

전기자동차 LDC 시스템의 전도 방출에 관한 고주파 모델링 연구

High-Frequency Circuit Modeling of the Conducted-Emission from the LDC System of a Electric Vehicle

정 기 범 · 조 병 찬 · 정 연 춘*

Kibum Jung · Byeong-Chan Jo · Yeon-Choon Chung*

요 약

본 논문에서는 고주파 회로 모델링을 이용하여 전기자동차의 LDC로부터 방출되는 전도성 전자파 잡음을 시스템-레벨에서 분석하였다. 관련 전도 방출의 주요 원인은 LDC에서 사용하는 펄스폭 변조 방식의 100 kHz 스위칭 동작에 기인하며, 이러한 전도 방출은 공통-임피던스 결합 및 유도성 결합을 통해 AM/FM 주파수 대역에서의 무선주파수 간섭을 유발한다. 이러한 문제를 분석하기 위해 LDC를 구성하고 있는 MOSFET과 고압 커패시터, 고전압 케이블과 버스 바에 대한 기본 회로는 물론, 각 부분에서 존재하는 기생 성분 및 비선형 특성을 해석하여 LDC 전체를 포함한 시스템-레벨의 고주파 등가회로 모델을 제안하였다. 이러한 모델을 이용하여 시뮬레이션과 측정을 비교하여 유사성을 검증하였다. 향후 이러한 접근 방법이 전기자동차의 전자파 적합성 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

In this paper, conducted emission from the LDC(Low-Side DC/DC Converter) of a HEV/EV was analyzed using high-frequency circuit modeling in system-level approach. The conducted emission by PWM process(100 kHz; Switching Frequency) can cause RFI(Radio-Frequency Interference) problems in the AM/FM frequency range. In order to mitigate this conducted emission, a high-frequency equivalent circuit model is proposed by analyzing the fundamental circuits, parasitic components in their parts and connections and non-linear characteristics of MOSFETs, high-power capacitors, inverters, motors, high-power cables, and bus bars which are composed of the LDC. Using these circuit models, results of both simulation and measurement were compared and similarities between them were verified. We are looking forward that this approach can be effectively used in the EMC design of HEV/EV.

Key words : EMC(Electromagnetic Compatibility), HEV/EV(Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle), LDC (Low-voltage DC/DC Converter), RFI(Radio-Frequency Interference), CISPR25, PWM(Pulse Width Modulation), FET

I. 서 론

전기자동차(EV: Electric Vehicle) 및 하이브리드
자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle)의 동력원은 크

(주)이앤알텍(E&R Tech, Co., Ltd.)

*서경대학교 전자공학과 (Department of Electronics, Seokyeong University)

· Manuscript received June 18, 2013 ; Revised July 23, 2013 ; Accepted August 9, 2013. (ID No. 20130618-12S)

· Corresponding Author : Yeon-Choon Chung (e-mail : ycchung@skuniv.ac.kr)

