전기자동차 모터 구동 시스템의 전도 방출에 관한 고주파 모델링 연구

Study on the High-Frequency Circuit Modeling of the Conducted-Emission from the Motor Drive System of an Electric Vehicle

정기범 · 이종경 · 정연춘* · 최재훈**

Kibum Jung · Jongkyung Lee · Yeon-Choon Chung* · Jaehoon Choi**

요 약

본 논문에서는 고주파 회로 모델링을 이용하여 전기자동차의 모터 구동 시스템으로부터 방출되는 전도성 전자파 노이즈를 시스템-레벨에서 분석하였다. 관련 전도 방출의 주요 원인은 모터 구동 시스템에서 사용하는 펄스폭 변조방식의 스위칭 동작에 기인하며, 이러한 전도 방출은 공통-임피던스 결합 및 유도성 결합을 통해 AM/FM 주파수 대역에서의 무선주파수 간섭을 유발한다. 이러한 문제를 분석하기 위해 모터 구동 시스템을 구성하고 있는 IGBT와 고압 커패시터, 인버터, 모터 및 고전압 케이블과 버스 바에 대한 기본 회로는 물론, 각 부분에서 존재하는 기생 성분 및 비선형 특성을 해석하여 모터 구동 시스템 전체를 포함한 시스템-레벨의 고주파 등가회로 모델을 제안하였다. 이러한 모델을 이용한 모터 구동시스템의 전도 방출 특성을 시뮬레이션하고, 측정하였으며, 비교적 큰 해석구조임에도 불구하고 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 향후 이러한 접근방법이 전기자동차의 전자파 적합성 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

In this paper, conducted emission from the MDS(Motor Drive System) of a HEV/EV was analyzed using high-frequency circuit modeling in system-level approach. The conducted emission by PWM process 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 IGBTs, high-power capacitors, inverters, motors, high-power cables, and bus bars which are composed of the MDS. It is confirmed that the simulated result by the proposed model is well agreed with measured results in spite of a large-scaled analysis in system level. 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), MDS (Motor Drive System), RFI(Radio-Frequency Interference), CISPR25, PWM(Pulse Width Modulation), IGBT

(주)이엔알텍(E&R Tech, Co., Ltd)

*서경대학교 전자공학과(Department of Electronics, Seokyeong University)

**한양대학교 융합전자공학부(Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received November 26, 2012 ; Revised December 20, 2012 ; Accepted December 21, 2012. (ID No. 20121126-132)

· Corresponding Author : Jaehoon Choi (e-mail : choijh@hanyang.ac.kr)

I. 서 론

전기자동차(EV: Electric Vehicle) 및 하이브리드 자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle)는 기존 내연기관 자동차와 달리 전기 모터로 구동된다. HEV는 구동 시 인버터에 의한 모터 구동 시스템(MDS: Motor Drive System)에 의해 운전되고, 가속 시 기존 내연기관과 MDS가 함께 동작하여 출력을 낸다. 정속도 운전 시는 일반 내연기관으로 운전이 되고, 감속 시 충전 모드로 전환이 된다. EV의 경우는 내연기관을 보조하는 MDS가 아닌 순수하게 MDS로만 동작한다^{[1],[2]}.

일반적으로 자동차의 접지는 전장품들과 공통 접지를 이루고 있으며, 차량 내부는 근 방계 조건에 해당한다. 따라서 이러한 공통 접지 경로에 의해 전장품에서 발생된 전자파 노이즈가 다른 전장품들에게도 전도성 간섭을 초래하고^[3], 근 방계 결합으로 인해 방송 통신 장비에의 무선주파수 간섭(RFI: Radio Frequency Interference)을 유발할 수 있다. 특히, 이러한 문제는 기존의 내연기관 자동차와 달리, 전기자동차에서는 고전압/고전류의 펄스폭 변조(PWM: Pulse Width Modulation) 방식의 인버터를 포함하는 MDS를 사용하므로 스위칭에 의한 고주파 대역의 전도 방출과 RFI가 매우 심각한 문제로 대두되었다. 실제, 전기자동차에서 AM/FM 주파수 대역에서의 오디오 잡음에 대한 소비자의 불만 해결이 중요한 이슈로 자리 잡고 있다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 문제를 유발하는 전자파 노이즈 원과 전달 경로를 분석하고, 나아가서 자동차 내에서의 전자파 노이즈의 결합 메커니즘을 이해해야 한다. 따라서 이러한 접근을 위해서는 개별 전장품 하나에 대한 분석뿐만 아니라, 다수 개의 주요 전장품의 배치 접속 등을 고려한 시스템-레벨 접근이 반드시 필요하다^[4].

