

철도용 연료전지 및 유도급전을 이용한 Hybrid system 연구

한경희\*, 이병승\*\*, 박현준\*\*, 권삼영\*\*, 백수현\*  
\*동국대학교 전기공학과, \*\*한국철도기술연구원

The Study of Hybrid system using FC and IPT for Railway system

K.H.HAN\*, B.S.LEE\*\*, H.J.PARK\*\*, S.Y.KWON\*\*, S.H.BAEK\*  
\*Dongguk Univ. Electric Dept., \*\*Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - Urban air quality, including carbon-dioxide emissions, and national energy security are related issues affecting the rail industry and transportation sector as a whole. They are related by the fact that (in the United States) 97-98% of the energy for the transport sector is based on oil, and more than 60% is imported. A fuelcell locomotive combines the environmental advantages of a catenary-electric locomotive with the higher overall energy efficiency and lower infrastructure costs of a diesel-electric. Catenaryelectric locomotives, when viewed as only one component of a distributed machine that includes an electricity-generating plant and transmission lines, are the least energy-efficient locomotive type. The natural fuel for a fuelcell is hydrogen, which can be produced from many renewable energies and nuclear energy, and thus a hydrogen-fuelcell locomotive will not depend on imported oil for its energy supply. This paper proposes a base models of Hybrid fuel cell/IPT railway vehicle power system, the necessary of this research.

1. 서 론

최근 국내는 물론, 전 세계적으로 화석연료 수요공급 한계로 인해 유가가 급등하면서 국내에서는 화물연대 파업과 같은 사회적, 경제적 문제가 확산되고 있다.

이미 전체 교통수단의 97% 이상이 기름 소비에 의한 동력시스템이며, 그 중, 국내 소비 유량 100%를 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한 이러한 이유로, 교통/물류비용면에서의 가계 부담이 증가하여, 이에 따른 대중교통의 이용량이 증가함과 동시에 차츰 연료비 절감효과가 뛰어난 Hybrid 자동차로의 관심이 커지고 있다. 에너지 자원의 한계와 대기오염을 우려한 화석연료 소비절감 대책으로서 연료전지를 이용한 Hybrid 철도 추진시스템은 친환경적인 대중교통 구현을 위한 필수사항인 것은 틀림이 없다.

여러 가지 fuel cell이 존재하지만 자동차용과 휴대용으로 적합한 PEM fuel cell은 양극판, 가스 확산층, 전해질, 그리고 멤브레인 등으로 구성된 각각 다른 층을 가지고 구성되며 수소와 산소가 전해층에서 반응할 때, DC 전력이 발전되고 열과 수분이 부산물로 발생된다.

BOP(balance-of-plant)는 연료공급과 부산물 제거를 위해 요구구되는 부분이다. BOP는 4개의 하위 시스템으로 나눌 수 있는데 이는 발열 방지와 함께 연료와 수분 공급을 위한 것이다. 연료전지의 부산물로 발생하는 열은 연료전지의 안정적인 동작을 위해서 제거되어야 한다. 그러나 열은 가정이나 빌딩에서 물이나 공기를 가열하는데 다시 사용될 수 있다. 하나의 장점은 자칫 낭비될 수도 있는 부산물을 사용함으로써 효율을 극대화 할 수 있다는 것이며, 이는 상업화할 수 있는 가능성에 근접하고 있

음을 의미한다.

에너지 절감효과 극대화를 위한 친환경적 Hybrid 추진 시스템은 고출력 2차 전지(Ni-MH 등)와 Supercap을 이용하여 회생에너지를 차량 내에서 직접 재생 및 소모하여 효율적으로 활용하는 것이 가능하다. 한 예로, 주행 중 충전은 물론, 역사 정차 시 유도급전을 이용한 급속충전에도 효과적임을 의미한다.

이미 출발과 저속주행 시에 엔진에 연료(디젤 혹은 가스)를 차단하여 사용하지 않고, 배터리전원을 이용하여 전기모터로 구동하는 하이브리드 자동차를 개발하는 등, 일반자동차보다 연비가 2배 이상 높은 고효율 Hybrid 추진 시스템을 포드(1L당 25km), 도요다(1L당 28km), 혼다(1L당 35km) 등의 일류 기업들이 앞 다투어 개발하고 있다.

또한, 기존 발전소 공급 에너지효율 20~40%, 연소과정이나 구동장치가 필요 없는 연료전지가 발전할 때 발생하는 폐열 활용 시 최대 효율 83%에까지 이르러 연료전지의 발전효율은 화력발전 대비 5~20%나 높은 것으로 알려져 Hybrid 추진시스템은 이미, 효율 측면에서는 검증이 된 시스템이라 할 수 있겠다.