게 모터, 내연기관 엔진, 주 배터리 및 보조 배터리로 구성이 된다. HEV/EV의 보조 배터리(12 V)는 헤드라이트나 계기판의 조명등과 같이 저전압 부하에 전원을 공급하는 역할을 수행한다. 통상 일반적으로 수 A~수백 A 이상으로 전류가 흐르게 된다. 이러한 보조 배터리를 충전시키기 위해 HEV/EV 시스템에서는 LDC(Low-Side DC/DC Converter)를 이용하게 된다. 고전압의 주 배터리로부터 전원을 공급받아 DC/DC 컨버터를 사용하여 저전압의 보조 배터리를 충전하는 방식이 사용이 된다. 공진형 DC/DC 컨버터는 영전압 및 영전류 스위칭을 하여 스위칭 손실을 줄일 수 있으나, 높은 전압과 전류로 인하여 소자의 정격이 높아 사이즈가 커지며, 큰 실효 전류로 인하여 도통 손실도 크게 발행하여 잡음 측면에서 불리한 방식이다. 그러나, 소프트스위칭 컨버터 중 위상천이 영전압 스위칭 방식은 고주파 변압기 누설 인덕턴스와 스위치 출력 커패시터의 공진에 의해서 영전압 스위칭을 할 수 있으므로 외부에 추가 회로를 구성하지 않고, 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 공진형보다 소자의 정격이 낮기 때문에 사이즈적인 장점이 있고, 경량화가 가능하다^[1]. 하지만 공진형이기 때문에 전도 방출이나 복사 방출에 문제가 생기면 EMC 문제를 야기시킬 수 있다. 하지만 회로적인 관점에서는 HEV/EV 보조배터리 충전용 DC/DC 컨버터에는 Full-Bridge 영전압 스위칭 PWM(Pulse Width Modulation) DC/DC 컨버터가 적절하다. 그림 1은 Full-Bridge 위상천이 PWM 컨버터를 이용한 LDC 기본 회로이다^{[2],[3]}. 이 기본 회로를 기준으로 본 논문에서는 전도 방출 잡음을 고려한 고주파 회로 모델링에 관한 연구 결과를 도출할 것이다.

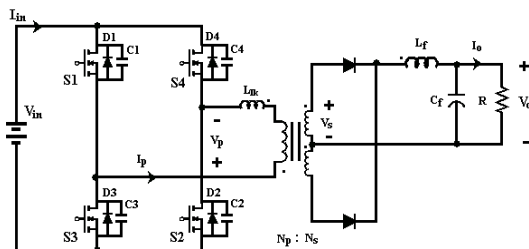


그림 1. LDC 기본 회로 구성
Fig. 1. Basic circuit configuration of the LDC.

저전압 보조 배터리의 (-)는 전장품들과 공통 본딩을 이루고 있으며, 차량 내부는 근방계 조건에 해당한다. 따라서 이러한 공통 본딩 경로에 의해 전장품에서 발생한 전자파 잡음이 다른 전장품들에게도 전도성 간섭을 초래하고^[4], 근방계 결합으로 인해 방송 및 통신장비의 무선주파수 간섭(RFI: Radio Frequency Interference)을 유발할 수 있다. 특히, 이러한 문제는 기존의 내연기관 자동차와 달리, 전기자동차에서는 고전압/고전류의 펄스폭 변조 방식의 DC/DC 컨버터를 사용하므로 스위칭에 의한 고주파 대역의 전도 방출과 RFI가 매우 심각한 문제로 대두되었다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 문제를 유발하는 전자파 잡음 원과 전달경로를 분석하고, 나아가서 자동차 내에서의 전자파 잡음의 결합 메커니즘을 이해해야 한다. 따라서 이러한 접근을 위해서는 개별 전장품 하나에 대한 분석뿐만 아니라, 다수개의 주요 전장품의 배치 접속 등을 고려한 시스템-레벨 접근이 반드시 필요하다^{[5],[6]}.

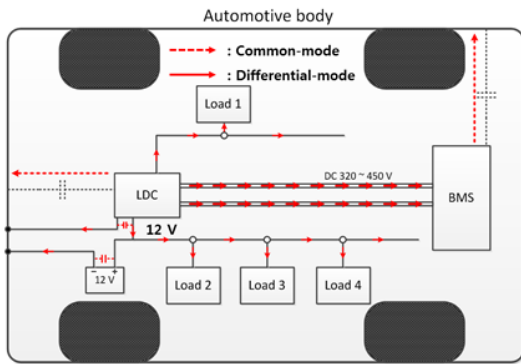
본 논문에서는 LDC 컨버터 스위칭 주파수에 대한 영향을 분석하고, 전기자동차의 각 시스템을 구성하는 전기회로부를 실제 동작 환경과 유사하게 모델링하였다. 참고문헌 [6]과 동일한 접근을 통해 LDC 시스템에 대한 전자파 적합성에 영향을 미칠 수 있는 요소와 제어 가능한 요소를 체계적으로 파악하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

