

디지털 제어방식의 DC-DC컨버터를 이용한 계통연계형 연료전지발전

주영아*, 한병문*, 차한주**
 명지대*, 충남대**

Grid-tied Fuel-Cell Power Generation using DC-DC Converter with Digital Control

Young-Ah Ju*, Byung-Moon Han*, Han-Ju Cha**
 Myongji University*, Chungnam National University**

Abstract - 본 논문에서는 디지털 제어방식의 DC-DC컨버터를 이용한 계통연계형 전력변환기를 제안한다. 제안하는 전력변환기는 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터와 계통연계형 3상 인버터로 구성되어 있다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 출력 동특성을 나타내는 모델과 제안하는 전력변환기의 모델을 개발하였다. 시뮬레이션모델의 검증이 가능한 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다. 제안하는 전력변환기는 정격출력에서 저전압특성을 갖는 연료전지를 전력계통에 고효율로 연계하는데 유용할 것으로 보인다.

을 적용함으로써 스위치에 흐르는 RMS전류를 저감시키고, ZVS(Zero Voltage Switching)동작을 통한 스위칭 손실 저감에 따른 소부피 고효율을 갖는다.

1. 서 론

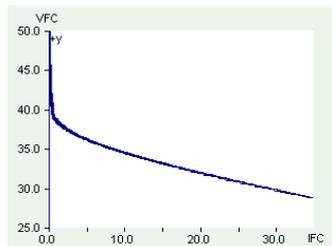
고분자전해질(PEMFC)은 고체고분자막을 이용하여 수소와 산소 연료의 전기화학적 반응을 통해 전기에너지를 생성하고 부산물로 열에너지와 물을 생산하는 발전 형태의 시스템이다.[1] 연료전지(PEMFC)는 친환경적이고 높은 에너지 효율을 가지며 시스템 구축이 용이해 설치장소의 제약이 적고 상시발전이 가능한 장점이 있다. 그러나 분극현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 가지며 수십 볼트의 저전압 출력 특성으로 인해 220V, 60Hz의 전력계통에 연계하여 발전하기 위해서는 반드시 고효율 전력변환기가 요구된다.

본 논문에서는 연료전지발전의 낮은 직류 출력전압을 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터를 사용하여 400V로 승압시키고 이를 DC-AC 인버터로 보내어 60Hz 교류로 변환하는 전력변환기를 제안하였다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 시뮬레이션 모델과 제안하는 전력변환기의 시뮬레이션모델을 개발하였다. 이 시뮬레이션모델의 분석결과를 바탕으로 향후 구성할 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지(PEMFC) 동작원리 및 특성

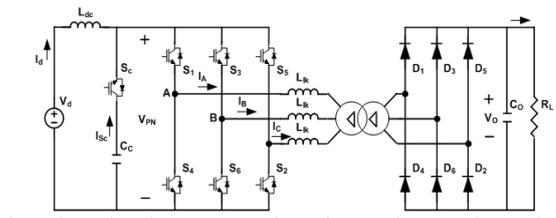
연료전지(PEMFC)는 김스 자유에너지에 의한 Nernst모델을 통해 이상적인 연료전지 전위를 구할 수 있지만 실제 연료전지 출력전압은 평형전위에서 활성화분극(Activation polarization)과 농도분극(Concentration polarization),저항분극(Ohmic polarization)현상에 따른 손실을 뺀 전압으로 비선형적인 특성을 보인다. 이로 인해 정격 전압이 무부하의 약 50%에 달하는 전압 변동이 나타나게 된다. 그 밖에 연료전지는 연료의 압력, 활성화 에너지, 온도, stack단면적, cell 개수 등 연료전지 주변조건에 의해서도 영향을 받는다. 그림 1은 PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지(PEMFC)의 모델링으로서 연료전지 관련 파라미터들을 반영하여 실제 연료전지 출력의 동특성을 확인하였다.



