

단상 태양광 발전용 고효율 벡부스트 하프브리지 인버터

A High-efficiency Buck-boost Half-bridge Inverter for Single-phase Photovoltaic Generation

류형민[★]

Hyung-Min Ryu[★]

Abstract

Among single-phase photovoltaic inverters that can avoid excessive leakage current caused by the large parasitic capacitance of photovoltaic panels, a boost converter followed by a half-bridge inverter is the simplest and has the smallest leakage current. However, due to the high DC-link voltage, the rated voltage of the switching devices is high and the switching loss is large. This paper proposes a new circuit topology which can operate as a buck-boost inverter by adding two bidirectional switches to the output side of the half-bridge inverter instead of removing the boost converter. By reducing two stages of power conversion through the high-voltage DC-link to one stage, power loss can be reduced without increasing costs and leakage current. The feasibility of the proposed circuit topology is verified by computer simulation and power loss calculation.

요약

태양광 패널의 큰 기생 커패시턴스에 기인하는 과도한 누설 전류를 피하기 위한 단상 태양광 인버터 중에 부스트 컨버터와 하프브리지 인버터를 종속적으로 결합하는 방식은 가장 단순하면서 누설 전류가 가장 작다. 하지만 직류단 전압이 높아 스위칭 소자의 정격 전압이 높고 스위칭 손실이 크다. 본 논문은 부스트 컨버터를 제거하는 대신에 하프브리지 인버터의 출력 측에 2개의 양방향 스위치를 추가함으로써 벡부스트 인버터로 동작할 수 있는 새로운 회로 토폴로지를 제안한다. 고전압 직류단을 거치는 두 단계의 전력 변환을 한 단계로 줄인 덕분에 전력 손실을 절감할 수 있으며 비용 및 누설 전류는 증가하지 않는다. 제안된 회로 토폴로지의 타당성은 컴퓨터 시뮬레이션 및 전력 손실 계산을 통해 검증한다.

Key words : single-phase photovoltaic inverter, leakage current, half-bridge inverter, buck-boost inverter, bidirectional switch, power loss

1. 서론

단상 태양광 인버터는 태양광 패널의 발전 전력을 단상 계통에 공급하기 위해 직류를 교류로 변환하는 장치

이다. 변압기를 사용하지 않는 방식이 비용 및 효율 측면에서 유리하기 때문에 절연을 요구하는 일부 시장을 제외한 대부분의 시장을 점유하고 있다.

하지만 변압기로 절연하지 않으면 태양광 패널의 출력

* Dept. of Electrical Engineering, Dong-eui University

★ Corresponding author

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

※ Acknowledgment

Manuscript received Nov. 13, 2023; revised Dec. 4, 2023; accepted Dec. 13, 2023.

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.

단자와 접지 프레임 사이에 존재하는 큰 기생 커패시턴스로 인해 과도한 누설 전류가 흐를 수 있어 EMI 노이즈 및 누전 차단 규제와 관련해서 심각한 문제를 초래할 수 있다[1]. 예를 들어 국제 표준 IEC 62109-2에서는 누설 전류가 300mA를 초과하면 차단하도록 규정하고 있다 [2]. 따라서 Sunway사의 HERIC을 비롯해서 누설 전류를 저감하면서 동시에 효율을 높이거나 비용을 줄일 수 있는 다양한 회로 토폴로지들이 제안되었다[3]-[9].

이러한 회로 토폴로지 중에 부스트 컨버터와 하프브리지 인버터를 종속적으로 결합한 방식은 가장 단순하면서 누설 전류가 가장 작다[9]. 하지만 예를 들어 하프브리지 인버터 대신에 풀브리지 인버터를 사용한 방식과 비교하면 직류단 전압이 두 배 높기 때문에 스위칭 소자의 전압 정격이 높고 스위칭 손실이 크다[6].

본 논문에서는 기존 방식의 비용 및 누설 전류와 관련한 장점은 유지하면서 전력 손실을 줄이기 위해 부스트 컨버터를 제거하고 대신에 하프브리지 인버터에 양방향 스위치를 추가하여 교류 승압이 가능하도록 변형한 회로 토폴로지를 제안한다. 제안된 방식은 도통 손실이 증가하지만 스위칭 손실을 크게 줄일 수 있기 때문에 전체 손실을 절감할 수 있으며, 스위칭 소자의 수가 두 배로 증가하는 대신 정격 전압이 절반으로 감소하기 때문에 비용은 증가하지 않는다. 제안된 방식의 회로 동작과 손실 절감의 타당성은 3kW급 단상 태양광 인버터를 예시로 해서 PSIM을 이용한 시뮬레이션 및 전력 손실 계산을 통해 검증한다.