본 논문에서는 인버터 스위칭 주파수에 대한 영향을 분석하고, 전기자동차의 각 시스템을 구성하는 전기회로부를 실제 동작 환경과 유사하게 모델링하였다. 특히, 본 논문에서는 단편적인 회로 모델링만 고려한 기존의 다른 연구 논문^{[5]~[9]}과 달리, 각각의 주요 전장품은 물론, 접속 케이블 등에서의 기생 성분을 포함한 시스템-레벨에서의 통합적인 고주파 회

로 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 사용하여 150 kHz~108 MHz 대역의 전도 방출 노이즈 및 RFI 측정 결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 접근을 통해 전자파 적합성에 영향을 미칠 수 있는 요소와 제어 가능한 요소를 체계적으로 파악하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

II. 모터 구동 시스템의 전도성 EMI 분석

2-1 고주파 노이즈 결합 경로 분석

전기자동차에서의 RFI 현상과 전도 방출의 결합 경로를 그림 1에 보였다. 그림 1(a)에서 볼 수 있는 것처럼 각종 전장품으로부터 발생한 전자파 노이즈가 다양한 경로의 전도성 및 방사성 결합을 통해 각종 안테나 및 레이더로 유도되어 RFI 문제를 유발한다.

그림 1(b)는 전기자동차에 존재하는 2가지의 주요 전도 잡음 결합 경로이다. 첫 번째는 MDS와 조향장치가 연결된 전도성 경로 즉, 샤프트 전류에 의한

(a) RFI

(b) 전도 잡음
(b) Conducted EMI

그림 1. HEV/EV에서의 전자파 노이즈 결합 경로
Fig. 1. Principal noise coupling paths in a HEV/EV.

그림 2. 모터 구동 시스템의 구성 요소와 공통 임피던스 결합 경로

Fig. 2. Constituent elements and common-impedance coupling path of the motor drive system.

노이즈 결합이고, 두 번째는 MDS와 BMS(Battery Management System)의 접속 경로이다. 이 경로는 배터리 팩과 연결이 되어 있으므로 MDS에서 발생한 고주파 노이즈가 방사성 및 전도성 결합을 통해 AM/FM 수신 안테나에 유도될 수 있다. 왜냐하면, 차량 구조적으로 배터리 팩의 위치가 차량용 AM/FM 안테나와 가깝기 때문이다.

그림 1로부터 전기자동차에서 AM/FM 주파수 대역에서의 RFI는 MDS의 스위칭 동작으로부터 발생하는 고주파 노이즈가 공통 임피던스 결합을 통해 전도되고, 이러한 전도 전류가 근 역장 결합, 특히 유도성 결합을 통해서 안테나 케이블로 유기됨을 알 수 있다. 따라서 AM/FM 주파수 대역에서의 전자파 노이즈를 저감시키기 위해서는 반드시 MDS로부터 방출되는 전도 잡음에 대한 대책이 이루어져야 함을 예측할 수 있다.

2-2 모터 구동 시스템의 특성 분석

우리는 앞에서 전기자동차에서의 RFI 및 전도 잡음 대책에 있어서 MDS가 핵심이 됨을 살펴보았다. 그림 2는 MDS에 관한 구성 요소와 공통-임피던스 결합 경로를 나타낸 것이다^[5].

MDS는 다음과 같이 총 7가지 부분으로 구별할 수 있다.

