

하이브리드 자동차 모터 구동 시스템의
전도/방사 노이즈에 관한 연구 동향

김병기, 이병국, 나완수

성균관대학교

I. 서 론

주지하다시피 기존의 화석 연료 에너지를 이용한 내연 기관을 동력으로 사용하는 자동차는 지구상의 화석 에너지의 고갈과 환경 문제로 인하여 수십 년 안에 더 이상 생산되지 않을 것으로 예측되고 있으며, 이에 따라서 기존의 화석 연료 자동차를 대신할 차세대 자동차로서 전기 자동차(Electric Vehicle), 수소 연료 자동차(Fuel Cell Vehicle) 등의 연구 개발이 전 세계적으로 활발히 연구/개발되어지고 있다^[1]. 최근 본격적인 전기 자동차, 수소 연료 자동차의 상용화에 앞서서 화석 연료를 사용하는 엔진과 배터리 충·방전 시스템을 동시에 장착하여 자동차의 연료 효율을 크게 높인 하이브리드 자동차가 상용화되어서 그 판매량이 크게 증가하고 있다^[2]. 기본적으로 전기 자동차, 수소 연료 자동차, 그리고 하이브리드 자동차는 전기 모터로 자동차가 견인된다는 점에서 기존의 자동차와 크게 다르고, 따라서 EMI/EMC 측면에서는 기존의 내연 기관 자동차에서는 고려하지 않아도 되는 모터 드라이브 시스템(motor drive system)의 전자파 적합성(electromagnetic compatibility)을 검토하는 것이 대단히 중요한 분야로 대두되었다^[3]. 이러한 흐름에 따라서 본고에서는 하이브리드 자동차의 전기 시스템 중에서 기존의 자동차 전장 시스템과 관련된 부분 이외에 모터 구동 시스템과 관련된 전도/방사 노이즈를 예측/제어하기 위해서 어떠한 방법의 연구들이 시도/진행되고 있는지를 간략하게 소개하고자 한다. 그러나 이러한 연구 동향을 모두 일괄적으로 정리한다는 것은 대단히 방대한 작업이고, 따라서 본

고에서는 특별한 몇 가지 경우에 한하여 한정적으로 원리를 위주로 하여 기술하고자 한다.

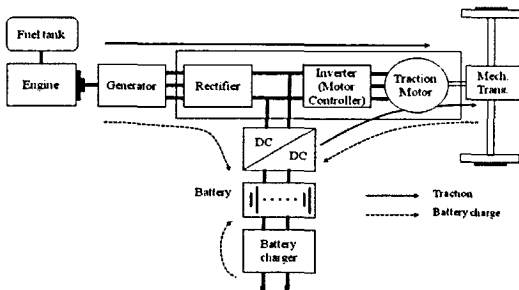
기본적으로 전자파 장애의 원인이 되는 전기 자동차/하이브리드 자동차의 전자파 간섭 현상을 예측하기 위해서는 고주파 전원 소스에 대한 분석이 필요하고, 이를 위하여 모터 구동 시스템을 구성하는 각 전기 회로부를 실제 동작 환경과 유사하게 회로 모델링을 하는 것이 필요하다. 이것을 위해서는 전력 반도체 소자와 전기 회로로 구성된 각 회로부의 기생 성분들을 추출하여야 하며, 이 기생 성분들을 전체 전기 회로에 반영하여 전체를 동시에 해석해야 유효한 결과를 도출할 수 있다^{[4][5]}. 이러한 해석 방법 등을 통하여 예기치 못한 전자파 장애로 인한 시스템 오작동 가능성을 제작 전에, 사전에 파악하고 문제점을 신속하게 해결해 나갈 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 II, III장에서는 하이브리드 자동차의 기본 구성이 되는 모터 구동 회로를 구성하여, 모터 구동의 핵심이 되는 인버터를 중심으로 전력용 반도체 소자 및 이를 구성하는 주변 회로의 기생 성분을 추출하고, 이를 실제 모터 구동 회로와 함께 구성하는 방법을 소개하였다. 그리고 구성한 회로 모델에서 모터 구동 시 발생할 수 있는 전도성 노이즈(Conducted Emission)에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 통하여 분석한 결과를 보였다. IV장에서는 모터 구동 회로의 여러 가지 기생 성분 중에서 집지(ground) 부분과의 기생 커패시턴스 성분에 의해서 어떻게 공통 모드(common mode)의 전압/전류 성분이 생성되는지는 보이고, 이것들을 억제하는 방법에 대한 동향을 기술하도록 한다. 본고의 II, III장은 참고문헌

[1]의 내용 중 일부를 발췌/정리한 것임을 밝힌다.

