

SRC를 적용한 전기자동차용 OBC 시스템의 CM 누설전류 예측 및 최소화 방법

홍석민¹, 홍성용¹, 이동인², 윤한신², 이재범^{1*}
한국교통대학교¹, 인천대학교²

Prediction and Minimization Methods of CM Leakage Current in OBC Systems for Electric Vehicles Using SRC

Seok-Min Hong¹, Seong-Yong Hong¹, Dong-In Lee², Han-Shin Youn², Jae-Bum Lee^{1*}
Korea National University of Transportation¹, Incheon National University²

ABSTRACT

전기자동차용 On-Board Charger (OBC) 시스템은 AC 입력을 DC 출력으로 변환하는 Power Factor Correction (PFC)단과, PFC단의 DC 출력을 차량 충전에 필요한 넓은 범위의 DC 출력으로 변환하는 DC-DC 단으로 구성된다. DC-DC 단의 경우 우수한 ZVS 성능을 제공하는 LLC 공진형 컨버터가 주로 사용되지만, 넓은 입출력 범위를 만족해야 하는 OBC 시스템의 특성상 LLC 공진형 컨버터를 적용할 경우 변압기의 큰 부피로 인해 고밀도 고밀도 설계가 어려운 문제가 있다. 이에 본 논문에서는 OBC 시스템의 고밀도화 및 고효율화를 도모하기 위하여 변압기를 제거한 SRC 컨버터를 DC-DC단 토폴로지로서 채택하였다. 하지만 SRC의 비절연 구조는 EMI 제거를 위해 설치되는 Y-커패시터에서 발생하는 공통모드(CM) 누설 전류의 증첩을 야기하며, 이 경우 큰 CM 누설전류가 발생하여 누전차단기 동작 및 감전과 같은 안전 문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 CM 누설전류의 원인이 되는 OBC 동작에 따른 CM 노이즈 전압을 분석하고, Matlab을 통해 도출한 CM 노이즈 전압의 FFT 분석 결과와 OBC 시스템의 CM 등가회로를 이용하여 OBC의 설계 파라미터에 따른 CM 누설 전류를 최소화할 수 있는 이론적 방법과 최적 파라미터 선정 방법을 제시하였다. 또한 시제품을 통한 실제 동작 실험을 통해 그 유효성을 검증 하였다.

1. 서론

최근 국제적인 환경 문제와 지속 가능한 발전의 필요성이 증대되면서 전기자동차의 수요가 급증하여, 기존 화석연료 기반의 자동차 수요를 대체하고 있다. 이에 따라 전기자동차의 주행 거리 향상 및 충전 시간 단축을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 On-Board Charger (OBC)시스템의 충전 속도 개선 및 충전용량 증대를 위한 연구와 OBC 시스템의 고효율 고밀도화를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[1]

OBC 시스템은 AC입력을 차량 충전에 필요한 DC 출력으로 변환하여 전기자동차 배터리를 충전하기 위해 필요한 장치로 차량 내부에 탑재된다. OBC 시스템은 AC 입력을 DC 출력으로 변환하고 전압과 전류의 위상차를 줄여 높은 역률을 만족시키는 PFC단과 PFC단의 DC 출력을 전기자동차의 충전에 요구되는 전압으로 변환하는 DC-DC단으로 구성된다.

