

특집

연료전지시스템과 부하관리 응용

한 수빈, 정 봉만, 최 수현
(한국에너지기술연구소)

1. 서론

연료전지는 천연가스, 납사, 메탄올과 같은 탄화수소 계열 연료가 갖는 화학에너지를 기계계의 변환없이 전기에너지로 직접 변환시키는 높은 발전효율의 기술임과 동시에 공해요인이 매우 적기 때문에 전력수요자 부근에 설치할 수 있고 따라서 송전설비와 손실이 경감되는 장점을 갖고 있다. 또한 폐열의 회수이용도 가능하여 급탕, 냉난방 등에 이용함으로써 높은 종합에너지효율을 기대할 수 있는 차세대의 주요발전기술중 하나이며 이미 많은 응용분야에서 실용화 단계에 진입하고 있는 기술이다.

이 연료전지 발전시스템은 전력수요지 근처에 설치하여 사용하거나 전력수요가 밀집한 도심지역에 분산설치하여 사용할 수도 있으며 필요에 따라 대용량 발전설비로도 이용 가능하며 아울러 도서지역과 같은 원격지의 전원공급으로서도 활용할 수 있는 등 실로 다양한 응용분야를 갖고 있기 때문에 미국, 일본등 선진국에서 많은 연구를 수행해 오고 있다. 현재 수요지 부근 현지설치용(on-site)으로는 50~1000kW급의 중용량급이 2차변전소 이하의 전력계통에 분산배치되는 분산형 및 전력사업용으로는 1000kW~11MW급이 개발중이거나 실용화되어 있다.

많은 응용분야중 최근에 안정된 전력공급과 관련하여 부하의 분산처리 또는 계통연계에 의한 전력공급으로 피크 부하를 계통과 공유하는 방향의 부하관리 측면으로의 적용을 고려하는 것은 당연한 것이다. 그러나 현재까지 연료전지는 직접적인 부하관리의 적용보다는 현지설치용과 같은 간접적인 부하관리 역할이나 수송기관의 동력 또는 이동전원으로서의 특수응용분야에서 많은 시도가 있었다. 또한 현재까지 여러 종류의 연료전지가 개발중에 있지만 그 특성이 서로 다르므로 여기에서 그 응용성이 구분된다고 할 수 있다.

따라서 부하관리 목적으로서의 연료전지시스템을 보다 잘 이용하기 위해서는 서로 다른 연료전지의 특성을 정확하게 파악하고 현재까지 구성되고 있는 시스템을 이해하고 연료전지 발전프랜트의 응답특성등 주요 특성을 파악한 후 관련 응용예를 고찰하는 것이 필요하다고 판단된다. 따라서 이러한 내용을 다음에 간략히 기술하고자 한다.

2. 연료전지의 종류별 특성 및 적용

연료전지는 일반적으로 전해질의 사용종류에 따라 구분하며 표 1에 그 특성을 상세히 비교하였다. 현재 인산형의 경우는 다른 연료전지가 실험실위주로 개발중인 것과 비교하여 수백W의 소형이동전원, 50kW~1MW의 현지설치형, 10MW급의 분산형전원등 여러분야에서 실용화단계에 있는 가장 발전된 연료전지이다. 그러나 촉매를 백금으로 사용하여야 하기 때문에 전체적인 가격이 높은 것이 단점이다. 용융탄산염 연료전지는 발전효율이 보다 높고 백금 촉매를 사용하지 않으므로 이러한 경제성 문제를 해결할 수 있는 다음 세대의 연료전지로 평가되고 있다. 고체전해질형은 높은 효율과 작동온도가 높아서 폐열의 온도가 높고 가스터빈이나 증기터빈을 작동시킬 수 있는 등 복합발전이 가능한 장점이 있으며 전력용 사업의 대용량 프랜트에 적합하다. 알칼리형은 알칼리성 수용액을 전해질로 사용하기 때문에 오래 전에 아폴로우주선에서 전원과 수(水)제조를 겸용하여 사용한 바 있고 연료가 수소로 제한되는 한계가 있고 작동온도가 저온으로 폐열이용은 불리하나 시동/정지가 용이한 측면이 있어서 우주, 해양, 군사용등 특수용도에서 사용되고 있다. 고체 고분자형은 전류밀도가 높고 구조가 간단하여 소형 경량화에 유리한 장점이 있다. 따라서 표 2와 같이 선호되는 응용분야를 대략적으로 구분할 수 있다.

