

의사-왓킨슨-존슨 인버터

김정훈, 김기수, 차현녕, 김흥근
경북대학교

Qusai-Watkins-Johnson Inverter

Jeonghun Kim, Kisu Kim, Honnyong Cha, Heung Geun Kim
Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문에서는 Quasi Watkins Johnson(qWJ) 인버터를 제안한다. 단상 qWJ 인버터는 기존의 Watkins Johnson(WJ) 인버터에서 간단한 회로 수정을 통해 제안되며, 기존의 WJ 인버터의 모든 장점을 유지한다. 제안한 인버터는 모든 능동 스위치가 비절연형 게이트 구동을 하므로 게이트 구동회로의 부담을 덜어주고 기존 방식에 비해 적은 비용과 작은 크기로 구현할 수 있다. 또한, 제안한 인버터는 기존의 하프 브릿지 인버터의 출력전압보다 더 큰 출력전압을 가진다. 3상 qWJ 인버터는 출력전압이 입력전압의 2배까지 승압이 가능하다. 계통연계형 태양광 시스템에 적용 시, 기존의 3상 전압형 인버터는 누설전류로 인해 안정성에 문제가 생길 수 있지만, 제안한 인버터는 누설전류에 의한 문제가 생기지 않는다. 그러므로 제안한 인버터는 누설전류를 줄이기 위한 추가적인 회로가 필요하지 않고 적은 비용과 작은 사이즈로 계통연계형 태양광 인버터 시스템을 구현할 수 있다. 이러한 장점들은 3상 qWJ 인버터에서 더욱 현저하게 드러난다. 1kW의 시제품을 제작하여 제안한 인버터의 성능을 검증하였다.

1. 서론

기존의 하프 브릿지 인버터는 스위치를 두 개만 사용하여 AC 출력을 낼 수 있다. 하지만 최대출력전압은 입력전압의 절반으로, 입력전압만큼 큰 출력전압이 필요하거나 입력전압의 범위가 넓은 경우 입력 단에 2배의 승압 기능을 가진 부스트 컨버터를 추가해야 한다. 하지만 2단으로 이루어진 회로는 스위칭 소자가 추가되기 때문에 효율이 감소하고 비용이 커지게 된다. 또, 스위치 중 절반은 비절연형 게이트 구동을 하지만 남은 절반은 절연형 게이트 구동을 한다. 절연형 게이트 구동은 트랜스포머나 부트스트랩 회로를 추가하여 사용해야 하며, 이는 게이트 구동회로의 비용과 크기를 증가시킨다.

계통연계형 태양광 인버터에서 입력과 출력의 접지가 서로 달라 기생 커패시턴스가 생긴다. 기생 커패시턴스의 전압 변동에 의해 태양광 패널과 접지 사이에는 누설전류가 흐른다.^[1] 누설전류는 노이즈를 발생시켜 회로의 안정성과 효율을 떨어뜨린다. 누설전류를 줄이기 위해 지금까지 많은 인버터들이 개발되어 왔다.^[2] 대표적인 인버터로 H5^[3], H6^[4] 그리고 HERIC^[5] 인버터가 있다. 이들은 스위치 소자를 추가하여 누설전류의 양을 줄였다. 하지만 누설전류를 완전히 제거하지 못하였으며 추가

된 스위치 소자 때문에 비용과 효율 측면에서 단점을 가진다.

그림 1의 Watkins Johnson(WJ) 인버터는 기존 인버터의 단점들을 극복하였다.^{[6],[7]} 하프 브릿지 인버터와 같이 두 개의 스위치를 사용하지만 풀 브릿지 인버터처럼 출력전압을 입력전압만큼 올릴 수 있다. 또, 입력과 출력이 공통 접지를 이루고 있어 계통연계형 태양광 인버터로 이용하더라도 누설전류가 거의 흐르지 않아 안정성을 높일 수 있다. 하지만 WJ 인버터 역시 두 개의 스위치 중 하나는 절연형 게이트 구동으로 절연문제를 해결하지는 못한다.

