

발전용 연료전지 시스템의 계통연계 운전 기술

서 인 영

((주)효성 중공업연구소, 수석연구원)

1. 서론

세계 에너지 수급 문제 및 환경 문제에 대한 관심 고조로, 신에너지원 발굴 및 수소 에너지 이용에 대한 관심이 높아지고 있으며, 수소 에너지 이용 기술에서 가장 활발한 연구 및 성과를 거두고 있는 분야 중 하나가 연료전지 기술 분야이다.

연료전지는 사용 전해질에 따라 몇가지 종류로 분류되는데, 기존 집중식 화력발전소를 대체하거나 대용량 분산전원용으로 유력한 고온형 연료전지로 용융탄산염 연료전지(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell), 가정용이나 수송용(자동차용)으로 개발중인 저온형 연료전지인 고분자전해질 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)와 휴대전원용의 직접메탄올 연료전지(DMFC, Direct Methanol Fuel Cell), 상업용, 발전용에 적용 가능한 고체산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell), 인산형 연료전지(PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)등이 각 적용 분야별로 연구개발 중에 있다.

기존 대규모 발전의 경우 주로 기계적 회전력에 의한 전자기 유도방식에 의해 발전 과정으로 연료의 연소, 고온 고압의 수증기 발생, 이를 기계적 회전에너지로 전환등 다단계의 에너지 변환과정에서 에너지 손실 및 부산물에 의한 환경오염등의 문제점을 가진 반면, 연료전지는 물의 전기분해의 역반응으로서 연료의 화학적 에너지를 전기화학 반응을 통하여 직접 전기로 전환하는 발전 방식으로, 공기중의 산소를 활용하며, 수소를 연료로 사용하여 하나의 에너지 변환단계에서 전기를 얻을 수 있다는 점에서 기존의 발전과는 에너지 변환효율 및 환경오염 측면에서 주목받는 발전방식으로 대두되고 있다.

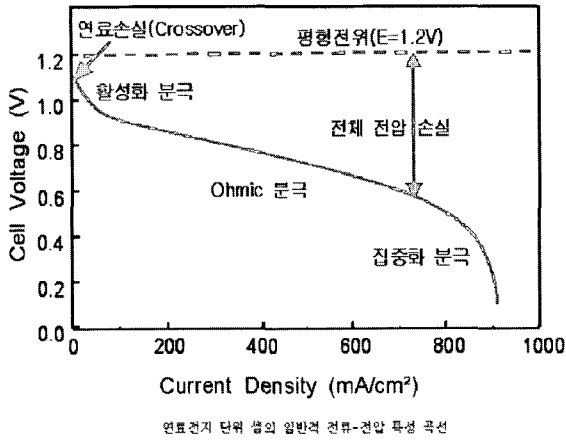
본 원고에서는 이러한 연료전지 발전시스템의 발전 전력을 기존 전력 계통에 공급하기 위해 연료전지 발전 출력을 기존 전력 계통에 적합한 형태, 즉 상용주파수의 교류 전력으로 변환하고 적정 전력품질을 유지하며 부하 공급량을 조절하는 등 분산형 전원의 계통 연계 운전시 요구되는 성능 및 기술적 고려 사항등에 대해 소개하고자 한다.

2. 발전용 연료전지의 출력 특성 및 전력 변환 방식

연료전지는 음극(수소가 공급되어 전자가 발생되는 연료극), 양극(산소와 전자가 결합하여 물이 생성되는 공기극)과 두 전극사이의 전해질로 이루어진 단위 전지(셀)를 여러층 적층한 연료전지 스택의 형태로 구성되며, 그 출력 특성은 단위 전지의 출력 특성에 따라 결정된다.

연료전지 셀에 나타나는 전압강하 즉 손실의 주요 요소로는, 두 전극사이에서 이온만 통과하여야 할 전해질을 통해 극미량의 연료가 통과하여 전기 생산에 기여하지 못함으로써 발생하는 연료손실(Crossover 또는 Internal Current), 전극 표면에서 전하를 이송하여 화학반응을 일으키도록 하는데 전압의 일정 부분이 사용되어 발생하는 손실(활성화 분극), 전극에서의 전기저항과 전하가 전해질을 통과하면서 나타나는 저항성분에 의한 손실(오姆 분극), 전극에서의 반응물의 집중도가 감소하게 되면서 반응물(전하, 이온)을 전극표면으로 원활하게 전달하지 못하게 되어 나타나는 전압 강하(집중화 분극)등이 있으며, 이러한 손실 요인으로 이론적으로 얻을 수 있는 전압보다 낮은 범위에서 다음과 같은 전압-전류 특성을

보인다. 연료전지의 단위셀에서 전기화학 반응을 통해 발생하는 단위셀 전압과 전극의 단위면적당 발생하는 전류밀도의 관계 곡선으로 연료전지 운전 특성을 나타낸다.



