

연료전지 분산전원용 전력전자 시스템의 개발현황 및 전망

이 병 국

(한국전기연구원 선임연구원)

1. 서론

최근들어 화석연료의 고갈과 환경오염의 심각성 및 기존 전력설비의 노후 및 용량증대에 따른 지속적인 문제점이 대두되고 있는 가운데 지난 8월 미국 동부 및 캐나다에서 발생한 대정전사고는 현재의 에너지원에 근간을 둔 전력시스템에 대한 심각성을 보여준 계기가 되었으며 신재생에너지원의 개발 및 기존 전력설비와의 연계에 대한 절실한 필요성을 일깨워준 사건이라고 할 수 있다. 태양광, 풍력, 수력, 지열, 조력, 연료전지, 마이크로터빈 등과 같은 다양한 에너지원은 NOx 및 SOx 등의 공해물질을 유발시키지 않으며 기존의 화석연료에 의존하지 않는다는 큰 장점을 두고 그동안 선진국에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 현재의 발전시스템의 전기생산단가와 비교했을 때는 아직은 경제성 및 효율차원에서 경쟁력의 우위를 확보하고 있지 못하는 실정이지만 독립적 에너지원의 확보와 심각한 지구공해문제의 해결이라는 두가지 당면한 문제점을 궁극적으로 해결하기 위해서는 이러한 신재생에너지원을 이용한 발전시스템이 그 해답으로 주어질 수밖에 없는 실정으로 앞으로도 많은 연구비 투자 및 정책적인 지원이 이루어질 것으로 예상할 수 있다. 또한 Annual Energy Outlook 및 Consortium for Electric Reliability Technology Solution (CERTS)의 보고서에 따르면¹⁾ 전 세계적으로 2020년까지 약 7million MW의 전력이 추가적으로 필요하다고 조사되었다. 하지만 기존의 송배전설비를 강화하기 위해서는 입지적인 설치부지확보가 어렵고 또한 경제적으로 많은 비용이 요구되므로 신재생에너지원을 이용한 분산전원 (Distributed Power Generation) 시스템의 도입을 통하여 당면한 문제를 해결하려는 시도가 이루어지고 있다. CERTS의 보고서에 의하면 전력설비의 약 15-20%정도를 분산전원으로 충당하려는 계획에 의해 2020년 예상되는 분산전원은 약 1million MW정도

로 추정된다. 따라서 석유수입을 외국에 전량 의존하고 있는 국내의 현실 및 곧 다가오는 미래의 에너지 대란의 위기에서 국가의 자생력을 확보하기 위해서는 국내 실정에 최적인 신재생에너지원의 발굴 및 이를 이용한 독립발전시스템 구축 및 계통과 연계하는 분산전원발전시스템에 관한 신뢰성 있는 기술력을 반드시 확보해야만 한다.

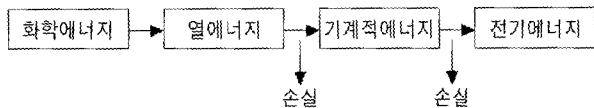
이러한 현실적 요구에 따라 본 논문에서는 신재생에너지원 가운데서 수소와 산소의 화학적 반응에 의해 전기를 발생하는 연료전지 (Fuel Cell)를 이용한 발전시스템에 대해서 고찰하고자 한다. 연료전지 분야에 대해서 1988년 이후 정부의 지속적인 지원이 있었음에도 불구하고 현재까지 실증연구가 전무한 국내의 현실의 문제점을 살펴보면 지금까지는 연료전지 스택자체의 개발에만 연구가 치중되어 온 것에서 그 원인을 찾아볼 수 있다. 연료전지 자체 역시 반드시 개발을 해야 하지만 연료전지가 실생활과 산업현장에 효율적으로 적용되기 위해서는 연료전지용 전력변환장치의 개발이 반드시 수반되어야만 하는 것이다. 연료전지는 기존의 DC 전원과는 달리 강한 비선형성과 느린 동특성 및 낮은 출력전압의 특성을 갖기 때문에 기존에 산업체에서 전동기 가변속 제어 목적으로 사용이 되어오던 전력변환장치를 그대로 이용해서는 연료전지를 운영하는 데 상당한 문제점 및 어려움을 지니게 된다. 최근들어 국내의 연료전지발전 연구분야가 점점 활기를 띠고 있는 가운데 이러한 문제점에 대한 인식이 점차 확산되고 있는 실정에 의해 본 논문에서는 연료전지를 이용하여 고효율, 고성능 발전시스템을 구축하기 위해서 전력변환장치에서 요구되는 사항들에 대해서 자세히 살펴보고 계통에 연계될 때의 기술적 고려사항에 대해서도 고찰하고자 한다. 또한 선진국의 정부 및 기업, 대학의 기술개발현황에 대해서 살펴봄으로써 앞으로 국내 연구방향의 설정에 있어서 참고가 되는 자료가 되기를 기대한다.

