

철도차량용 연료전지 하이브리드 동력시스템

Fuel Cell Hybrid Power System for Railway Vehicles

김영렬*
Kim, Young-Ryul

박영호**
Park, Young-Ho

김영수***
Kim, Young-Soo

ABSTRACT

The development of fuel cell hybrid power system, as a next generation power system for solving the global warming, has been being made actively progress around passenger vehicles. Also, in case of railway vehicles in unelectrified railway line, the adoption of fuel cell hybrid power system is being studied around well-known manufacturers. This paper introduces both the configuration and the control strategy of fuel cell hybrid power system in order to apply to a light electronic railway vehicle having a repeated driving pattern of acceleration, coasting and deceleration and provides simulation results to evaluate their validity.

1. 서 론

지구온난화는 현실이며 21세기는 지구환경과 에너지문제를 해결해야 할 역사적 사명에 놓여 있다. 이에 따라 환경기술력이 국가와 기업 경쟁력의 원천임을 직시하여 전 세계적으로 에너지 저감기술 및 대체에너지기술이 각국 정부의 주도하에 개발되고 있다. 특히, 태양광 및 풍력을 이용하여 만들어진 전기로부터 물을 전기 분해하여 수소를 제조하고 수소를 연료로 하는 수소에너지 사회가 필연적이라고 할 수 있다.

수소연료를 가장 효율적으로 이용하는 것은 연료전지이고, 연료전지의 과급효과가 가장 큰 것이 차량 분야이다. 수소를 연료로 하고 연료전지로부터 생성된 전기를 전기구동 모터에 공급하여 차량을 구동하는 연료전지 차량은 완전 무공해 차량이며 연료 효율 또한 도표 1에 나타낸바와 같이 기존 내연기관 차량의 3배를 목표로 하고 있다.

도표1. 일본 도요타사의 연료전지자동차의 효율 목표

Vehicle	Efficiency	Well To Tank (%)	Tank To Wheel (%)	Well To Wheel(%)			
				10	20	30	40
Gasoline Vehicle		88	16	14%			
Gasoline HEV			30	26%			
Diesel Vehicle		89	22	20%			
Diesel HEV			30	27%			
Hydrogen FCV		58	38	22%			
Hydrogen FCEV4			50	29%			
Target FCHV			60	3 x Gasoline, 1.5 x HEV 42%			

철도차량에서도 선진메이커를 중심으로 연료전지 하이브리드 철도차량 개발이 착수되어 향후 활발한 전개가 예상되고 있다. 특히, 전차선이 설치되어있지 않은 철로를 운행하는

* 현대로템 주식회사 기술연구소, 선행연구팀, 비회원

E-mail : yrk1234@hyundai-rottem.co.kr

TEL : (031)460-1560 FAX : (031)460-1784

** 현대로템 주식회사 기술연구소, 전장품개발팀

*** 현대로템 주식회사 기술연구소, 전기전자연구 부문장

기존의 디젤차량을 대체하는 것을 필두로 향후 개발되는 다양한 철도차량의 동력원이 될 것으로 예상하고 있다. 본 논문에서는 역(Station)간 거리가 짧은 구간을 운행하며, 가속, 타행주행(Coasting) 및 감속을 반복하여 운행하는 특징을 갖는 경전철에 연료전지 하이브리드 동력시스템 적용을 위한 동력시스템 설계 및 동력제어 전략을 개발하고 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

2. 연료전지 하이브리드 동력시스템의 구성

2.1 동력시스템 구성

그림1은 경전철에 적용을 고려하고 있는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 구성과 전력흐름을 나타낸다. 본 시스템은 구동모터의 인버터측 DC Link 전압이 연료전지의 전압에 따라 가변되는 구조이며, 배터리는 양방향 DC/DC 컨버터를 통하여 구동모터의 회생전력 및 연료전지의 발전 전력을 저장할 수 있으며, 반대로 구동모터에 전력을 공급할 수 있다. 차량에서 요구되는 부하는 구동모터 뿐 아니라 냉난방장치와 같은 보기류 부하 및 연료전지의 발전에 필요한 연료전지 운전장치류의 부하와 같은 연료전지 기생전력을 포함한다. 이들은 각각 운전 전압이 다르기 때문에 그림과 같이 해당 전원에 분산 배치된다.

