

전기차의 전력네트워크를 고려한 전동 컴프레셔용 인버터의 전도성 EMI 필터 설계

서용원, 이성민, 정경훈, 박성준, 강은석, 신유승, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Conductive EMI filter design for inverter for electric compressor considering electric vehicle power network

Yongwon Seo, Sungmin Lee, Kyunghun Jung, Sungjun Park, Eunseok Kang,
 Youseung Shin, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab, Konkuk Univ.

ABSTRACT

EV(Electric Vehicle) 시스템의 경우 Traction 모터 외에도 에어컨 컴프레서(eComp) 모터와 같은 시스템이 추가적으로 병렬 연결된다. 병렬 연결된 모터 시스템은 EMI 필터가 필수적으로 부착되는데, 이때 발생한 고조파 전류가 EMI 필터에 문제를 발생시키고 있다. 따라서 EMI 필터를 설계할 때, 발생한 고조파를 파악하고 해당 대역을 피해 설계하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 인버터 스위칭에 의해 발생하는 DC Link 전류 고조파(harmonics) 성분을 분석하고, 그로 인해 EMI 필터에 발생하는 문제점 및 해결방안을 분석·제안한다. DC Link 전류 고조파 분석은 인버터 전압 변조기법인 Space Vector PWM을 기준으로 Double Fourier 수식을 통해 검증하였다.

1. 서론

EV(Electric Vehicle) 차량의 수요가 높아짐에 따라 관련된 문제가 여러 발생하고 있다. 인버터 시스템의 경량화와 원가 절감을 위해 최근 자동차 업계에서는 DC Link 커패시터의 크기를 축소시키고 있는 추세이다. 하지만 DC Link 커패시터 축소는 전류 리플 및 기타 고조파 문제와 연관되어 있으며, 이는 차량 내 다른 시스템에 영향을 미칠 수 있다.

EV(Electric Vehicle) 차량은 단순히 Traction 모터 외에도 에어컨 컴프레서(eComp) 모터 등 추가적인 시스템이 복합적으로 구성되어 있다. 에어컨 컴프레서(eComp) 모터는 Traction 모터와 병렬로 연결되어 있으며 이 두 모터 사이에는 고조파 저감을 위한 EMI 필터가 위치한다. 그러나 EMI 필터를 설치함으로써 발생하는 문제가 있는데, 이는 EMI 필터를 구성하는 인덕터와 커패시터의 공진 주파수가 시스템 구동 시 발생하는 DC Link 전류 고조파와 일치하는 경우이다. 이러한 경우 전류 리플의 공진이 발생하여 소자의 발열 문제 등 EV 차량에 치명적인 문제를 초래할 수 있다. 따라서 차량 구동 시 발생하는 DC Link 전류 고조파를 고려하여 EMI 필터를 설계하는 것이 필수적이다.

이에 본 논문에서는 EV 차량 구동 시 발생하는 DC Link 전류 고조파 성분과 그 영향을 분석하고, EMI 필터 설계 시 고려해야 하는 주파수 대역을 제안한다. 설계한 시스템과 EMI 필터는 모의실험을 통해 검증하였다.

1. DC Link 전류 harmonics

1.1 DC Link 전류 harmonics 분석

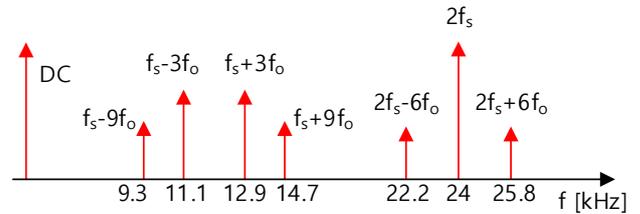


그림1 DC Link 전류 harmonics, SVPWM
 Fig.1 DC Link Current harmonics, SVPWM

표1 파라미터
 Table1.parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of Pole (P)	8	L _r	5.9 uH
f _s	12 kHz	L _{DM}	2.5 uH
f _o	300 Hz	Y-Cap	4.7 nF
Traction Rated Speed	4500 rpm	X-Cap	100 nF
Traction DC Link Cap	270 uF	Bulk-Cap	2.7 uF
eComp DC Link Cap	24 uF		

그림 1^[1]은 Traction 모터 구동 시, DC Link 전류의 고조파 분석을 나타낸다. 전압 변조기법 중 하나인 SVPWM 기법을 기준으로 계산하였다. f_s는 스위칭 주파수, f_o는 모터의 기본과 주파수를 나타낸다. 인버터의 스위칭 동작에 의해 DC Link 전류에는 스위칭 주파수의 사이드 밴드 성분과 스위칭 주파수의 2차 및 짝수 고조파 성분이 우세하게 나타난다.

