

# 발전용 연료전지 PCS 기술 및 개발 동향

최 세 완

(서울산업대 제어계측공학과 교수)

발전용 연료전지로서 가장 유망한 MCFC와 SOFC는 현재 국내에서도 활발히 상용화가 진행되고 있다. 300kW급의 스택을 이용하여 작게는 수MW급 분산전원으로부터 수십 또는 수백 MW급의 대규모 발전플랜트를 구축하는데 있어서 PCS는 전체가격의 10~25%를 차지하는 상용화에 매우 중요한 핵심 장치이다. 본고에서는 발전용 연료전지 PCS의 국내외 기술개발 동향을 소개하고 저전압 출력의 PCS 기술 및 PCS의 대규모화에 요구되는 차세대 기술과 기술적인 이슈를 소개하고자 한다.

## 1. 서론

현재 발전용 연료전지로서 가장 활발히 개발중인 연료전지는 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell)와 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell)이다. MCFC는 약 650°C의 고온에서 운전되어 값싼 니켈을 전극으로 사용할 수 있고 다양한 연료의 활용과 폐열을 회수하여 이용할 수 있기 때문에 열병합 발전까지 포함하여 약 70%의 높은 효율을 얻을 수 있다. 국외에서는 미국의 FCE사가 가장 먼저 MCFC 300kW급 스택을 기본으로 하는 시스템을 상업화하였고 독일의 MTU사가 500kW급 스택을 기본으로 하는 시스템 개발을, 이탈리아의 Ansaldo Fuel Cell 사는 250kW 두 대를 결합한 500kW급 기본모델 개발을, 일본의 IHI 사가 300kW급 열병합 시스템의 개발을 각각 추진하고 있다. 국내에서는 1992년 정부의 21세기 선도사업으로 MCFC 기술이 선정된 이래 한전연구원에서 현재 250kW급 평가설비를 구축하였고 100kW급 평가운전중이다. 기업으로서는 포스코파워가 FCE사와의 전략적 기술계휴를 바탕으로 스택과 BOP(Balance of Plant)를

생산·보급하고 있으며 두산중공업은 정부의 지원으로 300kW급 및 플랜트연계형 1.2MW급 MCFC시스템의 스택, 구성요소 및 BOP를 자체기술로 개발하고 있다. 국내 MCFC 발전시스템의 스택의 구성요소에 대한 기술 수준은 선진국 대비 80% 이상 도달한 것으로 보고되고 있으며 연료전지 플랜트 전체를 포괄하는 시스템 분야에서는 선진국 대비 70% 정도의 기술수준을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 시스템 설계 부분과 EBOP(또는 PCS) 및 MBOP 개발에 집중할 필요가 있다.

국내에서 발전용 연료전지 PCS는 효성중공업이 2004년도에 100kW급을 2007년도에 250kW급을 각각 개발하였고, 포스코는 2008년도에 600kW급을 그리고 2009년도에는 1.5MW 및 3MW급을 각각 개발하였으며 2010년에는 UL 제품인증을 추진하고 있다. 국외의 경우 ABB사와 SATCON사에서 300kW급 발전용 연료전지 시험용으로 PCS를 개발하였고 SATCON사에서는 2.4MW급까지 개발한 것으로 보고되고 있다. 최근 독일 MTU사에서 개발한 300kW급 PCS는 부피가 대폭 저감된 것이다.

국내·외의 발전용 연료전지 PCS와 관련한 개발사례를 살펴 볼 때 기술적으로는 2레벨 PWM 인버터를 60Hz 변압기를 사용하여 병렬로 결합하는 방식으로 용량을 증대시키며, 주로 3MW급 이하의 용량에 적용하고 있는 상품화의 초기단계라 할 수 있다. 향후 발전용 연료전지 스택 기술이 상용화에 근접하면 수십~수백 MW급의 발전소 규모로 대형화의 요구가 뒤따를 전망이다. 이에 따른 대규모 연료전지 PCS 개발이 주요 과제로 떠오르고 있다.

