

다중 동력 연료전지 하이브리드 장갑차량의 동력관리 전략에 관한 연구

안 상준¹⁾, 김 태진²⁾, 이 교일³⁾

A Study on Power Management Strategy for Multi-Power Source Fuel Cell Hybrid Armored Vehicle

Sang-Jun An, Tae-Jin Kim, Kyo Il Lee

Key words : Multi-Power Source Fuel Cell Hybrid System(다중 동력 연료전지 하이브리드 시스템), Energy Storage System(보조동력 시스템), Battery(배터리), Ultracapacitor(울트라커패시터)

Abstract : Since the fuel cell uses the hydrogen for its fuel, it has no emission and higher efficiency than an internal combustion engine. Also fuel cell is much quieter than engine generator and generates heat much less than engine generator. So it has advantage of Army's 'silent watch' capability, and the ability to operate undetected by the enemy. The fuel cell hybrid system combines a fuel cell power system with an ESS. The ESS (e.g., batteries or ultracapacitors) reduces the fuel cell's peak power and transient response requirements. It allows the fuel cell to operate more efficiently and recovery of vehicle energy during deceleration. The battery has high energy density, so it has the advantage regarding driving distance. However, it has a disadvantage considering dynamic characteristic because of low power density. One other hand, the ultracapacitor has higher power density, so it can handle sudden change or discharge of required power. Yet, it has lower energy density, so it will be bigger and heavier than the battery when it has the same energy. This paper proposes the power management strategy for multi-power source fuel cell hybrid system, which is applied with the merits of both battery and ultra capacitor by using both of them simultaneous.

1. 서 론

연료전지를 이용한 동력 시스템은 수소를 연료로 사용하여 배기가스가 거의 없고 내연기관에 비해 높은 효율을 가지고 있다. 또한 내연기관에 비해 소음과 열의 발생량이 현저히 줄어들게 된다. 이러한 장점은 군용 차량에 있어서 '무음경계' 및 적의 감시를 피한 정찰 활동 등에 유리한 측면을 많이 가지고 있다. 순수한 연료전지 시스템의 경우 시스템이 간단하다는 장점을 가지고 있지만, 회생제동 에너지를 흡수할 수 없고, 연료전지를 전 출력 영역에서 운전하게 됨으로 시스템의 출력효율이 좋지 않게 되며, 느린 동특성을 가지게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 연료전지 외에 보조 동력원을 가지는 연료전지 복합구동 시스템(fuel cell hybrid system)에 대한 연구가 이루어지고 있다. 연료전지 복합구동 시스템에서 보조 동력원은 회생제동 에너지의 흡수와 더불어 전체 출력 요구에 대해서 보조 동력원에 저장된 에너지를 적절히 사용

함에 따라 시스템의 동특성을 향상 시키고 연료전지의 운전영역을 고효율 영역으로 제한함으로써 전체 시스템의 효율을 향상 시킬 수 있다.

배터리는 높은 에너지밀도(energy density)를 가지고 있어 주행거리 측면에서는 장점을 가지고 있지만 낮은 출력밀도(power density)를 가지고 있어 급격한 요구 출력의 증가에 대한 응답특성이 느린 단점이 있고 급격한 충전은 배터리의 성능 및 내구성을 떨어뜨린다. 울트라 커패시터의 경우 높은 출력밀도를 가지고 있어 급격한 요구

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : sjan75@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7143 Fax : (02)883-1513
 - 2) 국방과학연구소
E-mail : tj5777@chol.com
Tel : (042)821-3237 Fax : (042)821-2221
 - 3) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : lki@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7135 Fax : (02)883-1315

출력변화를 수용할 수 있고 회생제동에너지를 흡수할 수 있으나 에너지밀도가 낮아서 배터리와 같은 양의 에너지를 저장할 경우 부피와 무게가 크게 증가하여 전체시스템의 효율을 떨어뜨리게 된다.^{1,2)}

따라서 본 연구에서는 6륜 독립구동 장갑차량을 대상 시스템으로 하여 보조동력원으로 배터리와 울트라 커패시터를 동시에 사용함으로써 배터리와 울트라 커패시터의 장점을 살린 다중 동력 연료전지 하이브리드 시스템(multi-power source fuel cell hybrid system)을 제안하였고, 두 보조 동력원사이의 동력제어 전략을 제안하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템의 구성

다중 동력 연료전지 하이브리드 시스템은 수소와 산소의 전기 화학적 반응을 유도하여 에너지를 만드는 연료전지와 에너지의 흡수가 가능한 보조동력원으로 배터리와 울트라 커패시터를 동시에 사용하는 시스템이다. DC/DC 컨버터는 시스템의 전압과 연료전지의 전압을 분리시키고 연료전지와 보조동력원 사이의 동력흐름을 제어하며 둘 사이의 전압레벨을 맞추어준다.

