인버터 PFC의 저주파 공통 모드 누설 전류 저감 방법 연구

이동인[1], 임지훈[1], 현예지[1], 정성욱[1], 장근호[1], 윤한신[1]
인천대학교 전기공학과[1]

PWM Method to Reduce Low Frequency Common-mode Leakage Current for Inverter PFC

Dong-In Lee[1], Ji-Hoon Lim[1], Ye-Ji Hyeon[1], Seong-Wook Jeong[1], Geun-Ho Jang[1], Han-Shin Youn[1]
Department of Electrical Engineering, Incheon National University[1]

ABSTRACT

본 연구에서는 인버터 PFC의 저주파 공통 모드 누설 전류를 줄일 수 있는 스위칭 기법에 대해 논한다. 인버터 PFC의 누설 전류 발생 원인과 그 과정을 분석하고 수식적인 관계를 도출하며, 분석한 내용을 바탕으로 저주파 누설 전류 문제를 개선할 수 있는 인버터 PFC의 새로운 스위칭 기법을 제안한다. 끝으로, 인버터 PFC 회로에 제안하는 스위칭 기법 적용 유무에 따른 누설 전류 비교를 통해 제안하는 스위칭 기법의 유효성을 검증한다.

1. 서 론

전 세계적으로 전기 자동차(이하, EV)의 판매량 및 EV 시장 확대 예상 수준이 지속적으로 상승함에 따라 각 EV 제조사들은 사용자 편의성을 만족시킬 수 있는 충전 시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 고전압 대전력 배터리 탑재를 통한 주행 거리 향상이 그중 하나이며, 배터리 전압이 상승함에 따라 차량 내에 탑재되는 On-Board Charger(OBC)의 출력 전압 상승이 요구되고 있다[1].

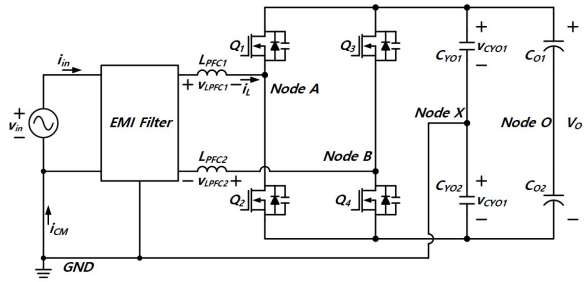

그림 1 Inverter PFC 회로 구성
Fig. 1 Circuit Configuration of Inverter PFC

OBC는 일반적으로 입력 교류 전력을 가공하는 PFC단과 고전압 배터리에 전력을 전달하는 DC/DC단으로 구성되며, OBC의 PFC단에 적용 가능한 토폴로지는 Inverter PFC가 있다.

Inverter PFC는 Bridgeless PFC와 같은 구조로, 일반적인 Boost 컨버터 기반 PFC와 달리 다이오드 정류기가 없어 소자 수와 손실을 저감할 수 있고 PFC 회로의 고밀도, 고효율화가 가능한 장점이 있다. 그러나, Inverter PFC는 스위칭 동작에 의해 출력 Y-커패시터(이하, Y-cap) 양단 전압이 정현파 형태로 변화하여, 공통 모드(이하, CM) 저주파 누설 전류가 발생한다. CM 누설 전류는 전자기적 장애 요소로써 제어부를 비롯한 센싱부에 악영향을 초래함과 더불어 제어의 불안정성을 야기하며, 큰 CM 누설 전류는 OBC의 샤시 그라운드를 따라 AC 전원측으로 흘러 AC 전원측 누전 차단기의 전원 차단 동작을 비롯한 인체 감전 사고의 원인이 되므로 CM 누설 전류는 EMI 필터나 제어를 통해 충분히 저감되어야 한다[2].

본 논문에서는 Inverter PFC에서 발생하는 CM 누설 전류의 주요한 성분인 저주파 CM 누설 전류를 저감할 수 있는 새로운 PWM 방법을 제안하며, 750V/ 3.3kW급 프로토 타입 축소 모델 실험 결과를 통해 제안하는 PWM 방법의 유효성을 검증한다.

