

전기자동차 OBC용 Interleaved Totem-Pole PFC의 V2L 경부하 효율 개선을 위한 제어기법

안동혁*, 하태욱**, 이주아**, 이병국**†

성균관대학교 전자전기공학부*, 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과**

Control Strategy for Interleaved Totem-Pole PFC to Improve Light Load Efficiency of V2L Operation in EV On-Board Charger

Dong-Hyuk Ahn*, Tae-Wook Ha**, Ju-A Lee**, Byung-Kuk Lee**†

School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University**

ABSTRACT

V2L (vehicle to load) 기능에 대한 수요가 증가함에 따라 OBC (on-board charger)의 양방향 동작이 필수적으로 요구되고 있다. 일반적으로 최대 부하 조건에서 동작하는 G2V (grid to vehicle)와 달리 V2L은 부하 조건이 다양하게 형성되어 경부하 조건에서 효율 개선이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 경부하 효율 개선을 위한 PFC 스위칭 leg의 선택 적용 제어 알고리즘을 제안하고, 부하 조건에 따른 손실 분석을 통해 제안하는 제어 알고리즘의 우수성을 검증한다.

1. 서론

최근 전기자동차 (electric vehicle, EV) 기술의 발전에 따라 V2L 기능에 대한 수요가 증가하고 있다. EV 사용자는 V2L 기능을 통해 표 1과 같은 다양한 부하에 필요한 외부 전력을 EV를 통해 공급받을 수 있다. 이에 따라 G2V 동작에 최적 설계된 EV가 다양한 부하 조건에서 V2L 동작이 요구됨에 따라 경부하 조건 효율 개선의 중요성이 강조되고 있다^[1].

그림 1은 interleaved totem-pole PFC의 기본 구조를 나타낸다. 회로에 적용된 interleaved 구조는 G2V 동작 시, 입력 전류가 A, B 상 leg로 분배되어 단상 구조 대비 전류 크기 감소를 통한 손실 개선 효과의 이점을 갖는다. 하지만 주로 경부하 조건에서 동작하는 V2L의 경우, interleaved 구조 적용에 따른 전류 크기 감소 효과가 크지 않아 효율 개선의 이점이 떨어지며, 단상 대비 소자 수 증가로 인한 손실 성분이 크게 나타난다. 특히, 인덕터의 철손은 스위칭 주파수에 따라 변동이 큰 반면, 부하에 따른 변동이 적은 고정손에 해당하여 경부하 조건에서 효율 저하 정도가 크게 나타난다. 결과적으로, 이는 경부하 조건에서 interleaved 구조의 적용이 비효율적이라는 것을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 V2L 동작 시 경부하 영역에서 interleaved PFC 회로 중 두 개의 leg만 사용하고, 부하 증가에 따라 3개의 leg를 모두 사용하는 방식으로 고효율 달성을 위한 최적 구동 방안을 제안한다. 이를 위해 PFC의 2-leg 및 3-leg 구동에 따른 효율 양상을 비교하여 부하 및 DC-link 전압 변화에 따른 최적 스위칭 leg 구동 영역을 도출한다. 또한 제안하는 제어 알고리즘 적용에 따른 효율 개선 정도를 확인하여 제어기법의 신뢰성 및 타당성을 검증한다.

| Load | Rated Power [W] |
|------------|-----------------|
| 전기장판 | 50 ~ 200 |
| 블루투스 스피커 | 20 ~ 300 |
| 커피포트 (소형) | 800 ~ 1500 |
| 전기히터 | 2000 ~ 3000 |
| 이동형 대형 에어컨 | 4000 ~ 5000 |

표 1 V2L 기능 사용 부하 예시

Table 1 Example of load using V2L functionality

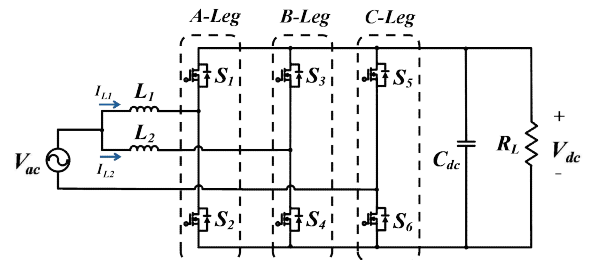


그림 1 Interleaved totem-pole PFC 컨버터 회로

Fig. 1 Circuit of interleaved totem-pole PFC converter

2. 손실 분석 조건 및 시뮬레이션 검증

| Parameter | Value [Unit] |
|------------------------------------|------------------------|
| DC-link voltage (V_{dc}) | 436 ~ 826 [V] |
| AC voltage (V_{ac}) | 2ph, 220 [V_{rms}] |
| AC frequency (f_{ac}) | 60 [Hz] |
| AC power (P_{ac}) | 5 [kVA] |
| Switching frequency (f_{sw}) | 50 [kHz] |
| Current ripple (ΔI_{ac}) | 0.2% |
| Power semiconductor switch | AIMW120R035M1H |
| LC filter design parameter | |
| Input inductor | 300 [μ H] |
| Output Capacitor | 3.6 [nF] |

