

300kW급 발전용 연료전지 PCS의 부피저감을 위한 DC-DC 컨버터 최적 설계

박성식*, 권준범*, 최세완*, 조진상**, 김태희**
* 서울산업대학교, ** 두산중공업

Optimum Design of DC-DC Converter for Volume Reduction of 300kW Fuel Cell PCS

Sungsik Park*, Junbum Kwon*, Sewan Choi*, Jinsang Jo**, Taehee Kim**

* Seoul National University of Technology, ** Doosan Heavy Industries & Construction Corporation

ABSTRACT

기존의 발전용 연료전지 PCS는 주로 DC-DC 컨버터 없이 인버터만 있는 방식이거나 3상의 DC-DC 컨버터에 인버터를 사용하는 방식이다. 본 논문에서는 발전용 연료전지 PCS의 부피저감과 고효율을 위한 DC-DC 컨버터의 최적 설계를 제안한다. 제안하는 DC-DC 컨버터는 DCM에 의한 소프트 스위칭으로 스위칭 주파수를 증가시키고 동시에 상수를 증가시키는 방식으로 다상의 인터리빙으로 인해 필터 부피가 작아져 전체 PCS 효율을 높게 유지하면서 부피를 저감할 수 있다. 본 논문에서 PCS의 이론적 효율계산을 통해 DC-DC 컨버터의 최적 상수를 선정하였다.

1. 서론

최근 연료전지와 같은 신·재생에너지를 이용한 분산형 발전시스템이 실용화되고 있는 추세에 따라 수백 kW급의 대용량 PCS의 개발이 시급히 요구되고 있다. 특히 연료전지 발전을 위한 PCS는 낮은 연료전지 전압의 승압이 필요하며 승압을 위한 방식으로 그림 1과 같이 이를 교류에서 얻는 방식과 직류에서 얻는 방식의 두 가지가 있다. 그림 1(a)는 연료전지 전압을 우선 DC-AC 인버터로 교류전압으로 변환한 후에 저주파(60Hz)의 변압기로 승압을 하는 방식으로 구조가 간단하고 비교적 높은 효율을 얻을 수 있는 반면에 부피가 큰 저주파 변압기를 사용하고 연료전지 전압의 범위가 큰 경우 출력전압 조정의 품질이 저하될 수 있는 문제가 있다. 그림 1(b)는 낮은 불안정한 연료전지 전압을 고주파 DC-DC 컨버터를 사용하여 안정되고 높은 직류전압으로 승압한 후 DC-AC 인버터로 부하에 요구되는 교류전압으로 만들어 주는 방식으로 DC-DC 컨버터가 추가되거나 연료전지 적층기술의 문제로 인한 연료전지의 낮은 출력전압을 DC-DC 컨버터로 승압시킨다면 연료전지의 가격과 제작면에서 유리할 수 있다. 그리고 MW급으로 확장시각 300kW급의 연료전지에 DC-DC 컨버터를 추가하는 방식으로 확장이 용이할 뿐만 아니라 연료전지 병렬 운전시 연료전지의 출력 특성이 다르기 때문에 발생하는 출력용량 불균형 문제를 각각의 DC-DC 컨버터에서 연료전지 출력제어를 통해 균등하게 맞출 수 있어 연료전지 발전시스템의 신뢰성을 높일 수 있다.^[1] 현재까지 실제 적용된 직류승압 방식은 주로 3대의 부스트 컨버터를 병렬 연결하여 CCM로 인터리빙하는 기법으로서 부피나 효율 측면에서 교류승압 방식과의 차이가 거의 없다

고 볼 수 있다.

본 논문에서는 직류승압 방식으로서 DCM에 의한 ZVS 기법을 적용하고 부스트 컨버터의 상수를 증가시켜 전체 PCS의 부피와 효율을 개선할 수 있는 설계기법을 제안한다. 이를 위하여 수동소자의 부피, 스위치 개수 및 효율등을 고려한 최적의 컨버터 병렬 수 계산을 통한 부스트컨버터의 최적설계를 수행한다.