〈그림 1〉 PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지(PEMFC)모델링

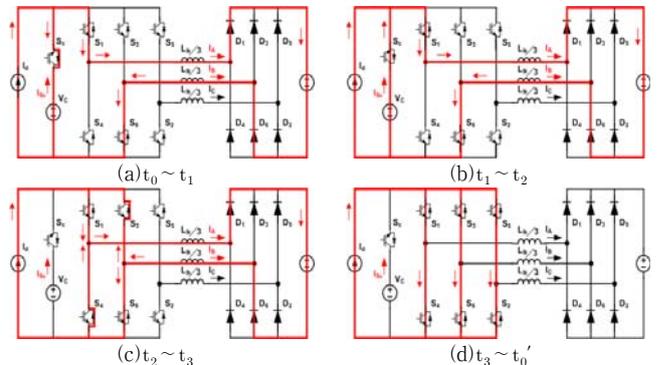
2.2 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터

그림 2와 같이 제안하는 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터는 전류리플에 큰 영향을 받는 연료전지의 특성을 충족시키고 3상 전력변환



〈그림 2〉 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터의 회로도

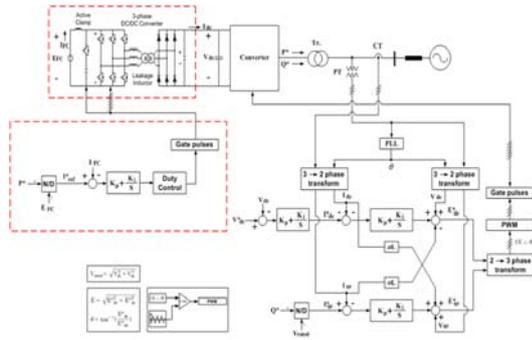
그림 3은 구간별 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터의 동작 모드를 나타낸 것이다. 그림 2에서의 연료전지 출력전압과 부스트 인덕터는 전류원으로 등가화하여 설명하였다. 그림 3(a)는 스위치 S1, S2를 제외한 네 개의 스위치 S3~S6는 Turn Off된다. 이에 따라 브리지전압(V_{br})이 상승하면서 클램프 전압(V_c)으로 클램프된다. 이 시점에서 클램프 전류(I_{sc})의 초기값은 -I_d이다. 누설 인덕턴스(L_{lk})에 흐르는 전류는 클램프 전압(V_c)과 출력전압의 1차측 환상값인 V_o와의 전압차가 누설 인덕턴스(L_{lk})의 관계에 의하여 상승한다. 그림 3(b)는 클램프 전류(I_{sc})는 양의 값으로 바뀌고 클램프 스위치(S_{sc})를 통하여 흐른다. 이 구간에서 클램프 전류(I_{sc})는 계속 증가하고 있는 변압기 1차측 a상 전류(I_a)와 입력 전류(I_d)와의 차이만큼 공급한다. 변압기 1차측 a상 전류(I_a)는 입력 전류(I_d)와 클램프 전류(I_{sc})의 합이므로 2I_d까지 상승한다. 그림 3(c)는 t₂에서 능동 클램프 스위치(s_{sc})가 Turn Off된다. 이 때 변압기 누설 리액턴스에 축적된 에너지에 의하여 스위치 S3, S4의 커패시터가 방전되면서 브리지전압(V_{br})은 영전압이 되고 역다이오드가 도통되면서 스위치 S3, S4는 ZVS Turn On된다. 그림 3(d)는 t₃에서 변압기 1차측 a상 전류(I_a)는 0으로 감소한다. 6개의 스위치 모두 Turn On되고 부스트 인덕터는 에너지를 축적한다. 이와 구간동작은 같은 패턴으로 반복하게 된다.[2]



〈그림 3〉 구간별 동작 모드

2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에서 제안한 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터를 이용하여 연료전지발전을 전력계통과 연계하여 효율적인 전력공급이 가능한가를 확인하기 위하여 C 인터페이스를 이용한 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 수행하였다.