II. 기존의 방식

기존의 부스트 컨버터와 하프브리지 인버터를 종속적으로 결합한 회로는 그림 1과 같다. 태양광 패널 전압 (V_{pv})을 부스트 컨버터에서 일정한 직류단 전압(V_{dc})으로 승압하고, 하프브리지 인버터에서 계통 전압(V_{grid})으로 강압하면서 계통 전류(I_{grid})를 단위 역률로 제어한다. 태양광 패널의 음극 마디에서 접지된 C_p 는 태양광 패널의 기생 커패시턴스를 의미하며, 태양광 모듈의 출력 단자와 접지 프레임 사이에 존재하는 기생 커패시턴스들의 총합이다.

누설 전류와 관련해서 하프브리지 인버터 회로에서 주목할 점은 직류단 중간, 즉 커패시턴스가 동일한 커패시터(C_{dc1} , C_{dc2}) 사이의 마디 b를 접지된 중성선에 바로 연결한다는 사실이다. 이러한 연결 덕분에 C_p 에 걸리는 전압이 직류단 전압의 절반으로 일정하고, 따라서 누설

전류(I_g)가 흐르지 않는다.

하지만 출력 전압 V_{ab} 가 직류단 전압의 절반이고, 계통 전류를 제어하기 위해서는 계통 전압보다 높아야 하므로 최소 700V의 직류단 전압이 요구된다. 직류단 전압이 최소 350V인 풀브리지 인버터 방식과 비교하면 스위칭 소자의 정격 전압이 600V에서 1200V로 증가하고 스위칭 손실이 크다.

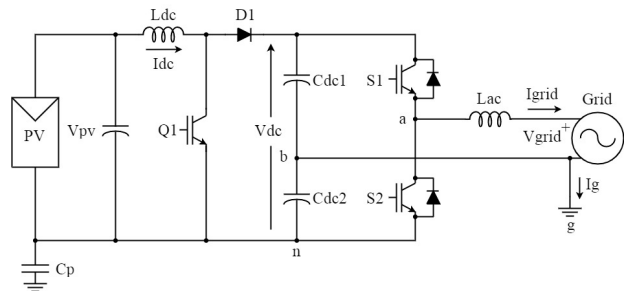


Fig. 1. Conventional single-phase photovoltaic inverter.
그림 1. 기존의 단상 태양광 인버터

III. 제안된 방식

1. 회로 토폴로지

제안된 방식의 벅부스트 하프브리지 인버터 회로는 그림 2와 같다. 직류 승압을 위한 기존의 부스트 컨버터를 대신해서 교류 승압이 가능하도록 2개의 양방향 스위치 ($S3-S4$, $S5-S6$)를 하프브리지 인버터의 출력 측에 추가하였다. 하나의 양방향 스위치는 IGBT와 다이오드를 2개씩 직병렬로 연결한 조합이며, 교류 승압에 필요한 양방향 전류 제어가 가능하다. Cf-Lf 회로는 계통 전류의 리플을 저감하기 위한 저주파 통과 필터이다.

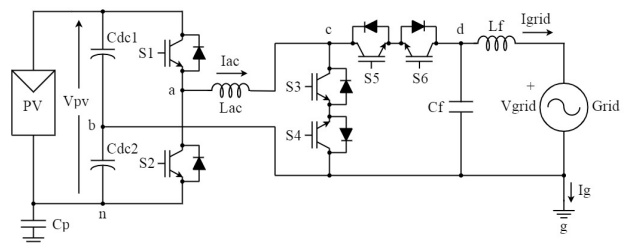


Fig. 2. Proposed single-phase photovoltaic inverter.
그림 2. 제안된 단상 태양광 인버터

제안된 방식은 강압만 가능한 하프브리지 인버터를 승압도 가능하도록, 즉 벅부스트 인버터로 동작하도록 회로 토폴로지를 변형하였고, 따라서 하프브리지 인버터를 태양광 패널에 바로 연결할 수 있다. 덕분에 스위칭 소자의 정격 전압을 1200V에서 600V로 낮추고 스위칭 손실

