

연료전지용 전력변환기 특징

이 학 성 | 효성중공업 연구소장

1. 머리말

에너지 고갈에 대한 대응과 지구환경 보존 문제가 오래 전부터 범세계적인 현안 문제로 대두되면서, 신에너지원 발굴 및 수소에너지 이용에 대한 관심이 높아지고, 수소에너지 이용 기술에서 가장 활발한 연구 및 성과를 거두고 있는 분야 중 하나가 바로 연료전지 기술이다.

연료전지발전시스템은 수소 (다양한 연료들로부터 개질기를 통해 생산)와 산소의 전기화학 반응으로부터 전력(직류)과 열에너지 형태의 출력을 얻게 되는데, 이 중 전력을 부하나 계통에 공급하기 위해서는 사용처에 따라 적합한 크기의 전압과 주파수를 갖는 교류형태로 전력을 변환해야 하며, 발전전력으로써 전력량과 전력품질에 대한 일정한 요건을 만족하는지 여부에 대한 관리 등이 필요하게 된다.

또한, 연료전지와 같은 여러 신재생 에너지 발전시스템들은 종래의 원거리 집중식 발전 방식보다는 수용가에 인접한 분산형 발전방식으로 이용될 가능성이 많다. 분산전원 시스템으로부터 생산된 전력을 계통에 주입할 경우 계통 운전자 측에서 요구할 수 있는 전력품질 수준, 계통에 설치되어 운용중인 타 시

스템들과의 보호협조기능, 연계운전방식 등 계통연계 운전에 대한 제어기능 역시 필요하게 된다.

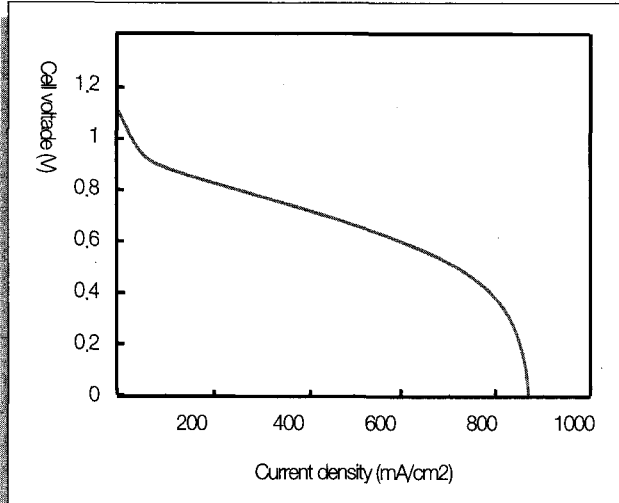
연료전지 발전시스템의 전기적 출력제어 및 운전 에 있어서 필수적인 역할들을 수행하는 것이 PCS(Power Conditioning System: 전력 변환 장치, 이하PCS로 칭함)이며, 연료전지의 출력전압 크기와 용량에 따라 여러 가지 형태의 Topology로 구현하게 된다.

2. 전력 변환 원리 및 제어 방식

가. 연료전지의 출력 특성에 따른 용량 선정

연료전지 스택(Stack)은 전압 및 전류를 발생시키는 단위Cell들의 조합으로 구성되며, 단위 Cell의 전기적 출력은 일반적으로 저전압 대전류의 특성을 가진다. 출력전압은 출력전류 변화에 따라 발생하는 손실들에 의해 연료전지의 이론적인 개방전압(Open circuit voltage) 보다 낮게 나타난다. 연료전지 단위 Cell의 전류밀도 변화에 따른 출력전압 변화곡선의 전형적인 예를 그림1에서 보이고 있다.

> [그림. 1] 연료전지 Cell의 전류-전압 특성 곡선



위 특성 곡선에서 초기 개방전압(Open circuit voltage)에 있어서도 반응 연료의 손실 등에 의해 이론적인 전압보다 낮은 전압이 얻어지고, 활성화 분극 등으로 초기 부분의 급격한 전압 강하가 나타나며, 안정 상태에서의 운전 중에는 전류밀도의 증가에 따라 Ohmic 손실에 의해 완만한 감소를 나타낸다.

연료전지의 PCS는 위와 같은 연료전지의 출력 특성에 따라 용량 설계를 하게 되는데, 일반적으로 PCS의 용량은 연료전지의 최대전압(무부하 전압)과 최대출력전류에 의해 결정되어 연료전지의 용량보다 크게 설계된다.

