연료전지 하이브리드 전력 시스템에 대한 에너지 제어 시뮬레이션

(Development of Energy Control Simulation for Fuel Cell Hybrid System

한수빈* · 송유진 · 정봉만 · 박석인 · 정학근

(Soo-Bin Han · Woo-Jin Jang)

한국에너지기술연구원

Abstract

This paper describes an simluation method to utilize the hybrid system with fuel cell and battery. The hybrid system has unique advantage to manage energy state between high energy system (fuel cell) and high power system (battery) according to various type of load. For proper design, the hybrid system is modelled and simulated. Especially, battery SOC is used as an important control parameter to decide the energy control.

1. 서 론

기존의 축전지를 이용한 시스템의 경우 단독운전만으로는 적용상의 많은 문제가 존재하는 것은 이미 알려진 바이다. 따라서 최근에는 서로 특성이 다른 에너지원을 복합적으로 운용하는 기술이 주목받고 있다. 여러 에너지원중 연료전지는 향후 이동전원 및 자동차용에 있어서 핵심적인 구성요소이며 이의 최적한 제어는 시스템의 안전성과 효율성을 좌우하게 되므로 상용화하는데 있어서 핵심적인 기술이 된다. 연료전지 시스템은 연료전지 스택을 중심으로 스택의 보호장치, 연료/공기의 공급계통과 스택 그리고 이들을 제어하는 제어기로 구성되는 등 복잡계의 전형적인 구성을 갖고 있다. 연료전지스택의 경우 그 에너지가 축전지를 통해서 부하에 전달되게 되는데 문제는 연료전지스택과 축전지가 모두 부하에 따라 정격의 전압/전류에서부터 크게 변화하는 특성에 있다. 이 경우 연료전지의 변화에 대해서 축전지의 상태에 악영향이 없어야 하며 또한 축전지의 변화가 연료전지스택에 악영향을 주어서는 안된다.

이를 위해서 연료전지스택과 축전지의 사이에 전력의 흐름과 입출력의 전압/전류상태를 서로 원활히 연결하는 인터페이스 기술이 중요하며 이를 분석하기 위한 모델링과 시뮬레이션기술이 성공적인 시스템 개발을 위해서는 기본적으로 필요하게 된다. 본 논문에서는 연료전지와 축전지의 하이브리드 운전에 관한 적정한 설계 및 제어를 위해 필요한 시뮬레이션 방식을 연구한 것이다. 전반적인 하이브리드 시스템의 소개와 함께 연료전지와 관련된 여러 구성 시스템의 분석과 성능에 대한 시뮬레이션 기술을 기술하였으며 또한 인터페이스 장치와 연관되어 전기적 시스템의 동작을 시뮬레이션 할 수 있는 기술에 대해 기술하였다.

2. 에너지원들의 특성과 모델

2.1 축전지

가장 일반적인 에너지 저장 장치로 에너지 저장능력이 매우 큰 특성을 갖고 있다. 그러나 순시적으로 발생시키거나 저장할 수 있는 전력은 제한이 되어 이러한 경우는 캐패시터를 사용하게 된다. 일반적인 축전지 모델은 여러 방식이 있지만 이들 중에서 가장 간단하며 일반적으로 사용되는 모델은 그림 1과 같이 개방 회로 전압과 등가 내부 직렬 저항으로 구성된다. 개방회로 전압은 사실상 축전지의 SOC (State of Charge)에 의해 변화되는데 축전지의 에너지를 정확하게 제어하려면 이 SOC를 측정할 수 있어야 한다. 그림 1의 모델에서는 전류의 누적치로 SOC를 계산하는 방식을 사용하였다. 개방회로 전압과 내부저항은 사실상 SOC와 온도에 따라서 비선형적으로 변화되는 특성을 갖고 있으므로 넓은 범위의 동작 시뮬레이션을 위해서는 이들 파라메터에 대한 정보를 갖고 있어야 한다. 축전지 모델의 테스트 동작으로 실제 계산시간의 단축을 위해서 파라메터값은 임의로 조정할 수 있다.

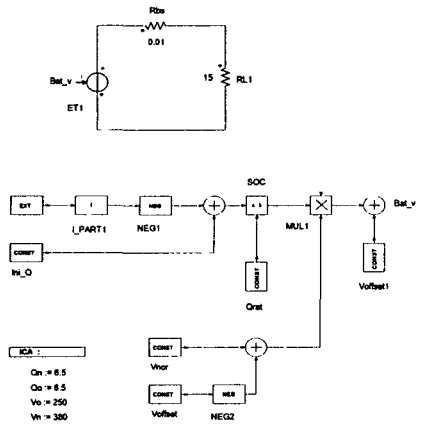


그림 1 축전지의 모델
Fig. 1 Commonly used battery model

2.2 연료전지

연료전지는 전기화학적인 반응에 의해 직류전력을 생성하는 면에서 축전지와 비슷하다. 두 개의 전극 즉, 애노드와 캐소드도 역시 전해물에 의해 분리되어 위치한다. 축전지와 같이 연료전지는 필요한 전압과 전력을 얻기 위해 스택으로 적층하여 사용된다. 그러나 축전지와 다른 점은 에너지를 저장하는 것이 아니라 수소연료를 외부에서 받아 전기에너지로 직접 변환하여 발생시키고 연료가 공급되는 한 지속적으로 동작한다[1][2].