II. LDC 시스템의 전도성 EMI 분석

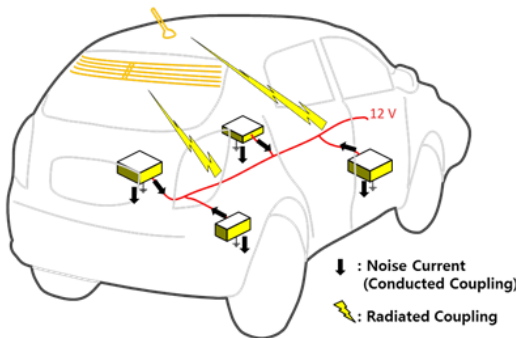
2-1 고주파 노이즈 결합 경로 분석

전기자동차에서의 RFI 현상과 전도 방출의 결합 경로를 그림 2에 보였다. 참고문헌 [6]과 동일하게 그림 2(a)에서 볼 수 있는 것처럼 각종 전장품으로부터 발생한 전자파 노이즈가 다양한 경로의 전도성 및 복사성 결합을 통해 각종 안테나 및 12 V 전장품의 접지 경로로 전도하여 RFI 문제를 유발시킬 수 있다.

그림 1에서 중요한 부분 중에 하나는 부하가 없을 때와 부하가 최대로 걸릴 때 LDC 출력의 변화에 따른 노이즈 분포이다. LDC는 친환경 자동차에서 모든 부하의 소스 원이 된다. 차량 내의 12 V 시스템의



(a) LDC 결합 경로
(a) Coupling path for LDC



(b) 무선 주파수 간섭
(b) RFI

그림 2. LDC의 HEV/EV에서의 전자파 노이즈 결합 경로

Fig. 2. Principal noise coupling paths in a HEV/EV for LDC.

전장부품들의 전원 공급 장치이다. 따라서, 부하가 없을 때 Duty 0%가 됨으로써 노이즈적으로 가장 악조건이 형성된다. 최대 부하가 걸리면 Duty 100%를 유지하므로 over-shoot가 적게 형성이 되기 때문에 EMC적으로 안정적이라고 할 수 있다. 따라서 부하 조건에 따른 EMI 노이즈 크기가 달라지게 된다는 점이다. 이 경로는 배터리 팩과 연결이 되어 있으므로 LDC에서 발생한 고주파 노이즈가 복사성 및 전도성 결합을 통해 AM/FM 수신 안테나에 유도될 수 있다.

또한 LDC는 고전압 DC단으로 연결이 됨으로써 100 kHz 하모닉 성분들이 BMS 제어부에 유도된다. 따라서, BMS 제어부의 노이즈 유입으로 인한 배터리 상태를 모니터링 하는 센서들이 오동작을 일으키

는 경우가 있기 때문에, BMS 측면에서는 내성을 향상시키는 것이 전체 시스템 차원에서 바람직한 방법이라 할 수 있다.

그림 2로부터 전기자동차에서 AM/FM 주파수 대역에서의 RFI는 LDC의 100 kHz 스위칭 동작으로부터 발생하는 하모닉 고주파 노이즈가 공통 임피던스 결합을 통해 전도되고, 이러한 전도 전류가 근역장 결합, 특히 유도성 결합을 통해서 안테나 케이블로 유기됨을 알 수 있다. 따라서 AM/FM 주파수 대역에서의 전자파 노이즈를 저감시키기 위해서는 반드시 LDC로부터 방출되는 전도 잡음에 대한 경로 대책이 이루어져야 함을 알 수 있다.

