

태양광 시스템용 단상 및 3-레벨 부스트 컨버터의 효율 및 전력밀도 비교 분석

김철민¹, 김종수[†]

Comparative Analysis of Efficiency and Power Density of Single-Phase and 3-Level Boost Converters for PV System

Chul-Min Kim¹ and Jong-Soo Kim[†]

Abstract

In this study, single-phase and three-level boost converters applied to the photovoltaic system were compared and analyzed in terms of efficiency and power density according to the input voltage and load conditions. For accurate analysis of efficiency, the losses in each device of the single-phase and three-level boost converters were derived using mathematical equations and simulations by using the PSIM thermal module. Then, the losses were compared with the efficiency confirmed through the actual experiments. Results confirmed that the efficiency and power density can be improved by applying the three-level boost converter to the system according to the selection of the switching frequency.

Key words: PV system, Boost converter, Three-level boost converter

1. 서 론

신재생 에너지는 고유가 및 환경문제로 인해 지난 몇 년간 전 세계적으로 지속적인 상승세를 보이며 주요 발전 원으로 각광받고 있다. 2018년 말까지 전 세계 신재생 에너지 설비 용량은 총 2,378[GW]로 이 중에서도 태양광 발전은 100[GW]가 추가되며 신재생 에너지 발전의 선두주자로 나서고 있다^[1].

태양광 발전에서 태양광 모듈의 발전 전압은 250~1100[V]로 태양광 모듈의 출력으로부터 인버터 구동을 위한 DC전압을 형성하는 여러 방법 중 가장 간단한 방법은 일반적인 단상 부스트 컨버터를 사용하는 것이다. 태양광 발전 시스템에서 단상 부스트 컨버터를 사용할 경우 적은 소자를 사용해서 회로를 구성하는 것이 가능하지만 태양광 모듈의 발전전압이 스위치에 그대로 걸리게 되므로 스위치에는 최대 1100[V]의 전압 스트레스

가 가해지게 되고 일반적으로 IGBT가 사용되어 스위칭 주파수를 높이는데 제한이 생기게 된다^[2].

이러한 단점을 극복하기 위해 3-레벨 부스트 컨버터를 사용한다면 회로를 구성하는데 필요한 소자의 개수는 증가하지만 스위치에 걸리는 전압 스트레스가 일반적인 단상 부스트 컨버터에 비해 절반으로 줄어들기 때문에 IGBT소자 대신 MOSFET 소자의 적용이 가능하게 되고 스위칭 주파수를 높이는 것이 가능해진다. 따라서 3-레벨 부스트 컨버터의 인덕터 크기는 감소하고 스위치 전압 정격은 낮아져 전력밀도 및 효율의 향상이 가능해진다^[2].

기존의 연구 사례^[3-5]에서는 3-레벨 부스트 컨버터와 일반적인 부스트 컨버터를 비교하였을 때 3-레벨 부스트 컨버터가 일반적인 부스트 컨버터보다 전력밀도와 효율 측면에서 개선된다는 것을 강조하고 있지만 실제로 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터 두 가지 토폴로지를 비교하여 전력밀도와 효율의 향상이 수치상으로 어떻게 나타나는지에 대해서는 제시되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 태양광 발전 시스템에 적용 가능한 20kW급 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터를 제작하여 제작된 프로토타입의 전력밀도를 비교하고 각 소자에서 발생하는 손실을 수식과 시뮬레이션

Paper number: TKPE-2020-25-2-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jskim2@daejin.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Daejin University

