

해외기사 소개

연료 전지에 의한 전력 생산

새로운 이상적 전력 생산에 관한 사안 및 도전과제들

MARIE-CÉCILE PÉRA, DENIS CANDUSSO, DANIEL HISSEL,
and JEAN MARIE KAUFFMANN

본 글은 IEEE Industrial Electronics Magazine 2007년 가을호에 게재된 MARIE-CECILE PERA 외 3인 저자의 "Power Generation by Fuel Cells"를 번역하여 재편집한 내용입니다.

김 태 훈, 이 종 학
(숭실대 전기공학부 석사과정)

1. 서론

지속적인 원유의 공급 감소와 점진적의 유가의 상승에 따라, 지난 세기 동안의 우리의 석유 기반 경제에 대한 대안의 필요성이 증대되었다. 이 문제는 재생 가능 에너지원에 기반한 깨끗하고 효율적인 전원공급 장치를 이용하여 다루어야 한다. 여타의 기술적 대체물들 중, 연료 전지(연료전지) 전원은 자동차 산업과 고정식 파워 플랜트 모두에 점차 흥미롭고도 전망있는 해법이 되고 있다. 그러나 이 분야에서 경쟁력 있는 산업용 제품들이 개발되려면 먼저 많은 기술적 장애물들이 극복되어야 한다. 이 글에서는 이러한 도전 과제들을 살펴보고 다른 기술 분야들을 소개한다.

2. 배경

기존의 다섯 가지 연료전지 기술들에서, 각 유형은 그 특징에 잘 부합하는 시장 영역에 중점을 두고 있는 하나의 시스템으로 구성될 수 있다. 짧은 시동시간으로 인해 저온 연료전지(알카라인 연료전지, 고분자 전해질형 연료전지)는 휴대

용, 주거용 전력 및 운송 수단에서의 활용이 고려되고 있다. 고온 연료전지(인산형 연료전지, 용융 탄산염 연료전지, 고체 산화물 연료전지)는 이따금 고정식 전력 생산용으로 고려된다. 그러나 SOFC에는 고체 전해질이 사용되므로 일부 자동차 제조 및 공급 회사들은 운송 수단에서의 활용을 생각하고 있기도 하다.

만일 연료전지 스택들이 본질적으로 부하 변화에 빠르게 반응할 수 있다면, 스택의 BOP(수소 공급, 공기 압축기, 가스 가습, 냉각 회로)는 그 보다 몇 배 빠른 시간 안에 응답하게 된다. 이러한 분명한 모순 상태는 시스템 전체의 신뢰도와 성능을 감소시킨다. 그림 1은 연료전지 시스템의 일반적인 구조이다.

그림 1은 연료전지시스템의 일반적인 도식을 나타낸다. 그림에서 보듯이 연료전지 스택은 많은 부속물들의 작동을 필요로 하다. 우선 연료가 생산 및/또는 저장되어야 한다. 그 후에, 연료전지 스택에 들어가기 전 최종적으로 처리(주로 압력, 가습화, 유량 조절의 측면에서)된다. 산화제 또한 같은 방식으로 처리되어야 한다. 연료와 산화제 가스 모두에서, 연료전지 스택에 의해 생성된 물은 배출가스로부터 제거되고 흡

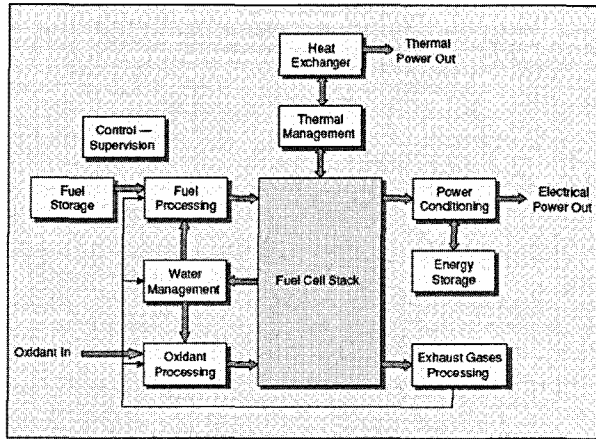


그림 1 연료전지 시스템의 구조

입 가스의 액화 과정에 재사용될 수 있다.

그 후에는, 전기화학적 반응이 발열 반응이고 연료전지 스택은 주어진 온도 범위에서 작동해야 하므로, 열의 관리가 필수적이다. 게다가, 가스 공급과 스택의 열 관리는 가스의 액화 수준 제어와 불가분의 관계에 있기도 하다. 마지막으로 시스템 전체의 (에너지 저장 장치와 연계하여 혹은 연계되지 않는) 전력 조절 및 전반적 제어는 중요한 기타 하위 시스템들이다.

물론, 전체 연료전지 시스템을 고려하면, 에너지 저장 및 오염물 방출량은 이 연료전지 시스템 전체가 제대로 설계되었는지, 그에 따라 이 시스템에 전체적인 최적화가 수행되어 왔는지에 크게 좌우된다. 따라서, 효율적이고 경쟁력과 신뢰성을 갖춘 연료전지 발전기들이 실제로 시장에서 등장하기 위해서는 수많은 기술적 난제들이 해결되어야만 한다.

3. 일반적인 기술적 도전과제들

이러한 서로 다른 기술적 도전과제들 가운데, 일부는 주로 전기화학, 기계, 혹은 열역학 연구자들과 관련이 있다. 분명, 첫 번째 연구 영역은 연료전지스택 자체에 대한 전기화학 및 재료공학에 관한 것이다. 전력 밀도는 증가해야 하는 반면 귀금속 촉매제의 양은 감소해야 한다. 온도 및 물 관리에 관한 문제들 또한 최상위의 중요도를 가지고 있다. 저온 연료전지 스택의 경우에는 (물 관리의 문제를 줄이기 위해) 온도가 증가해야 하고, 고온 연료전지스택의 경우에는 (재료에 대한 열 스트레스를 줄이고 구동 시간을 단축시키기 위해) 온도가 감소해야 한다.

