

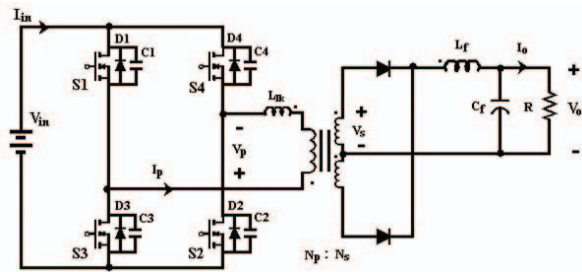
전기자동차 LDC 시스템의 전도 방출에 관한 시험 방법 및 해석 연구

I. 서론

전기자동차(EV: Electric Vehicle) 및 하이브리드 자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle)의 동력원은 크게 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 실효전류로 인하여 도통손실도 크게 발행하여 노이즈적으로 불리한 방식이다. 그러나, 소프트 스위칭 컨버터 중 위상천이 영전압 스위칭 방식은 고주파 변압기 누설인덕턴스와 스위치 출력 커패시터의 공진에 의해서 영전압 스위칭을 할 수 있으므로 외부에 추가 회로를 구성하지 않고 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 공진형 보다 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 1>은 Full-Bridge 위상천이 PWM 컨버터를 이용한 LDC 기본 회로이다^[2-3]. 이 기본 회로를 기준으로 본 기고에서는 전도 방출 노이즈를 고려한 고



정 기 범
(주)이엔알텍 대표이사



〈그림 1〉 LDC 기본 회로 구성

주파 회로 모델링에 관한 연구 결과를 도출할 것이다.

저전압 보조 배터리의 (-)는 전장품들과 공통 본딩을 이루고 있으며, 차량 내부는 근 방계 조건에 해당한다.

따라서 이러한 공통 본딩 경로에 의해 전장품에서 발생된 전자파 노이즈가 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 변조방식의 DC/DC 컨버터를 사용하므로 스위칭에 의한 고주파대역의 전도방출과 RFI가 매우 심각한 문제로 대두되었다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 문제를 유발하는 전자파 노이즈원과 전달경로를 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^[5-6].

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

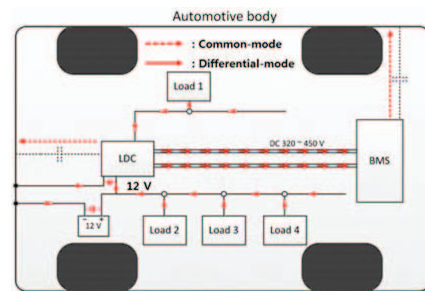
II. LDC 시스템의 전도성 EMI 분석

1. 고주파 노이즈 결합경로 분석

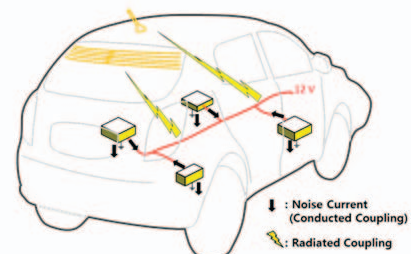
전기자동차에서의 RFI 현상과 전도방출의 결합경로를 〈그림 2〉에 보였다. 참고문헌 [6]과 동일하게 〈그림 2(a)〉에서 볼 수 있는 것처럼 각종 전장품으로부터 발생한 전자파 노이즈가 다양한 경로의 전도성 및 복사성 결합을 통해 각종 안테나 및 12V 전장품의 접지 경로로 전도하여 RFI 문제를 유발시킬 수 있다.

〈그림 1〉에서 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. 차량내의 12 V 시스템의 전장부품들의 전원공급 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

공통 본딩 경로에 의해 전장품에서 발생된 전자파 노이즈가 다른 전장품들에게도 전도성 간섭을 초래하고, 근방계 결합으로 인해 방송 및 통신장비의 무선주파수 간섭을 유발할 수 있다.



(A) Coupling Path for LDC



(B) RFI : Radio Frequency Interference

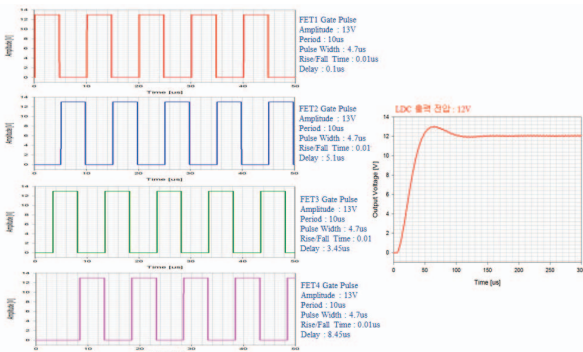
〈그림 2〉 LDC의 HEV/EV에서의 전자파 노이즈 결합경로

조건에 따른 EMI 노이즈 크기가 변화된다는 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 일으키는 경우가 있기 때문에 BMS측면에서는 내성을 향상 시키는 것이 전체 시스템 차원에서 바람직한 방법이라 할 수 있다.

