

고전압 태양광 패널용 고효율 단상 태양광 인버터

A High-efficiency Single-phase Photovoltaic Inverter for High-voltage Photovoltaic Panels

류형민[★]

Hyung-Min Ryu[★]

Abstract

For DC-AC power conversion from a high-voltage photovoltaic panel to a single-phase grid, the two-stage transformerless inverter with a buck-boost converter followed by a full-bridge inverter is widely used. To avoid an excessive leakage current due to the large parasitic capacitance of the photovoltaic panel, the full-bridge inverter can only adopt the bipolar PWM which results in much higher power loss compared to the unipolar PWM. In order to overcome such a poor efficiency, this paper proposes a new topology in which an IGBT and a diode for circuit isolation are added to the buck-boost converter. The proposed circuit isolation method allows the unipolar PWM in the full-bridge inverter without any increase in the leakage current so that the overall efficiency can be improved. The validity of the proposed solution is verified by computer simulation and power loss calculation.

요약

고전압 태양광 패널에서 단상 계통으로의 직류-교류 전력 변환을 위해 벡부스트 컨버터에 풀브리지 인버터를 종속적으로 연결하는 두 단계의 무변압기 인버터가 주로 사용된다. 태양광 패널의 큰 기생 커패시턴스에 기인하는 과도한 누설 전류를 피하기 위해 풀브리지 인버터는 단극성 PWM에 비해 훨씬 더 많은 전력 손실을 초래하는 양극성 PWM으로만 스위칭할 수 있다. 그런 낮은 효율을 개선하기 위해 본 논문은 벡부스트 컨버터에 회로 절연을 위한 IGBT와 다이오드를 하나씩 추가한 새로운 토폴로지를 제안한다. 제안된 회로 절연 방식은 누설 전류를 증가시키지 않으면서 풀브리지 인버터에서 단극성 PWM을 가능케 함으로써 전체 효율을 개선한다. 제안된 방법의 타당성은 컴퓨터 시뮬레이션과 전력 손실 계산을 통해 검증한다.

Key words : high-efficiency, single-phase photovoltaic inverter, buck-boost converter, full-bridge inverter, leakage current

1. 서론

단상 태양광 인버터는 가변 직류 전원인 태양광 패널에서 발전된 전력을 단상 계통에 공급하기 위해 직류를

교류로 변환하는 장치이며, 태양광 패널 전압의 허용 범위에 따라 부스트 컨버터 또는 벡부스트 컨버터에 풀브리지 인버터를 종속적으로 연결하는 두 단계의 전력 변환 방식이 주로 사용된다. 변압기를 사용하지 않는 방식

* Dept. of Electrical Engineering, Dong-eui University

★ Corresponding author

E-mail : hmryu@deu.ac.kr, Tel : +82-51-890-1670

※ Acknowledgment

This work was supported by Dong-eui University Foundation Grant(2018).

Manuscript received Nov. 11, 2022; revised Dec. 6, 2022; accepted Dec. 13, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 비용 및 효율 측면에서 유리하기 때문에 현재는 단상 태양광 인버터 시장의 대부분을 점유하고 있다.

하지만 변압기를 사용해서 절연하지 않으면 태양광 패널의 출력 단자와 프레임, 즉 접지 간에 존재하는 큰 기생 커패시턴스로 인해 과도한 누설 전류가 흐를 수 있어 EMI 노이즈 및 누전 차단과 관련하여 심각한 문제를 초래할 수 있다[1]. 참고로 600V/50A급 IGBT와 방열판 간의 기생 커패시턴스는 수십 pF에 불과한 데 반해, 5kW급 태양광 패널의 기생 커패시턴스는 수십 nF에 달한다[1].

