

다중 연료전지 발전시스템용 PCS 병렬운전

최규영, 강현수, 김종수, 이병국  
 성균관대학교 정보통신공학부

Power Conditioning System (PCS) Parallel Operation for Multi-Fuel Cell Generation System

Gyu-Yeong Choe, Hyun-Soo Kang, Jong-Soo Kim, Byoung-Kuk Lee  
 School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 용량증대의 편리성, 유지 보수의 수월성, 전원에 따른 PCS 모듈화를 위해 연료전지와 같은 입력전원 증가 시 동일한 전력분배를 위한 PCS의 병렬운전기법이 적용된 연료전지 발전시스템을 개발하였다. 또한 다중 연료전지 발전시스템 PCS의 기생 성분 영향을 분석하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염의 심각성, 교토 의정서에 준한 온실가스 감축 의무부담 본격화 그리고 기존 전력설비의 노후 및 용량증대에 따른 지속적인 문제점이 대두되고 있는 가운데 이에 대한 대책으로 무공해 무한에너지원인 신재생에너지원 (연료전지발전, 태양광발전, 풍력발전 등) 및 관련기술의 연구개발이 급격히 증가하고 있다. 그 중 연료전지 발전시스템은 환경요소의 제약이 없고 친환경적인 전원으로 많은 연구가 진행되고 있다 [1].

연료전지 발전시스템의 구성 중 BOP (Balance of Plant)의 중요성에 대한 인식이 증가하고 있으며 EBOP (Electrical Balance of Plant)는 연료전지의 용량 또는 전압 범위에 따라 여러 topology 형태로 연료전지 발전시스템에 적용되고 있다. 특히 연료전지 개발의 기술적 한계와 경제성 및 발전용량의 확장성을 고려하여 효율적인 연료전지 발전시스템을 개발하기 위해서는 다중의 연료전지를 사용한 병렬운전 시스템의 연구가 필요하다.

병렬운전 시스템은 전원용량의 분산으로 인하여 낮은 정격소자를 사용할 수 있고, 이로써 각 전원별 PCS의 모듈화가 가능하며, 모듈화로 인해 유지 보수가 간편하게 되며 전원 용량의 확장이 용이해진다. 또한 각 전력변환장치 모듈의 성능 최적화가 가능하다 [2]. 하지만 각 모듈간의 임피던스 차이로 인해 전력분담의 불균형이 발생하게 되므로 반드시 균등한 전류분배 알고리즘이 병렬운전 시스템에 적용되어야 한다. 또한 각 모듈의 최적화를 위해 기생 인덕턴스와 캐패시턴스의 영향인 전압 링잉과 스위칭전력 이상의 과전압을 막을 수 있는 스너버 회로가 필요하다 [3].

그러므로 본 논문에서는 다중의 연료전지를 사용하여 PCS의 모듈화, 모듈의 최적화, 전원용량의 확장성, 유지보수의 수월성에 장점이 있는 병렬운전 시스템을 개발하였다. 또한 모듈의 최적화를 위하여 기생 성분들로 인한 영향을 분석하고 스너버 회로를 추가하여 병렬운전 시스템에 적용하였으며 다중 연료전지 발전시스템 병렬운전의 타당성을 검증하기 위해 2kW 시스템을 제작하여 다중 연료전지 발전시스템의 성능을 확인하였다.

2.1 연료전지 발전특성

연료전지는 일반 DC전원과 달리 전원의 비선형성과 동특성이 나타나 PCS 설계 시 반드시 전원의 특성이 고려되어야 한다.

본 논문에서 사용된 연료전지는 고분자 전해질 연료전지로 중앙에 고분자 전해질 막을 중심으로 대칭인 구조로 되어 있다. 고분자 전해질 막 양쪽으로는 연료극 (Anode)과 공기극 (Cathode)의 두 전극이 위치한다. 이것은 통상 일체형으로 제작되고 막-전극 접합체 (Membrane Electrolyte Assembly, MEA)라고 한다. 전해질로는 대부분 나피온 (Nafion)이 사용되고, 이것은 수소이온에 대해서만 전도도를 가진다. 전극 양쪽으로는 가스 확산층 (Gas Diffusion Layer, GDL)이 존재하고, 이것은 연료의 공급을 고르게 하기 위해 사용된다. 연료 밀봉을 위해 개스킷이 삽입되며, 마지막으로 반응물을 공급하기 위한 채널역할, 생성물인 물 제거 그리고 생성된 전자를 외부로 이동할 수 있게 해주는 집전체인 분리판 (Bipolar Plate)으로 구성되어 있다.