2. 연료전지 시스템 특성 고찰

2.1 연료전지의 구성 및 기본특성

그림 1은 기존의 발전방식에 비해 연료전지 발전방식이 갖는 장점을 보여주고 있다. 기존의 화학에너지로부터 전기에너지를 얻기 위해서는 일반적으로 두 단계의 변환을 필요로 하나 연료전지의 경우 화학에너지로부터 직접 전기에너지를 얻을 수 있다는 장점에 의해 기존의 발전방식에서 발생하는 손실을 제거할 수가 있다. 이러한 연료전지는 일반적으로 그림 2와 같이 구성이 되며 전기에너지가 발생하는 원리를 설명하면 다음과 같다.

연료극 (양극, Anode) 쪽으로 공급된 수소는 촉매층에서 전자와 수소이온 (Proton)으로 분해된다. 수소이온은 전해질층을 통해 공기극 (음극, Cathode)으로 이동하고 전자는 외부 회로를 통하여 공기극으로 이동하게 된다. 공기극에서 산소이온과 수소이온이 합쳐져서 물을 생성한다. 이러한 과정을 거치면서 전기와 물을 생성하게 된다. 단위전지 (Cell)의 전압은 보통 0.7[V] 정도이면 이러한 단위전지를 여러 개 직렬로 연결 (Stack)하면 연결된 수만큼 곱한 크기의 전압이 얻어지게 된다. 위에서 설명한 화학반응을 통한 전기생성 과정을 수식으로 정리하면 식 (1)과 같다²⁾.



(a) 기존의 발전방식



(b) 연료전지 발전방식

그림 1. 발전방식의 비교

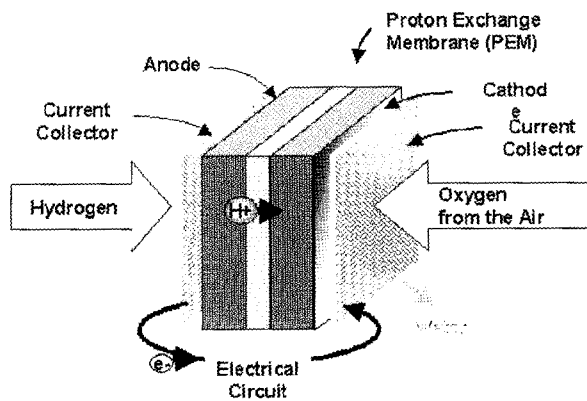


그림 2. 연료전지의 구성 및 발전원리

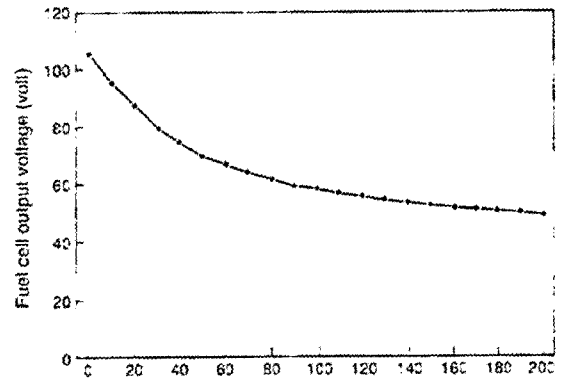


그림 3. 연료전지의 전압, 전류 출력특성

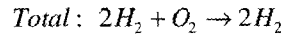
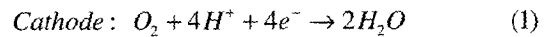
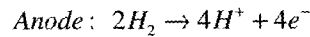


그림 3은 연료전지의 전압, 전류 출력특성을 나타내고 있다. 앞에서 언급하였듯이 부하조건에 따라 출력전압이 상당히 비선형적 특성을 나타내고 있기 때문에 이러한 출력특성을 고려하여 운전되는 부하조건과 부하변동에 따라서 항상 양질 (High-Quality)의 전원으로 변환하는 일을 전력변환장치에서 감당해야만 한다.