2-2 LDC 시스템의 특성 분석

LDC 기본 회로를 바탕으로 각 FET 소자의 스위치가 지연 시간을 두고 스위치가 on/off 되면서 원하는 출력 전압을 만들 수 있다. 그러나 이러한 과정에서 위상 천이가 발생하면서 충전과 방전을 반복하게 되는데, 이런 과정에서 고주파 변압기 누설 인덕턴스와 출력 커패시터의 공진에 의하여 노이즈가 발생하게 된다. 그림 3은 이러한 출력 전압을 얻기 위한 회로 동작의 예를 설명한 것이다.

그림 3의 동작 원리는 그림 1의 풀브리지 위상천이 PWM 컨버터에서 모든 1차측 스위치는 스위치의 출력 커패시터가 공진에 의해서 방전한 후, 내부 다이오드가 도통되기 시작하여 드레인-소스 전압이 영이 되고 나서 게이트 신호가 인가되는 방식으로 영전압 스위칭이 이루어진다. 그림 3에 위상 천이에 의한 영전압 스위칭이 각 부 파형을 나타낸다. 그림 1

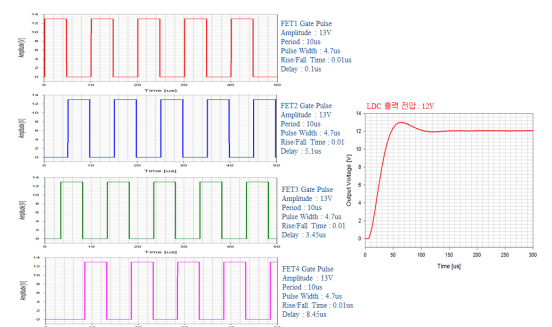


그림 3. LDC 기본 동작 원리
Fig. 3. Basic circuit configuration of the LDC.

에서 임의의 시간 t_1 이전에는 스위치 S_4 와 내부 다이오드 D_1 이 도통하여 순환하다가 t_1 이 되는 순간 스위치 S_4 가 턴오프하게 되면 전류는 스위치 S_4 의 출력 커패시터를 입력 전압까지 충전시키고, 동시에 스위치 S_2 의 출력 커패시터는 영 전압까지 방전시킨다. 스위치 S_2 의 출력 커패시터가 영 전압까지 방전되고 나서, 내부 다이오드 D_2 가 도통된 후 스위치 S_2 가 턴온하는 방식으로 영 전압 스위칭이 이루어지며, 임의의 시간 $t_3 \sim t_4$ 동안은 스위치 S_1 과 S_2 가 도통하여 에너지가 2차측으로 전달된다. 그림 3에서 2차측의 출력 파형이 12 V로 형성됨을 회로 시뮬레이션을 통해 증명하였다. LDC는 다음과 같이 총 6가지 부분으로 구별할 수 있다.

1. 배터리 팩(리튬-이온 모듈 + BMS)
2. 고전압 DC 입력 케이블
3. 커패시터 모듈(X-Cap + CM 필터)
4. DC Bus-Bar
5. FET 모듈 + 방열 구조
6. DC 12V 출력 케이블

본 논문에서는 배터리 팩의 DC 고전압에 관하여 이상적인 DC 전압으로 가정하였다. 관련하여 자세한 회로도나 출력단에서의 전류 파형은 참고문헌 [7]을 참조하기 바란다. 또한, 고전압 DC 입력 전압은 270~420 V 범위가 일반적인 전압이다. DC 전압 리플 저감용 X-Cap의 경우는 380~500 μF 범위이며, CM 필터로 구성하였다. 그리고 전기자동차용 저전압 충전용 LDC는 통상적으로 100 kHz의 PWM 파형을 사용한다. 본 논문에서는 회로 모델링을 위한 PWM 파형의 주파수를 100 kHz로 수행하였다.

III. LDC 시스템의 고주파 등가 회로 모델

본 논문에서는 고주파 노이즈의 근원이 되는 공통 모드 전압을 시스템 레벨로 해석할 수 있는 시뮬레이션 기법을 제시한다. 시뮬레이션으로 사용한 프로그램은 ANSYS사의 Simplorer와 Q3D를 이용하였다. Simplorer의 경우, 전체적인 PWM 모터 구동 회로 구성 및 제어를 위해 사용되었으며, Q3D의 경우 케이블 및 각종 고전압 부품의 기생 성분 해석을 위해 사용되었다.

