

연료전지용 다중레벨 DC/DC 고효율 컨버터

송성근*, 박성준**, 최규하***, 정병환****
전자부품연구원*, 전남대학교**, 건국대학교***, 삼성탈레스****

High Efficiency Multi-Level DC/DC Converter for Fuel-Cell

Sung-Geun Song*, Sung-Jun Park**, Gyu-Ha Choe***, Byong-Hwan Jeong****
KETI*, Chonnam National Univ.**, Konkuk Univ.***, Samsung Thales****

Abstract - 최근 산업계에서는 스위칭 손실을 저감하여 효율 및 성능 개선에 대한 다양한 토폴로지가 제안되고 있다. 특히 소프트 스위칭 방식은 낮은 전압과 전류 스트레스를 갖는 장점으로 인하여 절연형 DC/DC 컨버터에서 인덕터 사용 없이 트랜스포머의 누설리액턴스를 사용한 소프트 스위칭에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 소프트 스위칭 특성을 갖는 새로운 DC/DC 컨버터 형태를 제안한다.

1. 서 론

에너지 고갈 및 환경문제 등이 글로벌 이슈가 되면서, 화석 연료의 대안으로 관한 연구가 매우 중요하게 부각되고 있다. 그 중, 풍력, 수력, 지열, 태양열 에너지 등을 이용한 신재생 에너지 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 저장에 가능하며 고 효율의 에너지 자원인 수소연료전지가 대안으로 부상하고 있다. 수소연료전지는 공해물질을 배출하지 않는 친환경적인 특성과 전체 효율이 80%까지 상승하는 고효율 및 리튬이온 전지보다 10배 이상의 고 에너지 밀도의 특징을 가지고 있어, 휴대용, 주택용, 자동차용 및 발전용 등의 그 응용분야가 매우 다양하다[1][2]. 가정용 연료전지스택의 정격 전압은 20~50VDC 정도로 낮기 때문에 이를 상용전원으로 만들어주기 위해서는 승압(Boost) 및 교류로 변환하여야 한다. 또한 연료전지스택의 출력전압은 부하의 변동에 따라 변동폭이 크므로 이 전압을 일정하게 조정(Regulation)해야 하며, 연료전지와 부하사이에는 안전과 노이즈의 차단 등을 위하여 절연(Isolation)이 필요하다. 이와 같이 연료전지는 저전압·고전류의 특성과 부하에 따라 전압이 크게 변동하는 특성을 가지므로 기존의 DC-DC 컨버터 기술로는 요구되는 효율을 만족시킬 수 없으며, 연료전지 컨버터의 효율이 낮아지면 전단의 스택 및 개질기의 용량이 커져야 하기 때문에 전체 연료 전지시스템의 가격이 상승하게 되어 상용화를 어렵게 하는 요인이 되기 때문에 연료전지용 고효율 컨버터에 대한 다양한 토폴로지가 제안되고 있으며 그 중요성이 대두 되고 있다[3][4].

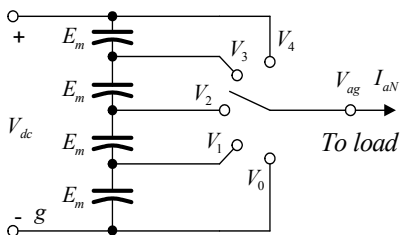
최근 낮은 전압과 전류 스트레스를 갖는 장점으로 인하여 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터에서 인덕터 사용 없이 트랜스포머의 누설리액턴스를 사용한 소프트 스위칭에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[5][6]. 그러나 이러한 소프트 스위칭방식은 PWM으로 인하여 그 제어범위가 협소하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 연료전지용 높은 승압비를 갖는 DC/DC 컨버터를 구성함에 있어 소프트 스위칭을 갖는 절연형 DC/DC 컨버터를 제안하고, 이를 이용한 다중레벨 컨버터를 구성한 새로운 방식의 고효율 DC/DC 전력변환기를 제안한다.