기본파 주파수는 회전속도 rpm과 비례한다.

2. EV 시스템 회로

2.1 Traction 모터 단독 구동 전류 Path

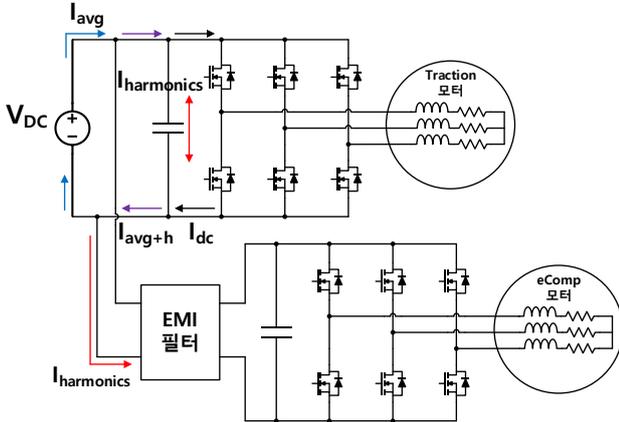


그림2 EV 모터 시스템, Traction 모터 단독 구동
Fig.2 EV motor system, Traction motor operates independently.

EV 모터 시스템의 전체 회로 구조는 그림 2와 같다. I_{dc} 는 DC Link 전류, $I_{harmonics}$ 는 인버터의 스위칭 동작에 의해 발생한 고조파, I_{avg+h} 는 병렬 연결 단 후 전류, I_{avg} 는 배터리 평균 전류를 나타낸다. Traction 모터 단독 구동 시 발생하는 대부분의 고조파는 임피던스가 작은 Traction 모터 DC Link 커패시터에 유입되고,^[2] 일부 고조파 성분은 병렬 연결된 eComp단에 유입된다. 이때 Traction 모터 DC Link 커패시턴스가 작을수록 유입되는 고조파 양은 더 적어진다.

2.2 EMI 필터 등가 회로

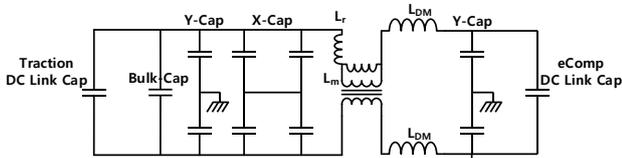


그림3 EMI 필터 회로
Fig.3 EMI filter circuit

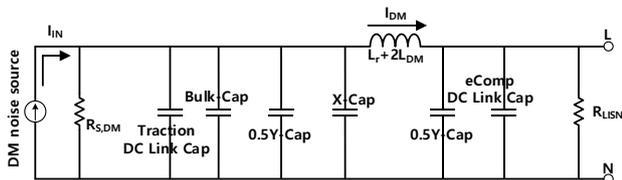


그림4 EMI 필터 DM 등가회로
Fig.4 EMI filter DM equivalent circuit

그림 3은 EV 차량에 들어가는 EMI 필터의 일반적인 구조를 보여준다. 두 개의 모터가 병렬로 연결되어 있으므로, 필터 해석 시 각각의 DC Link Cap(커패시터)은 필터의 일부분으로 포함되어 해석하게 된다. Traction 모터 단독구동 시, Traction 모터의 인버터 단은 고조파의 발생지인 노이즈 원으로 동작하게 된다. 모터에서 발생한 노이즈는 전원 전류와 같이

