

Z-Source 인버터

최형래*, 정태욱***, 전장건*, 우도*, 이동현*, 강필순**, 최준호*, 박성준*
 *전남대학교, **한밭대학교, ***한국생산기술연구원

Z-Source Inverter

HL Choi*, T.U Jung***, J.G Jeon*, Yu Tao*, DH Lee*, P.S Kang**, J.H Choi*, S.J Park*

* Chonnam National Univ, ** Hanbat National Univ, *** Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

This paper presents control method of a Z-source inverter and their relationships of voltage boost versus modulation index. A maximum boost control is presented to produce the maximum voltage boost(or voltage gain)under a given modulation index. The control method, relationships of voltage gain versus modulation index, and voltage stress versus voltage gain are analyzed in detail and verified by experiment.

1. 서론

최근 화석 에너지의 고갈이나 환경문제로 인한 대체 에너지 개발이 시급한 문제로 부각 되어 지고 있는 가운데 현재 많은 국가에서는 활발히 대체에너지 기술 개발 및 연구가 이루어지고 있다[1]. 그중에 특히 태양광 에너지, 풍력 에너지, 연료전지가 가까운 미래에 가장 잠재성 있는 에너지원으로 각광을 받고 있다. 그러나 이러한 에너지는 넓은 대역의 입력 전압 및 넓은 대역의 주파수를 가지고 있어 변환장치 없이는 실제 사용되어 지는데 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 현재 PWM을 이용한 전압, 전류원(V-I source) 인버터들이 많이 사용 되어지고 있는 가운데 이들이 가지는 단락으로 인한 소자 파괴 및 소자증가 문제점을 개선 하고자 새로운 형태의 Z-source 인버터에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 단상 Z-source 인버터에 대한 입출력특성을 고찰하고, 실제 신재생 에너지를 위한 1kW급 Z-source 인버터를 제작하여 그 동작특성을 분석하였다.

2. Z-Source 인버터

2.1 Z-Source 인버터의 특성

현재까지 제안된 인버터로는 크게 전압원(V source), 전류원(I source)인버터로 구분된다. 전압원 인버터는 크게 전압원, 커패시터, 스위칭 부분으로 구성 되어져 있으며, 커패시터는 DC 전압원 인버터 구동을 위한 가장 중요한 기능을 하고 있다. DC 전압원으로는 배터리, 연료전지, 태양광 전지로 구성 되어질 수 있으며, 전류흐름 제어와 전압차단을 위한 4개의 스위치들은 parallel 차단 및 단방향 전압 차단을 위해 환류 다이오드(free-wheeling)가 사용 되어 지고 있다. 그림 1은 전형적인

단상 전압원 인버터를 보여주고 있다. 전압원 인버터는 넓게 사용되어 지고 있으나 다음과 같은 한계점인 가지고 있다.

- 1) AC 출력 전압은 입력전압 보다 큰 DC 전압을 넘지 못하는 한계점을 가지고 있다. 따라서 전압원 인버터는 DC/AC 변환을 위해서는 Buck(step-down)회로로 동작되고, AC/DC 변환을 위해서는 Boost(step-up)회로로 동작된다. Boost 형태의 DC/AC 변환을 위해서는 추가적인 Boost회로 가 필요한 단점이 있다.
- 2) 전압원 인버터는 EMI 노이즈 등에 의한 암 단락으로 스위칭 소자가 파괴될 위험성이 있어, 신뢰도에 있어 가장 치명적이다.
- 3) 동일한 입출력 사양을 가지는 전류원 인버터와 비교했을 때 싸인 전압을 인가하기 위하여 2차측의 LC 필터를 고려하여야 하며, 2차측 인덕터에 의한 스위칭 스트레스와 손실을 유발한다.

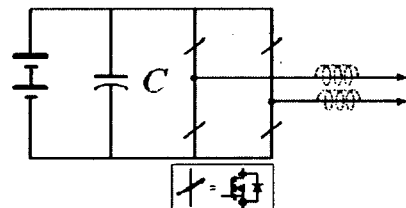


그림 1 전형적인 전압원 인버터
 Fig. 1 The traditional V-source inverter

그림 2는 전형적인 단상 전류원인버터를 보여주고 있다. 인덕터의 전류를 축적하여 승압하는 이 인버터는 입력 단에 직렬로 인덕터가 삽입되어져 있으며, 스위치의 시비율을 이용한 승압이 가능하다. 그러나 전류원 인버터는 개념적으로나 이론적으로 아래와 같은 문제점을 가지고 있다.