두 번째로 큰 연구 분야에서는 수소의 생성, 전달 또는 저장을 다룬다. 분명 수소는 산업적으로 생산되어야 하는 하나의 에너지 매개체이지, 일차적 동력원은 아니다. 오늘날, 수소는

석유나 천연 가스의 정제 (이 경우 화석연료가 필요하며 탄소가 배출된다), 또는 전기 분해(이 경우 전기가 공급되어야 한다)에 의해 생산할 수 있다. 그 정제 방식은 시간의 제한을 받는 자원에 기반하고 있으며, 수소의 순도 문제에도 어려움이 있다. 오늘날의 전기 분해는 여전히 크게 효율적이지 않아서 막대한 양의 전력을 필요로 한다. 이 글의 다음 부분에서는 수소가 연료전지 스택에의 투입 시에 바로 사용이 가능하다는 점이 제시된다.

4. 전기 공학에서의 기술적 도전과제들

전기 공학에서의 도전과제들은 시스템 부속물들에 관한 것이다. 부속물들은 열평형(온도 조절 또는 제한), 출력 조절 (저장 장치 및 동력 변환기들), 시스템 감시를 확인하는 반응물들을 스택에 공급하는데 필요하다. 네 가지 주요 연구 사항들에 대해 고려할 필요가 있다.

- 첫째는 연료전지 발전기의 순수 출력이다. 전기화학 변환의 전기적 효율성은 50%에서 60%로 꽤 높지만, 그 자체의 부속물들에 전력을 공급해야 한다. 전체적 효율성을 가능한 높게 유지하기 위해서는, 부속물에서의 소모가 최소화되어야 하며(특히 모터 압축기나 송풍기) 이들의 효율성이 최적화 되어야 한다(동력 변환기들).
- 둘째로, 부속물들의 시간 응답은 연료전지 발전기의 동력을 좌우한다. 실제로 전기화학적 응답 시간은 msec 단위 미만이며, 이는 유량 제어기와 밸브(sec 또는 msec 단위), 공기 압축기(sec 단위), 가습 시스템(min 단위) 같은 부속 장치들보다 훨씬 빠른 것이다.
- 세 번째로, 전력의 버퍼는 피할 수 없다. 일반적으로 이 시스템은 배터리의 도움을 받지만, 울트라커패시터와 플라이휠들 역시 이용된다. 최소한 시스템은 구동 및 긴급 폐쇄 동안 감시 시스템에 전력을 공급해야 하지만, 스택 전력과 균형을 맞추도록 그 규모를 조정할 수도 있다. 에너지 저장 장치(ESD)의 크기는 필요한 하이브리드용에 따른다. 연료전지는 비가역적 자원이므로, 내장 장치에서의 회생 제동 중에 에너지 회복을 가능케 하여 최대 동력 수요를 공급하고 일시적 부하 변화에 대한 시간 응답을 개선한다.
- 마지막으로, 제어기는 상세히 다루어야 한다. 고려할 것은 부속물들의 지역적 제어(흐름 제어기의 제어 루프, 압축기 등)와 발전기의 전역적 감시, 이 두 가지 수준이다. 마지막 것은 정상 모드와 실패 모드에서의 동작 상태를 담당한다. 연료와 산화제의 공급 방식에는 특별한 주의가 필요하다. 연료 및 산화제를 가능한 많이 아껴야 하기 때문에, 이는 중점을 두고 세심하게 균형을 맞추어야 할

사항이다. 사실상, 이들의 처리 및 저장에는 에너지가 소모되므로, 스택에 과도한 공급이 이루어져서는 안 된다. 그러나 스택에 공급이 부족한 상태 역시 피해야 한다. 이는 연료에 가역적, 심지어는 비가역적인 손상까지도 일으킬 수 있기 때문이다. 더욱이, 생성된 물을 증발시키기 위해서는 최소한의 유량을 공급해야만 한다(특히, 액화 상태의 물이 있을 수 있는 저온 연료전지의 경우). 여기서의 감시는 스택의 안전한 작동도 보장해야 한다. 이상적으로는 단일전지의 전압, 스택 온도, 액체 온도, 압력, 유량, 스택 전류를 측정해야 하지만, 이는 허용치를 넘어서는 양의 데이터를 얻게 되므로 관련된 변수들이 선택되어야 한다. 마지막으로 중요한 것은, 다른 자원들 사이의 에너지 흐름을 관리해야 한다는 것이다.

4.1 모델링의 도전과제들

모델링 접근법은 연료전지의 물리적 성질을 보다 깊게 이해하거나, 그 성능 특성을 양호한 수치 자료로 얻는 데에 매우 유용하다. 현재 많은 PEM 연료전지 모델들이 문헌으로 보고되어 있다. 어떤 모델들은 구매를 통해 이용 가능한 것도 있다. 그렇지만, 이들 중 어떤 것도 총체적인 다중물리 문제를 다룰 수는 없다. 게다가, 하나의 모델은 대개 하나의 특정 목적을 가지고 개발된다. 따라서 이는 어떤 특별한 가정들을 사용하여 설계되고 몇 가지의 적합한 접근방식들을 고려하여 제작된다. 모델을 고려하면, 현상들에 관련된 다양한 크기와 시간 계수들은 계산의 편의를 위해 여전히 제한된 범위 내에서 유지되어야 한다.

