

멀티페이즈 컨버터 기반 3kW급 연료전지용 계통연계 PCS 개발

한동화*, 최규하*, 채영민**, 조준석**, 임정민**

*건국대학교, **(주)이이시스

Development of Multi-Phase Converter based Utility-Interactive PCS for 3kW Fuel Cell System

Donghwa Han*, Gyuha Choe*, Youngmin Chae**, Junseok Cho**, Jungmin Lim**

*Kunkuk University, **EESYS

ABSTRACT

본 논문은 연료전지를 이용한 가정용 발전시스템의 계통 연계를 위한 3kW급 전력변환 시스템의 개발에 관한 것이다. 저전압 대전류 출력특성을 갖는 연료전지의 전류리플 최소화를 위해 멀티페이즈 컨버터를 적용한 DC/DC 승압 컨버터를 제안하고자 한다. 특히 고밀도 전력변환 시스템의 스위칭 손실 극소화를 위해 고효율 ZVS Soft-Switching 동작을 구현하였다. 또한 본 연구에서는 높은 승압비로 변환된 전압을 통해 계통운전 동작을 수행하기 위한 DC/AC 단상 인버터와 고효율 무결점 기능을 갖는 디지털 방식의 DSP를 적용한 제어기 개발도 병행하여 수행되었다. 제안하는 3kW급 멀티페이즈 컨버터 및 계통연계형 인버터의 Proto-Type을 제작하고 실험을 통해 본 방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

산업발달과 함께 화석에너지의 고갈 및 온실가스 문제가 대두되면서 에너지에 대한 관심이 높아지며 무공해 청정에너지의 사용과 에너지 고 효율화에 대한 연구들이 끊임없이 수행되어 오고 있다. 특히 대체 에너지 개발을 통한 소규모의 발전설비에 대해서 세계적으로 큰 관심이 집중되고 있으며, 그 중에서 연료전지 발전시스템이 현실적인 대안으로 주목을 받고 있다. 반면에 고밀도 연료전지 발전시스템의 상용화를 위해서 필수적으로 필요한 연료전지용 전력변환 전원장치의 시스템 변환효율은 최소 90[%]이상을 달성해야 경제성을 갖는다.

특히 연료전지가 가지고 있는 낮은 임피던스 형태의 저전압 대전류 출력특성으로 인하여 기존의 풀-브리지 및 푸쉬-풀 방식의 컨버터의 경우 스위칭 고주파 리플전류의 증가에 의한 연료전지 출력 안정화 및 이용률의 감소를 초래하는 문제점을 야기한다.

본 논문에서는 연료전지 출력전류의 안정화를 위해 멀티페이즈 컨버터를 적용하여 다상 컨버터의 위상각을 조절하는 방식으로 스위칭 리플전류를 상쇄시켜 최소화하면 연료전지의 전력변동을 최소화하여 연료전지 정격용량대비 최적 효율운전이 가능해진다. 또한 계통연계형 발전시스템을 제작하고 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 연료전지 발전 시스템 구성

연료전지를 이용한 계통연계형 가정용 3kW급 발전시스템의 전력변환 회로 구성을 보면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 제안된 발전시스템은 3-Leg Half-Bridge 방식의 다상 스위치를 갖는 멀티페이즈 컨버터가 적용되었으며, Y-Y 변압기와 3상 전파정류 회로를 통해 연료전지에서 출력되는 수십[V] 레벨의 저전압 입력을 400[V]급의 고전압으로 승압한다. 한편 승압된 전압은 그림과 같이 단상 Full-Bridge 인버터와 접속되며 PLL에 의한 역율 제어를 통해 계통으로 발전전력을 전달시키는 동작을 수행한다. 특히 3[kW]급 연료전지 시스템의 실증시험을 위해서 개질기를 포함한 복잡한 연료전지 시스템 대신에 가상의 V-I 전기적 특성을 갖는 연료전지 시뮬레이터 장치를 제작하여 별도로 구성하였다.