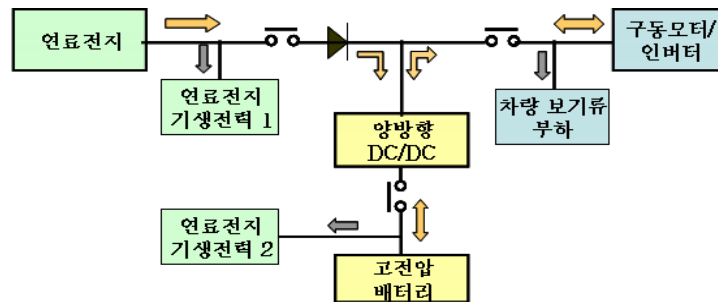


그림1. 연료전지 하이브리드 동력시스템 구성

2.2 제어 시스템 구성

그림1의 동력시스템을 제어하기 위한 제어시스템의 구성과 각 제어기의 동작에 관한 주요 입출력 사양은 다음 그림2와 같다.

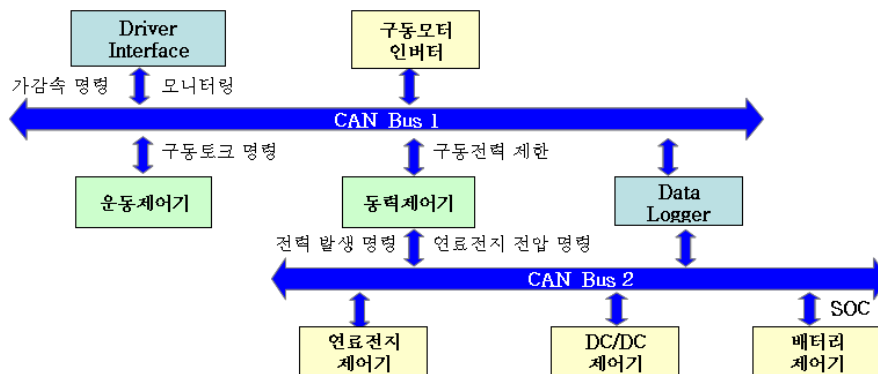


그림2. 연료전지 하이브리드 동력제어 시스템 구성

제어시스템은 운동제어기와 동력제어기 각각에 CAN Bus 1과 2를 두어 각각은 구동모터의 토크제어 및 연료전지의 발전제어를 수행한다. 즉, 운동제어기는 운전자와의 인터페이스 및 구동모터/인버터의 상위제어기가 되며, 동력제어기는 연료전지제어기, DC/DC컨버터제어기 및 배터리제어기의 상위제어기가 된다. 또한 운동제어기와 동력제어기는 상호 협조적 제어를 수행하기위해 동력제어기는 CAN Bus1도 접속하고 있다. Data Logger 역시 각 CAN Bus에 접속하여 각 제어기들의 주요 제어 변수 및 입/출력 값을 저장한다.

2.3 연료전지 하이브리드 동력제어의 개념

연료전지 하이브리드 동력시스템의 기본적인 동력제어 개념은 다음과 같이 연료전지 및 배터리의 성능 선도와 이들 시스템의 보호를 고려하고 있다.

2.3.1 연료전지 성능곡선과 동력제어기의 발전 지령 생성

그림3은 연료전지 성능곡선을 나타내고 있다. 즉, 연료전지에 부하전류가 없을 때 (OCV: Open Circuit Voltage) 단위셀 전압은 약 1.0V가 되며 부하전류가 증가되어 단위셀 전압이 0.6V이하가 되면 연료전지의 보호를 위하여 부하전류를 증가시키지 않아야 한다.

동력제어기는 구동모터의 요구부하전력과 기타 차량 소모 전력을 파악하고 동시에 배터리의 SOC 정보로부터 연료전지의 발생 전력을 결정한다.