II. 하이브리드 전기 자동차의 모터 구동 시스템 모델링

2-1 모터 구동시스템

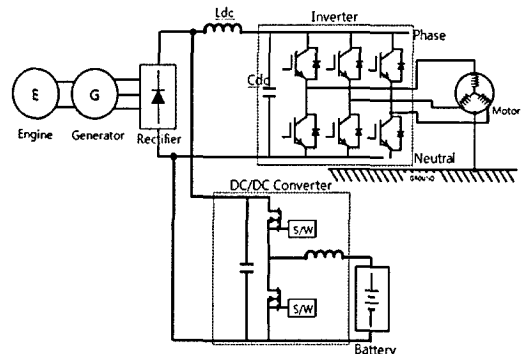
하이브리드 전기 자동차는 전기적으로 직렬, 병렬, 직병렬 시스템이 존재하며, 본고에서는 이 중에서 내연 기관인 엔진이 자동차의 기계적 구동에 직접 쓰이지 않고, 전기 발전만을 담당하는 경우([그림 1])에 한하여 기술하였다. [그림 1]은 직렬(series hybrid)시스템의 하이브리드 전기 자동차의 전체적인 구성을 나타낸다^[2]. 직렬 시스템의 구성과 동작을 보면 자동차의 가속과 정속 구간에서는 [그림 1]의 실선에서 보는 것과 같이 가솔린 연료를 연소하여 내연 기관의 힘으로 발전기(generator)를 구동하여 전기 에너지로 변환하며 변환된 에너지는 정류기(rectifier)를 통해 DC 전원으로 변환된다. 정류된 DC 전원은 인버터에서 교류 전류로 변환되어 모터를 구동시킨다. 또한 여기서 DC 전원을 배터리에서도 공급 받을 수 있다. 반대로 감속 구간과 정지해 있을 때는 [그림 1]의 점선의 방향과 같이 정류된 에너지는 DC-DC 컨버터를 통하여 배터리에 충전된다. 또한 구동축의 힘에 의해 발생된 에너지는 회생 제동으로 배터리에 충전된다. 다양한 전기 소자(기기)들이 하이브리드 및 전기



[그림 1] 하이브리드 자동차의 구성도

자동차 구동 시스템에 사용되고 있으며, 본 연구에서는 모터 구동 드라이브 시스템을 중점적으로 분석하였다. [그림 2]에 전기 자동차의 모터 구동 드라이브 시스템의 개략적인 회로를 나타내었다. 인버터는 배터리에서 직류 전력을 받아 교류 전력으로 변환하여 교류 모터를 구동시킨다. [그림 2]는 3상 인버터의 스위칭 소자로 파워 MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)나 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 같은 전력 용량이 큰 6개의 전력용 반도체 스위칭 소자를 사용한다. 인버터는 PWM(Pulse Width Modulation)의 제어를 통하여 구동 모터의 속도를 원활하게 제어할 수 있다^[3]. 구조적으로 인버터는 방열판 역할을 하는 금속으로 둘러싸여 있고, 이것은 하나의 모듈로 되어 있으며, 모터와 인버터 사이는 케이블로 연결되어 있다.