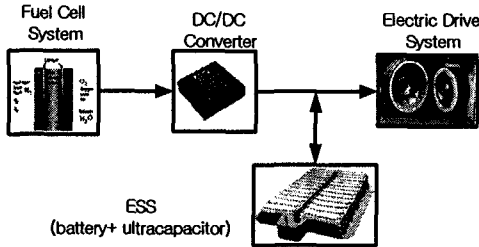


Fig. 1 Fuel cell hybrid system Configuration

2.2 시뮬레이션 프로그램의 구성

Fig. 2는 차량성능을 분석하기 위한 시뮬레이션 프로그램으로 Matlab Simulink를 사용하여 구현하였다. 시뮬레이터의 검증에 위해 범용 차량 성능해석 소프트웨어인 Advisor와 비교 검증하였으며 비교적 일치된 시뮬레이션 결과 값을 얻을 수 있었다.³⁾

차량의 동력 관리 전략을 개발하기에 앞서 6륜 구동 장갑차량의 주행 성능 목표 조건을 통해 동력 전달 요소 및 동력원들의 용량 매칭을 수행하였다. 용량 선정의 기준은 연비와 주행성능, 비용 등이 있으며 여기서는 주행 성능 조건을 기준으로 최적의 용량을 선정하였다.

특히 대상차량의 특성상 전장에서 신속한 회피기동 능력과 적의 레이더망을 피하기 위해 보조동력원만으로 주행이 이루어지는 스텔스(stealth)기동 조건이 중요하게 다루어졌다.⁴⁾

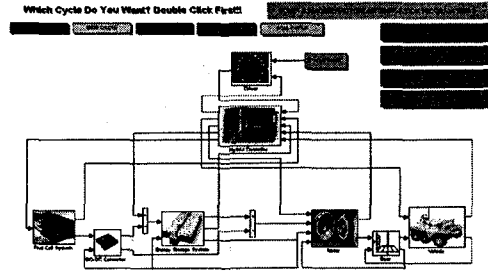


Fig. 2 Simulation program

3. 동력관리 전략

3.1 연료전지 출력 제어

연료전지 출력제어는 로드레벨링(load leveling) 알고리즘과 ADVISOR에서 구현되고 있는 전략을 기본으로 연료전지의 출력이 주 동력원이 되고 보조동력원의 SOC에 따라 부가 출력을 조정하는 전략이다. ESS의 SOC가 높을 때는 차량 요구 출력보다 연료전지의 출력을 낮게 조정하고 SOC가 낮을 때는 차량 요구 출력보다 높게 조정한다. 이 때 부가출력의 양은 유지해야할 목표 SOC와의 차이를 고려하여 정해지게 되며 또한 연료전지 출력은 고 효율 영역에 제한 되도록 한다. 또한 연료전지의 동특성을 고려하여 출력의 변화에 제한을 받게 된다.^{5,6)}

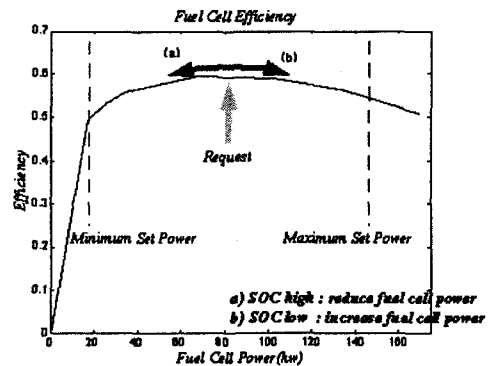


Fig. 3 Fuel cell output control

$$P_{fc_demand} = P_{request} + P_{add} \quad (1)$$

$$P_{add} = \frac{goal\ SOC - actual\ SOC}{0.5 \times SOC\ range} \times fc_change_pwr \quad (2)$$

$$Min_set_power \leq P_{fc_demand} \leq Max_set_power$$

where P_{fc_demand} : Required fuel cell power
 $P_{request}$: Vehicle requiring power
 $goal\ SOC$: Target SOC value
 $actual\ SOC$: Actual SOC value

fc_change_pur : Additional output adjusting factor
 Min/Max_set_power : Minimum/Maximum limitation value of fuel cell output