순환하기 때문에 DM 노이즈로 간주되어 그림 4와 같이 해석하였다. 그림 4에서 R_{SDM} 은 무한대 값을 가지고 있으며, R_{LISN} 은 LISN 임피던스를 나타낸다.^[3]

3. 모의 실험

3.1 기존 EMI 필터

EMI 필터로 유입된 DM 인덕터에 흐르는 전류의 주파수 응답은 식 (1)-(4)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{DM}}{I_{IN}} = \frac{1}{j\omega C_1} \cdot \frac{1}{j\omega L_1 + \frac{R_{LISN}}{R_{LISN} \cdot j\omega C_2 + 1} + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (1)$$

$$C_1 = C_{Traction,DC} + C_{Bulk} + 0.5 \cdot C_Y + C_X \quad (2)$$

$$C_2 = 0.5 \cdot C_Y + C_{eComp,DC} \quad (3)$$

$$L_1 = L_r + 2L_{DM} \quad (4)$$

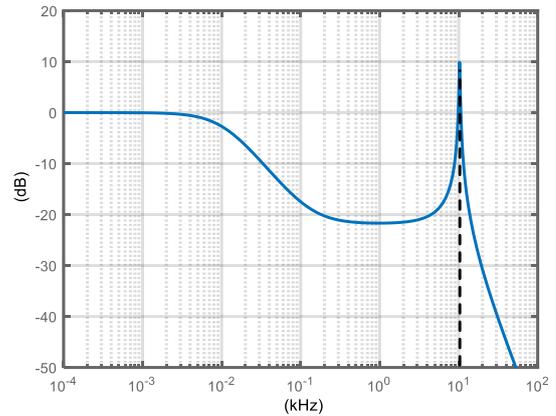


그림5 DM 인덕터 전류 주파수 응답
Fig.5 DM inductor current frequency response

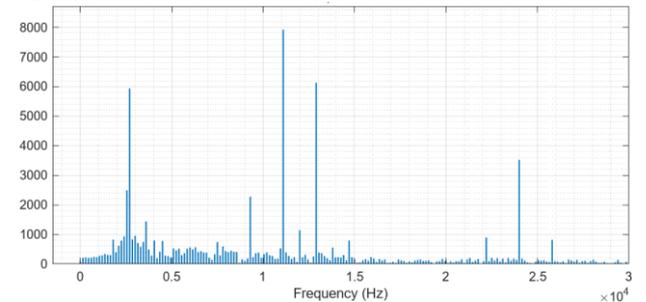


그림6 DM 인덕터 전류 FFT
Fig.6 DM inductor current FFT

그림 5는 식 (1)을 통해 계산한 DM 인덕터에 흐르는 전류의 주파수 응답을 나타낸다. 10.4kHz 대역에서 공진 주파수를 가지고, 이는 그림 1의 DC Link 전류에 나타나는 고조파 대역과 일치한다. 이러한 경우 리플 전류는 공진을 일으키고 소자의 발열 및 진동 떨림과 같은 시스템에 문제를 초래한다.

따라서 필터의 주파수 대역 선정 시, DC Link 전류의 고조파를 고려하여 선정해야 한다. DC Link 전류 고조파는 스위칭 주파수 및 기본파 주파수와

연관된다. 일반적으로 차량의 스위칭 주파수는 9-15kHz를 사용하고 기본파 주파수는 차량의 rpm 속도와 비례한다. 따라서 필터의 공진 주파수 선정 시 차량의 고속 주행 rpm을 고려하여 스위칭 주파수와 약 5kHz 정도의 이격을 두고 필터를 제작하였다.

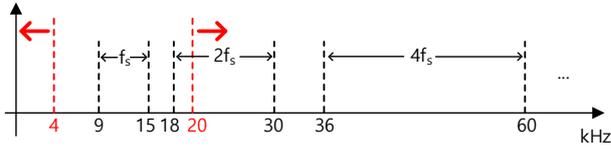


그림7 EMI 필터 공진 주파수 대역 선정

Fig.7 EMI filter resonance frequency band selection

그림 7은 EMI 필터의 주파수 대역 선정을 위한 구간을 보여준다. 20kHz 이상 대역 선정 시, 그림 1에서 나타난 스위칭 주파수의 짝수 고조파 영향을 받게 된다. 이에 스위칭 주파수의 영향이 적은 4kHz 이하 대역을 필터 제작에 선정하였다.