1. 배터리 팩(리튬-이온 모듈 + BMS)
2. 고전압 DC 입력 케이블
3. 커패시터 모듈(X-Cap + Y-Cap)
4. DC Bus-Bar

5. IGBT 모듈 + 방열 구조
6. 3상 출력 케이블(U, V, W)
7. 3상 모터

본 논문에서는 배터리 팩의 DC 고전압에 관하여 이상적인 DC 전압으로 모델링하였다. 관련하여 자세한 회로 모델링 기법은 Ref [12]를 참조하기 바란다. 또한, 고전압 DC 입력 전압은 270~420 V 범위가 일반적인 전압이다. 메인 X-Cap의 경우는 380~500 μF 범위이며, Y-Cap의 경우는 22~47 nF이다. IGBT(Insulator-Gate Bipolar Transistor)의 경우, 인피니언사의 하이브리드 팩-2를 사용하였다. HEV/EV에서 최근 3상 모터 용량은 기본적으로 30~100 kW 범위에 것을 사용한다. 이것은 리튬-이온 배터리와 밀접한 관계가 있다. 그리고 전기자동차용 인버터는 통상적으로 5~8 kHz의 PWM 파형을 사용한다. 본 논문에서는 회로 모델링을 위한 PWM 파형의 주파수를 8 kHz로 수행하였다.

MDS 시스템 내부에서 차량 차체로 즉, 접지 시스템과 구성되는 전도성 공통 모드 전류 경로는 그림 2로부터 총 9가지의 경로로 구성됨을 알 수 있다. 가장 위험한 경로군은 I_{CM2} 와 I_{CM3} 즉, 모터를 경유하는 경로가 가장 위험한 전도성 공통 모드 경로이다. 그 다음으로 EMI 노이즈에 민감한 경로는 I_{CM4} 이다.

III. 모터 구동 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.

3-1 MDS의 기본 회로

MDS의 기본 회로는 그림 3과 같다. 일반적으로 MDS의 접지 단자 간에 형성되는 기생 커패시턴스 성분¹⁾에 의해 시간에 따른 전압 변화(dv/dt)가 발생하

그림 3. MDS의 기본 회로 구성

Fig. 3. Basic circuit configuration of the MDS.

면 공통 모드 노이즈 전류가 발생한다. 현재 안정적인 우수한 동작을 구현하기 위해 사용되는 IGBT와 같은 고속 스위칭 소자는 전압과 전류의 급격한 변화로 인해 공통 모드 노이즈가 형성된다.

이러한 공통 모드 노이즈는 그림 1과 2에서 볼 수 있는 것처럼 다양한 경로를 통해 형성된다. 첫 번째로 모터 내부의 3상축과 모터 하우징 사이의 기생 커패시턴스 성분을 통하여 접지로 흐르는 경로가 있으며, 두 번째로 방사성 노이즈 차단 및 안정적인 파형 전달을 위해 사용되는 모터 3상 차폐 케이블 및 고전압 DC 차폐 케이블 내심과 외심 사이에 기생 커패시턴스 성분이 있다. 또한, 세 번째로 주된 노이즈 원인 IGBT가 탑재된 인버터에서 형성되며, 주된 노이즈 경로는 IGBT 모듈과 방열판 간의 기생 커패시터 성분에 있으며, 마지막으로 배터리 및 고전압 커패시터, 버스바 등을 포함한 고전압 부품의 기생 커패시턴스 성분을 통해 공통 모드 노이즈가 형성된다.

3.2 중요 기생 성분의 고주파 모델링

모터 구동 시스템을 구성하는 모든 고전압 부품은 기생 저항 및 기생 인덕턴스, 기생 커패시턴스가 존재하며, 이는 중요한 노이즈 경로 및 주파수에 따른 임피던스 변동을 통해 전자파 노이즈 원을 발생시키므로 보다 세분화하여 각 기생 성분의 고주파 특성을 분석하였다.

고전압 커패시터의 기생 성분 값은 표 1에 나타내었다. 고전압 커패시터는 X-Cap과 Y-Cap의 조합으로 만들어졌으며, 버스바 구조를 포함하여 표 1의 변수들을 측정과 시뮬레이션을 통해 추출하였다. 실

표 1. 고전압 커패시터 기생 성분 값

Table 1. Parasitic value of HV capacitor.