2.2 연료전지의 종류

1960년대 아폴로 11호용으로 개발된 알칼리형 연료전지 (Alkaline Fuel Cell : AFC) 이후로 사용하는 전해질 및 동작온도에 따라 연료전지는 크게 1세대인 인산형 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC), 2세대인 용융탄산염형 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC), 3세대인 고체산화물형 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) 및 1990년대에 개발된 4세대인 고분자전해질형 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell : PEMFC)로 분류할 수 있으며 MW급 이상 대용량 시스템에는 MCFC, 3kW급 가정용 발전 시스템 (Residential Power

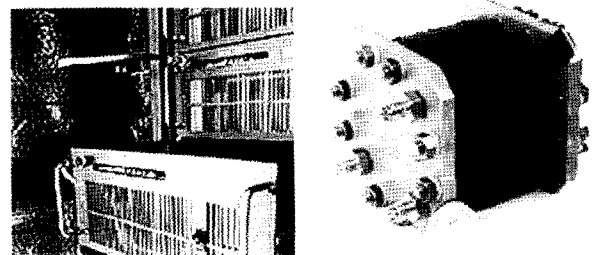


그림 4. 연료전지 스택 외형

표 1. 연료전지 종류 및 특성

종류 구분	알카리형 (AFC)	인산형 (PAFC)	용융 탄산염형 (MCFC)	고체 산화물형 (SOFC)	고분자 전해질형 (PEMFC)
전해질	수산화 칼륨	인산	탄산염	질코니아	이온 교환막
동작온도 (°C)	50-150	150-220	600-700	1000	상온-100
효율 (%)	60	36-45	45-60	50-60	40-50
용도	군사용, 위성용	전력용, 자가 발전용	중대용량 전력용	소, 중, 대용량 발전용	정지용, 이동용

Generation : RPG)에는 PEMFC이 주로 사용되며 현재 미국 DOE 산하 SECA (Solid State Energy Conversion Alliance)에서는 2010년 SOFC를 이용하여 5kW급 연료전지 발전시스템의 상용화를 위해 연구에 박차를 가하고 있다³⁾. 그림 4는 현재 상용화된 연료전지 스택을 보여주고 있으며 표 1에서 위에서 언급한 연료전지들의 특성을 정리하였다.

2.3 연료전지 발전시스템

그림 5는 연료전지 발전시스템의 일반적인 구성도를 보여주고 있다. 연료전지에서는 이상적으로 순수수소를 연료로 사용하는 것이 좋으나 기존의 천연가스, 석유, 메탄올 등 화석연료의 인프라를 활용하기 위해서는 이들 연료로부터 수소를 추출해내는 것이 필요하다. 연료개질기 (Fuel Processor or Reformer)는 이러한 역할을 담당하며 특히 불순물로 존재하는 CO2의 제거공정이 중요하다. 또한 발생한 수소를 저장하는 저장장치의 구성 역시 연료전지 시스템의 상용화에 있어서 반드시 해결해야 하는 기술적인 과제를 지니고 있다.

연료전지 발전시스템에서 간과할 수 없는 부분은 열병합발전 (Combined Heat Power : CHP) 능력이 있다는 것이다. 식 (1)에서 보듯이 연료전지는 전기를 생산하는 과정에서 부산물로 고온의 물을 생성하게 된다. 이를 난방 및 온수로 이용하는 열병합발전방식을 병행하면 전체 시스템 효율을

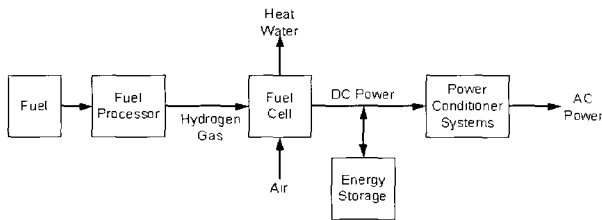


그림 5. 연료전지 발전시스템 구성도

80%이상 증가시킬 수 있는 큰 장점을 지니고 있다. 이상 위에서 기술한 연료전지 발전시스템의 장단점을 정리하면 다음과 같다.