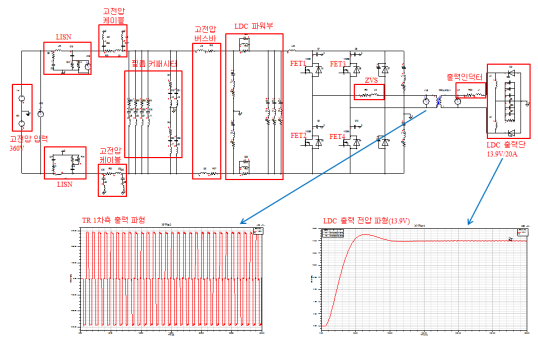


그림 4. LDC 고주파 회로 모델링
Fig. 4. High-frequency circuit modeling of the LDC.

3-1 중요 기생 성분을 고려한 회로 모델링

그림 4는 고주파 모델링된 회로를 이용하여 동작 상태를 확인한 결과이다. 그림 4의 동작 원리는 그림 1과 그림 3에 설명을 하였다.

1차측 출력 파형을 살펴보면 PWM 파형을 확인할 수 있다. 이것이 트랜스의 누설 인덕턴스와 출력 커패시터 사이의 공진을 이용하기 하기 때문에, 잡음으로 인하여 문제가 될 수 있으며 출력 트랜스의 패키지 형태에 따라 잡음 분포가 달라질 수 있다. LDC 시스템을 구성하는 모든 고전압 부품은 기생 저항 및 기생 인덕턴스, 기생 커패시턴스가 존재하며, 이는 중요한 노이즈 경로 및 주파수에 따른 임피던스 변동을 통해 전자기 노이즈 원인을 발생시키므로, 보다 세분화하여 각 기생 성분의 고주파 특성을 분석하였다. 기생 성분을 측정하기 위하여 그림 5와 같이 측정과 시뮬레이션을 이용하여 산출하였다.

고전압 커패시터의 기생 성분 값은 표 1에 나타났었다. 고전압 필름 커패시터와 버스바 구조를 포함하여 표 1의 변수들을 측정과 시뮬레이션을 통해 추출하였다.

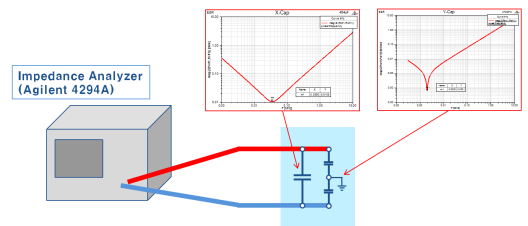


그림 5. 기생 성분을 산출하기 위한 측정 방법
Fig. 5. Measurement methods for calculating parasitic.

표 1. 고전압 버스바와 커패시터 기생 성분 값

Table 1. Parasitic value of HV capacitor.

변수 (버스바)	값	(C ₁ Cap: 4.7 nF) (C ₂ Cap : 1.5 μF)	값
<i>L_{dc_busbar}</i>	39.39 nH	<i>L₁</i>	4.11 nH
		<i>L₂</i>	10.66 nH
<i>R_{dc_busbar}</i>	39.6 mΩ	<i>C₁</i>	4.81 nF
		<i>C₂</i>	1.51 μF
		<i>R₁</i>	49.69 mΩ
		<i>R₂</i>	19.37 mΩ

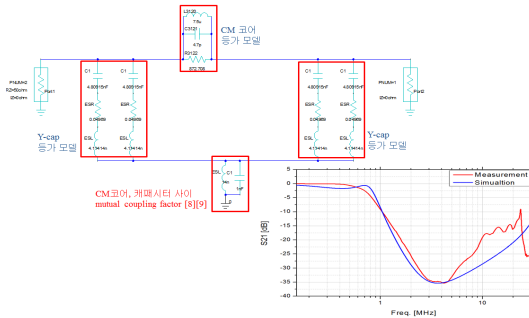


그림 6. CM 필터 고주파 회로 모델링
Fig. 6. High-frequency circuit modeling of CM filter.