3.2 보조동력원 출력 제어

배터리와 울트라 커패시터를 동시에 보조동력원으로 사용하는 경우, 이 둘 사이의 에너지 흐름을 제어해 줄 필요가 있다. 배터리와 울트라 커패시터 사이의 출력은 별도의 제어기나 양방향 DC/DC 컨버터(2way DC/DC converter)를 이용하여 배터리와 울트라 커패시터의 출력 및 각각의 SOC를 유지하도록 제어하였다.

3.2.1 보조동력원 출력제어 전략(1)

보조동력원의 출력은 배터리의 동특성을 고려한 필터링 함수를 통해서 배터리와 울트라 커패시터로 나누어진다.⁷⁾

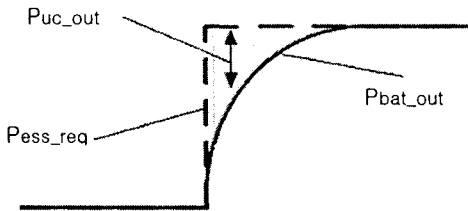


Fig. 4 ESS output control strategy (1)

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \tau_1 s) \times (1 + \tau_2 s)} \quad (3)$$

$$P_{bat_out} = F(s) \times (P_{ess_req} + P_{ess_add}) \quad (4)$$

$$P_{ess_add} = \frac{goal\ SOC_{UC} - actual\ SOC_{UC}}{0.5 \times SOC_{UC\ range}} \times bat_charge_pur$$

where $F(s)$: Filtering function
 P_{bat_out} : Battery output power
 P_{ess_req} : ESS required power

τ_1 은 배터리 시스템의 동특성을 나타내기위한 시정수 이며, τ_2 는 필터링의 제어 파라미터이다.

이 필터링 함수를 통해 걸러진 요구 출력을 배터리에서 담당하게 된다. 이때 보조 동력원이 담당해야 할 요구 출력은 울트라 커패시터의 SOC를 고려하여 수정되게 된다. 앞의 연료전지에서 배터리의 SOC를 고려하듯이 울트라 커패시터의 SOC가 목표 SOC보다 낮을 경우 좀더 높은 출력을 내서 울트라 커패시터를 충전하게 되고 그 반대의 경우 좀더 낮은 출력을 내어 울트라 커패시터의 목표 SOC를 유지하게 된다.

3.2.2 보조동력원 출력제어 전략(2)

전략 2는 양방향 DC/DC컨버터를 사용하여 배터리와 울트라 커패시터 사이의 동력 분배비를 결정하는 방식이다. 동기식 양방향 DC/DC컨버터는 동력의 입/출력이 가능한 컨버터로서 배터리와 울트라 커패시터의 전압 레벨을 자동으로 맞추어 준다.

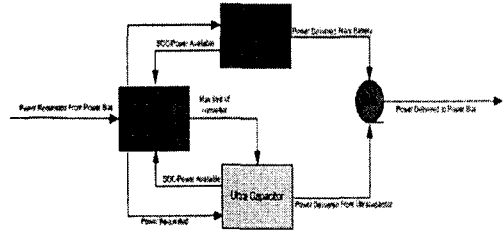


Fig. 5 ESS output control strategy (2)

버스로부터 요구되는 보조동력원의 파워가 0보다 큰 경우(Discharge)에는 Dynamic Variable 'K' 를 도입하여 K보다 클 경우는 배터리와 울트라 커패시터가 모두 동력원으로 사용되고, K값보다 작은 경우는 배터리만 사용하게 된다. 또한, 보조동력원의 요구 동력이 0보다 작을 경우(charge)에는 배터리와 울트라 커패시터의 SOC를 고려한 Battery charging matrix에 의해 각각의 충전량이 결정 된다.⁸⁾

Table 1 ESS output control strategy (2)

Pess_req > 0 (Discharge)		Pess_req < 0 (charge)
Pess_req < K	Pess_req > K	- Mode 3 Battery charging Matrix
- Mode 1 Pbat_out = Pess_req	- Mode 2 Puc_out = Max limit of converter (50kW) Pbat_out = Pess_req - Puc_out	Decision of charging Power between Battery and ultracapacitor