3. 연료전지 발전프랜트의 시스템 구성

연료전지 발전프랜트는 연료전지본체이외에 그림 1과 같이 연료처리장치(개질기), 공기공급장치, 전지냉각장치, 전력변환장치 그리고 폐열회수장치와 종합 제어장치등으로 구성된다. 그중에서 연료처리장치는 천연가스, 도시가스 등의 기체연료 또는 메탄올, 납사 등의 액체연료를 개질하여 연료전지에서 사용할 수 있도록 수소를 주성분으로 하는 연료로 제조하는 장치로 연료전지의 전체 시스템의 응답시정수를 좌우하는 부분이다. 공기공급장치는 연료전지 본체의 공기극의 산화제로 사용되는 공기를 공급한다. 시스템 제어장치는 프랜트의 기동/정지/발전운전 등의 동작모드를

<표 1> 주요 연료전지의 특성 비교

종류 특성	인산형 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	용융탄산염형 MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	고체 전해질형 SOFC (Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell)	알칼리형 AFC (Alkaline Fuel Cell)	고체고분자형 PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)
전해질	인산수용액 (H ₃ PO ₄)	용융탄산염 (K ₂ CO ₃ /Li ₂ CO ₃)	안정화 ZrO ₂	알칼리 수용액 (KOH)	고분자이온 교환막
반응을 증대하는 이온	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	OH ⁻	H ⁺
촉매	백금	니켈	-	니켈, 은, 백금	백금
작동온도	180~210°C	600~700°C	800~1000°C	60~80°C	80°C부근
연료	천연가스 메탄올, 납사 LPG	천연가스, 납사 메탄올, 석탄가스, LPG	천연가스, 납사 메탄올, 석탄가스, LPG	순수소	천연가스 메탄올
폐열이용	양호	중음	중음	나쁨	나쁨
용량	수십kW~수십MW 현시설치형, 분산형	~ 수백 MW 전력사업용	~ 수백 MW 전력사업용	~ 100kW 우주, 해양, 군사용	수십kW 우주, 해양, 군사용
발전효율(%)	40~45	50~60	50~60	45~60	약 40

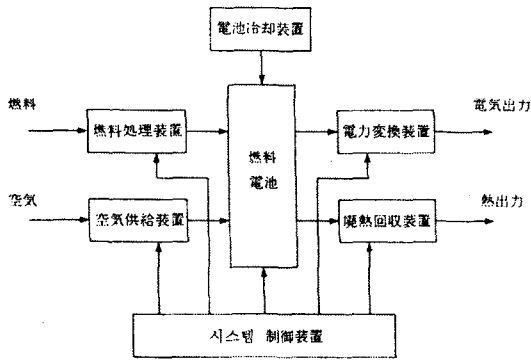
<표 2> 연료전지의 종류에 따른 응용

Market	Fuel cell types				
	PAFC	MCFC	SOFC	AFC	PEFC
Generation (100kW~250MW)					
- Electric utility	◎	◎			
- Remote	◎	◎		◎	
- Dispersed (stationary)	◎	◎	◎	◎	◎
On-site cogeneration (4kW~10MW)	◎	◎	◎		◎
Portable/mobile (1kW~500kW)					
- Commercial, portable				◎	
- Military, portable			◎		◎
- Underground mining				◎	◎
Vehicular (1kW~2.5MW)					
- Automotive	◎			◎	◎
- buses, trucks	◎		◎	◎	◎
- Railway				◎	◎
- Space	◎			◎	◎
- Submersibles					◎

4. 변환장치의 요건

모두 제어하고 전지본체의 연료와 공기의 공급량과 전지의 온도를 조절하며 전체 시스템의 동작 균형에 맞게 전력 변환장치에 출력명령을 지시하는 복합적인 동작을 수행하여야 한다. 전력변환장치는 연료전지가 발전하는 직류전력을 안정된 교류전력으로 변환시키는 역할을 한다.

