

연료전지 자동차 시스템의 효율적인 연계운전방법 개발을 위한 시뮬레이션 환경 구축

이남수, 심성용, 안현식, 김도현, 상영락, 오하영  
 국민대학교 전자정보통신공학부

Development of A Simulation Environment for An Efficient Combined Control Methodology of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

Nam-Su Lee, Seong-Yong Shim, Hyun-Sik Ahn, Do-Hyun Kim, Yeong-Rak Seong, Ha-Ryoung Oh  
 School of Electrical Engineering, Kookmin University

**Abstract** - It is well known that an indirect methanol based fuel cell system imposes a performance limitation on the fuel cell electric vehicle (FCEV) due to the reformer lag. An optional battery system can be used together with fuel cell to improve this performance limitation and it is called a fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEV).

This paper first describes the configuration of FCHEV with explanation of the energy flow between subsystems. Mathematical modeling of each subsystem such as a fuel cell system, a battery system, a driving motor with the transmission are formulated and coded using Matlab/Simulink software. It is illustrated by simulation results that fuel cell modeling yields appropriate stack voltage in order to get the required current quantity with varying hydrogen flow.

1. 서 론

수송 분야에서의 석유 에너지절약과 환경공해문제 그리고 지구 온난화문제 등을 해결하기 위해서 기존의 내연기관 자동차를 대신할 대체에너지 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 자동차의 문제점을 해결할 수 있는 가장 확실한 방안으로 연료전지 자동차가 고려되고 있으며, 이에 따라 최근 선진국의 주요 자동차 제작사와 부품회사들을 중심으로 상용화를 위한 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다.

연료전지 자동차는 에너지원으로 연료전지를 사용하는 것으로 연료전지는 공기 중의 산소와 연료 중의 수소를 이용하여 전기화학적으로 전기를 발전할 수 있는 시스템이다. 연료전지는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키기 때문에 기존의 내연기관에 비해 효율이 매우 높고 공해물질의 발생도 거의 없어 무공해 관련 법규도 만족시킬 수 있다. 또한 연료전지의 연료로 다양한 대체 연료를 사용할 수 있어 석유에너지 절감과 대체에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 연료전지는 사용되는 전해질의 종류에 따라 분류되는데, 적은 부피 및 중량, 낮은 작동온도 및 빠른 시동특성 등을 구비한 고분자 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell: PEMFC)가 자동차 동력원으로 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 연료전지에 연료로 사용되는 수소는 압축수소탱크나 액체수소탱크를 이용하여 공급하는 방식과 메탄올, 가솔린 같은 탄화수소연료를 자동차 내에서 개질한 후 수소를 추출하여 공급하는 방식이 개발되고 있다[1]-[4].

연료전지 자동차는 연료전지와 배터리를 조합한 하이브리드 방식을 이용하여, 여러 가지의 운전조건 아래에서 두 동력원 모두의 특성을 충분히 이용하는 최적의 사용 형태가 되도록 할 수 있다. 하이브리드 방식의 차량은 저부하에서 과부하까지의 출력 요구에 대응하여 연료전지를 고효율의 영역에서 작동시킬 수 있으며, 차량의 감속 시 열에너지로 소비되었던 제동에너지를 회수할 수

있어 연료전지 자동차의 연비를 더욱 향상시킬 수 있다. 그러나 이러한 하이브리드 방식은 여러 가지 운전상황에 따른 두 가지 에너지원간의 적절한 출력 비 선정을 필요로 하게 된다.

본 논문에서는 연료전지 시스템과 배터리 시스템간의 효율적 연계운전방법 개발을 수행할 수 있는 단순화된 시뮬레이션 환경을 구축하고, 연료전지 자동차 시스템 모델링 중 연료전지 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 보인다.

2. 연료전지 자동차 시스템

2.1 시스템 구성

본 논문에서 고려하는 연료전지 자동차 시스템은 그림 1과 같은 하이브리드 방식의 자동차 구성을 갖는다. 이 경우 바퀴에 전달되는 모든 동력은 전기모터에 의해 공급되어지며, 전기모터에 공급되는 전류는 연료전지 시스템 및 배터리 시스템에 의해 공급된다.