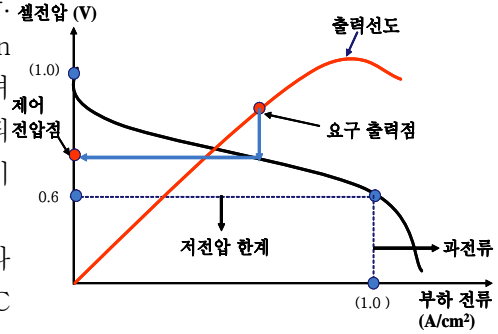


그림3. 연료전지 성능 곡선도

2.3.2 배터리의 성능곡선과 목표 SOC

그림4의 배터리의 SOC별 충방전 저항은 SOC가 높을 때는 충전저항이 크고, SOC가 낮을 때에는 방전 저항이 크다. 또한, 배터리의 안전을 위해서 보통 SOC 80%를 상한치로 설정하고 있으며, 내구성을 위하여 30%를 하한치로 설정하고 있다.

배터리의 충방전 효율을 고려하고 상한치 및 하한치 내에서 배터리를 운용하기 위해서 배터리를 목표하는 SOC로 유지 제어가 필요하며 이는 통상적으로 50~60% 사이에서 목표 SOC를 결정한다.

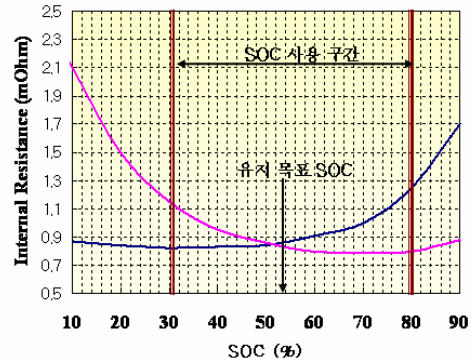


그림4. 배터리의 SOC별 내부저항

2.3.3 동력제어 알고리즘

하이브리드시스템의 동력 제어의 목적은 구동모터를 포함한 차량의 부하전력을 충분히 공급하면서 배터리 SOC를 목표하는 값에서 유지하는 것이라 할 수 있다. 그림5는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 동력제어 개념도로 연료전지 출력지령값 (P_{fc}^*)은 구동모터의 포함한 차량 요구동력과 배터리의 목표 SOC를 추종하는 것으로 결정 된다.

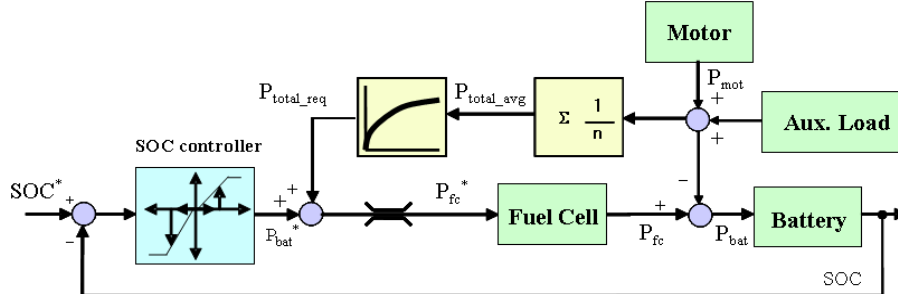


그림5. 연료전지 하이브리드 동력제어 개념도

3. 경전철의 운행 패턴 및 구동모터 특징

고려하고 있는 연료전지 하이브리드 동력시스템의 적용 대상은 경전철로서 역(Station) 간 거리가 짧고 가속, 타행주행(Coasting) 및 감속 과 정차를 반복하는 주행 패턴을 갖는다. 따라서 이러한 주행 패턴에 부합하는 동력시스템설계 및 동력제어 전략이 필요하다.

3.1 운행 패턴과 요구 동력시스템의 특성 예측

그림6과 도표2는 고려되고 있는 경전철에 요구되는 운행 패턴이다.