2. 본 론

입력 전압 Positive Cycle 임의의 한 지점에서 제안하는 PWM 방법을 적용한 Inverter PFC의 동작 파형 및 전류 흐름은 그림 2와 같으며, 제안하는 PWM 방법을 적용한 Inverter PFC의 시비율 D는 아래의 식 (1)과 같이 계산된다.

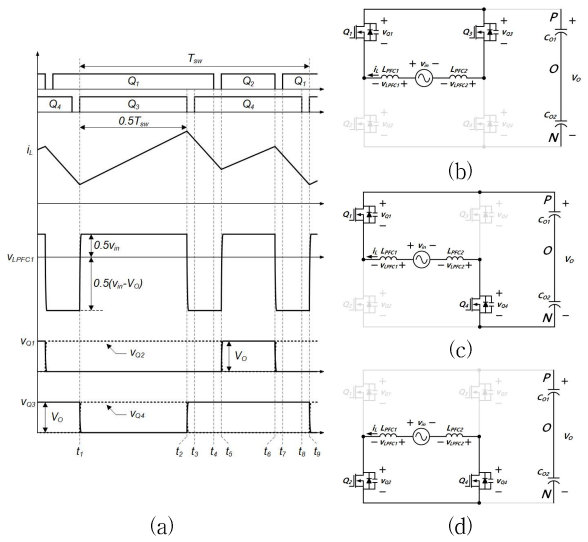

그림 2 (a) 제안 PWM을 적용한 Inverter PFC 동작 파형, (b) t_1~t_2 (c) t_3~t_4 and t_7~t_8, (d) t_5~t_6

Fig. 2 (a) Waveform of Inverter PFC with Proposed PWM, (b) t_1~t_2 (c) t_3~t_4 and t_7~t_8, (d) t_5~t_6

$$D = \frac{1}{2} + \frac{v_{in}}{V_O} \quad (1)$$

그림 2에 나타난 바와 같이 제안하는 PWM 방법을 적용한 Inverter PFC에서 Q_3와 Q_4는 0.5의 같은 고정 시비율을 가지며 서로 상보적으로 동작한다. 일반적인 Inverter PFC의 PWM과 달리, Q_3와 Q_4가 0.5 시비율로 상보 동작하므로, 노드 B의 폴 전위는 0V로 항상 일정한 값을 가진다.

이때, PFC 인덕터 L_{PFC2}의 양단 전압 v_{LPFC2}는 Volt-Second Balance에 의해 저주파 및 평균 관점에서 항상 0V 전압을 가진다. 따라서, 노드 X의 전위는 저주파 및 평균 관점에서 노드 B의 폴 전위와 동일한 0V의 일정한 전위를 갖게 되어 노드 X 양 측의 두 Y-cap 양단 전압이 변동하지 않는다. 결과적으로 PFC 출력 전압 V_O가 일정할 때, 두 Y-cap C_{YO1}과 C_{YO2}의 양단 전압 V_{CYO1},과 V_{CYO2}가 일정한 값을 갖게 되어 저주파 CM 누설 전류가 발생하지 않게 된다.

한편, Inverter PFC에 일반적인 PWM과 제안하는 PWM 적용에 따른 저주파 CM 누설 전류 $i_{CM.conv}(t)$와 $i_{CM.prop}(t)$는 아래 식 (2)와 (3)과 같이 계산된다.

$$i_{CMconv}(t) = \pi f_{line} v_{in.max} (C_{YO1} + C_{YO2}) \cos\omega t \quad (2)$$

$$i_{CMprop}(t) = C_{YO1} \frac{dv_{CYO1}}{dt} - C_{YO2} \frac{dv_{CYO2}}{dt} = 0A \quad (3)$$

여기서, f_{line}은 입력 전원 주파수, $v_{in.max}$는 입력 전압 최댓값이다.

3. 실 험

표 1 Inverter PFC 프로토 타입 회로 설계 파라미터
Table 1 Inverter PFC Proto Type Circuit Design Parameters

Boost Inductance	L_{PFC1}, L_{PFC2}	184.8uH
Output Capacitor	C_{O1}, C_{O2}	1.1mF
Switch	$Q_{1\sim4}$	C3M0032120K
Output Y-capacitor	C_{YO1}, C_{YO2}	44nF

제안하는 PWM 방법의 유효성 검증 실험을 위해 Inverter PFC 프로토 타입 회로를 구성하였다. 회로 구성의 주요 소자 파라미터는 위의 표 1과 같다. 스위칭 소자는 켈빈 소스 타입의 1200V급 SiC 소자를 선정하였고, 제안하는 PWM을 적용하여 750V/3.3kW 출력 실험을 진행하였다.