◎ 장점

- 높은 에너지 효율 (40%이상, CHP 경우 80%이상)
- 환경오염이 적다 (NOx 및 SOx 무배출)
- 화석연료의 의존성이 적다 (천연가스, 메탄올 등 사용)
- 소음이 적다 (기계적 Moving Part 부재)
- 이동이 자유롭다 (설치장소의 제약이 적음)
- 폐열활용이 가능하다 (CHP 기술이용)

◎ 단점

- 설치비용의 경제성 문제
- 기술적 신뢰성 및 내구성 문제
- 수소공급 등 인프라 구축 문제

3. 연료전지용 전력변환장치 시스템

3.1 특성고찰

연료전지는 특성상 에너지 저장 능력이 없으므로 시스템 초기 기동 시나 부하의 급변에 따른 속응성 능력을 부여하기 위해서 일반적으로 Battery나 Super-Capacitor등의 에너지저장장치 (Energy Storage)를 병합하여 사용하는 Hybrid 시스템의 구조를 갖는다. 이에 따라 에너지저장장치의 운용을 담당하는 양방향 DC-DC 컨버터의 설계 및 제어 역시 연료전지 시스템에서 중요한 역할을 감당한다. 또한 연료전지스택은 일반적으로 27-48[V]정도의 DC를 출력하므로 이를 400[V]정도로 승압하여 120/240[V] 60[Hz]의 AC전원으로 변환시키는 전력변환장치가 요구된다. 특히 연료전지 시스템에서는 전력변환장치가 저가, 고효율의 특성을 가져야 하므로 이에 따른 새로운 회로의 설계 및 제어가 중요한 부분을 차지한다. 이러한 연료전지용 전력변환장치의 새로운 개발을 위하여 현재 미국 NETL (National Energy Technology Laboratory : <http://www.netl.doe.gov>)에서는 대학연구기관을 상대로 Future Energy Challenge (FEC) 경진대회를 개최하고 있다. FEC 경진대회에서 목표로 하고 있는 변환장치의 사양은 표 2와 같으며 2004년 FEC 경진대회에서는 서울산업대학의 최세완교수팀이 Grand Prize를 획득하여 국내의 전력변환장치 기술의 수준을 세계에 널리 알린 성과를 기록하였다.

3.2 회로 구성도

연료전지용 전력변환장치 (PCS)의 일반적인 구성은 그림 6과 같다. 이 시스템은 일반적으로 연료전지스택의 낮은 출

표 2. FEC 경진대회 연료전지용 전력변환장치 사양⁴⁾

Design Items	Minimum Target Requirement
SOFC (5kW)	29V nominal, 22-41VDC, 275A max.
Battery	48V nominal, +10%~20%, 500 \pm
Output Power	nominal : 5kW continuous @DPF 0.7
	overload : 10kW overload for 1 min. @DPF 0.7
Output Voltage	Split Single-Phase 120/240V, 60Hz
	Voltage Regulation : $\pm 6\%$
	Frequency Regulation : $\pm 0.1\text{Hz}$
	THD : $\leq 5\%$
Manufacturing Cost	$\leq \$40/\text{kW}$
Efficiency	$\geq 90\%$
Package Weight	$\leq 30\text{kg}$
EMI	FCC 18 Class A

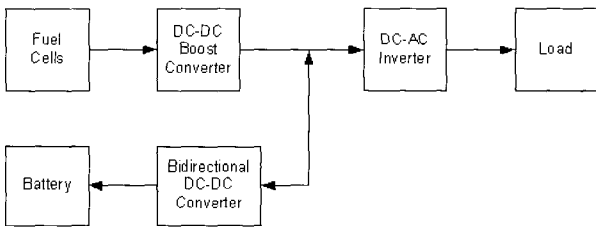


그림 6. 연료전지용 전력변환장치의 구성도

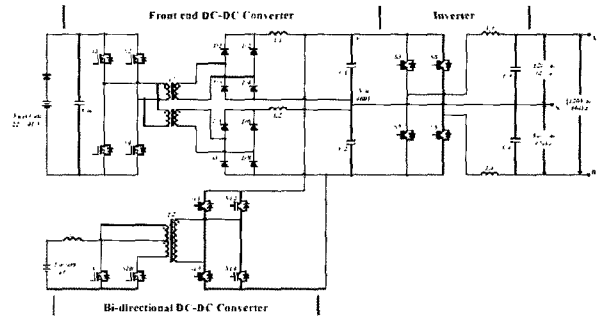
력전압을 승압시키는 DC-DC 컨버터, 에너지저장장치와의 연계를 위한 양방향 DC-DC 컨버터 및 DC-AC 인버터로 구성이 되며 기술적으로 요구되는 사양은 3.1에서 설명한 바와 같다.

