

부하별 에너지 예측기반 가정용 연료전지 열 병합 시스템 시뮬레이션 연구

황 수영¹⁾, 김 민진²⁾, 이 진호¹⁾, 이 원용²⁾

A Simulation Study of Residential Fuel Cell Cogeneration System Based on Load Energy

Suyoung Hwang, Minjin Kim, Jinho Lee, Wonyong Lee

Key words : PEFC(고분자 전해질 연료전지), Cogeneration(열병합), Simulation(시뮬레이션)

Abstract : Residential fuel cell cogeneration systems have gained much interest due to its high efficiency. In the present study, we have performed numerical simulation of residential fuel cell cogeneration system which includes a fuel cell/battery hybrid system. The cogeneration system consists of 1kW PEFC, two 60Ah batteries, inverter/converter and reformer. Several empirical models have been employed for respective components to improve the accuracy of the simulations. The load varies seasonally. The present simulations can successfully predict the characteristics of the hybrid cogeneration system and thus it can be utilized for establishing an optimal operating strategy of the system.

Nomenclature

E_{FC} : producted electrical energy of fuel cell, J
 Q_{FC} : producted heat energy of fuel cell, J
 Q_{fuel} : total enthalpy of reaction gas for fuel cell, J
SoC : state of charge
 C_i : battery capacity, Ah
 Keq : chemical equilibrium number
 G : Gibbs free energy, J
 P : partial pressure, Pa
S/C : Steam/carbon ratio

subscrip

FC : fuel cell

1. 서론

연료전지는 높은 에너지 효율과 유해 배기물이 거의 없으므로 친환경적이다. 환경문제가 대두되고 있는 오늘날, 친환경적인 연료전지는 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 하지만 연료전지는 시스템의 정상화에 시간이 필요하며, 부하변동에 따른 연료전지의 반응이 느리다는 단점을 가지고 있다. 따라서 연료전지는 2차 전지 혹은 계통연계와 하이브리드로 운전하는 방법으로 수요에 대한 부하를 보충해 줄 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 또한, 가정용 연료전지 하이브리드 시스템은 연료전지와 2차 전지 외에 연료변환장치, 급기설비, 열 및 물관리 설비, 전력변환장치 및 제어 등으로 구성되기 때문에 시스템 전체의 성능은 연료전지와 2차 전지 외 주변 운전 장치에 영향을 받게 된다. 실제로 연료전지 스택의 전기 변환율은 약 40~60%로 내연기관에 비해 높게 나오지만 주변 장치의 동력을 고려할 경우 전체 시스템의 성능은 30~40%로 감소한다. 따라서 최적 시스템의 구

1) 연세대학교 기계공학과
E-mail : butan-young@hanmail.net
Tel : (042)860-3583 Fax : (042)860-3104
2) 한국에너지기술연구원
E-mail : minjin@kier.re.kr
Tel : (042)860-3781 Fax : (042)860-3104

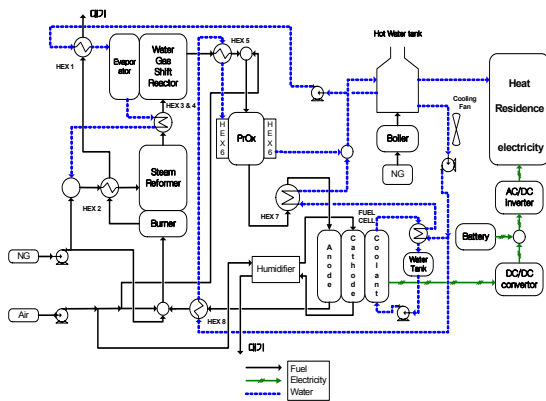


Fig.1 A schematic diagram of the NG-fed cogeneration PEFC system

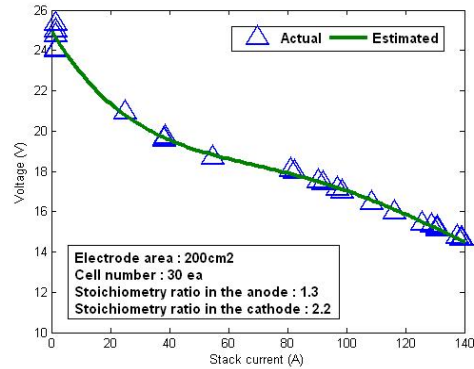


Fig. 2 Modeling of PEFC

성은 시스템 구성에서부터 최종 운전까지 고려한 종합적인 설계 및 성능 예측이 필요하다.

