

배전계통에 연계된 연료전지 발전시스템의 제어기 모델링

노 경수, 박 왕규
 동국대학교 전기공학과

Modeling of a Controller for Fuel Cell Plants Connected to a Power Distribution Network

Kyoung-Soo Ro, Wang-Kyou Park
 Electrical Engineering, Dongguk University

Abstract - This paper presents a methodology for effective control of fuel cell devices connected to the electric utility distribution network. A controller is designed for a fuel cell power plant to assist the conventional generators to damp out oscillations, which is possible by utilizing the fast response characteristic of fuel cells. Computer model of the controller is proposed and its effectiveness is proved by a sample test. Fuel cell devices can be used to improve power system stability when these are connected to a distribution system.

1. 서 론

전 세계적으로 환경문제에 대한 관심의 증가에 따라 대체에너지의 개발이 촉진되고 있는 가운데 연료전지 발전은 재생에너지원 중에서도 가장 활발하게 연구 개발되고 있는 분야로서 현재에는 연료전지 개발자체에 치중하고 있으나 머지않아 광범위하게 전력시스템 및 자동차 분야에 활용될 것으로 예상된다. [1],[2]

연료전지의 높은 에너지 변환 효율특성으로 인하여 이것의 파급효과는 상당히 클 것이며 이것의 효율적인 제어기술 또한 절실히 요구 될 것이라 예상되고 있다.

또한 연료전지가 가지는 빠른 부하응답 특성을 이용하면 전력시스템의 안정도 및 신뢰도를 높이는 데 크게 기여하리라 여겨진다. 따라서 불의의 고장 사고나 부하의 급격한 변동에 대해 빠르게 응답함으로써 전력시스템의 안정도 향상에 기여할 수 있으며 이것은 곧 전기에너지의 공급 신뢰도를 증대시키는 결과로 나타날 것이다. [1] 본 논문은 연료전지 발전 시스템을 전력시스템에 효과적으로 연계하는 방법을 고찰하고자 하며 그 발전시스템의 제어기 모델을 제시하고자 한다. 연료전지 발전시스템이 유효/무효전력의 흐름을 조절할 수 있는 능동적 장치가 되어 연계된 계통의 발전기들의 부하추종 부담이 줄어드는 것을 MATLAB 프로그램을 이용하여 모의해 보임으로써 제어기의 효율성을 입증하고자 한다.

2. 연료전지 발전시스템의 구성

연료전지 발전시스템은 현재 상용화되어 있는 PAFC (phosphoric acid fuel cell)를 실제 전력계통에 연계하여 운용하는 방식으로 전력시스템의 안정도향상 측면을 고려하여 PAFC 시스템에 대한 제어기를 제시하여 전력회사에 보다 쉽게 응용될 수 있도록 한다.

그림 1은 25-250[°C]의 온도에서 동작하는 하나의 연료전지 셀의 전압-전류 특성을 보여주고 있다. [1]

$$E_f = E_0 - b \cdot \ln I_f - R \cdot I_f \quad (1)$$

$$\text{여기서 } E_0 = E_r + b \cdot \ln I_0 \quad (2)$$

- b : Tafel slope
- I_0 : Exchange current density for oxygen reduction reaction
- E_r : Reversible potential
- R : Internal resistance

그림 2는 26[MW] 급의 PAFC 연료전지 발전시스템 전력시스템에 연계된 모델로서 260(kW) PAFC 스택(stack) 100개로 구성되며 한 개의 스택은 516개의 전지 셀(cell)로 구성되어 있다. 연료전지 발전 시스템은 크게 다음과 같은 3부분으로 나누어진다.

- (1) Reformer : 연료를 수소가 풍부한 가스로 변환
- (2) Fuel cell stack : 화학반응을 통하여 직류전력을 생산하는 부분
- (3) Power conditioning subsystem(PCS) : 직류전력을 교류전력으로 변환하는 장치

여기서 PCS 부분은 6-스위치 3상 전파브리지 인버터회로로 구성되며 직류전력을 교류전력으로 변환하여 66.9-KV 배전계통에 공급하는 역할을 한다. 이러한 DC-AC 변환장치는 UPS, PWM컨버터, 무효전력 보상 장치 등에 널리 이용되는 전파브리지 인버터를 주로 사용하며 전압 및 주파수 조정기능을 갖고 있으며 전체 시스템의 효율에 큰 영향을 끼치므로 인버터의 스위칭 및 도통 손실을 최소화시키고 동시에 인버터 출력단에 연결