2. DC-DC 컨버터 최적 설계

기존의 발전용 연료전지 PCS의 DC-DC 컨버터는 일반적으로 그림 2(a)와 같이 CCM에서 동작하는 방식으로 인덕터 전류 리플의 크기가 작기 때문에 스위치의 전류 정격과 필터 커패시터가 작아지는 장점이 있으나 인덕턴스가 크고 턴온과 턴오프시의 스위칭 손실 때문에 스위칭 주파수에 제한이 있다. 또한 입력전압이 낮아져 듀티비가 클수록 다이오드에 역방향회복에 의한 서지가 발생하여 스너버 같은 추가회로가 필요하다.

그림 2(b)에서 보듯이 작은 인덕턴스를 사용하는 DCM 방식은 ZVS 턴온에 의해 스위칭 손실을 줄일 수 있고 다이오드의 역방향회복에 기인하는 스너버 회로가 필요 없으므로 스위칭주파수도 더욱 높일 수 있다. 단점으로는 전류 리플이 커져 인덕터 손실과 스위치 도통 손실이 증가하고 스위치의 전류 정격과 필터 커패시터가 커지는 문제가 있다. 이제까지의 연료전지 발전용 PCS는 주로 3상의 DC-DC 컨버터를 CCM으로 동작시킨 방식으로 본 연구에서는 위에서 언급한 두 방식의 장단점을 고려하여 최적의 상수와 스위칭방식의 선정에 의해 전체 PCS의 부피 및 효율을 개선한다.

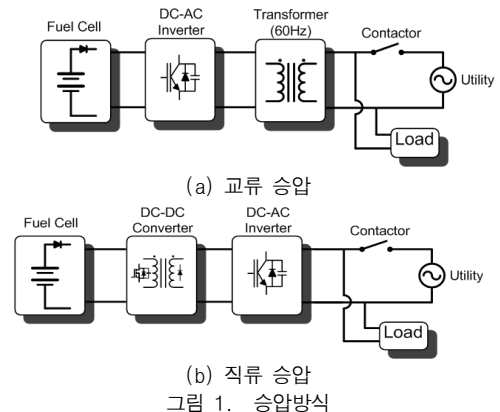


그림 1. 승압방식

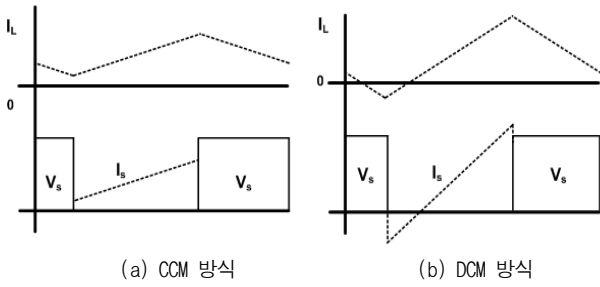


그림 2. 부스트 컨버터의 스위칭 방식에 따른 주요 파형

용량이 큰 응용에서 단상 DC-DC 컨버터를 적용할 경우 소자의 큰 전류 스트레스로 인해 손실 및 부피가 커지기 때문에 다상(Multi-phase) 기법을 적용하는 것이 유리하다. 하지만 응용분야와 출력용량에 따라 최적의 상수(Number of phases)가 다르므로 이를 선정하는 것이 매우 중요하다.

그림 3은 각상의 인덕터 전류파형을 보여주며 DCM 으로 동작하는 경우 상수의 증가에 따른 인덕턴스와 스위칭 주파수를 선정하는 방법을 나타낸다. 여기서 N 은 상수, I_{in} 은 입력 전류의 평균값, $\Delta I_{L,N}$ 은 각상전류의 리플크기를 나타낸다. 최대정격부하에서 ZVS를 성취하기 위해서는 각상에서 음의 인덕터 전류가 필요하며 이 음의전류의 크기를 I_{in}/N 의 5%로 고정하였다. 이러한 경우 상수의 증가에 따라 각 인덕터 전류리플이 감소해야 하기 때문에 그림 3과 같은 4가지의 인덕턴스와 스위칭 주파수 선정방법이 있다.