연료전지 전압은 무부하 상태에 해당하는 100% 전압에서부터 전부하 상태까지 40~50%로 전류의 증가에 따라 크게 감소한다. 일반적으로 피크 전력은 정격전압 근방에서 발생하게 되고 통상적으로 안정된 동작을 권장하는 동작구간이 존재한다. 연료전지의 모델은 이러한 I-V 특성을 look-up-table화하여 구현하는 것이 실제적이다.

2.3 슈퍼캐패시터

슈퍼캐패시터는 용량이 매우 크지만 일반 캐패시터처럼 동일하게 동작한다. 따라서 슈퍼캐패시터의 모델은 캐패시터의 모델을 그대로 사용할 수 있다. 단일 소자로 5000F이상이 현재 판매되고 있는데 계속적으로 용량은 증가하고 있다. 다만 취약점은 약 2V대의 낮은 내압을 갖는 것에 있으며 응용 상에서 제한이 되고 실제 사용을 위해 필요 이상으로 직렬로 사용하여 전압을 높여야 하기 때문에 시스템에서 가격상승의 요인이 되고 있다[3][4].

3. 복합 에너지 시뮬레이션 시스템 구성

3.1 인터페이스의 수단

다양한 에너지 시스템들의 인테페이스는 여러 가지 방법이 가능하다. 간단한 방법은 에너지 시스템사이에 저항과 같은 수동소자를 사용하여 연결하는 것인데 전압, 전류에 대한 조정능력과 손실 등의 문제로 시스템 구성시 경제적이지만 효과적인 수단이 될 수 없다.

연료전지나 슈퍼 캐패시터의 출력 전압은 전류 증가에 따라 급격하게 감소하는데 정격전류에서 출력 전압은 무부하 상태의 50%이하로 감소될 수 있다. 이것은 넓은 범위의 입력 전압에 대해서 일정 출력을 얻어야 하는 경우 필연적으로 인터페이스 수단으로 초퍼와 같은 DC-DC 컨버터를 사용하게 만든다[5]. 그러나 넓은 동작범위가 설계에는 큰 부담이 되고 있다.

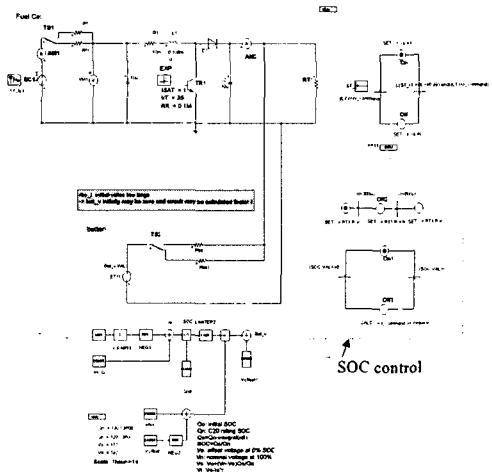
3.2 복합에너지 시스템의 구성

복합 에너지 시스템의 구성은 사용되는 에너지 시스템에 따라서 그림 2와 같이 다양하게 가능하다. 일반적으로 에너지저장 수단으로는 축전지와 슈퍼캐패시터를 사용하게 되고 에너지원으로는 상용전원과 대체에너지원으로 구분되는데 대체에너지원으로는 풍력발전, 태양광 발전, 연료전지 발전 등이 대표적으로 사용된다. 많은 대체에너지원들은 직류로 발전되는 경우가 많은데 그림 2에서는 직류발전 중에서 연료전지 발전을 예로 들었다. 그림 2-a의 경우는 연료전지와 축전지의 복합시스템으로서 연료전지 자동차, 연료전지 이동전원장치 등이 이러한 구성으로 사용된다. 축전지대신에 슈퍼캐패시터를 사용하는 것도 가능하다. 그림 2-b의 경우는 슈퍼캐패시터와 축전지를 사용한 경우로 구성이 되는데 축전지와 슈퍼캐패시터의 설치 위치는 응용에 따라서 달라질 수 있다. 연료전지의 경우는 단방향으로 에너지를 전달하지만 축전지와 슈퍼캐패시터의 경우는 양방향으로 에너지 전달이 되므로 이때의 인터페이스 장치는 모두 양방향으로 구성된다.