Table 2 Dynamic Variable 'K'

UC SOC	0	0.4	0.5	0.6	0
K(W)	K1(86.87)	K2(59.27)	K3(29.28)	0	0

Table 3 Battery Charging Matrix

		Battery SOC			
		0.5	0.6	0.7	0.8
UC SOC	0	0.5	0	0	0
	0.1	0.5	0	0	0
	0.2	0.5	0.1	0	0
	0.3	0.6	0.1	0	0
	0.4	H1(0.7109)	H2(0.1169)	0	0
	0.5	H3(0.8865)	H4(0.5506)	0	0
	0.6	1	U1(0.8516)	U2(0.2012)	0.25
	0.7	1	U3(0.8778)	U4(0.5520)	0.5
	0.8	1	U5(0.8369)	U6(0.7716)	0.75
	0.9	1	1	1	0.9
1	1	1	1	1	

전략(2)의 제어전략 최적화를 위해서 Dynamic Variable 'K' 와 Battery charging matrix중 UDDS cycle과 HWFET cycle 주행시 배터리와 울트라 커패시터의 SOC가 주로 머무는 영역에 대해 최적화를 수행하였다.⁹⁾

Table 3에서 H1-H4는 HWFET cycle에서 U1-U6은 UDDS cycle에서 SOC가 주로 머무는 영역이다.

Object Function =

Fuel Economy (UDDS) + Fuel Economy (HWFET)

Constraint Condition :

Acceleration Time (0 → 32km/h) < 3.5 sec

목적함수는 UDDS cycle과 HWFET cycle의 연비 값의 합으로 목적함수를 최소가 되게 하는 값을 도출 하였다. 또한 구속조건으로 0에서 32km/h의 가속시간이 3.5초보다 작게 하여 연비와 가속성을 동시에 향상 시키는 값을 도출하였다. Table 2, 3에서 괄호 안의 값이 최적화 결과이다.

4. 시뮬레이션 결과

먼저 UDDS 사이클에서 보조동력원의 요구 동력에 대한 배터리와 울트라 커패시터의 출력을 비교해 보았다.

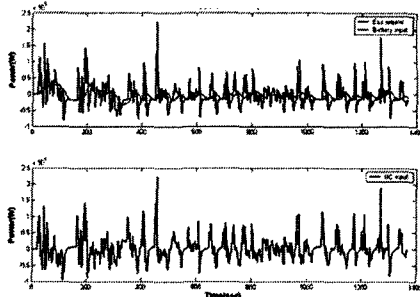


Fig. 5 Power distribution of ESS-strategy (1)

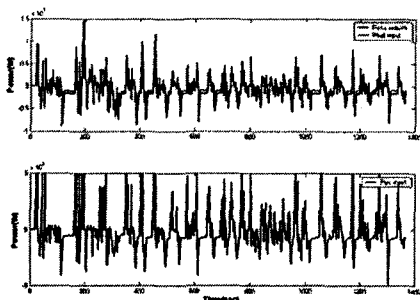


Fig. 6 Power distribution of ESS-strategy (2)

Fig.5,6에서 볼 수 있듯이, 전략(1)과 (2) 모두 급격한 요구 출력의 변화는 울트라 커패시터에서 감당하는 것을 볼 수 있고, 전략(1)은 필터의

사용으로 인해 배터리의 출력이 부드럽게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한, 전략(2)는 전략(1)에 비해 울트라 커패시터의 전체 사용량이 증가하였음을 알 수 있다. 이는 K값보다 큰 출력이 보조동력원에 요구될 때 우선적으로 울트라 커패시터가 방출함으로써 많은 영역에서 출력을 울트라 커패시터가 감당하기 때문이다.

다음으로 UDDS cycle에서 보조동력원의 SOC 변화를 살펴보았다.

