

EMTP를 이용한 마이크로터빈과 연료전지의 모델링 및 동특성 해석

권경하*, 백영식**, 정태영**
경북대

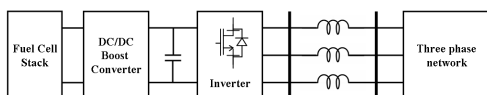
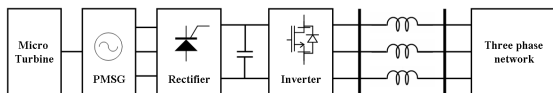
Modeling and Dynamic Analysis of Microturbine and Fuel Cell Using EMTP

Kyung-Ha Kwon*, Young-Sik Baek**, Tae-Young Jyung**
Kyungpook National University

Abstract - Microsources supply high quality power from 1kW to a matter of MW with higher reliability and energy efficiency than the existing large power facilities. In this paper, we designed dynamic modeling of Microturbine and Fuel cell being worthy as a small distributed energy source. Using EMTP we designed the dynamic modeling and confirmed characteristics of steady-state and dynamic analysis. In this paper, we designed dynamic modeling of Microturbine and Fuel cell being worthy as a small distributed energy source and analyzed dynamic characteristics corresponding to load variation.

1. 서 론

기존의 분산전원은 화력복합발전 방식으로 많이 이루어져 있으며 발전기의 규모와 기계적 관성이 비교적 크고 별다른 전력변환 장치 없이 계통에 연계되어 운전되고 있다. 최근 화석연료의 고갈과 대기오염의 문제성을 극복하기 위한 여러 방법이 대두되고 있는데, 이 중에서 신재생에너지 기술발전 등과 더불어 소형 분산에너지원으로 이루어진 분산전원망인 마이크로그리드가 주목받고 있다. 이는 단일이나 복수의 수용가를 대상으로 분산전원을 포함하며 대용량의 송배전망과 연결하거나 분리운전이 가능하다. 마이크로 소스의 발전원은 마이크로터빈과 연료전지, 태양전지 등 여러 가지가 있으며, 1kw에서 수MW 사이의 전력을 공급한다. 마이크로소스는 전력원이 DC 전원을 생산하고, 전압원 인버터를 사용하여 교류전원을 발전하는 방식을 채택하고 있다.[3] 본 논문에서는 마이크로그리드의 동특성을 해석하기에 위하여 마이크로소스들 중 마이크로터빈과 연료전지의 동특성 모델을 EMTP를 이용하여 구현하였다.



〈그림 1〉 마이크로터빈과 연료전지 발전 시스템

2. 본 론

2.1 마이크로 터빈

대표적인 분산전원 중의 하나인 마이크로터빈(Micro Turbine)은 약 30kW에서 약 500kW에 이르는 소규모 발전용량을 갖는 초소형 발전용 가스터빈으로 열효율, 친환경성, 침투부하 삭감 등 다양한 적용 용도로 인하여 각광받고 있다. 마이크로터빈은 수만 rpm의 고속 원동기로서 일반적으로 영구자석형 동기발전기(PMSG, Permanent magnet synchronous generator)를 채용하여 발전하며 기동시에는 동기전동기로 운전하여 터빈을 일정 속도에 도달할 때까지 가속하게 된다. 이는 그림1에서 보듯이 터빈과 발전기가 함께 고속회전(30,000rpm~100,000rpm)함으로 높은 주파수(kHz)의 전력이 발생하게 된다. 따라서 마이크로터빈 발전 시스템과 network 사이에는 정류기와 인버터 등 전력 전자 인터페이스들이 필요하다.[2]

2.1.1 마이크로 터빈의 모델링

그림 2는 속도제어, 가속제어, 온도제어, 연료시스템이 포함된 마이크

로터빈의 동특성 모델을 나타낸다. 기준속도지령(p.u)과 터빈의 회전자 속도에 의해 속도오차가 형성된다. 이를 통해 속도제어는 현재 부하상태에 따라 터빈의 출력을 제어한다. 가속제어는 터빈이 시동하는 동안 운전속도에 도달하기에 앞서 회전자의 가속율을 제어하여 터빈의 과열 현상과 오버스피드를 제한한다. 또한 온도제어는 주위 온도변화나 연료의 특성에 관계없이 미리 정해진 연소온도로 마이크로터빈의 출력을 제한한다. 이들 세 가지 제어(속도제어, 가속제어, 온도제어)의 출력 중 가장 작은 값을 택해 연료시스템의 밸브를 조절함으로써 결과적으로 가장 적은 연료를 사용하게 제어된다. 마이크로터빈의 토크와 배기온도는 앞의 연료흐름과 터빈의 속도에 의해서 선형적으로 나타낼 수 있다. [1, 2]