4.2 연료전지 모델의 검토

모델들에 따라 관심 영역은 크게 달라질 수 있다. 이 영역은 대개 연구 대상 시스템의 범위에 의해 정의된다. 하나의 모델은 시스템 전체에 초점을 둘 수 있다. 아니면 연료전지 스택만을 다룰 수도 있고, 또는 단일전지나 단일전지의 구성요소(예를 들면, MEA 멤브레인, 분배 가스판)만을 다룰 수도 있다. 더 작은 범위에서는, 재료 수준의 인터페이스들(예를 들면, 활동층)을 다룰 수도 있다. 개발된 모델은 전기, 열 혹은 유체 특성 등과 같은, 연료전지의 한 특정 측면을 살펴볼 수 있다. 해당 분야 과학자들은 종종 자신들에게 익숙한 도구들을 사용하려는 경향이 있다. 이들은 연료전지와 관련된 문제를 해결하는 데 있어 자신들의 방식을 적용하는 것을 선호한다. 예를 들어, 전기공학 연구자들은 연료전지 시스템에서 반응 가스들의 역학적 유체 반응을 모델링하는 데 전기 RC 회로를 사용할 것이다.

다른 유형의 모델링 방식들 또한 생각해 볼 수 있다. 이론적 방식 또는 반(半)실증적 방식이 그것이다. 이론적 혹은 기계론적 모델들은 전기화학, 열역학, 유체 역학적 관계에 기반을

두고 있다. 이는 전지 전압에 관한 버틀러-볼머(Butler-Volmer) 방정식 또는 기체상 전달에 관한 스테판-맥스웰(Stefan-Maxwell) 방정식 같은 현상논리 방정식 덕분에 설명이 가능하다. 이런 종류의 모델은 훌륭한 정확도 및 예측 능력의 확보를 위해 때때로 매우 구체적이고 복잡하기도 하다. 흔히 볼 수 있는 문제점은, 높은 수치의 변수들을 측정해야 하기 때문에 개발 기간이 문제가 되거나 검증에 어려움이 있다는 것이다. 이와 달리, 반-실증적 모델들은 몇 가지 주어진 물리적 조건에서 수집된 경험적 자료에 기반을 둔다. 이들은 분명 엔지니어들에게 매우 실용적인 도구들을 제공할 수 있다. 예를 들면, 이들은 일반적인 전압-전류 관계를 제공하며, 이것은 연료전지에 의해 생성된 에너지를 어떻게 관리하고 어떻게 전력망에 공급할 수 있을지를 연구하는데 사용될 수 있다. 어떤 연구자들은 제어 환경 및 온라인 진단에 매우 편리한 몇몇 블랙박스 모델들을 사용하기도 한다. 사실 한편으로 이러한 모델들은, 정확하고 빠른, 심지어 실시간의 계산까지도 가능케 하지만, 다른 한편으로는, 반-실증적인 모델들과 블랙박스 모델들은 하나의 특정한 연료전지로 구체화되는 경향이 있으며, 이것은 분명 예측 도구에 있어서는 한계일 것이다.

모든 연료전지모델들은 또한 두 가지 주요 유형인, 지속상태 모델 또는 일시 모델로 분류할 수 있다. 지속상태 모델은 구성요소들의 크기를 측정하고 기술적인 선택을 하는 데에 매우 유용하다. 일시적 모델들은 구동 절차나 부하 변화에 대한 반응 시간을 연구하는 데 사용된다.

공간 차원(0에서 3)은 모델을 정의/선택하는 또 다른 기준이다. 연료전지를 모델링하는 가장 기본적인 방식은 0차원 접근방식(예를 들면, 일반적인 편광 곡선)으로 구성된다. 계산학적 유체 역학(CFD) 모델들은 3차원(3-D) 모델들이다. 예를 들면, 스택 공급자들은 연료전지 구성요소들의 기하학적 설계와 성능 최적화를 목적으로 이를 사용할 수 있다.

4.3 연료전지 등가 회로

서로 다른 유형의 연료전지 모델들 중에, 등가 회로 접근법은 전기공학적 관련사항들을 다루며 시스템 통합 문제에 적합하다. 이것은 연료전지 구조에 직접 기반한다. 예를 들어 PE 연료전지 스택의 단일 전지를 생각해 보면, 이것은 양성자-전도성 고분자막(전해질) 주변에 포개어진 두 개의 전극으로 구성된다. 전지는 또한 분리판과 가스 확산층 또는 전극 영역 상의 반응 가스 흐름(일반적으로 수소나 정제 혼합물 및 공기)의 균질 분포를 보장해야 하는 가스 방지층으로 구성된다. 양극 측에서는, 수소가 양극 촉매체(백금 또는 백금 합금)에 분산되며, 여기서 양성자와 전자로 분해된다(그림 2 참조). 양성자들은 막을 통해 음극 쪽으로 전도되고, 전자들은 외부 전력 회로를 거친다. 음극에서는 산소가 전자 및 양성자

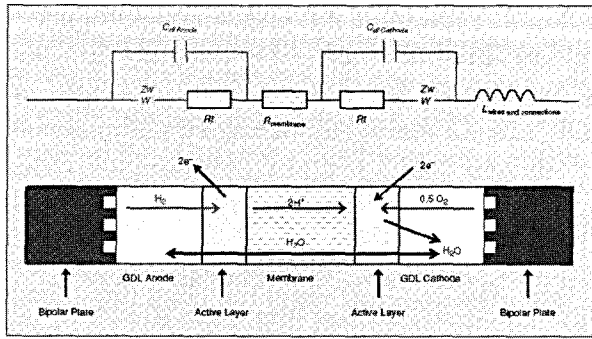
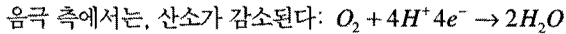
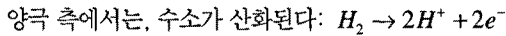


그림 2 연료전지 임피던스의 모델링을 위한 가능한 전기 회로의 예: 다양한 스택 구성요소들과 화학 반응들

와 반응하여 물을 형성한다. 따라서 두 반(半)반응은 다음과 같이 표현될 수 있다.