오랫동안 연구가 되어온 전력변환회로의 Know-How에 기반을 두고 현재 계속적으로 새로운 연료전지용 전력변환회로에 대한 연구결과가 보고되고 있으며 대표적인 회로를 그림 7에서 예시하였다.

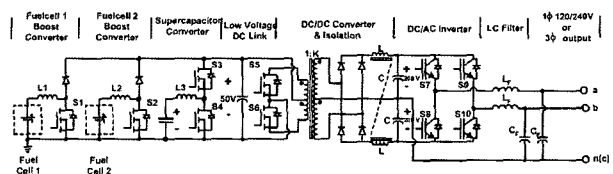
4. 연료전지 분산전원 시스템⁷⁾

연료전지 시스템은 계통과 분리하여 독립형전원으로 사용이 될 수 있지만 기존의 계통과 연계하여 수용가측에 안정된 전원을 공급하면서 기존 설비증대의 목적을 동시에 만족시킬 수 있다. 본 장에서는 연료전지 등의 신재생에너지원이 계통에 연계 될 때 고려해야 하는 문제점들에 대해서 살펴보고자 한다.

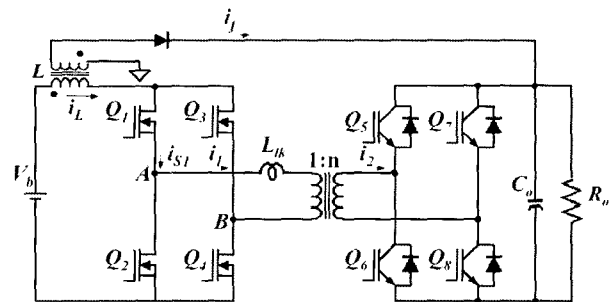
분산전원 (Distributed Power Generation)이라 하면 기존의 전력회사의 대규모 집중형 전원과는 달리 소규모로서 소



(a) 서울산업대 회로⁴⁾



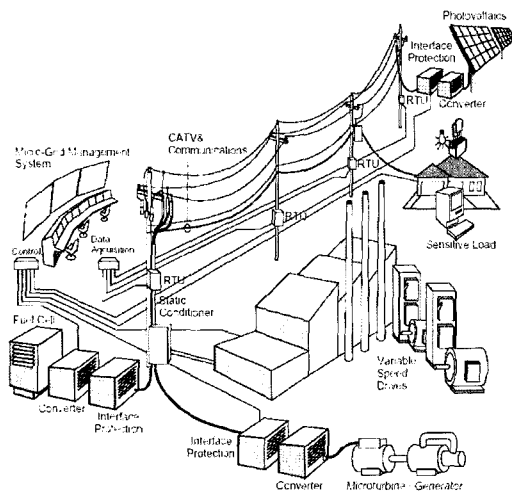
(b) Texas A&M 회로⁵⁾



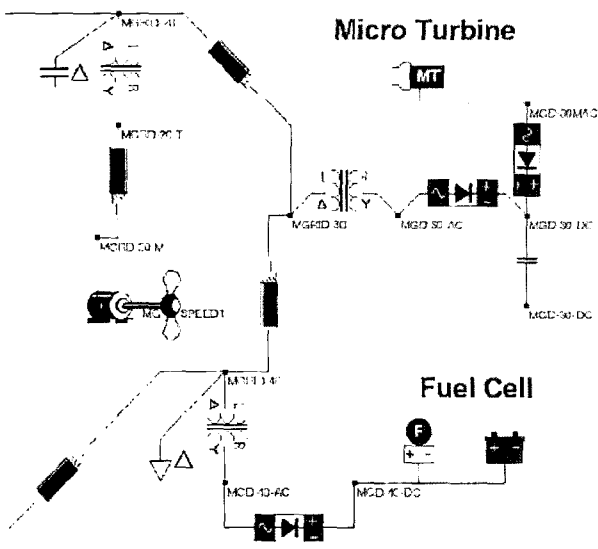
(c) 초기가동을 고려한 회로⁶⁾

그림 7. 연료전지 시스템용 전력변환회로

비지 근방에 분산배치가 가능한 전원을 일컬으며 보통 5kW에서 50MW급의 용량을 갖는다. 이를 일컫는 용어로는 Dispersed Generation, Distributed Generation, Local Generating Facilities 및 Micro-Grid 등 다양하다. 그림 8은 신재생에너지원이 계통에 연계된 전체 개요도를 보여주고 있다. 분산전원이 갖는 큰 장점으로는 송배전설비의 강화 및 투자비용의 증가억제 및 지연, 계통의 신뢰성 개선, 효율적 설비운용, 수용가 서비스의 향상 및 전력시장 개방에 따른 발전시장부분에서의 경쟁력 확보 등을 들 수 있다. 배전계통의 국부적 피크부하로 선로 신, 증설이 요구되는 경우 배전선로의 피크 부하컷트용 분산형 전원을 도입, 운융함으로써 송배전설비 강화에 소요되는 투자비용의 절감과 지연이 가능하게 되는 것이다.