연료전지가 비선형적인 특성을 갖는 것은 분극현상 (Polarization)이라는 손실로 표현된다. 연료전지의 분극은 활성화 분극 (Activation polarization), 오믹 분극 (Ohmic polarization), 농도 분극 (Concentration polarization)으로 구성된다. 활성화 분극은 전극표면에서 발생하는 반응 속도에 차이에 의해 발생하며 식(1)과 같이 표현된다. 오믹 분극 전해질 저항, 전극 저항, 도선 저항으로 인해 발생되며 식(2)와 같이 표현된다. 농도분극은 반응물의 농도 기울기 차이로 인해 발생하며 식(3)과 같이 표현된다 [4]. 그림 1은 각 분극으로 인한 연료전지 출력 특성을 나타낸다.

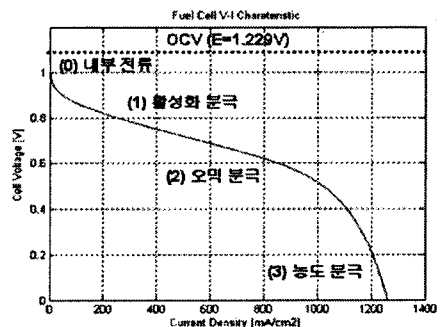


그림 1. 연료전지 특성곡선

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (1)$$

$$\eta_{ohmic} = IR_T \quad (2)$$

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (3)$$

## 2.2 병렬운전

본 논문에서는 2개의 연료전지에 2개의 풀 브리지 컨버터를 연결하여 병렬운전을 실행 하였으며 각각의 PCS 모듈의 임피던스 차이로 인해 발생하는 전류 불균형을 제어하기 위해 전류게인 조절기를 사용한 전류분배 알고리즘을 적용하였다.

### 2.2.1 전류불균형

그림 2는 각 PCS의 모듈의 등가회로를 나타낸다.

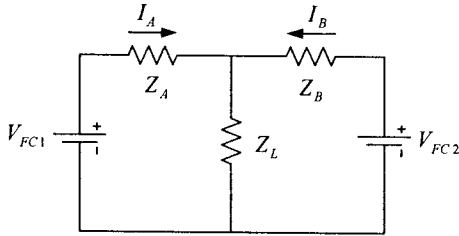


그림 2. PCS 모듈의 등가회로

두 개의 PCS 모듈은 각각을 구성하는 소자들의 임피던스 차이로 인해 식(4), (5)와 같은 전류가 부하로 흐르게 된다. 이때 부하 임피던스가 같지 않다면 각 모듈의 전류가 차이가 나게 되어 전압제어와 전류 제어가 적절히 실행되지 않을 것이다. 그러므로 병렬운전에서는 균등한 전류 분배가 제어 필요하다.

$$I_A = \frac{V_{FC1} + I_B Z_L}{Z_A + Z_L} \quad (4)$$

$$I_B = \frac{V_{FC2} + I_A Z_L}{Z_B + Z_L} \quad (5)$$

### 2.2.2 병렬운전 알고리즘

본 논문에서는 각 PCS 마다 균등한 전력을 분담하기 위해 전압제어와 전류제어를 적용하였는데 전압제어는 DSP를 통해 수행하였으며 전류제어 시스템의 응답성을 높이기 위해 아날로그 제어를 사용하였다. 일반적으로 평균 전류분배 알고리즘은 그림 3과 같다.

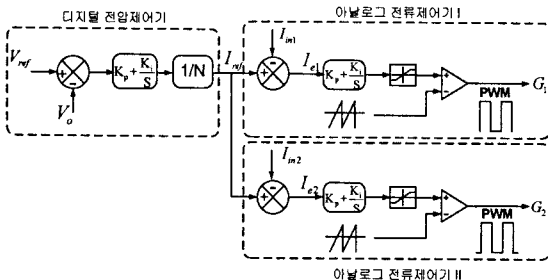


그림 3. 평균 전류분배 알고리즘

평균 전류분배 알고리즘은 전류 지령치를 만들기 위해 전압의 지령치와 실제 전압을 센싱하고, 두 전압을 비교하여 에러를 만들어 PI제어기를 거친 후 병렬로 연결된

모듈의 개수를 나눈다. 생성된 전류 지령치는 실제 전류와 비교되고 PI제어기를 거친 후 톱니파와 비교되어 PWM을 생성하게 된다. 이때 전류 지령치는 모듈의 개수가 증가할수록 작아져 제어기의 응답이 느려지게 된다. 그러므로 본 논문에서는 전류게인 조절기를 사용하여 전류 지령치를 생성하였다. 전류게인 조절기의 게인을 테이블 형태로 저장하여 병렬개수에 따라 다른 게인을 시스템에 적용하게 하였다. 그림 4는 본 논문에서 제시한 전류게인 조절기 적용된 전류분배 알고리즘을 나타낸다.