이와 같은 특성의 단위전지를 직렬 적층하여 구성된 연료전지는 수십에서 수백Volt의 저전압과 수천Ampere까지의 대전류를 직류 형태로 출력하게 되며, 부하량에 따라 운전 범위가 큰, 즉 전압 변동폭이 큰 운전을 하게 되어, 저전압 고전류 직류에 대한 고효율 전력변환과 큰 전압 변동에 대해 안정되게 운전할 수 있는 전력변환 기술이 필요하게 된다.

연료전지 발전 시스템의 계통 연계 운전을 위해서는 연료전지의 저전압 출력을 승압하고 운전점 변화에 따른 직류 전압 변동을 일정 직류 전압으로 변환해 주는 직류-직류 변환기(이하 DC-DC 컨버터)와 그 적정 크기로 승압된 직류를 기존 전력 계통의 공칭 전압 크기와 주파수, 적정 전력품질을 갖는 교류 형태로 변환해 주는 직류-교류 변환기(이하 DC-AC 인버터)를 통한 전력 변환(Power Conditioning) 과정이 필요하다.

발전용 대용량 연료전지 시스템의 경우 3상변환을 통한 계통 주입이 일반적이고, 연료전지의 저전압-대전류 전력 변환

을 위해 DC-DC 컨버터의 직병렬 구성을 일반적으로 사용하며, 연료전지와 계통간의 절연 방식에 따라 직류측 절연 방식과 교류측 절연방식으로 구분할 수 있는데 그 일반적 형태는 그림 1과 같다.

직류측 절연 방식은 DC-DC 컨버터의 고주파 변압기를 통한 절연 방식으로 출력단을 설계에 따라 직병렬 구성이 가능하여 고압 직류 출력 전압을 구현할 수 있기 때문에 대용량 구현이 용이한 장점이 있는 반면, 전력변환 시스템 가격 상승 및 고효율 구현이 상대적으로 어렵다.

교류측 절연방식은 통상 Boost converter 방식을 채택하여 승압하고, 인버터 후단의 상용주파수 변압기를 통해 절연하는 방식으로, 입력전압의 승압 비율이 다소 제한적으로 비교적 낮은 출력 직류전압을 교류로 변환함에 따라 인버터에서의 손실이 상대적으로 증가한다.

따라서, 연료전지의 출력 전압의 크기에 따른 적정 전력변환기(이하 PCS, Power Conditioning System)의 회로 방식에 대한 연구가 이루어져야 하며, 저전압에서 고평량 구현을 위한 전력용 반도체 소자의 선정이나 효율, 가격, 크기 등이 종합적으로 검토되어야 한다.

3. 분산형 발전시스템의 계통 연계 운전

지금까지는 규모의 경제성이 있는 대규모 집중형 발전 방식에 의한 전력 공급이 보편적이었으나, 급격한 에너지 사용 증대와 환경오염에 대한 우려가 증가함에 따라, 운전 효율 및 환경적 측면에서 집중형 발전 방식의 문제점을 보완하기 위한 하나의 대안으로 수용가에 근접한 분산 발전시스템에 의한 분산형 전원의 활용이 대두되고 있으며, 집중형 발전시스템의 공급 부족을 분산형 발전시스템을 통해 해결하고자 하는 노력이 이루어지고 있다

분산형 발전시스템은 집중형 발전시스템에 비해 소용량으로 수용가 근처에 설치하게 되므로 송배전 비용이 크게 감소하고, 대용량 고온형 연료전지의 경우 발전시 발생하는 배열