3.2 제안된 EMI 필터

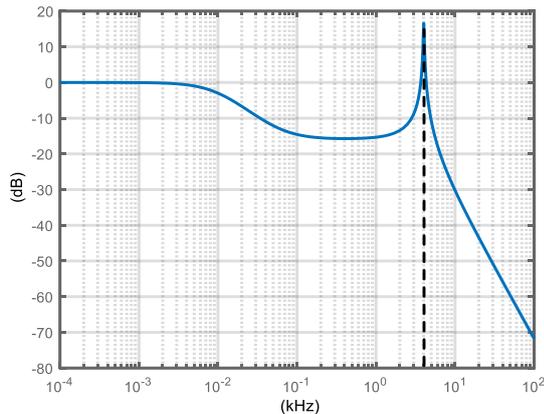


그림8 제안된 필터의 DM 인덕터 전류 주파수 응답

Fig.8 DM inductor current frequency response of the proposed filter

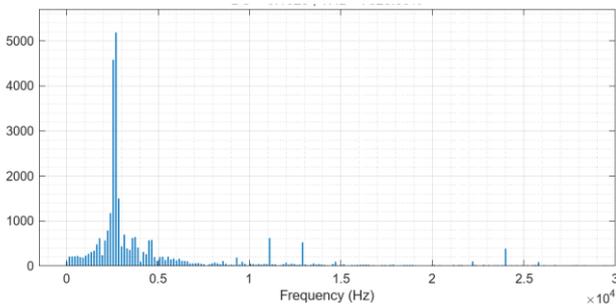


그림9 제안된 필터의 DM 인덕터 전류 FFT

Fig.9 DM inductor current FFT of the proposed filter

그림 8은 제안된 필터의 DM 인덕터 전류 주파수 응답을 나타낸다. 기존 필터는 10.4kHz의 공진 주파수를 가진 반면, 제안된 필터는 4kHz의 공진 주파수를 가진다. 그림 6은 기존 DM 인덕터 전류의 고조파 성분을 분석한 것으로 필터의 공진주파수 영향으로 Traction 모터에서 발생한 11.1kHz, 12.9kHz의 고조파 성분이 우세하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 9와 같이 제안된

필터에서는 동일한 주파수 대역인 11.1kHz, 12.9kHz의 크기가 90% 이상 저감된 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 인버터의 스위칭 동작으로 인해 DC Link 전류에 발생하는 고조파 스펙트럼을 분석하였고 필터에 끼치는 영향과 EMI 필터의 공진 주파수 대역 선정을 제안 및 검증하였다. 제안된 주파수 대역을 갖는 필터에서는 기존 필터 대비 DM 인덕터에 인가되는 전류의 고조파가 90% 이상 저감되는 것을 확인하였다. 향후 필터의 크기를 고려하여 최적 공진 주파수 대역을 분석하고, 능동 EMI 필터를 적용하여 필터의 크기를 최적화할 예정이다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기술평가원의 지원 (RS-2023-00252883, 하이브리드 추진선박 10MW급 직류배전 기술 개발)과 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20210501010020)

참고 문헌

- [1] R. Chen et al., "Analytical Analysis of Ac and Dc Side Harmonics of Three-level Active Neutral Point Clamped Inverter with Space Vector Modulation," 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 112-119, doi: 10.1109/APEC.2019.8721981. keywords: {Harmonic analysis;Power harmonic filters;Inverters;Support vector machines;Pulse width modulation;Switches;Three-level NPC converter;SVM;harmonics;interleaving angle;EMI filter},
- [2] U. Ayhan, "Investigation of DC bus current harmonics in two and three level three-phase inverters," M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2012.
- [3] 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, doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796885. keywords: {Electromagnetic interference;Magnetic separation;Inductors;Magnetic cores;Passive filters;Magnetic circuits;Magnetic flux;Magnetic integration;Conducted EMI;VSI;EMI filter;Single-stage;Multi-stage},