상수가 작아서 컨버터의 용량이 큰 경우 스위치의 큰 전류 정격으로 인해 테일 전류가 증가하여 IGBT의 고속 스위칭이 불가능하지만 상수가 증가하여 각 상 컨버터의 스위치 전류정격이 감소되고 스위칭 손실을 줄이기 위해 QSW를 이용한 ZVS 턴온 및 턴오프도 적용한다면 스위칭 주파수를 상승(예를 들면 10상인 경우 25kHz)시킬 수 있어 수동소자의 부피가 감소하게 된다. 본 연구에서는 상수가 증가함에 따라 효율이 감소되지 않는 범위내에서 스위칭 주파수는 상승시키고 인덕턴스는 감소시키는 방식 4를 선정하였다.

그림 4는 DCM 방식 4로 동작시켰을 때 상수의 증가에 따른 소자의 부피를 나타낸다. 부피계산을 위하여 다음의 사양을 고려하였다.

- Power = 300 kW · V_{in} = 250 ~ 450 V · ΔI_{in} = 5%
- ΔV_{out} = 3% ·출력전압조정률 = 6% ·THD = 5% 이하

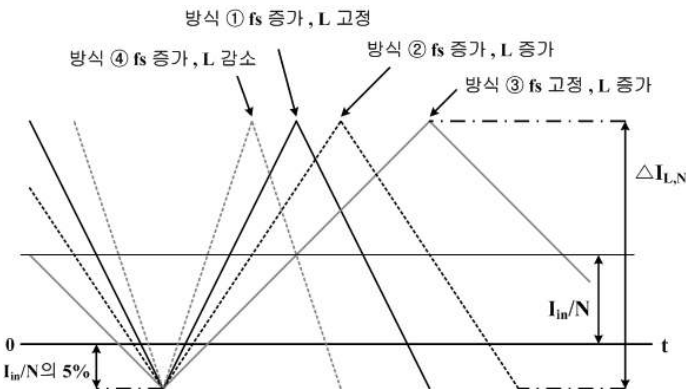


그림 3. DCM 동작시 상수 증가에 따른 인덕턴스와 스위칭 주파수 선정

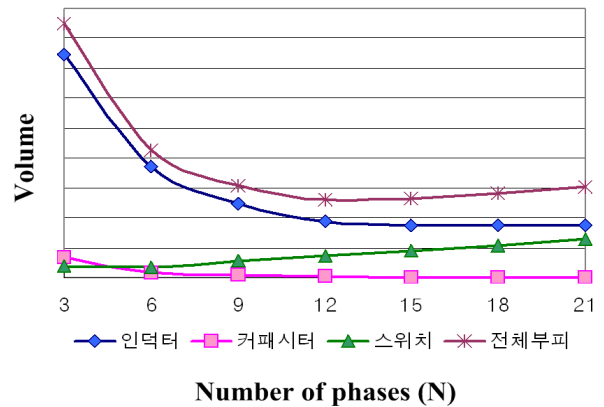


그림 4. DCM 방식 4의 경우 상수에 따른 DC-DC 컨버터 소자 부피

상수 증가에 따라 비례적으로 스위치개수가 늘어나므로 그에 따른 부피가 증가한다. 총 커패시터 에너지양 (CV^2)은 상수가 증가함에 따라 감소하나 12상부터는 감소폭이 작은 것을 알 수 있다. 또한 총 인덕터 에너지양(LI^2)도 상수가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 15상부터는 감소폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 그림 4로 부터 총 부피측면에서 최적의 상수는 9상에서 18상 사이에서 존재하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 상수 증가에 따른 각 상의 최대효율을 보여준다. 상수가 증가함에 따라 효율이 높아지나 일정 상수 이상이 되면 오히려 스위치개수가 늘어나 스위칭 손실과 도통 손실이 늘어나게 되어 10상인 경우가 가장 효율이 높은 것을 알 수 있다.

따라서 DCM 에서 부피와 최대 효율을 고려해 볼 때 10상이 최적 상수라는 결론을 얻을 수 있다.