한편 미국 에너지부의 Solid State Energy Conversion Alliance 프로그램에서 제시한 연료전지 발전 시스템의 2020

표 1 2007 High Megawatt Converter Workshop 참가기관

기관종류	참가기관
정부	DOE, DOD
연구소	NIST, NETL, EPRI, ORNL
시스템 업체	FCE, Siemens
PCS 업체	Satcon, ABB
부품 업체	Cree, Powerex
대학	Texas A&M, Virginia Tech

년 목표단가는 SOFC 스택을 기반으로 한 IGFC(Integrated coal Gasification Fuel Cell) 파워플랜트를 100~800MW 규모로 구축한다고 했을 때 \$400/kW이고 현재의 기술로는 단가가 \$3000/kW(100kW~1.2MW 18kV 이하 출력시 미국 FCE사 기준) 정도로 많은 격차가 있다. 또한 연료전지 PCS 만의 2020년 목표단가는 \$40~100/kW이고 현재의 기술로는 단가가 \$260/kW로 역시 많은 격차가 있음을 알 수 있다. 그러므로 전체 시스템에서 PCS가 차지하는 가격비중은 현재 10% 내외로 예상하고 있지만 PCS의 단가가 \$100/kW 까지 가는 경우 전체시스템 목표단가의 25%의 비중을 차지하게 되므로 전체시스템의 목표가격을 낮추기 위한 전력변환기술의 중요성이 더욱 강조될 전망이다.

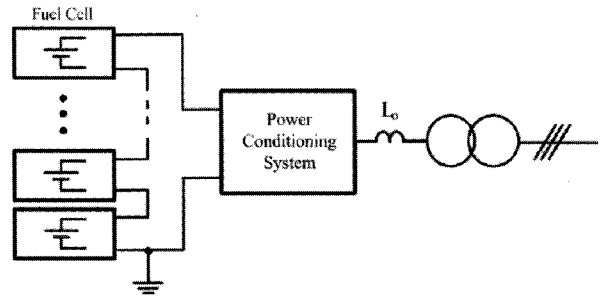
이와같이 연료전지 PCS의 단가목표 달성 및 대규모화를 위한 전력변환 기술개발의 중요성이 대두됨에 따라 미국의 경우 2007년부터 매년 에너지부 주관으로 "High Megawatt Converter Workshop"이 개최되고 있다. 제 1회 워크샵은 2007년 1월 메릴랜드주 소재 미국 국립기술표준원(National Institute of Standard and Technology, NIST)에서 열렸는데 표 1과 같이 미국내 발전용 연료전지와 관련된 정부, 기업, 연구소 및 대학에서 40여명의 PCS 전문가들이 참가하여 차세대 대규모 발전용 PCS의 기술 개발과 관련한 다음과 같은 주제를 논의 하였다.

- MW 전력변환 최신기술에 관한 정보교환
- 발전용 연료전지 PCS의 저가격화 방안 토론회
- PCS 대규모화에 필요한 요소기술 개발동향
- 산업주도 로드맵 위원회 및 R&D 자금운용 논의

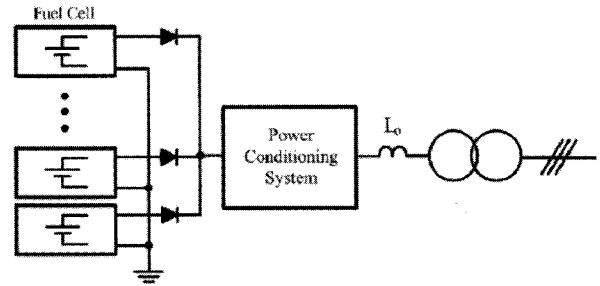
## 2. 발전용 연료전지 PCS 기술

### 2.1 단위 연료전지 스택 구성방법

용량을 증대시키기 위하여 그림 1과 같이 연료전지 스택을 직접 연결하는 두가지 방식을 고려해 볼 수 있다. 그림 1(a)와 같이 연료전지를 직렬연결하고 이를 PCS를 통해 계통에 연계시키는 방식은 PCS의 입력전압이 높아 효율을 높일 수 있고 DC-DC 컨버터 또는 60Hz 승압용 변압기의 생략이 가

