

전기추진 차량의 고전압 전자파 환경(EME) 분석과 전자파 적합성(EMC) 설계

임종광^{*,1)} · 이현주¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Analysis of High-Voltage EME and Design for EMC in Hybrid Electric Vehicle

Jong-kwang Lim^{*,1)} · Hyunju Lee¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 22 November 2013 / Revised 29 May 2014 / Accepted 5 September 2014)

ABSTRACT

There were overwhelming high-frequency electromagnetic noises in 200kW-class hybrid electric vehicle(HEV) although EMC control strategy had been applied to cope with the electromagnetic noises during the development of HEV. This paper investigates the characteristics of the conducted and radiated emission noises, the source and path of noises, and the effects of EMI on the electronics. Finally the design concept of noise control is proposed.

Key Words : Electromagnetic Environment(EME) (전자파 환경), Electromagnetic Compatibility(EMC) (전자파 적합성), Conducted Emission Noise(전도 노이즈), Electric Propulsion System(전기추진 시스템)

1. 서론

전기추진 차량은 기본적으로 차륜을 전동기로 구동시키는 전기구동 시스템이다. 전기추진 차량은 민수 뿐 만 아니라 군수 분야에서 연구가 진행되어 왔으나, 주로 발전기, 전동기, 전력변환장치들의 구현과 연비에 관한 것들이었다^{1~4)}. 최근 소형화, 고속 신호처리, 고신뢰 전자장치의 탑재에 따라 고전압 전자파 대책에 관한 연구사례가 증가하고 있다. 주된 연구분야는 차

체를 통해 전파되는 전도 노이즈의 저감방안^{5,6)}, 고주파수 EMC 모델링^{7~9)}과 필터링^{10~14)} 연구들이다. 그런데 이와 같은 연구는 100kW급 이하의 전동기 구동시스템에 국한되어 있고, 전기추진 차량의 설계 단계부터 발전기, 전동기, 각종 전력변환장치들과 같은 구성품에 대한 전자파 대책과 차량 조립 전, 조립 후 완성차에 대한 전자파 환경 통제를 반영한 연구사례는 거의 없는 상황이다.

본 논문에서는 전기추진 차량의 설계 단계부터 적용 가능한 전자파 대책 설계 방안을 제시하고자 한다. 논의 대상이 되는 군용 200kW급 전기추진 차량은 도섭에 대한 방수 대책으로 고전압 전력변환장치들은 차

* Corresponding author, E-mail: catch33z@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

량 내부에 탑재되어야 하고, 소요 전력을 고려할 때 크기가 엔진룸이나 트렁크 공간에 탑재되기에는 너무 커서 실내에 장착되어야 하는 상황이므로 고전압 전력 변환장치의 작동에 의한 승차원과 탑재 전자장치에 미치는 전자파 영향을 최소화할 수 있도록 개발되어야 한다.

민군겸용기술 사업을 통해 전기추진 차량은 2대가 개발되었는데 첫 시제 개발 시에는 MIL-STD-464^[15]에 따른 EMC(Electromagnetic Compatibility) 통제가 미흡하여 CAN(Controller Area Network) 통신 오류가 빈번하였다. 2차 시제는 EMC 통제전략^[16]에 따라 개발되어 CAN 통신부 절연과 접지를 개선하여 통신오류는 많이 줄일 수 있었다. 그러나 고전압 배터리에서 BMS(Battery Management System)와 보조 BMS 사이의 CAN 통신 문제가 여전히 발생하였다. 이에 고전압 배터리에 대한 노이즈원과 전파 경로를 분석하고 CAN 전원과 신호에 대한 접지와 절연 등 회로가 보완되었지만 통신오류는 해결되지 않았다. 결국 EMI(Electromagnetic Interference) 필터를 고전압 배터리 출력단에 투입해서 주행시험을 완료할 수 있었다.

본 논문에서는 후속 개발될 전기추진 차량의 고전압 전자파 환경에서 탑재 전자장치에 대한 전자파 영향을 통제하기 위하여 기 개발된 전기추진 차량의 고전압 전자파 노이즈를 측정하고 분석하여, 노이즈원과 노이즈 전파경로를 식별하고, 노이즈 영향과 그 억제 방안을 제시하였다.