변수 (X-Cap)	값	변수 (Y-Cap)	값
L_X	45.2 nH	$L1_Y, L2_Y$	22 nH
C_X	454.5 uF	$C1_Y, C2_Y$	35 nF
R_X	10.8 mΩ	$R1_Y, R2_Y$	50 mΩ

제 자동차에 양산 적용된 샘플을 이용한 것이다.

게이트 단자의 PWM 신호에 따라 고전압 스위칭이 지속적으로 이루어지는 IGBT의 경우, 많은 열이 발생한다. 이러한 과열로 인한 오동작을 막기 위해 방열판이 필요하며, IGBT와 방열판은 아주 가깝게 위치하게 된다. 따라서 IGBT와 방열판 사이에는 기생 커패시터 성분이 발생하며, 결과적으로 공통 모드 노이즈 경로를 형성한다^[10].

IGBT 모듈과 방열판 간의 등가회로를 구성하는 기생 성분의 경우, L_H 와 R_H 는 방열판이 접지까지 연결되는 거리경로에 따른 기생 인덕턴스와 기생저항이며, L_B 와 L_I 의 경우 IGBT 모듈을 연결하는 각 버스바의 단위면적과 길이에 따른 기생 인덕턴스 성분이다. 마지막으로 $C1_I$ 와 $C2_I$ 는 IGBT 모듈의 다이오드 및 FET 면과 방열판 면 사이에 기생 커패시턴스를 나타낸다. IGBT 및 방열판의 기생 성분 값은 표 2에 나타내었다.

고전압을 이용하여 구동되는 PWM 모터 구동 시스템의 경우, 고전압 DC를 BMS에서 인버터 단까지 공급하기 위해 케이블이 필요하며, 인버터에서 3상 신호를 모터까지 전달하기 위해 3상 케이블이 필요하다. 케이블의 기생 저항 성분을 표피 효과를 고려하여 구하였으며, 근접한 두 개의 케이블의 상호 인덕턴스와 커패시턴스 성분을 계산하였다^[11].

고전압 부품에 사용되는 케이블의 경우, 매우 높

표 2. IGBT 및 방열판 기생 성분 값

Table 2. Parasitic value of IGBT and heat-sink.

변수	값	변수	값
L_H	5 uH	$L1_I, L2_I, L3_I, L4_I$	2 nH
R_H	2 Ω	$C1_I, C2_I$	280 pF
$L1_B, L2_B, L3_B, L4_B$	2.5 nH		

표 3. 고전압 DC 케이블 및 3상 케이블 기생 성분 값
Table 3. Parasitic element value of the high-voltage DC input cable and 3-phase cable.

변수	값	변수	값
L_{1DC}	888 nH	L_{2DC}, L_{3DC}	25 nH
R_{DC}	100 m Ω	C_{1DC}, C_{2DC}	2 nF
$L_{13Phase}$	350 nH	$L_{23Phase}, L_{33Phase}$	35 nH
R_{3Phase}	55 m Ω	$C_{13Phase}, C_{23Phase}$	1 nF

은 전류가 흐르고, 다량의 스위칭 노이즈를 포함하고 있어 방사되는 EMI 노이즈를 막기 위해 주로 차폐 케이블이 사용되고 있다. 모델링 및 측정에 사용된 케이블의 경우 고전압 DC 케이블은 길이가 1 m이며, 3상 출력 케이블은 0.47 m이다. 고전압 DC 케이블과 3상 출력 케이블은 그 길이와 두께에 따라 기생 성분이 다르며, 각 기생 성분 값은 표 3에 나타내었다.

PWM 방식의 MDS는 매우 빠른 정류와 높은 스위칭 주파수를 사용하는 것이 특징이다. 이런 이유로 수 kHz부터 수십 MHz에 이르기까지 고주파 노이즈가 발생하며, 이런 고주파 노이즈 성분을 예측하기 위해서는 정교한 고주파 모터 모델이 필요하다.

모터의 경우, 다량의 동심 권선과 고정자 및 모터 하우징 등으로 구성되어 있으며, 여러 가닥으로 이루어진 동심 권선에 의해 기생 인덕턴스 성분(L_M)과 기생 저항 성분(R_{1M})이 형성된다. 각각의 동선은 여

표 4. 구동 모터 기생 성분 값

Table 4. Parasitic value of drive motor.

