

하이브리드 자동차의 제어

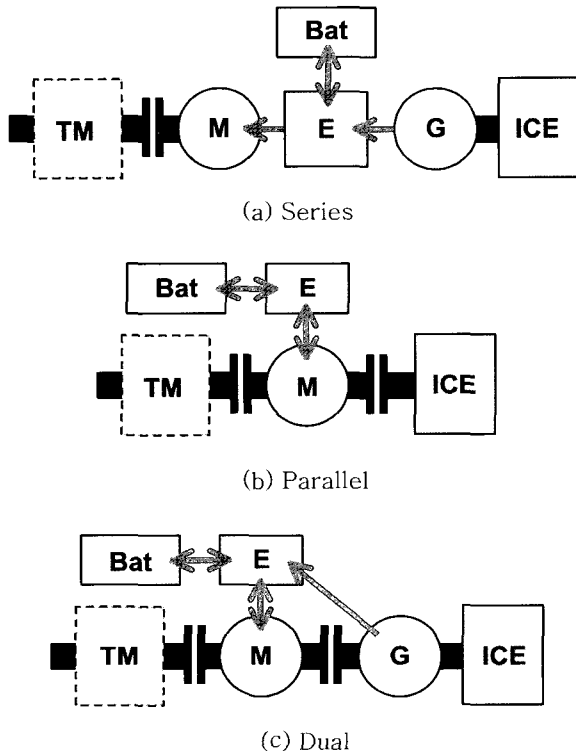
이형철

한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

1. 서론

하이브리드 자동차 (hybrid vehicle, HV, or hybrid electric vehicle, HEV)는 기존의 내연기관 자동차로 인한 환경문제나 석유자원 고갈에 따른 문제들을 줄일 수 있는 방안의 하나로 활발히 연구되고 있다. 특히 최근에는 좀 더 에너지 효율적이고 낮은 비용의 하이브리드 추진 시스템을 만드는데 많은 연구투자가 이루어지고 있다.

하이브리드 자동차는 최소한 두 개 이상의 에너지변환기와 두 개 이상의 에너지원을 가지는 차량 추진 시스템이므로, 내연기관과 전기기계 (electric machine)들 사이의 배열 및 작동의 방식에 따라 몇 가지 서로 다른 구조의 시스템을 만들 수 있다. 그 중, 특히 세가지 형태, 즉 직렬형(series)과 병렬형(parallel) 및 이중형 (dual) 이 많이 연구되었다. (그림 1)



(ICE: 내연기관, TM: 트랜스미션, M: 모터, G: 제너레이터, Bat: 배터리, E: 일렉트로닉스)

그림 1. 서로 다른 구조의 하이브리드 시스템.

직렬형의 경우 자동차의 추진력은 전적으로 전기모터에 의해 발생되며, 엔진은 제너레이터를 돌려 배터리를 충전시키는 용도로 사용되는데, 대규모 에너지 용량을 다루는데 보다 효율적이라고 알려졌다. 반면, 병렬형은 전기모터와 엔진이 동시에 혹은 단독으로 추진력을 발생시킬 수 있는 구조이며, 고속이나 급가속 시 등의 경우에 필요한 높은 파워를 효율적으로 생성하므로 개인용 자동차에 좀 더 적합하다고 여겨진다. 이중형은 Toyota의 Hybrid Synergy Drive와 같이, 기본적으로는 병렬형의 작동 방식을 따르면서, 모터 이외에 제너레이터가 따로 설치되어 좀 더 다양한 기능을 수행하는 시스템이다.

하이브리드 자동차의 연료절감은 엔진의 크기를 줄이거나 제동 에너지를 회생시키는 등의 자명한 이유에 의해서도 얻을 수 있지만, 동력의 발생이 연료경로와 전기경로로 분리되어 있으므로, 이를 최적으로 제어 함에 의해서도 얻을 수 있다. 따라서, 특히 병렬이나 이중형 하이브리드 자동차의 성능과 연료절감효과는 이러한 파워분리제어 (power split control)에 의해 큰 영향을 받는다.

이 글에서는, 제어대상으로서의 하이브리드 시스템의 하드웨어와 각 구성 부품에 대한 간략한 설명을 하고, 하이브리드 시스템의 제어 알고리즘 중 파워분리제어와 관련된 supervisory control 에 대해 알아본다.

2. 제어 하드웨어의 구성

현재 시판되고 있는 하이브리드 자동차는 대부분의 경우 병렬형이나 이중형이며 시스템의 용량이나 기본 제어 방식에 따라 크게 세가지 타입으로 분류할 수 있다. 첫 번째 타입은 가속 시에만 좀 더 많은 파워를 공급해주기 위해 소형의 배터리와 모터로 구성되는 42V의 전기모터추진시스템으로, 엄밀한 의미에서는 하이브리드 자동차에 넣지 않을 수도 있다 (예를 들면, Nissan March). 두 번째 타입 (assist type)은 10-20kW 정도의 모터를 장착한 시스템으로, 가속 시에 엔진을 보조 (assist)하여 출력을 높이고, 정차 시에는 엔진을 정지 시키며, 감속 시에는 배터리를 충전하는 등의 기본적인 하이브리드 기능을 수행한다. (예를 들면, Honda Insight/Civic의 Integrated Motor Assist). 마지막 타입 (full type)은 20kW이상의 모터와 대형의 배터리 팩을

사용하는 시스템으로 assist type의 기능 외에도 다양한 추가 기능, 예를 들면 5개의 다른 운전 모드와 더욱 강력한 구동력 등의 장점을 지닌다 (Toyota Prius의 Hybrid Synergy Drive).