가정용 연료전지는 가정에서 필요로 하는 열과 전기를 모두 충당하기 위해 열병합 발전을 한다. 열병합 발전은 연료전지의 30~40%에 달하는 전기적 효율과 개질기 및 시스템에서 열을 회수하기 때문에 80%에 가까운 이론적 효율을 가진다.⁽⁴⁾ 이처럼 80%에 가까운 고효율은 시스템의 운전 방법 및 설계 조건에 따라 가능하다. 계통연계가 되지 않은 독립적인 연료전지 시스템의 경우 수요 부하를 분담하기 위한 에너지 저장 시스템이 필요하며 이를 위해 연료전지와 2차 전지의 복합적 구성인 하이브리드 시스템이 바람직하다. 하이브리드 시스템에서는 연료전지의 출력에 의해 2차 전지의 충전이 이루어지며 충전된 2차 전지는 연료전지의 수요 부하를 분담하게 된다. 부하 분담에 의한 최적 효율은 수요 부하와 축전지 충전 상태 및 연료전지 시스템 성능을 복합적으로 고려함으로써 가능하다. 또한, 열병합 연료전지 시스템은 계절 간 혹은 연간 성능을 분석하여 운전전략에 반영하는 것이 필요하다. 일반 가정에서 전기와 열의 사용량은 계절에 따라 다르며 이에 따른 수요를 적절하게 충족하여 시스템의 효율을 높이기 위한 연료전지 시스템의 운전 전략이 수립되어야 한다.

최근 친환경 에너지에 대한 관심이 집중되면서 연료전지에 또한 관심이 집중되고 있다. 다양한 용도로 사용이 가능한 연료전지 시스템에서 특히 고효율을 달성할 수 있는 열병합 발전 시스템에 관한 연구는 설계 및 구성에서 실증운전까지 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 또한, 열병합 발전에서 계절별 기후조건을 고려한 열 해석 중심의 성능 분석도 이루어 졌다. 하지만 간이화된 모델식을 사용하였을 뿐, 개질기 등에 대한 상세한 해석식이 사용되지 않았다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 연료전지와 2차 전지, 즉 하이브리드 방식으로 설계된 고분자 전해질 연료전지 열병합 발전 시스템에서 실험을 기반으로 한 모델식을 사용하여 결과의 정확성을 높였다. 또한, 계절별 부하에 따른 수요를 예측하고 효율을 향상시키기 위한 성능 평가를 수행하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 연료전지 열병합발전 시스템 구성

대상 시스템 해석을 위한 가정용 열병합 발전 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. 주요 부위 모델링은 실험 자료를 토대로 유도하였으며 실험이 불가피한 장비의 특성 방정식은 이론적 모델식을 사용하였다.

2.2.1 연료전지

연료전지 모델링은 실험 자료를 토대로 유도하였으며 Fig. 2는 1kW 연료전지의 I-V 특성곡선이다. 이와 같은 실험 데이터를 기반으로 한 연료전지 특성식은 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 식 (2)와 식 (3)은 각각 연료전지의 생성 전기 에너지와 연료전지의 생성 열 에너지이다.

$$V_{FC} = a + bI_{FC} + cI_{FC}^2 + dI_{FC}^3 + eI_{FC}^4 \quad (1)$$

$$E_{FC} = V_{FC} \cdot I_{FC} \quad (2)$$

$$Q_{FC} = Q_{fuel} - E_{FC} \quad (3)$$

2.2.2 전력변환기

Fig. 3은 연료전지 출력에 따른 DC/DC converter 및 DC/AC inverter의 통합 효율을 나타낸 것이며 500~900W 범위에서 95%의 높은 효율을 나타내었다.