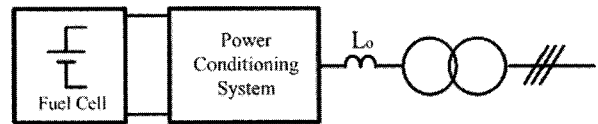


(a) 직렬연결

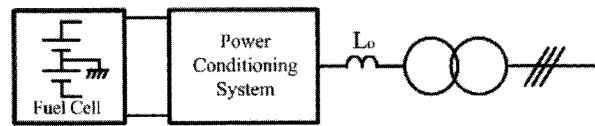


(b) 병렬연결

그림 1 연료전지 직접연결



(a) 단일스택



(b) 센터탭

그림 2 연료전지 단위스택 구성

능하여 전체 부피 측면에서 유리하다. 그러나 상측의 연료전지 스택이 고전압이므로 안전에 문제가 있을 수 있으며 주변 장치의 접지문제가 있다. 또한 한 대의 스택이 고장시 전체시스템이 정지되어 신뢰성이 저하될 수 있다. 그림 1(b)와 같이 연료전지를 병렬로 연결하는 방식은 직렬연결에서 같은 고전압에 의한 안전문제 및 주변장치의 접지문제가 없으나 PCS의 전류정격이 높고 순환전류 억제용 다이오드가 반드시 필요하게 되어 효율이 낮아지는 단점이 있다. 또한 각 연료전지 스택의 전류를 제어할 수 없으므로 스택간의 전류불균형 문제가 발생할 수 있다. 따라서 그림 2와 같이 여러 대의 연료전지 스택을 직접 연결하는 방식은 실제 적용이 어렵

다고 하겠다.

따라서 그림 2에서와 같이 연료전지 스택을 각각 한대 또는 두 대를 단위스택으로 하여 PCS와 연결하는 방식이 실제 적용된다. 그림 2(b)와 같이 두 대를 직렬로 연결하여 단위스택을 구성하면 스택과 점지간의 전위를 최소로 하면서 PCS 입력전압을 높게 가져갈 수 있어 DC-DC 컨버터를 생략 가능하거나 효율을 보다 높일 수 있는 장점이 있다. 그러나 두 대의 스택중 한 대 고장시 전체 시스템을 정지시켜야 하는 단점이 있다. 또한 장시간 운전시 스택의 단자와 사시간의 단락의 가능성이 있는데 이 문제를 해결하여 센터탭 방식의 연료전지를 단위스택으로 하는 방안이 추진되어야 한다.

발전용 연료전지 스택 한 대의 최대부하시 전압은 현재 대부분 250V~500V 사이에 있는데 2020년경에는 이를 2000V까지 높은 스택의 출현이 가능할 것으로 예상된다. 이 같이 PCS의 효율을 높이고 부피를 작게 하기 위하여 스택전압을 높이면 스택의 비용과 전기적인 절연요구 등이 증가되므로 단일스택 전압(셀 수)에 대한 선정을 위하여는 PCS의 아키텍처 및 토폴로지를 고려한 전체시스템의 경제성 검토가 선행되어야 한다.

### 2.2 DC-DC 컨버터의 사용 유무

PCS의 출력으로 저전압 380Vac(또는 440Vac)가 요구되는 경우 인버터 입력단의 최소 직류전압은 750V(또는 880V) 정도가 되어야 하므로 승압이 필요하다. 승압의 방식에는 그림 3(a)와 같이 연료전지로부터의 직류전압을 인버터로 교류전압으로 변환한 후 승압용 60Hz 변압기를 사용하여 원하는 전압으로 승압시키는 교류승압 방식과 그림 3(b)와 같이 DC-DC 컨버터로 연료전지 전압을 승압한 후 인버터로 교류전압으로 변환하는 직류승압 방식이 있다. 교류승압의 경우 PCS의 구성이 간단한 장점이 있으나 전류정격이 높아 인버터 및 필터의 부피가 커진다. 반면에 직류승압의 경우 별도의 DC-DC 컨버터 사용에 따른 소자수, 손실 및 부피가 증가되지만 인버터에 높고 안정된 전압을 공급하므로 인버터 및 이하 필터부의 부피감소와 및 효율증가가 가능하다. 또한 360Hz 리플전류를 제거하기 위한 커패시터 용량이 감소되고 예기치 못한 역전류에 의한 연료전지의 손상을 DC-DC 컨버터가 구조적으로 막아줄 수 있는 장점도 있다. 더욱이 별도의 22.9kV 승압용 변압기를 사용해야 하는 환경에서는 절연용 60Hz 변압기를 생략할 수 있다. 저전압(1000Vac 이하) 출력의 발전용 연료전지 PCS 제품으로서 ABB사와 포스콘은 교류승압 방식을 Satcon사와 효성중공업은 3상 CCM 인터리빙 방식의 DC-DC 컨버터를 포함한 직류승압 방식을 각각 적용하였다. 각사 제품의 출력용량 및 입력전압 범위등 사양이 달라 직접적인 비교는 어려우나 최대부하시 효율은 대부분 93%~96% 정도이고 직류승압인지 교류승압인지 따른