2.1. Honda IMA와 Toyota HSD

현재 시판되고 있는 하이브리드 자동차 중 Honda의 IMA (Integrated Motor Assist)와 Toyota의 HSD (Hybrid Synergy Drive)는 비록 같은 타입의 모터를 사용하고 있지만 약간 다른 형태의 구조와 작동방식을 보여준다. IMA는 비교적 소형의 모터 겸 제너레이터 하나를 사용하므로 구동력 보조 시에는 모터의 기능을, 배터리 충전 시에는 제너레이터의 기능을 수행하며 두 가지 기능을 동시에 할 수 없다. 이에 반해 HSD는 모터와 제너레이터를 따로 장착하여 모터는 구동과 엔진시동용으로 제너레이터는 배터리 충전용으로 사용하므로 가속 시나 언덕길에서 장점을 갖는다. 또한, HSD의 경우 구동용 모터는 비교적 대형을 사용하므로 42mph까지도 단지 모터만을 사용하여 구동할 수 있으며, 이는 교통이 혼잡한 지역에서 특히 장점을 가진다. 두 차량의 제원과 작동방식이 그림2에서 비교되었다.

하이브리드 시스템의 하드웨어 구성과 기본적 작동방식을 미국 시장에서 최초로 판매된 하이브리드 자동차인 Honda Insight의 사례를 통해서 알아본다.

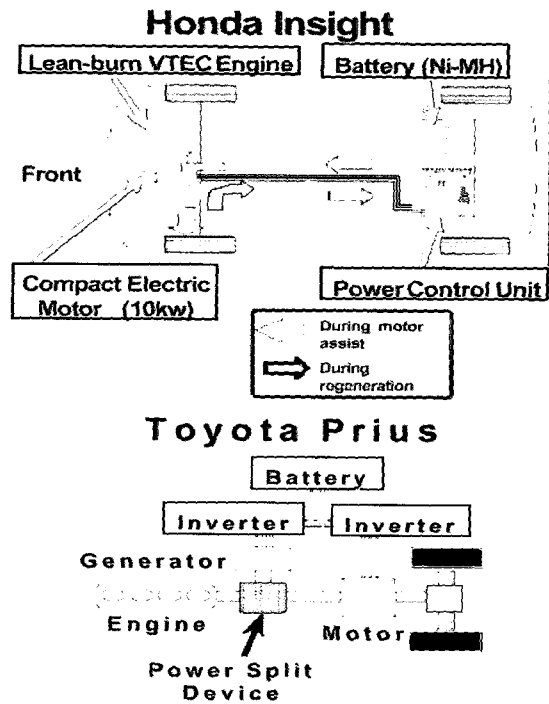


그림 2. Honda Insight와 Toyota Prius 비교.

Dimensions	Honda Insight	Toyota Prius	Units
Length	3.94	4.31	m
Width	1.70	1.69	m
Height	1.33	1.46	m
Frontal Area	1.90	Not available	m ²
Cargo Volume	0.45	0.33	m ³
Passenger Volume	1.34	2.51	m ³
Curb Weight	855.9	1254.2	kg
Coefficient of Drag	0.25	0.29	-
Engine Parameters			
Valve train	SOHC 12 valve	Water-cooled inline DOHC	
Cylinders	3	4	-
Displacement	1	1.5	L
Power data	50 kW @ 5700 rpm	52 kW @ 4500 rpm	
Torque data	89 Nm @ 4800 rpm	111 N-m @ 4200 rpm	
Emissions			
Catalyst	3 way with NOx adsorber	3 way with HC trap	
Transmission			
	manual 5 speed	Electronically controlled CVT (planetary gear)	
Electric Motor			
Type	Permanent magnet de brushless	3 phase AC synchronous permanent magnet	
Power output	10 kW @ 3000 rpm	33 kW @ 1040-5600 rpm	
Low rpm torque	48 Nm @ 1000 rpm	344 Nm @ 0-400 rpm	
Battery Pack			
Type	Ni-MH	Ni-MH	
Cell voltage	1.2	1.2	V
Cells per module	6	6	-
Number of modules	20	38	-
Total voltage	144	273.6	V
Rated capacity	6.5	6.5	Ah

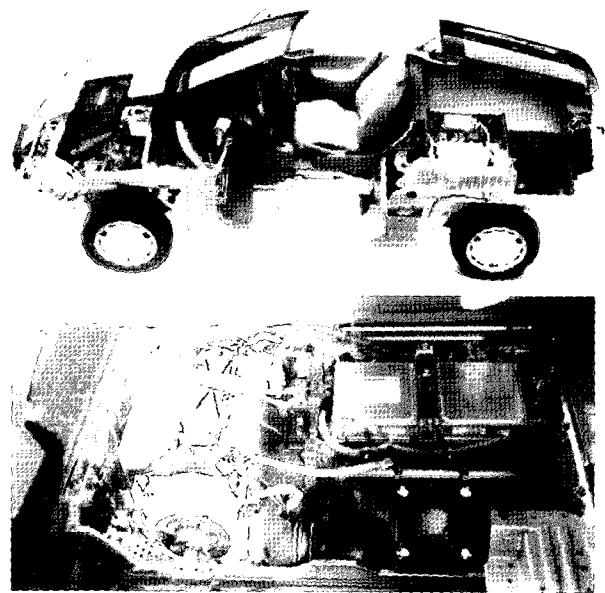


그림 3. Honda Insight 해부도 및 IPU부.

2.2. Honda IMA의 하드웨어 구성

그림 3은 Honda Insight의 해부도와 IPU(Intelligent Power Unit)부를 보여준다. IPU부는 운전석 및 승객석 바로 뒤에 위치하며 다음의 부품을 포함한다.

- 모터제어모듈 (Motor Control Module, MCM): assist나 regeneration mode에 있을 때 모터를 제어하며, assist/regeneration의 정도를 제어한다.
- 배터리제어모듈 (Battery Condition Module, BCM):

배터리의 충전상태 (state of charge, SOC)를 계산하고 사용 가능한 배터리 파워를 결정한다.