변수	값	변수	값
L_M	5 mH	C_{2M}	1.7 nF
C_{1M}	5 pF	R_{2M}	2 Ω
R_{1M}	1 Ω

그림 4. 이상적인 IGBT와 구동 모터 등가 모델

Fig. 4. Equivalent model of ideal IGBT and drive motor.

러 가닥이지만 절연처리가 되어 한 묶음 형태로 모터 내부에 실장되며, 이 때 권선 간에 기생 커패시턴스(C_{1M}) 성분도 같이 형성된다. 모터의 경우 내부에 3상 버스바와 중성단자가 겹쳐진 형태로 구성되어 있다. 이는 모터 하우징과도 절연체로 근접하게 배치되어 있어 그 면적과 간격에 따라 기생 커패시턴스(C_{2M})와 기생 저항 성분(R_{2M})이 형성된다. 모터 기생 성분 값은 표 4에 나타내었다.

이러한 기생 성분을 고려하여 구성된 이상적인 3

그림 5. MDS 전체 시스템의 고주파 회로 모델링

Fig. 5. High-frequency circuit model of a full MDS.

상 인버터 IGBT 회로와 모터의 고주파 회로 모델을 그림 4에 나타내었다^[9]. 특히, 본 논문에서는 모터 내부의 고정자와 회전자 사이의 베어링에 해당하는 부분을 기생 저항 성분(R_{2M})으로 추가하였다.

3-3 MDS의 시스템-레벨 고주파 회로 모델링

앞에서 기술한 것처럼 MDS를 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 등가회로를 구성하여 추가하였다.

이러한 과정을 통해 구성된 각 부분의 고주파 등가회로 모델을 모두 결합하여 MDS에 대한 시스템-레벨 고주파 회로 모델을 구성하였다. 그림 5가 최종적인 MDS 전체 시스템에 관한 고주파 회로 모델이다.

MDS에서 EMI 노이즈에 영향을 미치는 파라미터는 입력 커패시턴스와 고전압 DC 케이블, 3상 출력 케이블, 모터, IGBT와 같은 전력용 반도체 소자의 냉각을 위한 방열판으로 구분할 수 있다. 각 파라미터들은 필연적으로 기생 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 포함하고 있기 때문에, 의도되지 않은 공진 주파수를 발생시키며, 이로 인해 고주파 노이즈가 발생하게 된다.

IV. MDS 등가회로 모델의 검증

4-1 MDS의 전도 방출 측정

MDS의 전도 방출 시험을 위해서 구동 모터, 인버터, LISN, 고전압 케이블 및 6 m×7 m×3.4 m의 반무반사실의 챔버에서 진행을 하였다. 이것은 CISPR25의 규격에 근거하여 측정을 진행한 것이다. 그림 5는 이러한 측정 셋업을 보여주고 있다. 또한, 모터의 부하는 동작을 하지 않고 500 rpm 상태에서 고전압 LISN 출력에서 그림 6의 12번 EMI 수신기(ESCI, R & S)를 연결하여 측정을 수행하였다.

4-2 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

그림 7에 MDS의 전도 방출 측정 결과와 앞의 고

그림 6. MDS 전도 방출 측정 셋업

Fig. 6. Set-up of measurement for conducted emission of the MDS.

그림 7. MDS 전도 방출 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

Fig. 7. Comparison of measurement and simulation results for conducted emission of the MDS.

주파 등가회로 모델의 해석 결과를 비교하였다. 시스템-레벨의 큰 해석 구조임에도 불구하고, 두 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 7에서 150 kHz~1 MHz 대역은 3상 케이블의 기생 커패시턴스에 의한 공진 특성으로 발생이 된다. 따라서 관련 기생 커패시턴스의 설계 파라미터를 제어하면 이 대역의 특성을 개선시킬 수 있을 것으로 판단이 된다. 이것은 매우 중요한 사항으로 자동차 내부의 AM 대역 노이즈 유입 성능에 중요 파라미터라 할 있다. 자동차 패키지 설계 시 관련 케이블의 기생 커패시턴스를 최소화함으로써 노이즈 유입 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 판단이 된다. 그림 7에서 150 kHz~1 MHz 대역의 차이점은 모터