- 1) AC 출력 전압은 실제 전압 보다 크며 DC 전원이 인가된 인덕터는 AC전원이 인가된 입력 전압보다 항상 작은 DC 전압을 만들어 낸다. 따라서 I-source 변환기는 DC/AC변환을 위해 Boost 회로를 사용 하며, AC/DC를 변환을 위해선 Buck 회로를 사용해야 한다. 또한 이러한 문제점들로 인

하여 대 대역의 전압을 사용할 수 없다. 따라서 DC/DC Buck (혹은 boost)회로와 함께 사용 되어져야 하며 이에 따라 비용 상승 및 손실을 가져온다.

2) 스위치에 인가된 high 신호와 low 신호 중의 하나가 항상 ON상태를 지속해야 하는 반면에 DC 전류원이 ON 상태에서 파괴 될 수 있다. 또한 EMI에 의한 Open-circuit 문제점은 변환기의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치며, 신뢰성 있는 전류를 출력하기 위한 overlap 시간은 출력 파형에 왜곡을 을 발생 시킨다.

3) 전류원 인버터의 스위치는 전압을 역전시켜야 하며 이를 위해 IGBT 와 같은 고성능 소자를 필요로 한다 .

따라서 전압원 인버터와 전류원 인버터는 하나의 회로만으로 필요로 하는 출력을 만들 수 없을 뿐만 아니라, 이로 인한 부품증가 및 비용 상승을 가져온다. 위에서 말한 전압원 과 전류원 인버터의 문제점을 극복하기 위한 한 대안이 Z-source 인버터이다.

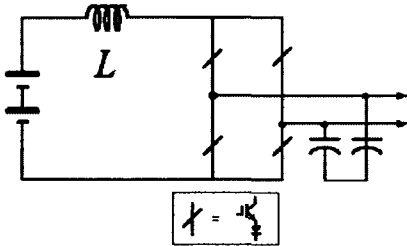


그림 2 전형적인 전류원 인버터
Fig. 2 The traditional l-source inverter

그림 3은 단상 Z-source 인버터를 보여 주고 있다. 2개의 평행적인 인덕터 L1 과 L2 , 커패시터 C1 과 C2가 X형태로 연결되어 있으며, 양단에 연계된 DC 전원을 위한 변환기 및 부하로 구성되어 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 Z-source 인버터는 전압원 및 전류원 특성을 모두 가지는 구조를 하고 있다.

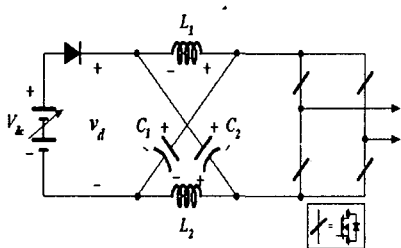


그림 3 단상 Z-source 인버터
Fig. 3 Single phase Z-source inverter

그림 4는 암 단락 여부에 따른 Z-source 인버터의 등가회로를 나타내고 있다. 그림 4(a)는 암 단락시의 등가회로이며, 이때 인덕터와 커패시터는 병렬로 연결되는 구조를 취하고 있다. 그림 (b)는 암이 비단락시의 등가회로이며, 이때는 기존의 인버터와 같이 부하에 전력을 공급하는 시점이다.

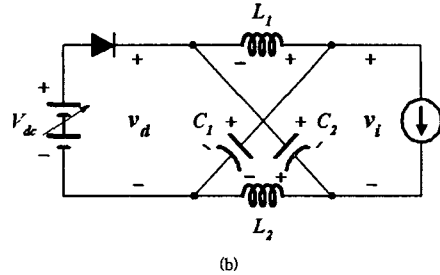
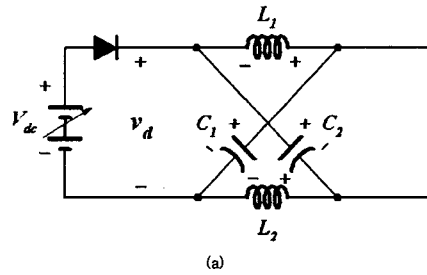


그림 4 Z-source 인버터의 등가회로
(a) 암 단락시 (b) 암 비단락시
Fig. 4 Equivalent circuit of the Z-source inverter
(a) Shoot-through (b) Non shoot-through

DC 전압원으로는 배터리, 다이오드 정류기, 솔라 셀 및 연료 전지 등을 사용할 수 있으며, 인버터는 환류다이오드를 내장한 스위치로 구성 되어 있다.