Tel: +82-31-539-1916 Fax: +82-31-539-1910

¹ Dept. of Electrical Engineering, Daejin University

Manuscript received Oct. 24, 2019; accepted Dec. 19, 2019

— 본 논문은 2019년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

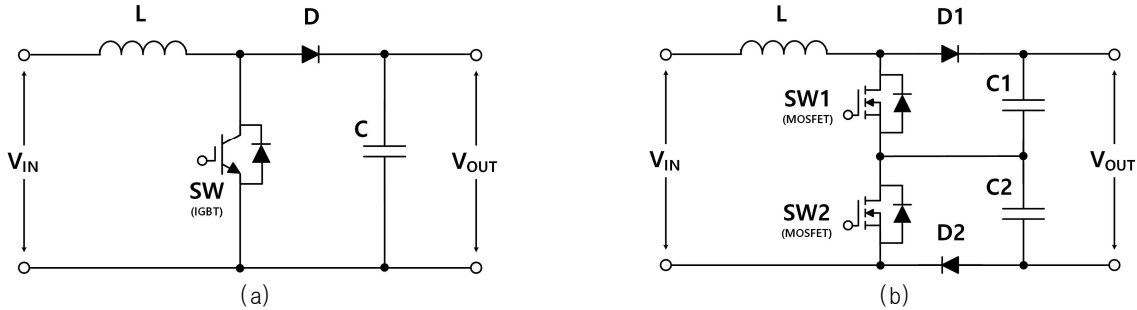


Fig. 1. (a) Schematic of single phase boost converter, (b) Schematic of 3-level boost converter.

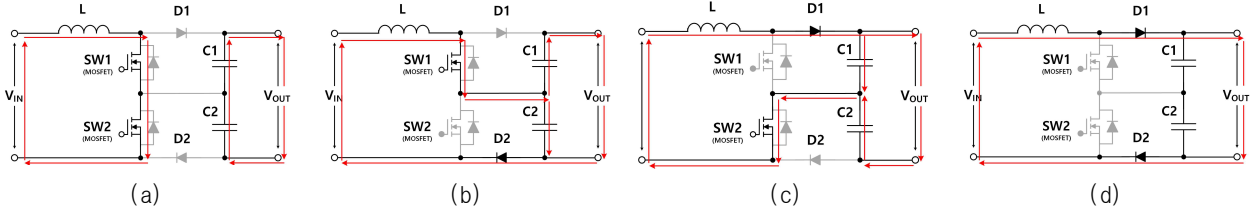


Fig. 2. Possible switching states in three-level boost converter: (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

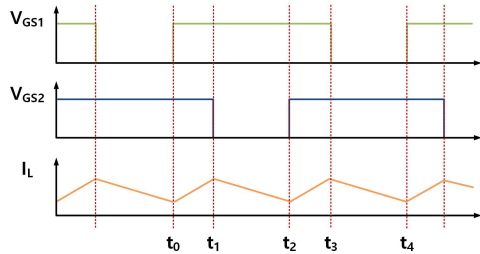


Fig. 3. Gate-Source signal and inductor current waveform of 3-level boost converter at duty cycle more than 50%.

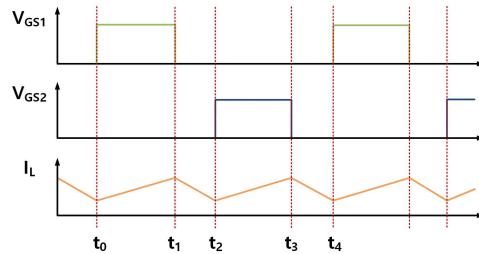


Fig. 4. Gate-Source signal and inductor current waveform of 3-level boost converter at duty cycle less than 50%.

을 사용해 도출하고 실제 실험을 통해 얻은 효율과 비교하여 동일 정격 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터를 전력밀도와 효율 측면에서 비교 분석한다.

2. 단상 및 3-레벨 부스트 컨버터

2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 사용한 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 회로를 나타내며 각 회로를 구성하는 소자는 표 1과 같다. 3-레벨 부스트 컨버터를 사용하게 될 경우 단상 부스트 컨버터에 비해 사용되는 소자는 증가하지만 각 소자에 걸리는 전압 스트레스가 감소하고 수동 소자의 크기가 작아지게 되므로 전력밀도의 개선이 가능해진다^[2].