이러한 이유로 풀브리지 인버터는 공통 모드 전압이 일정한 양극성 PWM으로만 스위칭할 수 있으며, 단극성 PWM은 구형파의 공통 모드 전압을 발생시키므로 심각한 누설 전류 문제를 초래한다[2]. 하지만 양극성 PWM은 단극성 PWM에 비해 스위칭 손실이 두 배 크고, 인덕턴스도 동일한 최대 리플 전류 조건에서 두 배 크다. 따라서 누설 전류 문제를 야기하지 않으면서 단극성 PWM이 가능하도록 IGBT와 다이오드를 두 개씩 추가한 Sunway사의 HERIC을 비롯해서 풀브리지 인버터의 토폴로지를 다양하게 변형한 일명 고효율 단상 태양광 인버터들이 제안되었다[2]-[8]. 각각의 토폴로지에는 일장 일단이 있어 효율과 비용을 고려한 발전 수익은 대동소이하다.

본 논문은 직류단 전압보다 높은 태양광 패널 전압까지 허용하기 위해 벡부스트 컨버터에 풀브리지 인버터를 종속적으로 결합한 토폴로지를 새로운 방식으로 변형한 고효율 단상 태양광 인버터를 제안한다. 일정한 공통 모드 전압을 얻기 위해 풀브리지 인버터에 스위칭 소자를 추가하는 기존의 토폴로지들과 달리 제안된 토폴로지는 벡부스트 컨버터에 IGBT와 다이오드를 하나씩만 추가하여 회로를 절연시킴으로써 단극성 PWM을 가능케 한다.

Table 1. Specifications of 5kW photovoltaic inverter.

표 1. 5kW급 단상 태양광 인버터 사양

Parameter	Value	Unit
Output power	5	kW
PV voltage(V_{pv})	550	V
DC-link voltage(V_{dc})	380	V
Grid voltage(V_{ac})	220	Vrms
Grid frequency	60	Hz
DC inductance(L_{dc})	2	mH
DC-link capacitance(C_{dc})	3.4	mF
AC inductance(L_{ac1}, L_{ac2})	1	mH
PV parasitic capacitance(C_p)	50	nF
Switching frequency	20	kHz

제안된 방식의 회로 동작과 효율 증가의 타당성은 표 1의 사양을 갖는 5kW급 단상 태양광 인버터를 예시로 해서 PSIM을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 전력 손실 계산을 통해 검증한다.

II. 본론

1. 기존의 방식

기존의 단상 태양광 인버터 회로는 그림 1과 같다. 직류단 전압(V_{dc})보다 높은 태양광 패널 전압(V_{pv})을 허용하기 위해 벡부스트 컨버터가 사용된다. 표 1의 예시에 사용된 태양광 패널은 370W급 태양광 모듈(LG370S2W-U5) 14장을 직렬로 연결한 것이며, 최대 전력 점 전압은 $39.3V \times 14 = 550V$ 이다. 태양광 패널의 음극 마디에서 접지된 C_p 는 태양광 패널의 기생 커패시턴스를 의미하며, 태양광 모듈의 출력 단자와 프레임, 즉 접지 간에 존재하는 기생 커패시턴스들의 총합이다. 풀브리지 인버터는

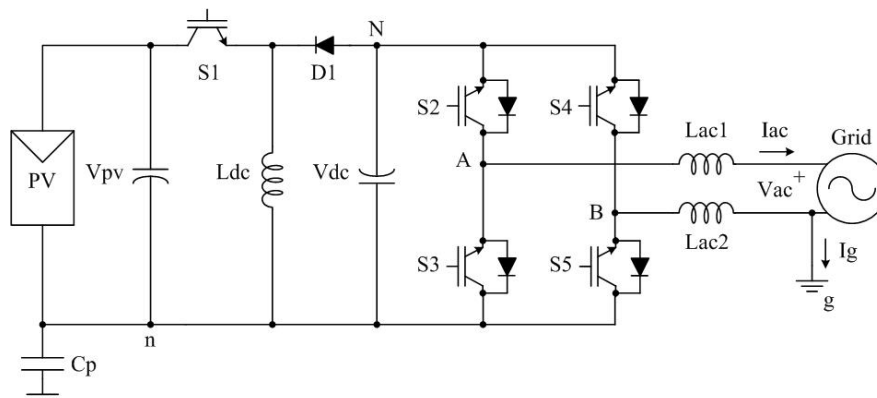


Fig. 1. Conventional single-phase photovoltaic inverter.