2. 전기추진 차량의 전자파 환경

200kW급 전기추진 차량은 Fig. 1(a)와 같은 형상의 5톤급 차량으로 전기추진 시스템은 Fig. 1(b)에서 고전압 배터리, 발전기, 구동 전동기, 다수의 전력변환장치(DC/DC, DC/AC) 등으로 구성된다.

전력변환장치는 발전기와 구동 전동기를 제어하는 인버터와 에어컨용 컨버터, 직류 24V 저전압 배터리를 충전하거나 각종 전자장치, 히터, 12/24V 저전압 전기장치 등에 대한 전력 공급을 담당하는 컨버터가 있다.

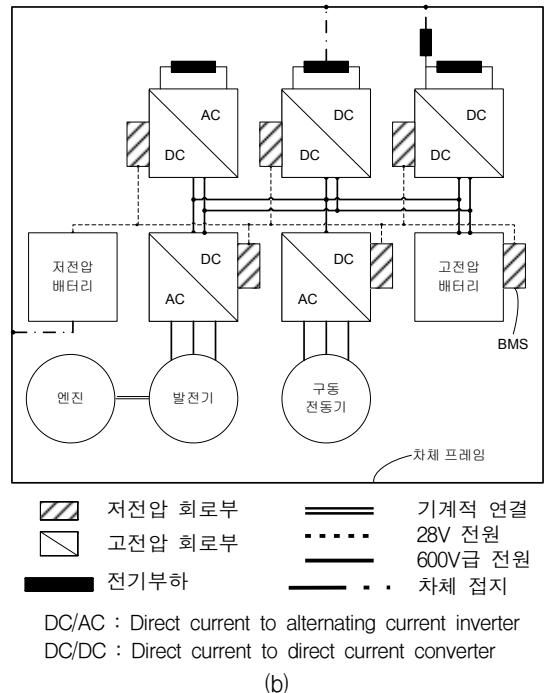
이와 같은 전기추진시스템의 전력변환장치는 고전압 회로부와 저전압 회로부로 구성되고 저전압 회로가 고전압 회로의 동작을 제어하므로 고전압과 저전압이 결합되는 회로부에서 전자기적으로 상호 간섭을 유발할 수 있는 조건이 발생된다. 또한 에어컨과 일부

12/24V 전기 부하는 차체에 접지되어 있는 점을 고려할 때 고전압 회로의 고속 스위칭에 의해 저전압 회로와 차량 내 협소한 공간에 근접 배치된 전자장치가 전자기적인 영향을 받는 환경이 형성된다.

전기추진시스템 작동에 의한 주변 전자장치에 미치는 전자기적 영향과 전기추진 차량의 고전압 전자파 노이즈 특성은 Fig. 1(b)에서 차체 접지 경로를 통한 전도 노이즈와 고전압 및 저전압 회로와 케이블을 통해 방출되는 방사 노이즈를 측정하면 분석할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 1. Hybrid electric vehicle (a) and powertrain system (b)

3. 고전압 전자파 노이즈 특성

3.1 전도 노이즈

전기추진 차량을 동력계(dynaomometer)에 장착한 상태에서 측정된 전도 노이즈는 Fig. 2와 같다.

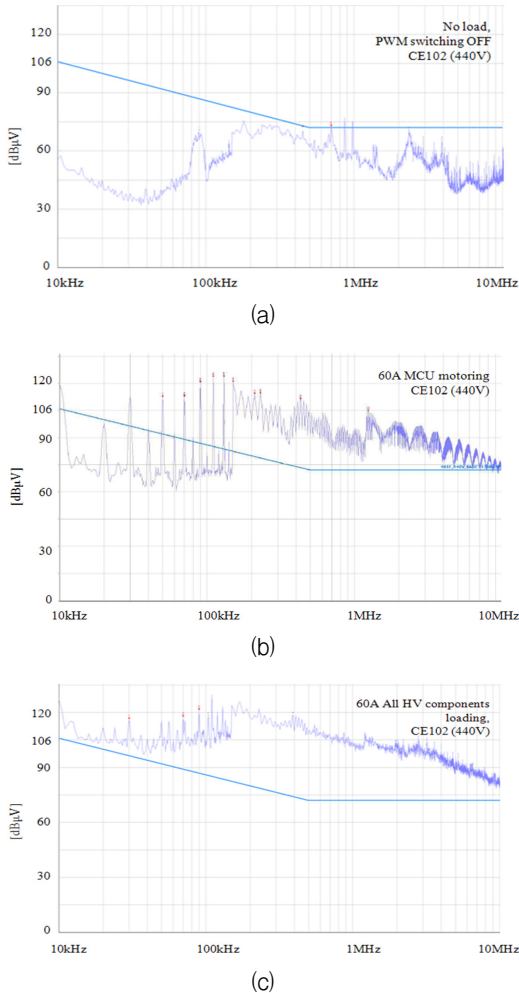


Fig. 2. Conducted emission noises(CE102, power leads, 10kHz~10MHz) in HEV : (a) No load with PWM switching OFF, (b) With only MCU(Motor control unit) motoring, (c) With all high voltage components loaded.

