

멀티 레벨 컨버터를 기반으로하는 고풍력 연료 전지 시스템의 전압강하 대책

김윤호, 문현욱, 김수홍, 곽형찬, 원충연
중앙대학교, 성균관 대학교

Compensation of Voltage Sag for A Fuel cell System based on Multilevel Converters

Y.H Kim, H.W. Moon, S.H. Kim, H.C. Kwak, and C.Y. Won
Chung-Ang University, Seongkyunkwan University

ABSTRACT

연료 전지 시스템은 아주 유용한 에너지원 중의 하나이다. 그것은 재사용이 가능하고 환경 친화적이라는 장점을 가지고 있다. 연료 전지로부터 AC 성분을 얻기 위해서는 인버터가 필요하다. 멀티레벨 컨버터는 고 전력 연료 전지 시스템의 인버터로 사용된다.

고조파 분석을 통하여 출력 특성을 해석하였다. 연료 전지 출력 전압이 강하할 때 기본파 성분이 감소하는 반면 THD가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부스트 컨버터를 연료전지 출력에 설치하는 것을 제안하였다. 모든 연료 전지 출력에 부스트 컨버터를 설치하는 것 대신에 하나의 부스트 컨버터만을 연료전지 출력부분에 설치하였다. PI 제어기는 부스트 컨버터를 제어하기 위해 사용하였다.

1. 서 론

연료 전지로 구성된 발전 시스템은 기존의 일반적인 발전 시스템이 가지고 있는 이상의 여러 가지 장점들을 가지고 있기 때문에 그것의 실제적인 사용이 증가할 것이라고 기대된다. 연료 전지로 구성된 발전 시스템의 장점으로는 적은 환경오염, 고효율의 전력 발전, 연료 전지의 다양성(천연 가스, LPG, 메탄올과 나프탈렌등), 배출 열의 재 사용성, 모듈화, 시스템 설치 기간의 단축성등이 있다.^[1]

미래 에너지 공급에 영향을 미치는 연료전지 발전 시스템은 수 메가 와트 범위의 큰 전력 정격을 중간에 상호 연결하는 유틸리티를 필요로 한다.^[2] 전력 유틸리티에 의한 큰 규모의 연료 전지 발전 시스템은 효율, 안정도, 신뢰도, 비용면에서 고 성

능 전력 시스템의 이용성에 의해 큰 영향을 받는다.^[3] 비록 현재까지 연료 전지 발전 시스템이 비싼 가격 측면 때문에 아직 완전히 상용화 되지는 못하였지만 최근에는 이전에 비해 보다 더 저렴한 비용의 발전 시스템을 연구하는 추세이기 때문에 조만간 많은 분야에서 연료 전지 발전 시스템을 사용할 것이라 예측한다.

일반적으로 연료 전지 발전 시스템에서 전력 조절 시스템의 기능은 연료 전지로부터의 DC 출력 전력을 AC 전력으로 변환하는 역할을 한다. 고 전력 응용에서 최근에 관심을 갖고 있는 멀티 레벨 인버터는 연료 전지의 전력 변환 시스템으로 적합하다.^[4]

멀티 레벨 인버터의 주된 특징은 DC 버스에 다중 레벨을 구성함으로써 생기는 각각의 전력 장치에 미치는 전압 스트레스를 줄일 수 있다는 것이다. 멀티 레벨 인버터에는 여러 종류가 있다. 그러나 이 논문에서는 H-B(Half-Bridge) 멀티 레벨 인버터를 고려하였다.

유효 전력 변환기와 관련된 응용에서 멀티 레벨 인버터의 중요한 요건은 DC 소스이다. DC 소스는 다른 소스들로부터 절연되어 있기 때문에 연료 전지 전력 시스템에 적합하다. 이러한 인버터 구조를 고려하여 높은 AC 출력 전압은 고 전력 연료 전지 모듈을 적은 수로 구성하거나 저 전력 연료 전지 모듈의 수를 많게 하여 다양하게 구성하여 얻을 수 있다. 그리고, 요구되는 또 다른 연료 전지 전력 시스템의 인버터 특성 즉, 제안된 변조 방법, 절연된 동작에 대한 가능성, 낮은 출력 고조파와 높은 효율에 따른 출력 전압 제어 가능성의 조건등도 역시 실행될 수 있다.

고조파 분석을 통하여 출력 특성을 해석하고, 연료 전지 출력에 순시 전압 강하가 증가함에 따른 기본파 성분과 THD를 해석한다. 이러한 문제점을

해결하기 위해 부스트 컨버터가 연료 전지 출력에 설치되는 것을 제안한다. 모든 연료 전지 출력에 부스트 컨버터를 설치하는 대신에 하나의 부스트 컨버터만 연료 전지 출력 중 한 곳에 설치하도록 한다. PI 제어기는 부스트 컨버터를 제어하기 위해 사용한다.

