

## 연료전지 및 유도급전 시스템을 이용한 하이브리드 철도차량 시스템 모델링

한경희\*, 장혜영\*, 권상영\*\*, 박현준\*\*, 이병송\*\*, 백수현\*  
 \*동국대학교 전기공학과, \*\*한국철도기술연구원 전기신호 연구본부

### The Modeling of Hybrid Railway Vehicle Power System Using Fuel Cell and IPT System

K.H.HAN\*, H.Y.JANG\*, S.Y.KWON\*\*, H.J.PARK\*\*, B.Y.LEE\*\*, S.H.BAEK\*  
 \*Dongguk Univ. Electric Dept., \*\*KRRI Signaling & Electrical Engineering Research Dept.

**Abstract** - This paper proposes a base models of Hybrid railway vehicle power system. A powered system with fuel cell is regarded as a high current and low voltage source. The design parameters of the system should be chosen by taking into account the characteristics of the fuel cell, so the costs of the power system at given operating conditions can be reduced. Currently, no integrated simulation has been approached to analyze interrelated effects. Therefore, the base models of power conversion system with a PEM fuel cell/IPT system for hybrid powered system that includes the PEM fuel cell stack, DC/DC converter are developed. Concept of bidirectional converter for super capacitor charging system is presented.

의 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 섹션)마다 IPT(Inductive Power Transformer) system을 이용함으로써, 가능하다.

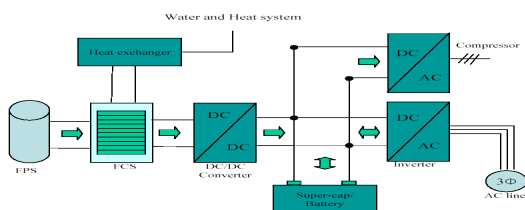
DC bus에 병렬로 연결된 DC 링크 캐패시터는 야기되는 전력의 요동을 필터링함으로써 부하를 연료전지와 분리시킨다. 여기에 bidirectional DC-DC converter와 연결된 Super Cap.에 에너지를 순간적으로 저장하였다가 급격히 요구되는 부하 수요에 따라 DC 링크 캐패시터로 에너지를 전달해주는 시스템을 소개한다.

### 1. 서 론

화석연료 고갈 등의 자원의 한계와 대기오염을 우려한 에너지 절감 대책의 절실함은 현실로 다가왔다. 유류비의 급등은 자연스레 하이브리드 자동차 혹은 전기자동차 등의 친환경 하이브리드 시스템에 대한 관심을 갖도록 만들었고, 이러한 관심은 철도나 버스와 같은 대중교통 시스템에 하이브리드 시스템이 반드시 적용되어야 할 날이 머지않음을 시사하고 있다.

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

BOP(balance-of-plant)는 연료공급과 부산물 제거를 위해 요구되는 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 가열이나 냉방에서 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 있음을 의미한다.

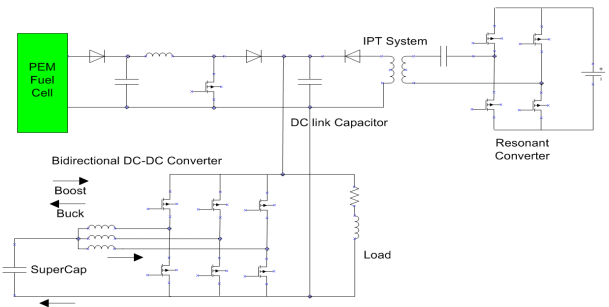


〈그림 1〉 일반적 PEM fuel cell 전력 시스템의 구조

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. 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. 전압

### 2. 본 론

#### 2.1 Hybrid Railway Vehicle Power System Using Fuel Cell and IPT System



〈그림 2〉 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.과 연결되어 있다. 마찬가지로 IPT 시스템을 이용하여도 SuperCap.의 충전이 가능한 구조를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

#### 2.2 DC/DC converter System for PEM fuel cell

DC/DC 컨버터 연료전지 전원시스템의 대표적인 기계구성을 그림 2에서 보여준다. 다이오드  $D_1$ 이 스태크로 역류하는 전류를 막는 동안, 스위칭 기간 동안 발생하는 동작 중에 어떠한 급작스런 전류의 공급을 완충하는 역할을 캐패시터( $C_{TV}$ )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 묘사되어진다.

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

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

$v_1$ 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,  $P_{com} = i_{com} v_{DC}$ 와 같다. 그러면, 출력에서의 전류와 캐패시터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

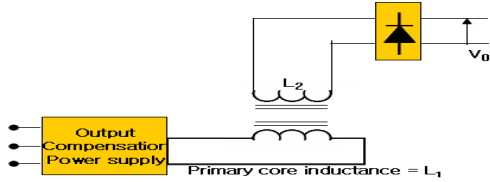
$$i_{cap} = i_{com} - i_{load} \quad (4)$$

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

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

### 2.3 IPT System

유도 급전 장치의 1차측 전력전송부에서는 3상의 교류를 받아서 왜곡 정형교류를 공급하는 전원 공급장치와 보상회로, 그리고 2차에는 유도 급전 장치로 유도 급전 시스템이 구성된다. 보다 완벽한 유도 급전 시스템의 구성을 위해서는 2차측에 누설 인덕턴스 보상회로(공진회로)부를 추가하는 것이 가능하다.