제한한 10상 DCM 동작 DC-DC 컨버터는 제작측면에서 다음과 같은 장점을 갖게 된다. 3상 CCM 으로 인덕터를 설계할 경우 각 인덕터의 최대 전류 정격이 커 상용 코어를 사용할 때 권선이 용이하지 않다. 그러나 10상인 경우 AC 인덕터로 동작하여 손실이 더 크지만 최대 전류 정격이 작아 권선이 용이한 장점이 있다. 또한 부스트 컨버터를 모듈화 할 수 있어 PCS 에 장착을 편하게 할 수 있다.

CCM 에서도 DCM 과 같이 응용분야와 출력용량에 따라 최적의 상수가 다르므로 효율이 감소되지 않는 범위내에서 인덕턴스와 스위칭 주파수를 선정해야 하고 DCM 최적의 상수와 효율 및 부피 비교를 통해 최종적으로 DC-DC 컨버터의 최적 상수를 선정해야 한다.

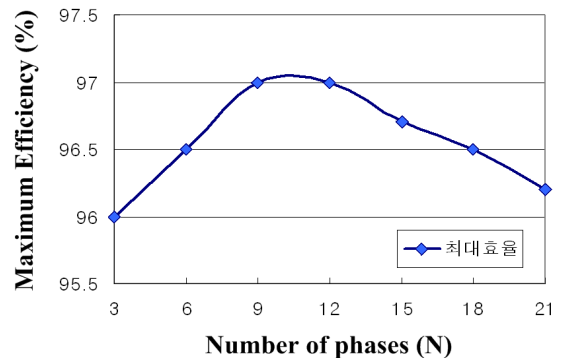


그림 5. DCM 방식 4의 경우 상수 증가에 따른 최대효율

3. 승압방식에 따른 효율 및 부피 비교

본 장에서는 2장에서 언급한 PCS 설계사양을 가지고 직류 승압방식과 교류 승압방식을 각각 설계한 후 효율과 부피를 이론적으로 계산하여 비교한다. 직류 승압방식은 기존의 CCM 3상 컨버터, CCM 에서의 최적 상수인 6상 컨버터, DCM 에서의 최적 상수인 10상 컨버터를 비교하였다.

표. 1. 승압방식에 따른 효율 및 부피 비교

	스위칭 주파수		부피	최대부하 효율
교류 승압 (그림 1(a))	3kHz		13.05m ³	94.5%
직류 승압 CCM 3상 (그림 1(b))	DC-DC	5kHz	11.18m ³	94.4%
	DC-AC	3kHz		
직류 승압 CCM 6상 (그림 1(b))	DC-DC	5kHz	9.91m ³	94.6%
	DC-AC	3kHz		
직류 승압 DCM 10상 (그림 1(b))	DC-DC	25kHz	9.35m ³	94.6%
	DC-AC	3kHz		