CM 코어의 모델링을 하기 위해서는 많은 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 참고문헌 [8], [9]와 같이 CM 필터의 구조에 대한 기생 성분을 실험과 시뮬레이션을 이용하여 도출하였다. 그림 6은 이러한 내용을 보여주고 있다.

그림 6은 CM 필터를 시뮬레이션과 측정 결과의 S₂₁(삽입 손실)을 측정한 결과로 유의성이 있음을 확인하였다. ZVS(Zero-Voltage Switching)와 출력 인덕터의 기생 성분은 표 2와 같이 도출하였다.

실제 ZVS에서 많은 잡음 성분들이 검출이 되며, 회로적인 면보다 기구적인 패키징에서 잡음 제어가 이루어져야 하는 어려움이 있다. 부품과 거리 그리고 주변 소자들에 의한 공통 모드 잡음 성분들

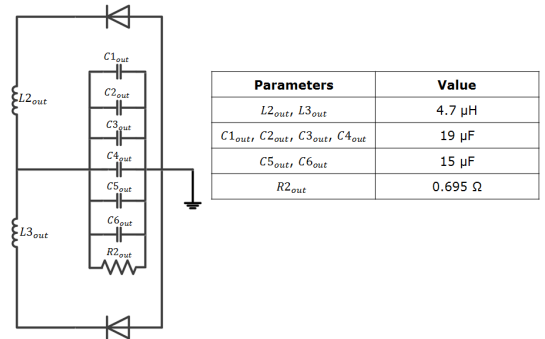
표 2. ZVS 및 출력 인덕터 기생 성분 값

Table 2. Parasitic value of ZVS and inductor.

변수 (ZVS 초크)	값	변수 (출력 인덕터)	값
<i>L_{ZVS}</i>	3.6 μH	<i>L_{out}</i>	1.8 nH
<i>R_{ZVS}</i>	3.937 mΩ	<i>R_{out}</i>	0.26 mΩ

표 3. 출력단 커패시터의 기생 성분 값

Table 3. Parasitic element value of the output capacitor.



이 존재하게 된다. 왜냐하면 공진형 회로를 사용하기 때문이다. 표 3은 출력단 커패시터의 기생 성분 값이다. 출력단 커패시터는 트랜스와 함께 공진형 DC/DC 컨버터의 중요한 성능 부분을 다루지만, 잡음 측면에서도 매우 어려운 부분 중에 하나다.

3-2 LDC 시스템-레벨 고주파 회로 모델링

앞에서 기술한 것처럼 LDC를 구성하는 기본 회로에 다양한 기생 성분을 모의하고, 기타 언급되지 않은 PCB 및 고전압 버스바 등은 Q3D를 이용하여 고주파 등가회로를 구성하였다. 또한, 공통 모드 전도전압을 측정하기 위한 LISN(Line Impedance Stability Network)을 CISPR 25 규정에 따라 고주파 등가 회로를 구성하여 추가하였다. 이러한 과정을 통해 구성된 각 부분의 고주파 등가회로 모델을 모두 결합하여 LDC에 대한 시스템-레벨 고주파 회로 모델을 구성하였다. 그림 7이 최종적인 LDC 전체 시스템에 관한 고주파 회로 모델이다. 그림 7에서 시간영역의 파형을 회로 시뮬레이션을 통해 구하고, 이를 주파수 영역으로 FFT 하였다. 기본적으로 측정 결과와 유의한 결과를 도출하였으면 회로 설계 단계에서 이러한 시뮬레이션 결과를 이용하여 100 kHz 잡음 성분을 예측할 수 있을 것이라 판단이 된다.