- 배터리모듈 (Battery Module Pack, BMP): 144V 배터리 팩과 2단 속도 냉각팬 및 연결판 (Junction Board, 배터리모듈 스위치와 배터리모듈을 power electronics에 연결시켜주는 contactor들로 구성)으로 구성된다.
- 모터구동모듈 (Motor Drive Module, MDM): MCM의 제어신호에 따라, 배터리모듈과 IMA 모터 사이에서 양방향으로 파워를 보내주는 switching electronics를 포함한다.
- DC-DC 컨버터: IMA 모터나 배터리모듈의 144V 전원을 12V 전원으로 전환하는 장치이다.
- 파워제어유닛 (Power Control Unit, PCU): 모터구동모듈, DC-DC 컨버터, Heat Sink (모터구동모듈과 DC-DC 컨버터에 의해 생성되는 열을 흡수, 발산) 및 냉각팬으로 구성된다.

2.2.1 IMA 모터와 제너레이터

하이브리드 자동차의 개발 초기에 일본 자동차회사들이 주로 영구자석 타입의 brushless DC 모터를, 미국 회사들은 AC induction 모터를 선택하였다. 미국회사들의 경우는 모터의 타입을 결정할 때, 모터 자체의 특성이나 성능 외에도 국제 정치적 영향을 고려했는데, 이는 영구자석용 희토류 재료 (rare earth materials, 예를 들면, NdFeB나 SmCo 등)의 많은 부분이 중국에 매장되어있다는 사실도 강하게 작용했다. 특정한 타입의 모터 선택은 power electronics의 설계와 전체 하이브리드 시스템의 구조 및 성능에 강한 영향을 끼치므로, Ford사가 막대한 연구비를 투자하여 개발하던 자체 시스템을 포기하고, 일본 회사들로부터 Escape용 하이브리드 시스템을 구매하기로 한 결정은, 기술개발과 기술 외적 고려 사이의 상관관계와 관련하여 시사하는 바가 적지 않다.

Honda Insight IMA의 경우, 팬케이크 타입의 모터를 3 실린더 엔진과 트랜스미션 사이에 위치시킨다. 즉, 영구자석 타입의 brushless DC motor는 4번째 실린더가 위치할 자리에 장착되고, 얇고 직경이 크므로 큰 토크를 발생 시킬 수 있다. 이 모터는 다음의 기능을 수행한다:

- 필요할 때, 차량에 구동력을 제공한다.
- 엔진 구동력 과다시나 제동시에는 제너레이터로 사용되어 배터리를 충전한다.
- 기존의 12V 전기 시스템을 위한 alternator로 작용한다. (DC-DC inverter 필요).
- 엔진을 시동/재시동한다.
- 크랭크 축의 속도 변화에 대해 댐핑으로 작용하여 좀 더 부드러운 공회전을 가능하게 한다.

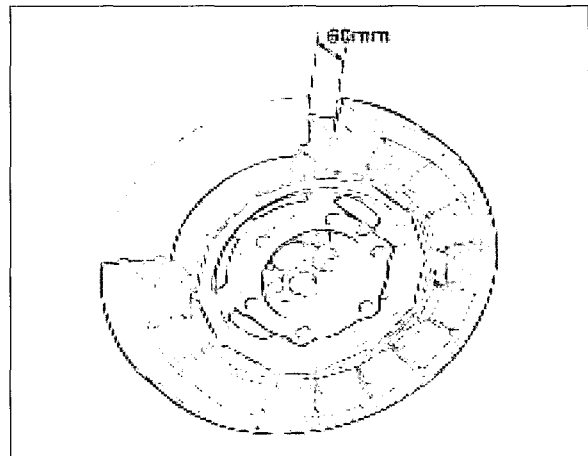


그림 4. Honda Insight IMA 모터.

2.2.2 모터제어모듈 (MCM)

모터제어모듈은 모터/제너레이터의 기본 기능들, 즉 배터리모듈을 충전시키고 가속 시 엔진을 보조하며, 상황에 따라 엔진을 시동하는 등의 모든 동작을 제어한다. 모터를 구동하기 위해서는 3상 전류의 각 상이 적절한 타이밍에 스위치되어야 하므로 모터의 위치를 정확히 아는 것은 매우 중요하다. 따라서, 모터제어모듈은 모터/제너레이터에 장착된 3개의 commutation 센서로부터 신호를 받아 모터의 위치를 알아낸다.

모터제어모듈은 역할은 다음과 같다.

- 엔진제어모듈과의 통신을 통해 차량의 운전모드를 결정한다.
- 배터리제어모듈과의 통신을 통해 지속적으로 배터리모듈의 충전 상태를 계산하게 한다. 이 정보는 배터리모듈을 보호하고 적정 충전수준을 유지하는데 사용된다.
- 계기판과의 통신을 통해 운전자가 하이브리드 시스템의 상태와 운전모드에 대해서 알 수 있도록 한다.
- 모터구동모듈과의 통신을 통해 모터의 commutation 정보를 받고, 모터 Power Inverter 모듈(IGBT's)을 전압변환모듈 (Voltage Converter Module)을 통해 제어한다.

2.2.3 모터구동모듈 (MDM)

모터구동모듈은 배터리모듈과 모터/제너레이터 사이에서 양방향으로 전류를 변환시켜 보내준다. 즉, 구동력이 필요한 경우에는 배터리모듈의 직류전류를 3상 교류전류로 변환시켜 모터를 구동시키고, 배터리로 충전 시에는 역으로 3상 교류전류를 직류전류로 변환시킨다. 이는 모터 Power Inverter 모듈 (모터구동모듈의 한 부분)에 포함된 IGBT (Insulated Gate Bi-polar Transistors)를 통해 이루어진다.

전압변환모듈 (모터구동모듈의 한 부분)은 모터제어모듈

로부터 명령을 받아 IGBT를 적절히 스위칭한다. 재생모드의 경우, 모터 Power Inverter 모듈 내의 다이오드들이 교류를 직류로 바꾸는데 사용된다 (기존의 alternator와 같은 원리).

