

연료전지시스템용 전력변환 기술

서인영*, 정홍주**, 이정민**

(효성 중공업연구소 *수석연구원, **책임연구원)

1. 서론

화석에너지의 가채량 제한과 지구 온난화 및 공해 문제 그리고 NIMBY 현상 등으로 무한에너지이며 청정에너지인 대체에너지로의 관심이 점점 고조되고 있다. 특히 대체에너지 중에서 수소에너지를 이용하는 연료전지 발전시스템은 고효율과 다연료를 이용할 수 있다는 장점 때문에 신 발전 방식들 중에서 적용 가능성이 높은 것으로 인식되고 있다.

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.

본 원고에서는 이러한 연료전지의 발전전력을 기존 전력계통에 안정되고 효율적으로 공급하기 위해 요구되는 전력변환기의 성능 및 기술적 고려 사항 등에 대해 소개하고자 한다.

2. 발전용 연료전지의 출력특성

연료전지는 양극(수소가 공급되어 전자가 발생되는 연료극), 음극(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.

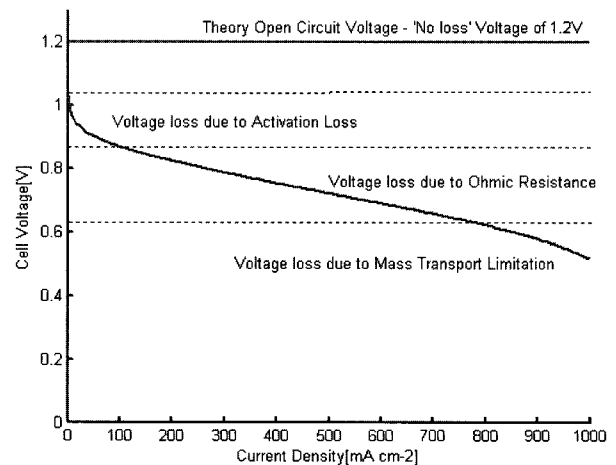


그림 1 연료전지 단위 셀의 전류-전압 특성 곡선

연료전지 셀에 나타나는 전압강하 즉 손실의 주요 요소로는, 전극 표면에서 전하를 이송하여 화학반응을 일으키도록 하는데 전압의 일정 부분이 사용되어 발생하는 손실(활성화 분극, Activation Loss), 전극에서의 전기저항과 전하가 전해질을 통과하면서 나타나는 저항성분에 의한 손실(오姆 분극, Ohmic Resistance Loss), 전극에서의 반응물의 집중도가 감소하게 되면서 반응물을 전극표면으로 원활하게 전달하지 못하게 되어 나타나는 전압 강하(집중화 분극, Mass Transport Limitation) 등이 있으며, 이러한 손실 요인으로 부하전류에 따른 전압변동폭이 큰 특성을 갖는다. 그림1과 같이 연료전지의 단위셀에서 전기화학 반응을 통해 발생하는 전압과 전극의 단위면적당 발생하는 전류밀도의 관계를 곡선으로 나타낼 수 있다.

이와 같은 특성의 단위전지를 직렬 적층하여 구성된 연료전지는 수십에서 수백 Volt의 저전압과 수천 Ampere까지의 대전류를 직류 형태로 출력하게 되며, 부하량에 따라 전압 변동폭이 큰 운전이 하게 되어, 저전압 고전류 직류에 대한 고효율 전력변환과 큰 전압 변동에 대해 안정되게 운전할 수 있는 전력변환 기술이 필요하게 된다.

3. 발전용 연료전지의 전력변환 기술

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

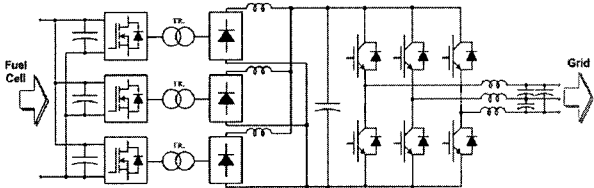


그림 2 대용량 고주파 절연방식

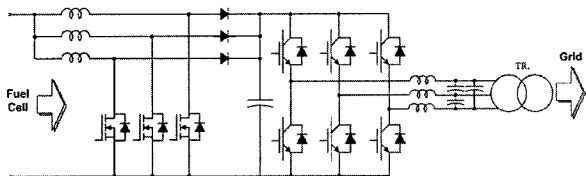


그림 3 대용량 상용주파 절연방식

필요하다.