본 측정에서는 고전압 배터리의 CAN 통신 불량에 대한 전도 노이즈의 요인 분석을 위해 배터리 출력단에 60A/1000VDC 급으로 소형화시킨 간이 EMI 필터를

투입하였고 차량은 필터의 전류 한계를 고려하여 60A 이하로 제한하여 구동토록 하였다.

Fig. 2에서 CE102 노이즈는 고전압이 인가되고 PWM (Pulsewidth Modulation) 스위칭을 하지 않는 구동 전 (No load) 조건에서 대부분의 주파수 대역에서 전도 노이즈는 규제치 이하였다. Fig. 2(b)는 구동 전동기만 제한적으로 구동할 때(60A MCU motoring) 전도 노이즈는 전대역에 걸쳐 급격히 증가하였고 특히 10~106kHz에서 규제치 보다 40~70dBuV 정도 초과하였다. Fig. 2(c)는 모든 고전압 장치를 60A 이하로 작동시킨 상태(60A All HV components loading)에서 측정된 것으로 Fig. 2(b)와 비교하면 동일 주파수에서 기저 노이즈의 크기가 증가됨을 볼 수 있다. 이와 같은 전기추진 차량의 전도 노이즈 경향은 Thomas Weber의 연구결과^[10]와 유사하다.

Fig. 3은 고전압 배터리 출력단에 250A/1200VDC 급 EMI 필터(FN2200-250-99, Schaffner 社)를 투입 전 (Without EMI filter)과 투입 후(With EMI filter) 측정된 전도 노이즈이다.

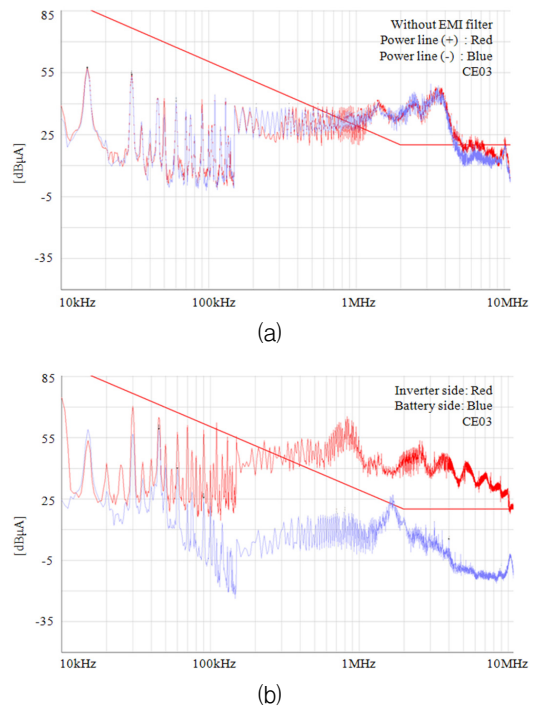


Fig. 3. The effect of EMI filter on the conducted emission noises(CE03, power leads, 15kHz~50 MHz) : (a) Without EMI filter (b) With EMI filter

본 측정에서는 600V/250A급 LISN(Line Impedance Stabilization Network)을 보유하지 않은 상태에서 차량을 최대 구동조건으로 전도 노이즈를 측정하기 위하여 CE102 측정 대신 전류프로브 방식의 CE03 노이즈를 측정하였다. EMI 필터는 10kHz에서 30dB, 100kHz에서 70dB, 1MHz~10MHz 대역에서 30~50dB의 감쇄 특성을 갖고 있으며, 센서류와 CAN의 주파수 대역(수십 kHz~100kHz)에서 노이즈를 저감시킬 수 있도록 선정된 것이다.