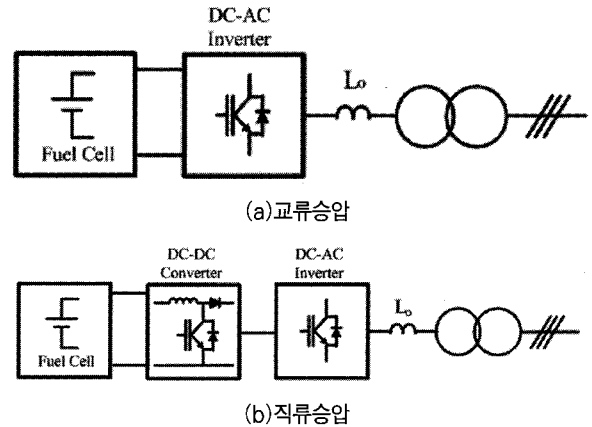


그림 3 승압방식

부피 차이는 없는 것으로 나타났다.

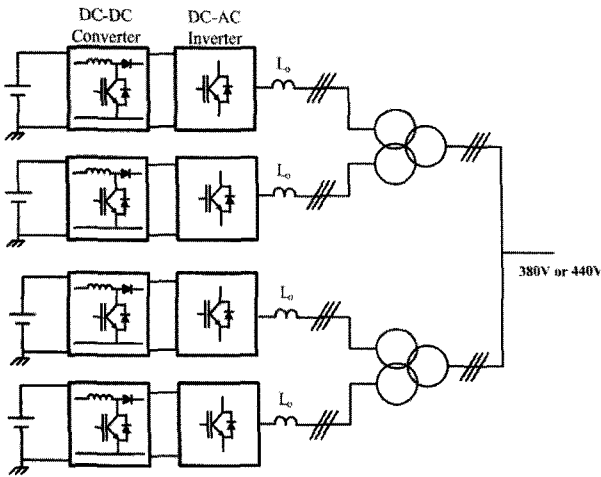
한편, 주어진 사양에 대하여 교류승압과 직류승압을 각각 적용하여 설계한 후 예상되는 효율과 부피를 비교한 연구 결과<sup>[5]</sup>에 의하면 교류승압의 경우 큰 전류로 인하여 인버터 및 LCL 필터의 부피가 커서 전체 PCS의 부피는 직류승압이 더 작은 것을 볼 수 있다. 또한 직류승압에서 DC-DC컨버터의 병렬상수가 몇인지도 효율 및 부피에 영향을 미치므로 이를 적절히 선정하는 것이 중요하다고 하겠다.

### 2.3 저전압 출력을 위한 PCS 토폴로지

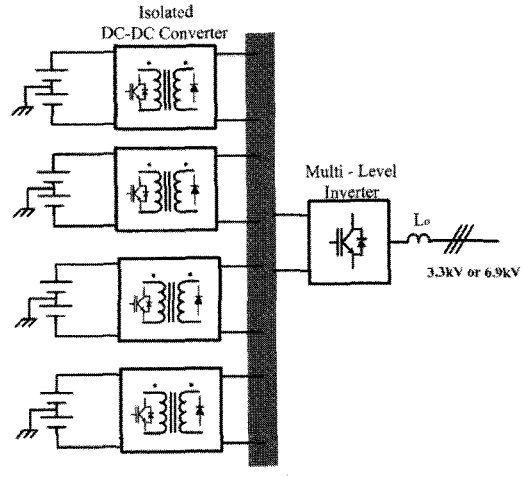
연료전지 스택 4대로부터의 전력을 통합하여 저전압출력을 하는 PCS 구성의 예를들면, PCS입력전압이 낮을수록 교류 승압 방식은 불리하므로 단위스택을 단일스택으로 하는 경우는 그림 4(a)와 같이 DC-DC 컨버터가 있는 직류승압 방식을, 센터탭으로 전압을 높일 수 있는 경우는 그림 4(b)와 같이 DC-DC 컨버터를 사용하지 않는 교류승압 방식을 각각 선정하는 것이 유리하다.