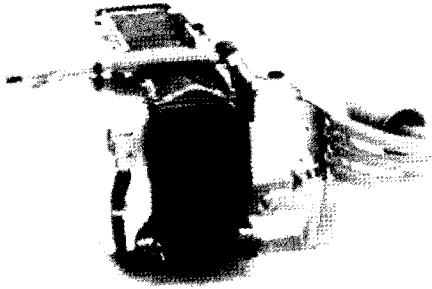


그림 5. 모터구동모듈.

2.2.4 배터리모듈 (BM)

비록 lithium-ion 배터리가 셀룰라폰이나 노트북 컴퓨터 등에서 nickel metal hydride (NiMH) 타입의 배터리를 대체하고 있고, 하이브리드 자동차나 의료장비 등에서도 테스트되고 있으나, 시판용 하이브리드 자동차에는 높은 에너지 밀도와 내구성을 갖는 NiMH 타입이 주로 사용된다. 배터리의 각 셀의 전압은 약 1.2V이고 모듈 형태의 조립으로 만들어진다. 배터리모듈에는 10개의 voltage 센서들과 4개의 온도 센서가 장착되는데, 이들 센서 신호들은 배터리상태모니터모듈 (Battery Condition Monitor Module, BCM)로 보내진다.



그림 6. 배터리모듈.

배터리상태모니터모듈은 이들 센서 신호와 충전율/방전율을 결정하기 위한 한 개의 전류센서를 사용하여 배터리의 상태를 계산한 후, 그 결과를 모터 제어모듈로 보내준다. 배터리상태모니터모듈은 배터리의 수명을 최적화하기 위해 배터리의 충전 상태 (state of charge, SOC)를 결정하고 SOC가 20%~80% 범위에서 유지되도록 한다. 배터리상태모니터모듈은 또한 연결판 (junction board)에 있는 릴레이와 저항을 제어하여 2단 속도 냉각팬의 작동을 제어한다.

2.2.5 DC-DC 변환기

12V 전기 시스템에 전원을 제공하기 위해 기존의 alternator 대신 DC-DC 변환기를 사용한다. 따라서, alternator의 추가로 인해 발생할 엔진부하를 줄일 수 있고 좀 더 안정적인 12V를 공급할 수 있다. insight의 경우는 모터구동모듈이나 배터리모듈에서 제공되는 144V 직류 전원을 우선 교류로 변환하고 이를 변환기 (transformer)에 의해 강압한 후에 12V의 직류전원으로 변환한다.

DC-DC 변환기는 고전압소자이고 작동 중에 많은 열을 발생시키므로 마그네슘 하우징 내에 알루미늄으로 된 fin형 heat sink를 둔다. 12V 전기 시스템의 파워 소모에 따른 DC-DC 변환기의 출력은 엔진제어기 (Engine Control Module)에 의해 제어된다. IMA가 어떤 오동작을 일으키거나 DC-DC 변환기의 온도가 비정상적으로 높아질 때, 모터 제어모듈은 DC-DC 변환기의 작동을 중단시킬 수 있다.

2.2.6 연결판 (Junction Board)

연결판은 배터리모듈에 직접 연결되어있고, 작은 부품들이나 고전압 시스템의 주 연결선들로 이루어진다. 엔진이 시동되면 Bypass Contactor가 우선 닫히고 이어서 고전압 Contactor가 닫힌다. 모터구동모듈로 공급되는 전류가 Bypass Resistor를 통해 흐르므로 초기 시동 단계에서의 start-up current spike를 줄여준다.

2.3. 작동모드와 기본제어방식

•시동/재시동 모드(start/restart mode)

대부분의 경우 엔진은 IMA모터에 의해 1000rpm에서 시동된다. 배터리모듈의 SOC가 너무 낮을 경우나, 주위 온도가 너무 낮거나 너무 높을 경우, 또는 IMA 시스템이 고장 났을 경우를 대비하여 12V 부가 시동모터가 장착되어있다. 어떤 경우에도 차량 정지 시에는 엔진이 꺼지므로, 최초의 시동 이외에는 항상 IMA모터에 의해 재시동된다.

2.3.1 가속/어시스트모드(acceleration/assist mode)

가속 시에는 배터리모듈로부터의 직류전류가 모터구동모듈에 의해 교류로 전환된 후 모터에 공급되어 모터를 구동시킨다. 부하와 가속페달의 위치, 및 SOC 상태에 따라 전기모터의 어시스트 량이 변화하는데, 계기판에서 어시스트 정도를표시한다. 가속 시에 12V 전기시스템은 배터리모듈로부터 DC-DC변환기를 통해 파워를 전달 받으며, 필요하다면 12V 배터리가 충전되기도 한다. 만약 SOC가 최저수준으로 낮아지면, 어시스트는 중지되고, IMA 시스템은 12V 시스템을 유지시키기 위해서만 전기에너지를 생성한다. 가속 시에는 엔진의 출력을 최대한 차량 가속에 이용하기 위해, SOC가 아무리 낮더라도 배터리모듈의 충전은 이루어지지 않는다.

2.3.2 순항모드 (cruising mode)

정속운전 시, 배터리모듈의 SOC가 상대적으로 낮다면 엔진 파워의 일부가 IMA의 모터/제너레이터에 의해 배터리모듈을 충전시킬 전기에너지로 변환된다 (부분충전). 정속 운전이면서 배터리모듈이 충분히 충전되어있다면, 약간의 엔진파워가 IMA 모터/제너레이터에 의해 12V 시스템에 DC-DC변환기를 통해 전기에너지를 공급하기 위해 사용된다.

