

전기차 충전용 25kW급 AC/DC 컨버터의 3상 EMI 수동 필터 설계

이성은*, 최홍석*, 김성훈**, 채종윤**, 조영훈*
 건국대학교 전력전자연구실*, 현대자동차**

Design of 3-Phase EMI Passive Filter for a 25kW AC/DC Converter Used in Electric Vehicle Charging

Seongeun Lee*, Hongseok Choi*, Sunghun Kim**, Jongyoon Chae**, Younghoon Cho*
 Power Electronics Lab., Konkuk University*, Hyundai Motor Co., Ltd**

ABSTRACT

본 논문에서는 AC/DC 3상 EMI 필터 설계에 대해 다룬다. 3상 컨버터 회로를 등가회로로 변환하여 전달함수를 구하고, 이를 통해 주파수 응답을 분석한다. 분석한 차단 주파수와 공진 주파수를 참고하여 원하는 주파수 대역의 고조파를 감쇄하기 위한 필터 제정수를 선정하고, 필터를 설계한다. PSIM 시뮬레이션을 이용하여 EMI 노이즈를 측정하고 필터 성능을 CISPR 25 (class3)와 비교·분석한다. 이를 통해 제안한 필터의 EMI 노이즈 감쇄 효과를 확인한다.

1. 서론

오늘날 전기자동차의 충전 시간 단축과 전반적인 효율적인 운용을 위해 충전 전압 및 차량 내 배터리팩 전압 상승에 대한 연구가 요구되고 있다. 전기자동차 충전 전압 상승을 통해 급속 충전이 가능해짐에 따라, 점점 더 높은 전압의 배터리팩을 탑재한 차량이 출시되고 있다. 하지만 고속 스위칭 등으로 인한 전자기 간섭(Electromagnetic Interference, EMI)이 증가하여 회로 설계에 어려움이 있으며, 전기자동차 충전기의 고밀도 전력과 고효율 조건을 만족하기 위해 EMI를 줄일 수 있는 필터가 필요하다.

본 논문에서는 충전기에 사용될 필터로, 2-stage EMI 필터보다 부피와 무게 면에서 유리한 1-stage EMI 필터를 설계하였다. 특히, 전기자동차의 급속 충전을 위해 충전 전압과 차량 내 배터리팩 전압의 상승도 필요하며, 본 논문에서는 25kW급 충전 전압 DC 600V 이상 일 때의 고조파 성분을 전자파 방출 제한 기준인 CISPR 25 (class3)와 비교 분석하였다. 설계된 필터가 기준치를 만족하는지 여부를 모의 실험을 통해 검증하였다.

2. 3상 EMI 필터

2.1. EMI 필터 등가회로

그림 1은 전기자동차 AC/DC 충전기에 사용될 EMI 필터의 회로로, 일반적인 3상 수동 필터 구조를 보여준다. 시스템에서 발생한 노이즈 중 공통 모드(Common Mode, CM) 노이즈는 부유용량에 의해 전원 라인과 기준 접지간에 노이즈 전압이 발생하며 생기고, 그림 2와 같이 등가회로 변환 된다. 반면, 차동 모드(Differential mode, DM) 노이즈는 시스템 내부에서 순환

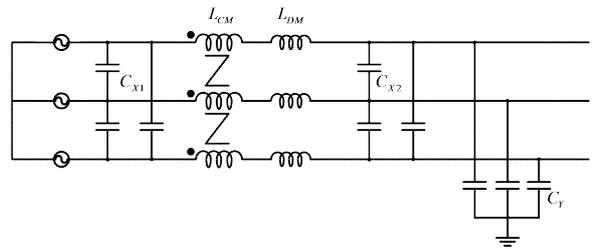


그림 1 3상 AC/DC 컨버터 EMI 필터 등가회로
 Fig.1 3-phase AC/DC Converter EMI filter equivalent circuit

