

단상 V2L OBC의 열 신뢰성 향상을 위한 Modified 유니폴라 PWM 기법

곽봉우 · 김명복*

한국생산기술연구원 목적기반모빌리티그룹

Modified Unipolar PWM for Thermal Reliability Improvement in Single-Phase V2L OBC

Bongwoo Kwak · Myungbok Kim*

Department of Purpose Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology,
6 Cheomdangwagi-ro 208beon-gil, Buk-gu, Gwangju 61012, Korea

(Received 21 November 2025 / Revised 29 January 2026 / Accepted 29 January 2026)

Abstract : This paper proposed a Modified Unipolar PWM (MU-PWM) technique to enhance the thermal reliability of single-phase bidirectional inverters for Vehicle-to-Load (V2L) applications. Conventional Unipolar PWM (U-PWM) concentrates switching losses on one specific leg, causing significant thermal imbalance. The featured MU-PWM resolves this by alternating the high-frequency switching leg every half-cycle of the grid voltage, thereby evenly distributing thermal stress. Experiments were conducted on a 3 kW SiC MOSFET-based inverter prototype. The results indicate that MU-PWM successfully reduced the heatsink temperature deviation between the legs from 5.5 °C (with U-PWM) to within 1 °C. This thermal improvement was achieved while maintaining high system efficiency (over 98 %) and a high power factor (over 0.99), equivalent to conventional U-PWM. Moreover, the MU-PWM technique effectively mitigates localized thermal stress, significantly improving the long-term reliability and durability of V2L inverters without compromising performance.

Key words : Modified unipolar PWM(MU-PWM), Voltage source inverter(전압형 인버터), Vehicle-to-Load(V2L), Thermal imbalance(열적 불균형), Thermal reliability(열 신뢰성)

1. 서론

최근 전 세계적으로 탄소 중립 달성을 위한 친환경 에너지 정책이 강화됨에 따라 전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 보급이 가속화되고 있다. 이에 따라 차량 내 배터리를 충전하는 탑재형 충전기(On-Board Charger, OBC) 기술 역시 고효율 및 고밀도화를 목표로 빠르게 발전하고 있다.^{1,2)} 초기 OBC는 단방향 충전 기능에 국한되었으나, 최근에는 차량을 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)로 활용하는 V2G(Vehicle-to-Grid) 및 V2L(Vehicle-to-Load) 기술의 요구가 증대되면서 양방향 전력 전달 기능이 필수적인 요소로 자리 잡고 있다.^{3,4)} 특히 V2L 모드는 재난 상황이나 야외 활동 등 독립된 전원 공급이 필요한 환경에서 일반 AC 부하에 전력을 공급할 수 있어 EV의

활용성을 극대화하는 핵심 기능으로 주목받고 있다.⁵⁾

V2L 모드에서 OBC의 DC-AC 전력 변환부는 Fig. 1과 같이 단상 풀-브리지 기반의 전압 소스 인버터(Voltage Source Inverter, VSI) 구조를 가지며, 이를 제어하기 위한 변조 기법으로는 유니폴라 PWM(Unipolar PWM, U-PWM) 방식이 널리 사용된다. U-PWM은 바이폴라PWM (Bipolar PWM, B-PWM) 방식 대비 출력 전압의 고조파 성분이 스위칭 주파수의 두 배 대역에서 발생하여 필터 사이즈를 저감할 수 있고, 낮은 전류 리플과 우수한 전고조파왜곡률(Total Harmonic Distortion, T.H.D.) 특성을 갖는 장점이 있다.⁶⁾ 그러나 기존의 U-PWM 기법은 구조적으로 한쪽 레그는 고주파 스위칭을 수행하고, 다른 쪽 레그는 계통 주파수 스위칭을 수행하는 비대칭적인 동작 특성을 갖는다.⁷⁾

*A part of this paper was presented at the KSAE 2025 Spring Conference

*Corresponding author, E-mail: boks@kitech.re.kr

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.