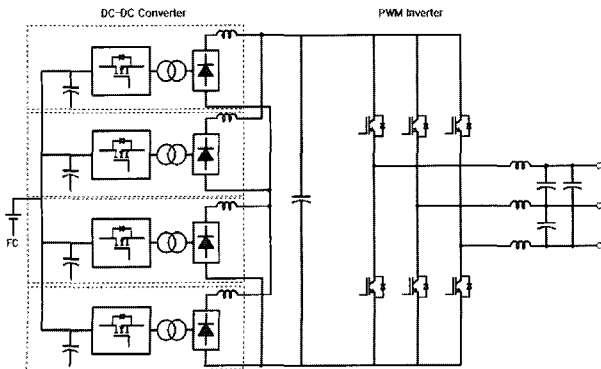


그림 1 직류측 절연 방식의 전력변환기

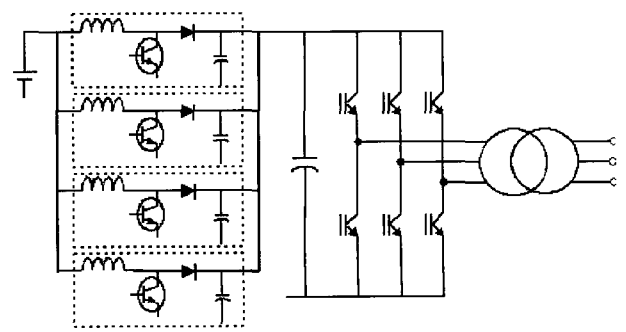


그림 2 교류측 절연 방식의 전력변환기

을 이용하여 열병합 발전이 가능하므로 고효율의 발전효율을 기대할 수 있으며, 또한 전력 계통망이 공급하지 못하는 원격지에서의 단독 운전 및 비상용 전원등으로의 활용도 가능하다.

국가적으로도 연료전지를 포함한 신·재생에너지에 의한 발전 비율 확대 계획을 가지고 있으며, 고효율 환경친화적인 분산형 발전 시스템으로의 적용이 기대되고 있다.

이러한 분산형 발전시스템을 기존 전력 계통에 연계하여 운전하기 위해서는 기존 전력 계통과 동일한 전력품질을 유지하고 계통에 능동적 영향을 주지 않기 위한 여러 운전 제어 기법이 필요하며, 주요 기술적 고려 사항에 대한 내용은 다음과 같다.

3.1 계통과의 동기화 및 연계

분산형 발전 시스템의 전기적 최종 출력단이라고 할 수 있는 PCS는 계통 연계전 먼저 독립 운전(Stand alone)로 방식으로 동작하게 되고, 계통과 연계하기 위해서는 계통의 전압을 감시하여 PCS 출력전압의 위상과 전압크기를 동기시켜

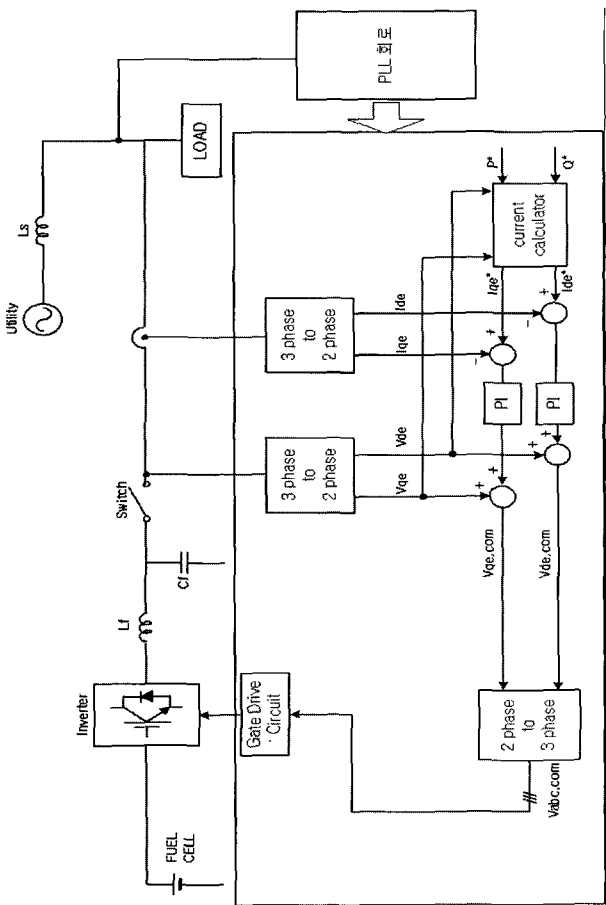


그림 3 계통 연계시 전력 제어 블록도(예)

야 하며, 이를 위해 독립 운전 상태에서 PLL(Phase-Lock Loop)을 통해 계통 전압과 위상이 동기된 인버터 출력 전압을 생성하고 계통 전압의 크기와 동일한 전압으로 제어하게 된다.