2. 다중레벨의 전력변환기

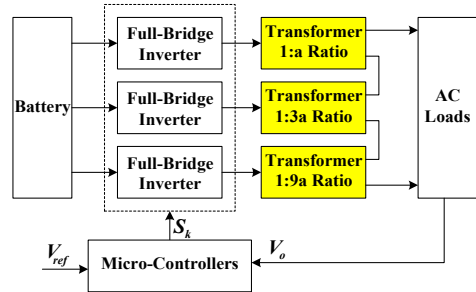
2.1 다중레벨 전력변환기의 원리

그림 1은 5-레벨 전력변환기에 대한 개념도를 나타내고 있으며, 여기서 다중레벨 전력변환기의 출력 V_{ag} 는 V_1, V_2 등의 노드전압을 선택함에 따라 임의의 전압레벨이 된다.



<그림 1> 다중레벨 인버터의 단상 개념도

그러므로 다중레벨 전력변환기는 다채널 단극 스위치(Single pole multi throw)로 생각할 수 있다. 즉, 한 번에 한 노드에 연결된 스위치에 의해 한 개의 원하는 출력을 형성한다. 다중레벨 전력변환기의 구조는 일반적으로 동일 전압 또는 이상 전압을 갖는 독립된 직류 전압으로부터 몇 개의 직류 전압 레벨을 출력지령전압에 가깝게 합성시키는 것으로 레벨 수를 증가 시킬수록 합성된 출력 파형의 정도는 증대된다. 그림 2는 출력전압 레벨 수 증대를 위한 일반적인 14레벨 전력변환기를 나타내고 있다.



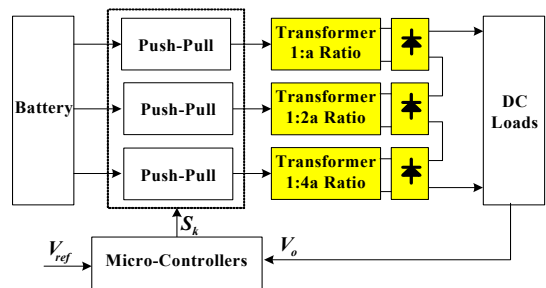
<그림 2> 3개의 변압기를 이용한 14 레벨 전력변환기

이 컨버터에서는 한 개의 전원전압을 사용하기 위해 변압기 절연방식을 사용하였으며, 변압기의 권수비를 이용하여 출력전압 레벨 증대를 이룬 전력변환기이다.

위와 같은 다중레벨 전력변환기에서 다수의 인버터를 사용하여 효율적으로 많은 인버터의 출력전압 레벨을 발생하기 위해서는 인버터의 출력전압 레벨을 적절히 선택할 필요성이 있다. 이때 출력전압의 적절한 레벨선택은 변압기의 권수비 설정이다. 권수비 설정에서 최대레벨을 발생시킬 권수비 (a_n)는 아래 식과 같다.

$$a_n = \left(2 \sum_{k=0}^{n-1} a_k + 1 \right) a_0 \quad , (a_0 = 0) \quad (1)$$

2.2 제안한 DC/DC 다중레벨 컨버터



<그림 3> 직류전원 발생용 8 레벨 전력변환기

일반적으로 다중레벨 전력변환기는 변압기를 사용함으로써 교번자속을 위해 교류전압 발생용 다중레벨 전력변환기로 직류전압 다중레벨 전력변환기로는 적합하지 않다. 따라서 직류 전원발생용 다중레벨 전력변환기는 그림 2와 같은 구조에서 변압기 출력단에 정류기를 정착한 형태인 그림 3과 같은 구조를 취하게 된다. 그림 3과 같은 구조에서는 부의 전압을 발생시킬 수 없어 변압기의 권수비를 아래 식과 같다.