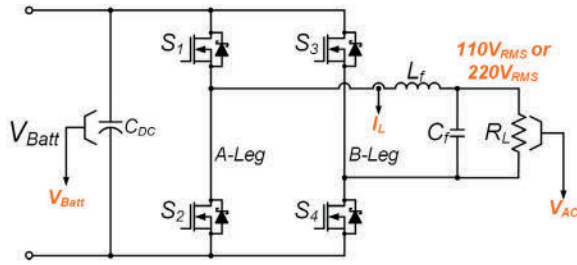


Fig. 1 Circuit configuration of single-phase V2L OBC inverter

이러한 동작 방식은 고주파 스위칭을 담당하는 특정 레그에 스위칭 손실을 집중시키며, 결과적으로 인버터 내 전력 반도체 소자 간의 심각한 열 분포 불균형을 초래한다.⁸⁾ 특히 전력 밀도 향상을 위해 SiC(Silicon Carbide)와 같은 와이드 밴드갭(Wide Band-Gap, WBG) 소자를 적용하여 스위칭 주파수를 높이면, 손실 편중 현상은 더욱 심화된다. 특정 소자에 집중된 국부적인 열 스트레스는 전력 소자의 온도 상승 및 수명을 단축시키고, 전체 전력 변환 시스템의 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이 된다.^{9,10)}

이러한 열적 불균형 문제를 해결하기 위해 선행 연구에서는 Alternate Hybrid PWM(AH-PWM) 기법을 적용하였다. 2개의 기준 주기 동안 각 스위치의 동작 주파수를 고주파수와 저주파수로 번갈아 동작하여 전력 손실 및 스위치간 열 부하를 균등하게 분산하였다.¹¹⁾ 또한, 다른 선행 연구에서는 인버터의 각 스위치 온도를 실시간으로 추정하고, 가장 온도가 낮은 스위치에 스위칭 부하를 할당하는 능동형 열 제어 기법이 제안되었다.¹²⁾ 그러나 이러한 방식들은 복잡한 열 모델링과 연산 부하를 요구하거나, 열분배 과정에서 전류 왜곡이 증가하여 전력 품질이 저하되는 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 단상 V2L OBC 인버터의 열적 신뢰성 향상을 위해 수정된 유니폴라 PWM(Modified Unipolar PWM, MU-PWM) 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 복잡한 연산 없이 계통 전압의 반주기마다 고주파 스위칭을 담당하는 레그를 주기적으로 교대하는 방식을 적용한다. 이를 통해 기존 U-PWM의 장점인 높은 효율과 우수한 출력 파형 품질을 그대로 유지하면서도, 스위칭 손실을 두 레그에 균등하게 분배하여 특정 소자의 과열을 원천적으로 방지한다.¹³⁾

제안하는 기법은 기존 연구¹¹⁾와 달리 복잡한 열 모델링이나 추가적인 온도 센서 없이, 계통 전압의 위상 정보를 기반으로 고주파 스위칭 레그를 매 반주기마다 알고리즘적으로 교번하여 열 부하를 균등 분배한다. 이는 계통 주파수 2배 주기로 스위치 레그를 교번하는 AH-PWM¹²⁾ 방식 대비 열 분산 주기를 빠르게 하여 과열 방지

에 더 유리하다. 추가로, 영교차점 전류 왜곡을 방지하여 기존 U-PWM 수준의 우수한 전력 품질을 보장한다. 결과적으로 특정 소자에 집중된 스위칭 손실을 물리적으로 강제 분산함으로써 국부적 과열을 방지하고, 시스템의 열적 신뢰성을 극대화하는 실무적인 해결책을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 U-PWM의 동작 원리와 이에 따른 열적 불균형 문제를 이론적으로 분석하고, 이를 해결하기 위한 MU-PWM의 동작 원리를 설명한다. 3장에서는 3 kW급 SiC 기반 인버터 프로토타입을 이용한 실험을 통해 제안 기법의 열 분포 개선 효과와 전기적 특성을 검증한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

2. Modified Unipolar PWM 동작 및 손실 분석

2.1 Modified Unipolar PWM

MU-PWM은 V2L 모드에서 인버터 Leg의 열적 불균형을 해소하기 위해 계통 전압의 극성에 따라 고주파수 스위칭 Leg가 교차되도록 제어한다.

계통 전압이 양(+)의 반주기일 때는 A-Leg의 스위치(S₁, S₂)가 고주파수로 스위칭되며, B-Leg의 로우사이드 스위치(S₄)만 턴-온 상태를 유지한다.