2.2.3 2차 전지(Battery)

수요에 따른 연료전지의 부하를 분담하는 2차 전지는 60Ah 2개의 축전지 팩을 직렬 연결하여 구성하였다. 축전지 방전 및 충전시 SoC 계산식은 식 (4) ~ 식 (5)와 같다.

$$\Delta SoC = -\frac{\Delta C_i}{C_i} = -\frac{I_i \cdot \Delta t}{3600 C_i} \quad (4)$$

$$\Delta SoC = -\frac{\Delta C_i}{C_{ref}} = -\frac{\alpha \cdot I_i \cdot \Delta t}{3600 C_{ref}} \quad (5)$$

여기서 α 는 온도, SoC는 전류에 따른 충전계

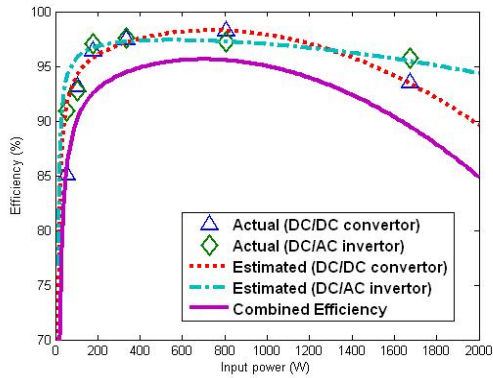


Fig. 3 Combined DC/DC & DC/AC efficiency

수, C_{ref} 는 20°C , 0.1C 에서의 충전지 용량이다.

2.2.4 연료변환 시스템(Reformer)

연료변환 시스템은 메탄 수증기 개질기(MSR), 전이반응기, 선택산화기, 증발기, 연소기로 구성되며 본 연구에서는 열역학적 모델을 이용하여 해석하였다. MSR은 천연가스를 수증기 개질하는 반응으로 Table 1 과 같은 화학반응을 수반한다. MSR의 반응기 작동온도는 750°C 이고 공급되는 수증기와 탄소의 비는 $S/C=3$ 이다. MSR의 출가스 조성을 계산하기 위하여 Gibbs 에너지를 이용한 화학평형계수를 구하고 부분압력에 대한 화학평형계수식과 비교하여 반응이 일어나는 몰수를 구하였다.

$$K_{eq} = \exp\left(\frac{\Delta G}{1.9865 \times T}\right) \quad (6)$$

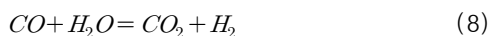
$$K_{eq} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} \quad (7)$$

$$= \frac{(CO + Z_M)(H_2 + 3Z_M)^3 P^2}{(CH_4 - Z_M)(H_2O - Z_M)(T_m + Z_M)^2}$$

Table 1 Chemical Reactions in MSR

| LNG 조성(%) | 개질반응식 |
|--------------------------------|--|
| CH_4 [90] | $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ |
| C_2H_6 [5] | $\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{CO} + 5\text{H}_2$ |
| C_3H_8 [3] | $\text{C}_3\text{H}_8 + 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{CO} + 7\text{H}_2$ |
| $n\text{C}_4\text{H}_{10}$ [1] | $\text{C}_4\text{H}_{10} + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{CO} + 9\text{H}_2$ |
| $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ [1] | $\text{C}_4\text{H}_{10} + 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{CO} + 9\text{H}_2$ |

MSR에서는 식 (8)과 같은 전이반응이 일어난다. 전이반응의 화학평형계수는 MSR과 동일한 방법으로 구하며 반응기의 작동온도는 450°C 로 가정하였다.