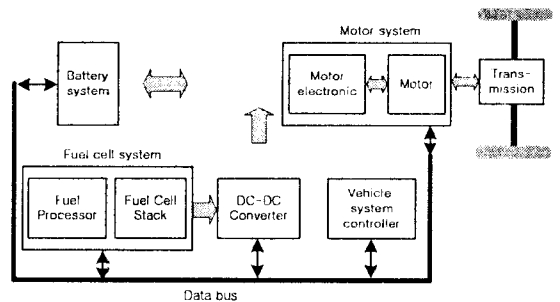


그림 1. 하이브리드 자동차 시스템에서의 에너지 및 신호 흐름.

연료전지 시스템은 간접 메탄올 기반의 연료전지 시스템과 그것의 액세서리 부하들로 구성되어있다. 연료전지 시스템 자체의 부하들은 자동차 성능에 중요한 영향을 주게 되며, 그 영향은 연료전지 스택의 성능특성에 포함시켜 생각하였다. 메탄올 개질기는 연료처리기로써 연료전지 스택과 함께 메탄올 기반의 연료전지 시스템의 주요 구성요소이다. 메탄올 개질기는 메탄올에서 수소를 추출하며, 이 수소는 연료전지 스택의 연료로 사용된다. 수소는 스택내부에서 수증기로 산화되면서 전기에너지를 생산하게 된다. 이 과정에서 필요한 산소는 공기에서 공급해준다. 연료전지 스택의 온도조절과 수소 및 공기의 공급량은 연료전지에 요구되는 출력량에 의해 조절된다.

연료전지 시스템의 동적 응답은 주로 메탄올 개질기의 과도응답에 의해 제한을 받는다. 이것은 메탄올 개질기

의 연료처리 속도가 연료전지 스택에서의 반응속도보다 매우 느리기 때문이다. 이와 같은 메탄올 기반의 연료전지 시스템의 응답은 자동차의 일시적인 동력 요구를 만족시키지 못할 수 있다. 이것은 자동차가 처음 출발할 때 또는 높은 가속을 필요로 할 때 문제가 된다. 메탄올 기반의 연료전지 시스템의 전력 전달 지연을 보상하기 위해서 배터리 시스템이 이러한 과도기간 동안 전력을 추가 공급하기 위해 사용된다. 또한 DC/DC 컨버터는 배터리 시스템과 연료전지 시스템의 연계와 전력변환을 위하여 사용된다.

연료전지 자동차 시스템의 모든 구성요소들은 데이터 버스를 통해 통신한다. 전달되는 데이터들은 배터리 전압, 감/가속 명령 값, 모터 전류, 배터리 전류, 연료전지 스택 전류와 그 밖의 구성요소간 최적의 상호작용에 필요한 값들이다.

## 2.2 수학적 모델링 및 코딩

본 절에서는 하이브리드 자동차 시스템의 서브시스템별 수학적 모델링을 수립하고 Matlab/Simulink 소프트웨어를 이용하여 각 서브시스템에 대한 코딩을 수행한다. 블록 다이어그램으로 표현된 하이브리드 자동차 시스템의 전체적인 모델링은 그림 2와 같다.

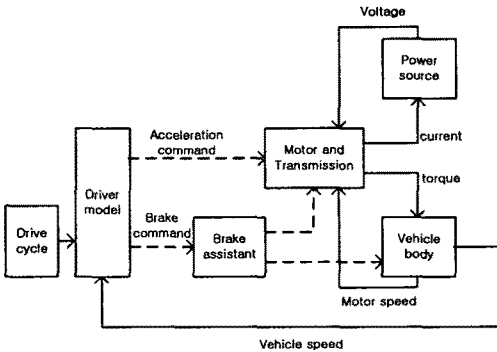


그림 2. 하이브리드 자동차 시스템의 모델링.

주행 스케줄은 차량이 주행 중에 겪는 다양한 형태의 주행 패턴을 모델화한 것으로 시간에 대한 차량 속도의 변화를 나타내고 있다. 운전자 모델은 주어진 주행 스케줄에 의해 정해진 속도와 차량의 실제 속도를 비교하여 감/가속 명령을 내보내게 된다. 차량 가속 시 요구되는 제동력은 제동장치 보조기에 의해 전기적인 제동력과 기계적인 제동력으로 나뉘게 된다. 전기적인 제동력은 구동모터에 의해 배터리로 충전되는 회생제동 에너지가 되며 기계적인 제동력은 차량의 브레이크에서 열로 소모되게 된다[2].