연료전지용 전력변환장치는 연료전지와 인터페이스와 전력계통과의 인터페이스를 만족하여야 한다. 연료전지는 출력전류가 증가하게 되면 단자전압이 20-30%정도 떨어지



[그림 1] 연료전지 플랜트의 기본 구성

는 특성이 있고 같은 부하에 대해서도 연료공급과 반응은도에 따라서 전지전압이 역시 변화한다. 또한 운전시간이 오래 경과함에 따라 전지의 성능상태가 떨어지게 되어 초기특성에 대해 10%정도의 전압강하를 사전에 고려해야 한다. 따라서 전력변환장치는 이러한 여러 전압변동요소들에 대해 출력전압을 일정하게 유지할 수 있도록 하는 전지의 전압변동에 대한 추종능력을 갖고 있어야 한다.

또한 전력변환장치는 전지성능을 저하시키는 여러 요인을 억제시켜야 하는데 예로서 연료전지는 부하급변과 전류리플이 큰 경우 특성이 떨어지며 무부하상태의 운전을 장시간 계속하는 경우 역시 성능저하가 온다. 따라서 전지출력에 보조저항을 접속하거나 부하급변 억제용 백업전원을 설치하는 등의 회로구성과 운전방식이 필요하다. 그리고 연료전지에 역전류가 흐르는 경우는 전해질에 손상을 주므로 이의 방지 역시 필요하다.

계통에 연결하는 경우는 계통의 전압변화를 추종할 수 있는 특성과 유효전력제어가 가능하여야 하며 계통에 가능한 고조파를 유입시키지 않도록 해야 한다. 연료전지 전력변환기의 구성의 예로는 대표적으로 80년대에 개발되었던 그림 2와 같은 현지설치용과 그림 3과 같은 분산발전용을 들 수 있다. 연료전지는 단위전지가 저전압 대전류의 특성을 가지므로 전력변환장치는 항상 승압의 기능이 포함되게 된다. 50kW급의 현재설치용인 경우는 DC/DC 컨버터에서 승압을 하고 PWM방식을 사용하였으나 11MW급에서는 출력단에서 다중 컨버터와 트랜스포머를 이용한 승압과 고조파제어를 수행하고 있다.

4. 연료전지발전의 부하 응답 특성

연료전지는 넓은 동작영역에서 비교적 일정한 효율을 유지하면서 부하변화에 대해 매우 빠른 전력응답특성을 갖고 있다. 이는 부하관리 적용측면에서 볼 때 중요한 장점으로 작용이 된다. 예로서 뉴욕과 일본에 설치된 4.5MW테마용 플랜트는 feedforward 센서와 에너지전달시스템을 이용하여 0.3초의 부하에 대한 과도특성을 갖고 있다. 이 것은