Fig. 3(a)에서 필터 투입 전에 고전압 (+)선로와 (-)선로에서 측정된 전도 노이즈는 큰 차이가 없음을 보여 준다. Fig. 3(b)에서 필터를 적용 후 배터리 측의 전도 노이즈(Blue)는 10kHz~50kHz 대역에서 큰 변화가 없으나 50kHz 이상에서 감쇄되기 시작하여 106kHz 이상에서는 30~45dB μ A 정도 노이즈가 감쇄됨을 볼 수 있다. 10kHz~50kHz 대역은 전력변환장치의 스위칭 주파수의 기본파, 제 1,2 고조파 영역이 존재하는 영역으로 EMI 필터를 투입해도 노이즈 전력을 충분히 억제시키지 못함을 알 수 있다. 반면에 EMI 필터 출력단(Battery side)의 전도 노이즈 감소와 다르게 그 입력단(Inverter side) 노이즈는 필터 투입전보다 오히려 커졌다. 이것은 EMI 필터가 특정 대역의 노이즈를 제거하는 대신 억제시킴으로써 고전압 배터리의 정상동작에 영향을 주는 주파수 대역을 회피하는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 문제가 될 수 있는 주파수 대역의 전도 노이즈를 다른 대역으로 이동시키는 것과 동일한 효과가 있으며, 일종의 노이즈 회피기술^[6] 가운데 하나이다.

이런 사실로부터 EMI 필터는 회로 동작에 악영향을 미치는 전도 노이즈의 주파수 대역을 회피시키는 효과만 있지만 EMI 필터의 입력단(Inverter side)의 전도 노이즈가 증가하게 되어 방사 노이즈를 증가시킬 수 있기 때문에 필터를 투입할 때에는 방사 노이즈의 영향도 분석하여야 한다.

3.2 방사 노이즈

전기추진 차량이 동력계에 장착된 상태에서 측정된 방사 노이즈는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 실험실 자체의 환경 노이즈(Lab. Ambient)는 MIL-STD-461^[17]의 규제치(Basic)와 표준 EMI 챔버 노이즈 수준(Chamber Ambient)을 이미 초과함을 볼 수 있다. 따라서 실제 차량 운전 조건에서의 노이즈는 실험실 자체 환경에

서 발생하는 노이즈(Lab. Ambient)를 감안하여 검토해야 한다.

10MHz 이하 대역에서 구동 시에는 큰 변화는 없었고, 영전류 제어 시(Zero current motoring)에는 구동시보다 더 큰 노이즈가 발생되었다. 곧 Fig. 4에서 1MHz~30MHz 대역에서 Chamber Ambient 수준으로 노이즈를 평행 이동시키면 Zero current motoring의 노이즈가 Vehicle OFF 조건 대비 20~35dB μ V/m 정도 크고 규제치도 초과하였다.

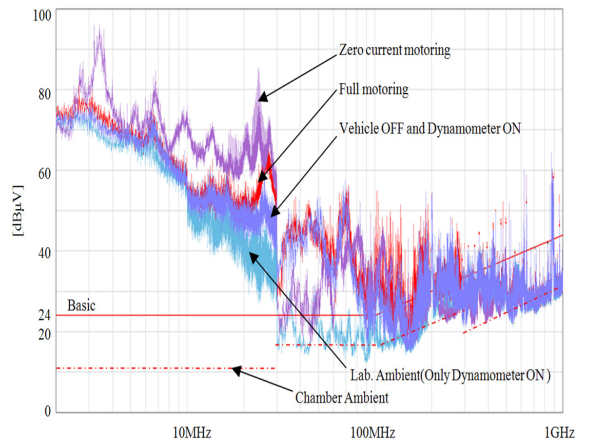


Fig. 4. Radiated emission noises in HEV (RE102, electric field at 1m, 10kHz~40GHz)

라디오 주파수 대역과 중첩되는 수 십 MHz 이상의 대역에서는 전력변환장치 작동 시 AM, FM 수신기와 휴대폰 등 각종 통신장치에 영향을 미치는 EMI 간섭을 최소화시키기 위해 방사 노이즈를 저감시켜야 한다. 예를 들면 FM 수신기의 수신감도는 94.5MHz에서 신호 증폭전 조건으로 -64dBm(43dB μ V/m 또는 200 μ Vrms, 50 Ω 부하 기준)이므로 RE102 규제치는 24dB μ V/m (-83dBm) 보다 훨씬 큰 신호이기 때문에 신호 수신에는 문제가 없다. 그러나 94.5MHz에서 방사 노이즈는 48dB μ V/m(-59dBm)으로 노이즈 전력이 라디오 신호 전력(-64dBm) 보다 더 크므로 수신 불량 문제가 발생될 수 있다.