*** 연료전지의 출력 용량**

- 전압 : 단위 Cell의 적층수로 결정됨.
(단위Cell전압x적층 매수)
- 전류 : 연료전지 Cell의 단면적으로 결정됨.
(단위Cell전류밀도x Cell단면적)
- 연료전지 스택의 용량(전압 x 전류)

*** PCS의 변환부 용량**

- 전압 : 인가되는 최대 전압

(무부하전압=단위Cell OCV x 적층 매수)

- 전류 : 출력 가능한 최대 전류
(연료전지 성능에 따른 과부하전류)
- 변환부 용량(무부하전압 x 과부하전류)

연료전지와 같은 신재생에너지원에 의한 발전 방식에서 중요한 설계목표 중 하나가 시스템 효율이며 이와 관련하여 PCS 전력변환부의 손실에 대해 살펴보면 다음과 같다.

*** PCS내 주요 손실 종류**

- 반도체 소자 손실 : Conduction Loss, Switching Loss
- 통전에 의한 저항손
- 변압기/리액터 등 Magnetic 소자들에서의 Eddy Loss, Hysteresis Loss
- 캐패시터 손실(유전손실, ESR)

전체 시스템의 효율향상을 위해, 가장 큰 부분을 차지하는 반도체소자 손실, 저항손을 비롯한 기타 손실들의 저감에 대한 연구가 필요하며, 이는 기술적인 개선과 소재 및 재료의 발전을 전제로 하고 있다.

나. 변환기의 구성

앞에서 언급한 바와 같이 PCS의 주기능은 연료전지Cell로부터 생성된 직류형태의 전력을 부하가 필요로 하는 적절한 크기의 전압과 주파수를 가진 교류전력 형태로 변환하는 것이다. 이러한 기능을 구현하기 위해 일반적으로 PCS내부에 2개의 구성품이 기능적으로 직렬 (Cascading)방식으로 연결되어있다.

한 개는 연료전지 Stack으로부터 생성된 낮은 직류전압을 보다 높은 직류전압으로 변환하는

Converter이며, 다른 하나는 변환된 직류전압을 적절한 형태의 교류전원으로 변환하는 Inverter이다. 이러한 전력변환 과정에서 손실이 발생하게 되며 향후 고효율 변환기 설계와 관련된 다양한 기술들이 급속한 발전을 이룰 것으로 예상하고 있다.

PCS설계에 있어서 위와 같은 연료전지의 출력 특성 이외에도, 운송용(자동차), 휴대용, 정치형(가정용, 분산발전용) 등 연료전지 시스템의 용도에 따른 고려도 함께 이루어져야 할 것이다.

현재 보편적으로 적용되고 있는 대표적인 Converter Topology는 전압 변환비에 따라 Full-Bridge, Half-Bridge 및 Boost Converter 등이 있으며, 안전성을 고려하여 절연형, 비절연형을 결정하여야 하고, 효율 및 제어성 등을 고려하여 전압형 또는 전류형을 결정하여야 한다. 이외에도 고려해야 할 주요 변수로 전류 용량, 주변 온도 및 사용 조건, 경제적인 문제 등을 함께 검토 대상에 두어 최적의 설계 방안을 수립하여야 한다.

그림2는 대표적인 비절연형 Boost Converter를 보여 주고 있으며, 그림3은 절연형 Full-Bridge의 기본 회로이다.

> [그림 2] 비절연형 DC/DC converter 구조

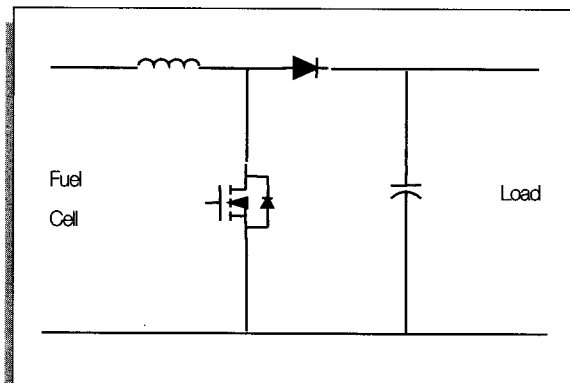
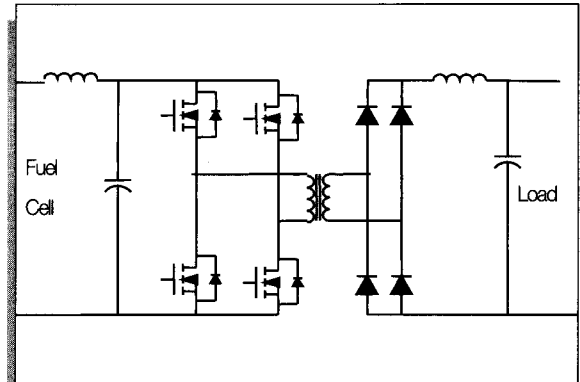