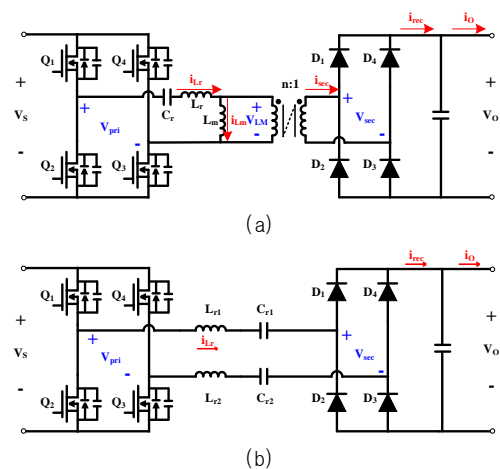


그림 1 (a) 절연형 LLC 공진형 컨버터 (b) 비 절연형 SRC 컨버터

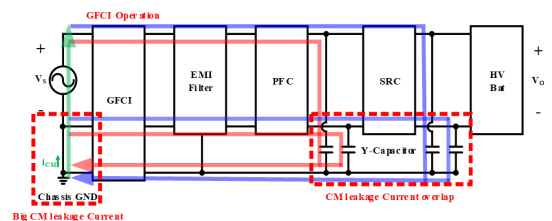


그림 2 SRC 적용시 CM 누설전류의 흐름

기존 OBC 시스템의 경우 DC-DC 단으로 ZVS능력이 우수한 그림 1 (a)의 절연형 LLC 공진형 컨버터를 채택하였다.^[2] 하지만 LLC의 경우 넓은 범위의 출력전압 범위를 만족하기 위해서 큰 부피의 변압기를 필요로 하여, OBC 시스템의 고밀도 설계가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 논문은 OBC 시스템의 고밀도 설계를 위해, 기존 LLC 컨버터에서 그림 1 (b)의 변압기를 제거한 형태의 SRC 컨버터를 채택하였으며, 이 경우 동일 동작 성능을 유지하기 위한 자성체의 Product Area를 효과적으로 저감할 수 있다. 하지만 비절연 구조의 SRC를 적용할 경우 그림 2에 나타난 바와 같이 EMI제거를 위해 OBC 입력부와 출력부에 설치되는 Y 커패시터에 인가되는 CM 노이즈 전압에 의한 CM 누설 전류가 증첩되어 큰 누설전류가 계통측에 흐르게 되는 문제가 존재하며, 이 경우 누전 차단기 동작으로 인한 OBC 시스템의 정상 동작이 불가능 하다.

따라서 본 논문은 OBC 시스템의 고밀도화를 위한 SRC의 적용을 위하여 CM 누설전류를 저감하는 이론적 방법을 소개한다. 우선 누설전류의 근본적 원인이 되는 CM 전압원의 발생 원리를 분석하고 OBC 시스템의 CM 등가회로 및 CM 트랜스 컨덕턴스를 도출하여 Matlab을 통해 OBC 동작시 발생하는 CM 누설전류의 발생을 이론적으로 분석한다. 이를 기반으로 CM 누설전류 저감을 위한 SRC의 공진 파라미터 최적설계 방안을 제시하고 시제품 제작 및 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다.

1. 본문

1.1 CM 누설전류의 발생

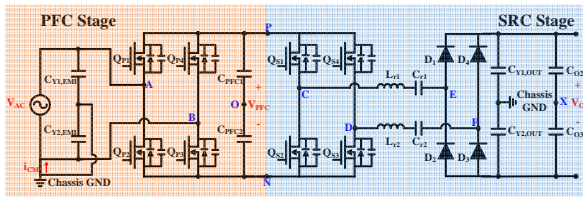


그림 3 OBC 시스템의 전체 회로도

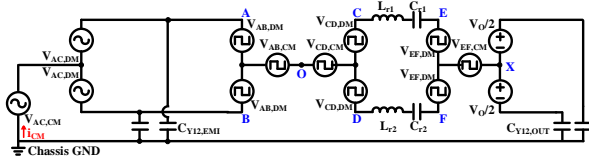


그림 4 OBC 시스템의 CM/DM 분리 회로

그림 3은 PFC단과 SRC단으로 구성된 OBC시스템의 전체 회로도를 나타내며, EMI 제거를 위해 PFC 입력부와 SRC 출력부에 각각 Y 커패시터가 설치된 것을 확인할 수 있다. Chassis GND로 흐르는 CM 누설전류 i_{CM} 은 Y 커패시터에 시간에 따라 변화하는 CM 전압이 인가될 경우 $C_Y(dv/dt)$ 에 의하여 발생하게 된다. 따라서 전체 시스템의 동작 중 발생하는 CM 누설전류를 파악하기 위해선 CM 전압원을 분석해야하며 이를 위해 그림 4에 나타난 바와 같이 OBC 전체 시스템의 CM/DM 분리회로를 작성하였다.

그림 4에 나타나있는 바와 같이 CM 전압은 시스템의 스위칭 동작에 의하여 A/B, C/D, E/F 노드에 발생하게 된다. 노드 O를 기준으로 노드 A와 B에 인가되는 전압은 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(1)과 (2)를 연립하여 A/B노드에 발생하는 CM 전압을 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