그러한 전지는 전기화학적 임피던스 계산에 기초하여 역학적 작동 모드로 모델링 될 수 있다. 활동층으로의 반응 물질 공급과 관련된 제한이 없는 경우 각 산화 환원 반응은 병렬 RC 등가 전기 회로와 연계된다(즉, 물질 전송 제한이 없음). 전극에 농도 변화가 발생하면, 산화 환원 반응이 $Z_f C$ 병렬 조합으로 표현될 수 있다. 패러데이 임피던스(Z_f)는 직렬의 두 임피던스로 구성된다. 하나의 전자 및 이온 전하는 음극에서 감소된 쪽 또는 양극에서 산화된 쪽에 대한 저항(R_i)과 하나의 분산 임피던스(Z_w)를 전달한다. 전극의 총 임피던스는 이중층 캐패시턴스(C_{dl})와 병렬로 놓인 Z_f 패러데이 임피던스와 일치한다. 그러면 이것은 가스 방지층에서의 농도 변화의 역학과 계면 캐패시턴스에 저장된 전하를 설명해주게 된다. 마지막으로, 연료전지의 전체 임피던스는 막 저항과 직렬로 위치한 두 개의 전극 임피던스로 구성된다(그림 2).

그림 2에 나타난 등가 전기 회로의 다른 변수들을 평가하기 위해서는, 실제 실험 시스템에 대한 전기화학적 임피던스 분광분석(EIS)이 최상의 선택인 경우가 많다. EIS는 이미 전기화학자들이 전기화학적 장치의 동작을 더욱 잘 이해하기 위해 흔히 사용하고 있다. EIS는 역학적 조건들 속에서 스택의 특성화를 가능케 하는 강력한 기법일 뿐 아니라 연료전지 정적 성질(예를 들어, 가스 수화 기능으로서 막 저항의 결정)에 대한 정보들을 제공하기도 한다. 이 방식에서, 정적 작동 지점과 그 둘레의 작은 사인파형 교류 부분을 고려한 역학적 연료전지 성질 연구가 수행된다. 측정된 전류 및 교류 전압 요소로부터 연료전지 임피던스의 실수부와 허수부가 계산된다.

그림 3은 저전력 연료전지 스택에서 측정된 나이퀴스트 다

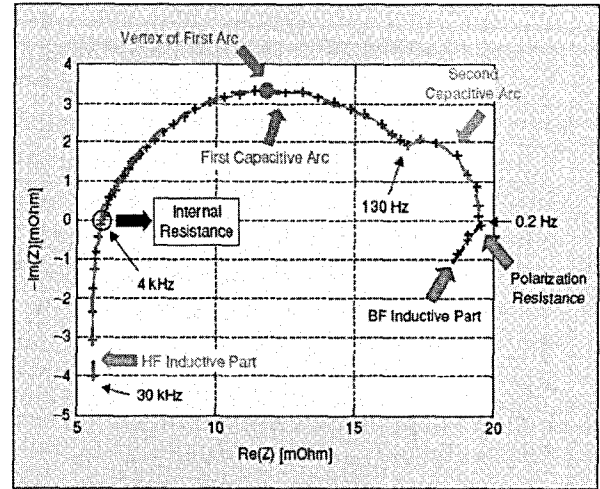


그림 3 100W 3전지 스택에 대한 임피던스 스펙트럼의 예

이어그램(임피던스 그래프)을 나타낸다. 임피던스 스펙트럼은 여러 부분으로 구성되어 있음에 유의하라.

- 유도성 회로는 고주파(4-30kHz)에서 존재: 이 그래프는 테스트가 완료된 연료전지 스택의 모든 구성요소들(예를 들면, 연결부 등의)로 인한 의사-인덕턴스부와 관련될 수 있다.
- 첫 번째 캐패시터성 원호(주파수 범위 130Hz에서 4kHz에 대하여)로, 주로 전하(전자와 양성자) 이동 현상에 부합: 원호가 클수록 전하의 이동이 어렵다.
- 두 번째 캐패시터성 원호(주파수 범위 0.2-130Hz)로, 대량 이동(기체상의 이온들)과 관련: 원호(실수 축에서 측정)가 크다는 것은 연료전지 판 채널들로부터 전극들까지의 가스의 분산이 어렵다는 뜻이다. 예를 들면, 이것은 반응 가스의 공급이 부족하거나 너무 많은 양의 물이 가스 분산층에 들어갔기 때문(범람 현상)일 수도 있다.
- 확실히 설명할 수 없는 또 다른 유도성 회로(주파수 0.2Hz 미만): 어떤 저지들은 이 저주파 유도성 회로를 전기화학-화학-전기화학 산화-환원 반응 메커니즘에서 중간 족들의 이완 현상과 관련짓는다. 이 유도부는 또한 이러한 매우 낮은 주파수들에서 한 스택에 대한 안정된 작동을 확보하는 데 생기는 어려움과 주로 관련이 있다. 예를 들어, 스택 전압에 대해 연료전지 온도 제어가 미치는 영향을 고려할 수도 있다. 그래서 이는 EIS가 요구하는 정적 상태에 완전하게 부합하지 않으므로 신중하게 고려해야 한다.

제시된 등가 회로(그림 2)의 요소들에 대한 규명은, 그것이 결코 간단하지는 않더라도, 실험 스펙트럼들로부터 수행될

수 있다. 우선, 분산 임피던스 Z_w 는 비선형이다. 또한, 모든 성분들은 해당 작동 지점(전류, 대응 압력, 이용 요소값, 온도의 dc 값)에 따른다. 규명은 응용 수치해석을 필요로 하며, 이는 제시된 참고문헌들에서 보다 폭넓게 제시되어 있다.

그럼에도, 어떤 정보들은 측정을 통해 쉽게 얻을 수 있다. 연료전지스택의 내부 저항은 나이퀴스트 다이어그램이 고주파에서의 실수 축과 교차하는 지점으로부터 얻게 된다. 내부 저항이 막의 물 함량에 크게 의존하며 그 값은 가스 가습 과정과 관련이 있다는 사실은 잘 알려져 있다. 막의 가습 부족으로 인한 내부 저항 증가는 분명 연료전지 성능의 악화로 이어진다. 또 다른 중요점은 분극 저항으로, 이는 저주파에서 측정 가능하며 연료전지 임피던스의 예상 부분이 0과 같아지는 스펙트럼 그림에서의 그 지점에서 측정된다. 분극 저항이 다른 연료전지 물리적 내부 현상과 연계된 다양한 저항들(내부 저항, 전달 저항 등)의 총합과 일치함에 따라, 분극 저항이 높아지면서 주어진 전류에 대한 스택 전압이 낮아지고 성능이 떨어진다.