방사 노이즈는 전력변환장치와 각종 전자장치에서 발생하는 스위칭 노이즈가 부적합한 접지, 케이블, 차폐 등에 의해 차량 내외부로 방출되는 노이즈이다. 방사 노이즈의 주요소인 스위칭에 의한 발진 전류원은 회로 설계 보안을 통해 감소시켜야 하며, 부적합한 접

지, 케이블, 차폐 등 노이즈 전파 경로를 식별하고 차량 운전과 안전에 관련된 핵심 부품에 대하여 필수적으로 노이즈 전파 억제를 위한 설계대책을 강구하여야 한다.

4. 고전압 전자파 노이즈 분석

4.1 고전압 전자파 노이즈 원

전기추진 차량에서 고전압 전자파 노이즈의 발생원은 전력변환장치 고전압부에 내장된 고전력 부품인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)이다. 수 kHz~20kHz 수준의 고속 스위칭 시 펄스의 상승과 하강 에지(edge)에서 발생하는 과도전류는 고전압 케이블을 통해 회로로 전파된다. 이와 같은 IGBT는 구매품을 사용하므로 자체에서 발생하는 노이즈원을 제거시키는 것은 불가하고 노이즈 전파경로를 통제하여 노이즈를 회피하는 방안을 모색해야 한다.

4.2 고전압 전자파 노이즈 경로

전기추진 시스템에서 EMI 문제를 유발시키는 주된 노이즈는 전도 노이즈이다. 전도 노이즈는 Fig. 5와 같이 전력변환장치의 IGBT 방열판 및 하우징, 전동기와 발전기의 하우징과 차체 프레임 사이에서 고주파수에서 형성되는 기생 커패시턴스(parasitic capacitance)를 통하여 누설전류가 차체 접지된 각종 부하, 고전압 배터리 및 전력변환장치의 입력단으로 전파된다.

전기추진시스템의 고전압 스위칭시 고전압 배터리에서 BMS와 서브 BMS 사이의 CAN 통신 불량요인은 차체 접지를 통하여 전파되는 전도 노이즈로써 차체 프레임(차체 접지)과 배터리 하우징의 접촉, 저전압과 고전압 사이의 절연, 저전압 전원 접지와 CAN 통신 접지 등의 노이즈 경로를 통해 간섭을 받은 것으로 유추할 수 있다.

4.3 고전압 전자파 노이즈 영향

전기추진 차량 내 전자파 적합성(Intrasystem EMC)^[15] 관점에서 노이즈원이 되는 가해장비(EMI source)와 EMI 영향을 받을 수 있는 피해장비(EMI receptor)를 사용주파수 대역으로 분류해 보면 Fig. 6과 같다. 전기추진 차량에서 가해장비는 주로 고전압 부품이고 피해장비는 센서, CAN, AM/FM 수신기, 무전기 등 통신 장비들이다.