2. 캐스케이드 H-B 멀티레벨 인버터

멀티 레벨 인버터 구조는 고 전력 스위칭 장치의 단점을 극복하는데 기여 하였다. 그리하여 멀티 레벨 인버터는 고 전력 시스템에 적용이 가능해졌다. 멀티 레벨 인버터의 독특한 구조는 변압기의 사용 없이 낮은 고조파를 갖으며 고 전압에 이를 수 있도록 해 주는 것이 가능하다. 이것은 소비자 전력 응용과 복잡한 ac 변환 시스템에 적합하고 독특한 전력 시스템 구조를 만든다.^{[5],[6]}

일반적인 멀티 레벨 인버터에는 캐스케이드와 NPC, 두 가지 종류가 있다. H-B 인버터는 비교적 단순한 스위칭 제어와 NPC에 비해 레벨수 증가에 따른 추가적인 다이오드가 불필요한 장점등을 가지고 있기 때문에 자주 사용된다.

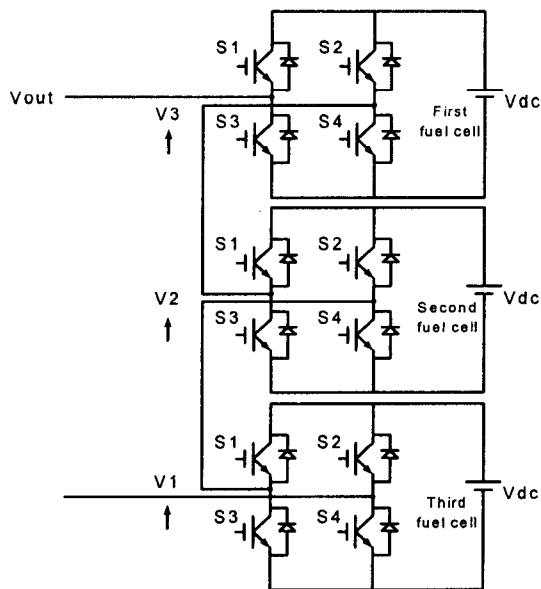


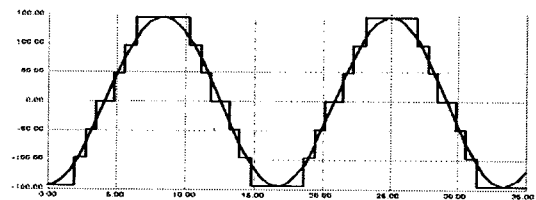
그림 1. 7-레벨 캐스케이드 H-B 인버터를 이용한 단상 멀티레벨 인버터 구조

Fig. 1. Single-phase structure with a 7-level cascaded H-bridge inverter

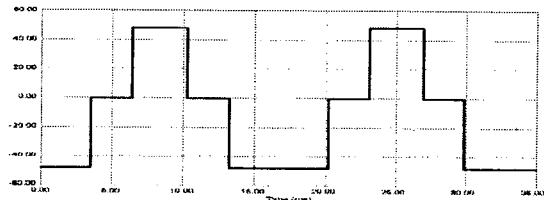
그림 1은 7-레벨 캐스케이드 H-B 인버터를 이용한 단상 멀티 레벨 인버터 구조를 나타낸다. 그림 2는 출력 전압 파형과 7-레벨 캐스케이드 인버터의 스위칭 패턴을 나타낸다. 캐스케이드 인버터에서 출력 되는 상 전압의 레벨 수 m 은 $m = 2s + 1$

에 의해 정의 된다. s 는 인버터의 수이다. 각각의 분리된 dc 소스는 단상 풀 브리지 혹은 H-B, 인버터와 연결된다.

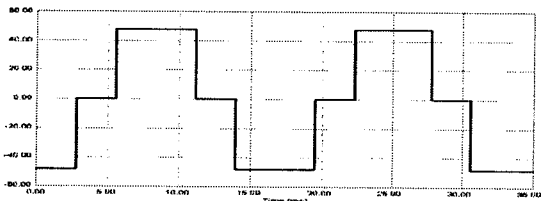
각각의 인버터 레벨은 각 인버터에 있는 네 개의 스위치 S1, S2, S3, S4의 서로 다른 조합에 의해 결정 된다. ac 출력이 dc 소스와 연결됨으로 스위칭 조합에 따라 세 가지의 서로 다른 전압 출력, $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$ 를 발생한다. $+V_{dc}$ 를 얻기 위해서는 스위치 S1과 S4가 턴 온 된다. 그리고 스위치 S2와 S3을 턴 온함으로 $-V_{dc}$ 를 얻는다. 또 S1과 S2 혹은 S3과 S4를 모두 턴 온하거나 모든 스위치를 턴 오프 함으로 인버터의 출력 전압은 0 이 된다^[4].