도 크게 줄일 수 있다. 스위칭 소자의 정격 전압이 절반으로 감소하는 대신 스위칭 소자의 수가 두 배로, 즉 IGBT와 다이오드가 각각 3개에서 6개로 증가하기 때문에 비용은 동일하다. 기존의 방식과 마찬가지로 입력 커패시터(Cdc1, Cdc2) 사이 마디를 중성선에 바로 연결하므로 누설 전류는 여전히 흐르지 않는다.

2. 제어 모드

계통 전압의 순시 절댓값이 태양광 패널 전압의 절반보다 작거나 크에 따라 각각 벡 인버터(강압) 또는 부스트 인버터(승압)로 제어하며, 제어 모드를 다음의 세 가지로 나눌 수 있다. 여기서 Lf에 걸리는 전압은 계통 전압에 비해 매우 작기 때문에 무시하고 Cf 전압이 계통 전압과 같다고 가정한다. 그림 3~5는 각 제어 모드에서 스위칭에 따른 동작 모드를 나타낸다.

가. 제어 모드 I

$-0.5V_{pv} < V_{grid} < 0.5V_{pv}$ 일 때 기존의 방식과 동일하게 벡 인버터로 동작한다. S1과 S2는 상보적으로 스위칭하고 S5, S6은 온, S3, S4는 오프 상태이다. S1(S2)을 켜면(끄면) 전류는 그림 3(a)와 같이 S1, Lac, S5, S6을 통해 흐르며, 인덕터(Lac)에 걸리는 전압, 즉 Vac는 $0.5V_{pv} - V_{grid} > 0$, 따라서 인덕터 전류(Iac)가 증가한다. 반대로 S1(S2)을 끄면(켜면) 전류는 그림 3(b)와 같이 S2, Lac, S5, S6을 통해 흐르며, Vac가 $-0.5V_{pv} - V_{grid} < 0$, 따라서 Iac는 감소한다.

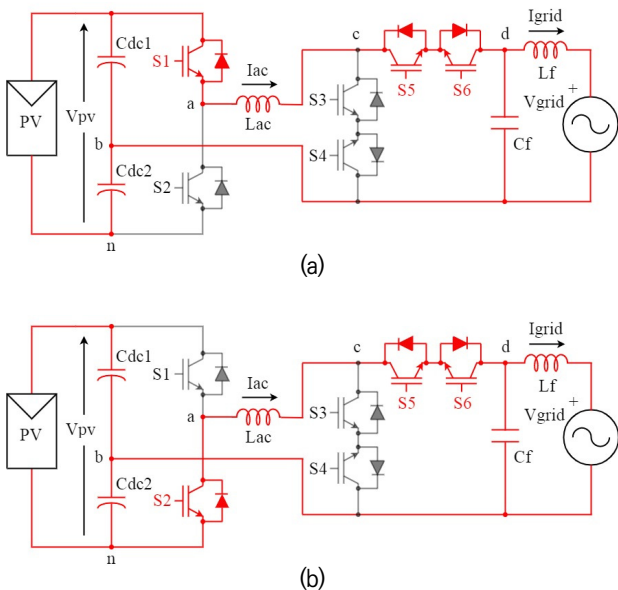


Fig. 3. Operation modes in control mode I. (a) S1 ON, (b) S2 ON.

그림 3. 제어 모드 I 동작 모드. (a) S1 온, (b) S2 온

나. 제어 모드 II

$V_{grid} > 0.5V_{pv}$ 일 때는 부스트 인버터로 동작한다. S3과 S6은 상보적으로 스위칭하고 S1, S4, S5는 온, S2는 오프 상태이다. S3(S6)을 켜면(끄면) 전류는 그림 4(a)와 같이 S1, Lac, S3, S4를 통해 흐르며, Vac는 $0.5V_{pv} > 0$, 따라서 Iac가 증가한다. 반대로 S3(S6)을 끄면(켜면) 전류는 그림 4(b)와 같이 S1, Lac, S5, S6을 통해 흐르며, Vac가 $0.5V_{pv} - V_{grid} < 0$, 따라서 Iac는 감소한다.