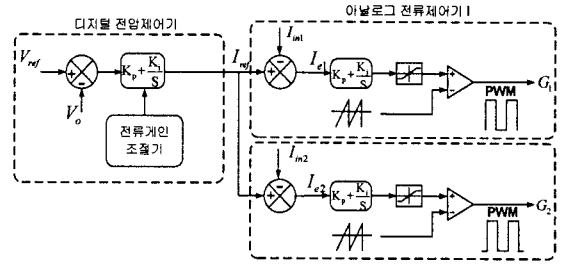
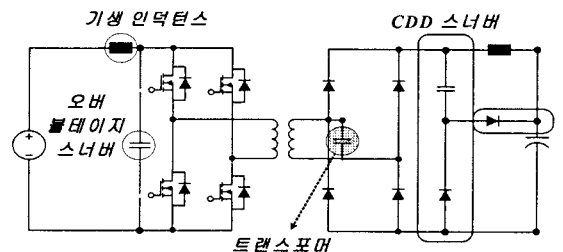


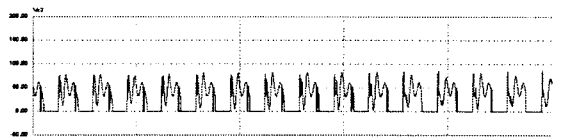
그림 4. 전류게인 조절 전류분배 알고리즘

## 2.3 기생성분의 영향

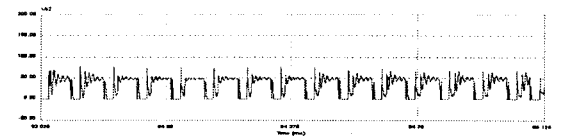
일반적으로 풀 브리지 컨버터를 설계할 때 기생 인덕턴스와 캐패시턴스를 고려하여 설계하게 된다. 하지만 병렬운전 시스템일 경우는 구조적으로 기생 인덕턴스와 캐패시턴스가 증가할 수밖에 없다. 특히 기생 인덕턴스는 스위치의 전압 스트레스로 작용하기 때문에 본 논문에서는 오버 볼테이지 스너버로 캐패시터를 사용하였다. 하지만 캐패시터가 클 경우 스위치의 링잉을 발생시켜 2차측 다이오드의 링잉을 야기 시킨다. 그러므로 캐패시터의 선정시 스위칭 전압과 다이오드 전압을 절충하여 선정해야 한다. 2차측 다이오드의 전압링잉은 트랜스포머의 기생 캐패시턴스에 큰 영향을 받는다. 이 전압링잉은 시스템의 효율을 저하시키므로 본 논문에서는 2차측 다이오드 전압 스트레스를 줄이기 위해서 CDD 스너버를 추가 하였다 [3].



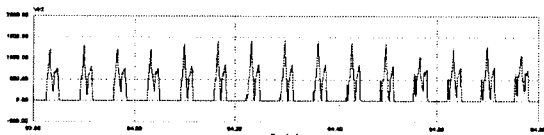
(a) CDD 스너버



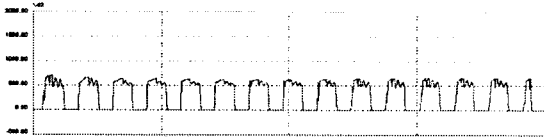
(b) 스위치 전압 (CDD 적용 전)



(c) 스위치 전압 (CDD 적용 후)



(d) 다이오드 전압 (CDD 적용 전)



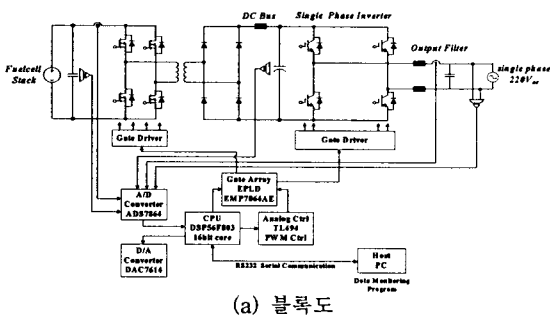
(e) 다이오드 전압 (CDD 적용 후)

그림 5. CDD 스너버 적용 전·후 파형

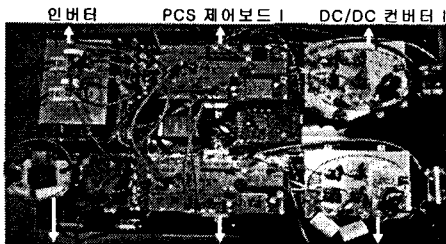
그림 5는 CDD 스너버 전·후 파형이며 오버 볼테이지 스너버로 생긴 링잉 전압의 영향이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

## 2.4 시스템 구성

그림 6은 다중 연료전지 발전시스템 구성도이다.