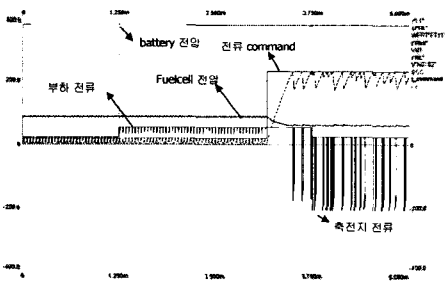
3.3 복합에너지 시스템의 시뮬레이션 구성

본 논문에서는 그림 3과 같이 인터페이스 장치로는 boost converter에 대해서 고려하였으며 에너지원들 사이에서 전류모드[6]로 동작하여 에너지를 제어한다. 여기에서는 연료전지와 축전지에 대한 하이브리드 시스템에 대한 모델과 시뮬레이션의 예를 보였다. 부하가 변화하면 연료전지에서 에너지가 공급되는 것이 아니고 축전지에서 에너지가

공급이 된다. 전류명령이 증가할 경우는 연료전지에서 에너지를 더 공급하게 되고 부하에 공급되고 남은 에너지는 축전지를 충전하게 된다.



(a) 시뮬레이션 구성도



(b) 시뮬레이션 결과

그림 3 연료전지와 축전지의 복합 시스템과 시뮬레이션
Fig. 3 Hybrid system simulation

3.4 에너지제어 시뮬레이션

에너지의 흐름은 결국 축전지의 에너지 상태를 파악하여 이를 제어하는 데에 있다. 결국 SOC를 전체 운전에서 제어변수로 사용하는 것을 의미한다. 실제 통합운전에서는 주행모드, 축전지 용량, 연료전지 특성 그리고 제어조건 등이 서로 연관되어 영향을 주게되므로 설계가 매우 다양하게 시도된다. 그림 4는 그림 3을 이용하여 SOC를 측정하고 그 값이 0.9이상이면 0.4가 될 때까지 연료전지의 출력을 10A로 유지하고 그 이하이면 0.9가 될 때까지 부하에서 필요로 하는 전류값이 되도록 연료전지의 출력전류를 제어하는 방식의 구현이다. 시뮬레이션 결과에서 SOC는 시간이 경과됨에 따라 점차로 감소하다가 0.4이하가 되면 인터페이스 장치의 제어는 실제 부하에서 필요로 하는 전류가 되도록 연료전지 출력전류를 조절하는 것으로 바뀌게 된다. 따라서 이때는 전류 명령값이 커지게 되는데 출력 캐패시터가 작으면 출력전류는 불연속이 되어 축전지의 충전 및 방전 전류의 크기가 커지게 된다. 출력 캐패시터가 크면 캐패시터의 저장 용량이 커지게 되므로 부하측이 출력전류는 연속적 전류가 되고 전류 변화의 크기도 줄어든다. SOC는 제어모드가 바뀌어도 계속 미세하게 감소하는 것을 볼 수 있는데 따라서 SOC 값에 따른 제어 방식을 변경해야 함을 알려 주고 있다.

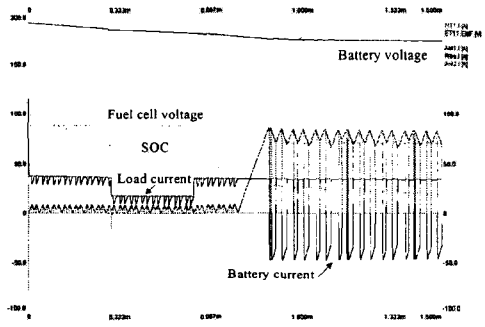


그림 4 시스템 시뮬레이션 결과
Fig. 4. System simulation result

그림 5와 그림 6은 실제 주행 모드를 구현한 것으로 주행모드의 변화는 부하의 전류의 변화와 등가적인 것으로 모델을 하였다. 여기에서는 Udds cycle을 구현하였는데 실제는 약 1875sec의 시뮬레이션 시간을 필요로 하지만 효율적인 시뮬레이션 시간을 위해 0.052초로 시간을 정규화시켰다. 이에 따라 전체의 에너지 균형을 위해서는 축전지의 용량도 정규화되어야 한다. SOC 제어는 0.9보다 큰경우는 실제 부하에서 필요로 하는 전류가 되도록 제어하고 0.4보다 작아지면 300A로 연료전지가 출력하도록 하였다. 그 결과로 그림 5는 축전지의 용량이 120/100A-Hour인 경우로 주행이 계속됨에 따라 SOC는 점진적으로 감소하게 된다. 이 경우는 축전지의 용량이 Udds cycle을 감당하기에 충분하지만 용량이 상대적으로 과도하게 설정된 것으로 볼수 있다. 그림 6은 축전지의 용량이 120/1000A-Hour로 이 경우는 SOC가 주행중간에 0.4이하가 되게되며 따라서 최대전류 300A가 연료전지로부터 출력되어 SOC가 0.9가 될 때까지 유지되는 것을 볼수 있다. 이때의 축전지 용량은 Udds cycle의 1주기가 지난때에서 볼때 더 이상

증가하거나 감소하지 않는 것으로 축전지의 용량은 적정한 것으로 볼 수 있다.