2.3.3 감속/회생제동모드(deceleration/regenerative braking mode)

감속 시, 엔진은 연료공급중지모드 (fuel cut mode)로 전환되고, IMA 모터/제너레이터는 차량의 바퀴에 의해 작동되는 충전모드 (generation mode)로 전환된다. 배터리모듈에 충전되는 에너지량은 IMA 모터/제너레이터가 차량을 감속시킨 운동에너지량에 비례한다. 제동모드에는 두 가지의 다른 모드가 있는데, 만약 운전자가 가속페달도 감속페달도 모두 밟지 않은 경우는 부분충전을 하고, 감속페달을 밟았을 때는 밟은 정도에 따라 충전량을 늘린다. 감속페달 밟은 정도가 일정한 수준을 넘어가면, IMA 모터/제너레이터의 감속작용과 더불어 기존의 마찰 브레이크가 작동을 시작한다.

감속 시, 회생제동은 엔진이 일정한 속도, 예를 들면, 1000rpm로 떨어질 때까지 계속되는데, 이 속도에서 엔진은 즉시 공진정지모드 (idle stop mode)로 들어간다. 만약 운전자가 정지하려고 하는지 명확하지 않을 때는, 공진정지모드로 들어가기 전에 잠시 동안 공진을 하게하며, 만약 배터리의 SOC가 너무 낮으면 공진정지모드로 들어가지 않고, 대신 배터리모듈을 충전시키기 위해 엔진을 빠른 속도로 공진시킨다.

배터리의 SOC가 최고수준이 되면 생성된 전기에너지는 12V 시스템에만 사용된다. ABS 작동시에는 "ABS-busy" 신호가 모터제어모듈에 전달되어, ABS 시스템과의 간섭을 방지하기 위해 회생제동을 즉시 정지시킨다.

2.3.4 연료공급중지모드 (fuel cut mode)

트랜스미션이 중립이 아니고 클러치가 engaged되어있으면서 감속을 할 경우, IMA는 연료를 엔진에 공급하지 않는 연료공급중지 모드로 들어간다. 엔진과 엔진에 의해 작동하는 부속품 (예를 들어, 에어컨의 컴프레서) 들은 바퀴에 의해 계속 회전하므로 이 모드가 가능하다. 일반적인 감속 시에는 연료공급중지 모드 중에 회생제동이 작동하며, 엔진속도가 1000rpm 이하로 떨어지면 차량속도나 다른 여러 가지 상황을 고려하여, 엔진은 공진중지모드 (엔진이 정지)로 들어가거나 공진을 계속하기 위해 연료를 공급받는다.

2.3.5 공진중지모드 (idle stop mode)

차량이 감속할 때, 아래 조건이 발생하면 엔진이 정지 (shutdown) 된다.






					
Vehicle Operating Mode	Start-up	Acceleration	Cruising	Deceleration	Stationary
Gasoline Engine Mode	Engine Start	Vehicle Propulsion		Fuel Cut	Auto Idle Stop
Electric Motor Mode		Assisting with Propulsion	Generation / Off	Regenerative Braking	Off
Battery State of Charge	Full	Engine startup by IMA	Assist with partial load & wide open throttle	No generation	Auto Stop System Enabled
	High		Wide open throttle assist		
	Medium			Regeneration	Generation
	Low	Startup by auxiliary Starter Motor	No assist		
IMA Contribution to Fuel Efficiency	Best fuel control when starting	Reduce engine load and fuel consumption by motor assist	Reduce unnecessary generation and load by efficient battery control	Recover and store energy, no fuel consumption	No fuel consumption

그림 7. Insight의 작동모드.

차량이 감속할 때, 아래 조건이 발생하면 엔진이 정지 (shutdown) 된다.

- 차량의 속도가 30km/h이하이면서 감속페달이 밟혀졌거나, 또는 차량의 속도가 5km/h 이하일 때
- 감속이 시작되기 전에 트랜스미션의 기어가 1단이 아니었을 때
- 클러치가 풀렸거나 중립기어일 때
- 엔진속도가 1000rpm 이하일 때

공진중지모드는 다음의 조건일 때 발생하지 않는다.

- 엔진이 warm up 되지 않았을 때
- 후진기어가 선택되어졌을 때
- IMA의 ECU가 stop and go 상태를 인식했을 때 (예를 들면, 트랜스미션이 이전의 stop 이래로 1단 기어로 부터 바뀐 적이 없을 경우)

감속 시에 차량이 일정한 속도 이상이고 감속페달이 풀리면 (release) 엔진은 즉시 시동된다. 일정한 속도 이하라 하더라도, 가속페달을 밟았거나 다른 기어가 선택되었다면, 엔진은 재시동 된다. 엔진의 재시동 조건은 다음과 같다.

- 클러치가 풀리고 기어가 선택되어졌을 때
- 감속 시에 감속페달이 풀렸을 때
- 클러치가 풀렸거나 중립기어인 상태에서 가속페달이 밟혔을 때

- 클러치가 풀렸거나 중립기어인 상태에서 배터리모듈의 SOC가 어느 수준 이하로 떨어졌을 때
- 매스터 실린더의 유압이 낮을 때

3. 제어 알고리즘

3.1. 여러 가지 제어 알고리즘

그림 8은 하이브리드 자동차 제어시스템의 간략한 구조를 나타낸다. 그림에서처럼 하이브리드 시스템에는 배터리제어, 회생제동제어, 모터제어, 엔진제어, 및 클러치제어 등, 하이브리드 시스템을 이루는 여러 가지 다른 서브시스템의 제어와 관련한 알고리즘이 필요하다. 그러나 이들 서브시스템의 제어는 하이브리드 시스템에만 국한된 것이 아닌 전반적인 제어문제이므로, 이 글에서는 주로 하이브리드 시스템 제어의 고유문제인 supervisory control, 즉 연료경로와 전기경로로 분리되어 있는 두 개의 병렬 경로 사이에서 torque (혹은 소모 에너지)의 배분을 결정하는 방법에 범위를 국한해서 살펴본다. 특히 2-3절에서 살펴 본, 실제 시판용 하이브리드 자동차의 에너지관리 알고리즘 (정성적인 경험과 엔지니어링 센스에 기초한 알고리즘)과는 다른, 주로 차량동역학이나 최적화 기법에 대한 고려에 의한 제어기법을 알아본다.