인버터 드라이브를 효과적으로 분석하기 위해서는 먼저 회로를 단순화 하여 접근하는 것이 필요하며, 또한 인버터를 차동 모드(differential mode)와 공통 모드(common mode)를 각각 따로 해석을 하는 것이 필요하다^[7]. 인버터 주변의 회로에서 방열판 접지와 Decap의 기생 성분, DC-link에 연결된 DC choke 또한 고주파 노이즈에 큰 영향을 미치므로 이러한 요소들도 집중 소자(lumped element)로 모델링하여 함께 해석



[그림 2] 하이브리드 자동차에서의 모터 구동 회로 모델 개념도

해야 한다. 그리고 회로 모델을 해석할 때 시간 영역(time-domain) 시뮬레이션이 먼저 수행 되어야 하며, 그 결과를 FFT(Fast Fourier Transformation)하여 주파수 영역(frequency-domain)에서 해석을 해야 한다. 해석 범위는 적어도 한 주기 동안 회로의 동작을 시뮬레이션 해야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

2-2 기생 성분의 회로 모델링 기법

PWM 스위칭 제어는 반도체 전력 소자, 수동 소자, 연결 선로, 제어 회로 등으로 구성되며, 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 인버터 스위칭 제어에서 높은 dv/dt 나 di/dt 가 전도성 노이즈에 큰 영향을 미친다. 이런 dv/dt 나 di/dt 의 변화가 크면 다양한 기생소자에 의한 전도성 노이즈가 더욱 커진다^{[8],[11]}. EMI에 대한 유용한 분석 방법이 최근 연구에서 보고되고 있으나, EMI 노이즈가 여기(excited)되고 전달되는 것에 대한 기본 메커니즘은 아직 충분히 조사되지 않아 보인다^[3]. 따라서 실제 모터가 구동되는 시스템에서 EMI 노이즈를 예측하기는 쉽지 않고, 이것은 전기기기의 모든 기생 성분들을 찾는 방법이 각 부분마다 상이하고, 이것을 회로 시뮬레이터 내에서 정확한 위치에 적절한 값으로 적용하는 것이 어렵기 때문이다. 따라서 시스템 내에서 고주파에 의해서 큰 영향을 미치는 주요 기생 성분만을 추출하여 EMI 노이즈 예측 모델을 구성하는 것이 효과적인 방법 중 하나라고 생각된다.

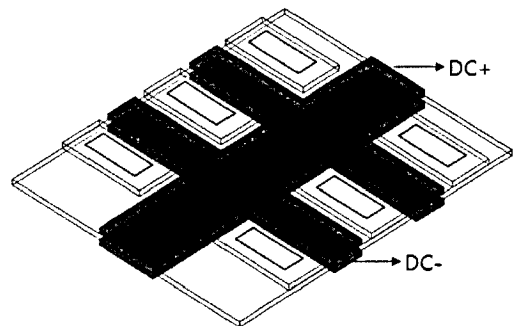
모터 구동 드라이브 시스템에서의 등가 회로 구성은 능동 소자를 사용한 구성은 단순화하되, 주변의 수동소자를 사용한 회로 구성은 구체적으로 구성되어야 한다. 소자의 특성, 구조 및 구성 요소와 위치가 주어지면 이론적으로 고주파 기생 성분과 같은 소자의 전기적 파라미터(parameter)를 추출하는 것이 가능하다. 각각의 소자들의 기생 성분을 추출하는 것과 모터 드라이브 등가 회로와 추출된 기생 성분이 포함된 전체 회로 시뮬레이션을 해야 한다.

2-2-1 Power Bus 기생 성분 추출

모터 드라이브의 인버터 구동 회로에 전력을 공급하는 power bus는 인버터 모듈 내부에서 구리 라인으로 형성되어 있다. 배터리에서 인버터까지 연결된 부분에서 R, L, C 요소 중 고주파에서 특성에 영향을 미치는 소자로 DC choke가 있으며, 배터리의 +단과 인버터 DC+단 사이에 위치해 있다. 그리고 인버터의 상측단(DC+)을 phase, 하측단(DC-)을 neutral라고 하고, 이는 PCB를 통해 인버터에 전력이 공급이 되는 층을 구성하고 있다. 이런 복잡한 power bus의 구조에서 유용한 기생 성분 추출 방법으로는 일반적으로 FEM(Finite Elements Method) 분석 방법을 사용한다. 본 연구에서 사용된 툴은 Ansoft사의 Q3D Extractor로 3차원 공간에서 구조물 또는 구조물 간의 저항, 인덕턴스, 캐패시턴스 값을 추출해 낼 수 있다^{[6],[7]}. 이 추출된 R, L, C값들을 사용하여 회로 시뮬레이터 내에 등가 모델을 생성할 수 있다. 여기서 각 요소들이 가진 성분과 요소간의 커플링(coupling)된 기생 성분을 적절한 위치에 적용하는 것이 중요하다.