3.1 전력변환기의 토폴로지

발전용 대용량 연료전지 시스템의 경우 연료전지의 저전압-대전류 전력 변환을 위해 DC-DC 컨버터의 직병렬 구성을 일반적으로 사용하며, 연료전지와 계통간의 절연 방식에 따라 고주파 절연방식과 상용주파 절연방식으로 구분할 수 있으며 인버터는 일반적으로 그림 2, 그림 3과 같이 3상 인버터 방식을 채택한다.

대용량 고주파 절연방식은 DC-DC 컨버터의 고주파 변압기를 통한 절연방식으로 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.

대용량 상용주파 절연방식은 대용량화 및 입력전류 리플을 줄이기 위해 다상 Boost 컨버터 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.

발전용 소용량 연료전지 시스템의 경우에는 단일 DC-DC 컨버터를 통하여 연료전지의 낮은 입력전압을 승압시키고, 단상 인버터를 통하여 계통과 연계시킨다. 대용량과 마찬가지로 연료전지와 계통간의 절연방식에 따라 고주파 절연방식과 상용주파 절연방식으로 구분할 수 있으며, 일반적인 토폴로지는 그림 4, 그림 5와 같이 구성된다.

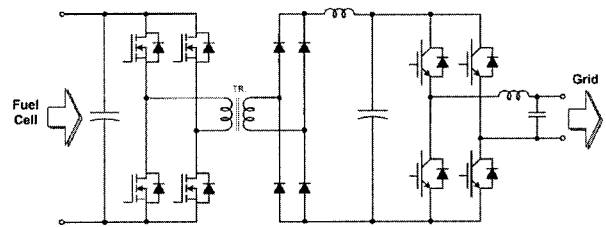


그림 4 소용량 고주파 절연방식

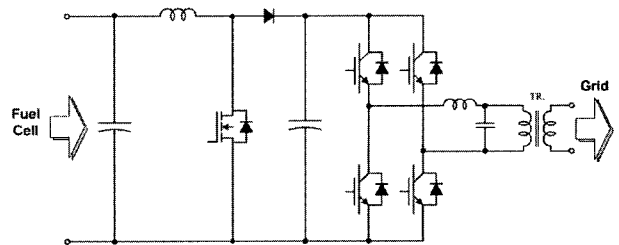


그림 5 소용량 상용주파 절연방식

소용량 고주파 절연방식은 단일 DC-DC 컨버터의 고주파 변압기를 통한 절연방식으로 입력전원을 전압원과 전류원에 따라 구성 토폴로지를 나눌 수 있으며, 그림 4와 같은 Full-Bridge방식, Half-Bridge방식, Push-Pull방식이 있다. 스위칭 주파수를 높여 고주파 변압기와 인덕터를 소형 경량화할 수 있는 장점이 있는 반면, 고압 직류 출력 전압을 구현하기 위해 고주파변압기의 변압비가 높아 제작 상에 어려움이 있고, 고효율화 구현이 상대적으로 어렵다.

소용량 상용주파 절연방식은 단일 Boost 컨버터방식을 채택하여 승압하고, 대용량과 동일하게 인버터 후단의 상용주파수 변압기를 통해 절연하는 방식이다. 단일 스위치를 사용하는 Boost컨버터 방식은 컨버터의 손실이 비교적 낮고 구현이 용이한 반면에 상용주파수 변압기의 크기나 무게가 고주파 변압기에 비해 높기 때문에 소형 경량화가 어렵고, 낮은