계통 전압이 음(-)의 반주기일 때는 B-Leg의 스위치(S₃, S₄)가 고주파수로 스위칭되며, A-Leg의 로우사이드 스위치(S₂)만 턴-온 상태를 유지한다.

MU-PWM과 기존 U-PWM의 상세한 스위칭 파형 비교는 Fig. 2에서 명확히 확인할 수 있다. 이와 같이 MU-PWM은 계통 전압의 반주기 극성에 동기되어 고주파 스위칭 레그를 교대로 활성화하는 동작을 통해 스위칭 손실 부하를 균등하게 분배한다. 결과적으로 이는 레그간의 열 분포 편차를 최소화하며, 인버터 시스템의 전반적인 열 분산 성능을 개선하는 핵심적인 기전이다. 궁극적

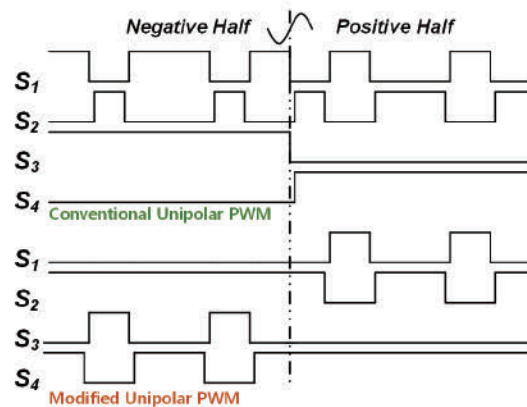


Fig. 2 Comparison of switching patterns between conventional U-PWM and proposed MU-PWM

으로 MU-PWM 기법은 특정 스위칭 소자의 국부적 과열을 방지하고 V2L OBC 시스템의 장기적인 신뢰성 및 수명 향상에 직접적으로 기여한다.

2.2 단상 유니폴라 PWM 인버터의 손실 분석

SiC MOSFET 기반 풀-브릿지 인버터의 정확한 열적 특성을 모델링하기 위해서는, 각 전력 반도체 소자에서 발생하는 손실에 대한 정량적 분석이 필수적이다. 인버터를 구성하는 각 레그의 SiC MOSFET과 바디 다이오드는 스위칭 및 도통 상태를 반복된다. 이 과정에서 발생하는 총 전력 손실(P_{tot})은 식 (1)과 같이 스위치 손실($P_{S,tot}$)과 다이오드 손실($P_{D,tot}$)의 합으로 정의된다

$$P_{tot,avg} = P_{S,tot,avg} + P_{D,tot,avg} \quad (1)$$

본 논문에서 3 kW급 단상 풀 브릿지 인버터 프로토타입에 적용된 SiC MOSFET은 Infineon 사의 IMZA65R050M2H이다. 손실 분석에 필요한 회로 파라미터 및 SiC MOSFET의 주요 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 SiC MOSFET key specifications and circuit parameters

Parameter	Variable	Value	Unit
DC link voltage	V_{Bat}	385	V _{DC}
Output voltage (rms)	V_{AC}	220	V _{rms}
Output power	P_{OUT}	3,000	W
Output frequency	f_{AC}	60	Hz
Switching frequency	f_{sw}	50	kHz
MOSFET on-resistance	$R_{DS,on}$	50	mΩ
Diode forward voltage	V_{SD}	4.5	V

SiC MOSFET에 발생하는 총 손실은 스위칭 손실과 도통 손실로 구성된다. AC 주기에 대한 평균값으로 산정되며, 특정 스위치의 평균 손실은 식 (2)와 같다.

$$P_{S,tot,avg} = P_{S,cond,avg} + P_{S,sw,avg} \quad (2)$$

스위칭 손실은 턴-온 에너지(E_{on})와 턴-오프 에너지(E_{off})에 스위칭 주파수(f_{sw})를 곱하여 정의되며, AC 주파수(f_{grid})에 대한 시간 평균값을 사용한다. 스위칭 손실의 주피 평균 수식은 식 (3)과 같다.

$$P_{S,sw,avg} = f_{sw} \cdot \frac{1}{T_{grid}} \int_0^{T_{grid}} [E_{on}(I_S(t)) + E_{off}(I_S(t))] \cdot D_{S,k}(t) dt \quad (3)$$

여기서, T_{grid} 는 계통 주파수(AC 주파수)의 주기이며, $D_{S,k}$ 는 SiC MOSFET이 고주파 스위칭에 참여하는 시간 비율이다.