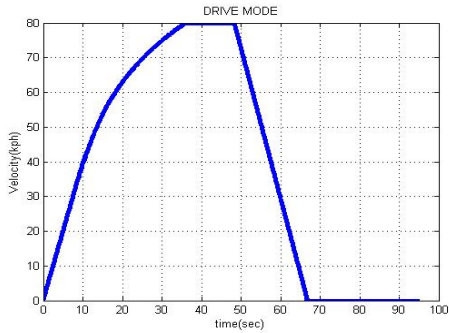


그림6. 경전철의 운행 패턴

도표2. 경전철 운행 패턴 요약

주행거리	1.0 km
최대 속도	80 kph
주행 시간	67 초
정차시간	30 초
일충전 주행거리	(400 km)

도로를 주행하는 차량에서는 노면상태, 도로상황 및 신호등에 의해 차량의 가속과 감속을 예측할 수 없지만 철도차량은 차량 운행사가 미리 정해 놓은 주행 패턴에 따라 모든 운전자는 거의 같은 패턴으로 운전하게 된다. 그림6은 각 역간 주行的 평균적인 주행 패턴이 된다. 여기서 동력시스템의 설계 및 제어관점에서 주목해야 할 것은 차량이 정지상태로부터 최대속도까지 가속되며 역으로 최대속도에서 정지상태로 가속된다는 것과 감속에 요구되는 시간이 가속에 요구되는 시간의 절반 수준으로 짧다는 점이다. 이것을 위해서는 기본적으로 구동모터의 속도-토크 제어 선도가 가속시보다 감속시 더 큰 전력(Power)을 발생시키도록 설계되어야 할 뿐 아니라 감속 패턴을 만족시키기 위해 발생하는 회생에너지를 충분히 흡수할 수 있는 에너지 용량을 갖는 배터리 선정이 필요함을 예측할 수 있다.

3.2 전기 구동 모터의 성능 곡선 과 배터리의 파워 용량

경전철의 운행패턴을 만족하기위해 설계된 전기구 구동력 동모터의 속도-구동력선도는 다음 그림7과 같다.

즉, 주행패턴에서 요구한 가속시 보다 더 짧은 감속 시간에 따라 모터 회생시 제동력은 모터링시의 2배속도 지점에서 최대 제동력을 발생하도록 설계되었다.

최대 회생 파워가 구동시 대비 2배가 됨을 의미하는 것으로서 배터리 및 DC/DC 컨버터의 파워용량은 이를 흡수할 수 있는 것으로 선정되어야 한다

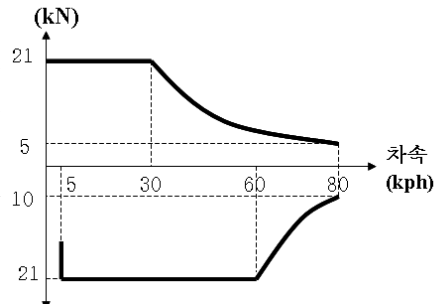


그림7. 구동 모터 구동력 선도

4. 경전철용 동력시스템 설계 및 제어 전략

4.1 동력시스템 설계

경전철의 주행 패턴의 특성에 따라 연료전지의 출력과워 및 배터리의 요구 파워는 다음과 같이 정리될 수 있다.

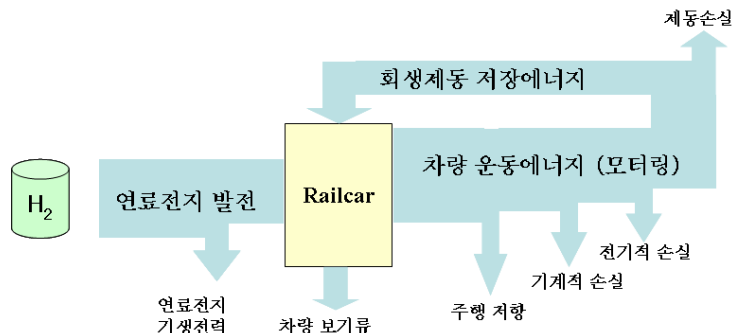


그림8. 차량 및 동력시스템 에너지 흐름

- 1) 배터리의 파워 용량은 구동모터의 최대 회생파워를 받아들일 수 있어야 한다.
- 2) 연료전지의 파워 용량은 구동모터의 최대 구동파워 이하의 값으로 결정할 수 있으며 다음과 같이 에너지 관점에서 그 최소값이 결정된다.