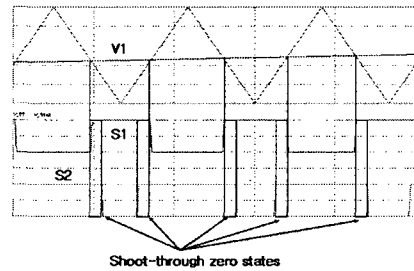


그림 5 단상 인버터의 PWM 스위칭 방식
Fig. 5 PWM switching method of single phase inverter

그림 5는 기존의 PWM 방식에 암단락(shoot-through states)이 되어진 Z-source 인버터 구동 스위치 신호를 나타내고 있으며, 각 스위치에 ON/OFF 되어지는 시간을 나타내고 있다. 각의 스위치 파형을 보면 단락되어진 부분을 발견 할 수 있으며, 이것은 인버터의 DC 링크단의 전압이 단락에 의한 승압 기능이 추가되었음을 알 수 있다. 이것은 2가지 스위칭 모드에 의한 Z-source 인버터의 인덕터에 특성을 설명 할 수 있는 가장 두드러진 특징이라고 할 수 있다. 즉 Z-source 인버터는 기존의 인버터에 Z형태의 수동소자의 추가로 승감압이 가능한 특성을 보여주고 있다.

2.2회로 분석 및 취득 가능한 출력 전압

인덕터의 L1, L2 및 커패시터 C1, C2가 동일하다면 인덕터 L과 커패시터 C로 표현할 수 있다. 따라서 Z-source 회로는 대칭적으로 동등한 회로가 되며, 아래수식이 성립한다.

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C, \quad v_{L1} = v_{L2} = v_L \quad (1)$$

Z-source 인버터에서 암단락 되어지는 시간(T_0)인 그림 4(a)에서 인덕터 및 콘덴서에 인가되는 전압은 아래와 같다.

$$v_L = V_C, \quad v_d = 2V_C, \quad v_i = 0 \quad (2)$$

Z-source 인버터에서 비 암단락 되어지는 시간(T_1)인 그림 4(b)에서 인덕터, 콘덴서 및 출력전압은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} v_L &= V_0 - V_C, \quad v_d = V_0 \\ v_i &= V_C - v_L = 2V_C - V_0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 V_0 는 DC전압이고 $T_0 + T_1$ 은 스위칭 주기 T 가 된다. 한 번의 스위칭 간격(T)동안 인덕터에 인가되는 평균전압은 0이 될 것이다. 따라서 위식으로부터 아래이 유도된다.

$$\begin{aligned} V_L = v_L &= (T_0 \cdot V_C + T_1 \cdot (V_0 - V_C)) / T = 0 \\ \frac{V_C}{V_0} &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} \end{aligned} \quad (4)$$

비슷하게 인버터의 스위치를 가로 지르는 DC 링크의 평균전압은 다음과 같이 찾아낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i = \bar{v}_i &= (T_0 \cdot 0 + T_1 \cdot (2V_C - V_0)) / T \\ &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_0 = V_C \end{aligned} \quad (5)$$

인버터의 브리지에 걸리는 DC 링크 최대치(peak)는 (3)식에 대입해 다음과 같이 다시 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{v}_i = V_C - v_L &= 2V_C - V_0 = \frac{T}{T_1 - T_0} V_0 \\ &= B \cdot V_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{단, } B = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} \geq 1$$

여기서 B 는 shoot through zero state로부터 결정 되어진 boost factor 이다. DC링크의 전압피크(v_i)로부터 인버터의 모듈레이션 인덱스(M)이 주어지면 인버터의 최대 출력 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{v}_{ac} = M \cdot \frac{\hat{v}_i}{2} \quad (7)$$

(6)의 boost factor인 B 와 (7)의 buck factor를 결합하면 아래 식과 같다.

$$\hat{v}_{ac} = M \cdot B \cdot \frac{V_0}{2} \quad (8)$$

수식 (8)의 buck-boost factor B_B 에 선택에 의한 스텝 증가와 스텝 다운이 출력 전압에서 보여 진다.

$$B_B = M \cdot B = (0 \sim \infty) \quad (9)$$

수식(1)(5)(7)에 의해서 커패시터 전압을 나타 낼 수 있다.