시스템별 구동효율

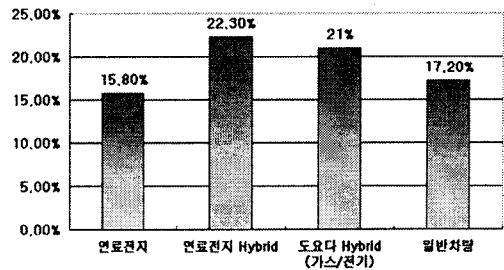


그림 1. 일반적 PEM fuel cell 전력 시스템의 구조

연료전지 시스템을 철도차량에 적용할 경우에 예상되는 친환경적 장점 중 하나는 기관지염, 폐기종, 폐암 등 호흡기 질환의 원인인 SOx(황산화물), NOx(질소산화물) 배출 없어, 대기오염의 염려가 없는 연료전지 발전시스템을 적용하면 청정 철도 교통시스템 구현이 가능하다는 것이다.

또한, 연료전지 시스템을 적용한 철도차량의 궤도운행 특성에 무접속 유도급전 기술을 접목하면, 기존 Hybrid/전기자동차에서 에너지 저장 시스템의 기술적 한계(즉, 짧은 1회 충전 주행거리와 긴 충전시간, 수소에너지 안전성 등)를 극복하는 것이 가능하다. 가전·배터리 하이브리드 RTRI LRV "Hi-tram" 1회 충전으로 30km 주행가능하며 가속시 소모전력의 70%를 제동시 회생전력 사용한다.(유럽 CITADIS or Hybrid bibi, Alstom 저장연료전지 버스 등)

현재 판매되는 고가의 Hybrid 에너지 전원 차량 시스템

은 개인 운전자를 대상으로 해서는 보급 속도가 느리기 때문에 단기적인 유통 소비 절감 효과를 기대하기 어려운 단점이 있으므로, 시스템 비용 대비 연료비 절감 효과가 큰 대용량의 Hybrid 교통시스템 구현은 사회기반시설로서 철도가 해결해야 할 과제라고 생각되며 이러한 방면에서 철도시스템의 특성을 적극적 활용함으로써 시스템적/경제적 한계에서 보다 업그레이드된 Hybrid 교통시스템 구현이 가능하리라 생각된다.

## 2. 본 론

### 2.1 철도차량용 Fuel Cell/IPT System

일반적으로 사용되는 PEM fuel cell system의 구조는 보통 가정용 연료전지의 예로 사용되는 CHPG의 구조(그림 1)를 통해 설명할 수 있다. CHPG란, Combined Heat and Power Generation의 약자로, 개질기를 비롯한 연료전지 전력공급시스템, DC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터와 함께 저장장치가 포함되어 있으며 일반적인 연료전지 시스템 방식과 동일하다. 연료전지 발전 시스템이 동작하게 되면 부하는 단상 혹은 3상 이 될 수 있다.

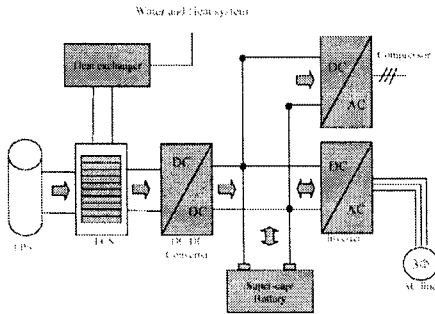


그림 2. 일반적 PEM fuel cell 전력 시스템의 구조

무엇보다도 연료전지의 출력 특성은 대전류/저전압을 발생하는 전압원으로 볼 수 있으며, 그러므로 연료전지의 출력 전압은 주어진 전압의 최대치와는 최소한 같도록 DC bus voltage 까지 승압해야 한다. 전압의 승압은 컨버터에 의해서 수행된다. 컨버터는 스위치가 on 되었을 때에는 우선 에너지를 인덕터에 저장하고, 스위치가 off 되었을 때 캐패시터에 인덕터 에너지를 다시 충전한다. 일단 스위칭 주기가 적절하게 조절되면, 캐패시터의 전압은 부하에서 일정하게 유지될 수 있다.

가정용 시스템과는 달리 철도 시스템의 경우, 차량 기동시 요구되는 높은 에너지 밀도를 보완해 줄 Battery(Super Capacitor)가 필요하며 이는 각 정차역(혹은 충전 색션)마다 IPT(Inductive Power Transformer) system을 이용함으로써, 가능하다.

