

무선전력전송 기술과 4차원 시공간 상의 전자기파 에너지 하베스팅

김종훈 | 이엠씨닥터스(주) 박사/대표



1. 서론

에너지 관련 산업은 날이 갈수록 점점 더 중요한 산업이 되고 있다. 석유를 비롯한 화석연료 자원의 고갈이 예상됨에 따라, 자동차 시장도 화석연료 자동차에서 하이브리드 자동차 및 전기 자동차로 변화하고 있다. 그림 1과 같이, 화석연료를 이용하는 내연기관과, 배터리에 저장된 전기 에너지를 이용하는 전기 모터를 모두 탑재한 하이브리드 자동차를 (hybrid vehicle) 우리 주변에서 쉽게 관찰할 수 있다 [1, 2]. 화석연료와 같은 광물자원의 고갈에 대비하여, 불필요하게 소비되는 에너지를 최소화하는 기술, 예를 들면 전기전자 제품의 소비전력을 (Power Consumption) 최소화 하는 기술의 개

발이 요구될 뿐만 아니라, 새로운 대체 에너지 자원의 발굴을 위하여 최선의 노력을 해야만 한다.

아주 다양한 방법으로 에너지 자원의 개발이 진행될 수 있겠지만, 최근 신재생 에너지 자원 개발의 한 방법으로 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting) 기술이 상당한 주목을 받고 있다. 에너지 하베스팅 기술에 관하여 논의하기 이전에, 먼저 에너지 하베스팅이라는 용어에 관한 정의를 명확하게 이해할 필요가 있다.

에너지 하베스팅이란?

1. 그냥 버려지는 에너지를 수집해 전기로 바꿔 쓰는 기술 (출처 : 과학동아) [3]
2. 태양광 발전처럼 개별 장치들이 태양광, 진동, 열, 바람 등과 같이 자연적인 에너지원으로부터 발생하는 에너지를 모아서 유용한 전기에너지로 바꾸어 사용할 수 있도록 하는 기술 (출처 : 국립중앙과학관) [4]
3. 태양광, 진동, 열, 풍력 등과 같이 자연적인 에너지원으로부터 발생하는 에너지를 전기 에너지로 전환시켜 수확하는 기술, 일상적으로 버려지거나 사용하지 않은 작은 에너지를 수확하여 사용 가능한 전기 에너지로 변환해주는 기술 (출처 : 두산백과) [5]

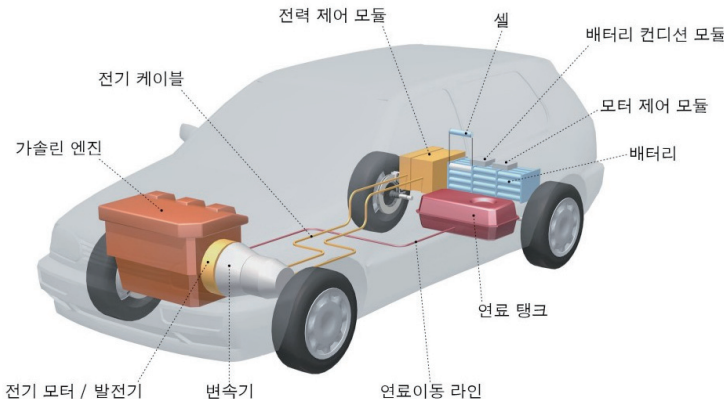


그림 1. 하이브리드 자동차의 에너지원 [출처: Britannica Visual Dictionary] [2]

위의 표현들을 정리하여 보면, 에너지 하베스팅이란, “지금까지는 버려지고 있던 자연적인 형태의 에너지를 이용하여, 전기 에너지를 생성하는 기술”이라고 할 수 있다. 에너지 하베스팅은 자연에서 직접 전기 에너지를 획득할 수 있기 때문에 에너지 공급의 안정성, 보안성 및 지속 가능성을 유지할 수 있고, 환경 공해를 줄일 수 있는 친환경 에너지 활용 기술로 각광받고 있다 [5]. 에너지 하베스팅의 정의를 조금 더 자세하게 분석해 보면, 어떤 형태의 에너지이든, 전기 에너지로 변환한다는 것을 쉽게 인지할 수 있다. 에너지 하베스팅은 결국 전기 에너지를 생성하는 기술,

즉 발전 (power generation, 發電) 기술이라고 해도 과언이 아니다. 그렇다면 에너지 하베스팅과 발전 사이의 관계는 어떨까? 예를 들어서, 버려지는 쓰레기를 이용하여 발전을 한다면, 에너지 하베스팅이라고 불러야 하는 지, 발전이라고 불러야 하는 지, 다소 혼란스러울 수 있다. 에너지 하베스팅과 발전 사이의 차이를 명확하게 구별 할 필요는 없다고 생각한다. 에너지 하베스팅이 전기 에너지를 생성하는 것이므로, 다양한 발전 방법들 중의 하나가 에너지 하베스팅이라고 볼 수 있기 때문이다.