모터 및 변속기 모델의 입력 변수는 모터 회전 속도와 배터리 전압 그리고 감/가속 명령에 의해 계산된 요구되는 구동모터의 토크 값이다. 구동모터에서 요구되는 전류 값이 출력되며, 이 값은 식 (1)에 나타난 모터 샤프트에서의 기계적 전력과 모터 양단의 전력의 평형관계에 의해 유도된다.

$$I_{motor\ dc} = \frac{\omega_{motor} \cdot T_{motor}(V_{dc}, \omega_{motor})}{V_{dc} \cdot \eta_{motor}(T_{motor}, \omega_{motor})} \quad (1)$$

여기서  $T_{motor}$ 는 모터 토크 값이며 배터리 전압  $V_{dc}$ 와 모터 회전속도  $\omega_{motor}$ 에 의해 계산되어진다. 또한  $\eta_{motor}$ 는 모터 효율을 나타내며 모터 토크 값과 회전속도에 의해 결정된다.

또 다른 출력인 휠 토크 값은 식 (2)에 의해 유도된다.

$$T_{wheel} = i \cdot \eta_{trms} \cdot (T_{motor} - \theta_{motor} \cdot \frac{d\omega_{motor}}{dt}) \quad (2)$$

여기서  $T_{wheel}$ 는 휠 토크 값이며  $i$ 와  $\eta_{trms}$ 는 각각 변속비와 변속기의 효율이고,  $\theta_{motor}$ 는 모터 관성이다[3].

전력 공급원은 배터리, 연료전지 DC/DC 컨버터 모델을 포함하고 있다. 배터리 모델의 입력 변수는 모터와 변속기 모델에서 계산되어진 구동모터에서 요구되는 전류 값이며, 출력은 배터리 전압이 된다. 배터리의 전체 사용 가능 용량과 출력 전류를 시간에 대해 적분한 사용 용량의 비율 SOC로 나타내었다. 식 (3)에 의해 계산된 배터리의 SOC 값과 모터에서 요구되는 전류 값에 따라 연료전지 시스템에 요구되는 전류 값이 결정되게 된다.

$$soc = \frac{\int I_{battery}}{E_{battery}}; \quad V = V_{OC} + I_{battery} R_{int} \quad (3)$$

여기서  $V_{OC}$ ,  $R_{int}$ 는 각각 배터리의 개방회로 전압과 내부 저항이고,  $I_{battery}$ 와  $E_{battery}$ 는 각각 배터리 전류와 용량이다.

연료전지 시스템은 식 (4), (5)에 따라 모델링 된다. 연료전지 시스템의 동특성은  $dmol$ 로 나타낸 메탄올 개질기로부터 공급되는 수소의 유입량에 의해 결정된다. 즉, 개질기의 성능에 따라 변화하는 개질기 시상수  $\tau$ 에 의해서 연료전지 시스템의 동특성이 결정되는 것이다. 연료전지 시스템의 출력으로 나오는 연료전지 스택 전압 값은 연료전지 분극 특성곡선에 의해서 결정된다[4].

$$I_{fc} = \frac{2F}{n_{fc}} \dot{m}ol; \quad V_{fc} = f(I_{fc}) \quad (4)$$

$$\dot{m}ol = \frac{1}{\tau^2 s^2 + 2\tau s + 1} \frac{n_{fc}}{2F} I_{fc\ command} \quad (5)$$

여기서  $I_{fc}$ ,  $V_{fc}$ 는 연료전지 전류와 전압이고,  $F$ 와  $n_{fc}$ 는 각각 패러데이 상수와 연료전지 스택의 셀 수이다.