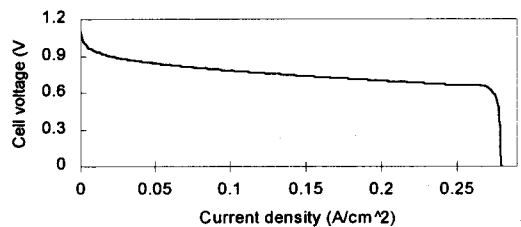


그림 1. 연료전지 셀의 전압-전류 특성

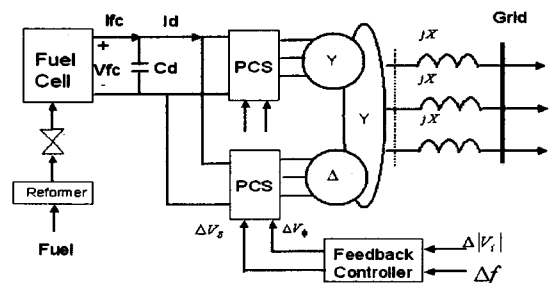


그림 2. 계통에 연계된 연료전지 발전시스템의 모델

된 필터용량을 최소화시켜 무효전력에 의한 손실을 최소화 해야한다. [3]
피드백(feedback) 제어기는 모선 전압의 크기와 주파수의 변화값을 입력으로 받아들여 PCS 스위칭을 제어하는 출력을 내보낸다. 그 제어기는 유효전력은 물론 무효전력을 효과적으로 제어할 수 있으며 무효전력은 송전손실과 전압안정도와 밀접한 관계가 있기 때문에 무효전력의 효과적인 제어도 중요하게 된다.

3. 제어기의 컴퓨터 모델

그림3은 전력계통에 연계한 연료전지 발전시스템과 제어기의 컴퓨터 모델을 나타낸다.

연료전지 발전시스템의 컴퓨터 모델에서 feedback 루프(loop)는 두 가지 주요 경로로 표시된다. 그중 한가지는 angle controller 이고 나머지 한가지는 amplitude controller이다.

Angle controller는 발전기의 동요방정식에서 주파수의 변화를 감지하여 인버터와 계통 모선사이의 전압 위상각을 조절하기 위해 직류/교류 인버터의 스위칭을 변화시킴으로써 유효전력을 제어한다. Amplitude controller는 연료전지가 연결된 모선의 전압크기를 감지하여 인버터의 스위칭을 변화시킴으로써 무효전력 제어를 이룰 수 있다. [4],[5]

컴퓨터 모델을 수식적으로 표현하기 위해서는 그림3에 전달함수 형태로 주어진 모델을 상태방정식으로 표시하여야 한다. 그리고 초기치 값은 외란이 발생하기 전 시스템이 정상상태에 있다고 가정하여 전력조류 계산에 의해 구해진다. 이때 부하의 갑작스런 변동은 발전설비에 의해 공급되는 유효전력의 동요로 나타난다. 부하의 변화 ΔP_L 은 전력조류 방정식에 의해 발전력 ΔP_G 로 응답하게 되고 그 결과로 주파수의 변동 Δf 가 발생한다. 발전기의 동요방정식(swing equation)은 아래의 (3)식과 같이 표시된다. [3],[6]

$$M \ddot{\delta} + D \dot{\delta} + P_G = P_M \quad (3)$$

상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} x(1) &= \Delta \delta \\ x(2) &= \Delta \omega = 2\pi \Delta f \\ x(3) &= \Delta U_1 \\ x(4) &= \Delta V_\varphi \\ x(5) &= \Delta V_1 \\ x(6) &= \Delta V_\delta \\ x(7) &= \Delta V_{fc} \end{aligned}$$