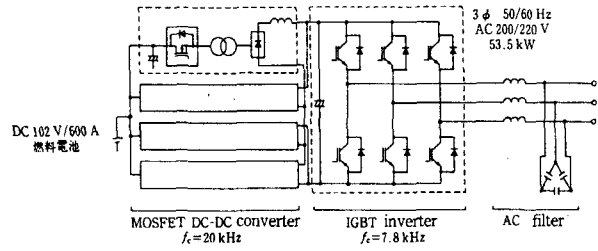


그림 2 50kW급 연료전지 전력변환시스템

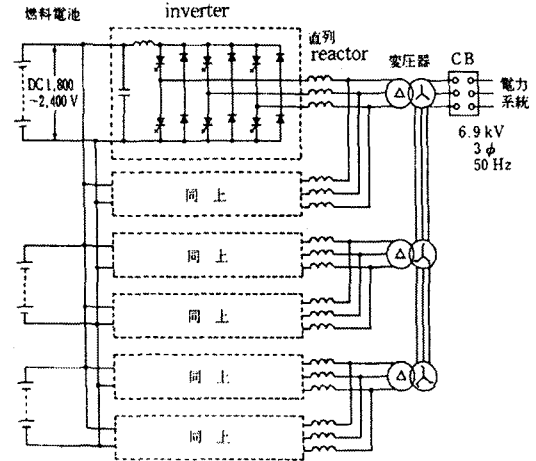


그림 3 11MW급 연료전지 전력변환 시스템

현지설치용으로 많이 적용된 50kW급 시스템에서도 물론 같으며 그 외에 제어시스템을 간소화하고 가격을 감소시키기 위해서 PC-23 11MW시스템은 feedback 에너지 제어와 전달시스템을 사용하여 1초내에 1MW의 부하변화에 응답 되도록 설계되었다.

연료전지 발전시스템의 전력응답시간은 연료전지 자체는 msec의 응답시간을 갖고 있기 때문에 사실상 연료공급 시스템이 응답시간을 좌우한다고 볼 수 있고 부하변화에 대해 최적화된 연료공급제어기 설계가 매우 중요하다. 한 예로 연료공급의 지연이 없는 경우인 그림 4와 비교하여 연료공급의 지연이 심한 경우는 스택내에 압력강하의 포화가 발생되므로 그림 5과 같이 연료전지자체의 성능이 정상적으로 동작하는 시간까지 포함하여 보다 긴 시간이 소요되거나 스택내부의 동작의 안정도를 감소시킬 수도 있다.

이 빠른 전력응답특성은 계통으로 하여금 요구되는 발전기의 회전 예비율(on-line spinning reserve)을 줄일 수 있게 해준다. 또한 빠른 응답특성 때문에 격자로 연결된 연료전지 발전시스템들은 계통에 있어서 스위칭시 발생하는 전압의 서지 및 흔들림에 반응하고 댐핑을 줄 수 있기 때문에 shunt reactor/capacitor의 대체역할을 할 수 있다.

5. 연료전지의 부하관리적용 예

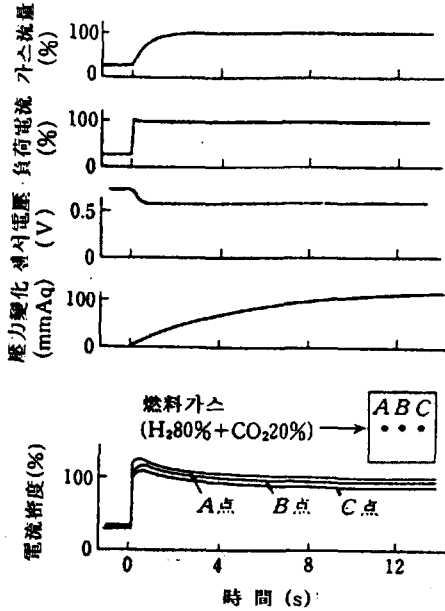


그림 4. 연료공급 지연시간이 없는 경우의 부하추종특성

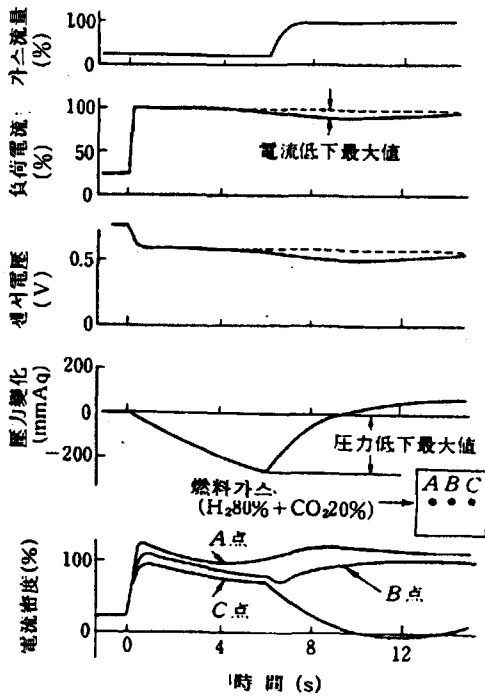


그림 5. 연료공급 지연시간이 큰 경우의 부하추종특성

연료전지시스템의 본격적인 부하관리로의 응용은 연료전지시스템이 아직은 개발진행중인 기술이므로 보다 경제적이고 다양한 용량이 상용화되기까지 연구단계에 있을 것으로 보인다. 그러나 연료전지의 고유의 장점 때문에 기존의 태양광발전 시스템이나 축전시스템과 복합적으로 구성