## 3. 발전용 연료전지 PCS 대규모화 기술

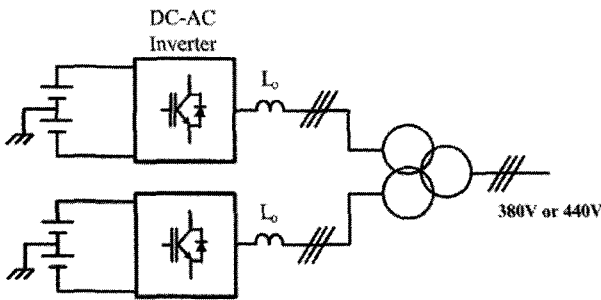
그림 5는 1.5MW 단위스택을 이용하여 100~300MW급의 IGFC 발전시스템 구성시 전력통합(Power Consolidation)의 한 예를 보여준다. 이같이 연료전지 스택을 수십~수백대 연결하여 대규모화하는 경우 그림 4와 같은 저전압출력 방식을 적용하면 전류가 크고 결합변압기 등의 부담이 커져 전체 연료전지 PCS의 부피, 가격 및 효율측면에서 비효율적이다. 따라서 수 MW 이상의 발전시스템에서는 MV(Medium Voltage) 출력이 요구되며 MV출력의 PCS를 어떻게 구성하여 전력을 통합하느냐에 따라 시스템 가격 및 성능이 크게 좌우되므로 PCS 아키텍처 및 토폴로지와 그에 수반되는 연구는 가장 중요한 과제라 할 수 있다.



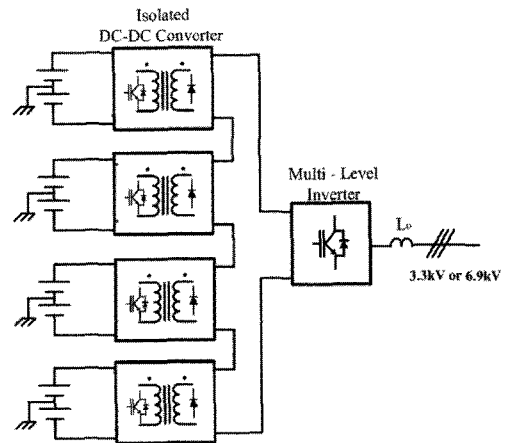
(a) 직류승압



(a) DC 버스



(b) 교류승압



(b) Series-connected DC

그림 4 저전압 출력 PCS

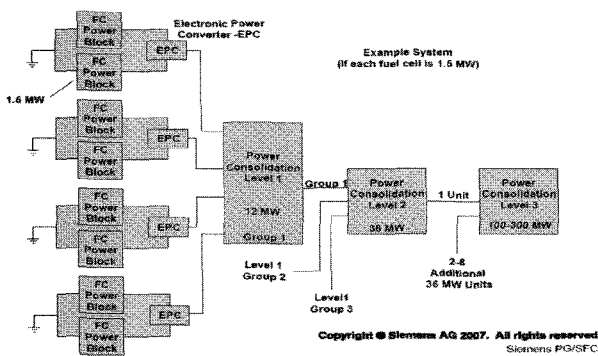
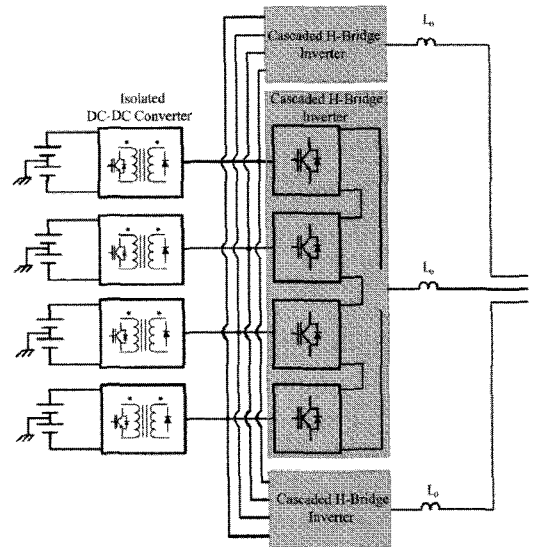


그림 5 대규모 연료전지 발전시스템에서 PCS에 의한 전력통합 (Siemens사)

### 3.1 시스템 아키텍처 및 토폴로지 연구

발전용 연료전지 PCS 설계시 요구조건을 보면, 개개의 단위스택 전압이 균일하지 않은 상태에서 동작이 가능하고, 각 스택 모듈의 전류량을 제어할 수 있으며, 시스템 동작중에 인버터를 포함하는 개개의 모듈을 교체할 수 있어야 한다는 것