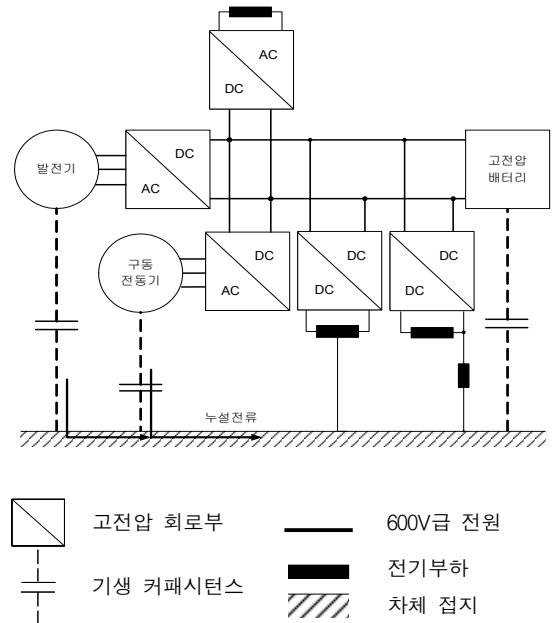


Fig. 5. Propagated path of conducted emission noises

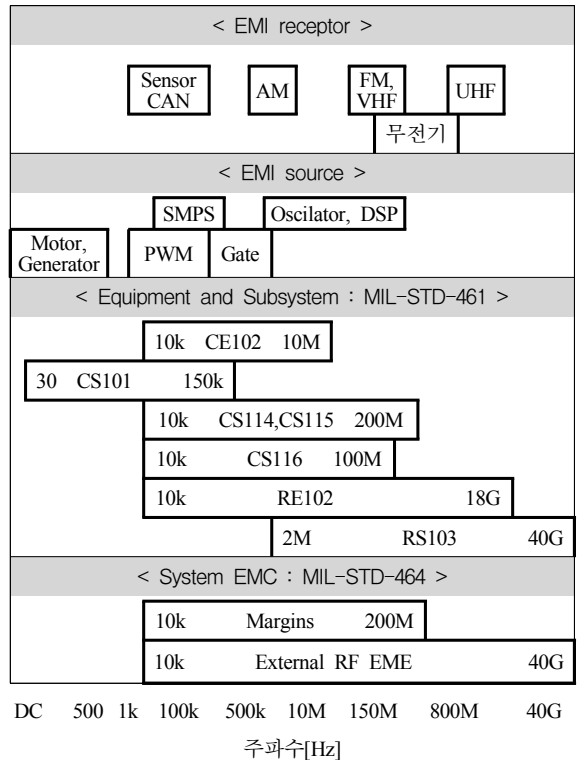


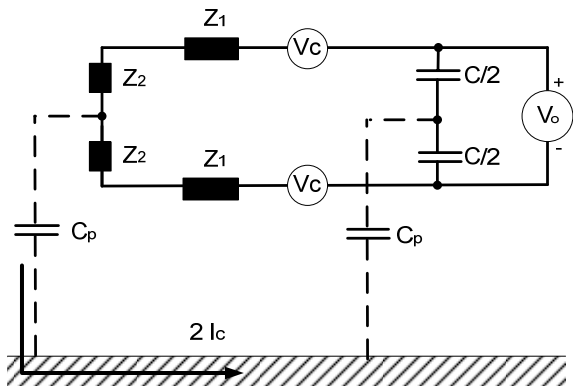
Fig. 6. EMI source-victim equipment and validation items in HEV

Fig. 2, 3에서 10kHz~106kHz 대역에서의 전도 노이즈는 주로 Fig. 6에서 고전압 부품에 내장된 PWM 회로에 의해 작동되는 고속 스위칭 소자에 의한 것으로 직접 영향을 받는 피해장비는 식별되지 않는다. 단지 저전압 회로에 내장된 CAN 통신과 각종 센서 신호가 전자기적인 영향을 받을 수 있다. 또한 무전기에 영향을 미칠 수 있는 부품으로는 고전압 부품 내에 Oscillator, DSP(Digital Signal Processor)와 같은 저전압 고속 스위칭 소자들이 있다.

그 외 전도 노이즈 대역에서 직접적인 영향을 받는 전자장치는 외형적으로 식별되지 않지만 실제 전도 노이즈에 의해 발생될 수 있는 방사 노이즈가 존재하며 이를 분석하였다.

고전압 부품이 전자기적으로 근접 배치되는 경우, 고전압 스위칭에 의해 유기되는 방사 노이즈 영향으로 통신장치의 동작에 문제를 유발시킬 수 있다. 즉 Fig. 3에서 나타난 전도 노이즈로 인한 방사 노이즈는 Fig. 6의 통신장비의 작동에 직접 영향을 미칠 수 있다.

상세하게 설명하기 위하여 그림1(b)의 전기추진 시스템을 고주파수 전도 노이즈 등가회로로 도시하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.



- Z₁ : 케이블, 인버터 등가 임피던스
- Z₂ : 3상 회전기의 단상 등가부하 임피던스
- C_p : 기생 커패시턴스
- l_c : 전도 전류
- V_c : Turn-On IGBT에 의한 공통모드 노이즈원
- V_o : 인버터 직류단 커패시터에 걸린 전압

Fig. 7. High frequency equivalent circuit of powertrain

전도 노이즈에 의한 고전압 (±) 2 개의 선로 전류에 의해 차체접지 사이의 유기되는 누설전류 2I_c로부터

선로와 r[m] 이격된 곳에서 공간에 유기되는 전계는 아래 식으로 결정된다¹⁸⁾.

$$E = 0.4\pi f L r^{-1} I_c \quad [\mu V/m] \quad (1)$$

여기서 f는 주파수[Hz], L은 선로 길이[m], I_c는 전도 전류[A]이다. f = 40MHz, r = 1m, L = 5m이고, I_c를 100nA의 매우 작은 값으로 가정할 경우 E = 25μV/m (28dBμV/m)로 산출된다. 이 값은 MIL-STD-461의 RE102 육군 규제치 24 dBμV/m를 초과하는 값이다.