계통 연계후에는 더 이상 연계점에 대한 계통 전압을 능동적으로 제어하지 않고 계통에 전력 공급을 위한 제어를 하게 되는데, 출력 전류 제어 방식 보다는 계통의 외란 발생시 연료전지측의 출력 특성에 영향이 없도록 하고 과도 현상을 줄이기 위해 계통 전압에 따른 일정 전력 제어를 하는 것이 바람직한 것으로 생각되며, 그림 3에 계통 연계 제어에 대한 예시를 나타내었다.

계통 연계후 운전 과정에서 계통에 순간 전압 상승이나 순간 전압 강하등 외란 발생시에도 인버터의 출력 전력에는 변동이 없도록 하여야 연료전지의 출력 전력에 대한 변동이 최소화 되어 연료전지 전압-전류 특성 곡선에서의 운전점이 부하 변동에 영향을 받지 않게 된다.

PCS 출력의 계통 동기화를 통한 분산형 발전 시스템의 계통 연계 과정에서 계통과의 정확한 동기화가 이루어지지 않을 경우, PCS 출력 전압과 계통 전압의 위상각 오차에 의해 계통측과 PCS간에 순간 과전류 발생등의 문제를 경험하게 되며, 그 현상에 대한 예를 그림 4에 나타내었다.

이 현상은 PCS 제어기 내부의 인버터 출력 전압 위상의 기준이 되는 PLL (Phase-Lock Loop) 회로에서의 시간 지연 등이 문제가 되며, 위상 지연을 보상하는 등의 해결이 필요하다.

다음은 계통 동기화와 관련하여 분산형 전원 발전설비와 연계하고자 하는 계통사이의 주요 제한 변수의 관리치를 나타내고 있다.

3.2 전압 변동 및 주파수 관리

분산형 발전시스템의 계통 연계후 연계점에서 발생할 수 있

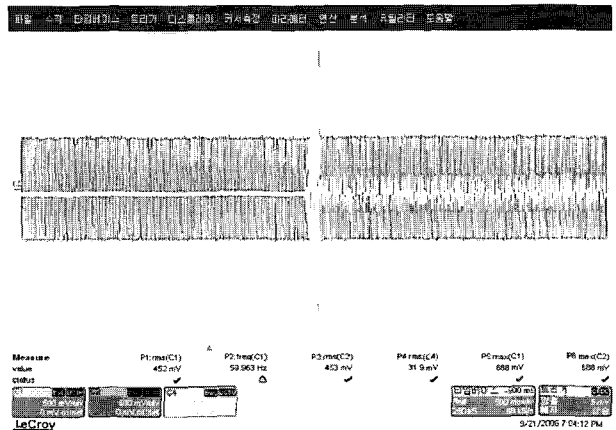


그림 4 계통연계시 순간과전류 발생 문제

표 1 분산형 전원 연계시 주요 제한 변수(한국전력공사 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준)

발전용량 합계 (kVA)	주파수 차 (Δf , Hz)	전압 차 (ΔV , %)	위상각 차 ($\Delta \theta$, °)
0~500	0.3	10	20
500~1,500	0.2	5	15
1,500~10,000	0.1	3	10

표 2 계통 이상전압 발생시 분산형 전원 분리 (한국전력공사 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준)

전압 범위 (기준전압에 대한 비율 %)	고장 제거 시간 (초)
$V < 50$	0.16
$50 \leq V \leq 88$	2.00
$110 < V < 120$	2.00
$V \geq 120$	0.16

표 3 분산형 전원의 고조파 전류 왜형률 (한국전력공사 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준)

고조파 차 수	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	TDD
비율	4.0	2.0	1.5	0.6	5.0

는 전압 저하(Sags), 전압 상승(Swells), 서지(Surge), 소음(Noise) 등의 전압 변동과 계통의 공칭주파수(50Hz 또는 60Hz)를 벗어나는 경우, 분산형 발전시스템을 전력 계통으로부터 분리시켜야 하며, 그 관리 범위는 다음과 같다.