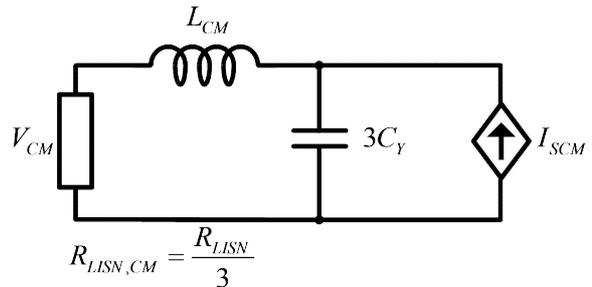


그림 2 3상 EMI 필터 CM 등가회로
 Fig.2 3-phase EMI filter CM equivalent circuit

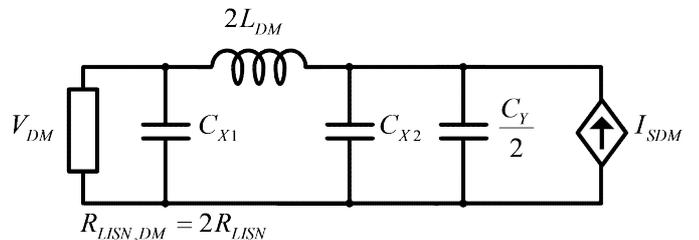


그림 3 3상 EMI 필터 DM 등가회로
 Fig.3 3-phase EMI filter DM equivalent circuit

하기 때문에 그림 3과 같은 등가 회로로 변환된다. 이 때 $R_{lisn,CM}$, $R_{lisn,DM}$ 은 각각 LISN 임피던스를 나타낸다.

2.2. EMI 필터 등가회로 전달함수

고조파 노이즈를 감쇄하기 위해 고조파 필터를 추가 할 경우 좀 더 복잡한 전달함수 식을 계산해야 하지만, 본 논문에서

는 기본적인 3상 EMI 필터 구조만 고려하여, CM과 DM을 각각 계산하였다. 그림 2와 그림 3의 EMI 필터로 유입된 CM 및 DM 전류의 전달함수는 식 (1) - (2)로 나타낼 수 있다. 식 (1)과 (2)를 통해 주파수 응답을 구하면, 해당 전달 함수를 가진 회로의 공진 주파수와 차단 주파수를 계산할 수 있으며, 이를 통해 원하는 주파수 대역의 노이즈 감쇄 크기를 감안하여 필터 소자의 값을 구할 수 있다. 필터 제정수 값에 따라 CM과 DM 노이즈 감쇄 정도에 차이가 발생하므로 CM과 DM 각각 방출 제한 기준치를 만족하도록 제정수를 선정해야 한다.

$$G = \frac{I_R}{I_{sCM}} = \frac{1}{1 + 3C_Y R_{LISN,CM} s + 3L_{CM} C_Y s^2} \quad (1)$$

$$G = \frac{I_R}{I_{sDM}} = \frac{\frac{1}{C_a s}}{\frac{1}{C_a s} + \frac{R_{LISN,DM}}{C_{a1} R_{LISN,DM} s + 1} + 2L_{DM} s} \cdot \frac{\frac{1}{C_{a1} s} + R_{LISN,DM}}{\frac{1}{C_{a1} s} + R_{LISN,DM}} \quad (2)$$

$$C_a = C_{a2} + \frac{C_Y}{2}$$

3. 모의 실험

3.1. 기존 3상 시스템 회로

25kW 출력의 3상 AC/DC 컨버터 시스템을 PSIM 시뮬레이션을 통해 모의 실험하였다. EMI 방출 제한 기준선은 CISPR 25 Class3를 기준으로 하였다. EMI 노이즈 성분을 관측하기 위해, 시뮬레이션에서 계통 전원 측과 DC 링크의 상단 및 하단에 임의의 부유 용량 값을 추가하였다. LISN을 통해 측정된 CM 노이즈는 그림 4와 같이 출력 전압이 900V일 때, CISPR 25 Class3 기준선을 넘었다. DM 노이즈도 마찬가지로 기준선을 넘었다.