본 논문에서는 단상에서 두 개의 스위치를 사용하며 모든 스위치가 비절연형 게이트 구동하는 인버터를 제안한다. 제안한 회로는 기존의 WJ 인버터에서 간단한 수정을 통해 제안되었기 때문에 기존의 WJ 인버터의 모든 장점을 그대로 유지한다.

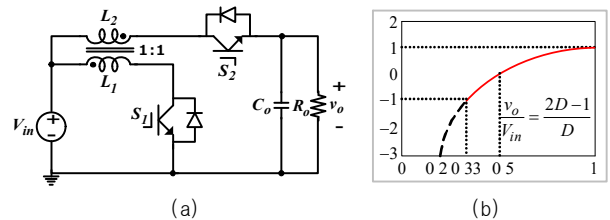


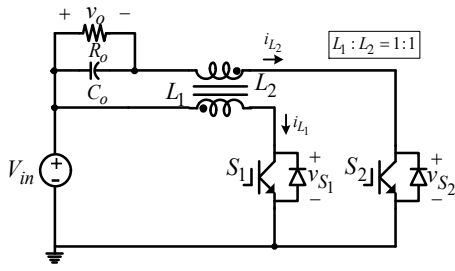
그림 1 기존 왓킨슨-존슨 인버터 (a) 회로 (b) 전압이득
Fig. 1 Conventional WJ Inverter (a) Circuit (b) Voltage Gain

2. 본 문

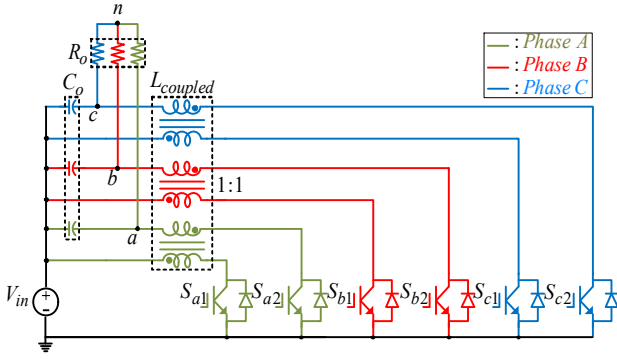
2.1 제안한 토폴로지

제안한 qWJ 인버터(그림 2)는 기존 WJ 인버터에서 추가된 소자가 없기 때문에 스위치(S_1 , S_2), 결합 인덕터(L_1 , L_2), 출력 커패시터(C_o)로 구성된다. 제안한 인버터는 모든 스위치가 비절연형 게이트 구동이 가능하여 게이트 구동회로를 간소화시켜 제작비용과 크기를 줄일 수 있다. 또한, 추가된 회로나 소자가 없고 동작모드가 크게 변하지 않기 때문에 기존의 WJ 인버터의 장점을 그대로 가진다. 최대출력전압은 기존의 WJ 인버터와 같다.

제안한 인버터는 입력과 출력이 접지를 공유하고 있지 않다. 하지만 입력과 출력의 양의 단자를 공유하고 있기 때문에 계통연계형 태양광 인버터에서의 누설전류 문제를 해결할 수 있다.



(a)



(b)

그림 2 제안한 의사-왓킨슨-존슨 인버터

(a) 단상 (b) 3상

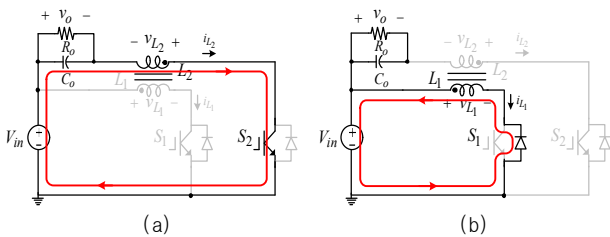
Fig. 2 Proposed quasi-Watkins-Johnson Inverter

(a) Single-phase (b) Three-phase

2.1.1 동작모드

출력이 양일 때($v_o > 0$), 모드 1은 S_1 이 오피, S_2 가 온 되는 구간으로 그림 3(a)와 같다. i_{L_1} 은 흐르지 않고, i_{L_2} 는 $V_{in} - v_o - S_2$ 를 통해 흐른다. L_2 는 입력에 의해 에너지가 충전되며 전압 관계식은 다음과 같다.