3.3 전력품질 관리

일반적으로 고조파(harmonics)란 기본 주파수(50Hz 혹은 60Hz)의 정수배의 주파수를 갖는 정현파 전압 혹은 전류를 말하며, 변형 원인은 기본적으로 전력기기의 비선형 특성(자속의 포화특성 등)에 기인하고, 분산형 발전시스템의 PCS는 DC-AC 인버터를 사용한 것이 많은데, 이 변환기가 고조파의 발생원이 될 수 있으며, 계통 연계시 관리의 대상이 된다.

상기 TDD(Total Demand Distortion)는 다음과 같이 정의된다.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad [\%]$$

I_h : 각 차수의 고조파 전류 크기,

h : 고조파 차수, I_L : 최대 부하 전류

이와 더불어, 분산형 발전시스템의 계통 연계점에서는 역률 제어(90%이상), 직류 전류 계통 유입 제한(정격 최대 전류의 0.5%이하)등 전력품질 관리에 대한 기술적 고려를 해야 한다.

3.4 단독 운전 방지

전력 계통의 사고 발생시 사고점에서 가장 가까운 보호계전기, 차단기 등에 의해 제거되는데, 전력계통에서 분리된 일부 배전계통에 분산형 발전설비가 연계되어 운전중일 경우, 해당 분산형 발전 시스템이 분리된 계통의 전부하를 담당하게 된다. 대부분의 경우 해당 분산형 전원은 과부하 상태가 되어 전압이나 주파수를 저하시켜 정지하게 되지만, 이 분리된 고립계통에 접속된 분산형 발전설비가 계속하여 전력을 공급할 능력이 있는 경우 전력회사에서 공급되는 전력이 정지되더라도 분산형 전원만으로 부하에 계속 공급하는 상태가 되고, 이를 '단독운전'이라 한다.

단독운전상태가 계속되면 점검·복구 작업자가 위험에 노출되고, 분산형 전원의 전력품질이 전력회사에서 공급되는 경우에 비해 떨어지는 경우 부하에 악영향을 미치며, 사고 복구를 위해 일정한 시간 후 변전소 등의 차단기·개폐기를 재투입하려 할 때, 단독운전이 계속되고 있으면 비동기 투입이 이루어져 사고가 확대되고 오히려 사고복구가 늦어지게 된다.

따라서, 분산형 발전시스템의 계통 연계 운전 제어시 계통 사고를 검출하고, 접속점에서 발전시스템을 분리할 수 있도록 단독운전 방지 기능을 갖추어야 한다.

4. 결론

발전용 연료전지 시스템의 계통 연계 운전과 관련하여 수소를 연료로 하는 신재생에너지원인 연료전지의 전기적 출력 특성 및 그 특성에 적합한 대표적 전력변환 방식에 대해 알아 보고, 연료전지 발전시스템을 포함한 분산형 전원 설비를 기존 전력계통과 연계하여 운전하기 위해 필요한 주요 기능 및 계통 운전자가 요구하고 있는 여러 제한들에 대해 간략히 소개 하였다.

발전용 대용량 연료전지 시스템의 전기적 출력 특성에 적합한 고효율, 저가격, 소형 PCS(전력변환기)에 대한 지속적 연구가 필요하며, 점차 늘어날 것으로 기대되는 분산형 발전 설비의 계통 연계 운전에 대한 제어기법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있어, 향후 환경친화적인 신재생에너지원을 이용한 분산형 발전시스템들의 신뢰성 향상 및 보급 확대를 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] 임희천, "100kW급 용융탄산염형 연료전지 발전시스템 개발" 전기저널 pp.17-27, 7월, 2000.
- [2] "100kW급 연료전지용 전력변환 기술 개발", (주)효성 중공업연구소 보고서, 2004.
- [3] "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", 한국전력공사 기술기준.
- [4] "250kW급 열병합 용융탄산염형 연료전지 Prototype 개발", 한전 전력연구원 중간보고서, 2005.
- [5] 후나바시토시히사, "분산형 전원계통 연계시의 기술적 과제와 그 대책", (주)메이덴사.

〈 저 자 소 개 〉



서인영(徐仁榮)

1967년 5월 20일생. 1990년 한양대 전기공학과 졸업. 2000년 University of Texas at Austin 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)효성 중공업연구소 수석연구원.