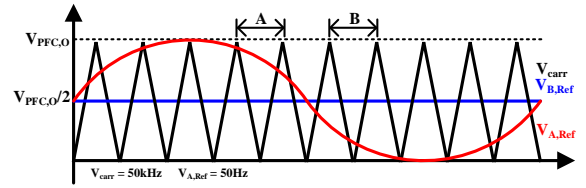
$$V_{AO} = V_{AB,CM} + V_{AB,DM} \quad (1)$$

$$V_{BO} = V_{AB,CM} - V_{AB,DM} \quad (2)$$

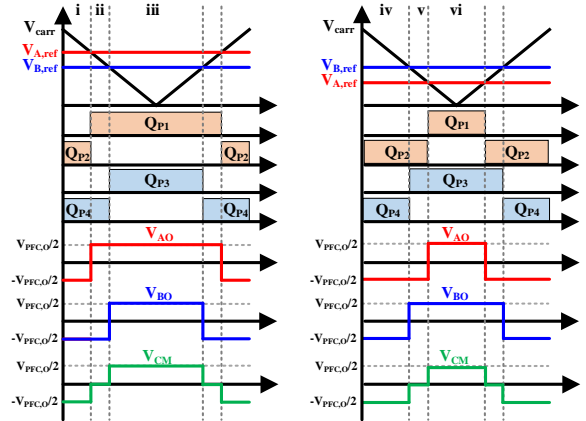
$$V_{AB,CM} = \frac{V_{AO} + V_{BO}}{2} \quad (3)$$

1.1.1 스위칭 동작에 의한 CM 전압 분석

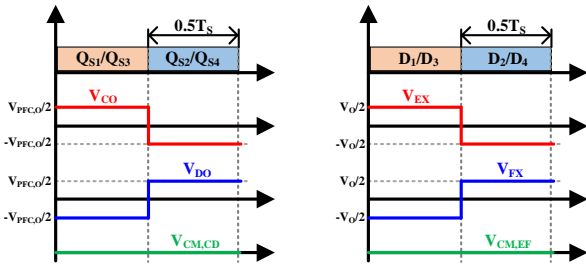
그림 5 (a)는 PFC단의 유니 폴라 인버터 타입 제어의 반송파와 각 레그의 전압지령을 나타낸 그림이며, 그림 5 (b),(c)는 PFC단의 유니폴라 제어 및 SRC단의 동작에 의해 각 노드에 인가되는 전압 및 CM 전압의 파형을 보여준다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 PFC단 및 SRC단 동작에 따른 CM 전압 분석

그림 5(a)에 나타나있는 바와 같이 PFC단 Aleg 지령의 경우 50Hz의 AC 입력을 DC로 변환하기 위하여 50Hz의 주파수를 가지며, 스위칭 주파수는 50kHz로 동작한다. 그림 5 (b)에 나타나있는 바와 같이 PFC단의 경우 식 (3)에 의하여 $V_{PFC,O}/2$ 의 크기를 갖는 준구형파 형태의 CM 노이즈 전압이 발생하며, 이는 PFC단의 동작 주파수 50kHz와 Aleg 전압지령의 주파수 50Hz의 주기를 갖는다. 반면 SRC단의 경우 스위칭 동작에 의해 각 노드에 인가되는 전압이 상보적인 형태를 가지므로 CM 전압은 상쇄되어 발생하지 않는다. 결론적으로 OBC 시스템의 동작으로 인한 CM 노이즈 전압은 PFC단에 의해서 발생하며, 50Hz, 50kHz의 고조파 성분을 갖는 CM 노이즈 전압이 발생한다.

1.1.2 CM 등가회로 및 트랜스 컨덕턴스

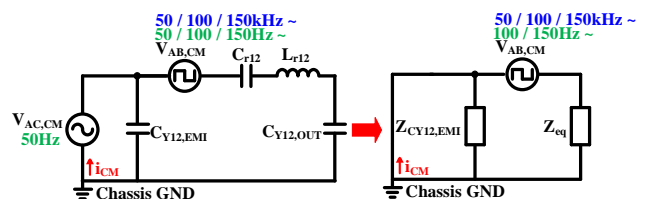


그림 6 OBC 시스템의 CM 등가회로

그림 6은 CM 누설전류 분석을 위해 DM 성분을 단락으로 생략한 CM 등가회로이다. 유니폴라 인버터 타입 PFC단의 경우 AC 입력전압은 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, CM 전압원의 기본파 성분은 $V_{PFC,O}/2$ 의 AC 입력전압과 동일한 크기를 갖는다. 또한 PFC단 Y 커패시터의 경우 50Hz의 저주파에서 큰 임피던스를 가지므로 그림 6에서 AC 입력전압과 CM 노이즈 전압의 기본파 성분은 직렬로 연결/상쇄되어 생략가능하다.

$$V_{AC} = \frac{V_{PFC,O}}{2} \times \sin(\omega t) \quad (4)$$

CM 누설전류는 그림5 (b)를 통해 도출한 CM 노이즈 전압과 그림6을 통해 도출할 수 있는 CM 등가회로의 CM 트랜스 컨덕턴스의 곱으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{CM} = G_{CM} V_{CM,AB} \quad (5)$$