되어 보다 효과적인 시스템을 구성할 수 있다. 일 예로 그림 6은 일본의 NTT가 1993년에 요코하마지점에 설치한 인산형 연료전지를 이용한 통신용 에너지시스템의 계통도이다. 이 시스템은 연료전지는 통신기에 전력을 공급하고 열에너지는 실내의 공조를 위한 냉각수를 발생하기 위해 흡수냉동기에서 사용되도록 한 복합에너지 시스템이다. 또한 연료전지 출력은 효율 92%, 48V/55A 출력인 9개의 dc-dc converter를 통해서 직류로 직접 축전지와 연계되어 통신기에 에너지를 전달하는 동시에 효율 94%의 100kW 인버터를 통해 교류전력시스템과도 연계된 2중 연계시스템으로 구성된다.

평상시에는 계통전원에서 정류기를 통해 DC48V로 기기에 전력이 공급되고 정전시에는 축전지의 저장된 에너지가 무정전의 직류전력을 공급한다. 이 때 연료전지의 직류출력이 축전지와 연계하여 그림 7과 같이 기기에 전력을 공급하게 된다. 한편 인버터를 통한 연료전지의 교류출력은 계통전원과 연계되어 조명 및 냉난방공조시스템에 전력을 공급한다. 그 연계운전상태는 그림 8과 같다.

또다른 응용 예로는 건물의 전기에너지를 상용계통전원은 전력 이용하지 않고 가스에너지만을 사용한 연료전지 발전 그리고 보조의 태양광 발전 및 축전지의 복합운전으로 전력을 공급하는 NEXT21이라는 1993년에 오사카에 설치된 미래형 실험집단주택을 들 수 있다. 이는 환경보호, 에너지 절약 및 안락한 생활을 실현시키기 위한 실험으로 180-330V의 직류출력의 100kW 인산형 연료전지를 이용하였다.

6. 결론

연료전지에서의 부하관리는 건물등에서 현지설치형과 같은 시스템의 보급으로 계통에서 공급받는 부하를 줄이거나 계통과 연계하여 대규모 혹은 소규모 다수의 시스템으로 피크부하를 공유하는 방식의 개념으로 생각할 수 있다. 이 때도 전력부하의 기저부하(base load) 또는 첨두부하(peak load) 혹은 중간부하(mid load)로의 이용을 생각할 수 있지만 연료전지의 발전열효율과 부하추종능력의 비중에 따라 선택의 여지가 달라진다. 현재 인산형의 경우 첨두 및 중간부하용으로서의 운용이 가능할 것으로 보이며 대형 화력발전의 대체용 또는 기저부하용으로는 용융탄산염 연료전지가 향후 실용화 될 경우 가능할 것으로 판단된다. 본 해설에서는 연료전지시스템의 특징과 함께 부하관리측면에서의 응답특성 그리고 현재 실제적인 운용이 많이 추구하고 있는 태양광발전 또는 축전시스템과의 복합운전에 의한 부하공유의 예를 들었고 부하관리에의 효과적인 운용에 보다 이해가 될 것을 기대한다.