(a) 블록도



인버터 PCS 제어보드 II DC/DC 컨버터 II

(b) PCS

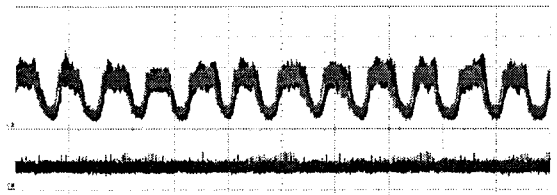
그림 6. 다중 연료전지 발전시스템

다중 연료전지 발전시스템은 2개의 DC/DC 컨버터와 단상 인버터로 구성되었다. 2kW급 계통연계형 발전시스템이며 마스터와 슬레이브 제어기로 구성하였다. 연산처리는 Free-scale사의 DSP 56F803을 사용하였으며 아날로그 제어기는 TL494를 사용하였다. DC/DC 컨버터의 스위칭 주파수는 30kHz 이며 인버터는 10kHz 스위칭한다. 시스템의 초기는 소프트 스타트로 DC link 전압을 서서히 충전시키고 일정한 전압이 되면 발전을 시작한다. 마스터와 슬레이브로 제어기가 구성되어 전류 지령치와 고장 신호를 인지하여 어느 쪽이던 고장시 발전을 중지한다.

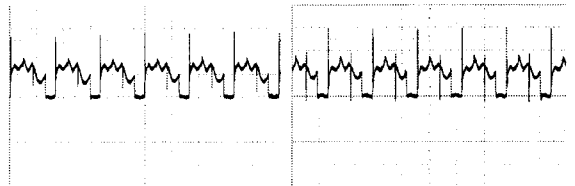
## 2.5 실험 결과

그림 7은 다중 연료전지 발전시스템 병렬운전의 실험 파형이다. 그림 7(a)는 병렬운전의 전류분배 기법을 통하여 균등한 전력이 분배되는 파형으로 마스터와 슬레이브의 전압 전류가 동일함을 볼 수 있다. 그림 7(b), (c)는 CDD스너버를 통해 스위치, 다이오드 전압 스트레스가

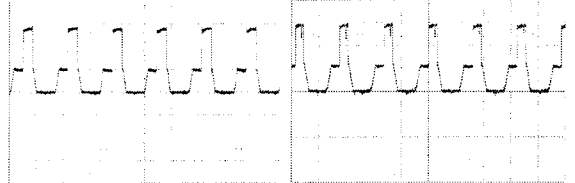
줄어든 파형이다. 그림 7(d)는 계통 출력 전압 전류의 파형으로 2kW 정도의 전력을 연료전지에서 입력으로 받아 계통으로 출력하는 것을 볼 수 있다.



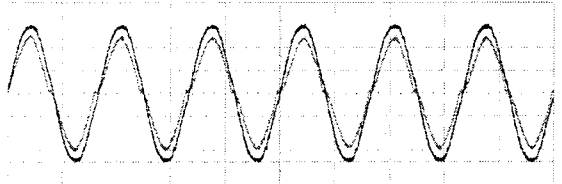
(a) 입력전류(20A/div)/입력전압(50V/div) - 마스터, 슬레이브



(b) 스위치 전압(25V/div) - 마스터, 슬레이브



(c) 다이오드 전압(200V/div) - 마스터, 슬레이브



(d) 출력 계통전압(100V/div), 계통전류(5A/div)

그림 7. 실험 파형

## 3. 결 론

본 논문에서는 PCS의 모듈화와 최적화, 전원용량의 확장성, 유지 보수의 수월성에 장점이 있는 다중 연료전지 발전시스템을 개발하였다. 시스템 최적화를 위하여 기생 성분들로 인한 영향을 분석하고 CDD 스너버 회로를 추가 하여 병렬운전 시스템에 적용하였다. 따라서 본 논문은 다중 연료전지 발전시스템 최적설계에 적용될 것으로 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 홍성안, "수소 연료전지 기술의 개발현황 및 전망", 공학교육, 제13권, pp.53-61, 2006.
- [2] 김수석 "병렬운전 모델을 이용한 DC-DC 컨버터의 병렬운전 특성해석" 조명.전기설비학회논문지, 제18권, 제5호, 2004.
- [3] E.S Kim, Y.H Kim, "A ZVZCS PWM FB DC/DC Converter Using a Modified Energy-Recovery Snubber" IEEE Trans. on Ind Elect. Vol. 49, No. 5, 2002.
- [4] G.Y Choe, J.S Kim, H.S Kang, B.K, Lee, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)" ICEMS2007, pp.238-243, Oct, 2007.