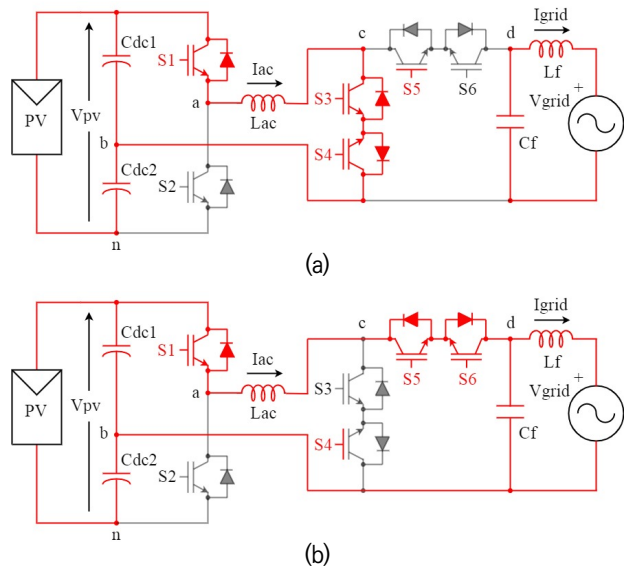


Fig. 4. Operation modes in control mode II. (a) S3 ON, (b) S6 ON.

그림 4. 제어 모드 II 동작 모드. (a) S3 온, (b) S6 온

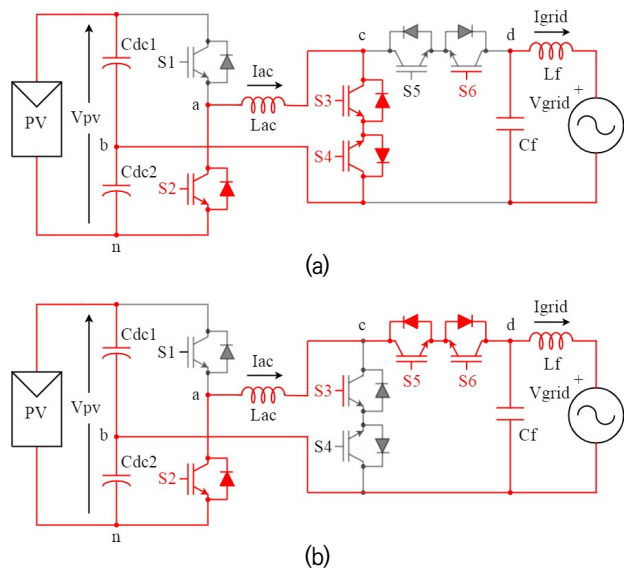


Fig. 5. Operation modes in control mode III. (a) S4 ON, (b) S5 ON.

그림 5. 제어 모드 III 동작 모드. (a) S4 온, (b) S5 온

다. 제어 모드 III

$V_{grid} < -0.5V_{pv}$ 일 때도 부스트 인버터로 동작한다. S4와 S5는 상보적으로 스위칭하고 S2, S3, S6은 온, S1은 오프 상태이다. S4(S5)를 켜면(끄면) 전류는 그림 5(a)와 같이 S2, Lac, S3, S4를 통해 흐르며, V_{ac} 는 $-0.5V_{pv} < 0$, 따라서 I_{ac} 가 감소한다. 반대로 S4(S5)를 끄면(켜면) 전류는 그림 5(b)와 같이 S2, Lac, S5, S6을 통해 흐르며, V_{ac} 가 $-0.5V_{pv} - V_{grid} > 0$, 따라서 I_{ac} 는 증가한다.

3. 제어 모드에 따른 인덕터 전류

단위 역률 제어를 위한 계통 전류는 태양광 패널의 출력 P_{pv} 와 식 (1)의 계통 전압으로부터 식 (2)와 같이 근사할 수 있다. 여기서 계통 전압과 계통 전류를 곱한 계통 전력의 교류 성분은 입력 커패시터(C_{dc1} , C_{dc2})에서 거의 다 흡수되고, 나머지 회로 소자에서의 전력은 매우 작기 때문에 직류 성분은 P_{pv} 와 같다고 가정한다.

$$V_{grid} = V_m \sin \omega t \tag{1}$$

$$I_{grid} = I_m \sin \omega t \approx \frac{2P_{pv}}{V_m} \sin \omega t \tag{2}$$

식 (2)로부터 제어 모드에 따른 인덕터 전류(I_{ac})는 다음과 같이 근사할 수 있다.