(c) Cascade H-bridge

그림 6 Medium Voltage 출력 PCS

이다. MV출력의 PCS는 그림 6에서 보듯이 멀티레벨 인버터에 기반을 둔 세가지 기본 구성을 고려해 볼 수 있다. 그림 6(a)의 DC 버스방식은 동작 중에 각 연료전지 및 DC-DC 컨버터 모듈의 교체가 가능하고 여분의 모듈을 추가하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 각 DC-DC 컨버터의 순시 출력전압이 다른 경우 순환전류가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위한 제어 알고리즘이 복잡해질 수 있다. 그림 6(b)와 같이 절연형 DC-DC 컨버터의 2차측을 직렬연결하는 Series-connected DC 방식의 경우 절연형 DC-DC 컨버터의 승압비를 낮게 가져갈 수 있다. DC 버스방식과 Series-connected DC 방식 모두 Diode Clamped 또는 Flying capacitor 방식의 멀티레벨 인버터를 사용할 수 있는데 다이오드 및 커패시터 전압의 불균형 문제 등으로 인하여 레벨 수에 제한이 있을 수 있다. 그림 6(c)는 Cascaded H-bridge 인버터를 이용한 방식으로서 각 스택의 접지를 다르게 할 수 있는 경우 절연형 DC-DC 컨버터를 생략할 수도 있다. 이 방식은 모듈화와 시스템 증대 및 유지보수가 용이하다는 장점이 있으며 다른 방식에 비해 더 많은 레벨출력이 가능하여 필터사이즈를 최소화 할 수 있다.

### 3.2 인버터 및 컨버터 대용량 토폴로지 및 설계

MV출력의 PCS에서는 저압의 범용소자를 사용할 수 있는 멀티레벨 인버터의 적용이 필수적일 것으로 예상된다. 현재까지 멀티레벨 인버터는 주로 유도전동기 구동분야에 적용되어 왔고 계통연계응용에서는 적용된 사례가 극히 드물다. 따라서 멀티레벨 인버터를 적용한 시스템 아키텍처와 그에 따른 모듈용량 및 레벨수 선정, 생산성 및 유지보수향상을 위한 모듈화 및 표준화, IEEE 1547 등 계통연계 기준을 만족하기 위한 제어기법 등 대규모의 계통연계에 적용하기 위한 연구가 필요하다.

또한 대부분의 경우에 있어서 300kW~600kW급의 절연형 DC-DC 컨버터가 필요한데 이러한 대용량 절연형 DC-DC 컨버터는 타응용에서도 적용된 사례가 많지 않아 향후 해결해야 할 가장 중요한 기술적 과제이다. 그림 6(a)의 DC버스 방식에서는 고승압의 컨버터가, 그림 6(b)의 Series-connected DC방식에서는 승압비는 높지 않은 절연 목적의 컨버터가 각각 필요하다. 기존의 풀브리지, 하프브리지 및 푸시풀등의 단상(Single-phase)을 기본으로 하는 DC-DC 컨버터로는 스위치의 전압 및 전류부담이 커지기 때문에 이를 직·병렬 연결하여 구성할 수 있다. 최근 단상 DC-DC 컨버터에 비해 전류정격의 감소되어 소자 선정이 용이하고, 인터리빙 동작으로 입출력 필터크기가 작으며, 변압기의 이용율이 높아 부피감소가 가능한 다상(Multi-phase) DC-DC 컨버터<sup>(7,8)</sup>가 대용량에 적용을 목적으로 연구되고 있다.

### 3.3 PEBB등 표준소자에 의한 모듈화 기술

PEBB(Power Electronics Building Blocks)는 "Plug&Play" 개념을 전력전자 시스템에 적용한 기술이다. 전력소자, 게이트 드라이버 및 센서, ADC & DAC, 보호회로, 필터 등의 요소들을 통합하여 모듈화하고 표준화시킴으로서 대규모의 발전용 연료전지 PCS의 단가를 낮추고 생산성을 증대시키며 유지보수 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 반드시 필요한 기술이라 하겠다.

### 3.4 신소자에 의한 효율개선

SiC 소자는 실리콘 소자에 비해 높은 차단전압과 전류밀도로 손실을 50%정도 감소시킬 수 있다. 또한 200°C의 고온에서 동작이 가능하고 열전도 특성이 우수하여 약 85%의 방열 시스템 감소가 가능하며 낮은 역방향회복시간으로 높은 스위칭 주파수 동작이 가능해 PCS의 부피와 무게를 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 저전압 출력 PCS의 경우 DC-DC 컨버터에 1200V급의 SiC MOSFET과 Schottky Diode의 적용이 가능하고 MV 출력 PCS의 경우 현재 Cree사가 개발 중인 1.2kV~10kV/10A~67A SiC MOSFET과 12kV SiC IGBT의 적용을 고려해 볼 수 있다. SiC소자를 적용하는 경우 스위칭 소자의 가격은 상승하지만 자성체 및 방열부분의 가격은 감소되고 효율상승이 가능하다. 특히 고전압·고주파의 SiC소자를 사용하여 PCS의 출력을 HV(High Voltage)로 하면 60Hz변압기 생략이 가능하므로 SiC소자의 적용은 MV 또는 HV에서 더욱 효과적이라 할 수 있다.