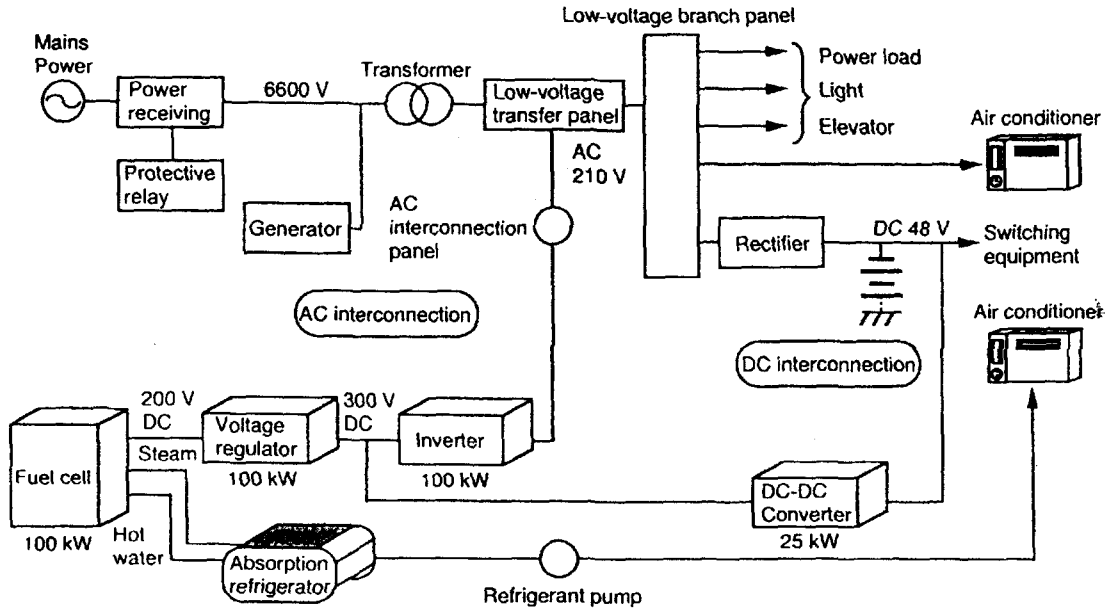


그림 6 연료전지를 이용한 통신용 에너지 시스템

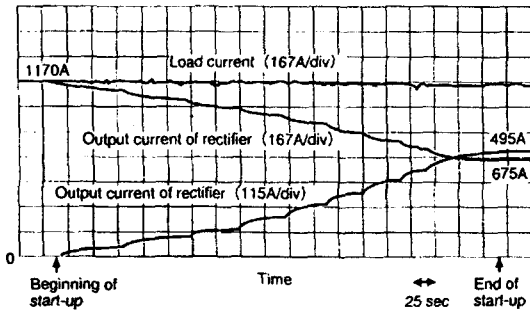


그림 7 직류전력 연계 특성

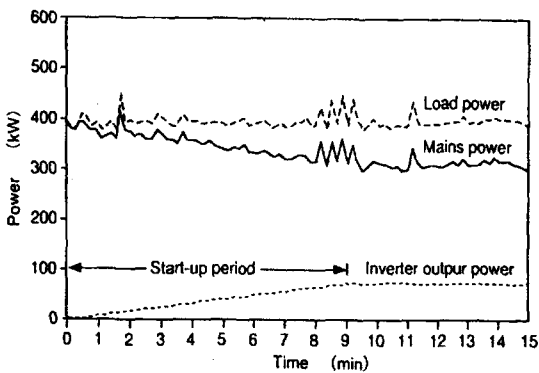


그림 8 교류 전력 연계 특성



한수빈(韓秀彬)
1981년 한양대학교 전자공학과 졸업,
1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공
학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 전
기 및 전자공학과 졸업(박사), 현재 한
국에너지기술연구소 선임연구원



정봉만(鄭鳳晩)
1980년 연세대 전기공학과 졸업,
1985년 충남대학교 전자공학과 졸업(석
사), 1990년 동대학원 전자공학과 졸업
(박사), 현재 한국에너지기술연구소 책
임연구원



최수현(崔壽鉉)
1969년 서울대 응용물리학과 졸업,
1978년 미국 Colorado State
University 전기공학과 졸업(박사), 한
국에너지기술연구소 에너지절약연구센
터장, World Energy Council 전문위원
등 역임, 현재 한국에너지기술연구소
책임연구원, 당학회 부회장