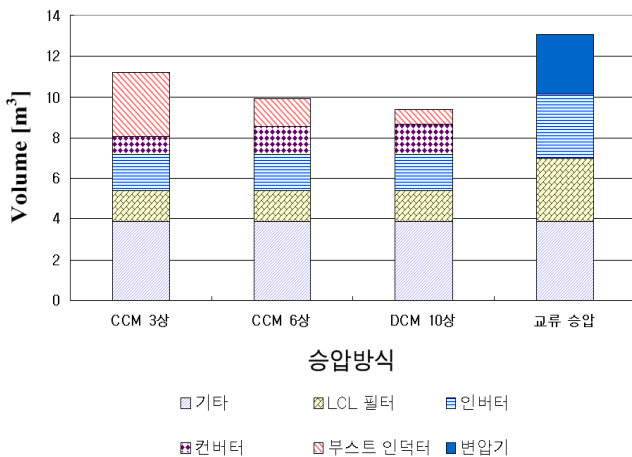


그림 6. 승압방식에 따른 각 소자의 부피 비중

인버터의 스위칭주파수는 모두 3kHz 로 동일한 것으로 가정하였다. 직류 승압방식에서 CCM 동작의 경우 하드스위칭으로 인하여 스위칭주파수를 5kHz 이상으로 사용하는 것이 어렵지만 제안한 10상 DCM 의 경우 ZVS로 인해 스위칭주파수를 25kHz 정도까지 사용하는 것이 가능하다. 전체 PCS의 부피는 교류승압에 비해 직류승압이 유리한 것을 볼 수 있으며 교류승압 방식중에서도 10상의 DCM 방식이 소자의 수는 가장 많지만 총 수동소자의 부피가 감소하여 전체 PCS의 부피가 가장 작은 것을 볼 수 있다. 또한 교류승압과 직류승압 모든 방식은 최대정격 부하에서 효율이 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 직류승압 10상의 DCM 방식은 더 높은 효율이 요구되는 경우 스위칭 주파수를 낮춰 효율을 높게 할 수 있다.

그림 6은 승압방식에 따른 부피 비중을 그래프로 보여준다. 여기서 기타는 제어부, 차단기, 부스바등을 포함한 부피이며 인

버터는 DC-Link 커패시터와 스위치, 게이트 드라이버가 포함된 부피이며 컨버터는 상수에 의한 스위치개수와 게이트 드라이버를 포함한 부피를 나타낸다. 교류승압의 경우 저주파 변압기가 큰 부피를 차지하며 큰 전류로 인하여 인버터 및 LCL 필터의 부피가 큰 것을 볼 수 있다.

직류승압방식에서는 10상 DCM 컨버터가 스위치개수는 많지만 부스트 인덕터의 부피가 아주 작아지는 것을 알 수 있다. 교류승압 방식은 직류승압방식보다 전류의 정격이 크기 때문에 인버터의 부피가 커진다. 또한 교류승압방식은 부하전류가 커서 360Hz의 인버터 입력전류 리플성분이 커져 DC-Link 커패시터가 매우 크게 되기 때문에 필름 커패시터의 사용이 어렵다. 그러나 직류승압방식은 필름커패시터의 사용이 가능해 커패시터의 수명이 길어 교체주기를 길게 할 수 있는 장점이 있다. 또한 높은 인버터의 출력전압으로 인해 전류 정격이 작으므로 필터 인덕터의 부피가 작아지게 되고 큰 무게와 부피를 차지하는 변압기가 없어 부피뿐만 아니라 PCS 전체 무게도 작아지는 장점이 있다.

4. 결론

본 논문에서는 300kW급 발전용 연료전지 PCS의 부피저감과 고효율을 위한 DC-DC 컨버터의 최적 설계를 제안한다. 기존에 주로 사용하던 교류승압 방식과 3상 CCM 직류승압방식 외에 6상 CCM 방식 및 제안한 10상 DCM 방식등의 부피 및 효율을 이론적 계산에 의해 비교해 본 결과 제안한 10상 DCM 방식이 동등한 효율을 유지하면서 부피측면에서 가장 우수한 것을 알 수 있었다. 따라서 발전용 연료전지 PCS와 같은 대용량 전력변환 시스템은 본 연구에서 제시한 방법과 같이 주어진 사양에 대하여 여러 가지 토폴로지와 스위칭방식의 효율과 부피를 이론적으로 예측하고 최적의 방식이 선정된 후 제작하는 것이 중요하다고 하겠다.

이 논문은 에너지관리공단의 “고효율 300kW급 내부개질형 MCFC 스택 및 시스템 국산화 기술 개발” 과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 이진희, 백승택, 최준영, 서인영, 김도형, 임희천, “대용량 연료전지 시스템의 병렬운전을 위한 전력변환기 제어 알고리즘 개발”, *한국 신·재생에너지학회 춘계학술대회논문집* pp. 65-68, 2008년 5월
- [2] 최세완, “특집 : 대체에너지 발전시스템에서의 전력전자기술 - 연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술”, *전력전자학회지*, 제6권, 제1호. pp.30-36, 2003년 8월
- [3] Junhong Zhang, Jih-Sheng Lai, Rae-Young Kim, Wensong Yu, "High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional dc-dc Converter", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 22, No. 4, pp. 1145-1153, July 2007.