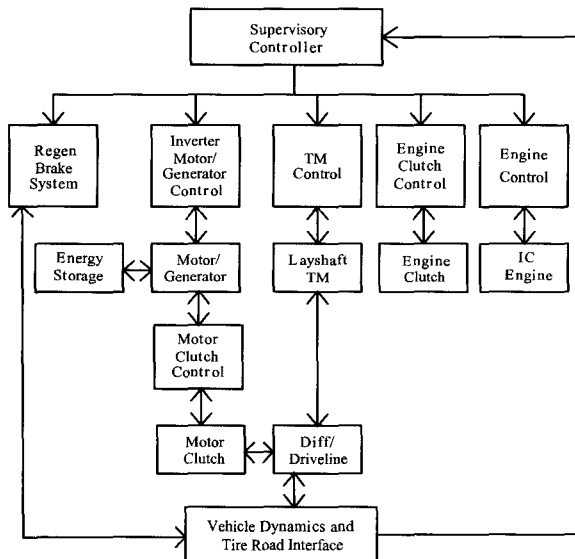


그림 8. 하이브리드 자동차의 제어 블록 다이어그램.

하이브리드 자동차의 supervisory controller의 목표는 차량의 주행성능을 유지 혹은 향상 시키면서 연료소모와 엔진의 배기가스를 최소화 하는 것이다. 이 경우 근본적인 문제점은, 두 개 이상의 장치들 사이에서 파워의 흐름을 조절하는 데는 순간적인 제어가 이루어져야 하나 제어의 목표는 대부분의 경우 적분의 형태 (연료소모량과 마일 당 배기가스량) 이고, 배터리의 SOC 같은 적분제한 (integral

constraints)에 의해 제약을 받는다는 점이다. 게다가 실제 주행 시에서는 미래의 운전 상태를 알 수 없으므로 일반적인 global optimization technique을 사용할 수 없다.

이러한 제어의 목표와 제약에 대한 이해를 기초로, supervisory controller를 설계하는 몇 가지 방법이 제안되었다. 초기에는 주로 간단한 rules이나 maps에 의한 방법이 연구되었고, 이러한 경험적인 방법을 좀 더 복잡하게 구현한 퍼지제어이론에 의한 제어방법도 활발하게 연구되었다. 그 외에도 강인제어방식을 이용한 연구나 적응제어방식을 이용한 연구들도 많이 볼 수 있다.

그 중에서 특히, 연료의 소모를 최소화하려는 최적제어 기법은 다른 방식에 비해 좀 더 일반적이고 체계적인 방식이며 제어 파라미터의 튜닝을 줄일 수 있는 방식이므로 그 동안 많은 연구가 진행되어왔다. 이들 연구는 크게 두 가지, 즉 global optimization 방식과 instant optimization 방식으로 나누어볼 수 있다.

Global optimization 방식의 경우는 미래의 운전조건이나 운전사이클 스케줄에 대한 사전정보를 필요로 하므로 실시간 제어에서는 적절치 않지만, 다른 제어방식들의 수준과 특징을 평가할 수 있는 비교기준을 제시한다.

이에 반해 instant optimization 방식은 파워분리의 실시간 제어를 위해 연구되었는데, 크게 두 가지 조건, 즉 미래의 운전조건에 대한 사전 지식이 없고, 전기경로의 경우 자가유지 (self-sustainability)가 보장된다는 가정을 한다. 두 번째 가정은 전기에너지 저장장치가 외부의 전원에 의해 충전되는 것이 아니라 자체 내의 제너레이터나 회생제동에 의해 충전됨을 의미한다.

Instant optimization 방식에 기초한 실시간 제어 전략에는 각 순간에 최소화할 cost function (현재 시스템 변수에 의해서만 표현되는)의 정의가 필요하다. 제어의 주요 목표가 연료의 소모를 최소화하는 것이므로 연료소모량을 cost function에 포함시켜야 하며, 자가유지의 요구조건을 만족시키기 위해서는 저장된 전기에너지 (혹은, state of charge, SOC)의 변화도 또한 고려돼야 한다. 이런 점들을 다루기 위한 여러 가지 연구가 진행되어왔는데, 예를 들면, 현재의 SOC 편차에 따라 PID에 의해 조절되는 조정변수 (tuning parameter)를 cost function에 포함 시키거나, cost function을 전기경로를 통한 손실과 연료경로를 통한 손실을 합한 총 손실로 정의하는 등의 방법들이 연구되어졌다.

이들 중, 가장 가능성이 높은 방법으로는 등가소모최소화 전략 (equivalent consumption minimization strategy, ECMS)이 있는데, 이는 cost function을 연료소모와 SOC 편차와 관련한 등가연료소모의 합으로 정의하는 방법이다. 즉, 전기에너지와 연료에너지를 직접적으로 비교하는 것이 아니라 등가인자를 통해 비교하는 방법이다. 전기에너지와 연료에너지 사이의 등가성은 연료로부터 전기에너지 저장소까지의 평균 에너지 경로를 고려하여 구할 수 있는데, 만약

전기경로와 연료경로의 효율이 일정하다면 이 증가성은 이론적으로 정확하나, 작동점과 작동조건에 따라 효율이 변하므로 결국 이 방식의 경우는 평균값을 사용하여야 한다.

또 다른 방식으로는, 등가연료소모량을 모든 SOC에 있어서의 변화량은 현재의 작동점에서 작동하는 엔진에 의해 나중에 보충된다는 가정하에 평가하는 것이다. 따라서, 등가연료소모량은 작동점과 파워분리제어 양자에 의해 변화하고, 이것의 평가는 instant optimization 과정 내에 추가적인 내부 loop를 만들거나 결과를 look-up 테이블로 저장하여 사용한다. 이러한 제어 방식들에 대해 아래에서 간략하게 설명한다.