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

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 전이가 발행하면서 충전과 방전을 반복하게 되는데 이런 과정에서 고주파 변압기 누설 인덕턴스와 출력 커패시터의 공진에 의하여 노이즈가 발생하게 된다.



〈그림 3〉 LDC 기본 동작 원리

〈그림 3〉은 이러한 출력 전압을 얻기 위한 회로 동작의 예를 설명한 것이다. 〈그림 3〉의 동작 원리는 〈그림 1〉의 풀 브리지 위상전이 PWM 컨버터에서 모든 1차 측 스위치는 스위치의 출력 커패시터가 공진에 의해서 방전한 후 내부 다이오드가 도통되기 시작하여 드레인-소스 전압이 영이되고 나서 게이트 신호가 인가되는 방식으로 영전압 스위칭이 이루어진다. 그림 3에 위상전이에 의한 영전압 스위칭이 각 부 파형을 나타낸다. 그림 1에서 임의의 시간 t_1 이전에는 스위치 S4와 내부 다이오드 D1이 도통하여 순환하다가 t_1 이 되는 순간 스위치 S4가 턴오프 하게 되면 전류는 스위치 S4의 출력 커패시터를 입력전압까지 충전시키고 동시에 스위치 S2의 출력 커패시터는 영전압까지 방전시킨다. 스위치 S2의 출력 커패시터가 영전압까지 방전되고 나서 내부 다이오드 D2가 도통된 후 스위치 S2가 턴온 하는방식으로 영전압 스위칭이 이루어지며 임의의 시간 $t_3 \sim t_4$ 동안은 스위치 S1과 S2가 도통하여 에너지가 2차측으로 전달된다. 그림 3에서 2차측의 출력 파형이 12V로 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 + CM필터)
- (4) DC Bus-Bar
- (5) FET 모듈 + 방열구조
- (6) DC 12V 출력 케이블

본고에서는 배터리 팩의 DC 고전압에 관하여 이상적인 DC 전압으로 가정하였다. 관련하여 자세한 회로도 와 출력 단에서의 전류파형은 Ref [7]를 참조하기 바란다. 또한 고전압 DC 입력전압은 270 V ~ 420 V 범위가 일반적인 전압이다. DC 전압 리플 저감용 X-Cap의 경우는 380 uF ~ 500 uF 범위이며, CM 필터로 구성하였다. 그리고 전기자동차용 저전압 충전용 LDC는 통상적으로 100 kHz의 PWM 파형을 사용한



다. 본 기고에서는 회로 모델링을 위한 PWM 파형의 주파수를 100 kHz로 수행하였다.

3. LDC 시스템의 고주파 등가 회로 모델

본고에서는 고주파 노이즈의 근원이 되는 공통모드 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 중요 기생성분을 고려한 회로 모델링

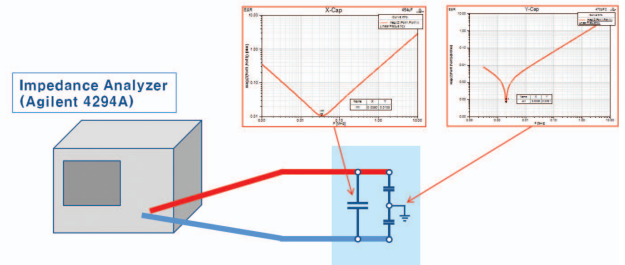
〈그림 4〉는 고주파 모델링된 회로를 이용하여 동작 상태를 확인한 결과 이다. 〈그림 4〉의 동작 원리는 〈그림 1〉과 〈그림 3〉에 설명을 하였다.

1차 측 출력 파형을 살펴보면 PWM 파형을 확인할 수 있다. 이것이 트랜스의 누설 인덕턴스와 출력 커패시터 사이의 공진을 이용하기 하기 때문에 노이즈적으로 문제가 될 수 있으면 출력 트랜스의 패키지 형태에 따라 노이즈 분포가 달라 질 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 전자파 노이즈 원을 발생시키므로 보다 세분화하여 각 기생성

분의 고주파 특성을 분석하였다. 기생 성분을 측정하기 위하여 〈그림 5〉와 같이 측정과 시뮬레이션을 이용하여 산출하였다.

전압 커패시터의 기생성분 값은 〈표 1〉에 나타냈었다. 고전압 필름 커패시터와 버스바 구조를 포함하여 〈표 1〉의 변수들을 측정과 시뮬레이션을 통해 추출하였다.