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C = \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{1 - 2\frac{T_0}{T}} V_0 \quad (10)$$

buck-boost factor, B_B 는 모듈레이션의 M 와 boost factor B 에 의해 결정되어진다. 수식 (6)에서 boost factor B duty cycle 에 의해 제어 되어 진다.

3. 실험 결과

그림 6은 1[kW]급으로 제작된 Z-source인버터를 나타내고 있다. 스위칭 신호발생을 위해서는 DSP(TMS320F2812)를 사용하였다.

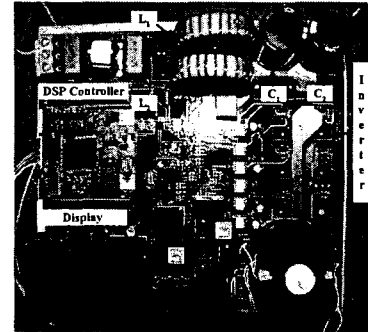
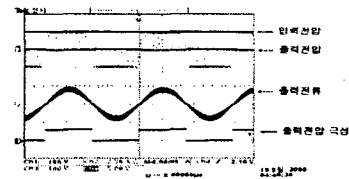


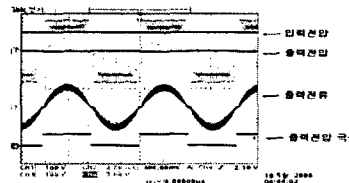
그림 6 제작된 Z-source 인버터
Fig. 6 Prototype Z-source inverter

그림 7은 Z-source를 이용한 승감압과정을 보여 주는 파형이다. 그때의 변조비와, 암단락비를 나타내고 있다.

그림 8(a)는 승압모드에서 Z-source 인버터의 입력전압, 출력전압, 인덕터의 전류파형을 나타내고 있으며, 그림 8(b)는 그림 8(a)를 확대한 그림이다.



(a)



(b)

그림 7 Z-source 인버터의 입출력파형
(a) $m=0.8, B=0$ (B) $M=0.8, B=0.078$
Fig. 7 Waveforms of Z-source inverter
(a) $m=0.8, B=0$ (B) $M=0.8, B=0.078$

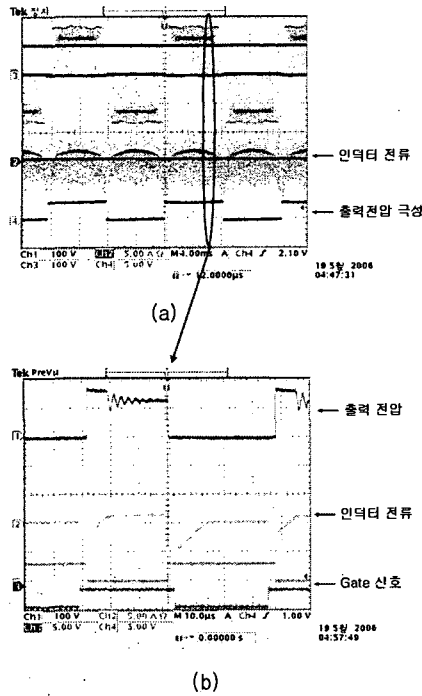


그림 8 승압모드 일 때 Z-source 인버터의 각부 파형
 Fig. 8: Each waveforms of Z-source inverter

3. 결론

이 논문은 하나의 임피던스 소스 전력변환 기술에 대해 기술하고 있으며, Z-source 인버터는 전력 변환 회로의 한 부분으로 하나의 커패시터와 인덕터가 각기 사용되어진 기존의 전압, 전류원(V-I source)의 단점을 극복하고 있음을 보여 주고 있을 뿐만 아니라 기존의 전압, 전류원(V-I source)인버터와는 다른 이론 및 운영 적으로 새로운 형태의 회로를 보여 주고 있다. 또한 기존의 시스템이 가지고 있는 단점(스위칭 단락, 소자 증가)을 해결할 수 있으며, Z-source의 이론은 모든 DC/AC, AC/DC, AC/AC, DC/DC 전력 변환 시스템에 응용되어 질수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Fang Z. Peng "Z-source Inverter", IEEE Trans, Ind, Applicat, Vol. 39, NO. 2, pp, 504-510, 2003 Mar/apr.
- [2] 김 희 준, "스위치모드파워 서플라이" 성안당.