표 2 Interleaved totem-pole PFC 설계 사양

Table 2 Specification of interleaved totem-pole PFC

표 2는 본 논문에서 사용한 interleaved totem-pole PFC 컨버터의 설계사양 및 전력 반도체 소자 정보를 나타낸다.

2.1 스위치 및 다이오드 손실

시스템을 구성하는 전력 반도체에서 발생하는 손실 요인으로는 도통 손실 및 스위칭 손실 그리고 역병렬 다이오드 손실이 존재한다. 도통 손실은 식 (1)을 통해 구할 수 있으며, 수식의 I_{rms} 는 채널 전류의 rms값, $R_{ds(on)}$ 은 스위치의 도통 저항을

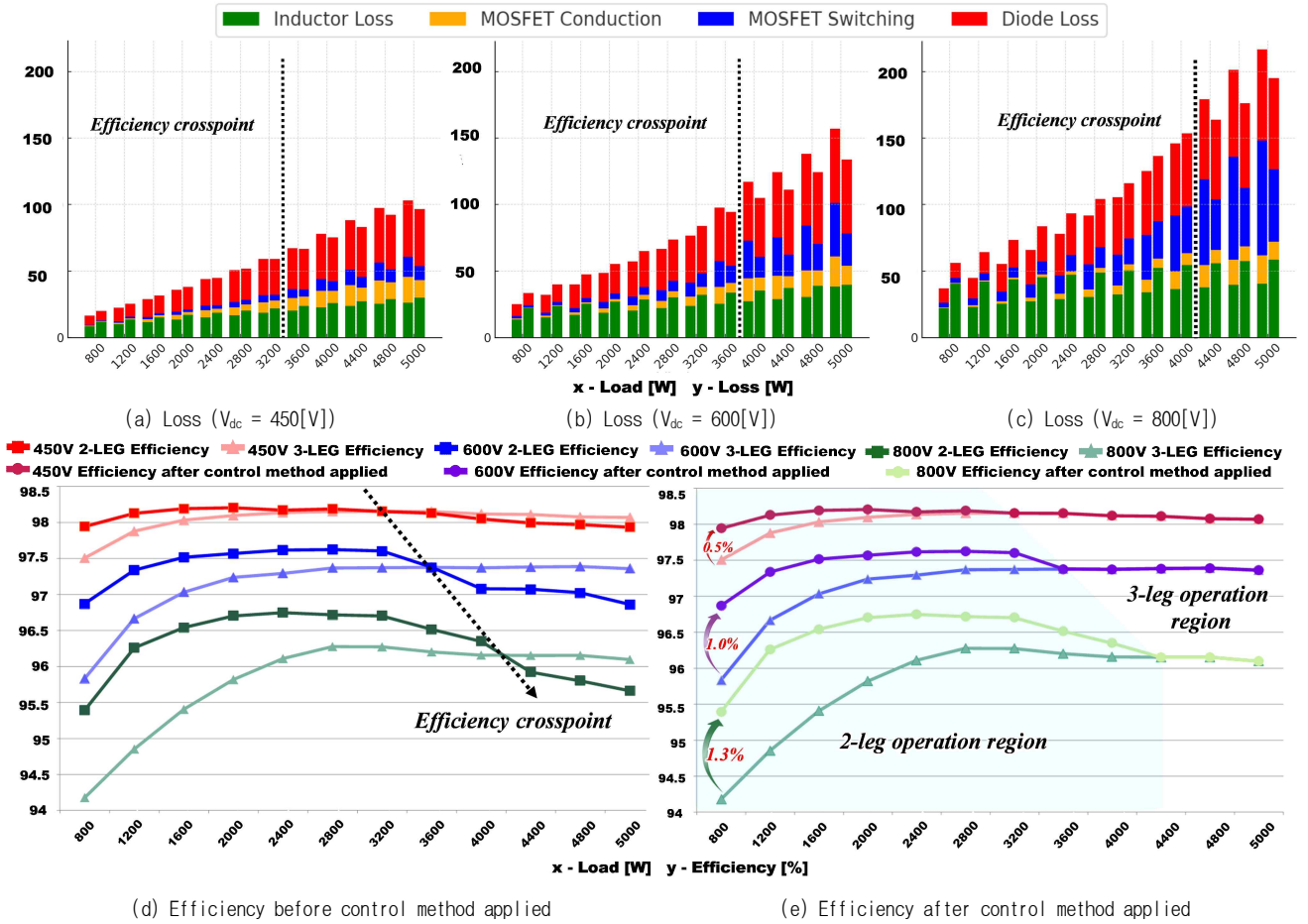


그림 3 전압 조건 별 부하에 따른 효율 및 손실

Fig. 3 Efficiency and losses according to load under different voltage conditions

나타낸다. 스위칭 손실은 식 (2)를 통해 구할 수 있으며, 이를 구성하는 성분인 P_{on} 과 P_{off} 는 스위치의 온/오프 손실, I_{nom} 과 V_{nom} 은 스위치의 정격 전류 정격 전압을 나타낸다. 이때 P_{on} , P_{off} 는 전력 반도체 소자의 datasheet를 기반으로 E_{on} , E_{off} 특성을 반영하여 도출된다. 다이오드 도통 손실은 식 (3)을 통해 구할 수 있으며, 이때 I_{rev} 는 역병렬 다이오드 전류의 평균값이고 V_F 는 다이오드 순방향 전압 강하를 나타낸다.

$$P_{cond, Switch} = I_{rms}^2 \cdot R_{ds} \quad (1)$$

$$P_{sw} = \frac{(P_{on} + P_{off}) I_{peak} \cdot f_{sw} \cdot V_{dc}}{\pi \cdot I_{nom} V_{nom}} \quad (2)$$

$$P_{cond, Diode} = V_F \cdot I_{rev}^2 \quad (3)$$

2.2 시뮬레이션 검증