그림 3에서 얻을 수 있는 상태방정식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

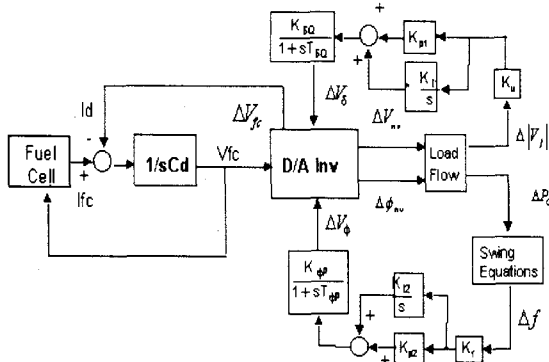


그림 3. 연료전지 발전시스템과 제어기의 컴퓨터모델

$$\begin{aligned} dx(1) &= x(2) \\ dx(2) &= (1/M) * (-ps * x(1) - D * (x(2))) \\ \Delta f &= x(2) / (2 * \pi) \\ dx(3) &= (K_w * K_{i2}) / (2 * \pi) * \text{delf} \\ dx(4) &= (K_{i1} * x(3) + K_w * K_{p2} / (2 * \pi) * \text{delf}) - x(4) / T_{1p} \\ dx(5) &= |\Delta V_j| * K_v * K_{i1} \\ dx(6) &= 1/T_{2a} * (K_{2a} * (x(5) + |\Delta V_j| * K_v * K_{p1}) - x(6)) \\ dx(7) &= (I_{fc} - I_d) / C_d \end{aligned}$$

변압기 2차측 단자전압은 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$V_{fn} = \frac{4\sqrt{2} * Nt * V_{fc} * \cos \delta * \cos 15}{\pi} \quad (4)$$

(연료전지의 출력단자 전압)

여기서 Nt : 변압기 권선비

(4)식에 주어진 δ 각은 인버터의 제어변수로서 amplitude controller에서 생성되어진다. Amplitude controller와 angle controller의 출력을 각각 다음과 같이 정의하면

$$V\varphi = \cos \varphi \quad (5)$$

$$V\delta = \cos \delta \quad (6)$$

연료전지 발전시스템에서 계통으로 주입되는 유효전력 및 무효전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ac} = 1/X * (V_s * V_{fn}) * \sin(\varphi_{fn}) \quad (7)$$

(인버터 유효 출력)

$$Q_{ac} = 1/X * (V_{fn}^2 - V_s * V_{fn} * V\varphi) \quad (8)$$

(인버터 무효 출력)

여기서 V_s : 인버터 연결모선 전압

그러면 연료전지 DC 출력과 인버터 AC 출력은 같아야 하므로 인버터 DC 전류, I_d 는 다음과 같다.

$$I_d = \frac{\sqrt{P_{ac}^2 + Q_{ac}^2}}{V_{fc}} \quad (\text{인버터 입력 전류}) \quad (9)$$

4. 모의 결과

본 논문에서는 그림 4의 5-모선 샘플시스템에서 시뮬레이션을 통하여 계통에 부하변동이 일어난 후 발전기 위상각과 주파수의 변화를 살펴봄으로써 제안된 제어가 전력시스템 안정도 향상에 기여함을 쉽게 알 수 있다. 표1과 표2는 5-모선 샘플시스템의 선로 데이터와 초기 조류계산 결과로 부하변동이 일어나기 이전의 상태를 나타내고 있다. 4번 부하모선에 연료전지 시스템을 연결한 뒤 2번 부하모선에서 유효전력 20[MW], 무효전력 10[MVar]의 부하변동을 가정하여 전체계통의 조류를 계산하고 발전기 모선에서 공급해야 할 조류변동분을 연료전지 시스템에서 공급하도록 설정하고 인버터를 거쳐

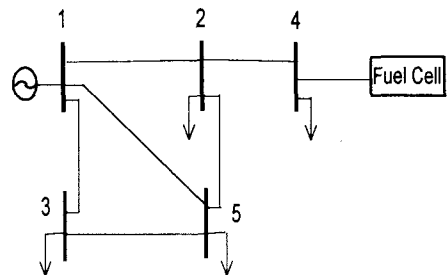


그림 4. 연료전지 시스템이 연계된 5모선 계통도

표1. 6모선 계통의 선로 데이터

선로		R(pu)	X(pu)	1/B(pu)
from	to			
1	2	0.031	0.205	0.0045
1	3	0.024	0.115	0.0065
1	5	0.040	0.175	0.0055
2	4	0.005	0.080	0.0020
2	5	0.026	0.125	0.0035
3	5	0.028	0.155	0.0100
4	6	0.000	0.050	0.0000

표2. 6모선 계통의 초기 조류계산 결과

모선번호	전압 (pu)		주입전력(MW/MVar)	
	크기	위상각	유효전력	무효전력
1	1.05	0.0	85.002	49.167
2	1.006	-2.561	10.0	5.0
3	1.023	-1.839	30.0	15.0
4	0.989	-3.610	40.0	20.0
5	1.018	-2.081	20.0	10.0
6	0.989	-3.141	-16.0	0.0