그러한 조사 결과는 연료전지 스택이 복잡한 전기 공급원임을 보여준다. I-V 곡선은 분명 비선형이다. 그 임피던스는 공급된 전류에 크게 의존하지만 또한 가스 공급 상태에도 달려 있다. 이는 대개 1kHz에서 0.1Hz까지의 넓은 주파수 범위에서 캐패시터성 특성을 보인다.

4.4 전력 변환기의 도전과제들

연료전지의 가장 눈에 띄는 특성 중 하나는 그것이 고전류 및 저전압 상태에서 전력을 생산한다는 것이다. 전지 전압은 공칭점에서 약 0.7V이며, 총 출력전압은 스택의 전지 전압의 합계이다. 하나의 스택 속에 들어가는 전지의 적당한 수는, 전지들 사이에 충분히 균질적인 가스히 분포되고 이들을 통합하기 쉬운 부피히 되도록, 적정량을 초과해서는 안 된다. 가장 최신의 공칭 전류 밀도는 0.5A/cm²로, 최고점인 1A/cm²로 쉽게 상승할 수 있다. 일반적으로 활성면들은 몇 백 cm² 넓이를 가지므로, 중간 전력 설비들이라 할지라도 수 백 암페어를 관리해야만 한다. 더욱이, 스택에 의해 전달되는 전압은 부하가 변하면 광범위하게 변한다. 일반적으로, 전지 전압은 1V에서 400mV까지 변화하므로, 60%의 전압변화를 관리해야만 한다. 그러면 스위칭 장치에 높은 스트레스가 부과 될 수 있다.

전력 변환기의 선택은 응용 설비나 발전기의 구조에 따라 크게 다르다. 고정형 설비에서는, 두 가지 사용 형태를 접할 수 있다. 연료전지시스템은 백업 전력 장치에 전력을 공급하거나 주 전력원이 될 수도 있다.

후자의 경우에는 땅에 연결되거나 분리될 수 있다. 내장형 설비에서는 두 가지의 기능이 수행될 수 있는데, 바로 추진용 에너지 공급 또는 온보드 보조 전원 유닛(APU)이다. 이

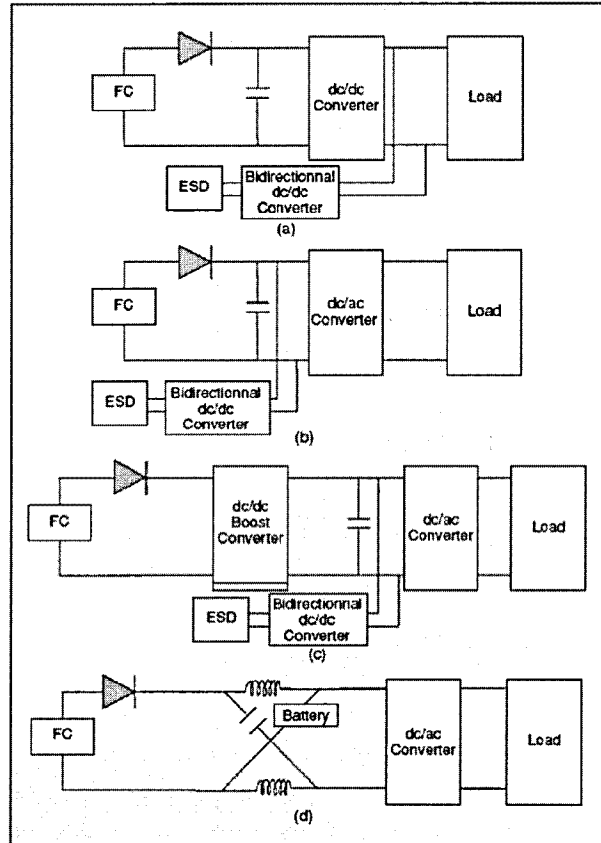


그림 4 서로 다른 전력 전환 구조들

처럼, 해당 구조 그리고 효율성, 복잡성, 소형성, 무게, 비용 같은 서로 다른 기준에 따라 서로 다른 형태들을 발견할 수 있다.

그림 4에는 해법들이 정리되어 있다. 스택과 직렬로 연결된 한 개의 다이오드는 연료전지에 손상을 입힐 수 있는 역전류를 피하기 위한 용도이다. 두 개의 단순한 구조가 나타나 있다. 그것은 dc 버스를 공급하는 dc-dc 컨버터(그림 4(a)) 또는 대체 전력이 필요할 때의 전통적인 펄스-폭 변조(PWM) 인버터이다. 이 마지막 경우에서, 출력 ac전압은 제한될 수 있는 연료전지 전압 미만으로 억제된다. 이제 dc-dc 부스트 컨버터가 첫 번째 단계로 추가된다(그림 4(c)). 많은 dc-dc 컨버터 위상들이 존재한다. 하프-브릿지형 푸시/풀 컨버터나 변압기 분리장치를 가진 풀-브릿지형 ac 컨버터는 조절이 간단하다. 주요 단점은 변압기의 무게와 부피가 늘어난다는 점이다. 이는 평면 변압기 기술을 사용하여 극복할 수 있다. 공진 dc-dc 컨버터는 스위칭 손실을 줄이고 효율성을 증가시켜 왔다. 이들은 아쉽게도 구성 요소들의 수가 매우 많고 제어 규칙이 더 까다롭다. 양방향 dc-dc 컨버터는 ESD를 연결하는데 늘 필요하기도 하다. Z-소스 인버터(그림 4(d))는 필요