식 (1)-(3)을 기반으로, interleaved totem-pole PFC의 V2L 동작에서 2-leg 및 3-leg 구동에 따른 손실 분석 결과를 그림 3(a)-(c)와 같이 나타내었으며, 이에 따른 시스템 효율 변화 양상을 그림 3(d)에서 확인할 수 있다. 그림 3(d)에서 알 수 있듯 경부하 영역에서는 2-leg 구동이 3-leg 구동에 비해 더 높은 효율을 보이지만, 부하가 증가함에 따라 두 구동 방식의 효율 변화가 미미하게 나타난다. 이후 최대 부하에 가까워질수록 철손보다 3-leg 구동의 도통 손실 저감 효과가 더 크게 작용하여 3-leg의 효율이 더 우수해지며 효율 양상이 역전된다. 또한, 그림 3(d)의 efficiency crosspoint에서 확인할 수 있듯이 DC-link 전압이 증가함에 따라 더 높은 부하 조건에서 3-leg 구동으로

의 전환이 요구됨을 알 수 있다. 제안된 구동 방식을 적용한 결과, V2L 동작 시 DC-link 전압 450 [V] 조건에서 최대 0.5%, 평균 0.15%, 600 [V] 조건에서 최대 1.0%, 평균 0.47%, 800 [V] 조건에서 최대 1.3%, 평균 0.74%의 효율이 개선됨을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 EV의 V2L 동작 시 경부하 효율 개선을 위한 interleaved totem-pole PFC의 스위칭 leg 선택 구동 방안을 제안하였다. 제안된 방식은 경부하 조건에서는 두 개의 leg만을 구동하고, 부하가 증가함에 따라 세 개의 leg로 전환하여 도통 손실을 줄이고, 효율을 극대화하도록 설계되었다. 시뮬레이션 결과, 제안된 구동 방식을 적용함으로써 DC-link 전압 조건 450 [V]에서 최대 0.5%, 평균 0.15%, 600 [V]에서 최대 1.0%, 평균 0.47%, 800 [V]에서 최대 1.3%, 평균 0.74%의 효율 개선이 이루어짐을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000440, 섹터커플링 에너지산업 고도화 인력양성사업)

참고 문헌

- [1] K. Chen, C. Lu, W. Zhou, and J. Ke, "A variable turn-off time control method for light load efficiency improvement in totem pole PFC," in *Proc. 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2253-2256, Dec 2023.