$$\text{총 주행에너지} = \text{모터링} + \text{보기류} + \text{주행저항} + \text{기생전력} + \text{기계적/전기적 소모} \quad (1)$$

$$\text{연료전지 공급에너지} = \text{총 주행에너지} - \text{배터리 회생에너지} \quad (2)$$

$$\text{연료전지 최소파워 용량} = \text{연료전지 공급에너지} / (\text{총주행 시간} - \text{회생 시간}) \quad (3)$$

4.2 동력시스템 제어 전략

그림5에서 제시한 연료전지 하이브리드 시스템의 기본적인 동력제어 개념을 바탕으로 경전철의 주행 패턴에 부합하는 알고리즘으로 다음 사항을 알고리즘에 추가 하였다.

- 1) 차량 총 요구 파워에 대해 각 주행 모드별 연료전지 및 배터리의 동력을 분배한다.
여기서 차량의 주행모드는 다음의 4개의 경우로 분류하며 배터리 SOC에 따라 각각을 세부 분류한다.
 - 차량 경부하시 : 연료전지 출력 > 차량의 총 요구 파워
 - 차량 중부하시 : 연료전지 출력 < 차량의 총 요구 파워
 - 차량 제동시
 - 차량 정차시
- 2) 차량 30초간 정차시에도 배터리의 SOC에 따라 충전이 필요하다면 연료전지를 최대출력으로 운전할 수 있다.
- 3) 차량 제동시 연료전지도 내구성 및 연료전지에 직접 부하 연결된 연료전지 기생전력을 위해 일정 출력을 발생시킨다.
- 4) 배터리 SOC가 목표 SOC와의 차가 5% 미만일 때는 연료전지만의 출력을 이용하여 차량 중부하시 및 회생제동시에는 이에 관계없이 배터리를 충전한다.

5. 연료전지 하이브리드 동력시스템 시뮬레이터 개발 및 시뮬레이션

5.1 시뮬레이터 개발

제안된 연료전지 하이브리드 동력시스템의 설계 및 동력제어 알고리즘을 검증하기 위해 성능해석 시뮬레이터가 필요하며, 이를 위해 그림9와같이 Matlab/Simulink 기반으로 차량, 운전자, 동력시스템 및 동력제어기를 모델링 하여 구성한 시뮬레이터를 개발하였다.

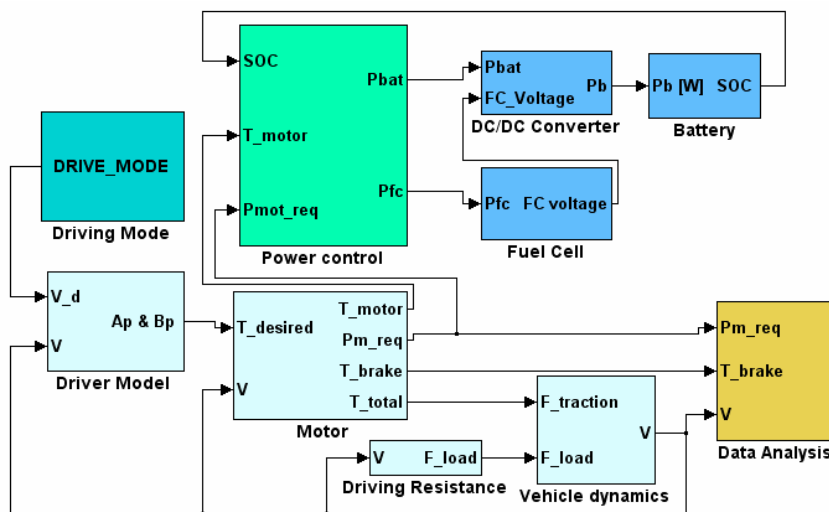


그림9. 연료전지 하이브리드 경전철용 Matlab/Simulink 시뮬레이터

5.2 시뮬레이션 대상

시뮬레이션에 사용된 차량 및 동력시스템의 주요 사양은 도표3과 같다. 여기서, 배터리의 최대 출력은 그림7의 구동모터의 최대 회생전력을 흡수할 수 있는 용량이다.