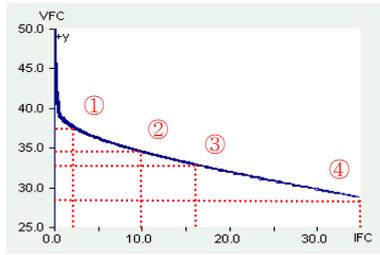


<그림 4> 전체 시스템의 구성도

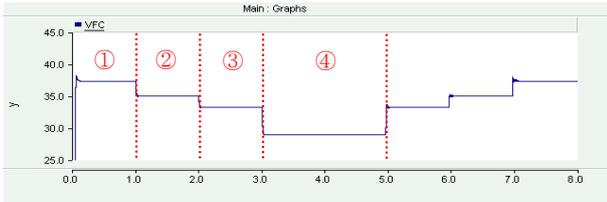
그림 4는 연료전지발전용 계통연계시스템의 제어기를 포함한 시스템 구성도이다. 제어기는 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터의 제어부와 DC-AC 계통연계인버터의 제어부로 나눌 수 있다. DC-DC컨버터 제어부는 유효전력 P 레퍼런스(P^*)를 연료전지 출력전압(V_{FC})으로 나눠 연료전지 전류 레퍼런스(I^*_{ref})를 생성한다. 이를 연료전지 출력전류(I_{FC})와 PI제어기를 통해 duty를 제어하게 되고 6개의 스위치와 1개의 클램프 스위치로 게이트 펄스를 인가하는 방식으로 유효전력 제어를 수행한다. 그리고 DC-AC 계통연계인버터 제어부는 3상 계통 전압/전류를 센싱받아 기준위상 Θ 를 설정하여 d-q변환을 수행한다. DC 커패시터 전압 400V 레퍼런스와 실제 DC 커패시터 전압을 PI제어기를 통해 d축 전류 레퍼런스를 생성한다. 이는 DC 커패시터 전압 제어를 수행하게 되고 q축 전류와 d-q변환한 전압/전류를 입력으로 전류제어를 수행한다. d-q축 기준전압을 생성하고 역변환과 PWM 펄스생성을 통해 인버터 6개의 스위치에 게이트 펄스를 인가한다.

<표 1> 시뮬레이션 시나리오

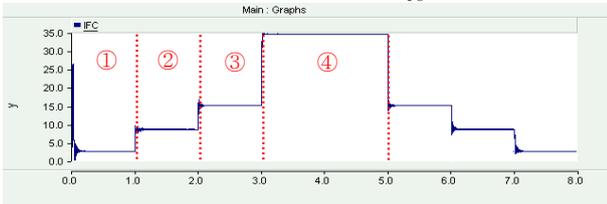
시간[s]	0~1 ^①	1~2 ^②	2~3 ^③	3~5 ^④	5~6	6~7	7~8
P[W]	100	300	500	1000	500	300	100



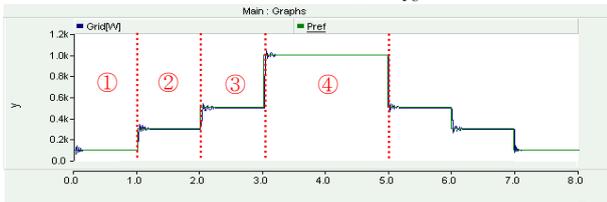
(a) 연료전지 출력 V-I 곡선



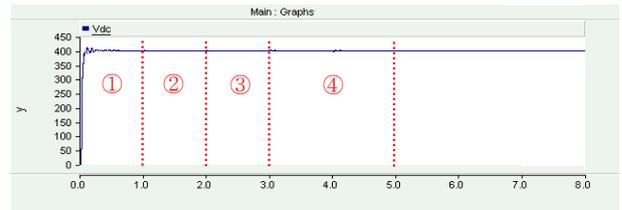
(b) 연료전지 출력전압(V_{FC})



(c) 연료전지 출력전류(I_{FC})