2.2 동작모드

기존의 단상 부스트 컨버터가 스위치 ON, OFF 동작에 따라 두 가지 모드로 번갈아 동작하는 것과 달리 3-레벨 부스트 컨버터는 두 개의 스위치가 각각 ON, OFF 되기 때문에 총 네 가지 모드로 동작하게 되며 각 동작 모드는 다음과 같다^[6].

TABLE I
NUMBER OF COMPONENTS BY TOPOLOGY

	Switch	Diode	Capacitor	Inductor
Single Phase	1	1	1	1
3-Level	2	2	2	

Mode 1은 그림 3에서 $t_0 < t < t_1$, $t_2 < t < t_3$ 에 해당하는 구간으로 스위치 Q_1, Q_2 가 모두 ON 되어있는 상태이며 다이오드 D_1, D_2 는 모두 역방향 바이어스가 된다. 또한, 커패시터 C_1, C_2 가 방전되어 출력전압을 형성하며 인덕터의 기울기는 0보다 큰 값($di_L/dt > 0$)을 갖는다.

Mode 2는 그림 3의 $t_1 < t < t_2$ 및 그림 4의 $t_0 < t < t_1$ 구간으로 스위치 Q_1 은 ON, Q_2 는 OFF 되어있는 상태이며 다이오드 D_1 은 역방향 바이어스, D_2 는 순방향 바이어스인 상태이다. 커패시터 C_1 이 방전되어 출력전압을 형성하고 커패시터 C_2 는 충전되며 인덕터의 기울기는 듀티가 50%보다 큰 경우 음의 값($di_L/dt < 0$)을 작은 경우 양의 값($di_L/dt > 0$)을 갖는다.

Mode 3은 그림 3의 $t_2 < t < t_3$ 및 그림 4의 $t_2 < t < t_3$ 구간으로 스위치 Q_1 은 OFF, Q_2 는 ON 되어있는 상태이며

TABLE II
CALCULATED POWER LOSS ACCORDING TO INPUT VOLTAGE AND LOAD CONDITION

3.4kW			6.4kW			8.2kW		
@ $V_{in}=250V$ $V_{out}=685V$	Single phase	3-Level	@ $V_{in}=410V$ $V_{out}=685V$	Single phase	3-Level	@ $V_{in}=580V$ $V_{out}=685V$	Single phase	3-Level
Inductor	5.1W	6.7W	Inductor	7.2W	9.0W	Inductor	5.9W	7.4W
Diode	14.89W	18.04W	Diode	26.26W	35.41W	Diode	31.83W	48.58W
Switch	12.31W	42.00W	Switch	9.17W	46.88W	Switch	2.171W	39.60W
Capacitor	38.63W	7.76W	Capacitor	52.93W	10.51W	Capacitor	40.97W	8.62W
Power loss	70.93W	74.5W	Power loss	95.56W	101.8W	Power loss	80.871W	104.2W
Total Efficiency	97.91%	97.80%	Total Efficiency	98.50%	98.41%	Total Efficiency	99.01%	98.72%

다이오드 D_1 은 순방향 바이어스, D_2 는 역방향 바이어스인 상태이다. 커패시터 C_1 은 충전되고 커패시터 C_2 이 방전되어 출력전압을 형성하며 인덕터의 기울기는 듀티가 50%보다 큰 경우 음의 값($di_L/dt < 0$)을 작은 경우 양의 값($di_L/dt > 0$)을 갖는다.

Mode 4는 그림 4의 $t_1 < t < t_2$, $t_3 < t < t_4$ 구간에 해당되며 스위치 Q_1 , Q_2 모두 OFF 되어 있는 상태이고 다이오드 D_1 , D_2 는 모두 순방향 바이어스이다. 커패시터 C_1 , C_2 모두 충전되며 인덕터의 기울기는 0보다 작은 값($di_L/dt < 0$)을 갖는다.