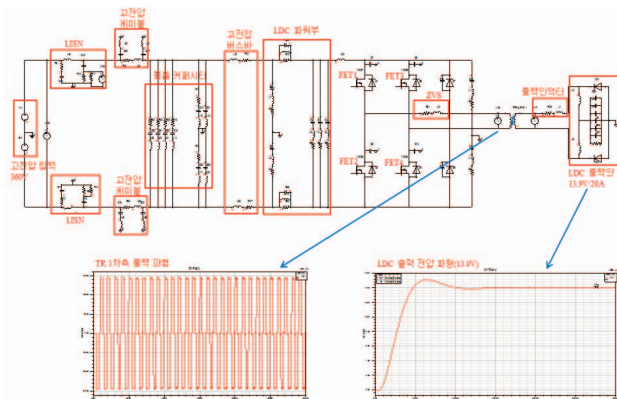
CM 코어의 모델링을 하기 위해서는 많은 어려움이 존재한다. 본 기고에서는 참고문헌 [8][9]와 같이 CM 필터의 구조에 대한 기생성분을 실험과 시뮬레이션을 이용하여 도출 하였다. 〈그림 6〉은 이러한 내용을 보여주고 있다.



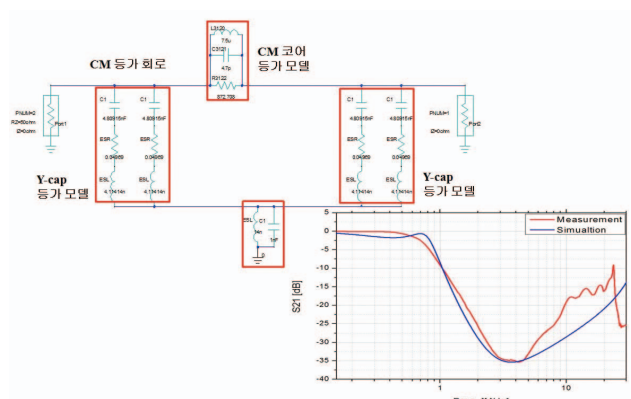
〈그림 5〉 기생성분을 산출하기 위한 측정 방법

〈표 1〉 고전압 버스바와 커패시터 기생 성분 값

변수 (버스바)	값	(C1 Cap: 4.7 nF) (C2 Cap : 1.5 uF)	값
Ldc_busbar	39.39 nH	L1, L2	4.11 nH 10.66 nH,
Rdc_busbar	39.6 mΩ	C1, C2	4.81 nF 1.51 uF
		R1, R2	49.69 mΩ 19.37 mΩ



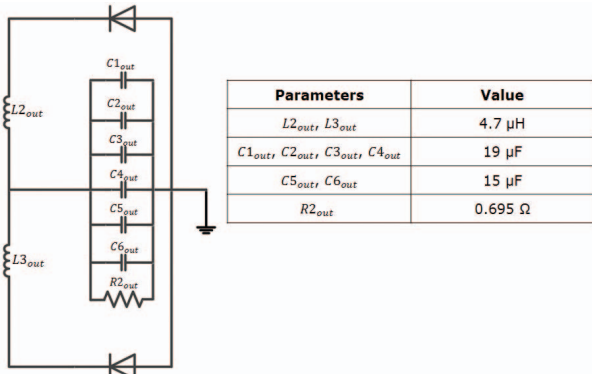
〈그림 4〉 LDC 고주파 회로 모델링



〈그림 6〉 CM 필터 고주파 회로 모델링

〈표 2〉 ZVS 및 출력 인덕터 기생성분 값

변수 (ZVS 초크)	값	변수 (출력인덕터)	값
L_{ZVS}	3.6 μH	L_{out}	1.8 nH
R_{ZVS}	3.937 m Ω	R_{out}	0.26 m Ω



〈그림 7〉 출력 단 커패시터의 기생성분 값

〈그림 6〉은 CM 필터를 시뮬레이션과 측정결과의 S21(삽입손실)을 측정한 결과로 유의성이 있음을 확인하였다. ZVS(Zero-Voltage Switching)와 출력 인덕터의 기생성분은 〈표 2〉와 같이 도출하였다.