(a) Block diagram



(b) 계통 회로도

그림 8. 분산전원 시스템 개요

분산전원이 실제적으로 적용이 되기 위해서는 정부의 보호 업무지침이 마련이 되는 것이 중요하다. 1986년 한전에서 “타사발전기병렬운전연계선로 보호업무지침”을 제정하였지만 이는 동기기나 유도기로 구성되는 자가용 발전설비에 적용이 되는 것이며 태양광, 풍력, 연료전지 등에 대해서는 보급실적이 없는 관계로 종합적으로 제시가 되어있지 않다. 분산전원의 보급을 위해서는 으로는 국가 총에너지사용량의 일정량을 신재생에너지로 공급하는 정책 마련이 시급하다고 할 수 있다. 일례로 미국 California 주는 2005년부터 20% 정도의 전력을 신재생에너지로 대체하겠다는 정책을 최근에 발표 한 바 있다.

5. 결론

국내의 전기분야 기술은 그동안 상당한 수준으로 급상승하였으며 선진국과 어깨를 나란히 할 수 있을 정도로 많은 Know-How가 축적이 되어있다. 특히 전력전자 및 전력계통 분야에서는 일류기술을 주도할 수 있는 수준이라 감히 말할 수가 있다. 연료전지뿐만이 아니라 다양한 신재생에너지원을 실생활에 도입하기 위해서는 사용하는 신재생에너지원의 물리적 특성 및 전기적 특성의 이해에 바탕을 두고 이에 최적인 시스템을 새로이 구성해야만 한다. 또한 새로이 구성된 전체 시스템을 전력전자와 전력계통의 전문가들이 하나의 형태로 연합하여 실증연구 중심으로 나아가야 비로소 신재생에너지는 우리의 현실과 연결된 고리를 찾을 수 있으리라 생각된다. 연료전지스택 및 마이크로터빈 등의 신재생에너지원 자체의 개발 역시 병행해야 하겠지만 실제 현장에 적용하여 테스트하지 않은 상태에서는 단순히 Laboratory 형태의 연구에서 벗어나기가 힘들지 않을까 생각된다. 선진국들은 이미 풍부한 실증경험을 통해 2010년을 기점 보급화를 위해 박차를 가하고 있는 가운데서도 국내에서도 전력변환장치와 계통분야의 연구자들에게 지속적인 관심과 지원이 있기를 기대한다.

하지만 분산전원을 기존의 배전계통에 연계 시키는 것은 단순한 작업이 아니다. 이에 따른 기술적 문제점을 열거해 보면 다음과 같다.

- 분산전원이 연계되었을 때 발생하는 역조류 문제
- 기존의 배전계통에 전력을 공급하는 역조류의 기능 허용
- 전압변동, 고조파, 보호협조 문제
- 독립운전 (Islanding)의 방지 문제
- 역률, 상불평형, 주파수 문제
- 단락용량 문제
- 기존 배전계통의 분산전원 수용한계 문제

참고 문헌

- [1] CERT보고서, <http://certs.lbl.gov>
- [2] Fuel Cell Handbook-6th Edition, DOE-NETL, Nov. 2002.
- [3] SECA Annual Report, <http://www.seca.doe.gov>
- [4] 최세완, "A low-cost 10kW SOFC-Battery hybrid power processing unit," 2004 FEC Presentation Material, 2004.
- [5] W. Choi, P. Enjeti, J. W. Howze, "Fuel cell powered UPS systems : Design considerations."

- IEEE-APEC2003 Conf. Rec., pp. 385-390, 2003.
- [6] J. Lai, "Power electronics for fuel cells," Power Electronics for Fuel Cell Workshop, 2003.
- [7] 김재연, "분산전원의 배전계통 도입전망과 대책," ETIS 기술자료집

〈 저 자 소 개 〉



이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년 4월~현재 한국전기연구원 전력전자그룹 근무.