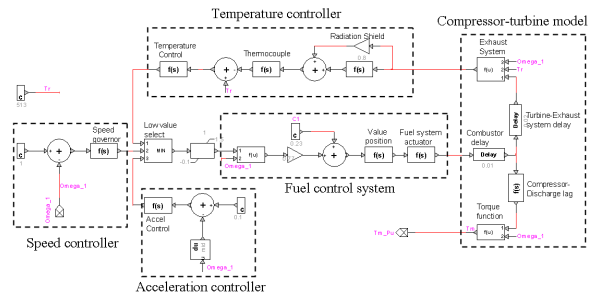
$$T_m = 1.3(W_F - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (1)$$

$$T_x = T_R - 700(1 - W_F) + 550(1 - \omega) \quad (2)$$

여기서 W_F 는 연료흐름, ω 는 회전자 속도, T_R 는 기준연소온도이다.

터빈토크와 부하토크, 회전자 속도의 관계는 (3)과 같다. J 는 회전자의 관성이다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_L) \quad (3)$$

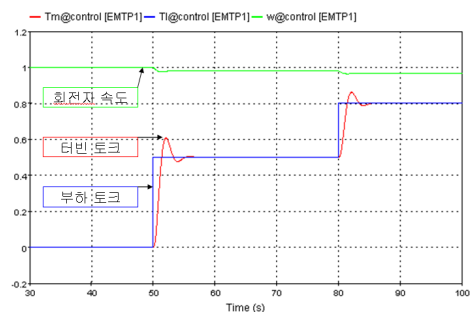


〈그림 2〉 마이크로터빈 동특성 모델

2.1.2 시뮬레이션 결과

마이크로터빈 발전 시스템에서 부하량의 변화는 터빈모델에서 부하토크의 변화로 모의할 수 있다.

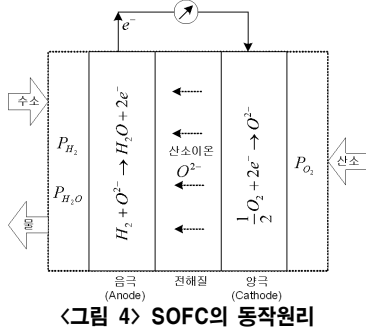
그림 3은 부하토크의 변화에 따른 터빈토크와 회전자 속도의 변화(p.u.)를 나타낸다. 터빈의 스타트업 시간 이후 무부하 상태에서 t=50초에서 0.5 p.u.로 다시 t=80초에서 0.8 p.u.로 증가시켰다. 이러한 변화에 터빈토크는 16초의 응답시간을 가지고 정상상태로 도달한다. 또한 무부하 운전시 회전자 속도는 정확히 1 p.u. 이고, 50초에 부하가 정격의 50%만큼 증가하면 0.98 p.u.로 감소한다. 이에 따라 부하가 증가하면 마이크로터빈 발전 시스템의 출력 전압과 주파수는 약간의 비틀림을 떨어짐을 알 수 있다.



〈그림 3〉 토크와 회전자 속도 변화

2.2 연료전지

연료전지는 연소 반응 없이 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 장치이다. 이중 고체산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)는 고체상의 세라믹을 전해질로 사용하여 500°C~1000°C의 고온에서 운전되는 연료전지로 고온에서 운전되므로 발전효율이 높고, 고온의 배기가스를 이용하여 열병합 발전이 용이하다.[4]



〈그림 4〉 SOFC의 동작원리

SOFC의 경우 그림 4처럼 cathode과 anode의 산소 분압차에 의해 산소이온이 이동하면 화학반응의 균형을 맞추기 위해 anode의 전자가 cathode로 이동하게 되는데 이때 외부 부하를 조절하여 원하는 전류를 얻을 수 있다.

이러한 연료전지 시스템에서는 그림 1과 같이 전력변화장치의 사용이 필수적인 구성요소이다. 연료전지의 셀 전압은 1.15V_{DC} 정도이고 전류가 증가하면 약 0.7V_{DC} 정도 까지 낮아지며, 정격 전압이 낮기 때문에 이를 상승(Boost)시켜야한다.

2.2.1 고체산화물 연료전지의 모델링

SOFC는 아래와 같은 조건들을 가정하고 수학적 모델링이 가능하다. 연료전지 내에 있는 수소 및 산소를 비롯한 기체들은 이상기체이고 안정적으로 공급되고 있다. 그리고 연료전지 온도는 안정적이고 일정하게 유지되고 있고, 채널내부의 압력은 모두 일정하다.

그림 5는 SOFC의 동특성 모델을 나타낸다.