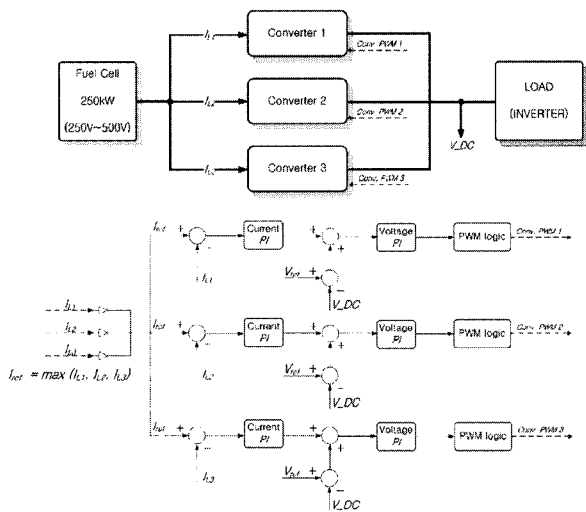


그림 6 DC-DC 컨버터 제어블럭도

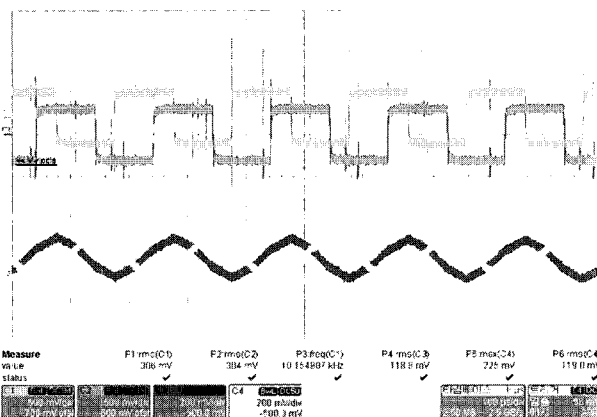


그림 7 DC-DC 컨버터 스위칭 및 인덕터 전류

출력 직류전압을 교류로 변환함에 따라 인버터에서의 손실이 상대적으로 증가하는 단점을 갖는다.

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

3.2 DC-DC 컨버터 제어

발전용 대용량 연료전지 시스템의 경우 저전압, 대전류 특성을 고려하여 승압형인 부스트 컨버터를 병렬로 구성하고 입력 전류리플 저감을 위해 Interleaved Switching방식을 적용한다.⁽⁶⁾

기존의 출력 전압 제어만을 구현했을 경우, 다상 부스트 컨버터의 인덕터 전류 불균형이 발생할 수 있고 이러한 전류 불균형은 전력 불균형을 야기시키고, 또한 전력변환기의 효율 저하 및 신뢰성에 심각한 문제를 발생 시킬 수가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 컨버터 각 상의 인덕터 전류와 출력 전압을 동시에 제어할 수 있도록 그림 6과 같이 다상 부스트 컨버터의 제어방식이 필요하다.

그림 7은 다상 부스트 컨버터의 스위칭 신호와 인덕터 전류파형을 나타낸다. 부스트 컨버터 3대가 병렬로 연결된 경우 컨버터의 각 스위칭 신호는 120° 위상차를 가지고 동작하므로 각 컨버터의 인덕터 전류는 120° 위상차를 가진 전류로 출력됨을 확인할 수가 있다. 따라서 컨버터의 입력측 전류는 3개의 인덕터 전류로 인해서 전류리플이 저감된 효과를 얻을 수가 있다. 그림 7에서는 3상 중 2상의 파형을 나타내고 있다.

3.3 DC-AC 인버터 제어

분산형 발전시스템을 기존 전력 계통에 연계하여 운전하기 위해서는 기존 전력 계통과 동일한 전력품질을 유지하고 계통에 능동적 영향을 주지 않기 위한 여러 운전 제어 기법이

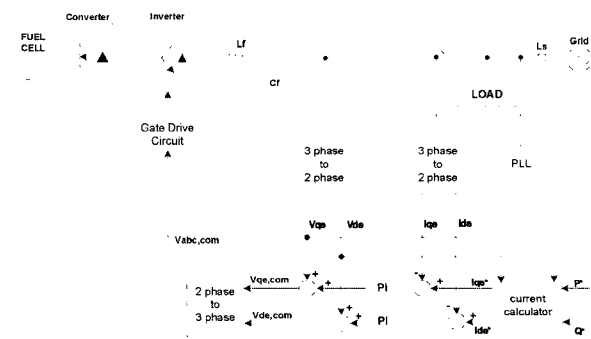


그림 8 계통연계 시 인버터 제어블럭도

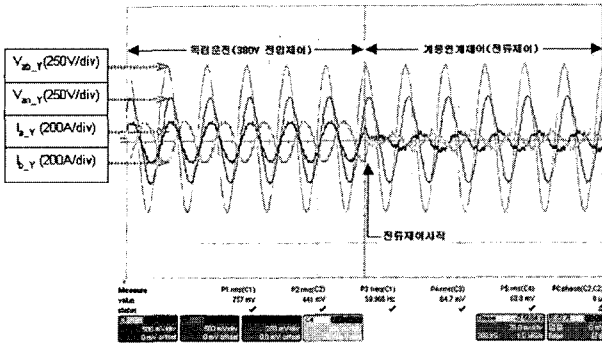


그림 9 독립운전에서 연계운전으로 전환

표 1 분산형 전원의 고조파 전류 왜형률^[3]