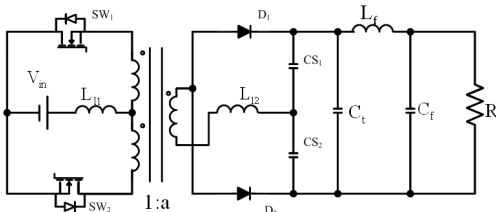
$$a_n = 2^{n-1} \quad (2)$$

본 논문에서는 연료전지의 특성상 입력전압의 변화가 25~50V까지 변화한다는 가정 하에서 출력전압의 제어를 원할 하게 하기 위해 최대 8-level 출력이 가능한 DC/DC 컨버터를 설계하였으며 이를 위해 총 3개의 고주파 변압기를 사용하였다. 각 변압기의 변압비는 식 (2)를 이용하여 1, 2, 4로 설정하였으며, 입력전압별 레벨은 다음 표와 같이 하여 출력전압이 350 ~ 430V 이내에 있게 하였다.

〈표 1〉 입력전압별 출력 레벨

입력전압[V]	레벨
44 ~ 50	4
36 ~ 43	5
30 ~ 35	6
25 ~ 29	7

또한 다중레벨 DC/DC 변환기에서 사용되는 각각의 Push-Pull 절연형 DC/DC 컨버터를 그림 4와 같은 입력측을 Push-Pull로 구성하고 출력측을 다이오드와 커패시터를 이용한 배압회로를 사용하였으며, 변압기의 누설리액턴스(L_{l1} , L_{l2})와 배압회로의 커패시터(C_{s1} , C_{s2})를 이용한 공진특성을 이용 소프트스위칭 하여 전력변환 손실이 최소화 되도록 설계하였다.



〈그림 4〉 Push-Pull DC/DC 컨버터 회로도

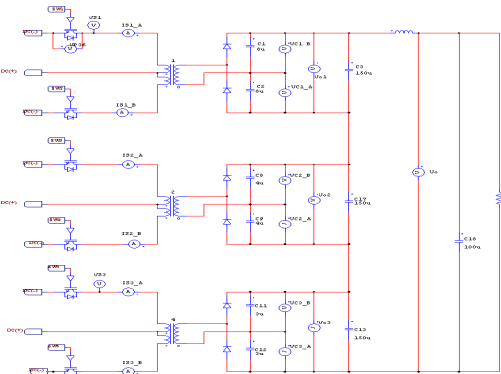
이와 같은 회로에서 공진 주파수(f_0)는 아래와 같다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_s}} \quad (10)$$

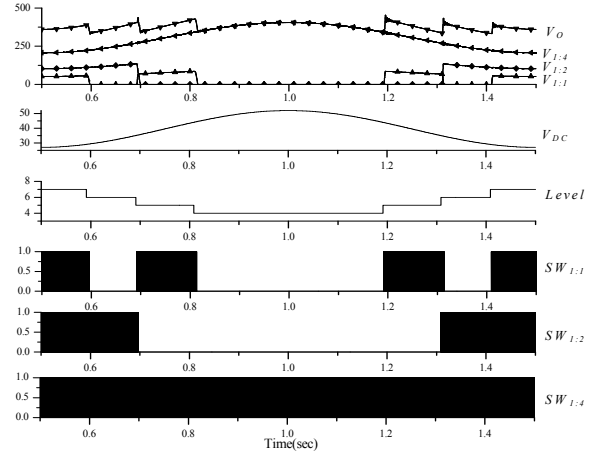
위식에서 L_f 은 1, 2차의 누설리액턴스를 1차 축으로 환원하여 계산되는 총 누설리액턴스 값이며, C_s 는 C_{s1} 또는 C_{s2} 를 1차측으로 환원한 커패시턴스 값이다. 각 변압기별 누설리액턴스 값이 다르기 때문에 DC/DC 컨버터별 스위칭 주파수 또한 각각 다르며 본 논문에서는 각 변압기의 Push-Pull 스위치를 17(1:a), 13(1:2a), 8(1:4a)kHz로 각각 스위칭 하였다.