제어 모드 I: C_f 전류가 매우 작기 때문에 무시하면 마디 d에서 KCL에 의해

$$I_{ac} \approx I_{grid} = \frac{2P_{pv}}{V_m} \sin \omega t. \tag{3}$$

제어 모드 II: 입력 전력이 $0.5V_{pv}$ 와 I_{ac} 의 곱이고, 계통 전력과 같다고 가정하면

$$I_{ac} \approx \frac{4P_{pv}}{V_{pv}} \sin^2 \omega t. \tag{4}$$

제어 모드 III: 입력 전력이 $-0.5V_{pv}$ 와 I_{ac} 의 곱이므로

$$I_{ac} \approx -\frac{4P_{pv}}{V_{pv}} \sin^2 \omega t. \tag{5}$$

4. 시뮬레이션 결과

제안된 방식의 회로 동작을 검증하기 위한 시뮬레이션 사양은 표 1, 결과 파형은 그림 6과 같다. 계통 전압(V_{grid})의 절댓값이 태양광 패널 전압의 절반($V_{pv} * 0.5$)을 지날 때마다 제어 모드가 전환되고, 계통 전류(I_{grid})

Table 1. Specifications of 3kW photovoltaic inverter.

표 1. 3kW급 단상 태양광 인버터 사양

Parameter	Value	Unit
Output power	3	kW
PV voltage(V_{pv})	300	V
Grid voltage(V_{grid})	220	V
Grid frequency	60	Hz
PV parasitic capacitance(C_p)	30	nF
AC inductance(L_{ac})	0.4	mH
Filter capacitance(C_f)	6	μ F
Filter inductance(L_f)	0.4	mH
Switching frequency	20	kHz

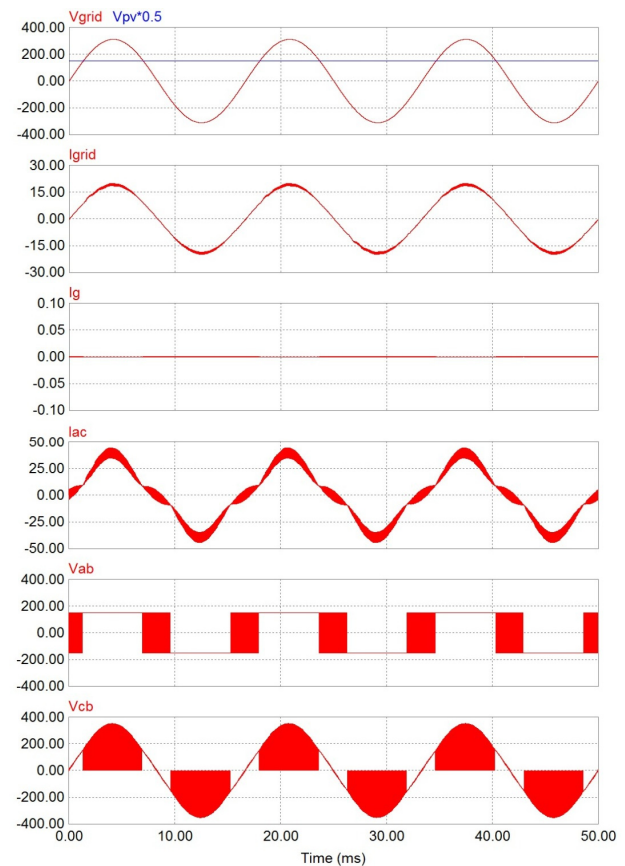


Fig. 6. Simulation results of the proposed method.

그림 6. 제안된 방식의 시뮬레이션 결과

를 단위 역률로 제어하기 위해 인덕터 전류(I_{ac})의 파형이 식 (3)~(5)와 같이 제어 모드에 따라 달라진다. 계통 전류를 제어하는 방법은 기존의 통상적인 PI 제어와 동일하며, 다만 제어 모드에 따라 게인값이 달라진다. 제어 모드가 전환될 때 계통 전류에 왜곡이 발생하지만 전류 고조파 및 역률과 관련한 인증 기준(전류 고조파는 40차까지 각 3% 이내, 종합 5% 이내, 역률은 0.95 이상[10])

을 모두 만족할 수 있는 미미한 수준이다.