위와 같이 3-레벨 부스트 컨버터의 경우 단상 부스트 컨버터와 달리 스위치 두 개로 동작하기 때문에 인덕터 측 주파수가 두 배가 될 뿐만 아니라 스위치에 걸리는 전압 스트레스가 작아지게 되어 MOSFET 적용이 가능해지므로 IGBT를 사용하는 경우보다 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있게 되어 인덕터 및 커패시터의 크기를 줄이는 것이 가능해진다.

2.3 구조에 따른 손실^{[7],[8]}

단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 효율이 입력전압과 부하조건에 따라 어떻게 나타나는지 확인하기 위해서는 각 소자별로 발생하는 손실을 구해야 한다. 따라서 인덕터, 스위치, 다이오드, 커패시터에서 발생하는 손실을 계산하기 위한 수식을 각각 나타내었으며 해당 수식을 이용해 소자의 데이터 시트에 기재되어 있는 Parameter를 기반으로 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터에서 발생하는 손실을 입력전압 및 부하조건에 따라 계산하여 표 2에 나타내었다.

2.3.1 인덕터 손실

인덕터에서 발생하는 손실은 크게 코어로 인해 발생하는 철손($P_{L,core}$)과 권선에 의해 발생하는 동손($P_{L,copper}$)으로 나누어지는데 철손은 히스테리시스 손실과 와전류 손실 성분으로 구성되어 있다.

철손은 자속밀도와 주파수의 함수로 인덕터 설계시 사

용되는 코어의 제조사에서 단위 부피당 손실($P_{L,core,volume}$)로서 제공하며 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{L,core,volume} = k_3 \cdot B^{k_1} \cdot f_{sw}^{k_2} \quad (1)$$

여기서 k_1 , k_2 , k_3 은 코어 제조사에서 제공하는 데이터 시트를 통해 확인 가능하며 자속밀도 B는 자계의 세기를 통해 구할 수 있다. 식 (1)을 통해 단위부피당 손실을 구한 뒤 계산 결과에 코어의 부피를 곱하면 코어의 철손을 구할 수 있다.

동손은 인덕터에 사용된 전선의 등가저항(R_{wire})을 구한 뒤 인덕터에 흐르는 전류를 이용해 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{L,copper} = I_L^2 \cdot R_{wire} \quad (2)$$

2.3.2 스위치 손실

본 논문에서는 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터에 각각 IGBT와 MOSFET을 적용하였기 때문에 스위치 손실 또한 각각 계산하였다.

IGBT에서 발생하는 손실은 도통손실($P_{IGBT,cond}$), 스위칭 손실($P_{IGBT,sw}$)로 나뉘며 도통손실은 트랜지스터 포화 전압($V_{ce(sat)}$)과 컬렉터 전류(I_C)를 통해 표현된다. 스위칭 손실은 스위칭 주파수에 영향을 받으며 데이터 시트에서 제공하는 온 손실(E_{on})과 오프 손실(E_{off})로 계산되어 IGBT의 전체 손실은 식 (3)으로 표현된다.

$$P_{IGBT} = P_{IGBT,cond} + P_{IGBT,sw} \\ = (V_{ce(sat)} \cdot I_{C,rms}^2) + (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} \quad (3)$$

일반적으로 MOSFET에서 발생하는 손실은 크게 도통손실($P_{FET,cond}$), 스위칭 손실($P_{FET,sw}$)로 나눌 수 있다. 도통손실은 MOSFET이 턴온되는 동안에는 도통되는 전류와 MOSFET의 드레인-소스간 존재하는 내부저항($R_{DS(on)}$)에 의해 발생하고 스위칭 손실은 MOSFET의 입력 커패시턴스에 의해 턴온, 턴오프시 발생하는 구동

TABLE III
SINGLE PHASE AND 3-LEVEL BOOST CONVERTER
SYSTEM PARAMETER

	Single Phase Boost Converter	3-Level Boost Converter
Power	20[kW]	20[kW]
Switch	IGBT	MOSFET
Input Voltage	250 - 580[V] *MAX 1100[V]	
Output Voltage	685 [V] *MAX 1100[V]	
Voltage Ripple	1%	1%
Current Ripple	10%	5%
Switching Frequency	20kHz	50kHz
Inductance	2,302uH	920uH
Capacitance	750uF	750uF

손실로 MOSFET의 t_{on} , t_{off} 에 의해 발생한다.