도표3. 차량 및 동력시스템 Data

차량 보기류 부하	50kW	차량 중량	40ton
배터리 기준 전압	370V	배터리 최대출력	350kW

5.3 연료전지 출력 결정

연료전지의 기생전력을 26.5kW로 가정할 때, 연료전지의 출력 하한치는 식(1)~(3)에 의해 다음과 같이 시뮬레이션 되었다. 본 연료전지 최소 출력용량을 근거로 적용이 가능한 용량을 고려하여 200kW로 결정하였다.

도표4. 연료전지 최소 출력용량 시뮬레이션 결과

총 주행에너지	배터리 회생에너지	연료전지공급에너지	연료전지 최소 출력용량
5.23 kWh	1.53 kWh	3.7 kWh	170kW

5.4 배터리 용량 결정

배터리의 용량(Ah)을 결정하기 위하여 배터리 초기 SOC를 0.4로 두고 배터리의 용량 별 1회 역간 주행 시뮬레이션 하여 가속구간으로 인한 배터리의 SOC의 저하된 값을 비교 하였다. 결과에 나타난 바와 같이 용량 30Ah의 경우 배터리의 허용 하한치 0.3 보다 저하되므로 용량으로는 부족하며, 배터리의 최대출력을 만족시키기 어려운 용량이라고 할 수 있다. 따라서, 배터리의 용량을 50Ah 이상으로 설정하는 것이 필요하다.

도표5. 연료전지 용량별 가속시 배터리 SOC 최저점 (초기 SOC=0.4)

30 Ah	40 Ah	50 Ah	60 Ah	70 Ah
0.25	0.28	0.31	0.32	0.33

5.5 동력 제어 알고리즘의 적합성

연료전지 최대 출력을 200kW로 하고 배터리의 용량을 50Ah로 결정하여 동력제어 알고리즘에 따른 차량주행 시뮬레이션하였다.

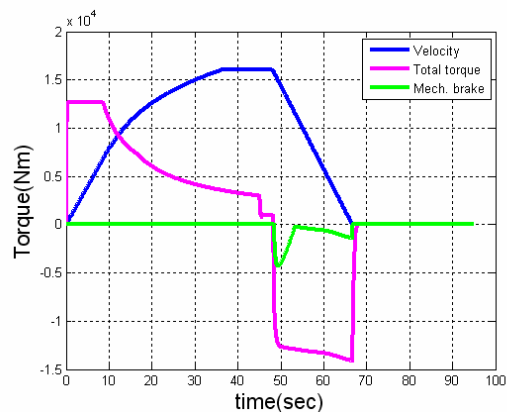


그림10. 주행시 구동 토크

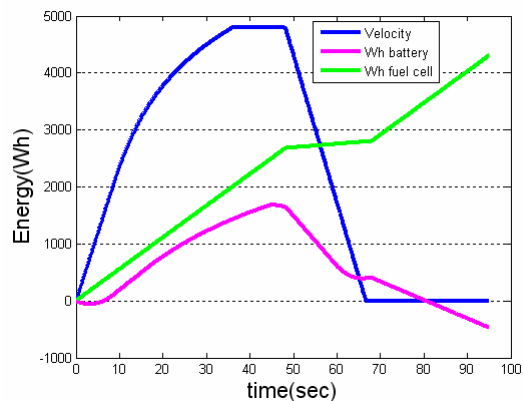


그림11. 에너지 소모 (초기 SOC=0.4)

그림10에서는 감속 구간에서 기계적제동의 기여분을 알 수 있으며, 그림11에서는 주행시 연료전지 및 배터리의 에너지 소모 경향을 알 수 있다. 특히, 차량 정차시에도 연료전지에 의해 배터리가 충전되고 있음을 알 수 있다.

그림11에서는 차량 주행 중 요구 동력에 대하여 동력제어 알고리즘에 의해 연료전지 및 배터리의 동력 분배를 나타내고 있으며 그림12는 초기 SOC에 대해 10회 반복 주행시 SOC가 목표 SOC에 잘 수렴되고 있음을 보여준다.