구조체로 인한 방사성 전자파가 주변의 케이블 및 접지 판으로 유기되어 생기는 차이로 분석이 된다. 이러한 노이즈는 실제 전도 노이즈에 측면에서 보면 큰 영향도는 없을 것으로 판단이 되며, 전체 경향성의 일치가 분석에 중요하다고 할 수 있다. 4~8 MHz 대역은 3상 출력 케이블 및 고전압 입력 케이블의 길이 및 기생 인덕턴스 성분에 의존함을 알 수 있다. 이러한 판단은 구성된 등가회로 모델의 해당 부분의 회로정수 값을 조금씩 변화시켰을 때 나타나는 전도 방출의 변화를 살펴보면 판단할 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 설계 초기 단계에 각 설계 파라미터들을 사전에 점검 및 분석할 수 있는 툴이 개발되었다는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있다. 방열판의 기생 커패시턴스는 주파수 1~2 MHz 대역의 영향성이 있는 것으로 분석이 된다. 그러나 그 값의 차이는 미미하다고 할 수 있다. 이것은 중요한 의미를 내포하고 있다. 일반적으로 인버터 스위칭 주파수는 매우 중요한 노이즈 소스이다. 하지만 시스템 측면에서 관찰했을 때 IGBT단의 노이즈 소스는 시스템 차원에서 중요한 노이즈 요인이 되지 않음을 알 수 있다. 추가적으로 30 MHz 이상의 대역에서 시뮬레이션과 측정 결과의 유의성에 관하여 시뮬레이션에 고려가 되지 않은 접지 판이나 접지 스트랩으로 인한 고주파 결합으로 인하여 두 결과가 차이가 난다고 할 수 있다. 이 부분은 향후 연구되어야 할 부분이며, 방사성 결합으로 인한 전도 노이즈의 영향성 분석이 이루어져야 한다. 하지만 시스템 차원의 EMC 대책에서 자동차 내부는 30 MHz 이상의 노이즈가 크게 중요한 성분이 되지 않는다. 저주파 대역의 노이즈가 매우 큰 성분이라, 차량에서는 저주파 대역이 더 많은 문제점을 가지고 있다. 이 대역은 또한 대책 관련 소자 및 부품을 적용하기 매우 어렵기 때문에 더욱더 어려움이 크다.

V. 결 론

전기자동차에서 AM/FM 주파수 대역의 RFI 문제는 매우 심각하며, 이러한 문제의 주요 원인은 PWM 방식으로 동작하는 모터 구동 시스템(MDS)의 전도 방출인 것으로 파악된다. 본 논문에서는 이러한 전도 방출을 효과적으로 해석하는 데 사용될 수 있는

MDS 전체의 고주파 회로 모델을 구하기 위해, MDS를 구성하고 있는 IGBT와 고압 커패시터, 인버터, 모터 및 고전압 케이블과 버스 바에 대한 기본 회로는 물론, 각 부분에서 존재하는 기생 성분 및 비선형 특성을 해석하였다. 이러한 모델을 이용하여 MDS의 150 kHz~108 MHz 주파수 대역의 전도 방출 특성을 시뮬레이션하고, CISPR 25 규격에 따라 측정하였다. 비교적 큰 해석 구조임에도 불구하고, 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