SOFC는 (4)와 같이 내부저항 손실과 활성화분극에 의한 손실, 유량이동에 의한 손실들을 고려한 Nernst 전압 방정식으로 스택의 기전력을 나타낼 수 있다.

$$V_{fc} = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} (\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}})] - rI - Bni - mc^{n_i} \quad (4)$$

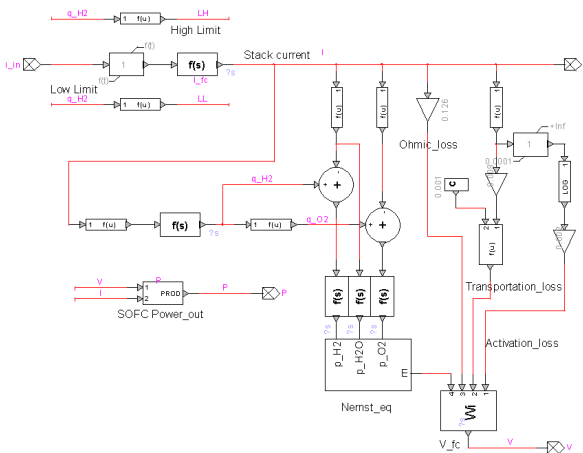
이는 초크흐름 방정식 $\frac{m_f}{p_{us}} = k\sqrt{M}$, (5)

이상기체법칙 $p_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT$, (6)

벨브를 통과하는 유량비 $\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2}$, (7)

Faraday법칙 $\dot{q}_{H_2}^r = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_f I$ (8)

등을 통해 구해진 기체의 부분 압력으로부터 유도할 수 있다.[5]

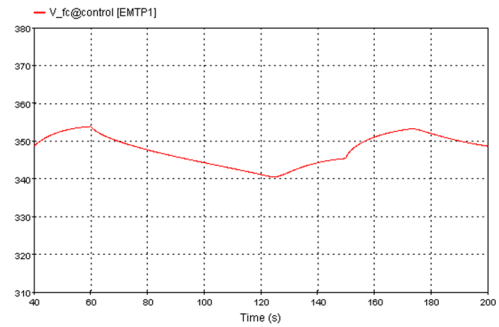
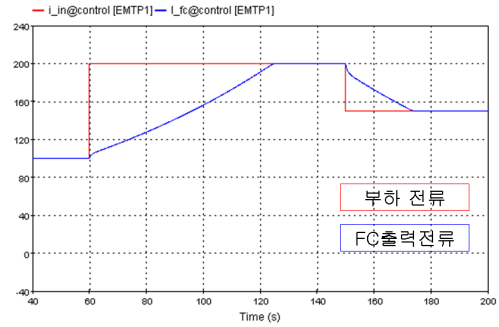


〈그림 5〉 SOFC의 동특성 모델

2.2.2 시뮬레이션 결과

초기 30초간 과도상태 구간에서 수학적 표현인 자연로그, 제곱근 안의 값에 따른 시뮬레이션 오류를 없애기 위해 하한 limit를 두었다. 연료전지 스택안의 셀의 개수는 384개로 시뮬레이션 하였다. 부하량에 따른 전류변화를 피드백하여 출력전류가 제어가 된다.

그림 6은 각각 전류변화에 따른 연료전지 출력전류의 변화와 출력 스택 전압을 나타낸다. t=60초에 전류를 100A에서 200A로 증가시키고 다시 t=150초에 150A로 감소시켰다. 입력전류 변화의 크기에 따라 출력전류는 수분정도까지의 매우 느린 응답시간을 가지는 걸 알 수 있다. 전류변동에 따라 전류가 증가하면 스택 전압은 감소하고, 전류가 감소하면 스택 전압은 증가하는 경향을 알 수 있다.



〈그림 6〉 스택 전류와 전압 변화

3. 결 론

본 논문은 마이크로그리드 시스템의 주요 발전원인 마이크로터빈과 고체산화물 연료전지의 동특성 시뮬레이션 모델을 EMTP상에서 구현하였다. 이 모델들의 부하증감에 따른 응답시간과 출력 특성을 확인하였고 그에 따른 영향을 분석하였다. 이는 마이크로그리드 시스템에서 서로 다른 동특성을 가지는 마이크로소스들의 여러 가지 운전상황에 따르는 제반 문제들을 도출하고 해결해 나갈 것으로 기대된다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of heavy duty gas turbines", Journal of Engineering for Power, Transactions ASME, vol.105, no.4, pp.865-869, Oct 1983
- [2] F. Jurado and A. Cano, "Use of ARX algorithms for modeling micro-turbines on the distribution feeder", IEE Proceedings: Generation Transmission and Distribution, vol. 151, no.2, pp.232 - 238, March 2004.
- [3] 손광명, 이계병, 김영섭, "SVPWM방식 마이크로소스로 구성된 마이크로그리드 모델링 및 해석", 한국조명전기설비학회 논문지 제20권 제3호, pp.12-19, 2006
- [4] 한국에너지기술연구원, "원통형 고체산화물 연료전지 기반기술 개발", 산업자원부, 2001
- [5] Padullis, J., Ault, G. W., and McDonald, R., "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation", J. Power Sources, 2000, 86, pp.495-500