그림 1. 기존의 단상 태양광 인버터

양극성 PWM으로 스위칭하며, 동일한 인덕턴스를 갖는 두 개의 인덕터를 사용하여 단상 계통과 연결한다.

그림 1에서 중첩의 원리에 의해 계통 전압(V_{ac})을 영으로 하고 공통 모드 등가 회로를 구하면 그림 2와 같다 [2]. 여기서 공통 모드 전압과 차동 모드 전압은 풀브리지 인버터의 풀 전압에 의해 각각 식 (1)과 식 (2)와 같이 정의된다.

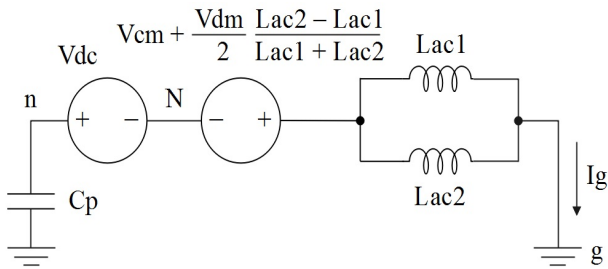


Fig. 2. Common mode equivalent circuit.
그림 2. 공통 모드 등가 회로

$$v_{cm} = \frac{v_{AN} + v_{BN}}{2} \quad (1)$$

$$v_{dm} = v_{AN} - v_{BN} \quad (2)$$

풀브리지 인버터의 두 인덕터가 동일한 인덕턴스를 갖기 때문에 차동 모드 전압에 기인하는 누설 전류는 영이다. 만약 풀브리지 인버터가 단극성 PWM으로 스위칭한다면 공통 모드 전압이 스위칭할 때마다 직류단 전압의 절반만큼 변동하는 구형파로 주어지고, 태양광 패널의 기생 커패시턴스가 크기 때문에 그림 3과 같이 누설 전류의 최대값이 2A를 초과하며 실효값은 985mArms에 달한다.

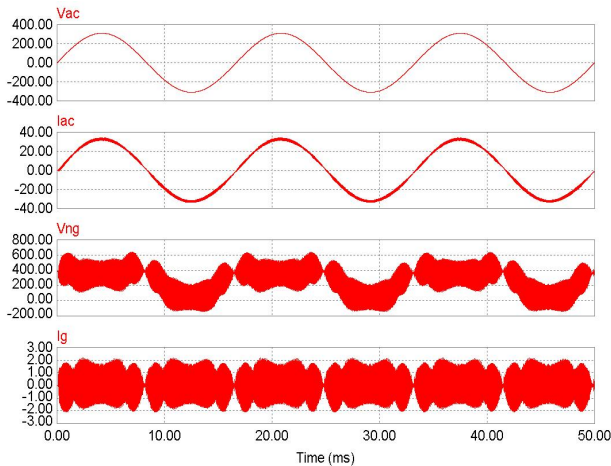


Fig. 3. Leakage current according to the unipolar PWM.
그림 3. 단극성 PWM에 따른 누설 전류(시뮬레이션)

이러한 큰 누설 전류는 EMI 노이즈 및 누전 차단 규제와 관련해서 심각한 문제를 야기한다. 예를 들어, 국제 표준 IEC 62109-2에서는 누설 전류가 300mArms를 초과하면 차단하도록 규정하고 있다[9]. 따라서 단극성 PWM은 누설 전류를 줄이기 위한 필터, 특히 공통 모드 인덕터의 과도한 비용 및 전력 손실을 초래한다.