5. 전력 손실 계산

본 절에서는 스위칭 소자에서의 전력 손실 계산을 통해 제안된 방식에 의한 전력 손실의 감소를 검증한다. 스위칭 소자의 부품 번호는 표 2와 같다. 회로 동작을 검증하기 위한 시뮬레이션에 전력 손실 계산을 추가하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

Table 2. Part numbers of switching devices.

표 2. 스위칭 소자의 부품 번호

	Switching device	Part number
Conventional	Q1	IKW40N120H3
	D1	IDP30E120
	S1, S2	IKW40N120H3
Proposed	S1~S6	IKW50N60T

1. 제조사가 제공하는 데이터시트를 참고해서 스위칭 소자의 전류-전압 특성 곡선과 스위칭 에너지 손실 곡선을 선형적으로 근사한다.

2. 계산의 편의를 위해 영향이 미미한 리플 전류와 다이오드의 스위칭 손실은 영으로 가정한다.

3. 스위칭 주파수로 샘플링한 전류 및 전압을 1번에서 구한 선형 근사식에 대입하여 스위칭 주기 동안 에너지 손실을 계산하고, 계통 주기 동안 합산한 다음 계통 주파수를 곱해서 전력 손실을 계산한다.

계산 결과는 표 3과 같다. 기존의 방식과 비교하면 전류가 흐르는 IGBT 또는 다이오드가 2개에서 3개로 늘

Table 3. Power loss calculation results.

표 3. 전력 손실 계산 결과

Loss(W)	Conventional		Proposed	
	Pcon	Psw	Pcon	Psw
Q1	6.6	40.7		
D1	4.4	0		
S1	8.4	24.6	12.0	0.8
S2	8.3	25.4	12.0	0.9
S3			10.2	10.4
S4			10.2	10.4
S5			13.7	0
S6			13.7	0
Total	27.7	90.8	71.8	22.5
	118.5		94.3	

고, 전류도 증가하기 때문에 도통 손실이 증가한다. 하지만 스위칭하는 IGBT가 2개에서 1개로 줄고, 스위칭 전압도 700V에서 S1, S2는 300V, S3, S4는 교류 220V로 절반 이상 감소하기 때문에 스위칭 손실이 크게 감소하고, 따라서 전체 손실은 20.4%만큼 감소한다.

IV. 결론

부스트 컨버터에 하프브리지 인버터를 종속적으로 결합한 단상 태양광 인버터에서 부스트 컨버터를 제거하는 대신 하프브리지 인버터에 양방향 스위치를 추가함으로써 벡부스트 인버터로 동작할 수 있는 회로 토폴로지를 제안하였다. 제안된 방식은 고전압 직류단을 거치는 두 단계의 전력 변환을 한 단계로 줄인 덕분에 전력 손실을 절감할 수 있으며, 스위칭 소자의 수가 두 배로 증가하지만 정격 전압이 절반으로 감소하므로 비용은 증가하지 않고, 기존 방식과 마찬가지로 누설 전류가 흐르지 않는다. 제안된 방식의 타당성은 전력 손실 계산을 포함한 PSIM 시뮬레이션을 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] *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems-Part 2: Particular requirements for inverters*, IEC 62109-2, 2011.
- [3] H. Schmidt *et al.*, "Inverter for transforming a DC voltage into an AC current or an AC voltage," Europe Patent 1369985 A2, 2003.
- [4] 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
- [5] 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 7411802, 2008.
- [6] R. Gonzalez *et al.*, "Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter," *IEEE*

Trans. Ind. Electron., vol.55, no.7, pp.2694-2702, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2008.924015

[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.2008.924015

[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] A. A. Khan *et al.*, "Novel transformerless buck-boost inverters without leakage current," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.67, no.12, pp.10442-10454, 2020. DOI: 10.1109/TIE.2019.2962478

[10] Korea New Renewable Energy Center (KNREC), NR-PV 501, <http://www.knrec.or.kr>.

BIOGRAPHY

Hyung-Min Ryu (Member)



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

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