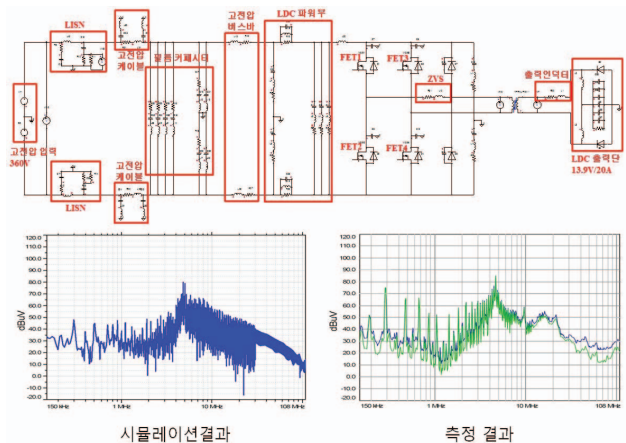
실제 ZVS에서 많은 노이즈 성분들이 검출이 되며 회로적인 면보다 기구적인 패키징에서 노이즈 제어가 이루어져야 하는 어려움이 있다. 부품과 거리 그리고 주변 소자들에 의한 공통모드 노이즈 성분들이 존재하게 된다. 왜냐하면 공진형 회로를 이용하기 때문이다. 〈그림 7〉은 출력 단 커패시터의 기생성분 값이다. 출력 단 커패시터는 트랜스와 함께 공진형 DC/DC 컨버터의 중요한 성능 부분을 다루지만, 노이즈 측면에서도 매우 어려운 부분 중에 하나다.

3.2 LDC 시스템-레벨 고주파 회로 모델링

앞에서 기술한 것처럼 LDC를 구성하는 기본 회로에 다양한 기생성분을 모의하고, 기타 언급되지 않은 PCB 및 고전압 버스바 등은 Q3D를 이용하여 고주파 등가 회로를 구성하였다. 또한 공통모드 전도전압을 측정하

기 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 8〉이 최종적인 LDC 전체 시스템에 관한 고주파 회로 모델이다. 〈그림 8〉에서 시간영역의 파형을 회로 시뮬레이션을 통해 구하고, 이를 주파수 영역으로 FFT 하였다. 기본적으로 측정결과와 유의한 결과를 도출하였으면 회로 설계 단계에서 이러한 시뮬레이션 결과를 이용하여 100 kHz 노이즈 성분을 예측할 수 있을 것이라 판단이 된다.

LDC에서 EMI 노이즈에 영향을 미치는 파라미터는 입력 커패시턴스와 고전압 DC 케이블, 출력 케이블, FET와 같은 전력용 반도체 소자의 냉각을 위한 방열판으로 구분 할 수 있다. 각 파라미터 들은 필연적으로 기생 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 포함하고 있기 때문에 의도되지 않은 공진 주파수를 발생시키며, 이로 인해 고주파 노이즈가 발생하게 된다. 특히, 트랜스의 공진 현상이 많은 문제를 야기 시킬 수 있기 때문에 해외 제조사에서는 출력 트랜스에 대한 재질과 특성 그리고 패키징 (차폐구조)에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.



〈그림 8〉 LDC 전체 시스템의 고주파 회로 모델링

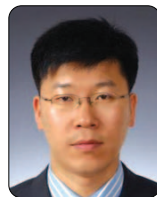
III. 결론

전기자동차에서 AM/FM 주파수대역의 RFI 문제는 매우 심각하며, 이러한 문제의 주요 원인은 PWM 방식으로 동작하는 모터 구동 시스템(MDS)과 LDC로 크게 구분할 수 있다. 본 기고에서는 LDC의 전도방출을 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 기생성분 및 비선형 특성을 해석하였다. 이러한 모델을 이용하여 LDC의 150 kHz ~ 108 MHz 주파수대역의 전도방출 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 노이즈의 결합 메커니즘에 대해 체계적으로 이해하고, 나아가서 설계 초기단계에서부터 EMC에 민감한 설계 파라미터들을 점검 및 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 조진상, 최세환, 송홍석, 정진환, 김호기, “하이브리드 전기자동차(HEV)의 12V 보조배터리 충전용 DC/DC 컨버터의 최적설계”, 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, 1994, Oct.
- [3] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee, B. H. Cho, “Design Consideration for High-Voltage High-Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter”, proceedings of the APEC Conf., 11-16, pp. 275-284, 1990, March.
- [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”, 한국전자파학회, 전자파기술, 제20권 제5호(통권75호), pp.61-71, 2009년 9월.
- [6] 정기범, 이종경, 정연춘, 최재훈, “전기자동차 모터 구동 시스템의 전도 방출에 관한 고주파 모델링 연구”, 한국전자파학회 논문지, 제 24권 제1호, 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, 50, no. 1, pp. 71-79, Feb. 2008.
- [9] S. Wang, F. C. Lee, D. Y. Chen, and W. G. Odendal, “Effects of parasitic parameters on EMI filter performance”, IEEE Trans. Power Electron, Vol. 19, no. 3, pp. 869-877, May. 2004.



정기범

- 1999년 2월 국민대학교 전자공학과 (공학사)
- 2001년 2월 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 한양대학교 전자파공학과 (공학박사)
- 2004년~2008년 한국전자파진흥협회 전자파기술원 ((구)EMC기술지원센터) EMC팀장
- 2008년~현재 (주)이엔알텍 대표이사

〈관심분야〉

EMC 회로 설계 및 대책기술, 전자파 수치해석, System-Level EMC, EFS(전자파안전성)