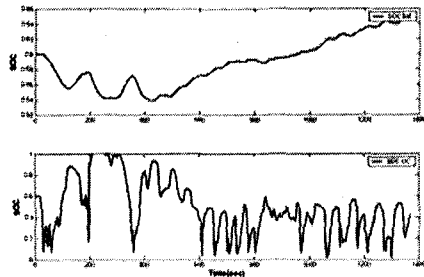


Fig. 7 SOC of ESS-strategy (1)

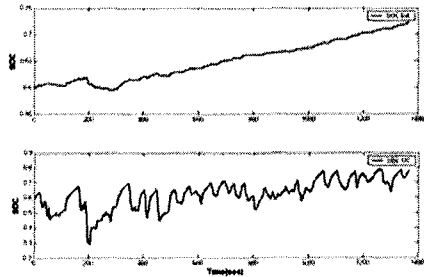


Fig. 8 SOC of ESS-strategy (2)

배터리의 SOC 변화를 볼때 전략(1)보다 전략(2)의 경우 더 많은 상승을 나타내었고 또한 울트라 커패시터의 SOC 변화가 전략(1)에 비해 전략(2)에서 더욱 안정적임을 알 수 있다.

Table 4 Performance analysis

	Acceleration Time (Sec)	F/E (km/L)		
		UDDS	HWFET	Obj.Fun.
Strategy(1)	3.35	6.26	8.96	15.22
Strategy(2)	3.45	7.83	8.99	16.82

Table 4는 전략에 따른 가속성능과 연비를 나타낸다. 가속성능에서는 전략(1)이 다소 좋은 결과를 보였으나 출력 밀도가 높은 울트라커패시터의 사용량이 많은 전략(2)의 경우 연비측면에서 매우 우수함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 보조동력원으로 배터리와 울트라 커패시터를 동시에 사용함으로써 배터리와 울트라 커패시터의 장점을 살린 다중 동력 연료전지 하이브리드 시스템(multi-power source fuel cell hybrid system)을 제안 하였고, 두 보조 동력원사이의 동력제어를 위한 두 가지 전략에 대해 성능을 비교해 보았다.

전략(2)의 경우 각 동력원의 출력 결정시 전략 (1)보다 각 보조동력원의 SOC의 변화를 적극적으로 반영하고 또한, 급격한 요구 출력의 변화가 생길 경우 출력밀도가 높은 울트라 커패시터를 우선적으로 사용함으로써 연비측면에서 매우 우수한 성능을 보였다.

본 연구에서는 도심주행 사이클인 UDDS cycle 과 고속도로 주행 사이클인 HWFET cycle에 대하여 전략(2)의 최적화를 수행하였으나 대상 차량이 균용차량임을 고려할 때 향후 험지등을 고려한 전용 사이클에 대한 최적화가 필요하다고 사료된다.

6. 후 기

이 논문은 두뇌한국 21 사업과 국방과학연구소의 지원을 받았습니다. 이에 관계자 분께 감사드립니다.

References

- [1] Philip P. Barker, 2002, "Ultracapacitors for Use in Power Quality and Distributed Resource Applications", IEEE
- [2] Roberto M. Schupbach, Juan C. Balda, 2003 "Design Methodology of a Combined Battery-Ultracapacitor Energy Storage Unit For Vehicle Power Management", IEEE
- [3] Sanguk Kwon, "A study on power management for fuel cell hybrid vehicle", M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2005
- [4] Sang-Jun An, Jae-Kwang Shin, Sang-Uk Kwon, Tae-Jin Kim, Kyo Il Lee, 2004, "A Study on Performance Analysis and Component Sizing Method for Multi-Power Source Fuel Cell Hybrid Armored Vehicle", EVS21, 2004
- [5] K.C.Oh, D.H.Kim, H.S.Kim, 2002, "Operating Algorithm for Minimum Fuel Comparison in a Parallel Hybrid Electric Vehicle with Relatively Small Electric Motor", EVS 19, 2002
- [6] Bruno Jeanneret, Tony Markel, 2004, "Adaptive Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Vehicle", SAE, Paper No. 2004-01-1298
- [7] Di Napoli, A.; Crescimbeni, F.; Solero, L.; Caricchi, F.; Capponi, F., 2002, "Multiple-input DC-DC power converter for power-flow management in hybrid vehicles", Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting, Conference Record of the , Volume: 3 , 13-18 Oct. 2002 Pages:1578 - 1585 vol.3
- [8] MATTHEW ZOLOT, 2003, "Dual-Source Energy Storage-Control and Performance Advantages in Advanced Vehicles", EVS-20 Proceedings, November, 2003
- [9] Feng An, Frank Stodolsky, Anant Vyas Roy Cuenca, James J. Eberhardt, 2000, "Scenario Analysis of hybrid Class3-7 Heavy Vehicle", SAE 2000-01-0989