1.2 CM 누설전류 분석 결과 및 유효성 검증

그림 7은 표 1의 동일 공진 주파수를 갖는 조건별 CM 트랜스 컨덕턴스에 대한 Bode 선도를 나타내며 d조건에 가까울수록 50Hz, 50kHz 대역폭에서의 CM 트랜스컨덕턴스의 크기가 저감되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 CM 누설전류의 저감을 위하여 작은 공진 커패시턴스를 갖는 공진파라미터 설계가 필요함을 알 수 있다. 그림 8은 Matlab과 PSIM을 통해 도출한 CM 누설 전류의 파형을 나타내며, 두 파형이 비슷한 양상을 띄는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 9에 나타난 바와 같이 Matlab과 PSIM의 결과가 모두 d 조건으로 갈수록 비슷한 값을 가지며 저감되는 것을 확인할 수 있다.

표 1 조건별 SRC컨버터의 공진 파라미터

Parameter	Value			
	a	b	c	d
L_r	22.7uH	27.3uH	34uH	45uH
C_r	66nF	55nF	44nF	33nF
F_r	130kHz			

그림 7 CM 노이즈 전압원의 FFT 분석결과

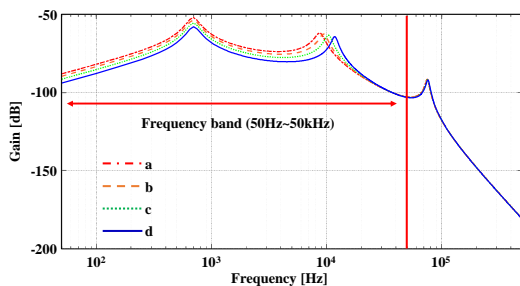


그림 7 조건별 CM 트랜스 컨덕턴스 Bode Plot

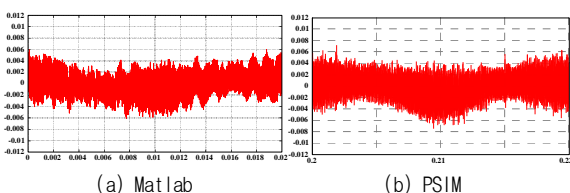


그림 8 CM 누설전류 파형 비교

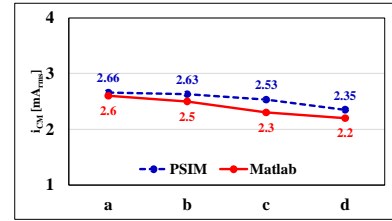


그림 9 CM 누설전류 결과 비교

2. 실험 결과

그림 10은 실제 OBC 시스템의 시제품 제작을 통해 AC 입력 230Vac / PFC 출력 750V / SRC 출력 500V (6.6kW) / 'd' 조건에서 실험을 진행하여 도출한 CM 누설전류 결과를 보여 준다. 실험 결과 CM 누설전류는 2.4mA_{rms}로 그림 9의 이론을 통해 도출한 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 이론에 대한 유효성을 입증하였다.

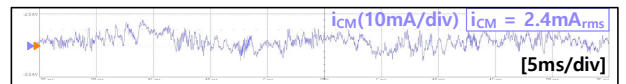


그림 10 실제 실험을 통한 CM 누설전류 측정 결과

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차 충전기용 OBC 시스템의 고밀도 고효율 달성을 위해 SRC 컨버터를 적용하였으며, SRC적용 시 CM 누설전류 발생으로 인한 동작 불능을 방지하기 위하여 CM 누설전류 저감을 위한 이론적 분석과 최적 공진파라미터 설계방법을 제시한다. 또한 이론적 분석결과와 PSIM 시뮬레이션 결과, 시제품 제작 및 실험을 통해 CM 누설 전류 저감에 대한 이론적 분석의 유효성을 검증하였다.

이 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 의 연구비 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO. 20018971)

참고 문헌

- [1] D. -W. Lee, B. -S. Lee, J. -H. Ahn, J. -Y. Kim and J. -K. Kim, "New Combined OBC and LDC System for Electric Vehicles With 800 V Battery," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 10, pp. 9938-9951, Oct. 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3148730.
- [2] H. Song, D. Xu and A. J. Zhang, "Re-analysis on ZVS Condition for LLC Converter," 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Phoenix, AZ, USA, 2021, pp. 1874-1880, doi: 10.1109/APEC42165.2021.9487400.