3.2. 하이브리드 파워트레인의 모델

하이브리드 자동차의 supervisory control 방법을 보여주기 위해 아주 간단한 차량 모델을 다음 식과 같이 가정하자.

$$\begin{aligned}
 ma_x &= F_x - C_{wx} v_x(t)^2 - F_{roll} - mg \sin \theta_{slope}(t) \\
 F_{roll}(v) &= mg \left\{ \begin{aligned} &a_0 + a_1 v(t) + a_2 v(t)^2 + a_3 v(t)^3 \\ &+ a_4 v(t)^4 + a_5 v(t)^5 \end{aligned} \right\} \\
 J_w \omega_w &= T_{shaft} - T_{brake} - r_w F_x
 \end{aligned}$$

여기서, F_x 는 traction force를, $C_{wx} v_x(t)^2$ 는 air drag 항을, F_{roll} 는 5차 방정식으로 가정된 rolling resistance 항을, T_{brake} 는 brake torque를, T_{shaft} 는 차축에 전달되는 torque를 나타낸다. 차축에 전달되는 torque는 연료경로 (fuel path)를 통한 토크와 전기경로 (electric path)를 통한 torque로 나뉘어진다. 즉,

$$T_{shaft}(t) = u(t) \cdot T_{e_path}(t) + (1-u(t)) \cdot T_{f_path}(t)$$

여기서 $u(t)$ 는 두 개의 병렬 경로 사이에서 torque의 배분을 결정하는 토크배분인자 (torque split factor)이며, 제어 변수가 된다. 예를 들면, $u(t)=1$ 는 바퀴에서 필요한 모든 구동 torque는 전기경로에 의해 제공되고, 바퀴로부터 제공되는 제동 torque는 재생회동에 의해 전적으로 전기경로에 의해 배터리에 축적된다는 것을 의미한다.

연료경로를 통한 torque는 간단한 transmission 모델로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_{f_path}(t) &= T_{ic}(t) R_{fg}(n(t)) \\
 \omega_{ic}(t) &= \omega_w(t) R_{fg}(n(t))
 \end{aligned}$$

여기서 $R_{fg}(n(t))$ 는 transmission의 기어비를, $T_{ic}(t)$ 는 엔진의 출력 torque를 나타낸다. 연료 소모량은 엔진맵으로부터 다음 식과 같이 구해진다.

$$m\dot{\xi}_f(t) = f_{ic}(T_{ic}(t), \omega_{ic}(t))$$

함수 f_{ic} 는 엔진실험을 통해 구해진다.

전기경로를 통한 torque 도 역시 간단한 transmission의 입출력 관계로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_{e_path}(t) &= T_{em}(t) R_{eg}(n(t)) \\
 \omega_{em}(t) &= \omega_w(t) R_{eg}(n(t))
 \end{aligned}$$

여기서 $R_{eg}(n(t))$ 는 transmission을 통한 전체 전기모터의 기어비를, $T_{em}(t)$ 는 모터의 출력 torque를 나타낸다. 배터리 파워의 방전량 혹은 충전량은 모터맵으로부터 다음 식과 같이 구해진다.

$$P_b(t) = f_{em}(T_{em}(t), \omega_{em}(t))$$

함수 f_{em} 은 모터실험을 통해 구해진다.

배터리 모델은 등가회로모델 (equivalent circuit model)을 채택하여 다음 식과 같이 구한다.

$$P_b(t) = I_b(t) V_{b,oc}(SOC(t), P_b(t)) - I_b(t)^2 R_b SOC(t)$$

여기서, 개회로 전압 (open circuit voltage)은 SOC의 테이블 함수이다. 전류 최대치와 SOC 변화량 및 배터리 전류의 관계는 다음과 같다.

$$Q_{max} \frac{dSOC(t)}{dt} = -I_b(t)$$

제어를 위해서 세 가지의 적분량, 즉 연료에너지 사용량 $E_f(t)$, 전기에너지 사용량 $E_e(t)$ (저장된 전기에너지의 변화량), 그리고 바퀴에 전달되는 기계에너지 $E_m(t)$ 들이 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 E_f(t) &= \int_0^t H_{inv}(\tau) m\dot{\xi}_f(\tau) d\tau \\
 E_e(t) &= \int_0^t I_b(\tau) V_{b,oc}(\tau) d\tau \\
 E_m(t) &= \int_0^t T_w(\tau) \omega_w(\tau) d\tau
 \end{aligned}$$

여기서 H_{inv} 는 연료의 low heating value이다.

3.3. 등가소모 최소화 전략 (ECMS)

등가소모 최소화 전략은 주어진 시간 t 와 시간 증가치 Δt 에서, 다음의 cost function을 최소화하는 제어변수 $u(t)$ 를 찾는 것이다.

$$J(t, u) = \Delta E_f(t, u) + s(t) \Delta E_e(t, u)$$

여기서 $\Delta E_f(t, u)$ 와 $\Delta E_e(t, u)$ 는 Δt 동안 사용된 연료에너지 소모량과 전기에너지 사용량이며 모두 $u(t)$ 와 운전 조건의 함수로 나타난다. 등가인자 (equivalence factor) $s(t)$ 는 ECMS의 핵심으로 전체 시스템의 작동에 다음과 같은 영향을 끼친다.

- 만약 $s(t)$ 가 너무 크면, 전기에너지 사용량은 제한되고 연료에너지 사용량이 증가한다.
- 만약 $s(t)$ 가 너무 작으면, 전기에너지 사용이 선호되어 배터리의 SOC가 감소한다.

등가인자 $s(t)$ 를 구하는 여러 가지 방법들이 발표되었고, 이들 연구 결과는 참고문헌의 논문들을 참조하도록 한다.