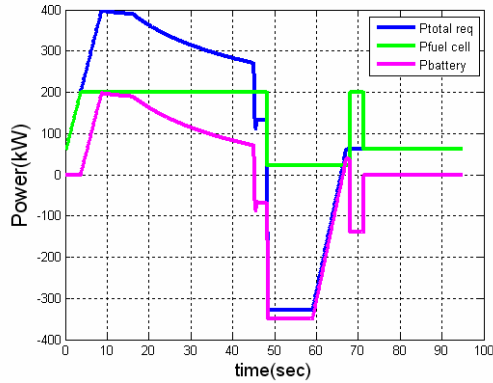


그림12. 주행시 요구 동력 분배

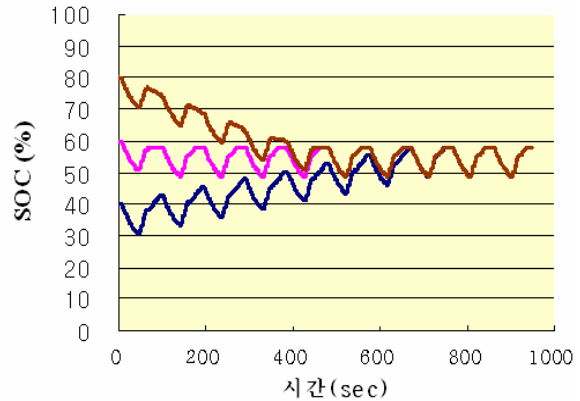


그림13. 초기 SOC별 목표 SOC 수렴성

6. 결론

본 논문에서는 경전철에 적용될 연료전지 하이브리드 동력시스템의 설계와 제어전략에 대해 주행 패턴을 근거로 제시하였으며 시뮬레이터의 개발을 통하여 설계 및 제어 알고리즘을 검증하였다. 또한, 본 논문을 통하여 다음과 같은 중요한 사항이 도출되었다.

- 1) 배터리의 파워는 구동모터의 회생파워를 흡수할 수 있도록 선정되어야 하며 본 회생 파워는 구동파워보다 크므로 적어도 파워면에서는 배터리 단독 운행이 가능하다.
- 2) 연료전지 파워 용량은 구동모터의 구동 파워 이하에서 선정할 수 있으며 그 크기는 에너지 매니지먼트 관점에서 최소 용량은 정의 될 수 있다.
- 3) 배터리의 SOC가 동력제어기의 효과적인 동력 분배에 따라 목표 SOC에 수렴되었다.

참고문헌

1. Motomi Shimada, Ryosuke Furuta, Shinji Takeda (2007), "Trial Run of Fuel Cell Hybrid Traction System for Railcar", EVS23.
2. Hiroshi Nomoto, Tetsuro Omura, Eiichi Toyota, Motomi Shimata(2006), " Hybrid Traction System for Railway Vehicles", EVS22
3. YoungRyul Kim, SeoHo Choi, TaeWon Lim, WonSuk Cho(2002), "Development of Hyundai Fuel Cell Hybrid Vehicle", EVS19.
4. 함윤영, 송승호,민병문,노태수,이재완,이현동,김철수(2003), “직렬형 하이브리드 버스에서 보조동력장치의 고효율 작동을 위한 제어 알고리즘”, Transaction of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp.170-175
5. 최영춘, 박치만, 김동현, 김정민, 김영렬, 김현수(2007),“6x6 인휠구동 직렬형 하이브리드 차량의 동력제어 전략 개발“, 2007 KSME 추계학술대회 논문집4권, pp2182-2187.
6. 조장호, 장재영, 김영렬, 임태원(2005), "연료전지 자동차용 수소재순환시스템 알고리즘 개발“, 2005 현대기아연구개발본부 연구논문집
7. JangHo Jo, IlHee Cho, NamWoo Lee, YoungRyul Kim, TaeWon Lim(2003), "Evaluation of a Hyundai's Fuel Cell System on Breadboard", 2003 International Fuel Cell Seminar
8. 김영렬, 손영일, 송병석 (2000), “하이브리드 연료전지자동차의 HILS 응용“, 2000 KSME 추계학술대회 논문집 2호, pp705-710