출력된 유효, 무효 전력이 모선에 공급되도록 하면서 부하변동에 대한 발전기의 응답의 변화를 알아보았다. 그림 5.1, 5.2는 2번 모선에서 부하변동이 일어나서 전체 계통의 조류변화에 대하여 발전기 위상각과 각속도의

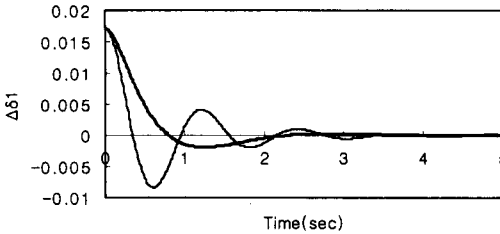


그림5.1 발전기 위상각 변화

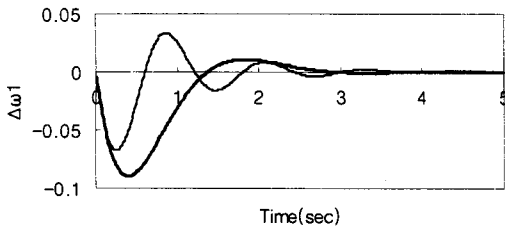


그림5.2 주파수 변화

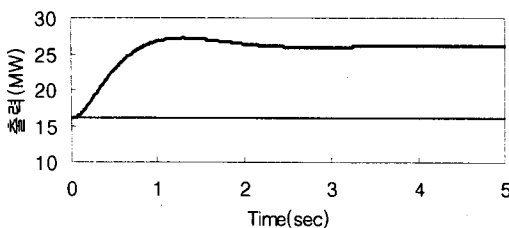


그림5.3 연료전지 시스템의 출력 변화

변화를 보여주고 있다. 발전기가 부하추종을 하고 안정화 단계에 이르기까지 걸리는 시간은 약 2~3초가 걸리지만 제어기를 사용하여 부하변동을 연료전지에서 공급하게 한 경우에는 발전기가 계통의 부하변동을 추종하는 시간이 짧고 안정하다고 할 수 있다.

그림 5.3은 연료전지 시스템의 출력을 보여주고 있다. 그림에 나타난 결과를 보고 알 수 있듯이 제어기를 사용하지 않은 경우에는 부하변동을 발전기가 모두 담당하지만 연료전지를 계통에 연계하고 제어기를 사용한 경우는 발전기가 분담하는 출력이 감소하면서 이것을 연료전지 시스템에서 출력을 증가시켜 보상하면서 발전기의 부하 추종에 대한 부담이 줄어드는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

연료전지가 지니고 있는 빠른 부하응답특성으로 인하여 연료전지 발전시스템의 보급영역은 확대될 것으로 예상된다. 이러한 연료전지 발전시스템의 안전한 운전을 위한 제어기를 설계하였으며 그것의 컴퓨터 모델을 제시하였다. 연료전지 발전시스템의 효율적인 제어를 통하여 전체 전력시스템의 안정도 향상을 기대할 수 있다.

부하의 변동에 따른 발전기의 출력의 동요를 연료전지 발전시스템의 실제 전력계통 연계를 통해서 배전계통의 전력공급 신뢰도를 높임으로써 현대사회의 고품질 전력에 대한 요구증가를 해결할 수 있다. 또한 전력계통의 안정도 향상에 크게 기여하는 등 여러 가지 장점이 예상된다. 그리고 가장 중요한 요인은 전 세계적인 관심사항인 환경문제에 대해 청정에너지 기술로써 차세대 대체에너지 기술로 많은 발전이 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Kyoung-Soo Ro and Saifur Rahman, "Two-Loop Controller for Maximizing Performance of a Grid-Connected Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid Power Plant", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 3, pp. 276-281, September 1998.
- [2] J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett, "Fuel Cell Handbook", Fourth Edition, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, November 1998
- [3] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices and Applications", Prentice Hall, Second edition, 백수현, 김희준, 김영석, 홍순찬 역, 교보문고, 1993
- [4] Arthur R. Bergen and Vijay Vittal, "Power System Analysis", Prentice Hall, Second Edition, 2000
- [5] K.C.Kalaitzakis and G.J.Vachtsevanos, "On the Control and Stability of Grid Connected Photovoltaic Source", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No.4, 556~562 December 1987
- [6] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [7] Don Fowley and Marcia Horton, "The Student Edition of MATLAB", Prentice Hall, Version 4 User's Guide, 1995
- [8] Katsuhiko Ogata, "Solving Control Engineering Problems with MATLAB", Prentice Hall, 1994