DC/DC 컨버터는 빠른 응답특성을 갖고 있기 때문에 과도현상은 고려하지 않는다. 다만 식 (6)에서와 같이 DC/DC 컨버터의 효율  $\eta_{dc-dc}$ 는 배터리 전압  $V_{battery}$ 와 연료전지 스택 전압  $V_{fc}$ 의 비율 및 연료전지 스택측 컨버터의 입력 전력  $P_{fc}$ 에 의해 결정된다.

$$\eta_{dc-dc} = f\left(\frac{V_{battery}}{V_{fc}}, P_{fc}\right) \quad (6)$$

차량 몸체의 동특성은 식 (7)과 같이 모델링 되는데, 기본적인 힘의 평형식에 의하여 모델링 되었다. 이 식은 차량이 극복해야할 가속저항력, 공기저항력, 구름마찰력 등으로 구성된 주행저항력과 이에 상응하는 구동력의 항으로 구성되어 있다. 또한 차량이 감속할 때 인가되는 기계적인 제동력으로 나타내었다. 차량의 가속도를 적분함으로써 식 (8)과 같이 차량 속도를 계산해낼 수 있다.

$$\frac{T_{wheel}}{r} = m \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + m_{vehicle} g \mu + q F_{brake\ max} \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{m} \int \left( \frac{T_{wheel}}{r} - q F_{brake\ max} - \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 - m_{vehicle} g \mu \right) dt \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 휠 반경이며,  $m$ 은 휠 관성을 포함한 차량 관성이다.  $\rho$ ,  $C_d$ ,  $A$  및  $v$ 는 각각 공기밀도, 견인계수, 차

량의 전면부 면적 및 차량속도이다.  $m_{vehicle}$ ,  $g$ ,  $\mu$  및  $qF_{brake\ max}$ 는 각각 차체 질량, 중력가속도, 회전마찰계수 및 기계적 제동력이다.

### 2.3 전력 배분제어 및 배터리 SOC 제어

연료전지 하이브리드 자동차에서 기본적으로 연료전지가 주전원으로 사용되고 배터리가 보조전원으로 이용되고 있으나 총 요구되는 전력량을 이 두 전원에 어떻게 할당하는 것이 최적인가에 대하여 많은 연구가 진행 중이다[6]-[9]. 즉, 배터리 SOC 범위와 이용 가능한 전력의 범위와 같은 제약조건하에서 차량의 효율을 극대화시키기 위한 하이브리드 제어를 설계해야 한다. 일반적으로 연료전지와 배터리 사이의 전력 배분을 적절히 제어함으로써 차량 시스템의 효율을 개선시킬 수 있고, 양방향 DC/DC 컨버터를 제어하여 배터리의 SOC를 조절할 수 있다. 이러한 두 가지 제어 개념은 서로 상반되는 경우가 발생하므로, SOC 제어에 우선권을 주기도 하지만 최적의 연계운전 방법은 계속 개발 중이다[10].

정상 운전 시에는 주로 연료전지가 구동모터에서 요구하는 전력을 공급한다. 모터링 또는 회생제동 운전과 같은 각각의 적당한 동작형태에 따라 배터리는 여분의 전력을 DC/DC 컨버터를 통하여 구동모터에 전달하거나 흡수하여야 한다. 또한 SOC 기준값은 배터리에서의 최적 충전 및 방전을 고려하여 결정되는데, DC/DC 컨버터를 제어하여 배터리의 SOC가 일정하게 유지되도록 한다. 만약 구동모터에서 요구되는 전력이 연료전지의 최대 출력을 초과하는 경우에는 SOC가 기준값 아래로 감소하게 되며, 이러한 감소분은 구동모터에 요구되는 전력이 연료전지의 최대 전력보다 적은 경우에 보상되도록 제어한다.

### 3. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 그림 2의 자동차 시스템 모델링에서 전력 공급원 블록 중 연료전지 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 연료전지의 분극 특성곡선 결과와 매우 유사함을 보인다.

연료전지 시스템 모델의 구성은 그림 3과 같다. 연료전지 시스템의 입력은 모터와 변속기 모델에서 구해진 요구 전류 값이다. 전류 값에 의해 필요한 수소 유입량이 결정되며 수소는 개질기의 동특성에 따라 과도응답을 갖게 된다. 또한, 정량화시킨 수소의 유입량과 요구 전류량의 정량화 값을 이용하여 연료전지의 분극 특성곡선으로부터 연료전지 스택전압을 얻을 수 있다.

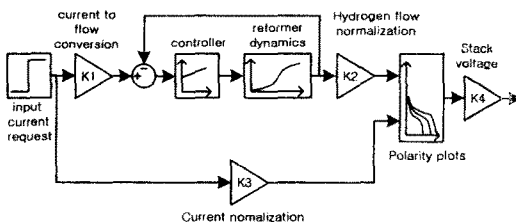


그림 3. 연료전지 시스템의 모델링.