MOSFET의 전체 전력 손실은 식 (4)와 같다.

$$P_{MOSFET} = P_{FET,cond} + P_{FET,sw} \\ = R_{DS(on)} \cdot I_{D,rms}^2 + \frac{1}{2} V_{DS} \cdot I_D \cdot f_{sw} \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad (4)$$

2.3.3 다이오드 손실

다이오드의 손실은 다이오드가 순방향 도통되는 동안 발생하는 도통 손실($P_{Diode,cond}$)과 다이오드 턴온, 턴오프 동작으로 인해 발생하는 역회복 손실($P_{Diode,rev}$)로 구분되며 턴온 동작으로 인한 손실은 순방향 역회복 시간(t_{fr})이 보통 ns 수준의 매우 짧은 시간이므로 턴온 동작으로 인한 손실 또한 작아 무시할 수 있다.

즉, 다이오드로 인한 전체 손실은 식 (5)와 같다.

$$P_{Diode,loss} = P_{Diode,cond} + P_{Diode,reverse} \\ = (R_D \times I_{rms}^2) + (V_F \times I_{rms} \times (1 - D_{on})) \\ + \left(\frac{V_R \times I_{RRM}}{2} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} \right) \quad (5)$$

3-레벨 부스트 컨버터는 다이오드의 손실을 계산한 후 다이오드의 수량만큼 곱해서 손실을 구하였다.

2.3.4 커패시터 손실

커패시터의 손실 분석 시에는 직렬저항, 누설 저항, 유전체에 의한 손실분을 모두 고려해야하지만 제조사에서 제공하는 데이터 시트의 내용이 한정적인 경우 데이터 시트에서 제공하는 $\tan\delta$ 값과 주파수, 커패시턴스 값을 이용하여 ESR 값을 구한 후 커패시터의 손실(P_C)을 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$P_C = ESR \times I_{C,rms}^2 \quad (6)$$

단상 부스트 컨버터는 커패시터를 4병렬 3직렬로 구성하였고 3-레벨 부스트 컨버터는 4직렬 3병렬로 구성하였으며 각 커패시터에 흐르는 전류값을 통해 손실을 계산한 후 커패시터의 수량만큼 곱해 전체 커패시터 손실을 구하였다.

2.3.5 시스템 전체 손실

단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 설계 값은 표 3과 같다. 설계 값을 적용하여 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 각 소자에서 발생하는 손실을 계산한 후 전체 효율을 비교한 결과 표 2와 같이 단상 부스트 컨버터의 효율이 3-레벨 부스트 컨버터보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 3-레벨 부스트 컨버터의 스위칭 주파수를 높여서 인덕터의 크기는 크게 감소시킬 수 있었지만 스위치에서 발생하는 손실 중 스위칭 손실이 크게 증가했기 때문으로 볼 수 있다.

3. 시뮬레이션

수식을 통해 계산한 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터 손실의 타당성을 확인하기 위해 PSIM내의 Thermal Module 기능을 사용하였다. Thermal Module은 전력반도체 데이터시트상의 정보를 사용해

전력반도체에 흐르는 전류와 전압에 대해 순시적으로 계산하므로 정확도가 높고 손실을 분석하는데 걸리는 시간을 줄일 수 있다^[9].

다만, PSIM Thermal Module은 전력반도체에 대한 손실에 대해서만 계산이 가능하므로 인덕터의 철손, 동손 그리고 커패시터 손실을 구하는 데는 적용할 수 없다. 따라서, 인덕터 손실 및 커패시터의 손실을 구하기 위해서 PSIM 기능중 하나인 Math function 블록을 사용해 시뮬레이션 결과 값과 각 상수들을 대입하여 인덕터 손실과 커패시터 손실을 구하였다.