표 1 모의실험 시스템 제정수
Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Mark	Value	Unit
LCM	LCM	1.04	uH
Y Capacitor	CY1	4.7	nF
X Capacitor1	CX1	0.6	uF
X Capacitor2	CX2	0.6	uF
R Lisn	R _{Lisn}	50	Ω

3.2. 제안된 필터를 적용한 시스템 회로

제안된 필터를 150 kHz 이상의 주파수에서 20dBuV 이상 감쇄되도록 차단 주파수를 선정하여, 필터 제정수를 설계하였다. 제안된 필터를 추가한 후, LISN을 통해 측정된 CM 노이즈의 결과는 그림 5와 같이 나타났으며, 900V일 때 CM, DM 노이즈 모두 40kHz~2.5.MHz 대역에서 CISPR 25 (class3) 기준선을 만족하였다.

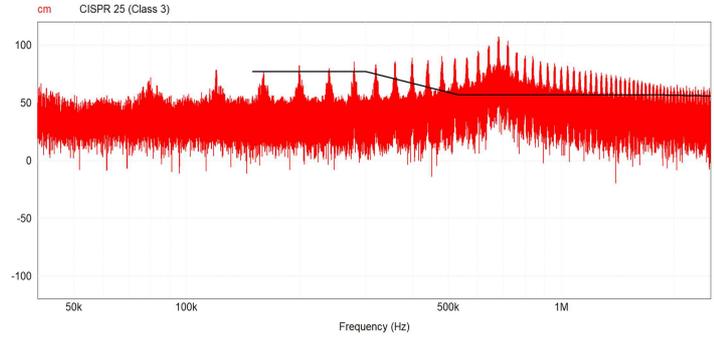


그림4 3상 공통모드(CM) 노이즈 (출력전압 900V)
Fig.4 3-phase CM noise (900V)

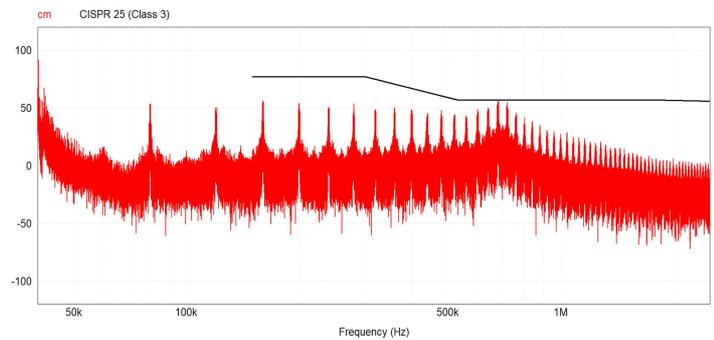


그림5 EMI 필터 적용한 3상 공통모드(CM) 노이즈 (출력전압 900V)
Fig.5 3-phase CM noise with EMI filter(900V)

4. 결론

본 논문은 3상 AC/DC 컨버터 회로에 3상 EMI 필터를 설계하여 분석하였으며, 제안한 EMI 필터의 성능을 모의 실험을 통해 900V 출력 전압에서 원하는 주파수 대역의 EMI 고조파 성분을 저감하기 위하여 제안된 필터를 사용했을 경우 고조파 성분이 저감 되었음을 확인하였다. CISPR 25 Class3 보다 엄격한 Class5 기준선을 만족할 수 있도록 EMI 필터 성능을 최적화할 예정이다.

본 연구는 2024년도 현대자동차 연구비 지원에 의한 연구입니다.

참고 문헌

[1] S. Jiang, Y. Liu, J. Peng and H. Jiang, "Magnetic Integration of EMI filter for Grid-Connected Voltage-Source Inverters," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 917-922

[2] Fu-Yuan Shih, D. Y. Chen, Yan-Pei Wu and Yie-Tone Chen, "A procedure for designing EMI filters for AC line applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 170-181, Jan. 1996,