반면에 양극성 PWM으로 스위칭하면 공통 모드 전압이 직류단 전압의 절반으로 일정하다. 따라서 그림 4와 같이 누설 전류가 계통 전압에 기인한 2mArms만으로 크게 감소한다.

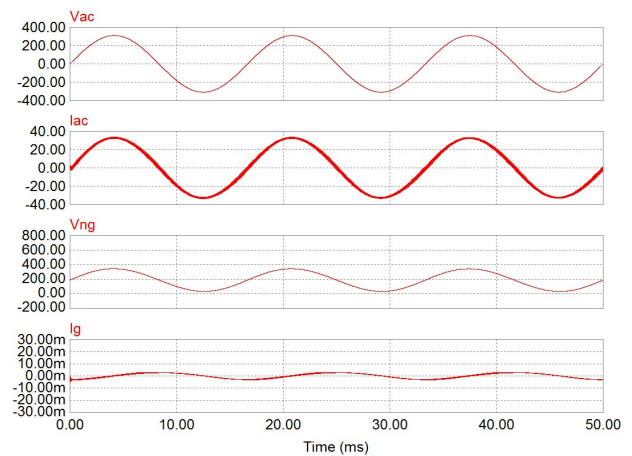


Fig. 4. Leakage current according to the bipolar PWM.
그림 4. 양극성 PWM에 따른 누설 전류(시뮬레이션)

2. 제안된 방식

제안된 단상 태양광 인버터 회로는 그림 5와 같다. 벡부스트 컨버터에서는 입력에서 출력으로 전류가 흐르지 않는다는 사실에 착안하여 누설 전류가 흐를 수 없도록 IGBT(S6)와 다이오드(D6)를 추가해서 회로를 절연하였다.

S1과 S6는 동시에 스위칭하며, 동작 모드에 따른 전류 경로는 그림 6과 같이 기존의 벡부스트 컨버터와 동일하다. S1과 S6를 켜면 인덕터(L_{dc})는 입력으로부터 에너지를 공급받아 저장하며, 오프 상태인 D1과 D6에 의해 출력과 절연된다(그림 6(a)). 반대로 S1과 S6를 끄면 인덕터는 입력과 절연되고, 저장했던 에너지를 D1과 D6을 통해 출력으로 전달한다(그림 6(b)).

이러한 회로 절연 덕분에 공통 모드 등가 회로(그림 2)가 개방되므로 공통 모드 전압과 무관하게 누설 전류가 흐를 수 없고, 따라서 풀브리지 인버터는 단극성 PWM으로 스위칭할 수 있다. 단극성 PWM은 기존의 양극성 PWM에 비해 다음의 장점을 갖는다.

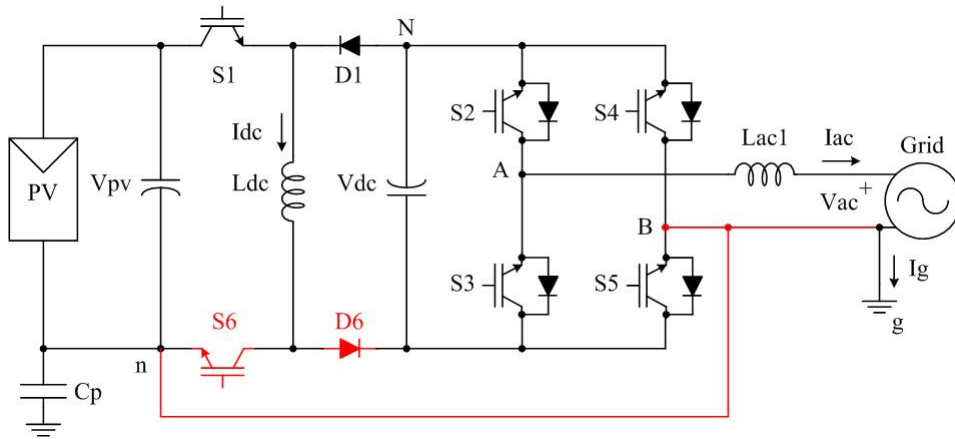


Fig. 5. Proposed single-phase photovoltaic inverter.
그림 5. 제안된 단상 태양광 인버터

1. 스위칭 손실이 절반으로 감소한다. 따라서 추가한 IGBT와 다이오드로 인한 도통 손실의 증가를 감안하더라도 전체 손실을 줄일 수 있다.