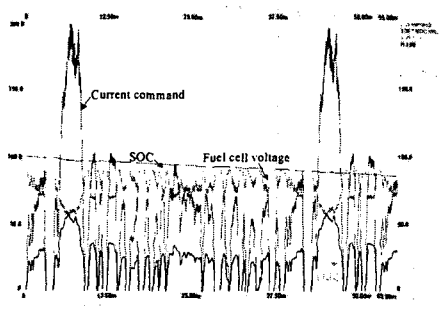


그림 5 주행모드에 따른 통합 시뮬레이션 결과(축전지 용량이 큰 경우)
Fig. 5 Simulation result including driving cycle(lage battery case)

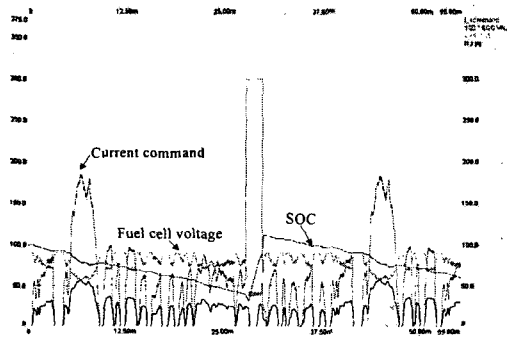


그림 6 주행모드에 따른 통합 시뮬레이션 결과(축전지 용량이 작은 경우)
Fig. 6 Simulation result including driving cycle(small battery case)

4. 결 론

연료전지 복합에너지 시스템의 대표적인 예는 FCV(Fuel Cell Electric Vehicle)로서 엔진 또는 연료전지등 에너지원이 축전지와 병용해서 사용하게 된다. 이러한 하이브리드 시스템에서는 축전지와 연료전지, 또는 축전지와 슈퍼캐패시터와의 에너지의 합리적 운용(에너지 이용의 분배 및 상호보완)이 부하에 따라 적절히 유지되어야 한다. 통상 부하들은 교류 또는 직류용 모두 일정 전압의 유지를 전제로 하여 사용되고 있으므로 부하의 변화에도 출력전압을 인터페이스 장치를 사용하여 일정하게 제어할 필요가 있으며 또한 에너지의 공급을 조절하여야 한다.

본 논문에서는 회로적 방식에 의한 복합시스템의 시뮬레이션을 연구한 것으로 축전지와 밀접한 동작관계를 같는 인터페이스 시스템의 분석과 축전지의 회로적인 상태에서의 분석과 관련하여 battery를 모델하였고 필요한 연료전지, 인터페이스, BMS, 부하등을 모델하였다. Battery는 회로적 모델을 사용하였고 연료전지는 LUT에 의한 모델을 사용하였다. 인터페이스로는 DC/DC컨버터를 회로적 모델로 구현하였고 BMS, 부하등은 기능적인 모델을 하여 시스템의 통합운전에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로 본 시뮬레이션용 모델은 인터페이스 장치의 회로적 구성 값, 연료전지 특성, 축전지의 용량특성, 부하의 주행 패턴, SOC의 제어알고리즘등에 대해 통합적인 시뮬레이션과 분석이 가능하게 되어 시스템의 최적설계와 운전 알고리즘을 개발하는데 실제적으로 유효하게 이용될 수 있게 된다.

참 고 문 헌

[1] G.A. Phillips, J.H. Vogt, J.H.Walton, Inverters for Commercial Fuel Cell Power Generation, IEEE Trans. on Power App. And Sys., pp. 994-953, 1976.

[2] A.Maggiore, "Solid Polymer Fuel Cells of Industrial Interest, Intertech Conference Records of Commercializing Fuel Cell Vehicles 97, 1997.

[3] R.L Spyker, et al Evaluation of Double layer Capacitors for Power Electronic, IEEE, IAS Conference Record, pp. 725~pp730, 1996.

[4] R. Bonert, and S. Reichert, Super-Capacitors for Peak Load shaving of batteris, EPE Conference, Vol. 1, pp.55-90, 1997

[5] R. P. Severns, G. Bloom, "Modern DC to DC Switchmode Power Converter Circuit," VNR, 1985.

[6] R. Redl and N. Sokal, "Current Mode Control, Five Different Types, Used with the Three Basic Classes of Power Converters," Power Electronics Specialists Conference Record, pp. 771-785, 1985.