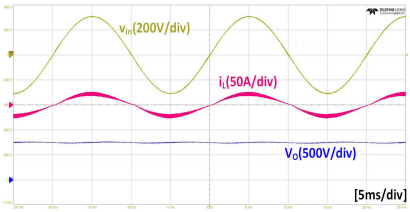

그림 3 제안하는 PWM을 적용한 Inverter PFC의 실험 파형
Fig. 3 Experiment Waveform of Inverter PFC with Proposed PWM

그림 3은 제안하는 PWM 기법을 적용한 Inverter PFC의 실제 실험 파형이다. 입력 AC 220V, 출력 DC 750V/3.3kW에서 효율은 97.43%로 나타났다. 이를 통해, 제안하는 PWM 방법을 적용하더라도 PFC 동작이 원활히 가능함을 확인할 수 있다.

아래의 그림 4는 Inverter PFC의 PWM 방식에 따른 CM 누설 전류를 측정한 실험 결과 파형이다. 그림 4. (a)를 통해, 일반적인 Inverter PWM 방법 적용 시, 입력 라인 주파수와 동일한 주파수 성분의 저주파 CM 누설 전류가 발생함을 알 수 있으며, 그 크기는 약 4.9mA로 나타났다. 반면에 그림 4. (b)와 같이, 제안하는 PWM 방법을 적용하면, CM 누설 전류에 저주파 성분이 제거되어 고주파 성분만 남아있게 되는 것을 확인할 수 있고, 그 크기는 일반적인 Inverter PWM 방식의 CM 누설 전류보다 작은 3.2mA로 나타났다. 이로써, Inverter PFC에 제안하는 PWM 방법을 적용하는 것이 저주파 CM 누설 전류 성분 제거를 통한 CM 누설 전류의 전체적인 크기를 감소시키는 것에 유효함을 알 수 있다.

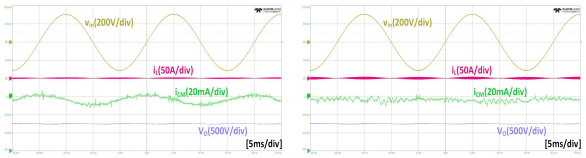

그림 4 Inverter PFC의 CM 누설 전류 실험 파형 (a) 일반적인 PWM 적용 시 (b) 제안하는 PWM 적용 시
Fig. 4 Experimental CM Leakage Current Waveform of Inverter PFC (a) with Conventional PWM (b) with Proposed PWM

4. 결 론

본 논문에서는 Inverter PFC의 누설 전류 저감을 위한 새로운 PWM 방법을 제안하였다. 제안하는 PWM 방법을 적용함으로써, 일반적인 Inverter PFC에서 발생하는 CM 누설 전류의 주요한 성분인 저주파 CM 누설 전류를 저감할 수 있다. 회로 내에 추가 소자 없이 Bridgeless PFC 회로를 그대로 적용하였으므로 부피 증가 없이 고밀도 고효율 PFC와 OBC 설계가 가능하다. 본 연구 결과를 통해 EV 충전 시스템의 CM 문제를 개선하고 더 나아가 산업계 여러 분야에 유의미한 기술 발전을 이룰 수 있을 것이라 기대한다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20019386)

참 고 문 헌

[1] J. Y. Kim, B. S. Lee, D. H. Kwon, D. W. Lee, J. K. Kim, “Low Voltage Charging Technique for Electriv Vehicles with 800 Battery”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 69, no. 8, pp. 7890-7896, Aug, 2022.

[2] Z. Yao, Y. Zhang, X. Hu, “Transformerless Grid-Connected PV Inverter without Common Mode Leakage Current and Shoot-Through Problems”, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 67, no. 12, pp. 3257-3261, Dec. 2020.