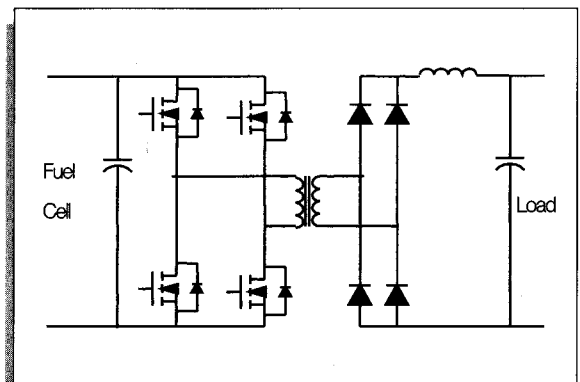
그림3의 절연형 Full-Bridge 회로는 다시 변환기 구조 및 제어 방식에 따라 그림4와 그림5에서 보여

> [그림 3] 절연형 DC/DC Converter구조

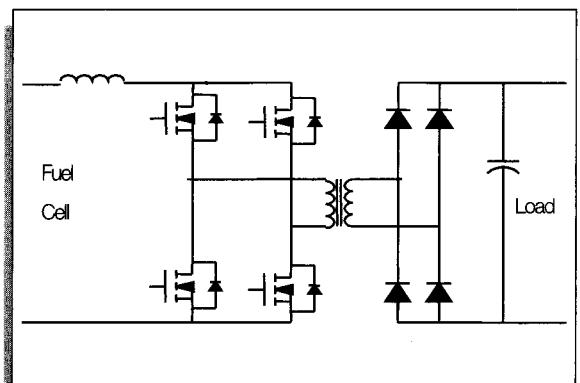


지는 전압형과 전류형 DC/DC 변환기로 구분할 수 있으며, 이외에도 많은 회로가 제안되어 연구되고 있다.

> [그림 4] 전압형 DC/DC Converter구조



> [그림 5] 전류형 DC/DC/AC Converter구조

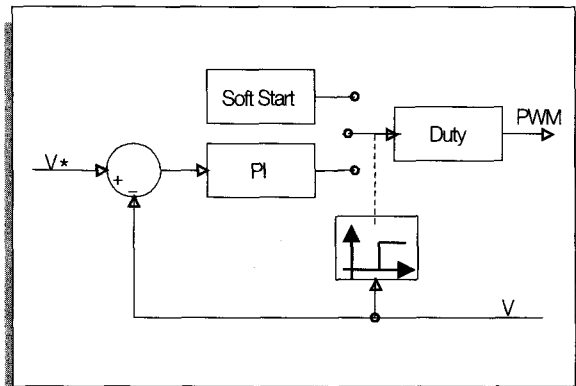


다. 제어 방식

연료전지 Stack으로부터 직류전압을 입력 받게 될 DC/DC Converter 제어 방식은, 직류전압의 크기를 변환하는 것이 주 기능으로 원하는 출력전압의 크기 (지령치)와 Converter 출력단의 센싱된 전압으로부터 스위칭 소자의 ON 시간을 얻게 되고 PI제어기를 통해 출력전압을 제어하는 방식을 한 예로 들 수 있으며, 그 제어 블록도를 그림 6에 나타내었다.

초기 기동 시 DC 출력단에 과도한 충전 전류의 발생을 방지하기 위해 소프트스타터를 적용하고, PI 제어기의 제어 이득(Gain)을 적절히 조정하여, 연료전지 Stack으로부터 생성된 DC 전압의 변동에 강인한 전압 제어기를 구성할 수 있다.