2-2-2 스위칭 소자의 기생 성분 추출

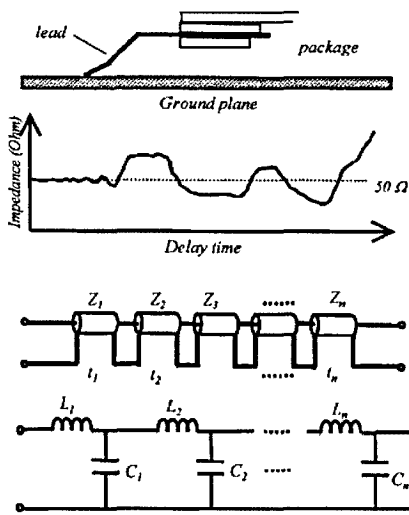
필요한 입출력 저항이나 캐패시턴스의 기생 성분들은 제조사(manufacturer)가 제공하는 데이터 시트에서 쉽게 찾아 볼 수가 있다. 또는 최근에는 SPICE



[그림 3] 인버터 모듈의 power bus 기생 성분 추출

시물레이터에서 소자의 주요 특성들이 데이터베이스화 되어 있어 이를 실제 동작 환경과 유사하게 적용하여 사용할 수 있다. 그리고 이런 소자를 인버터 모듈 위에 설치하면 전력 소자의 주요 입출력 선로들의 lead frame과 인버터 모듈에서의 연결 선로의 기생 성분을 동시에 고려하여 등가회로 모델에 적용하는 것이 효과적이다. 이는 하나의 transmission line 이론에 근거한 TDR(Time-Domain Reflectometry) 방법을 사용하여 기생 성분 값을 찾아 회로 모델링 하는 방법으로 접근할 수 있다^{[8],[9]}. Lead frame의 전송 선로는 임피던스의 불일치와 도체의 유도성(inductive) 성분과 용량성(capacitive) 성분의 차이로 인하여 반사 특성에 영향을 받는다.

인덕턴스와 캐패시턴스 값은 TDR 장비를 사용하여 구한다. 앞의 방법을 통하여 값을 추출하면 lead frame과 인버터 모듈 내에서 선로의 기생 성분 값들은 일반적으로 캐패시턴스 값은 무시할 만큼 매우 작고, 인덕턴스 값은 큰 것을 확인할 수 있다. 다음 수식을 사용하여 계산한 L, C 값들을 인버터의 스위칭 소자의 입력 단에 적용하여 회로를 구성할 수 있다.



[그림 4] Lead frame의 전송 라인모델^[9]

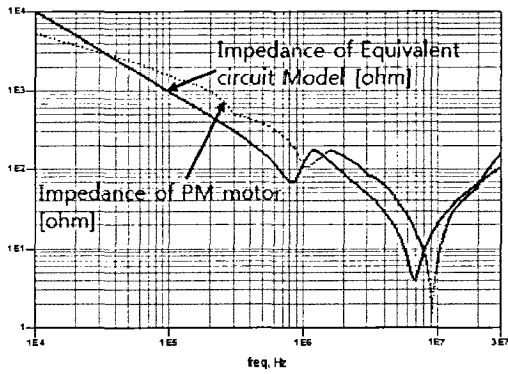
$$L = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} Z(t) dt \quad C = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{Z(t)} dt$$