### 3.5 공통모드전압 해석

PCS를 구성하는 DC-DC 컨버터와 인버터는 기본적으로 PWM 스위칭을 동작을 하며 이러한 스위칭 동작으로 각 노드와 접지 사이에 고주파 공통모드 전압(Common mode voltage)이 발생하며 그림 7에서와 같이 각 노드와 접지와 사이에 널리 분포된 기생 커패시터를 통하여 스파이크성의 순환전류를 발생시킨다. 이 순환전류는 Ground fault protection system에 간섭, 중성점 전이(Neutral shift) 및 EMI 등을 야기시킬 수 있다.

이러한 공통모드 전압에 의한 문제를 극복하기 위하여 인버터 출력단에 공통모드 필터를 추가하거나 고주파 변압기에 차폐를 하는 등의 방법이 사용되고 있다<sup>9)</sup>. 그러나 다수대의 연료전지 스택을 이용하여 대규모화 하는 경우 PCS의 구성 및 토폴로지가 복잡해지므로 공통모드 전압의 원인과 현상을 분석하기 위한 모델링을 토대로 이를 대처하기 위한 연구가 필요하다고 하겠다.

### 3.6 고성능 대규모 PCS 계통연계

계통연계 연료전지 시스템에서 계통에 이상이 발생하는 경

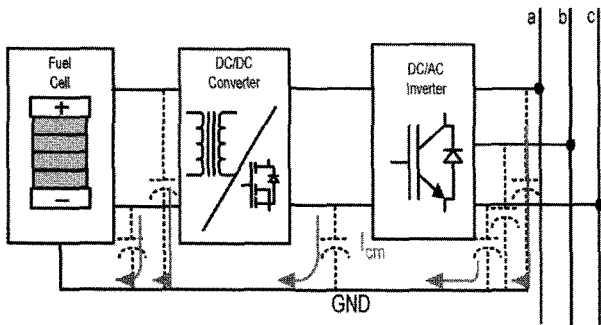


그림 7 공통모드전압에 의한 순환전류

우 PCS는 독립운전으로 전환하여 MBOP등 자체 부하에 지속적인 전력을 공급해야 한다. 이러한 모드전환시 M-BOP의 공급전압이 심한 과도상태에 놓이게 되어 연료전지 스택에 심각한 영향을 줄 수 있으므로 과도현상을 최소화하는 Seamless Transfer 기술이 필수적이다<sup>[11]</sup>. 또한, 대규모의 발전시스템에서 다수대의 인버터를 병렬로 운전하고 각 제어기로 단독운전 검출을 하는 경우 단독운전 검출이 더 어렵게 되거나 불가능한 문제가 발생할 수 있으므로 다수대의 인버터 운전시의 단독운전 검출기법이 필요하다<sup>[12]</sup>.

발전용 연료전지 PCS에서 LCL필터를 사용하는 경우 공진이 일어날 수 있으므로 적절한 댐핑을 필요로 한다. 수동 댐핑은 댐핑 저항으로 인한 손실이 발생하고 방열장치를 추가해야 하는 단점이 있으므로 대용량에서는 제어에 의한 액티브 댐핑 기술을 적용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다<sup>[13]</sup>. 더욱이 계통의 임피던스는 계통의 상황에 따라 변동할 수 있고 전류제어기 대역폭과 필터값 등 제어 파라미터에 영향을 미칠 수 있으므로 계통의 임피던스를 추정하는 알고리즘에 관한 연구가 필요하다<sup>[14]</sup>. 그 외에도 MBOP 등 비선형 부하, 전원전압의 불평형 및 고조파의 영향이 있는 경우 전원품질 기준에 만족하기 위한 고성능의 제어기법에 관한 연구가 필요하다 하겠다. 더불어 PCS가 대규모로 구성됨에 따라 고장 발생 시 이를 진단하고 모듈 및 인버터 단위의 허용제어 기술이 필요하다.

#### 4. 결론

본고에서는 발전용 연료전지 PCS의 국내의 기술개발 동향과 저전압 출력의 PCS 기술 및 PCS의 대규모화에 요구되는 차세대 기술에 대하여 기술적인 이슈를 중심으로 소개하였다.