기존에는 시스템을 구성하는 각각의 전장품에 대한 단편적인 회로 모델링만 고려했지만, 이러한 시스템-레벨 해석 방법을 사용하면 MDS의 동작에 의한 전도성 전자파 노이즈의 결합 메커니즘에 대해 체계적으로 이해하고, 나아가서 설계 초기 단계에서부터 EMC에 민감한 설계 파라미터들을 점검 및 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 본 논문에 이어서 LISN의 고주파 모델 정확성 향상과 리튬-이온 고전압 배터리 모델링^[12]을 추가적으로 진행하여 완벽한 MDS 시스템의 통합 회로 모델링을 개발하도록 할 것이다. 또한, 고전압 노이즈를 저감할 수 있는 소형화된 능동 필터 구조에 대한 연구를 추가로 진행할 것이다. 추가적으로 전자파 대책 기술 측면에서 언급을 하면, 모터 구동 시스템의 경우 적은 비용으로 많은 노이즈 성분을 제어할 수 있지만, 모터 부는 상당히 어려운 점이 많음을 지적하고 싶다. 특히, 모터의 Shaft 축 노이즈 관련하여 제어하는 것은 기구적인 문제이기 때문에 매우 어려운 점이 아직 존재하며^[9], 이것을 해결하기 위해서는 소재의 개발과 기구적 관점의 연구가 필요하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 정기범, "친환경 자동차 및 OBC에 관한 EMC 설계 방향 및 규격 동향", 한국전자과학회지 전자파기술, 23(4), pp. 43-51, 2012년 7월.
- [2] 정기범, "최근 자동차 EMC 대책 기술 동향", 한국전자과학회지 전자파기술, 21(4), pp. 65-71, 2010년 7월.
- [3] T. Van. Doren, *Grounding and Shielding of Electromagnetic System*, UMR, pp. 3-5~12, 1999.

- [4] 정기범, "시스템 레벨의 전자파 안전성에 관한 고찰 및 동향", 한국전자파학회지 전자파기술, 20(5), pp. 61-71, 2009년 9월.
- [5] N. Mutoh, M. Kanesaki, "A suitable method for eco-vehicles to control surge voltage occurring at motor terminals connected to PWM inverters and control induced EMI noise", *IEEE Tran. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, Jul. 2008.
- [6] S. Chen, T. W. Nehl, J. Lai, X. Huang, E. Pepa, R. Doncker, and I. Voss, "Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 14-22, 2003.
- [7] Y. Lee, A. Nasiri, "Conductive CM and DM noise analysis of power electronic converters in electric and hybrid electric vehicles", *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 392-398, 2007.
- [8] X. Fang, S. Li, and D. Jiandong, "Prediction model of conducted common-mode EMI in PWM motor drive system", *Pervasive Computing Signal Processing and Applications(PCSPA), 2010 First International Conference*, pp. 1298-1301, 2010.
- [9] A. Consoli, G. Oriti, and A. Testa, "Induction motor modeling for common mode and differential mode emission evaluation", *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1, pp. 595-599, 1996.
- [10] Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, Wiley, pp. 128-129, 2009.
- [11] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley, pp. 299-376, 1992.
- [12] LL. P. Bauer, E. Kelder, "A practical circuit-based model for Li-ion battery cells in electric vehicle applications", *IEEE INTELEC 33rd International*, 2011.

정 기 범

1999년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 2013년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 박사졸업 예정
 2004년~2008년: 한국전파진흥협회

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

이 중 경

2007년 2월: 서경대학교 정보통신공학 (공학사)
 2229년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학 (공학석사)
 2009년 2월~현재: (주)이앤알텍 선임연구원
 [주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 대책기술, SI/PI/EMI Co-Simulation 기법, 수치해석

정 연 춘

1984년 2월: 경북대학교 물리학과 (이
학사)

1986년 2월: 경북대학교 물리학과 (이
학석사)

1999년 8월: 충남대학교 전자공학
과 (공학박사)

1985년 12월~2001년 5월: 한국표준
과학연구원 전자기환경그룹 그룹장(책임연구원)

2000년 3월~2001년 2월: Univ. of York, Visiting Academics

2001년 6월~2002년 2월: (주)익스팬전자 중앙연구소장

2002년 2월~현재: 서경대학교 전자공학과 교수

2005년 6월~2008년 11월: 한국전자진흥협회 EMC기술지
원센터장(겸임)

[주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 대책 기술, 전자파 재료

최 재 훈

1980년: 한양대학교 전자공학과 (공
학사)

1986년: 미국 Ohio State University
전자공학과 (공학석사)

1989년: 미국 Ohio State University
전자공학과 (공학박사)

1989년~1991년: 미국 Arizona State
University 연구교수

1991년~1995년: 한국통신위성사업단 연구팀장

1995년~현재: 한양대학교 융합전자공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로 설계, EMC