2-2-3 Brushless 모터 기생 성분 추출

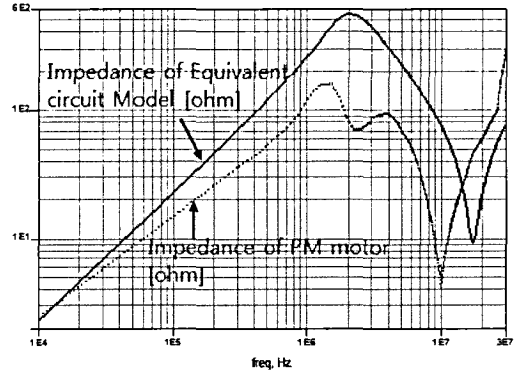
차동 교류 전기 기기들의 고주파 모델은 수 MHz까지의 권선 임피던스의 실제 실험적인 측정을 수행한 후, 이 데이터를 가지고 집중 정수 소자의 알맞은 값을 찾을 수 있다. 모터 회로의 파라미터는 모터 권선으로부터 주파수에 대한 임피던스를 측정된 회로와 유사한 임피던스 프로파일을 가지는 적합한 커브를 이용하여 결정한다^[5]. 따라서 VNA(Vector Network Analyzer)로 모터 권선 임피던스의 진폭 및 위상 모두를 측정해야 한다. [그림 5] (a)는 하나의 상과 그것의 중성점 사이에서 측정된 공통 모드 임피던스를 나타내고 있으며, [그림 5] (b)는 하나의 상과 접지 사이에 측정된 차동 모드 임피던스를 나타낸다. [그림 5] (a)와 [그림 5] (b)의 측정된 데이터를 바탕으로 Brushless 모터의 등가 회로를 모델링 할 수 있으며, [그림 6] (a)와 [그림 6] (b)에 Brushless 모터의 등가 회로 모델을 나타내었다. 이 모델에서 권선 AC 저항은 RL1과 RL2로 나타낸다. 진상 전류와 dielectric losses로 인한 손실 부분은 저항은 Rc1, Rc2와 Rp1, Rp2로 나타내고 stray capacitances는 C1과 C2에 의해 표현된다. 차동 모드에 존재하는 C3는 접지와 연결되지 않고 상과 중성점 사이에 연결되어 있는 반면에 공통 모드에 존재하는 Cg와 Rg는 접지와 연결되어 있다. 두 모델은 공통적으로 모터 케이블의 stray inductance L을 고려해야 한다. 앞에서 나열된 매개변수들을 실제 측정된 데이터를 이용하여 커브 피팅(curve fitting)기법을 통하여 구할 수 있다.