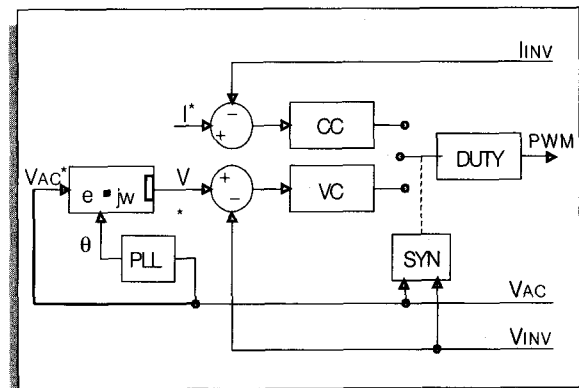
> [그림. 6] DC/DC converter 전압 제어 블록도



위와 같이 DC/DC 변환기를 통해 제어된 DC전압을 AC출력으로 변환하게 될 DC/AC 변환기는 DC/DC 변환기가 정상 상태에 도달한 후 운전하게 된다. 연료전지 등 분산전원을 계통에 연계하여 운전하는 중요한 기능을 담당하는 DC/AC 변환기는 연 계할 계통의 위상 정보를 검출하여 변환기를 계통에 투입할 연계 시점을 결정하게 되고, 변환기의 출력 전압, 전류를 검출하여 각각 전압 지령치와 전류 지령치에 추종시키기 위한 제어기를 구성하게 된다. 그

제어 블록도의 예를 다음에 나타내었다.

> [그림. 7] DC/AC Inverter 제어 블록도



위 그림에서 PLL부는 계통의 위상 정보를 검출하는 부분이며, SYN부는 계통과 동기화 시키는 부분, CC와 VC 는 각각 전류 제어기와 전압 제어기를 나타내고 있다.

라. 운전 방식

앞서 말했듯이, 기존의 집중식 발전방식이 아닌 연료전지 발전시스템과 같은 수용가에 인접한 분산형 발전방식에서 전원의 운전 방식을 PCS에서 제어하게 되는데, 부하에 기존계통과 연결 없이 전력을 공급하게 되는 독립운전 방식과 계통에 연계하여 계통과 병렬운전 하게 되는 계통연계 운전 방식이 있을 수 있다.

독립운전은 섬, 산간지역 등 고립된 지역의 전원이거나 비상 발전용 전원에 적용되고, 이 경우 출력전압 및 주파수가 제어대상이 되며, 부하 변동에 대한 빠른 응답성, 출력 전압의 THD(Total Harmonic Distortion, 왜형률) 및 주파수 관리 등이 요구된다.

이에 비해 계통연계 운전은 주거용을 포함한 분산전원에 적용될 수 있으며, 제어 대상은 전류 제어 또는 유효, 무효 전력 제어이고, 출력 전류의 THD등 계

통에 주입되는 전력의 전력품질 보상 기능, 부하 추종성, 고립운전 방지 등 계통투입 또는 분리시의 안정성에 관한 계통운전 적합성 등이 요구된다.

3. 개발 현황

PCS는 연료전지 발전시스템의 주요 BOP (Balance of Plant) 중 하나로서 주로 연료전지 시스템 개발과제의 일부로 진행되거나, 연료전지 업체들의 필요에 의해 진행되는 경우가 많으며, 시장 형성시점과 규모도 연료전지의 기술성숙도 및 시장규모에 따를 것으로 기대된다.

국의 연료전지 산업과 관련해서, Ballard Power System, Plug Power, Hydrogenics, UTC Fuel Cells 등의 업체들이 PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) 시스템의 개발에, 그리고 FCE, MTU, IHI 등의 업체들이 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell) 시스템의 개발과 그밖에 많은 업체들이 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell), DMFC(Direct Methanol Fuel Cell) 등 여러 형태

의 연료전지 시스템들을 개발, 실증시험 중에 있다.

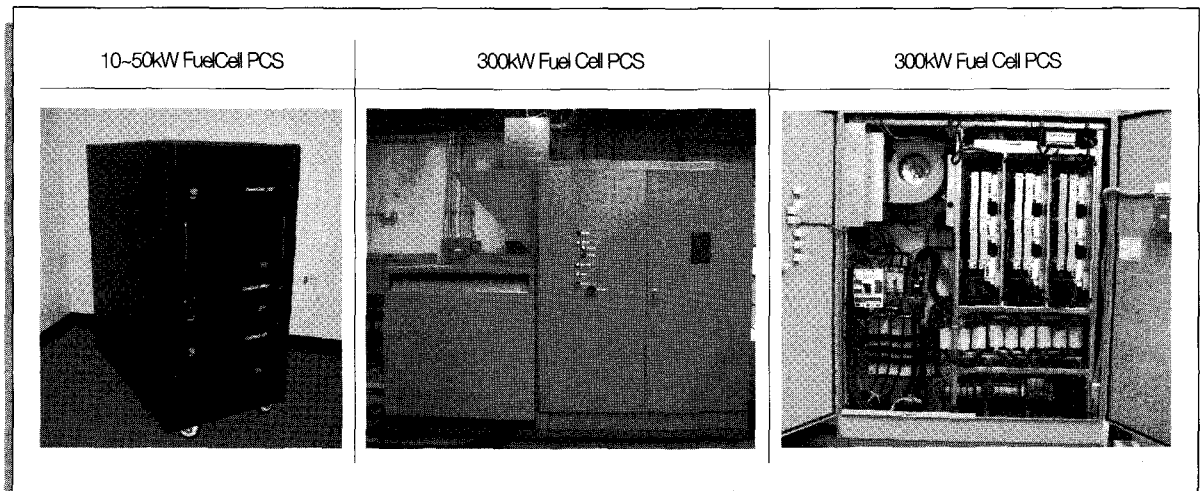
이미 많은 시스템들을 설치, 실증 운전 중에 있는 이들 연료전지 업체들은 상용화 제품 출시를 위하여 PCS등 BOP 구성품들에 대해서도 관련 업체들과 성능 향상, 가격 절감에서 협력 중에 있으며, 미국 S社 등 여러 업체들이 연료전지용 PCS를 제작, 공급하고 있고, 인버터, 컨버터의 계통 운전과 관련한 규격들에 적합한 제품 개발에 노력중인 것으로 알려져 있다. 그림 8은 미국 S사의 연료전지 제품을 보여주고 있다.