도통 손실은 MOSFET의 온 저항($R_{DS,on}$)과 스위치를 흐르는 순간 전류에 의해 발생한다. $R_{DS,on}$ 은 접합부 온도(T_j)에 영향을 받으므로 온도 의존성을 반영하고, 듀티 사이클을 적용하여 시간 평균을 구하면 식 (4)와 같다.

$$P_{S,cond,avg} = \frac{1}{T_{grid}} \int_0^{T_{grid}} [I_S(t)^2 \cdot R_{DS,on}(T_j) \cdot D_{S,k}(t)] dt \quad (4)$$

여기서, $D_{S,k}$ 는 AC 주기에 대한 스위치의 순간 듀티 비율이다.

SiC MOSFET에 내재된 바디 다이오드는 주 스위치가 턴-오프되고 반대편 스위치가 턴-온 되기 전 데드 타임(t_d) 동안 도통하거나, 역률 조건에 따라 프리 휠링 다이오드로 동작하여 손실을 발생시킨다. SiC 다이오드는 역회복 전하(Q_{rr})가 매우 작아 역회복 손실은 무시 가능하다. SiC 바디 다이오드 손실은 식 (5)과 같다.

$$P_{D,tot} = P_{D,cond,avg} + P_{D,sw,Coss} \quad (5)$$

다이오드 전도 손실은 식 (6)과 같으며, 다이오드에 흐르는 순간 전류($I_D(t)$)와 순방향 전압(V_{SD})의 곱을 시간 평균한 값이다.

$$P_{D,cond,avg} = \frac{1}{T_{grid}} \int_0^{T_{grid}} [V_{SD}(I_D(t), T_j) \cdot I_D(t) \cdot D_{D,k}(t)] dt \quad (6)$$

C_{oss} 방전 손실은 식 (7)과 같다. 스위치가 턴-온 될 때, 상보적인 스위치(MOSFET 또는 다이오드)의 출력 커패시턴스(C_{oss})에 저장된 에너지(E_{oss})가 방전되면서 발생하는 손실로 스위칭 주파수에 비례하여 모든 스위칭 소자에서 공통으로 발생한다.

$$P_{D,sw,Coss} = \frac{1}{2} C_{oss} V_{Bat}^2 f_{sw} \quad (7)$$

Fig. 3은 손실 모델 및 표 1의 파라미터를 기반으로 AC 한 주기에 대한 U-PWM과 MU-PWM 방식의 손실을 비교한 결과이다. 이때 다이오드 손실 두 PWM 방법 모드 상 대적으로 균등하게 분포됨으로 무시하였다.

1) U-PWM의 손실 불균형: 기존 U-PWM의 경우, 고속

스위칭을 하는 A-Leg는 도통 손실 및 스위칭 손실이 중첩되어 나타나다. 이로 인해 계통 주파수로 스위칭 하는 B-Leg 대비 현저히 높은 총 손실을 보인다. 이는 스위칭 손실이 AC 주기 전체에 걸쳐 A-Leg에만 편중됨을 의미하며, 결과적으로 두 레그 간 심각한 열적 불균형을 초래한다. 특히 표 1의 50 kHz 고주파 스위칭 조건에서 발생하는 과도한 스위칭 손실은 50mΩ의 $R_{DS(on)}$ 에 의한 도통 손실과 합산되어 A-Leg의 열적 스트레스를 더욱 가중시킨다.

2) MU-PWM의 손실 균일화: 제안하는 MU-PWM의 손실 분배 효과를 나타낸다. MU-PWM은 계통 전압의 반주기마다 고주파 스위칭을 담당하는 레그를 교대하는 방식을 적용한다. 따라서 양(+)의 반주기에서는 A-Leg가, 음(-)의 반주기에서는 B-Leg가 스위칭 동작을 수행하여 스위칭 손실을 분담하게 된다. 결과적으로 AC 한 주기 관점에서 두 레그의 손실 분포는 완벽한 대칭을 이루며, 평균 전력 손실이 양쪽 레그에 균등하게 분배됨을 확인할 수 있다.