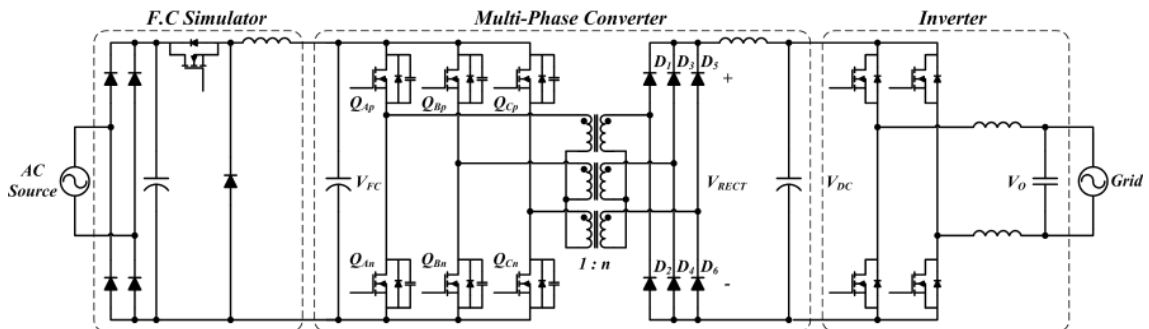


그림 1 제안된 전체 시스템 구성도
Fig. 1 Proposed overall system block

2.1 Multi-Phase V3 컨버터

본 논문에서 적용된 연료전지용 멀티페이즈 컨버터는 그림 1과 같이 3상 Half-Bridge 회로 구성의 V3 컨버터 구조를 갖는다. 다상구조의 전력변환 회로를 적용함으로써 위상각 조절을 통해 스위칭 리플전류를 상쇄시켜 기존 컨버터 방식이 갖는 스위칭 리플전류 및 전압/전류 스트레스 문제점을 해결함과 동시에 고효율의 저전압 대전류 전력변환시스템을 구현하였다.

제안하는 V3 컨버터는 그림 3과 같이 각상의 스위칭 패턴이 120° 위상차를 가지고 펄스폭을 조절하는 비대칭 펄스폭 변조 방식을 적용하였다. 특히 그림 2와 같이 펄스 듀티값에 따라 컨버터 입출력 전압 변환비 및 동작모드가 변동하고 있음을 알 수 있다.

펄스폭 범위가 $0^\circ < D < 120^\circ$ 인 경우 가변 컨버터 형태의 전압조절 모드로 동작하며 듀티비에 따라서 출력전압이 선형적으로 증가한다. 듀티가 1/3이 되는 지점에서는 Y-Y 변압기의 권선비 n 에 비례하는 최대 출력전압 nV_{IN} 전압을 나타낸다. 그림3과 같이 전압조절 모드에서는 Interleave 방식의 Buck 컨버터와 유사한 동작을 수행한다. 특히 그림 3의 스위치 모드 1과 같은 데드타임 구간에서 MOSFET의 출력 커패시턴스 C_{oss} 와 Y-Y 변압기의 누설 인덕턴스 L_{LK} 가 부분공진을 일으켜 모든 스위치의 ON 시점에서 영전압(ZVS) 소프트 스위칭을 구현할 수 있다. 이때 공진을 구성하는 등가회로를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{eq} &= C_{Bp} + C_{Bn} \\ L_{eq} &= L_{LKB} + (L_{LKA} \parallel L_{LKC}) \approx 1.5L_{LK} \end{aligned} \quad (1)$$