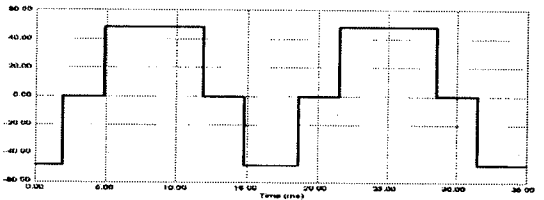
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 7-레벨 캐스케이드 인버터의 스위칭 패턴과 파형 (a) 최종 출력 (b) 첫 번째 컨버터 출력 (c) 두 번째 컨버터 출력 (d) 세 번째 컨버터 출력

Fig. 2. Waveforms and switching patterns of the 7-level cascade inverter.

(a) Final output (b) First converter output (c) Second converter output (d) Third converter output

그림 2에서는 서로 다른 H-B 인버터 레벨의 각각의 ac 출력이(그림 7(b), (c), (d)) 직렬로 연결되어 합쳐진 출력과 인버터의 출력 파형이(그림 7(a)) 같다는 것을 알 수 있다. 출력 전압은 $V_{out} = V_1 + V_2 + V_3$ 이다.

서로 다른 스위칭 패턴을 갖는 이유로는 연료 전지의 전력 평형을 위해서다. 만약 스위칭 패턴이 특정 스위치에서 한 주기 동안 같은 듀티 사이클을 갖게 된다면 H-B 인버터가 두개 혹은 그 이상으로 직렬 연결 될 때 연료 전지의 전력은 불 평형하게 된다. 그리하여 전력 평형을 고려하기 위해 스위칭 패턴을 고려해야 한다.

THD와 출력의 고조파에 영향을 주는 요소로는 구성된 시스템에서의 인버터 수와 스위칭 펄스의 듀티 사이클과 관계있다. THD는 H-B 인버터의 수와 관련하여 분석하도록 한다.

3. 인버터 수에 따른 고조파 분석

고조파와 THD 분석은 인버터의 수에 따라서 각각 분석하였다. 고조파 분석은 캐스케이드 인버터의 레벨 수가 변할 때 그리고 연료 전지 출력에 순시 전압 강하가 발생하였을 때를 각각 분석 하였다. 시뮬레이션과 분석을 위해 PSIM 프로그램을 사용하였다. 고조파는 레벨의 수가 3에서 9까지 변화할 때를 분석하였다. 그림 3에서 보듯이 레벨 수가 증가할 때 THD는 감소한다.

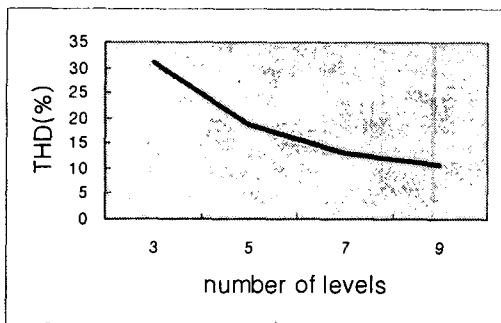


그림 3. 레벨 수에 따른 THD
Fig. 3. THD with respect to the number of levels

4. 순시 전압 강하시 분석

인버터의 수가 3개인 7-레벨 시스템에 대해서 고조파 분석은 연료 전지 시스템에 순시 전압 강하가 0%에서부터 100%까지 변화한다고 가정하고 시뮬레이션 하였다.

4.1 첫 번째 연료 전지에서 순시 전압 강하 발생

각 H-B 인버터에 연결되어 있는 연료 전지 중

첫 번째 연료 전지에 순시 전압 강하가 발생 하였다고 가정하였다. 그림 4는 순시 전압 강하가 증가할 때 THD도 증가한다는 볼 수 있다.

4.2 두 번째 연료 전지에서 순시 전압 강하 발생

다음에는 두 번째 연료전지가 순시 전압 강하가 발생하였다고 가정 하였을 때이다. 그림 5 역시 순시 전압 강하가 증가할 때 THD도 증가한다는 것을 볼 수 있다.

그러나 THD의 변화는 첫 번째 연료 전지에 순시 전압 강하가 발생하였을 때보다는 작다.