국내에서는 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원, 한전전력연구원 등의 연구기관들이 국가 주도형 사업을 통해 연료전지 관련 기술 개발 및 상용화 연구에 노력 중이며, 국가적으로는 2012년까지 250~1,000kW급 분산발전용 연료전지 시스템 300기, 10~50kW급 건물용 2,000기, 3kW급 이하의 가정용 10,000기 등의 보급 계획을 가지고 있고,

이에 연료전지 업체를 비롯한 다수의 관련 기업들도 제품 개발 및 실증 연구에 참여하고 있다.

이러한 연료전지 시스템 개발 진행에 맞추어 PCS도 가정용 시스템을 위한 수kW급에서 대용량 분산

> [그림. 8] 미국 S社의 Fuel Cell Power Conditioning System



발전 시스템을 위한 수십kW~100kW급까지 개발 실적이 있으며, 연료전지 시스템에 적합한 성능으로 개선 및 내구성 향상을 위해 연구 중에 있다. 그림 9는 (주) 효성에서 개발중인 연료전지용 PCS제품의 한 실례를 보여주고 있다.

4. 맺음말

여러 발전방식에서의 전원 출력에 대한 적절한 변환 및 전력품질 관리와 더불어, 발전 시스템의 운전과 관련된 여러 제어 및 관리 기능을 담당하는 PCS(Power conditioning system)는 연료전지 시스템등 신에너지 전원에서 주요한 구성품으로 전원에 대한 연구와 더불어 개발이 진행 중이다.

태양광, 풍력, 연료전지 등 신재생에너지 발전 방식의 기술 향상 및 보급 확대와 더불어 함께 발전할 것으로 기대되며, 기존 전력 변환에 기초한 기술을 기반으로 하여, 전원의 출력 특성에 최적한 구성, 고효율화, 저가격화, 소형화, 타 전력 시스템과의 연동 등에 초점을 맞춰 개발이 진행될 것으로 예상된다.

다양한 발전 방식의 출력특성에 적합하고 높은 효율을 얻기 위한 전력 변환부의 Topology 개발과 고효율 전력전자 소자들의 개발이 이루어질 것이고, 신재생에너지원의 보급 확대는 양산 모델의 개발로 가격 저감화를 달성할 것이며, 용도 및 설치 목적에 맞는 소형화 설계에 대한 개발 또한 이루어질 것이다.

나아가서, 태양광, 풍력, 연료전지 등 여러 전원 시스템들과 축전지, 플라이휠 등 에너지 저장 장치 등의 상호 연동 운전에 대한 기능까지 확대될 것으로 기대되어, 전력 변환 기술 및 분산전원 운전 제어에 관한 기술은 향후 분산전원 시스템에서의 주요한 부분을 담당할 것으로 본다.

따라서 국가관련기관의 지원정책 방향도 연료전지용 PCS기술개발을 단순한 전력전자 기술의 개발 측면이 아닌 새로운 에너지 시대의 중심국가 위상을 확보하기 위한 전략적 기술로 간주하여 독자적인 우리의 기술과 제품이 구축될 수 있도록 다양한 기술개발 및 보급과 관련한 다양한 지원정책이 발굴되어야 할 것이다.

> [그림 9] 수효성의 Fuel Cell Power Conditioning System