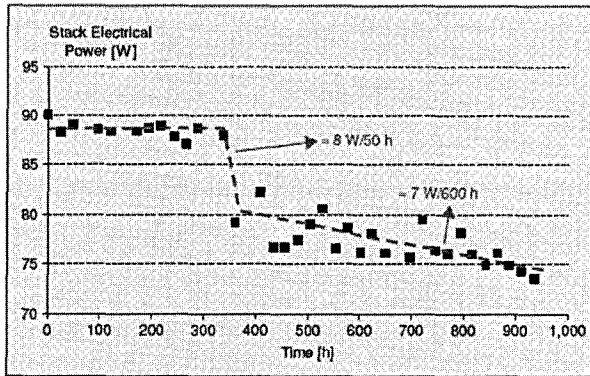


그림 5 해당 내구성 실험(0.05A/cm² 지속 수행)에서 시간에 따른 PEFC 스택의 전력

한 값의 ac전압을 공급하여 배터리의 전하 상태와 연료전지 출력력을 동시에 제어할 수 있다.

4.5 수명, 신뢰도 및 진단

수명은 연료전지기술 개발에 있어서 중대한 장애물이다. 이에 대한 요구조건은 응용 환경에 따라 다르다. 소형차의 경우 5시간, 트럭은 30시간, 기차와 고정형 발전기는 100시간이다. 이러한 수명들은 지속 상태에서 작동하는 단일 전지로는 쉽게 달성할 수 있는 반면, 전체 연료전지 스택이나 시스템에 있어서는 전혀 다른 문제가 된다. 이 분명한 모순은 쉽게 설명이 가능하다. 스택에서는, 전류가 반응물질들에 의하여 균일하게 모든 전지에 공급되지 않고 부산물의 배출도 단일 전지에서처럼 쉽지가 않다. 기계적인 제약과 열의 제약들 또한 제대로 다루기가 더 어렵다. 수명 감소 및 시스템 수준에서의 장애를 발생시키는 원인이 되는 변수들 일부에는 다음과 같은 것들이 포함된다.

- 연료 불순물: 일산화탄소(CO)는 저온 연료전지 촉매를 오염시키며, 황은 저온과 고온 연료전지 촉매 모두를 오염시킨다. 오염이 심한 곳에서는 산화제 합성물 또한 문제가 될 수 있다.
- 작동 중인 스택의 연료 및 산화제 공급 중단 : SOFC의 경우, 연료 공급이 끊길 경우 600℃의 양극에 들어가는 공기는 스택에 들어킬 수 없는 손상을 입힌다. PEFC에서는 이것이 스택 회로의 단락을 일으킬 수 있다.
- 온도 순환: SOFC의 경우, 주변 온도 및 작동 온도 순환에 대한 허용치가 제한된다는 것이 종종 보고된다. PEFC에 있어서는 그리 심각한 문제가 아니나, 그러한 경우에 수화/건조 주기를 피하도록 특별한 주의를 기울여야 한다.
- 가스 수화: 가스 수화는 PEFC에 중요한 요소지만 다루

기 힘든 변수이며, 특히 단기간에 그렇다.

- 압력 변화: 압력 변화(양극-음극 강하)가 PEFC 막에 높은 스트레스를 가할 수도 있다.
- 최고 전력 수요 및 전류 리플: 최고 전력 수요와 전류 리플은 큰 영향을 미치지만, 물리적인 설명은 여전히 연구 대상이다.

따라서 이처럼 소비자의 요구를 충족시키기 위해서 개선되어야 할 중요한 점들이 있다. 전지와 스택 레벨에서는, 재료, 반응 물질과 산출물 흐름의 내부 설계, 온도 증감률, 성분 호환성 등이 자세히 조사되어 있다. 시스템 레벨에서는, 시스템 구조의 최적화된 설계, 잘 선택된 특정 부속물의 개발, 그리고 효율적인 감시 규정의 제정으로, 상기 나열된 변수들의 영향을 크게 줄일 수 있다.

오랜 시간에 걸쳐 연료전지 스택의 실험상 특성을 검토해 보면, 성능 하락은 언제나 발생한다. 그러나 연료전지 스택이 작동하는 방식에 따라 크게 다르며, 동일한 비율로 일어나지 않고, 동일한 시간 간격으로 일어나지 않는다.

그림 5-7에는 실험실 테스트 벤치 상에서 1000시간 동안 거의 정상(nominal) 조건, 정상(stationary)전류 하에서 작동시킨 100W의 3-전지 스택에서 수행된 내구성 테스트 결과들이 나타나 있다. 이 연구에서 조사한 스택은 상용의 막들(Gore MESA Primea 시리즈 5510; 100cm²의 활동 전지 면적), 가스 분산층, 그리고 절삭된 흑연 분산판으로 조립되었다. 이 테스트에서, 부하 전류는 50A(0.5A/cm²)에 해당되었다. 연료전지는 건조한 수소가 습한 공기로 채워졌다. 양극/음극 화학량비(FSA/FSC)의 세트는 각각 2/4로 조절되었으며, 이는 필요한 수소의 양(각각에 공기)이 두 번(각각 네 번씩) 공급되었음을 뜻한다. 연료전지는 대기압(최대 순수 압력 1.5바)에서 작동되었다. 내구성 테스트에 사용된 테스트 벤치에 관한 세부 설명은 [21]에서 찾아볼 수 있다. 이러한 작동 조건에 따라, 그림 5는 노화 과정에 따라 스택 전력이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 이 실험 테스트에서, 스택은 실험 초기 350시간 동안 일정한 전압을 유지하다가 그 후의 50시간 동안은 상당히 급격히 감소했다(감소율 약 8W/50시간).