특히 수MW~수십MW 이상의 발전용 연료전지 PCS의 구현에는 최적의 아키텍처와 그에 수반되는 대용량 인버터 및 컨버터 토폴로지, PEBB등 모듈화 기술, 신소자에 의한 효율 개선, 공통모드 전압 해석, 부품 및 재료 기술, 고성능 계통연

계 등 기술적으로 해결해야 할 과제가 많다. 그러나 현재까지 국내에는 현대중공업이 6.6kV 5MW급 모터구동용 멀티레벨 인버터를 개발한 것이 최대이며 대용량 전력변환에 대한 개발 경험이 거의 없다. 더욱이 대용량의 발전용 연료전지 PCS에 대한 구체적인 개발 계획 및 인력등 여건이 형성되어 있지 않은 상태이며 업체의 개발비 부담이 커 정부의 지원 없이는 개발이 어렵다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 국내 전력전자기술 수준과 관련업체들의 제작능력이 우수하므로 기술 및 인력양성에 대한 투자가 뒤따른다면 파급효과는 클 것으로 기대된다. 또한 미국의 예와 같이 정부, 연구소, 시스템 업체, 부품업체 및 대학 등 각 기관의 유기적이고 장기적인 계획 및 협력 없이는 대용량 PCS의 목표달기 및 성능을 달성하기 어렵다고 하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] Proceedings of the High Megawatt Converter Workshop, Jan. 24, 2007, NIST Headquarters, Gaithersburg, MD
- [2] Ozpineci, B., Tolbert, L.M., and Adams, D.J.: "Trade study on aggregation of multiple 10-kW solid oxide fuel cell power modules". ORNL/TM-2004/248. UT-Battelle, LLC, Oak Ridge National Laboratory, 2004.
- [3] 백승택, 배병열, 이진희, 신현진, 서인영, "대용량 연료전지용 전력변환기 개발 현황", 전력전자 하계학술대회 논문집, pp. 208-210, 2009. 7.
- [4] 김형수, 황태식, 김왕래, 정우택, 임창진, 김윤현, 김광섭, "3MW 발전용 연료전지 EBOP 시스템 개발", 전력전자 추계학술대회 논문집, pp. 234-236, 2009. 11.
- [5] 박성식, 권준범, 최세완, 조진상, 김태희, "300kW급 발전용 연료 전지 PCS의 부피저감을 위한 DC-DC 컨버터 최적 설계", 전력전자 학술대회 논문집 pp. 329-331, 2008. 6.
- [6] 박영민, 유한승, 이현원, 정명길, 이세현, "고전압 대용량 유도 전동기 구동용 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 개발 및 적용", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 559-561, 2008. 6.
- [7] C. Liu, A. Johnson, J. Lai, "A Novel Three-Phase High-Power Soft-Switched DC/DC Converter for Low-Voltage Fuel Cell Applications", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 41, No. 1, pp. 1691-1697, Nov-Dec, 2005.
- [8] C. Yoon, S. Choi, "Multi-Phase DC-DC converters using a Boost Half Bridge Cell for High Voltage

- and High Power Applications”, IPEMC, pp. 780-786, May 2009, Wuhan, China.
- [9] L. Palma, M. Todorovic and P. Enjeti, “Analysis of Common Mode Voltage in Utility-Interactive Fuel Cell Power Conditioners”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 56, No. 1, pp. 20-27, January 2009.
- [10] T. Ericson, Y. Khersonsky, P. Schugart, and P. Steimer, “PEBB - Power Electronics Building Blocks, from concept to reality”, in Proc. Int. Conference on Power Electronics, Machines and Drives, April 2006, pp. 12-16.
- [11] H. Kim, T. Yu, S. Choi, “Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters in Distributed Generation Systems”, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 23, No. 3, pp. 1342-1347, May 2008.
- [12] C. Jeraputra, E. Aeloiza, P. Enjeti, S. Choi, “An improved anti-islanding algorithm for utility interconnection of multiple distributed fuel cell powered generations”, IEEE APEC, pp. 103-108, Mar 2005, Austin, TX.
- [13] M. Lisserre, A. Dell’Aquila, F. Blaabjerg, “Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier”, IEEE Trans. Power Electron, Vol. 19, pp. 76-86, Jan. 2003.
- [14] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, P. Rodriguez, A. Timbus, F. Blaabjerg, “Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations”, IEEE PESC 2007, pp. 2306 - 2312.

### 〈 필 자 소 개 〉



#### 최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수

석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 교수. 당 학회 국제이사.