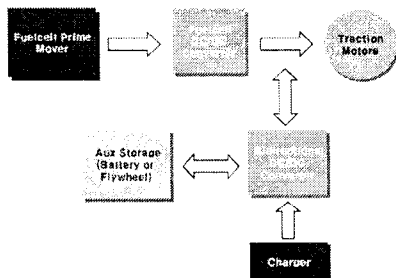


그림 3. 연료전지 Hybrid 추진시스템의 블록다이어그램

Hybrid 연료전지 IPT 복합시스템의 구성 및 역할은 다음과 같다. DC bus에 병렬로 연결된 DC 링크 캐패시터는 야기되는 전력의 요동을 필터링함으로써 부하를 연료전지와 분리시킨다. 여기에 bidirectional DC-DC converter와 연결된 Super Cap.에 에너지를 순간적으로 저장하였다가 급격히 요구되는 부하 수요에 따라 DC 링크 캐패시터로 에너지를 전달한다.

### 2.2 철도차량용 Fuel Cell/IPT System Model

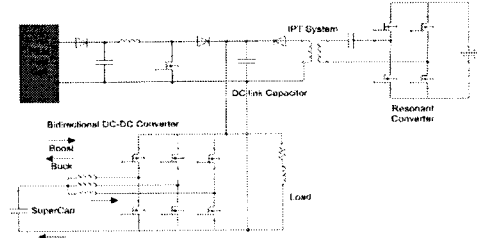


그림 4. 연료전지 및 유도급전 시스템을 이용한 하이브리드 전력 시스템

그림 2는 연료전지 및 유도급전(IPT) 시스템을 이용한 하이브리드 전력 시스템이다. PEM fuel cell 전압 안정을 위한 DC 링크 캐패시터는 Bidirectional DC/DC 컨버터를 통해 SuperCap.에 연결되어 있다. 마찬가지로 IPT 시스템을 이용하여도 SuperCap.의 충전이 가능한 구조를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

DC/DC 컨버터 연료전지 전원시스템의 대표적인 기계 구성을 그림 2에서 보여준다. 다이오드  $D_1$ 이 스택으로 역류하는 전류를 막는 동안, 스위칭 기간 동안 발생하는 동작 중에 어떠한 급작스런 전류의 공급을 완충하는 역할을 캐패시터( $C_{DC}$ )가 담당한다. 연료전지의 출력 전압을 승압하는 DC/DC 컨버터와 함께 DC/AC 컨버터가 요구되는 전류를 제공하게 되는 것이다. 운전이 전력 변환 중에 손실이 없는 것과 인덕터에서의 전류가 연속적이라는 가정 하에 컨버터의 동작이 컨덕션 모드로 제한되는 경우, DC/DC 컨버터는 두 개의 식 (1)과 (2)에 묘사되어 진다.

$$\frac{dv_{DC}}{dt} - \frac{1}{C}i_{DC} = \frac{1}{C}(1-D)v_{FC} - \frac{v_{DC}}{CR_{load}} \quad (1)$$

$$\frac{di_{DC}}{dt} = \frac{1}{L}(v_{DC} - (1-D)v_{FC}) = \frac{1}{L}(v_{DC} - v_1) \quad (2)$$

$v_1$ 은 PWM 기간 중 평균 전압을, D는 스위치 on duty,  $v_{FC}$ 는 연료전지시스템의 출력전압, 그리고  $v_{DC}$ 는 컨버터의 출력전압을 나타낸다.

컨버터에 손실이 없다고 하면, 입력 전력,  $P_{FC} = i_{FC} v_{FC}$ 는 컨버터의 출력전력,  $P_{con} = i_{con} v_{DC}$ 와 같다. 그러면, 출력에서의 전류와 캐패시터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{con} = \frac{P_{FC}}{v_{DC}} = \frac{v_{FC} i_{FC}}{v_{DC}} \quad (3)$$

$$i_{cap} = i_{con} - i_{load} \quad (4)$$

$$i_{con} = \frac{v_{FC} i_{FC}}{v_{DC}} - i_{load} \quad (5)$$

이 식들은 2개의 상태변수, 즉 DC 링크 전압과 연료전지 전류  $i_{FC}$ 를 가지는 2차 선형 시스템 다른 선형 시스템을 나타낸다.

유도 급전 장치의 1차측 전력전송부에서는 3상의 교류를 받아 저 왜곡 정형교류를 공급하는 전원 공급장치와 보상회로, 그리고 2차에는 유도 급전 장치로 유도 급전 시스템이 구성된다. 보다 완벽한 유도 급전 시스템의 구

성을 위해서는 2차측에 누설 인덕턴스 보상회로(공진회로)부를 추가하는 것이 가능하다.