Ⅲ. 모터 구동 시스템의 전도 노이즈

[그림 7]은 각 전기 소자들의 기생 성분을 고려한 모터 구동 인버터 회로이다. IGBT 전력용 반도체 소

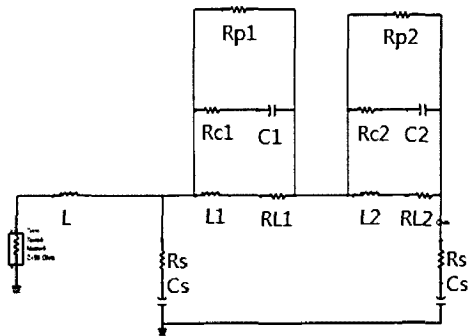


(a) 공통 모드 임피던스 특성

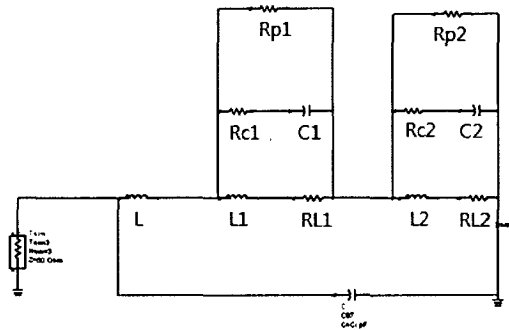


(b) 차동 모드 임피던스 특성

[그림 5] Blushless 모터 임피던스 특성



(a) 공통 모드 등가 회로



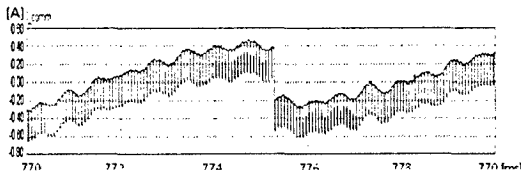
(b) 차동 모드 등가 회로

[그림 6] Blushless 모터의 등가 회로

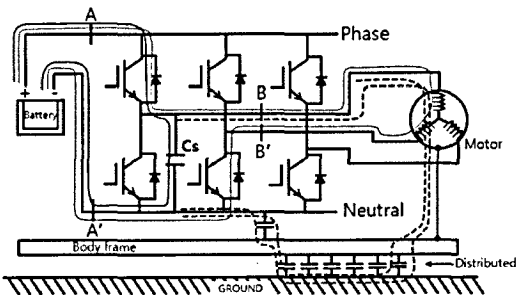
자에 입출력 단에는 기생 성분을 고려한 L 과 C 가 부착되어 있다. 또한 phase와 neutral 사이의 De-cap은 ESL(Equivalent Series Inductance)과 ELR(Equivalent Series Resistance)을 모두 고려하였다. 모터 제어의 PWM 파형의 주기는 10 kHz이고, 모터의 속도는 0초에서 0.5초 사이 가속을 하여 1,000 rpm에 도달하고, 0.5초에서 1초 사이에 1,000 rpm을 유지하고, 다시 1초 후에 감속을 하는 것을 [그림 8]에서 볼 수 있다. 실험된 결과는 모터의 속도가 1,000 rpm으로 정속도를 유지한 상태이다. 전원단에 LISN(Line Impedance Stabilization Network) 회로를 구성하여 전도성 노이즈

(conducted emission)를 분석할 수 있으며, 시간 영역과 주파수 영역에서의 노이즈 성분을 확인할 수 있다. [그림 9]에서 보는 것과 같이 인버터의 스위칭에 의한 노이즈 성분은 시간 영역에서 peak-to-peak 40 V까지 나타나는 것을 볼 수 있으며, 주파수 영역에서의 노이즈 성분은 2 kHz 부근과 8 kHz 부근에서 노이즈 성분이 높게 나타난 것을 볼 수가 있다. 또한 기생 성분이 있는 것이 없는 것에 비해서 10 kHz 이상의 주파수에서 더 많은 양의 노이즈 성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 회로를 구성하는 기생 성분들이 낮은 주파수에서는 영향이 적었으나, 주파수

생 커패시턴스 성분을 개념적으로 나타낸다^[4]. 그림에서 A-A' 부분의 회로는 정상적인 차동 회로의 성분만을 나타내지만, B-B' 부분 회로의 경우에는 phase와 neutral 부분의 전류 크기가 달라서 공통 모드 전류가 발생한다는 것을 나타낸다. 기본적으로 회로의 차동 모드 성분과 공통 모드 성분 모두 방사 노이즈를 발생하지만, 공통 모드 성분에 의한 방사의 양이 차동 모드 성분에 의한 방사의 양보다 훨씬 능가하는 지배성분이라는 것은 이미 잘 알려져 있으며^[13], 두 성분 모두 필터를 부착함으로써 최소한 부분적으로 제거가 가능하다. 차동 모드 또는 공통 모드에 의해서 발생하는 방사 노이즈의 양을 정확하게 예측하는 것은 이러한 모드 자체를 모두 찾아내어 분석하는 것(identification) 자체가 자동차의 내부 구조와 밀접한 관계가 있기 때문에 아직까지는 현실적으로 가능해 보이지 않으며, 지금까지 발표된 논문들에서는 각각의 케이스에 대하여 실험적으로 RE(Radiated Emission)을

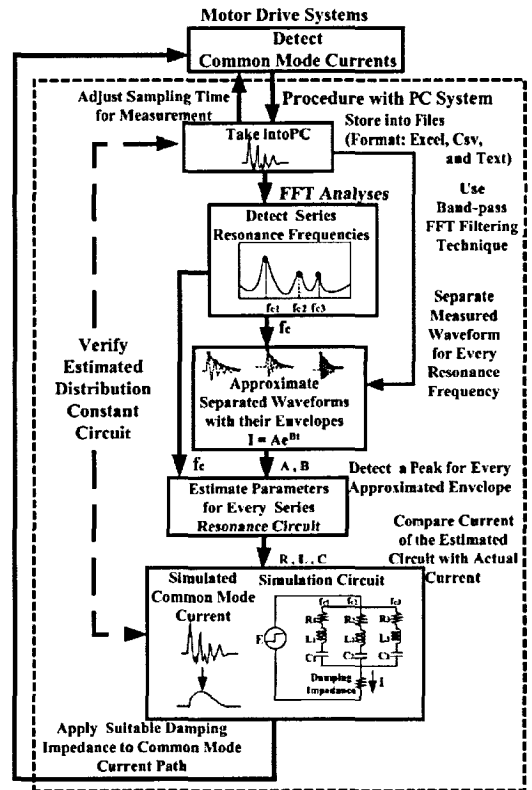


[그림 10] 회로 시뮬레이션에서 ground에 흐르는 공통 모드 전류

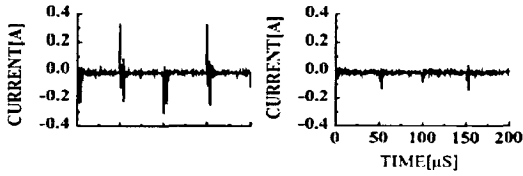


[그림 11] 모터 구동 드라이브 시스템에서 공통/차동 모드 전류 modified picture from^[4]