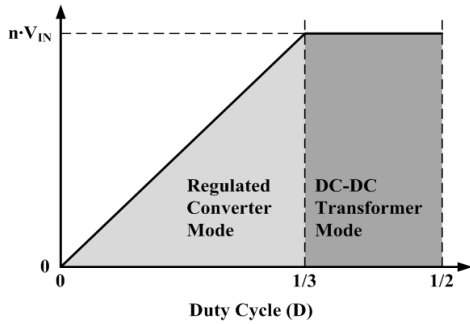


그림 2 전압 변환비 및 동작모드
Fig. 2 Voltage conversion ratio & operation mode

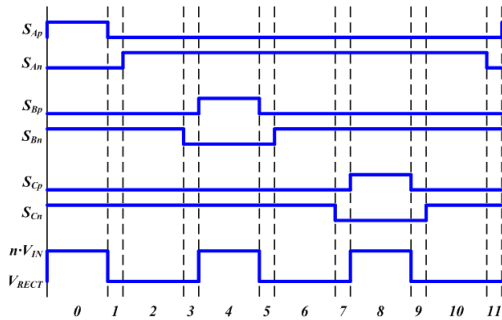


그림 3 가변 컨버터 모드시 스위칭 벡터
Fig. 3 Switching vectors for regulated converter mode

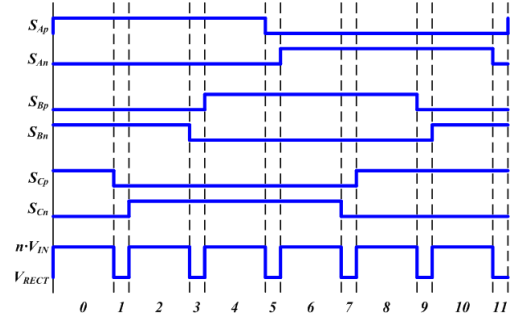


그림 4 DC-DC 변환 모드시 스위칭 벡터
Fig. 4 Switching vectors for DC-DC Transformer mode

한편 펄스폭 범위가 $120^\circ < D < 180^\circ$ 인 경우 고정 전압변환비를 갖는 DC-DC 변환모드로 동작하며 듀티비와 관계없이 출력전압은 nV_{IN} 의 값으로 항상 일정하다.

DC-DC 변환모드의 경우에도 그림 4의 스위치 모드 1과 같은 데드타임 구간에서 등가 커패시턴스와 누설 인덕턴스가 부분공진을 일으켜 모든 스위치의 ON 시점에서 영전압 소프트 스위칭을 구현한다. 특히 DC-DC 변환모드로 동작할 경우 단상 컨버터 대비 5배 이상의 스위칭 리플을 저감할 수 있으며 전력변환 효율 또한 94[%]에 근접하는 출력특성을 갖는다.

3. 실험결과

그림 5는 제안된 계통연계형 연료전지 발전 시스템의 시작품 및 멀티페이즈 컨버터 H/W를 나타내고 있으며, 그림 6은 Buck 컨버터로 구성된 연료전지 가상 시뮬레이터 전원의 출력 V-I 출력특성을 나타내고 있으며, Ballard사 PEM 타입 FCgen-1020 Stack의 72개 직렬 연결 구성을 바탕으로 등가모델링을 수행하였으며 그림6과 같이 46[V]/65[A]를 기준으로 3[kW] 전력을 출력한다.



그림 5 연료전지 발전 시스템 시작품 하드웨어
Fig. 5 Prototype hardware for fuelcell system

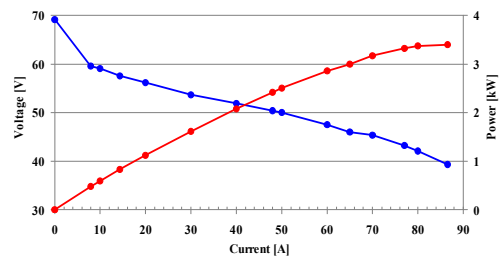


그림 6 연료전지 시뮬레이터 V-I 특성곡선
Fig. 6 V-I Characteristic of fuelcell simulator

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameter

구분	항목	Spec.
컨버터	정격출력	3[kW]
	정격 입력전압	46[V]
	정격 입력전류	65[A]
	스위칭 주파수	50[kHz]
	변압기 권수비($n_1:n_2$)	3 : 27
	출력전압	380[V]
	Transformer 코어	PQ5050
인버터	계통 전압	220[V]
	스위칭 주파수	15[kHz]
	출력 커패시터	10[μ F]
	출력 인덕터	2[mH]

본 연구에 사용된 연료전지 멀티페이즈 컨버터 및 인버터용 전력변환장치의 전기적 사양 및 파라미터는 표 1과 같다.

그림 7은 멀티페이즈 컨버터의 각 상 Upper 스위치의 게이트 파형과 LC 필터 이전단의 정류측 출력전압을 나타내고 있으며, 듀티비가 1/3을 넘어가면 그림과 같이 출력전압이 일정하다.