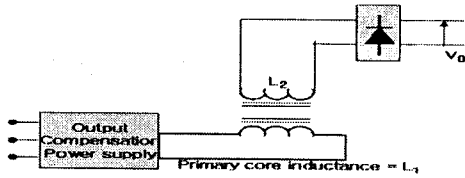


그림 5. 유도 급전 시스템

케도에 매립된 1차측 전력전송부의 상면에 차량이 위치하고 이 때, 차량 하부의 2차측 집전코일에 전력이 유도된다.

$$V_{po} = j\omega M_p I_{L1} \quad (6)$$

$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_p}{L_2} I_{L1} \quad (7)$$

$$P_{max} = |V_{po} I_{psc}| = \frac{\omega^2 L_1^2 M_p^2 Q_c}{L_2} \quad (8)$$

2차측 전력 집전자의 최대 출력 전류는 수식 6~8에서 볼 수 있듯이  $M_p/L_2$  상호인덕턴스의 2차 자기 인덕턴스의 비에 의존하여 1차측 전력전송부 전류  $I_{L1}$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

### 2.3 국내의 철도차량용 Hybrid Fuel Cell/IPT System

공공수송부분인 철도 시스템에 연료전지를 이용한 Hybrid 시스템 및 유도급전방식의 채용에 있어서 국내에서는 적용 사례가 없다.

국내 자동차 회사에서 개발 중인 연료전지 Hybrid 자동차는 2020년 연료전지 자동차의 양산을 목표로, 실용화 가능성 검증과 기술개발 방향 및 전략을 수립하고, 연료전지 자동차 및 수소생산, 공급, 충전 설비관련 기술 표준화 작업을 위해 현재 미국 에너지성의 시범운영에 참여 중이다.

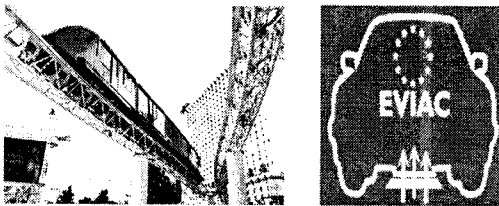


그림 6. 유도 급전 시스템을 이용한 추진시스템의 해외사례

독일, 프랑스, 영국 등을 포함하는 유럽연합에서는 2002년도부터 EVIAC (Electric Vehicle Inductive Automatic Charging)를 구성하여 전기자동차 및 경량전철에 활용할 수 있는 유도 급전기술을 공동 개발하고 있으며, 유도 급전기술을 수송시스템에 적용한 사례로는 미국 라스베가스 관광객 수송을 위한 환경친화적인 레도 전용 유도 급전 경량전철 상용화를 들 수 있다.

뉴질랜드의 경우 오크랜드 대학에서 연구를 수행하여, 환경친화적인 도로전용 유도급전 소형자동차시험선을 구축하여 상용화 검증시험이 진행 중이며, 일본의 경우, 다양한 방식의 Hybrid 복합열차 시스템의 개발과 발전성능 향상 위주의 특허보유하고 있으며, 이중 다수는 Hybrid 시스템의 발전성능 개선에 직접 관련된 연료전지 기술이다.

미국과 유럽의 경우에도 이미 Hybrid 추진 시스템을 적용한 철도 시스템 개발을 정부차원에서 추진하고 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 해외 철도 시스템 차량에서 적용되는 연료전지/IPT 적용 추진 시스템의 사례를 소개하였다. 동시

에 자동차는 물론 고유가 시대에 청정 교통 시스템의 구현은 물론, 에너지 절약에 기여할 수 있는 fuel cell/IPT 시스템을 제안하였다. 또한 기동시에 요구되는 높은 에너지 밀도를 보완해 줄 Battery(Super Capacitor)와 정차역마다 IPT(Inductive Power Transformer) system을 이용하는 PEM fuel cell system의 각 부분별 요소가 되는 model를 제시하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A.R. Miller, D.H. DaCosta, and M. Golben, "Reversible Metal-Hydride Storage for a Fuelcell Mine Loader," Proceedings of the Intertech-Pira Conference 2006 Hydrogen and Storage Forum, Vancouver, Canada (11-13 September 2006).
- [2] A.J. Forsyth, S. V. Molloy, "Modeling and control of DC-DC converters," Power Engineering Journal, vol. 12, Issue 5, pp. 229-236, Oct. 1998.
- [3] B. Baha, "Modeling of resonant switched-mode converters using SIMULINK," IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 145, No. 3, pp. 159-164, May 1998.
- [4] P. Moraal and I. Kolmanovsky, "Turbocharger Modeling for Automotive control Applications," SAE Paper 1990-01-0908.