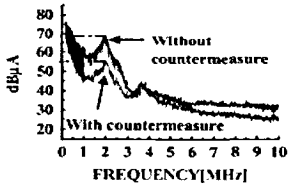
측정하여 분석 또는 국부적인 예측에 이용하여온 것으로 보인다^[12]. 본고에서는 특정한 경우에 있어서 공통 모드의 전류를 측정할 수 있을 때 측정된 전류의 모양에서 공통 모드 회로를 회로 모델링을 하고, 이 회로 모델링을 이용하여 공통 모드의 전류를 최소화시키는 최적의 임피던스 값을 추출한 알고리즘을 인용하여 [그림 12]에 보였다. 이와 같은 알고리즘을 이용하여 계산된 최적의 임피던스는 100 Ω이었으며, 이것을 공통 모드의 회로에 삽입하였을 때 감소한 공통 모드 전류 및 근접 자기장(near field)를 측정된 데이터를 [그림 13]에 나타내었다. [그림 13]에 나타난 바와 같이 100 Ω의 댄핑 임피던스를 삽입한



[그림 12] 원하는 공통 모드 전류에 부합하는 등가 회로의 형성과 적절한 댄핑 임피던스(damping impedance)를 구하기 위한 절차^[4]



(a) 기존 방법 (b) 제안된 방법



(c) Near magnetic fields의 감소 효과^[4]

[그림 13] 공통 모드를 억제하는 제안된 방법의 실험적 효과 증명

였을 때, 공통 모드의 전류뿐 아니라, 근접 자기장의 크기도 효과적으로 감소하였음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 고에서는 하이브리드 자동차의 모터 구동 회로에서 발생할 수 있는 전도/방사 노이즈를 분석/예측할 수 있는 모델링 기법에 대하여, 특정한 모터 구동 회로를 구성하면서, 살펴보았다. 이를 위하여 인버터를 구성하는 전력용 반도체 소자 및 이를 구성하는 주변 회로의 기생 성분을 추출하고, 이를 실제 모터 구동 회로와 함께 구성을 하였으며, 구성된 회로 모델에서 모터 구동 시 발생할 수 있는 전도성 노이즈에 대하여 시간 영역과 주파수 영역에서 분석을 하여, 모터 구동 시스템에서 고조파 성분을 구하는 기본적인 방법들에 대하여 살펴보았다. 이 때 각각 모델링한 전기 소자의 파라미터를 따로 분석하는 것이 아니라 전체 회로를 함께 분석하는 것이 예상치 못한 고주파 노이즈를 관찰할 수 있게 된다. 하이브리드 자동차의 모터 구동 시스템은 AC-DC 컨버터, DC-DC 컨버터, 그리고 DC-AC 인버터 등이 함께 연

결되어 있는 복잡한 회로인 까닭에 주위의 도체와의 기생 성분을 고려하지 않더라도, 회로 자체에서 공통 모드의 전류가 그라운드에 흐를 수 있음을 알 수 있었고, 이것을 제어하는 것이 EMC 문제에 중요한 부분 중의 하나가 되었다.