LDC에서 EMI 잡음에 영향을 미치는 파라미터는 입력 커패시턴스와 고전압 DC 케이블, 출력 케이블, FET와 같은 전력용 반도체 소자의 냉각을 위한 방열판으로 구분할 수 있다. 각 파라미터들은 필연적으로 기생 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 포함하

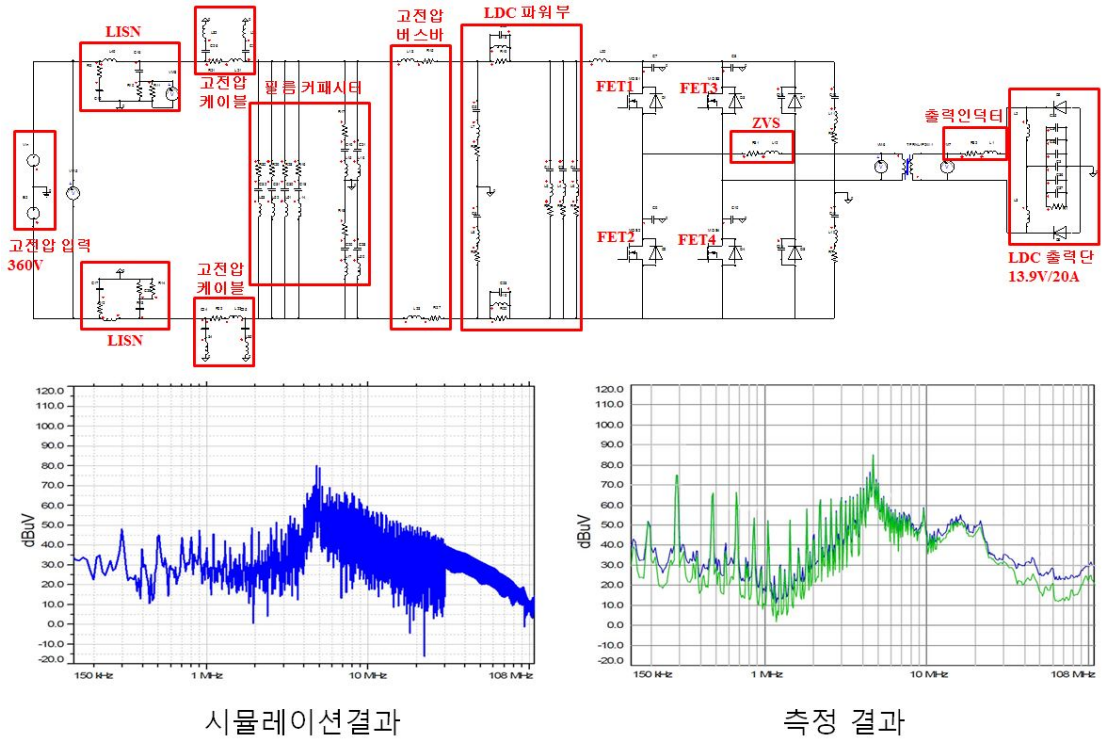


그림 7. LDC 전체 시스템의 고주파 회로 모델링
Fig. 7. High-frequency circuit model of a full LDC.

고 있기 때문에 의도되지 않은 공진 주파수를 발생시키며, 이로 인해 고주파 잡음이 발생하게 된다.

