (2019) 640 Final, 2019.

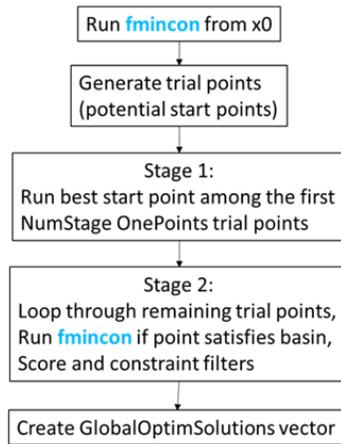
- 2) ICCT Report, The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO₂ Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation,” January 2018, www.theicct.org.
- 3) Commission Regulation(EU) 2017/1151, June 2017. Available online: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/oj>, Accessed on 24 November 2021.
- 4) M. Sens, Maßgeschneiderte Technologiepakete für Hybridantriebe Experten-Forum Powertrain, In Ladungswechsel und Emissionierung/Reibung in Antrieb und Fahrzeug/Simulation und Test; ATZ Live: Hanau, Germany, 2019.
- 5) H. Abi, Global Electric and Hybrid Light Vehicles Market—Forecasts to 2031, 2017 Q1 Edition; QUBE by Just-Auto: London, UK, 2017.
- 6) D. W. Gao, C. Mi and A. Emadi, “Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles,” Proceedings of the IEEE, Vol.95, pp.729-745, 2007.
- 7) Y. Lin, D. Qin, Y. Liu and Y. Yang, “Control Strategy for All the Mode Switches of Hybrid Electric Vehicle,” Advances in Mechanical Engineering, Vol.8, No.11, 2016.
- 8) C. Yin, S. Wang, C. Yu, J. Li and S. Zhang, “Fuzzy Optimization of Energy Management for Power Split Hybrid Electric Vehicle Based on Particle Swarm Optimization Algorithm,” Advances in Mechanical Engineering, Vol.11, No.2, Paper No.1687814019830797, 2020.
- 9) P. Chen, C. Yang and K. Huang, “Development of Energy Control System for Parallel Hybrid Power System Using Dynamic Equations and Fuzzy Theory,” Advances in Mechanical Engineering, Vol.12, No.11, Paper No.1687814020966927, 2019.
- 10) Y. Zou, R. Huang, X. Wu, B. Zhang, Q. Zhang, N. Wang and T. Qin, “Modeling and Energy Management Strategy Research of a Power Split-Hybrid Electric Vehicle,” Advances in Mechanical Engineering, Vol.12, No.10, Paper No. 1687814020962624, 2020.
- 11) S. Sanchez-Solano, M. Brox, E. del Toro, P. Brox and I. Baturo, “Model-Based Design Methodology for Rapid Development of Fuzzy Controllers on FPGAs,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.9, pp.1362-1370, 2012.
- 12) S. Delprat, G. Paganelli, T. M. Guerra, J. J. Santin, M. Delhom and E. Combes, “Algorithmic Optimization Tool for the Evaluation of HEV Control Strategies,” Proceedings of the Electric Vehicle Symposium(EVS-16 by TIB), Beijing, China, 12-16 October, 1999.
- 13) A. Brahma, Y. Guezennec and G. Rizzoni, “Optimal Energy Management in Series Hybrid Vehicles,” Proceedings of the 2000 American Control Conference, Chicago, IL, USA, 28-30 June 2000.
- 14) X. Lue, S. Li, X. He, C. Xie, S. He, Y. Xu, L. Fang, M. Zhang and X. Yang, “Hybrid Electric Vehicles: A Review of Energy Management Strategies Based on Model Predictive Control,” Journal of Energy Storage, Vol.56, Paper No.106112, 2022.
- 15) S. Rimaux, M. Delhom and E. Combes, “Hybrid Vehicle Powertrain: Modeling and Control,” Proceedings of the Electric Vehicle Symposium (EVS-16 by TIB), Beijing, China, 12-16 October, 1999.
- 16) Y. Bai and D. Wang, “Fundamentals of Fuzzy Logic Control-Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications,” Advances in Fuzzy Logic Technology and Industrial Applications, pp.17-36, 2006.
- 17) S. Sanchez-Solano, M. Brox, E. del Toro, P. Brox and I. Baturo, “Model-Based Design Methodology for Rapid Development of Fuzzy Controllers on FPGAs,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.9, pp.1362-1370, 2012.
- 18) M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance,” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, pp.504-511, 2006.
- 19) A. A. Pesaran, “Battery Thermal Models for Hybrid Vehicle Simulation,” Journal of Power Sources, Vol.110, pp.377-382, 2002.
- 20) S. Delprat, G. Paganelli, T. M. Guerra, J. J. Santin, M. Delhom and E. Combes, “Algorithmic Optimization Tool for the Evaluation of HEV Control Strategies,” Proceedings of the Electric Vehicle Symposium(EVS-16 by TIB), Beijing, China, 12-16 October, 1999.
- 21) T. Shi, F. Zhao, H. Hao and Z. Liu, “Development Trends of Transmissions for Hybrid Electric Vehicles Using an Optimized Energy Management Strategy,” Automotive Innovation, Vol.1, pp.291-299, 2018.
- 22) The Outlook and Reference on Mathworks Studio in MATLAB® and Simulink® for Global Search Algorithm, Available online: <https://in.mathworks.com/help/gads/how-globalsearch-and-multistart-work.html>.

Subscripts

GS 최적화 기본 방식²²⁾은, 첫째 GS는 fmincon을 실행

하여 사용자의 조건을 기준으로 분산 탐색 방법(Scatter search method)을 이용한 최적화 방식을 설정하게 된다 (Fig. 9). 초기에 시도된 결과치를 기준으로 분산 탐색 방법은 이를 시작 지점으로 설정하게 된다. 그 다음 1단계에서 GS는 초기 데이터 중에서 찾는 적절한 결과를 갖는 것들을 필터링하고 상호 작용하도록 설정을 한다. 2단계에서 GS는 Fmincon을 실행하여 나머지 실험의 반복을 통해 최적화 전략을 자동화한다. 마찬가지로 이는 최적의 솔루션에 도달할 때까지 가능한 모든 경우의 상호 작용에 대한 계산을 수행하게 된다. 이 프로세스를 통해 최종적인 최적화가 가능하다. GS 최적화 접근 방식은 계산의 시간을 최소화하여 최적의 매개 변수를 실시간 정의, 예측하는 전략이라 하겠다. 본 최적화 기능은 실제 프로세스에 적용이 가능하고 HEV 차량 설계 뿐 아니라 차량 ECU(Electronic Control Unit) 발전과 함께 차량 EMS에 적용이 가능한 기술이라 하겠다.

Global Search Algorithm



Example of fmincon for low CO2 in the tool:

```

fmincon f(x) {
    Power demand: P1<P2<P3<P4...
    P1_MTX=[1:1:10]...
    SOC: S1<S2<S3<S4...
    S1_MTX=[20:2:40]...
    SOC_threshold=60;
    INDX=find(SOC_MTX < SOC_threshold);
    SOC_MTX(INDX)=nan;
    CO2_MTX(INDX)=nan;
    [C, I,...]=min(CO2_MTX(:));
    [I1,I2, I3...]= ind2sub(size(CO2_MTX),I);
    SOC_opt=S1_MTX(I3)...
    CO2_min=C
}
    
```

Fig. 9 Algorithm of GS optimization²²⁾ and example of fmincon for minimizing CO₂ emissions in the simulation