$$v_{L_1} = v_{L_2} = v_o - V_{in} \quad (1)$$



(a)

(b)

그림 3 출력전압이 양일 때의 동작모드 (a) 모드 1 (b) 모드 2

Fig. 3 Operational Modes for $v_o > 0$ (a) Mode 1 (b) Mode 2

출력이 양일 때, 모드 2는 S_1 이 온, S_2 가 오피 되는 구간으로 그림 3(b)와 같다. 비록 S_1 이 온 되었지만 전류는 S_1 의 바디 다이오드를 통해 역방향으로 흐른다. 결합 인덕터는 에너지가 방전되며 전압 관계식은 다음과 같다.

$$v_{L_1} = v_{L_2} = V_{in} \quad (2)$$

출력이 음일 때는 전류의 방향이 반대가 되어 모드 1에서 역방향 전력 전송이 발생하고 모드 2에서 에너지가 충전된다.

2.1.2 전압이득과 게이트 신호

전압이득은 결합 인덕터의 flux balance 조건에 의해 식 (3)과 같이 도출된다.

$$\frac{v_o}{V_{in}} = \frac{2D-1}{D} \quad (3)$$

여기서 D 는 S_2 의 듀티비이다. 전압이득은 기존의 WJ 인버터의 전압이득과 같은 값을 가진다.

출력 커패시터(C_o)의 charge balance 조건과 전압이득 식을 통해 인덕터에 흐르는 평균전류를 구할 수 있다.

$$i_{L_1,avg} = -\frac{(1-D)}{D} I_o \quad (4)$$

$$i_{L_2,avg} = I_o \quad (5)$$

제한한 인버터의 출력전압과 토폴변조지수 M 은 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있다. 식 (6)과 (7)을 전압이득 식 (3)에 대입하여 듀티비와 M 의 관계식 (8)을 구할 수 있다.

$$v_o = V_m \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$M = \frac{V_m}{V_{in}} \quad (7)$$

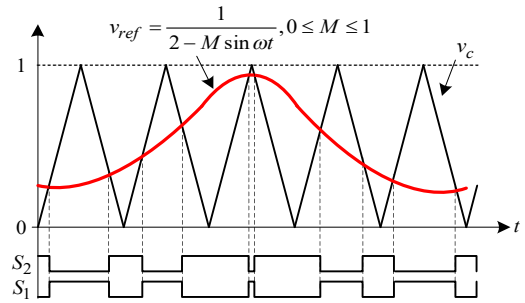


그림 4 제안한 인버터의 게이트 신호

Fig. 4 Gate Signal of the Proposed Inverter

$$D = \frac{1}{2 - M \sin(\omega t)} \quad (8)$$

하프 브리지 인버터는 입력과 출력전압의 관계가 선형적이기 때문에 기준과 신호(v_{ref})를 정현파로 변경하여 출력전압을 정현파로 얻을 수 있다. 하지만 제안한 인버터의 입력과 출력전압은 비선형적이기 때문에 정현파의 출력전압을 얻기 위해서는 비선형적으로 개정된 듀티비(식 (8))를 사용해야 한다. 그림 4는 제안한 인버터의 게이트신호 발생 원리를 나타낸다. 식 (8)로 이루어진 기준과 신호(v_{ref})가 반송파 전압(v_c)보다 클 때 S_2 가 온, S_1 이 오피 된다.

2.2 실험결과

본 논문에서는 제안한 회로의 성능 검증을 위해 표 1에 표기한 사양에 맞춰 시제품을 제작하여 성능을 검증하였다.

그림 5는 한 상의 스위치 전압 파형이다. 그림 6은 1kW 전력에서 3상 인버터의 출력선간전압 파형이다.