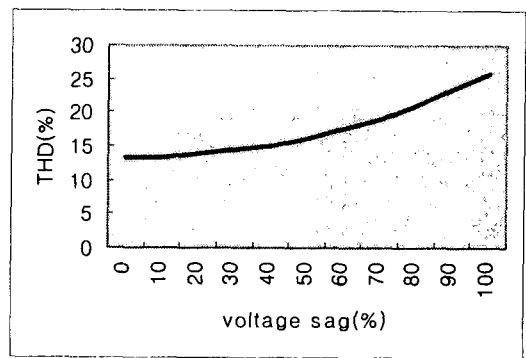


그림 4. 첫 번째 연료 전지에 순시 전압 강하를 갖을 때의 THD
Fig. 4. THD with first fuel cell voltage sag

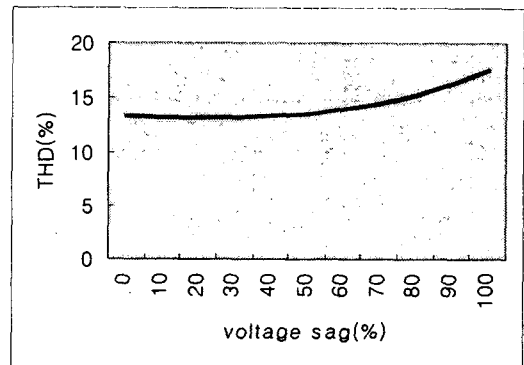


그림 5. 두 번째 연료 전지에 순시 전압 강하를 갖을 때의 THD
Fig. 5. THD with second fuel cell voltage sag

5. 순시 전압 강하에 대한 보상

고조파 분석을 통하여 순시전압 강하가 증가함에 따라 기본파 성분이 감소하는 반면 고조파 요소와 THD는 증가하는 것을 알 수 있었다.

이러한 문제를 보상하기 위해 부스트 컨버터를 연료 전지 출력에 설치하는 것을 제안한다. 모든 연료 전지 출력 단에 부스트 컨버터를 설치하는 것 대신에 하나의 연료 전지 출력 단에만 부스트 컨버

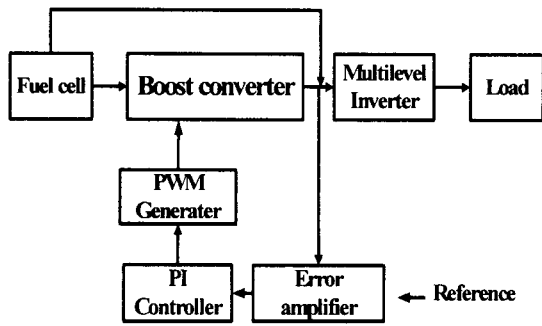


그림 6. 제안된 연료 전지 시스템의 블록 다이어그램
Fig 6. Block diagram of the proposed fuel cell system.

터를 설치하도록 한다. 이는 4.2에서 말했듯이 THD의 변화가 두 번째 연료 전지가 순시 전압 강하가 발생하였을 때 보다 첫 번째 연료 전지가 순시 전압 강하가 발생하였을 때 그 크기가 컸기 때문에 두 번째보다 첫 번째 연료 전지에 부스트 컨버터를 설치함으로써 그 효과를 더 크게 얻기 위함이다.

부스트 컨버터를 제어하기 위해서 PI 제어를 사용하였다. 그림 6은 제안된 연료전지 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 시스템은 순시전압 강하를 보상하기 위해 PI 제어기로 제어되는 부스트 컨버터를 포함한다.

그림 7은 첫 번째 연료전지가 시간이 0.15초에서 50%의 순시전압 강하가(연료 전지의 출력이 48V에서 24V로 떨어짐) 발생하였을 때의 출력 파형을 보여준다. 그림 7(a)는 전압의 기본 성분이 줄어들고 THD가 증가한 것을 보여준다. 그림 7(b)는 첫 번째 연료전지 출력에 부스트 컨버터를 설치함으로써 출력 전압의 기본성분을 보상함을 보여준다. 그림 7(c)는 부스트 컨버터의 출력을 보여준다. 부스트 컨버터의 출력은 순시 전압 강하가 일어난 후 이를 보상하기 위해 PI제어를 사용하여 출력이 부스트되었다.