<그림 3> 유도 급전 시스템

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

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

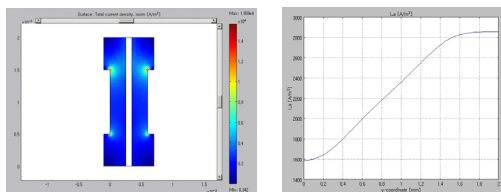
$$I_{psc} = \frac{V_{po}}{j\omega L_2} = \frac{M_{tp}}{L_2} I_{L1} \quad (7)$$

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

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

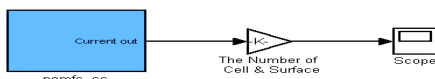
### 2.4 PEM fuel cell stack

연료전지는 카르노사이클(Carnot cycle)의 효율(40%)보다 훨씬 높은 효율을 가지고 있어서 똑같은 양의 연료로 더 멀리 운행할 수 있다. 연료전지는 연료극과 공기극에서 각각 수소 산화, 산소 환원이 일어난다.



<그림 4> PEM fuel cell 내부의 다중 물리현상

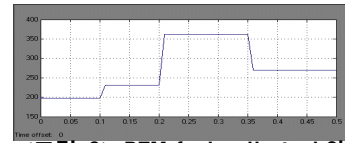
$$i_{ac} = L_{activation} (1 - \epsilon) j_{ac}$$



<그림 5> PEM fuel cell stack의 simulink model

PEM fuel cell의 전극(electrode)은 gas backing 이라고 하는 기체가 충만한 공극을 지닌 탄소 구조와 고분자 전해질을 함유하고 있는 공극 활성층으로 이루어져 있는 기체 확산 타입으로 되어 있다. 그림4의 시뮬레이션 결과는 PEM fuel cell 내부의 다

중 물리현상으로 인한 여러 가지 현상 중, 총 전류 밀도와 Anode 활성층에서의 길이에 따른 전류밀도를 보인다.



<그림 6> PEM fuel cell stack의 simulink model 결과

### 2.5 Simulation and Analysis

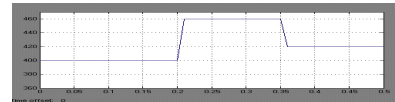
다음은 본 논문에서 수행한 연료전지 시스템 DC/DC 컨버터의 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

TABLE 1: SIMULATION PARAMETERS

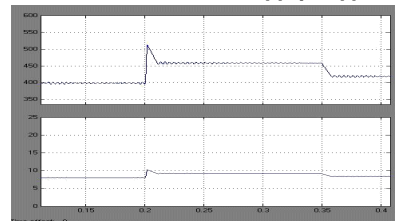
DC/DC CONVERTER			
PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
Switching frequency	20 KHz	$V_{DC}$	400 V
C	350 $\mu$ F	C	1500 $\mu$ F
L	240 $\mu$ H	$R_{load}$	50 $\Omega$
IGBT forward voltage	1 V	IGBT turn off current tail time	4*10 <sup>-6</sup> sec
IGBT ON resistance	0.017 $\Omega$	Diode ON resistance	0.015 $\Omega$
Diode forward voltage	0.8 V	Calculation step size	1*10 <sup>-6</sup> sec

연료전지 시스템은 전압우먼 제어 블록에 연결되어 있으며 이 때 인덕터의 전류는 연료전지 스택의 reference 전류로 설정된다. 따라서 출력 전압은 이전에 설명된 바와 같이 동작한다.

그림 7는 컨버터 입력으로 사용되는 PEM fuel cell의 출력 전압을 나타내며, 그림 8는 컨버터의 출력 전압과 출력 전류를 나타낸다.



<그림 7> PEM fuel cell의 출력 전압 (DC/DC converter 입력 전압)



<그림 8> DC/DC converter 출력 전압/전류

### 3. 결 론

본 논문은 철도 시스템 차량 기동시에 요구되는 높은 에너지 밀도를 보완해 줄 Battery(Super Capacitor)와 정차역(혹은 충전 색선)마다 IPT(Inductive Power Transformer) system을 이용하는 PEM fuel cell system의 각 부분별 요소가 되는 model을 제시하였다.

DC bus에 병렬로 연결되어 전력의 용도를 필터링함으로써 부하를 연료전지와 분리시키는 DC 링크 캐패시터와 여기에 bidirectional DC-DC converter, 이에 연결된 Super Cap.과 연료전지의 비선형적 해석에 의한 Simulink model을 도출함으로써 통합시스템 모델링의 base를 마련하였다. 향후, 시스템의 각 구성 요소가 집적된 동적 시스템의 모델링이 수반되어야 할 것으로 보여진다.

#### [참고 문헌]

- [1] P. Moraal and I. Kolmanovsky, "Turbocharger Modeling for Automotive control Applications," SAE Paper 1990-01-0908.
- [2] A.J. Forsyth, S. V. Mollov, "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.