구성된 모터 구동 회로를 자동차 내부에 장착시킬 때 회로는 필연적으로 주위의 도체(자동차 차체 등)와 분포 커패시턴스(distributed capacitance)를 매개로 커플링이 생기고, 이에 따라서 차동 모드/공통 모드의 전압/전류 성분이 발생하게 된다. 이 중에서 차동 모드는 회로의 최적 설계를 통해서 최소화하고 공통 모드는 적합한 댐핑 임피던스의 설계를 통하여 최소화함으로써 전도/방사 노이즈 모두를 줄일 수 있는 방법을 살펴보았다. 주어진 모터 구동 회로에서 방사 노이즈를 정량적으로 정확하게 예측하는 방법은 아직까지 발표된 바가 없는 것 같고, 기본적으로 차동/공통 모드의 성분들을 제어함으로써 방사 노이즈를 제어하는 연구들이 현재까지 많이 발표되어 있으며, 앞으로 더욱 효과적으로 차동/공통 모드의 성분들을 제어/통제하는 연구가 지속적으로 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 나원수, "하이브리드/전기 자동차의 EMI/EMC 성능 예측을 위한 분석 방법", *EMC KOREA2009*, 서울교육문화회관, pp. 66-89, Oct. 2009.
- [2] Ali Emadi, *Handbook of Automotive Power Electronics Electronics and Motor drives*, Taylor & Francis, 2005.
- [3] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman, and D. Schlegel, "EMI emissions of modern PWM AC drives", *Industry Applications Magazine*, IEEE, pp. 47-80, 1999.
- [4] N. Mutoh, M. Nakanishi, M. Kanasaki, and J.

- Nakashima, "EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems", *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, pp. 930-937, 2005.
- [5] N. Mutoh, M. Ogata, and F. Harashima, "New methods to control EMI noises generated in motor drive systems", *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting*, Conference Record of the vol. 4, pp. 2572-2579, 2002.
- [6] S. Chen, T. W. Nehl, X. Huang, E. Pepa, R. DeDoncker, and I. Voss, "Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications", in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, Miami, FL, pp. 14-22, Feb. 2003.
- [7] Jih-Sheng Lai, Xudong Huang, E. Pepa, Shaotang Chen, and T. W. Nehl, "Inverter EMI modeling and simulation methodologies", *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 53, issue 3, pp. 736-744, Jun. 2006.
- [8] Huibin Zhu, Jih-Sheng Lai, A. R. Hefner, Jr., Yuqing Tang, and Chingchi Chen, "Modeling-based examination of conducted EMI emissions from hard and soft-switching PWM inverters", *IEEE Transactions*, vol. 37, pp. 1383-1393, 2001.
- [9] Huibin Zhu, A. R. Hefner, Jr., and J. S. Lai, "Characterization of power electronics system interconnect parasitics using time domain reflectometry", *Power Electronics, IEEE Transactions*, vol. 14, issue 4, pp. 622-628, Jul. 1999.
- [10] Mulay A., Shenai, "IGBT module characterization, modeling and parasitic extraction", *Digital Object Identifier 10.1109/IWIPP.1998.722308*, 17-19, pp. 62-65, Sep. 1998.
- [11] Meng Jin, Zhang Lei, Ma Weiming, Zhao Zhihua, and Pan Qijun, "Common-mode current inductively coupled emission of AC PWM drives", *Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, APEMC 2008*, pp. 650-653, May 2008.
- [12] N. Mutoh, M. Ogata, K. Gulez, and F. Harashima, "New methods to suppress EMI noises produced in the motor drive system", *Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002*. Proceedings of the vol. 3, pp. 1083-1089, 2002.
- [13] Clayton R. Paul, "A comparison of the contributions of common mode and differential-mode currents in radiated emissions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 31, no. 2, pp. 189-193, May 1989.

≡ 필자소개 ≡

김 병 기



2008년 2월: 인제대학교 전자공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정
[주 관심분야] EBG, SI/EMC

이 병 국



1994년 2월: 한양대학교 전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
2001년 12월: Texas A&M University (공학박사)
2002년~2003년: Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University

2003년~2005년: 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자 그룹 선임연구원 (팀장)
2006년~현재: 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
2004년~현재: IEEE Senior Member
2007년~현재: Associate Editor, IEEE Industrial Electronics Society (IES)
2009년~현재: 대한전기학회 Senior Member
[주 관심분야] EV용 Battery Charger, Renewable Energy System, High Speed Motor Drive

나 완 수



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)

1991년~1993년: SSCL Guest Researcher in SSCL(Superconducting Super Collider Laboratory), USA
1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원
1995년~현재: 성균관대학교 정보통신공학부 교수
[주 관심분야] SI, PI, EMI/EMC