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

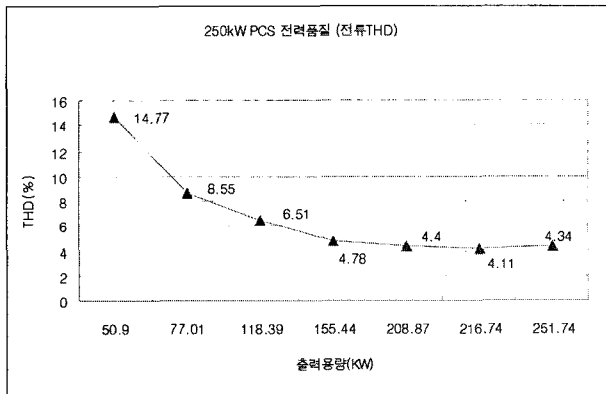


그림 10 250kW PCS 전력품질곡선(전류THD)

필요하다.

연료전지용 PCS에서의 DC-AC 인버터 제어는 계통연계 전 먼저 독립운전(Stand alone)방식으로 동작하게 되고, 계통과 연계하기 위해서는 계통의 전압을 감시하여 인버터 출력전압의 위상과 전압크기를 동기시켜야 하며, PLL(Phase Lock Loop)을 통해 계통전압과 위상이 동기된 인버터 출력 전압을 생성하고 계통 전압의 크기와 동일한 전압으로 제어 하게 된다. 계통연계 후 제어방식은 3상-2상 좌표변환과 d-q 동기좌표계를 이용한 제어방식을 채택하며 그림 8은 인버터의 제어기구성을 나타낸다.

계통 연계 후 운전 과정에서 계통에 순간 전압 상승이나 순

간 전압 강하등 외란 발생 시에도 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.

그림 9는 계통연계 시 인버터 출력전압의 크기와 위상을 동기시킴으로써 과전류가 발생하지 않고 연계가 되고 있음을 알 수가 있다.

분산형 발전시스템의 경우 계통연계 시 표 1과 같이 전력품질에 대한 규제를 적용하고 있으며, 요구되는 TDD(Total Demand Distortion)는 5%이하이다. 그림 10은 당사에서 개발한 250kW급 연료전지용 전력변환기의 THD(Total Harmonic Distortion) 결과이다.

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

4. 결론

발전용 연료전지 시스템에서 수소를 연료로 하는 신재생에너지원인 연료전지의 전기적 출력 특성 및 그 특성에 적합한 대표적 전력변환 방식에 대해 알아보고, 전력변환기의 주요 기술 및 제어방식에 대해 간략히 소개 하였다.

연료전지용 PCS(전력변환기)는 고효율, 고전력품질, 저가 격화를 위해 지속적인 연구가 필요하며, 향후 환경친화적인 신재생에너지원을 이용한 분산형 발전시스템의 신뢰성 확보 및 보급 확대에 기여할 수 있기를 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] 최세완, "연료전지 발전 시스템에서의 전력전자기술", 전력전자학회지, 제8권, 제4호, pp. 30~35, 2003. 8
- [2] 정홍주, 이정민, 정준모, 서인영, "250kW급 연료전지용 전력변환기 개발", 전력전자 하계학술대회 논문집, pp. 185~187, 2006. 6.
- [3] "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", 한국전력공사 기술기준
- [4] "250kW급 열병합 용융탄산염형 연료전지 Prototype 개발", 한전 전력연구원 중간보고서, 2005.
- [5] R. Giral, L.M.Salamero, S.Singer, "Interleaved Converters Operation Based ON CMC", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol 14, No. 4, pp. 643~652, July, 1999.

〈 저 자 소 개 〉



서인영(徐仁榮)

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



정홍주(鄭泓柱)

1972년 8월 15일생. 1998년 광운대 전기공학과 졸업. 2000년 광운대 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)효성 중공업연구소 책임연구원.



이정민(李政珉)

1973년 9월 17일생. 1997년 건국대 전기공학과 졸업. 1999년 건국대 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)효성 중공업연구소 책임연구원.