3. 해석

3.1 해석방법

계절에 따라, 가정에서 하루(24시간)동안 평균적으로 사용하는 전기와 열부하에 대한 연료전

지 시스템의 운전조건을 결정하였으며, 이에 따른 연료전지, 2차 전지, 온수탱크 등의 운전 범위를 결정하였다. 즉, 부하에 따라 연료전지 운전 조건이 결정되고 이에 연료전지 주변장치의 운전조건이 결정된다.

3.2 전기 및 열 부하 수요

시스템 설계 시 가정에서 필요한 열과 전기 수요에 따른 연료전지 시스템, 온수 탱크, 보조 보일러와 2차 전지의 용량 결정 및 운전방법을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 24평형 주택의 계절별 전기 및 열에너지 수요를 기준으로 시스템 해석 및 제어전략을 비교 평가 하였다.

3.3 부하제어

본 연구에서는 연료전지 시스템은 계통연계가 아닌 연료전지와 2차 전지를 이용하여 독립적인 시스템을 구성함으로써 수요에 따른 전기에너지를 공급하기 위한 2차 전지가 항상 적정한 SoC 상태를 유지하도록 하였다. 이는 가정에서의 수요와 상관없이 2차 전지의 SoC에 따라 연료전지의 출력이 변화하게 된다. 또한, 온수 저장탱크의 온도에 따라 연료전지의 출력이 조절된다. 하지만 본 연구에서는 주요 출력 제어변수는 전기 수요이므로 열 수요는 부수적인 제어변수로 두었다. 즉, 전기 수요에 따라 연료전지의 출력이 4단계(100/75/50/25%)로 조절되도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계절별 부하에 따른 성능평가

계절별 부하에 따른 운전 전략을 수립하기 위하여 Matlab 프로그램을 이용한 전산해석을 수행하였다. Table 2는 연료전지 부하분담 방식에 따른 계절별 성능을 나타낸 것이다. 전체 효율은 보일러의 작동까지 포함한 시스템의 효율을 계산한 것이며, 연료전지 전기 효율은 전기수요에 기반한 연료전지, 2차 전지, 전력변환기가 포함된 효율이다. 전체 시스템 효율에서 여름에 비해 겨울의 효율이 높게 나온 것은 전기와 열을 동시에 사용하는 겨울과 달리 여름은 전기만 사용하고 열을 사용하지 않기 때문이다.

Table 2 Seasonal variation of the total and PEFC efficiencies of the cogeneration system

| | | |
|-------------------|-------|------|
| 전체 시스템 효율 (%) | 봄, 가을 | 73.6 |
| | 여름 | 59.8 |
| | 겨울 | 76.9 |
| 연료전지 시스템 전기 효율(%) | 봄, 가을 | 32.8 |
| | 여름 | 33.6 |
| | 겨울 | 33 |

4.2 연료전지 하이브리드 시스템 특성

운전 전략에 따른 연료전지와 2차 전지 하이브

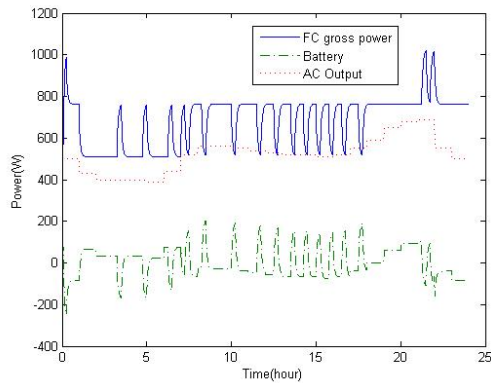


Fig. 4 Temporal variation of output powers during one day in the summer season

리드 시스템의 출력 변화 및 성능 특성을 파악하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 4는 여름철에 발생하는 연료전지와 2차 전지의 부하량 및 DC/AC inverter의 교류 출력량을 나타내고 있다. 연료전지 출력이 AC 출력보다 많은 경우 2차 전지에 충전이 되고 2차 전지의 충전 용량이 커지면 연료전지 출력이 떨어지면서 전체 출력부하를 제어하고 있다. 이는 연료전지와 2차 전지 간에 상호보완이 원활히 이루어지고 있으며 부하변화에 대한 대응이 느린 연료전지의 단점을 보완할 수 있는 대안으로 활용 가능성을 확인하였다.