시뮬레이션에 적용된 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 Parameter는 표 3에 나타난 것과 같고 시뮬레이션을 통해 얻은 손실과 수식을 통해 얻은 각 소자의 손실을 통해 확인한 효율은 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 나타나는 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과의 차이는 손실의 크기가 증가함에 따라 각 소자에서 발생하는 열이 소자의 특성을 변화시키게 되어 발생하는 것으로 추측된다.

4. 실험

단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터 프로토타입은 시뮬레이션에 사용한 값과 동일하게 표 3의 설계 값을 적용하여 그림 6과 같이 제작하였다.

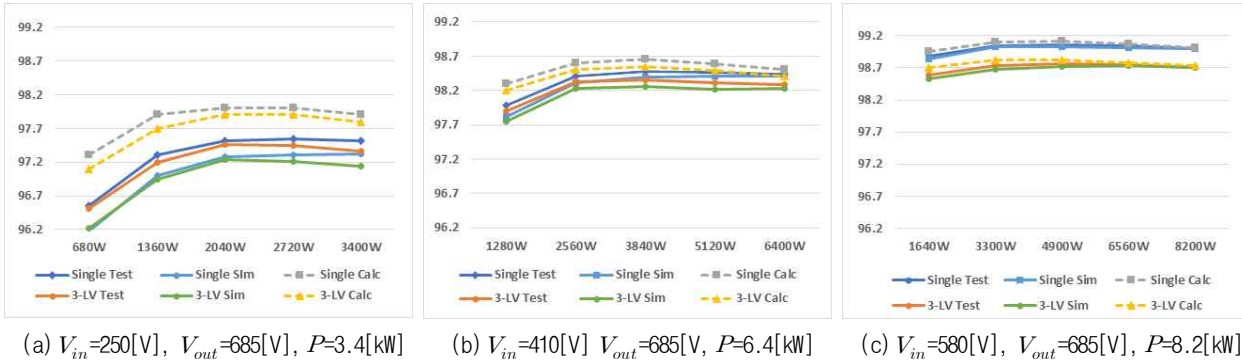
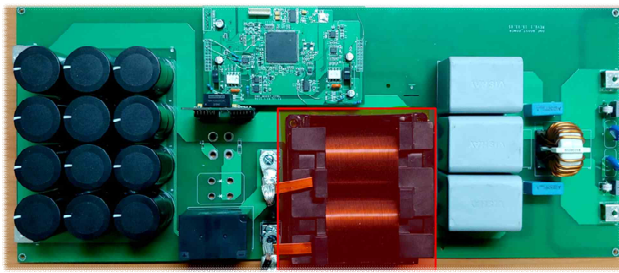
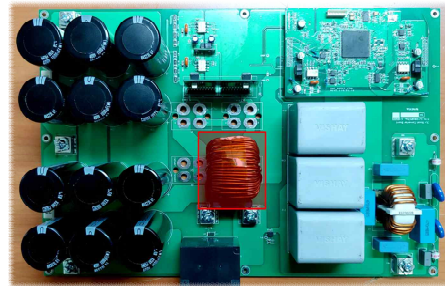


Fig. 5. Efficiency curve according to input voltage and load.



(a) Single-Phase Boost Converter



(b) 3-Level Boost Converter

Fig. 6. Prototype of single phase and 3-level boost converter.