상기 수식 (1)로부터 Fig. 4의 방사 노이즈 측정값을 적용하면 특정주파수에서의 누설전류를 추정할 수도 있다. 예를 들면 f = 40MHz, r = 1m, L = 5m이고 Fig. 4에서 40MHz에서 전동기 구동 시(Zero motoring, Full motoring) 측정된 노이즈는 약 57dBμV/m 이므로 누설전류 I_c는 약 2.8μA 수준으로 산출된다.

이상과 같이 전기추진 차량 내의 탑재 전자장치들 사이의 전자기적 영향은 Fig. 6에 제시된 MIL-STD-461과 MIL-STD-464에 의거 전자파 요구 성능을 확인하여야 하며, 30Hz에서 40GHz까지 전기추진 차량 내 탑재된 고전압 부품과 대부분의 전기전자 장치의 작동 주파수 전대역에 걸쳐 전자파 입증의 수행되어야 한다.

5. 고전압 전자파 노이즈 저감 방안

향후 개발되는 전기추진 차량은 전자파 노이즈 환경이 개선되도록 개발되어야 할 것이다. 전도 노이즈를 저감시키기 위하여 차체 프레임과의 기생 커패시턴스를 최소화시키도록 설계해야 한다.

전도 노이즈를 억제하기 위해서는 Fig. 5에서 (1) 발전기, 구동 전동기와 차체 접지 사이의 누설전류를 최소화시켜야 하며, (2) 차체 접지를 통해 전도되는 노이즈를 차단하기 위해 차체 접지된 각종 전자장치의 저전압 회로의 전원과 각종 접지가 절연(isolation) 되도록 설계해야 한다. 방사 노이즈를 저감시키기 위해서는 고전압 부품을 완전 차폐구조로 제작하여야 한다.

본 논문에서는 전도 노이즈와 방사 노이즈를 저감시키기 위하여 저 인덕턴스 선로 설계와 차폐 강화구조 설계를 다음과 같이 제안한다.

- (1) 발전기, 전동기의 3상 케이블 길이 최소화.

- (2) 발전기, 전동기, 전력변환장치의 하우징은 차폐설계하고 차체 접지와외의 접촉저항을 최소화.
- (3) 전력변환장치의 고전압과 저전압 회로부를 전기적으로 절연시키고 각각 차폐.
- (4) 필요시 고전압 직류단에 EMI 필터를 투입.
- (5) 고전압 직류단 전압이 안정되도록 설계.

Fig. 5에서 전도 노이즈는 기생 커패시턴스에 의해 어쩔 수 없이 생기는 누설전류에 의한 전자기 유도 현상이므로 억제하는 것 보다 회피하는 것이 합리적이다. 3상 노이즈 필터를 전동기와 발전기 입력단에 투입할 수 있지만 크기가 커지고 비용 측면에서도 효과적인 방법은 아니다. 고전압 직류 EMI 필터의 투입 여부는 전도 노이즈와 방사 노이즈 저감 설계를 먼저 적용한 후 필요시에 투입하는 것이 비용을 절감할 수 있는 방안이다.

또한 과도현상에 의한 전압변동이 고 토크 동작영역에서 소신호 회로에 영향을 미칠 수 있고 방사 요인이 되므로 다수의 전력변환장치가 병렬 운전된다는 점을 고려하여 고전압 직류단의 임피던스를 최적화하여 전압변동을 안정화시키는 것이 중요하다.

6. 결론

본 논문에서는 신규 개발되는 전기추진 차량의 전자파 환경 분석과 전자파 영향을 설계, 제작 과정에서 통제를 할 수 체계 EMC 설계 방안을 200kW급 군용 전기추진 차량을 사례 분석을 통하여 제시하였다.