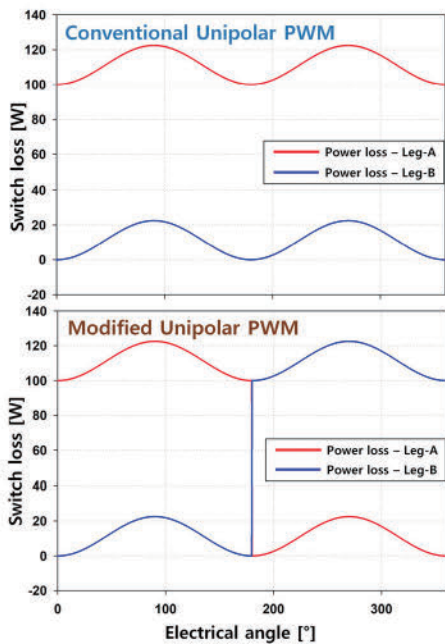


Fig. 3 Simulation waveforms of switching losses for conventional U-PWM and MU-PWM

3. 실험 결과 및 분석

3.1 3kW 급 인버터 시제품 제작 및 실험 환경

제안하는 MU-PWM 기법의 열적 성능을 기존 U-PWM 과 비교 검증하기 위해 3kW급 단상 풀-브리지 인버터 프로토타입을 제작하였다. 전체 제어 시스템은 전압 제어를 위한 외부 루프(Outer loop)와 전류 제어를 위한 내부 루프(Inner loop)의 이중 루프 구조로 구성된다.

Fig. 4는 제작된 인버터의 회로 구성과 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 출력 전압 제어기는 정현파 추종 성능이 우수한 PR(Proportional Resonant) 제어기를 사용하였으며, 인덕터 전류 제어기는 PI(Proportional Integral) 제어기를 적용하여 안정적인 전류 제어를 구현하였다. 시스템의 정격 및 스위칭 소자 사양은 앞서 Table 1에 제시된 바와 같으며, 실험에 적용된 DC 링크 커패시터 및 출력 필터 등 주요 수동 소자의 상세 파라미터는 Table 2와 같다.

Fig. 5는 제작된 3 kW급 인버터 시제품의 하드웨어를 보여준다. 실험 구성은 입력단에 DC 전원을 인가하고 출력단에 가변 저항 부하를 연결하여, 600 W 단위의 부하 변동에 따른 출력 특성을 검증할 수 있도록 구축하였다.

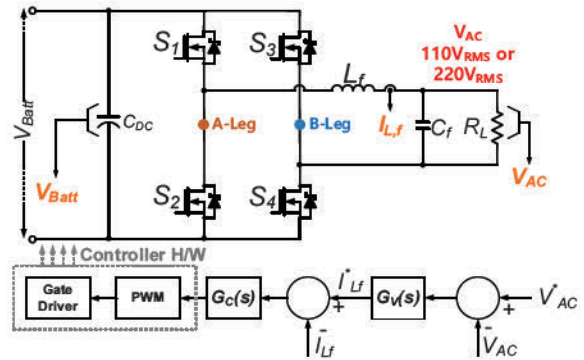


Fig. 4 Circuit configuration of single-phase V2L inverter including control block diagram

Table 2 Key passive component parameters of inverter prototype

Parameters	Variable	Value	Unit
DC Capacitance	C_{DC}	1,880	μF
Filter Inductance	L_f	600	μH
Filter Capacitance	C_f	3.3	μF

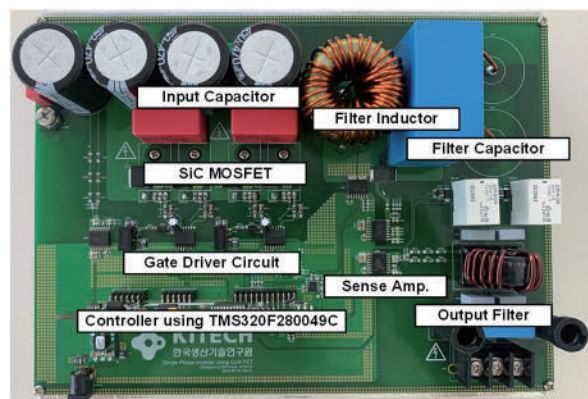


Fig. 5 3 kW single-phase inverter prototype

3.2 실험 결과 및 성능 분석

Fig. 6은 경부하(20%) 및 정격 부하(100%) 조건에서 기존 U-PWM과 제안하는 MU-PWM 기법을 적용했을 때의 정상 상태 동작 파형을 비교하여 보여준다.