마지막으로, 테스트가 끝날 때까지는 상당히 낮은 지속적 성능 손실(약 7W/600시간)을 관찰할 수 있었다. 이 내구성 테스트에서 스택의 물리적 안정성을 위태롭게 하는 심각한 장애는 나타나지 않았다. 더욱이 전압을 단순히 관찰하는 것으로는 이 감소 매커니즘을 포괄적으로 이해할 수 없다. 스택은 또한 노화 과정에 잘 특성화 되어야만 한다. 이처럼, 분극 곡선(그림 6(a)와 (b))과 임피던스 스펙트럼들(그림 7(a)와 (b))은, 연료전지 스택의 정적 특성 및 동적 특성을 추적하기 위해 실험 기간 전체에 걸쳐 규칙적으로 측정된다. 분극 곡선 "Hinit"는 내구성 테스트를 시작할 때 기록된 초기 전류-전압 특성에 부합한다. 분극 곡선들은 3-D(노화 시간/연

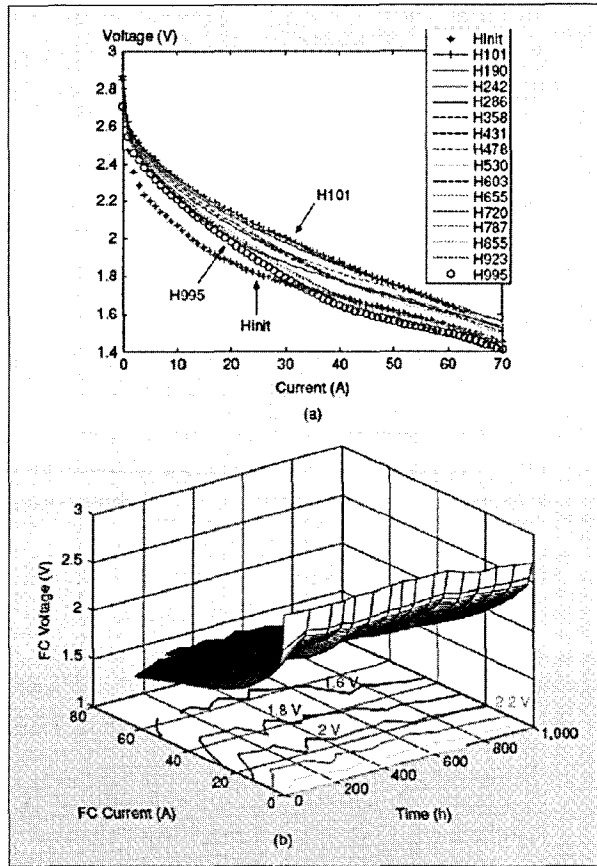


그림 6 (a) 2/5 양극/음극 화학량비에 대해 기록된 분극 곡선 세트. (b) 3-D 음영 표면을 사용한 분극 곡선 세트의 표시 (2/5 양극/음극 화학량비)

료전지 전류/연료전지 전압)의 음영 표면을 사용하여 나타낼 수 있다. 면 아래의 등고선 그래프인, 곡면의 투영이 시간/전류 면에 그려져 있다. 이 그래프는 경도와 위도 모두에 대한 상승 정도를 보여주는 위상 지도와 비슷하다.

그러나 상승 대신에 이 지도는 여기서 두 변수인 시간 및 부하 전류에 대해 측정된 연료전지 전압 레벨들을 보여준다. 이 마지막 분극 곡선의 모양은 시간에 대한 (전압에 있어서의) 스택 성능의 변화를 더욱 잘 보여준다. 처음 100시간 동안은 성능 향상이 관찰되고, 다음 200시간 동안은 안정적이지만 300시간과 400시간 사이에는 감소한다. 전압 등고선의 작은 봉우리들은 주로 특성화 절차의 영향일 수 있다(작동 조건들은 분극 곡선과 임피던스 스펙트럼의 측정에 의해 개선된다).

임피던스 스펙트럼 그래프의 특정 장소에 초점을 맞추므로써, 현장 기록들은 MEA 중요 성분들의 노화에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다. 내구성 테스트 동안에 기록된 모든 임피던스 스펙트럼들이 그림 7에 나와 있다. 보다시피, 스펙

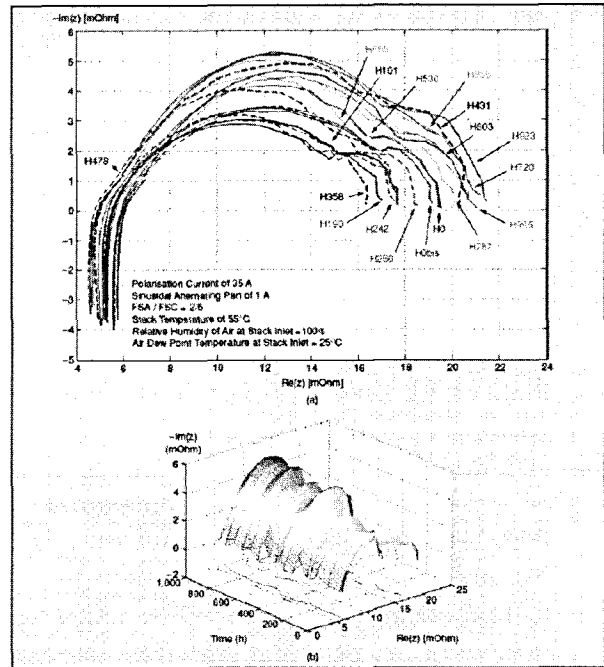


그림 7 (a) 내구성 테스트에서 기록된 임피던스 스펙트럼들 (b) 내구성 테스트에서 기록된 임피던스 스펙트럼들에 대한 3-D 플롯

트럼의 원호들은 내구성 테스트 동안 현저히 증가했으며, 이는 스택 성능의 현저한 감소를 강조하고 있다.