먼저 EMC 설계 통제가 반영되어 제작된 전기추진 차량에 대한 전자파 환경을 측정하고 분석하였다. 전자파 환경으로써 CE102, CE03, RE102 측정 결과 고전압 인가시와 전동기 구동시에 전도 노이즈가 급격히 증가하였고, 방사 노이즈는 탑재 통신장비에 감도저항을 유발하는 수준이었다. 고전압 직류단에 투입된 EMI 필터는 회로 동작에 간섭을 유발하는 주파수 대역의 노이즈를 저감시킬 수 있지만 필터 입력단의 전도 노이즈가 증가되는 역 효과가 확인되었기 때문에 시스템 차원에서 필터 투입에 따른 방사 노이즈의 변화도 신중히 검토하여야 한다.

후속 개발되는 전기추진 차량의 EMI 저감과 전압 안정화를 위하여 저 인덕턴스, 차폐강화, 필터링 설계가 반영되도록 EMC 통제전략을 수정해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 및 방위사업청의 민군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 지원을 받아 진행되었음

References

- [1] Committee on Assessment of Combat Hybrid Power Systems, "Combat Hybrid Power System Component Technologies : Technical Challenges and Research Priorities," ISBN : 0-309-54230-8, 2002.
- [2] Matti Linjonen, Ari Hentunen, and Jussi Suomela, "Validation of Quasi-Static Series Hybrid Electric Vehicle Simulation Model," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC), 2010.
- [3] Ari Hentunen, Jussi Suomela, Matti Linjonen, and Panu Sainio, "Hardware-in-the-Loop Verification Environment for Heavy-Duty Hybrid Electric Vehicles," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC), 2010.
- [4] Carsten Greißner, Stephan Frank, Daniel Köng, and Stephan Otto, "Hybrid System for a Military 8x8 Wheeled Vehicles as an Extension to a 120kW High-Voltage Energy System," Jenoptik, 2014.
- [5] Hirofumi Akgi and Takayuki Shimizu, "Attenuation of Conducted EMI Emissions from a Inverter-Driven Motor," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, pp. 282-290, January 2008.
- [6] Krishna Mainali, and Ramesh Oruganti, "Conducted EMI Mitigation Techniques for Switch-Mode Power Converters: A Survey," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 9, pp. 2344-2356, 2010.
- [7] Mattias Hedenskog, Emanuel Hallgren, "Modeling and Validation of the EMI Performance of an Electric Drive System by Device Level Characterization", Chalmers University of Technologies, 2011.
- [8] Rami Kahoul, Yacine Azzouz, Blaise Ravelo, and Belahcene Mazari, "New Behavioral Modeling of EMI for DC Motors Applied to EMC Characterization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 12, pp. 5842-5496, December 2013.

- [9] Marcelo Lebo Heldwein, Luca Dalessandro, and Johann W. Kolar, "The Three-Phase Common-Mode Inductor : Modeling and Design Issues," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 8, pp. 3264-3274, August 2011.
- [10] Thomas Weber, "EMC Filters in High Voltage Traction Drive Systems," IEEE Electromagnetic Compatibility, pp. 1-6, 2008.
- [11] Dong Jiang, Fei Wang, and Jing Xue, "PWM Impact on CM Noise and AC CM Choke for Variable-Speed Motor Drives," IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 49, No. 2, pp. 963-972, March/April 2013.
- [12] Stefan Klein, "EMC Filter for DC/DC Switching Controller Optimized," Application Note, Würth Elektronik, pp. 1-6, 2012.
- [13] Nidhal Y. Nasser, "Practical Approach in Designing Conducted EMI Filter to Mitigate Common Mode and Differential Mode Noises in SMPS," Journal of Engineering and Development, Vol. 16, No. 1, pp. 164-183, March 2012.
- [14] Annetle Muetze, and Charles R. Sullivan, "Simplified Design of Common-Mode Chokes for Reduction of Motor Ground Currents in Inverter Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 6, pp. 2570-2577, November/December, 2011.
- [15] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, 2010.
- [16] Jongkwang Lim, Kyogun Chang, Sangchul Chung, and Byunglae Rho, "EMC Control Strategy for the Series Hybrid Electric Vehicle," In Proceedings of International Conference on Materials and Reliability 2011, Busan, Korea, pp. ICMR2011_A312, November 20-22, 2011.
- [17] MIL-STD-461, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystem and Equipment, 2007.
- [18] Elya B. Joffe, EMC Design Considerations for Aerospace Systems, K.T.M. Project Engineering ltd.