Fig. 5는 연료전지/2차 전지 간의 상호보완시, 시간에 따른 2차 전지 상태를 확인할 수 있다. 또한, AC 출력에 따른 2차 전지의 충전 및 방전 상태를 확인함으로써 연료전지의 운전 상태를 간접적으로 알 수 있으며 가정에서 전기를 많이 사용하는 저녁시간(약 20시)의 경우 2차 전지의 SoC가 0.4까지 떨어지지만 다시 충전되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 독립적인 연료전지/2차전지 하이브리드 시스템에 의해 운전되는 가정용 연료전지 열 병합 시스템의 성능 예측 프로그램으로 설계된 시스템의 계절별 부하에 따른 성능 평가를 실시하였다. 시스템은 1kW급 연료전지와 60Ah 축전지 2개에 의한 하이브리드 전원 시스템으로 구성되었으며 연료는 도시가스(LNG)에서 수성전이반응에 의한 개질된 수소가 사용되었다. 열은 개질기와 연료전지 등에서 발생하는 것을 열관리 설비 및 온수 저장탱크의 열 시스템에 의해 회수되었다. 또한, 운전 전략은 계절에 따른 부하 소비 패턴을 전산해석에 도입하여 효율이 이론 수치인 80%는 아니지만 이론적 수치에 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 계절별 부하를 반영한 독립된 시스템의 성능 특성을 확인 하고 하이브리드 시스템의 평균 운전 성능과 최적 운전 조건을 결정 할 수 있었다. 제안된 전산해석 방법은 분산형 전원 시스템 및 기타 연료전지 시스템의 설계단계에 적용되어 시스템의 성능예측과 최적화에 활용될 것으로 기대된다.

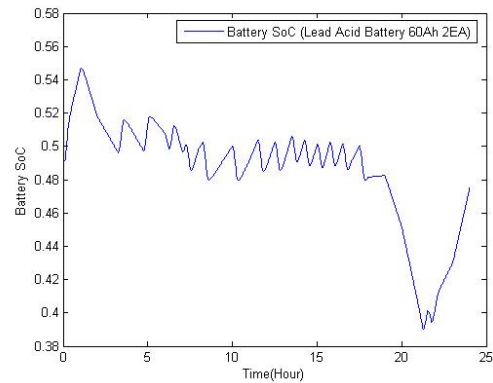


Fig. 5 Temporal variation of battery SoC during one day in the summer season

References

- [1] Kwiseong Jeong, Wonyong Lee, Changsoo Kim, 2005, "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", Journal of power sources, 145, 319-326.
- [2] J. Van Mierlo, G. Maggetto, Ph. Lataire, 2006, "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 2748-2760.
- [3] Minjoong Kim, Huei Peng, 2007, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 165, pp. 819-832.
- [4] Tsangdong Chung, Wentang Hong, 2008, "Efficiency analyses of solid oxide fuel cell power plant systems", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 933-941.
- [5] Cecilia wallmark, Sofia Enback, 2006, "Integration of the components in a small-scale stationary research PEFC system", Journal of Power Sources, Vol. 159, pp. 613-625.
- [6] Hideki Inaka, Andrew, Shindo Sumi, Kunihiro Nishizaki, 2002, "The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC cogeneration system", Journal of power sources, Vol. 106, pp. 60-67.
- [7] Yosuhiko Hamada, Ryuichiro Goto, 2006, "Operating results and simulations on a fuel cell for residential energy systems", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 3562-3571.
- [8] J. H. Lee, T. R. Lalk, 1998, "Modeling fuel cell stack systems", Journal of Power Sources, Vol. 73, pp. 229-241.