2.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 본 논문에서 제안한 DC/DC 다중레벨 컨버터의 타당성 검증에 위하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로도도 입력전압은 25 ~ 50V가 변하도록 구성하였으며, 각 변압기의 변압비는 1:2:4로 구성하여 최대 7레벨이 형성되고 구성하였다. 또한 레벨이 변화하는 구간에서는 전압변동분이 심하여 전압 오버슈트가 발생하는 것을 방지하기 위해 소프트 스위칭을 대신 변조폭을 강제로 변환시키는 하드스위칭을 사용하여 소프트 스타트 할 수 있도록 프로그램하여 시뮬레이션을 수행하였다.



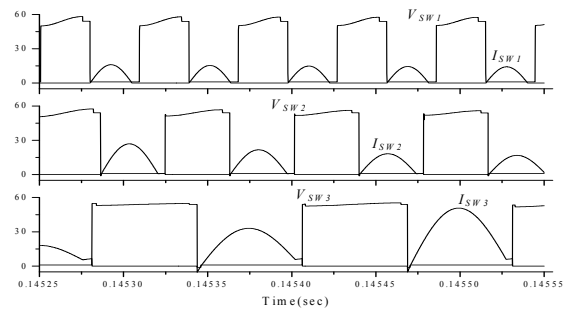
〈그림 5〉 Push-Pull DC/DC 컨버터 회로도



〈그림 6〉 다중레벨 DC/DC 컨버터 출력파형

그림 6은 제안된 다중레벨 컨버터의 출력파형으로 입력전압이 25V에서 50V까지 변화한 경우의 출력 전압, 레벨 및 각 스위치의 동작 상태를 나타내고 있으며, 그림에서 볼 수 있듯 레벨은 입력전압이 25V일 때 7레벨에서 50V일 때 4레벨까지 과도상태에도 문제없이 동작함을 볼 수 있으며, 각 레벨을 위한 스위치가 정상적으로 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 각 Push-Pull 스위치별 전압, 전류 파형으로 각 스위치별로 주파수를 달리하여 ZCS가 발생함을 확인할 수 있다.



〈그림 7〉 각 스위치별 전압 및 전류 파형

3. 결 론

본 논문에서는 소프트스위칭 기법을 이용한 절연형 DC/DC컨버터를 이용하여 연료전지 시스템에 적합한 다중레벨 형태의 DC/DC컨버터를 제안하였으며 제안된 컨버터에 대해 PSIM을 이용하여 그 타당성을 검증하였다. 제안된 회로는 연료전지의 출력 전압특성을 고려하여 2배의 전압 변동분에 대해 출력 전압을 인버터에서 제어 가능한 수준으로 제어하기 위해 총 7레벨이 가능하도록 구현하였으며, 레벨이 변화하는 순간의 과도한 전압 변동분을 방지하기 위해 소프트스타트 개념을 사용하여 출력 전압의 과도현상을 최대한 억제 하였다. 또한 제안된 방식은 변압기의 누설리액턴스와 배압 승압을 위한 커패시터간의 공진을 이용하여 ZCS 스위칭이 가능함을 확인 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Michihiko Nagao, and Koosuke Harada, "Power Flow of Photovoltaic System using Buck-Boost PWM Power Inverter", IEEE/PEDS, pp.144-149, 1997.
- [2] Johanna M. A. Myrzlk, "Novel Inverter Topologies for Single-Phase Stand-Alone or Grid Connected Photo-voltaic Systems", IEEE PEDS, pp.103-108, 2001.
- [3] 이승환, 성낙규, 오봉환, 김성남, 이훈구, 김용주, 한경희, "PWM 초과파와 전류원형 인버터를 이용한 계통 연계형 태양광발전시스템", 전력전자학회 논문지, 제3권, 제4호, pp. 323- 329, 1998. 12.
- [4] 유택빈, 성낙규, 이승환, 김성남, 이훈구, 한경희, "초파와 PWM 전압 인버터를 이용한 계통연계형 태양광 발전시스템에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제3권, 제2호, pp. 131-137, 1998. 6.
- [5] 황인호, 안교상, 임희천, 김신섭, "계통연계 태양광발전시스템의 제어 기법 및 연계운전 특성", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제2호, pp.123-129, 2000. 4.