표 1 제안한 인버터의 전기적 사양

Table 1 Electrical Specifications of the Proposed Inverter

Output Power (P_o)	1 [kW]
Input Voltage (V_{in})	200 [V_{dc}]
Output Voltage(line to line) (V_o)	220 [V_{rms}] 60 [Hz]
Switching Frequency (f_s)	20 [kHz]
Switching Device (S_{a1} S_{a2})	APT15GP90BD Q1G
Inductors ($L_{coupled}$)	600 [μH]
Output Capacitor (C_o)	13.6 [μF]

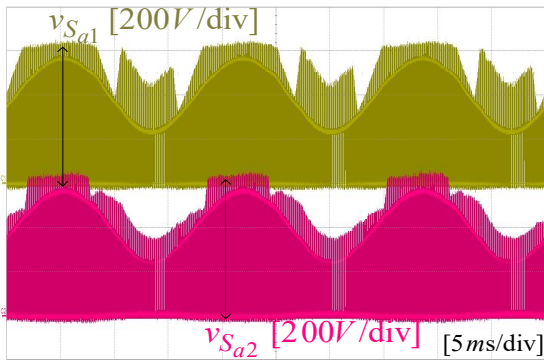


그림 5 스위치 S_{a1} , S_{a2} 전압의 실험파형

Fig. 5 Experimental Waveforms of Switch S_{a1} , S_{a2} Voltage

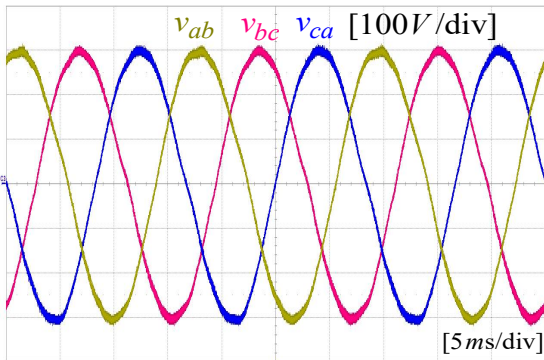


그림 6 출력선간전압의 실험파형

Fig. 6 Experimental Waveforms of Output Line-to-Line Voltage.

3. 결론

본 논문에서는 기존의 WJ 인버터의 장점을 그대로 유지하는 qWJ 인버터를 제안하였다. 제안한 인버터의 특징으로는 다음과 같다.

1. 제안한 인버터는 기존 3상 인버터보다 2배 높은 출력전압을 가질 수 있다.
2. 입력과 출력이 양의 단자를 공유하고 있어 계통연계 태양광 인버터에서의 누설전류 문제를 해결할 수 있다.
3. 모든 스위치가 비절연형 게이트 구동하기 때문에 비용과 크기를 줄일 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임(No 20174030201490)

참고 문헌

- [1] O. Lopez *et al.*, "Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 1, pp. 140–147, Mar. 2010.
- [2] N. Vazquez, M. Rosas, C. Hernandez, E. Vazquez, and F. J. Rerez Rinal, "A new common mode transformerless photovoltaic inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6381–6391, Oct. 2015.
- [3] S. Bremicker, "A method for converting an electric direct voltage of a direct voltage source, particularly of a photovoltaic direct voltage source into an alternating voltage," Patent Application DE102004030912 B3, Jun. 25, 2004.
- [4] W. Yu, J. Lai, H. Qian, and C. Hutchens, "High efficiency MOSFET inverter with H6 type configuration for photovoltaic nonisolated AC module application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1253–1260, Apr. 2011.
- [5] T. Kerekes, R. Teodorescu, P. Rodriguez, G. Vazquez, and E. Aldabas, "A new high efficiency single phase transformerless PV inverter topology," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 184–191, Jan. 2011.
- [6] ISRAELSEN, B.P., et al.: 'A 2.5 kV high reliability TWT power supply: design techniques for high efficiency and low ripple'. *IEEE Power Electronics Specialist Conf., Palo Alto, CA, USA, 1977*, pp. 212–222
- [7] T. Y. Ahn "Operation analysis of the Watkins Johnson converter," *J. Korean Inst. Telemat. Electron.*, vol. 34, no. 6, pp. 85–93, Jun. 1997.