그림 8은 3[kW] 정격용량 운전시 연료전지 시뮬레이터의 출력 전압/전류를 나타내고 있으며 46[V]/65[A] 정격지점에서 운전하고 있음을 보여준다. 또한 스위칭 리플이 5[A]미만으로 최소화되었음을 나타낸다.

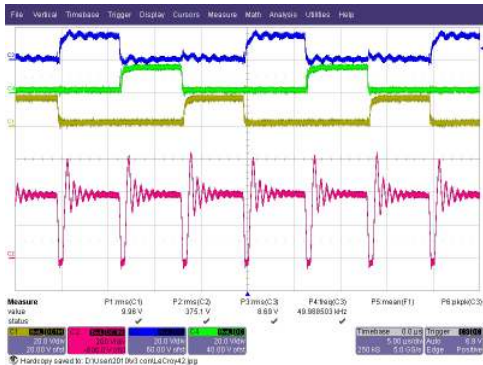


그림 7 게이트 파형 및 정류측 출력 전압
Fig. 7 Gate signal & rectifier output voltage
(20V/div, 200V/div, 5 μ s/div)



그림 8 가상 연료전지 출력 전압/전류
Fig. 8 Voltage and current of fuelcell simulator
(20V/div, 20A/div, 10 μ s/div)

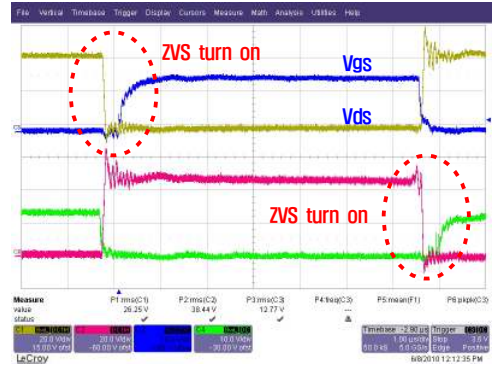


그림 9 멀티페이즈 컨버터의 영전압 스위칭 파형
Fig. 9 ZVS waveforms of multi-phase converter
(20V/div, 10V/div, 1 μ s/div)

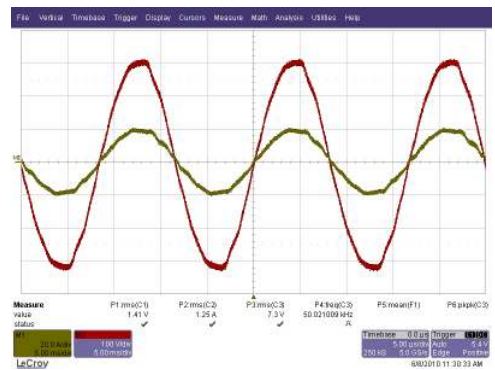


그림 10 계통연계형 인버터의 전압 및 전류파형
Fig. 10 Voltage & current waveforms of inverter
(100V/div, 20A/div, 5ms/div)

그림 9는 컨버터 A상 upper & bottom 스위치의 게이트 및 양단간 전압을 나타내고 있다. 그림과 같이 데드타임 구간에서 부분공진에 의한 영전압 스위칭 동작이 이루어지고 있다.

그림 10은 계통연계형 인버터의 출력전압 및 전류를 나타내고 있으며, THD 3[%]미만 / PF 0.99 이상의 제어특성을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 연료전지 발전용 계통연계 시스템 구성에 있어서 저전압 대전류 출력의 안정화를 위해 고효율 ZVS 소프트 스위칭이 가능한 멀티페이즈 컨버터를 적용하여 스위칭 리플전류를 최소화시키는 회로구성을 제안하였다. 제안된 멀티페이즈 컨버터에 의해 연료전지 발전용 계통연계 PCS의 리플 안정화 및 시스템 효율을 향상하였으며 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

이 논문은 중소기업청의 "국제산학연 공동기술개발지원 사업 No. 27524" 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] J.S. Lai, "A High-Efficiency 5kW Soft-Switched Power Conditioning System for Low-Voltage Solid Oxide Fuel Cells", Power Conversion Conference '07, pp. 463-470, 2007, April.