시간에 따른 연료전지의 상태의 특성화가 흥미롭다면, 실제 온라인 진단 역시 수행되어야 한다. 더욱이 이 진단은 시스템 상에서 제한된 수의 센서를 사용하여 수행되어야 한다. 문제가 탐지되면, 관리 규칙의 재편성이 제시될 수 있다. 연료전지 시스템의 신뢰도 및 가용성을 향상시키기 위해 점진적 변수 모델, 블랙박스 모델, 회색박스 모델들에 따른 진단 방식들을 개발해야만 한다. 그런 다음 적절한 결함 탐지와 관련 작동 모드의 결정이 제시될 수 있다. 정상적인 작동, (출력에 있어서) 제한된 작동, 단시간 폐쇄 절차가 나타나는 장애, 주요 결함이 그것이며 즉각 폐쇄의 안전성 측면이 포함된다.

5. 결론

연료전지의 모든 잠재력은 밝혀진 상태이다. 이것은 주로 이 분야에서의 도전과제들이, 한편으로는 화학에서 열역학 분야 까지 다른 한편으로는 기계와 전기 분야에 이르기까지 여러 학문에 걸쳐서 이루어지기 때문이다. 이 글에서는 이 모든 측면들을 간략하게 검토해 보았다. 연료전지가 에너지원으로서 가능한 후보들 중 하나로 여겨진다면, 많은 기술적 도전과제들이 극복되어야 할 것이다. 이러한 도전과제들 중 많은 것에

전기공학이 관련된다. 연료전지라는 아이디어는 굉장해 보인다. 그러나 아직은 넘어야 할 여러 장애물들이 있다. ❏

참고 문헌

- [1] M. Farooque and H.C. Maru, "Fuel cells: The clean and efficient power generators." *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1819-829, 2001.
- [2] A. Emadi and S.S. Williamson, "Fuel cell vehicles: Opportunities and challenges," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1640-645, 2004.
- [3] M.C. Pera, D. Hissel, and J.M. Kauffmann, "Fuel cell systems for electrical vehicles: An overview," *IEEE Vehic. Tech. Soc. News*, vol. 49, no. 1, pp. 9-4, 2002.
- [4] K. Rajashekara, "Hybrid fuel cell strategies for clean power generation," in *Proc. IEEE Industry Applications Conf.*, vol. 3, pp. 2077-083, 2004.
- [5] M.R. Von Spakovsky, D. Rancruel, D. Nelson, S.K. Mazumder, R. Burra, K. Acharya, C. Haynes, and R. Williams, "Investigation of system and component performance and interaction issues for solidoxide fuel cell based auxiliary power units responding to changes in application load," in *Proc. IEEE Industrial Electronics Society Conf. (IECON '3)*, vol. 2, pp. 1574-579, 2003.
- [6] A. Von Jouanne, I. Husain, A. Wallace, and A. Yokochi, "Innovative hydrogen/fuel cell electric vehicle infrastructure based on renewable energy sources," in *Proc. 38th IEEE Industry Applications Conf.*, 2003, vol. 2, pp. 12-6.
- [7] A. B i y i ko ~glu, "Review of proton exchange membrane fuel cell models," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 11, pp. 1181-212, 2005.
- [8] K. Haraldsson and K. Wipke, "Evaluating PEM fuel cell system models," *J. Power Sources*, vol. 126, no. 1-2, pp. 88-7, 2004.
- [9] J. Garnier, M-C. Péra, D. Hissel, F. Harel, D.Candusso, N. Glandut, J.P. Diard, A. De Bernardinis, J.M. Kauffmann, and G. Coquery, "Dynamic PEM fuel cell modelling for automotive applications," in *Proc. IEEE-VTC' 3 Fall*, Orlando, USA, 2003.
- [10] L. Dumercy, R. Glises, J.M. Kauffmann, and H. Louahlia-Galous, "Transient thermal computation of a PEM fuel cell by a nodal modelling," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, 2003, vol. 5, pp. 3299-303.
- [11] C. Wang, M.H. Nehrir, and S.R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 442-51, 2005.
- [12] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld "Polymer electrolyte fuel cell model," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 138, pp. 2334-342, 1991.
- [13] J. Kim, S. Lee, and S. Srinivasan, "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 8, pp. 2670-674, 1995.
- [14] D. Candusso, I. Valero, A. Walter, S. Bacha, E. Rulliere, and B. Raison, "Modelling, control and simulation of a fuel cell based power supply system with energy management," in *Proc. IEEE Industrial Electronics Conf.*, Seville, Spain, 2002, vol. 2, pp. 1294-299.
- [15] S. Jemei, D. Hissel, M.C. Pera, and J.M. Kauffmann, "Dynamic recurrent neural network towards modelling of on-board fuel cell power supply," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics Conf. (SIE' 4)* Ajaccio, France, pp. 471-76, 2004.
- [16] S. Um and C.Y. Wang, "Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 125, no. 1-2, pp. 40-1, 2004.
- [17] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillant, G. Dauphin-Tanguy, and B. Ould-Bouamama "Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements," *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, 22, pp. 905-13, 2006.
- [18] J. Garnier, M.-C. Pera, D. Hissel, A. De Bernardinis, J.M. Kauffmann, and G. Coquery, "Dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell under transportation cycle load," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, 2004, (ISIE' 4), Ajaccio, France, vol. 1, pp. 329-33, 2004.
- [19] E. Laffly, M.C. Pera, and D. Hissel, "Dynamic model of a polymer electrolyte fuel cell power

device,” in Proc. IEEE-IECON’ 6, Industrial Electronic Conf., Paris, France, 2006.

- [20] K. Holland and F.Z. Peng, “Control strategy for fuel cell vehicle traction drive systems using the Z-source inverter,” in Proc. IEEE Vehicular Power Propulsion Conf., Chicago, USA, 2005 [CD-ROM].
- [21] D. Hissel, M.C. Pera, D. Candusso, F. Harel, and S. Begot, “Characterisation of polymer electrolyte fuel cell for embedded generators. Test bench design and methodology,” Advances in fuel cells, Research Signpost Ed., 2005.

〈필자 소개〉



김태훈(金兌勳)

1983년 9월 18일생. 2009년 숭실대 전기 공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



이종학(李鍾鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.