(d) 출력 유효전력(P_{Grid})



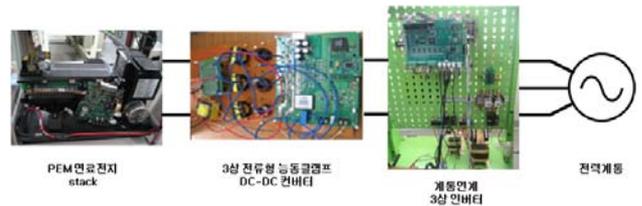
(e) DC 커패시터 전압(V_{dc})

<그림 5> 시뮬레이션 결과 파형

표 1과 같이 시뮬레이션한 결과 그림 5의 결과 파형을 얻었다. 그림 5(a)는 앞에서 언급한 연료전지(PEMFC)의 모델링이다. 그림 5(a)에 ①~④표시한 것과 같이 유효전력이 증가함에 따라 연료전지 출력 전압 및 전류의 동작점을 변동되고 있음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 모델링한 연료전지(PEMFC)의 출력전압(V_{FC})의 변동을 나타낸 것으로, 유효전력의 변동에 따라 동작전압이 변동함을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 연료전지의 출력전류(I_{FC})가 변동함을 나타낸 것인데, 연료전지 출력전압과 마찬가지로 유효전력이 변동함에 따라 동작점이 달라짐을 알 수 있다. 그림 5(d)는 전력계통으로 출력되는 유효전력의 추종특성을 나타낸 파형이다. 실측 유효전력은 안정화되는데 까지 0.5초 미만의 과도현상을 보이지만 곧 기준값을 추종함을 나타내 유효전력의 제어가 잘 수행됨을 알 수 있다. 그림 5(e)는 DC 커패시터의 전압을 나타낸 것이다. 유효전력의 변동에도 불구하고 400V로 일정하게 유지되어 전압 제어가 잘 수행됨을 알 수 있다.

2.4 하드웨어 제작 설계

본 연구를 검증하기 위하여 그림 6과 같이 하드웨어 구축 계획을 갖고 있다. 먼저 하드웨어제작에 사용될 연료전지는 PEMFC타입으로서 모델명은 Ballard Nexa Power Module System이고 1.2kW의 정격 출력을 갖는다. 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터는 3상 PWM패턴을 계산하는 DSP제어기, FPGA(EPM7128), 게이트 드라이버, 3폴의 하프 브리지와 클램프 브리지가 장착된 4개의 히트 싱크 및 3상 고주파변압기로 설계하였다. 계통연계인버터를 동작시키기 위한 제어보드는 Texas Instrument사의 실수형 DSP인 TMS320vc33-150와 Altera사의 EP1K100QC208로 구성되어 있다. 계통연계인버터는 PT 및 CT의 계측기를 통해 계통 3상 전압 및 전류 그리고 DC 커패시터 전압 및 전류를 측정하여 디지털 제어를 수행하게 된다.



<그림 6> 하드웨어 구성도

3. 결 론

본 논문에서는 고효율 계통연계형 연료전지발전용 시뮬레이션 모델에 대해 기술하였다. 1kW의 전력을 고효율로 전력계통에 출력하기 위한 전력변환기로서 디지털 방식의 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터를 제안하였고, 3상 범용 인버터를 연계하여 전체 시스템을 개발하였다. 이는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 및 실험결과를 분석하였고 이 모델을 바탕으로 향후 구성할 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다.

본 연구 결과의 분석을 통해 계통연계형 연료전지발전시스템의 운용과 더불어 DC급전과 스마트그리드에 적용하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 논문은 지식경제부(과제번호 R-2007-1-105-03)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다

[참 고 문 헌]

- [1] Gregor Hoogers, "FUEL CELL TECHNOLOGY HANDBOOK", CRC Press, 2003
- [2] 차한주, 최경완, 윤기갑, "연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC-DC컨버터", 전력전자학회, 12-6-4, 2007