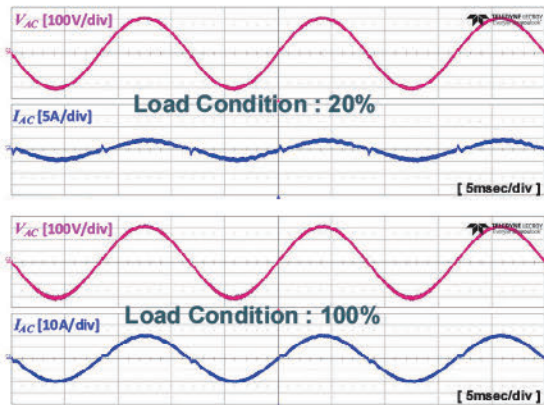
실험 결과, 두 기법 모두 출력 전압(V_{ac})과 출력 전류(I_{ac})가 동상을 이루며 0.99 이상의 높은 역률(PF)을 달성하였다. 특히, MU-PWM은 AC 계통의 반주기마다 고주파 스위칭 Leg가 교대되어 Dead zone이 없는 특징을 갖는다. 따라서, Fig. 6(a)의 U-PWM 기법의 영점 교차 부근에서 전류의 왜곡 문제가 MU-PWM 기법이 적용되면 Fig. 6(b)와 같이 왜곡 문제가 개선된다. 이는 제안하는 MU-PWM 기법이 기존 U-PWM의 우수한 제어 성능과 전력 품질을 저하시키지 않고 안정적으로 동작함을 입증한다.

Fig. 7은 3 kW 정격 부하 조건에서 300초간 운전 시 각 레그 별 방열판의 온도 상승 추이를 비교한 결과이다. 기존 U-PWM 방식은 고주파 스위칭이 특정 레그에 고정됨에 따라, 스위칭 손실이 누적되는 레그와 도통 손실위주의 레그 간 열적 불균형이 심화되었다. 실험 결과, 운전 300초 경과 시점에서 두 레그 간의 온도 편차는 약 5.5 °C

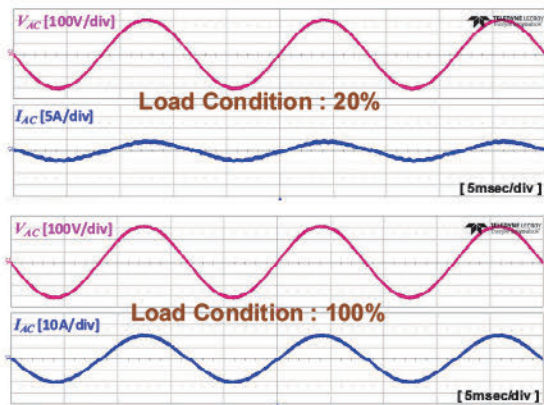
까지 벌어지며 열 평형 상태에 도달하였다. 이는 특정 스위치 소자의 정선 온도 상승을 가속화하여 장기적인 절연 파괴나 열적 스트레스를 유발할 가능성이 높다.

반면, 제안하는 MU-PWM은 매 반주기마다 스위칭 역할을 교대함으로써 두 레그에 발생하는 손실의 총량을 시간적 평균 관점에서 완전히 균등화한다. 그 결과, 두 레그의 온도 상승 곡선이 거의 일치하는 양상을 보였으며, 최종 온도 편차를 1 °C 이내로 억제하였다. 이는 제안 기법이 국부적 과열 지점을 효과적으로 제거하여 전체 시스템의 열적 안정성을 확보하고, 소자의 기대 수명을 연장할 수 있다.