2. 동일한 최대 리플 전류 조건에서 인덕턴스가 절반으로 감소하므로 인덕터를 하나만 사용할 수 있다(그림 5). 따라서 추가한 IGBT와 다이오드에 따른 비용 증가를 감안하더라도 전체 비용을 줄일 수 있다.

추가적으로 회로 절연에 따른 S1, D1, S6, D6의 오프 전압 불확정성을 제거하고, S1과 S6의 스위칭 특성 차이로 인한 전류가 흐를 수 있는 경로를 제공하기 위해 태양광 패널의 음극 마디(n)를 풀브리지 인버터에서 인덕터를 연결하지 않은 마디(B)와 연결하였다. S1, D1, S6, D6의 오프 전압은 마디 B에 연결된 S4와 S5의 온/오프 상태에 따라 달라지며 표 2와 같다. 결과적으로 S1과 D1은 기존의 방식과 동일하게 1200V의 전압 정격을 갖는 소자를 사용하고, 추가한 S6와 D6는 600V급 소자를 사용할 수 있다.

Table 2. OFF voltages of S1, D1, S6, D6 according to ON/OFF states of S4, S5.

표 2. S4, S5의 온/오프 상태에 따른 S1, D1, S6, D6의 오프 전압

Switching device	OFF voltage	
	S4 ON, S5 OFF	S4 OFF, S5 ON
S1, D1	V_{pv}	$V_{pv} + V_{dc}$
S6, D6	V_{dc}	0

제안된 방식의 회로 동작을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 풀브리지 인버터는 단극성 PWM으로 스위칭하며 S2와 S3는 스위칭 주파수로, S4와 S5

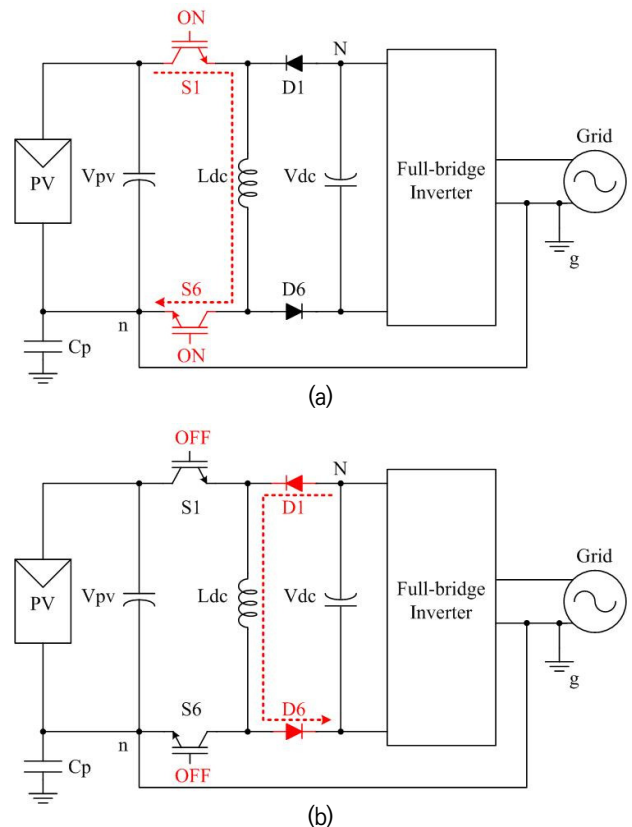


Fig. 6. Operation modes of the proposed buck-boost converter. (a) IGBTs ON, (b) IGBTs OFF.