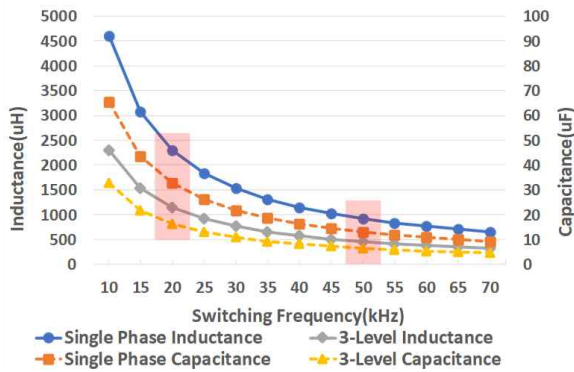


Fig. 7. Single-Phase and 3-level boost converter inductance and capacitance values with switching frequency.

각 부스트 컨버터의 크기 및 전력밀도는 표 4에 나타내었는데 3-레벨 부스트 컨버터가 단상 부스트 컨버터보다 전력밀도가 약 17% 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 3-레벨 부스트 컨버터가 단상 부스트 컨버터보다 사용되는 소자 수는 많지만 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 스위칭 주파수가 증가됨에 따라 인덕턴스와 커패시턴스가 감소하여 인덕터와 커패시터의 부피가 줄어들기 때문이다.

그림 8은 실험간 측정된 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 스위치 게이트-소스 전압, 출력전압, 인덕터 전류 파형을 나타낸 것으로 3-레벨 부스트 컨버터의 인덕터 전류 주파수가 스위칭 주파수의 두 배로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

TABLE IV
SIZE OF SINGLE PHASE AND 3-LEVEL BOOST CONVERTER

	Width	Depth	Height	Power Density
Single Phase	500[mm]	210[mm]	62[mm]	3072[W/L]
3-Level	370[mm]	250[mm]	60[mm]	3603[W/L]

수식 및 시뮬레이션을 통해 얻은 손실로 계산한 효율과 실제 실험을 통해 얻은 효율을 입력전압과 부하 조건에 따라 비교해서 그림 5에 나타내었다. 효율 측정 조건은 각각 1) 입력전압 250[V], 부하 3.4[kW] 2) 입력전압 410[V], 부하 6.4[kW] 3) 입력전압 580[V], 부하 8.2[kW]로 계산을 통해 구한 효율과 실제 실험을 통해 측정된 효율이 약간의 차이는 있지만 비교적 일정한 오차범위 내에서 비슷한 양상을 가지는 것을 볼 수 있다. 입력전압 250[V], 3.4[kW]조건에서 단상 부스트 컨버터의 경우 최대 효율 97.54%, 3-레벨 부스트 컨버터는 97.46%였고 입력전압 410[V], 6.4[kW]조건에서 단상 부스트 컨버터 최대 효율은 99.06%, 3-레벨 부스트 컨버터는 98.76%, 입력전압 580[V], 8.2[kW]조건에서 단상 부스트 컨버터 최대 효율 99.05%, 3-레벨 부스트 컨버터는 98.76%로 모든 실험 조건에서 단상 부스트 컨버터의 효율이 3-레벨 부스트 컨버터보다 높게 나타나는 경향을 보였다.

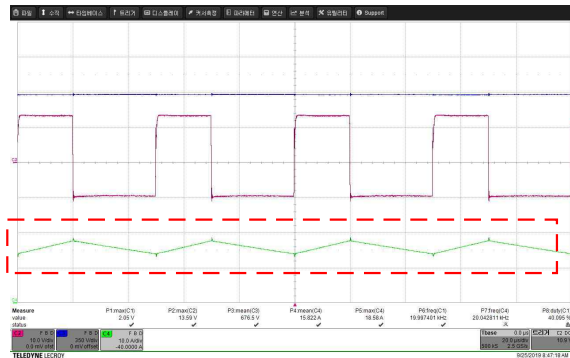
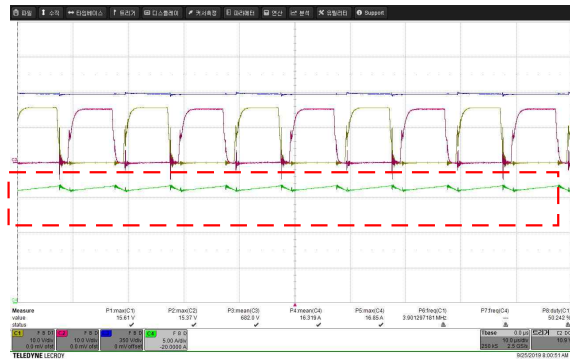
(a) Single-phase (@ $V_{in}=410[V]$, $P=6.4[kW]$)(b) 3-Level (@ $V_{in}=410[V]$, $P=6.4[kW]$)

Fig. 8. Key waveform of Single phase and 3-level boost converter.