제안 기법의 실용성을 검증하기 위해 부하 변동에 따른 효율 측정 결과(Fig. 8), MU-PWM은 전 부하 영역에서 기존 U-PWM과 대등한 효율 특성을 유지하였다. 3 kW 정격 출력 기준 두 기법 모두 약 98% 이상의 고효율을 달성하였다. 이는 MU-PWM이 스위칭 레그를 교번하면서도 기존 유니폴라 방식 고유의 유효 스위칭 주파수 및 도통



(a) Conventional U-PWM



(b) Proposed MU-PWM

Fig. 6 Comparison of output voltage and current waveforms under light (20%) and rated (100%) load conditions

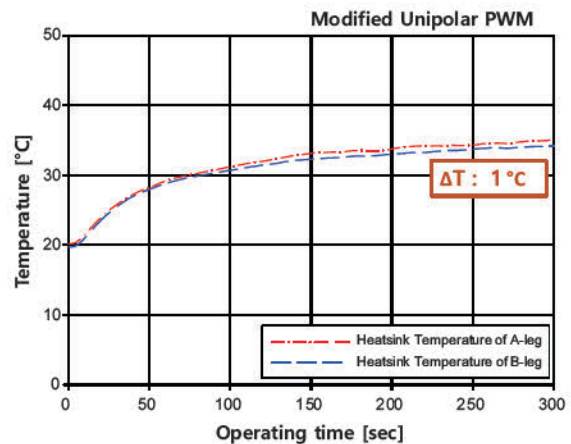
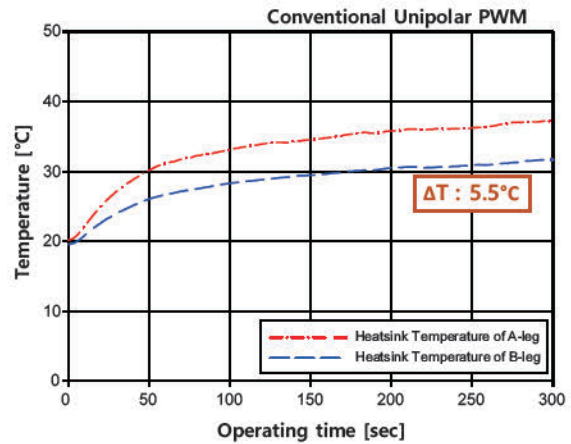


Fig. 7 Comparison of heatsink temperature rise between conventional U-PWM and proposed MU-PWM under 3 kW rated load condition

경로를 동일하게 유지하는 것으로 판단된다. MU-PWM의 레그 교대에 따른 알고리즘적 변화가 전체 스위칭 손실 및 도통 손실 총량에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

특히, 1kW 미만의 경부하 영역에서 관찰되는 0.1~0.2% 내외의 미세한 효율 차이는 레그 교대 시 발생하는 과도 응답이나 제어 알고리즘의 연산 오차보다는, 영점 교차 부근에서 미세한 전류 파형 왜곡 성분의 차이로 판단된다. MU-PWM은 열 분포 개선을 위한 알고리즘 적용에도 불구하고 효율 저하가 전혀 없으며, 특정 운전 영역에서는 오히려 전력 품질 개선을 통해 시스템 효율을 보전할 수 있음을 입증하였다.

결론적으로, 제안하는 MU-PWM 기법은 기존 U-PWM이 갖는 고효율과 우수한 전력 품질 장점은 그대로 유지하면서, 레그 간의 열적 불균형을 개선하여 V2L OBC의 장기적인 열적 신뢰성을 보장할 수 있는 효과적인 솔루션임이 확인되었다.

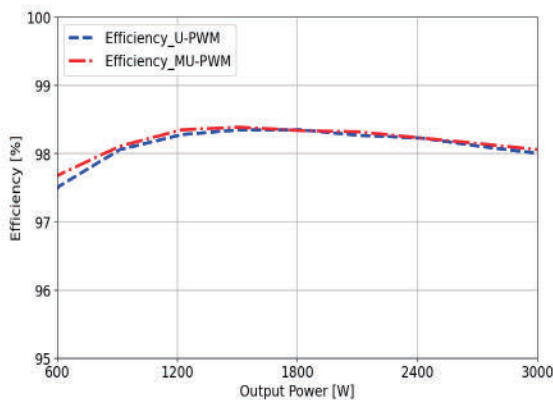


Fig. 8 Comparison of measured system efficiency according to load variation

4. 결론

본 논문에서는 단상 V2L OBC 인버터가 기존 U-PWM을 적용할 때 발생하는 레그 간 열적 불균형 문제를 해결하기 위해 MU-PWM 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 계통 주파수의 반주기마다 고주파스위칭을 수행하는 레그를 교대시켜 스위칭 손실과 열적 스트레스를 레그 간에 균등하게 분산시킨다.