그림 6. 제안된 벡부스트 컨버터의 동작 모드

는 계통 주파수로 스위칭한다. 제어 방식은 최대 전력 점 추종 제어에서 단위 역률 제어까지 전부 통상적인 기존의 방식과 동일하다. 시뮬레이션 결과로부터 표 2의 오프 전압을 확인할 수 있으며, 주목할 점은 누설 전류(Ig)가 전혀 흐르지 않는다는 사실이다. 기존의 방식에서는 계통 전압에 기인한 누설 전류가 불가피하지만(그림 4) 제안된 방식에서는 회로 절연 덕분에 흐르지 못한다.

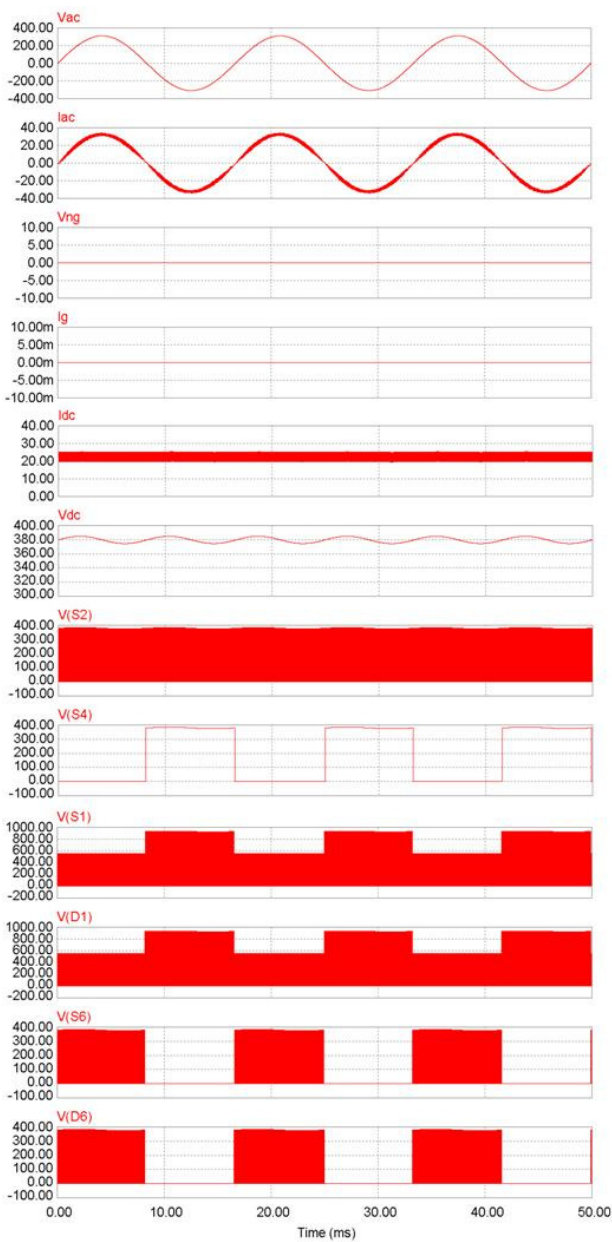


Fig. 7. Simulation results of the proposed method.

그림 7. 제안된 방식의 시뮬레이션 결과

3. 전력 손실 계산

본 절에서는 스위칭 소자에서의 전력 손실 계산을 통해 제안된 방식에 따른 전력 손실의 감소를 검증한다. 스위칭 소자의 부품 번호는 표 3과 같다. 스위칭 소자의 전류-전압 특성 곡선과 스위칭 에너지 손실 곡선은 제조사가 제공하는 데이터시트를 참고하였으며, 계산의 편의를 위해 다음을 가정하였다.