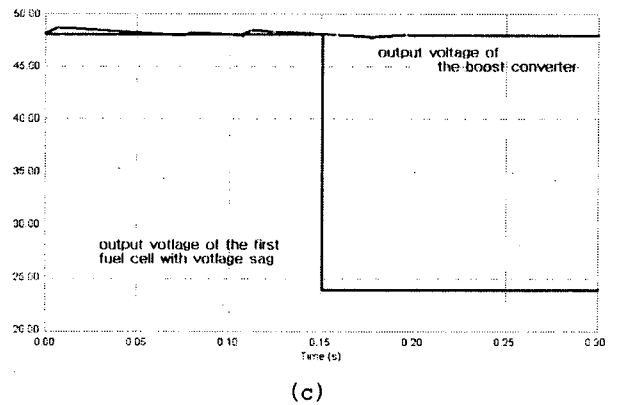
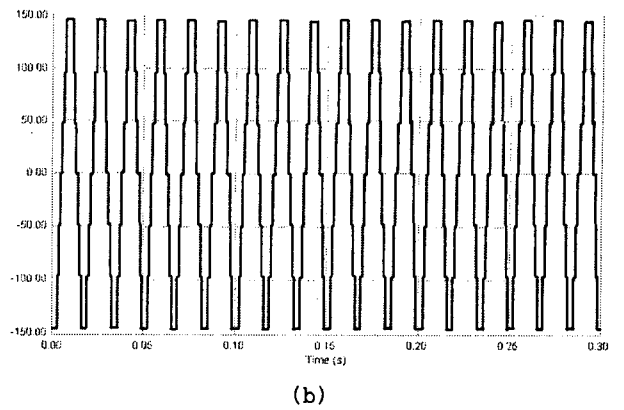
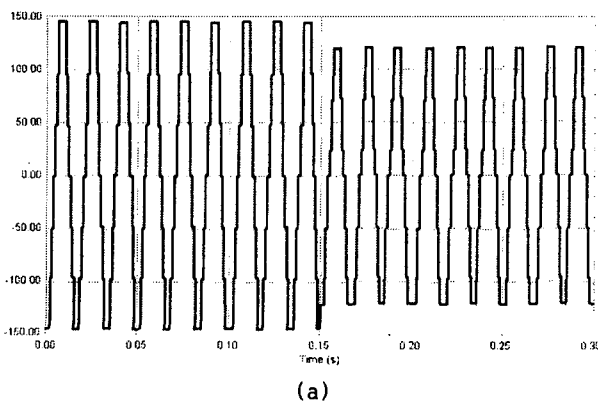


그림 7. (a) 첫 번째 연료 전지의 출력 전압이 48V에서 24V로(50%) 순시 전압 강하가 발생 하였을 때 비 보상 출력 전압 파형 (b) 보상된 출력 전압 (c) 부스트 컨버터의 출력 전압

Fig. 7. (a) Non-compensated output voltage waveforms when the first fuel cell has voltage sag from 48V to 24V(50%) (b) Compensated output voltage (c) Output voltage of the boost converter.

6. 결 론

전력 품질은 매우 중요한 문제이다. 전력품질은 최대 THD를 제한하는 것을 고려할시 인버터의 레벨 수를 선택하는데 좋은 지표로 사용될 수 있다. 이 논문에서 고조파 분석은 인버터의 레벨 수에 따라 연료전지 출력의 순시전압 강하에 따라 각각 이루어 졌다. 고조파 분석을 통하여, 순시 전압 강하가 증가함에 의해 기본과 성분은 줄어드는데 반해 고조파 성분과 THD는 증가하는 것을 알 수 있었다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 부스트 컨버터가 연료 전지 출력 단에 설치되는 것을 제안하였다. 모든 연료 전지 출력 단에 부스트 컨버터를 설치하는 대신에 하나의 연료 전지 출력 단에만 부스트 컨버터를 설치하였다. 부스트 컨버터를 제어하기 위해서 PI 제어가 사용되었다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축
지원 사업의 지원에 의해서 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Anahara, S. Yokokawa and M. Sakurai, "Present status and future prospects for fuel cell power systems," Proceedings of the IEEE, vol. 81, no. 3, pp. 399-408, 1993.
- [2] R. Naik, N. Mohan, M. Rogers and A. Bulawka, "A novel grid interface, optimized for utility-scale applications of photovoltaic, wind-electric and fuel-cell systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 4, pp. 1920-1926, 1995.
- [3] K. Tam and S. Rahman, "System performance improvement provided by a power conditioning subsystem for a central station photovoltaic-fuel cell power plant," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, no. 1, pp. 64-70, 1998.
- [4] Peng, F.Z., Tolbert, L.M. "Multilevel converters as a utility interface for renewable energy systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 2, 2000.
- [5] L. Gyugi, "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 2, April 1994, pp. 904-911.
- [6] A. van Zyl, J. H. R. Enslin, R. Spee, "A New Unified Approach to Power Quality Management," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 5, Sept. 1996, pp. 691-697.