특히, 트랜스의 공진 현상이 많은 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 해외 제조사에서는 출력 트랜스에 대한 재질과 특성 그리고 패키징(차폐 구조)에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

IV. 결 론

전기자동차에서 AM/FM 주파수 대역의 RFI 문제는 매우 심각하며, 이러한 문제의 주요 원인은 PWM 방식으로 동작하는 모터 구동 시스템(MDS)과 LDC로 크게 구분할 수 있다. 본 논문에서는 LDC의 전도 방출을 효과적으로 해석하는 데 사용될 수 있는 시스템 레벨의 고주파 회로 모델을 구하기 위해, FET와 고압 커패시터, 고전압 케이블과 버스 바에 대한 기본 회로는 물론, 각 부분에서 존재하는 기생 성분 및 비선형 특성을 해석하였다. 이러한 모델을 이용하여 LDC의 150 kHz~108 MHz 주파수 대역의 전도

방출 특성을 시뮬레이션하고, CISPR 25 규격에 따라 측정하였다. 기존에는 시스템을 구성하는 각각의 전장품에 대한 단편적인 회로 모델링만 고려했지만, 이러한 시스템-레벨 해석 방법을 사용하면 LDC의 동작에 의한 전도성 전자파 잡음의 결합 메커니즘에 대해 체계적으로 이해하고, 나아가서 설계 초기단계에서부터 EMC에 민감한 설계 파라미터들을 점검 및 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] 조진상, 최세환, 송홍석, 정진환, 김호기, "하이브리드 전기자동차(HEV)의 12 V 보조배터리 충전용 DC/DC 컨버터의 최적 설계", 전력전자학술대회 논문집, pp. 325-329, 2004년 7월.
- [2] I. A. Khan, "DC-to-DC converters for electric and hybrid vehicles", *Power Electronics in Transportation*, 20-22 pp. 113-122, Oct. 1994.
- [3] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee,

and B. H. Cho, "Design consideration for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter", *Proceedings of the APEC Conf.*, pp. 275-284, Mar. 1990.

- [4] T. Van. Doren, *Grounding and Shielding of Electromagnetic System*, UMR, pp. 3-5-12, 1999.
- [5] 정기범, "시스템 레벨의 전자파 안전성에 관한 고찰 및 동향", 한국전자과학회 전자파기술지, 20(5), pp. 61-71, 2009년 9월.
- [6] 정기범, 이종경, 정연춘, 최재훈, "전기자동차 모터 구동 시스템의 전도 방출에 관한 고주파 모델

링 연구", 한국전자과학회논문지, 24(1), pp. 82-90, 2013년 1월.

- [7] LL. P. Bauer, E. Kelder, "A practical circuit-based model for Li-ion battery cells in electric vehicle applications", *IEEE INTELEC 33rd International*, 2011.
- [8] H. Chen, Z. Qian, Z. Zeng, and C. Wolf, "Modeling of parasitic inductive coupling in a Pi-shaped common mode EMI filter", *IEEE Trans. Electromagnetic Compat.*, vol. 50, no. 1, pp. 71-79, Feb. 2008.

정 기 범



1999년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 2013년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학박사)
 2004년~2008년: 한국전자진흥협회

전자파기술원((구)EMC기술지원센터) EMC팀장
 2008년~현재: (주)이엔알텍 대표이사
 [주 관심분야] EMC 회로 설계 및 대책기술, 전자파 수치 해석, System-Level EMC, EFS(전자파안전성)

정 연 춘



1984년 2월: 경북대학교 물리학과 (이학사)
 1986년 2월: 경북대학교 물리학과 (이학석사)
 1999년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1985년 12월~2001년 5월: 한국표준

과학연구원 전자기환경그룹 그룹장 (책임연구원)
 2000년 3월~2001년 2월: Univ. of York, Visiting Academics
 2001년 6월~2002년 2월: (주)익스펜전자 중앙연구소장
 2002년 2월~현재: 서경대학교 전자공학과 교수
 2005년 6월~2008년 11월: 한국전자진흥협회 EMC기술지원센터장(겸임)
 [주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 대책 기술, 전자파 재료

조 병 찬



2008년 2월: 서경대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2010년 2월: 한양대학교 전자통신 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2010년~현재: (주)이엔알텍 EMC 선임연구원

[주 관심분야] EMC 측정 및 대책, 전자파 회로 시뮬레이션