1. 리플 전류가 영이다.
2. 풀브리지 인버터의 인덕터 전압이 영이다. 즉 PWM 기준 전압이 계통 전압과 같다.

계산 방식은 통상적인 선형 근사 방식이며 계산 결과

는 표 4와 같다. 벡부스트 컨버터에서 도통 손실은 추가한 IGBT와 다이오드로 인해 74%만큼 증가한다. 반면에 스위칭 손실은 거의 같은데, 그 이유는 제안된 방식에서 두 오프 전압의 합이 기존의 오프 전압과 같기 때문이다 (표 2). 풀브리지 인버터에서는 양극성 PWM을 단극성 PWM으로 대체한 결과로 스위칭 손실이 절반으로 감소하고 도통 손실은 같다. 결과적으로 전체 손실은 10.2%만큼 감소한다.

Table 3. Part numbers of switching devices.

표 3. 스위칭 소자의 부품 번호

Switching device	Part number
S1	IGW40T120
D1	IDP30E120
S2, S3, S4, S5	IKW50N60T
S6	IGW50N60T
D6	IDW50E60

Table 4. Power loss calculation results.

표 4. 전력 손실 계산 결과

Power loss(W)		Conventional	Proposed
Buck-boost converter	Conduction	31.9	55.4
	Switching	74.1	69.1
Full-bridge inverter	Conduction	45.2	45.2
	Switching	85.5	42.8
Total		236.7	212.5

III. 결론

본 논문에서는 벡부스트 컨버터에 풀브리지 인버터를 종속적으로 결합한 단상 태양광 인버터의 효율을 개선하고 비용을 저감하기 위한 변형 토폴로지를 제안하였다. 제안된 방식의 특징은 다음의 두 가지로 요약된다.

1. 벡부스트 컨버터에 IGBT와 다이오드를 추가하여 회로를 절연시켰고, 따라서 누설 전류가 흐르지 못한다.
2. 회로 절연 덕분에 풀브리지 인버터에서 기존의 양극성 PWM을 단극성 PWM으로 대체할 수 있고, 따라서 스위칭 손실과 인덕턴스를 절반으로 줄일 수 있다.

제안된 방식의 회로 동작과 효율 개선의 타당성은 5kW급 단상 태양광 인버터를 예시로 해서 시뮬레이션과 전력 손실 계산을 통해 검증하였다.

References

- [1] O. Lopez *et al.*, "Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.25, no.1, pp. 140-147, 2010. DOI: 10.1109/TEC.2009.2037810
- [2] B. Yang *et al.*, "Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.27, no.2, pp. 752-762, 2012. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2160359
- [3] H. Schmidt, S. Christoph, and J. Ketterer, "Inverter for transforming a DC voltage into an AC current or an AC voltage," Europe Patent 1 369 985 A2, 2003.
- [4] M. Victor *et al.*, "Method of converting a direct current voltage from a source of direct current voltage, more specifically from a photovoltaic source of direct current voltage, into an alternating current voltage," U.S. Patent 7 411 802, 2008.
- [5] R. Gonzalez *et al.*, "Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.22, no.2, pp.693-697, 2007. DOI: 10.1109/TPEL.2007.892120
- [6] S. V. Araujo, P. Zacharias, and R. Mallwitz, "Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.57, no.9, pp.3118-3128, 2010. DOI: 10.1109/TIE.2009.2037654
- [7] W. Li *et al.*, "Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.62, no.7, pp.4537-4551, 2015. DOI: 10.1109/TIE.2015.2399278
- [8] H. Li *et al.*, "An improved H5 topology with low common-mode current for transformerless PV grid-connected inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.34, no.2, pp.1254-1265, 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2833144
- [9] *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems-Part 2: Particular requirements for inverters*, IEC 62109-2, 2011.

BIOGRAPHY

Hyung-Min Ryu (Member)



2004 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2009~ : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Dong-eui University.