그림 4는 연료전지 시스템 모델의 시뮬레이션 결과로서, 요구되는 몇 가지 전류 값에 따라 출력되는 스택전압 값을 보여준다. 연료전지 분극 특성곡선에 나타나 있는 전류에 대응하는 스택전압 값이 개질기에 의해 발생되는 지연시간 후 출력 되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 기존의 논문에서의 결과와 매우 유사하다[5].

그 밖에 차체 모델링 및 모터/변속기 모델링도 수학적 모델식에 기초하여 코딩되었으며 정상적인 입출력 특성이 확인되었다.

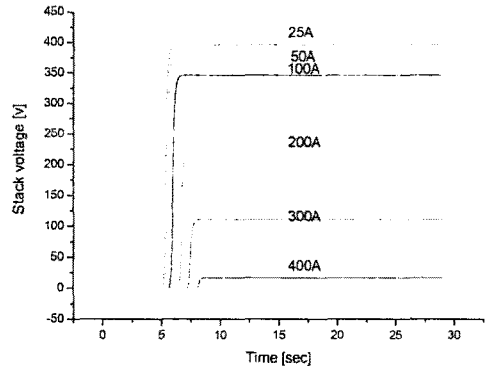


그림 4. 연료전지 시스템의 시뮬레이션 결과.

### 4. 결론

본 논문에서는 연료전지 하이브리드 자동차 시스템의 각 구성요소들을 모델링 함으로써 연료전지 시스템과 배터리 시스템에 대한 성능을 예측하고 두 에너지원 사이의 효율적인 연계운전방법 개발을 수행할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 또한 기본적인 전력배분 제어 및 배터리 SOC 제어 기법을 조사하였으며, 현재 여러 가지 주행 상황에서 배터리 SOC를 적절히 유지하면서 연료전지를 지속적으로 최적의 효율 구간에서 동작시키는 연계운전방법에 대한 연구를 하고 있다.

### [참고 문헌]

- [1] L. Carrette, K. A. Friedrich and U. Stimming, "Fuel cells fundamentals and applications," *Fuel Cells*, No.1, pp.5-39, 2001.
- [2] K. H. Hauer, R. M. Moore and S. Ramaswamy, "The hybridized fuel cell vehicle model of the university of california, davis," *SAE 2001 01 0543*, 2001.
- [3] Inchlul Hwang, Soo Hwan Kim, Nam Hyuk Kim, Jong Hyun Lee and Seo Ho Chol, "Development of fuel cell hybrid electric vehicle fueled by methanol," *SAE 2003 01 0421*, 2003.
- [4] K. H. Hauer, R. M. Moore and S. Ramaswamy, "A simulation model for an indirect methanol fuel cell vehicle," *SAE 2000 01 3083*, 2000.
- [5] K. H. Hauer, D. J. Friedmann, R. M. Moore, S. Ramaswamy, A. Eggert and P. Badrinarayanan, "Dynamic response of an indirect methanol fuel cell vehicle," *SAE 2000 01 0370*, 2000.
- [6] K. Rajashekara, "Propulsion system strategies for fuel cell vehicle," *SAE 2000 01 0369*, 2000.
- [7] B. Jeanneret and T. Markel, "Adaptive energy management strategy for fuel cell hybrid vehicles," *SAE 2004 01 1298*, 2004.
- [8] Jin Hwan Jung, Young Kook Lee, Jung Hong Joo and Ho Gi Kim, "Power control strategy for fuel cell hybrid electric vehicles," *SAE 2003 01 1136*, 2003.
- [9] Tadaichi Matsumoto, Nobuo Watanabe, Hiroshi Sugiura and Tetsuhiro Ishikawa, "Development of fuel cell hybrid vehicle," *SAE 2002 01 0086*, 2002.
- [10] Seo Ho Choi, Soon Won Kwon, Nam Woo Lee, and Tae Won Lim, "Design of fuzzy logic power distribution controller for fuel cell hybrid vehicles," *Proc. of FISITA*, (F2004F121), Barcelona, Spain, 2004.