이는 수식을 통해 계산한 효율과 마찬가지로 3-레벨 부스트 컨버터에 MOSFET을 적용하여 스위칭 주파수를 증가시켰기 때문에 인덕터와 커패시터의 크기가 감소하여 전력밀도는 향상시킬 수 있었지만 스위칭 손실이 증가하게 되어 나타나는 결과로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 시스템에 적용되는 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터를 입력전압 및 부하 조건에 따른 효율과 전력밀도 측면에서 비교 분석하였다. 효율에 대한 정확한 분석을 위해 단상 부스트 컨버터와 3-레벨 부스트 컨버터의 각 소자에서 발생하는 손실을 수식 및 PSIM Thermal Module을 통한 시뮬레이션을 통해 도출하고 실제 실험을 통해 확인한 효율과 비교하였다. 이를 통해 시스템에 3-레벨 부스트 컨버터를 적용할 경우 스위칭 주파수의 선정에 따라 효율과 전력밀도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

References

[1] REN21, "Renewables 2019 global status report," *Renewable Energy Policy Network for 21st*, Paris 2019.
 [2] C. M. Kim, H. S. Kim, and J. S. Kim, "Comparative

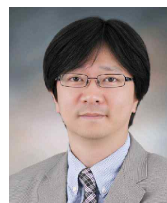
analysis and implementation of single-phase and three-level boost converter applied to PV system," in *2019 Power Electronics Annual Conference*, pp. 287-288, Jul, 2019.

- [3] C. Balakishan, N. Sandeep, and M. V. Aware, "Design and implementation of three-level DC-DC converter with golden section search based MPPT for the photovoltaic applications," *Advances in Power Electronics*, Vol. 2015, Article ID 587197, pp. 9, 2015.
 [4] V. I. Meleshin, D. V. Zhiklenkov, and A. A. Ganshin, "Efficient three-level boost converter for various applications," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, pp. DS1e.9-1-DS1e.9-8, Sep. 2012.
 [5] M. Tampubolon et al., "A study and implementation of three-level boost converter with MPPT for PV application," in *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFECC 2017-ECCE Asia), Kaohsiung*, pp. 1143-1148, Jun. 2017.
 [6] H. Chen and W. Lin, "MPPT and voltage balancing control with sensing only inductor current for photovoltaic-fed, three-level, boost-type converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 1, pp. 29-35, Jan. 2014.
 [7] M. K. Kim, D. G. Woo, B. K. Lee, N. J. Kim, and J. S. Kim, "Loss analysis of power conversion equipment for efficiency improvement," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No. 1, Feb. 2014.
 [8] J. H. Kim, C. Y. Won, and T. W. Lee, "Improved boost converter efficiency of 3kW PV-PCS using high efficiency power devices," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, Feb. 2009.
 [9] W. Y. Sung, "Design of loss analysis simulation platform for power converters using PSIM-MATLAB," Sungkyunkwan University, M.E Thesis paper, 2015.



김철민(金哲敏)

1993년 11월 3일생. 2018년 대전대 전기공학 학과 졸업. 2020년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2020년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김종수(金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2008년 성균관대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2011년~2012년 서일대 전기과 강의 교수. 2012년~2013년 삼성종합기술원 MD연구소 Power Lab 전문연구원. 2013년~현재 대전대 전기전자통신공학부 부교수. 당 학회 학술이사.