4. 결론

제어대상으로서의 하이브리드 시스템의 제어 하드웨어와 각 구성 부품에 대한 간략한 설명과, 하이브리드 시스템의 제어 알고리즘 중 supervisory control에 대해 간략하게 알아보았다. 이미 몇몇 하이브리드 자동차가 시장에 나와 있고, 그 탁월한 성능과 연료절감 및 배기가스 절감 효과 등이 널리 알려지고 있지만, 여전히 몇 분야, 특히 제어분야에서는 연구해야 할 주제가 많이 있다. 일반적으로, 하이브리드 자동차를 만드는 일본 회사들이 이와 관련하여 논문을 많이 발표하고 있지는 않지만, 그들의 특허로 미루어보아, 현재 시판되는 하이브리드 자동차의 제어는 주로 정성적인 기준에 의거한 지능제어방식을 사용하는 것으로 보인다. 따라서, 이제 갓 시작된 한국 하이브리드 자동차의 성능과 연료절감효과를 향상시키기 위해서는 각 부품의 개발뿐 아니라, 이들 부품들을 최적으로 활용할 수 있게 하는 제어기 설계 분야에서도 많은 체계적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Y. Tanokura, T. Shindo, and K. Kariatsumari, "Cover Story: automotive electronics enters consumer market", *Nikkei electronics asia*, May 2004.
2. A. M. Phillips, "Functional decomposition in a vehicle control system," *Proc. Of the american control conference*, pp. 3713-3718, Anchorage, 2002.
3. S. R. Cikanek, et al, "Control system dynamic model validation for a parallel hybrid electric vehicles", *Proc. of the american control conference*, pp. 1222-1227, San Diego, 1999.
4. A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal control of parallel hybrid electric vehicles", *IEEE Trans. On control systems technology*, vol. 12, no. 3, pp. 352-363, 2004.
5. K. J. Kelly and A. Rajagopalan, "Benchmarking of OEM hybrid electric vehicles at NRELS", *National renewable energy laboratory milestone report NREL/TP-540-31086*, 2001.
6. K. Yamaguchi, "Advancing the hybrid system", *Electric and hybrid ve-hicle technology'96*, p. 158, 1996.
7. A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, "Optimal energy management in series hybrid electric vehicle", in *Proc. American control conference 2000*, Chicago, IL, 2000.
8. C. Lin, Z. Filipi, Y. Wang, L. Louca, H. Peng, D. Assanis, and J. Stein, "Integrated, feed-forward hybrid electric vehicle simulation in SIMULINK and its use for power management studies", SAE, Paper no. 2001-01-1334.
9. F. Kirschbaum, M. Back, and M. Hart, "Determination of the fuel-optimal trajectory for a vehicle along a known route", *presented at the 15th IFAC world congr. 2002*, Barcelona, Spain, 2002.
10. S. Delprat, T. Guerra, G. Paganelli, J. Lauber, and M. Delhom, "Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain", in *Proc. 2001 American Control Conference*, Arlington, TX, 2001.
11. S. Delprat, T. Guerra, and J. Rimaux, "Optimal control of a parallel powertrain: from global optimization to real time control strategy", in *Proc. 18th Electric Vehicle Symposium EVS 18*, Berlin, Germany, 2001.
12. J. Seiler and D. Schröder, "Hybrid vehicle operating strategies", in *Proc. 15th Electric Vehicle Symposium EVS 15*, Bruxelles, France, 1998.
13. G. Paganelli, S. Delprat, T. Guerra, J. Rimaux, and J. Santin, "Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains", in *Proc. Fall VTC-01 Conference Sponsored by VTS (Vehicular Technology Society) and IEEE*, Atlantic City, NJ, 2001.
14. G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, "General supervisory control policy

for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles”, *Special Issue of JSAE Review*, vol. 22, no. 4, pp. 511518, 2001.

15. V. Johnson, K. Wipke, and D. Rausen, “HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions”, SAE, Paper no. 2000-01-1543.
16. L. Guzzella, A. Amstutz, and F. Grob, “Optimal operation strategies for hybrid power-trains”, in *Proc. 2nd IFAC Workshop on Advances in Automotive Control*, Mohican State Park, OH, 1998.
17. G. Rizzoni, L. Guzzella, and B. Baumann, “Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains”, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 4, pp. 246257, Sept. 1999.
18. A. Sciarretta, C. Onder, and L. Guzzella, “From global optimization to real-time load control for parallel hybrid vehicles”, *at-Automatisierungstechnik*, vol. 51, pp. 195203, 2003.
19. K. Shimizu and S. Seimiya, “Test procedure to evaluate fuel consumption of HEVs-Universal procedure to secure accuracy”, in *Proc. 18th Electric Vehicle Symposium*, Berlin, Germany, 2001.
20. H.-D. Lee, E.-S. Koo, S.-K. Sul, and J.-S. Kim, “Torque control strategy for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic”, *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 33-38, 2000.
21. P. Pisu, E. Silani, G. Rizzoni, and S. M. Savaresi, “A LMI-based supervisory robust control for hybrid vehicles”, *Proc. of the american control conference*, pp. 4681-4686, Denver, 2003.
22. R. Saeks, C. J. Cox, J. Neidhoefer, P. R. Mays, and J. J. Murray, “Adaptive control of a hybrid electric vehicle”, *IEEE trans. On intelligent transportation system*, vol. 3, no. 4, pp. 213-233, 2002.

..... 저자약력



《이 형 철》

- 1988년 서울대학교 기계공학과 (공학사).
- 1990년 서울대학교 기계설계학과 (공학석사).
- 1997년 University of California at Berkeley 기계공학과(공학박사).
- 1998년~2003년 Ford/Visteon (Technical Fellow).
- 2004년~현재 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(조교수).
- 관심분야는 비선형 적응제어, 차량 전자제어 장치, 임베디드 제어시스템, 차량 동역학