3 kW급 프로토타입 인버터의 실험 결과, 기존 U-PWM 방식의 레그 간 방열판 온도 편차 5.5 °C 대비, 제안된 MU-PWM 방식은 이 편차를 1 °C 이내로 획기적으로 감소시켰다. 또한, MU-PWM 기법은 전류 영점 교차 지점에서 왜곡 없는 안정적 동작과 함께 0.99 이상의 역률, 전 부하 98% 이상의 높은 효율을 달성하였다.

결론적으로, 제안하는 MU-PWM 기법은 복잡한 하드

웨어 추가 없이 스위칭 패턴의 변경만으로 특정 소자의 국부적 과열을 방지하고, V2L OBC 시스템의 장기적인 열적 신뢰성 및 수명을 확보할 수 있는 실효성 있는 솔루션임을 입증하였다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00399967, SiC 시스템용 부동전원 DC/DC 컨버터 내장 저전력/절연형 단일 칩 센스 앰프 IC 개발).

References

- 1) R. Pradhan, N. Keshmiri and A. Emadi, "On-Board Chargers for High-Voltage Electric Vehicle Powertrains: Future Trends and Challenges," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, Vol.4, pp.189-207, 2023.
- 2) J. Park, Y. Jeon, J. Na, S. Cho, Y. Shin, W. Shin and J. Kim, "Development of High Efficiency Power Module for Electric Vehicle Charger," *Transactions of KSAE*, Vol.30, No.10, pp.785-792, 2022.
- 3) G. G. Kumar and S. Palanisamy, "A Review of Bi-directional On-Board Chargers for Electric Vehicles: Topologies, Control Strategies, and Future Trends," *IEEE Access*, Vol.12, pp.12345-12360, 2024.
- 4) C. W. Lin, H. J. Chiu, M. S. Tzeng, J. W. Yeh and C. H. Huang, "Novel Bidirectional On-Board Charger for G2V and V2X Applications on Wide-Range Batteries," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.12, No.2, pp.2292-2305, 2024.
- 5) J. Y. Lee and H. J. Chae, "6.6-kW On-Board Charger Design Using GaN HEMT with High Power Density and Efficiency," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.8, No.3, pp.2864-2873, 2020.
- 6) N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd Edn., Hoboken, John Wiley & Sons, 2003.
- 7) F. Salomez, H. Pichon, Y. Lembeye and J. C. Crébier, "PWM Strategy for the Cancellation of the Common Mode Noise Generated in a Multicell DC-AC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.39, No.9, pp.11124-11133, 2024.
- 8) Z. Zhang, J. Wang and X. Wu, "Loss Unbalance Issue of the Full-Bridge Inverter with Reactive Power Injection," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp.1845-1849, 2021.
- 9) H. Zhang, J. Li, X. Wang and Y. Liu, "Thermal Analysis and Lifetime Evaluation of Power Devices in Single-

- Phase Inverter with Different Modulation Strategies,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.33, No.12, pp.10856-10866, 2018.
- 10) J. G. Berger, A. Müller, S. Braun and M. Doppelbauer, “On the Experimental Verification of Electrothermal Modeling of GaN-HEMT-Based DC-DC Converters,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.40, No.4, pp.5518-5530, 2025.
 - 11) K. S. P. Kiranmai, R. V. Damodaran, M. Hushki and H. Shareef, “An Alternate Hybrid PWM for Uniform Thermal Sharing in Single Phase Voltage-Source Inverter,” Scientific Reports, Vol.13, Paper No.3348, 2023.
 - 12) C. Wang, C. Tian and J. Deng, “A PWM Method of H-Bridge Converter with Temperature Rise Balancing and Minimization Based on Periodically Alternating Employment of Power Devices,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.37, No.9, pp.11023-11034, 2022.
 - 13) B. W. Kwak, M. B. Kim and K. S. Lee, “Comparison of Zero-Crossing Distortion Characteristics for Unipolar PWM Methods in a Single-Phase Inverter Under V2G Operation of a Bidirectional OBC”, KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1124-1125, 2025.