본 원고에서는 그림 2와 같이 무선전력전송 (WPT, Wireless Power Transfer) 기술의 분석을 통하여, 전자기파 에너지 하베스팅 (Electromagnetic Energy Harvesting) 기술의 구현 방법에 대하여 검토해 보고자 한다. 전자기파 에너지 하베스팅을 위하여, 반드시 관리되어야 하는 입력 혹은 출력 관련 주요 변수에 대한 분석을 통하여, 전자기파 에너지 하베스팅을 연구하려는 분들께 작으나마 도움이 되기를 기원한다.

2. 전자기파 에너지 하베스팅의 구현 1단계 : 4차원 시공간 상의 전자기파

자연적인 형태의 에너지는 매우 다양한 형태로 나타날 수 있으며, 참고로 두산 백과에서는 에너지 하베스팅의 종류로서, 신체 에너지 하베스팅, 광 에너지 하베스팅, 진동 에너지 하베스팅,

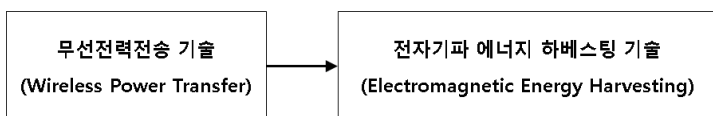


그림 2. 무선전력전송 기술을 통한 전자기파 에너지 하베스팅 기술의 이해

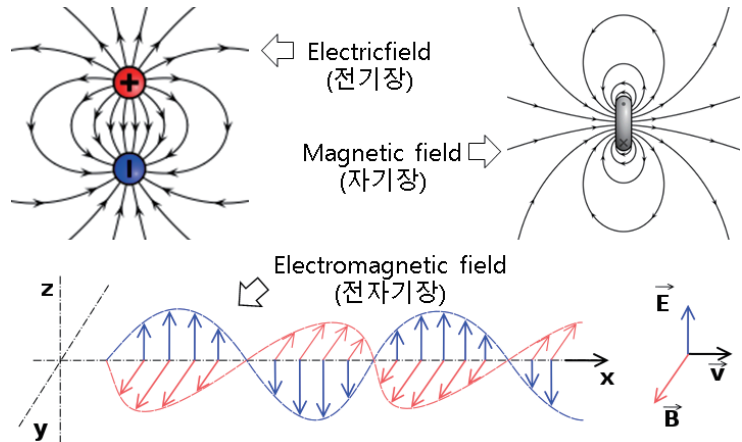


그림 3. 전자기파의 형태 : 전기장, 자기장, 전자기장

열 에너지 하베스팅, 전자파 에너지 하베스팅, 중력 에너지 하베스팅, 위치 에너지 하베스팅 등을 소개하고 있다 [5]. 본 원고에서 관심 있는 부분은 전자기파 에너지 하베스팅이다.

두산백과에서는, 전자파 에너지 하베스팅을 방송전파나 휴대전화 전파 등의 전자파 에너지를 이용하는 방법이라고 설명하고 있지만 [5], 방송전파나 휴대전화 전파 이외에도 매우 다양한 형태의 전자기파가 존재할 수 있다. 전자기파의 형태는 그림 3과 같이 전기장 (Electric field), 자기장 (Magnetic field), 그리고 전자기장 (Electromagnetic field) 형태로 존재할 수 있으며, 각각 혹은 중첩된 형태로 나타날 수도 있다.

자기장의 분포에 관하여, 조금 더 깊이 분석해 보면, 암페어의 법칙으로 설명할 수 있듯이, 전류가 흐르는 환형 (Loop) 도선 주위에는 자기장이 그림 4와 같이 발생한다. 자기장의 세기는 수식 (1)과 같이 비오-사바르의 법칙 (Biot-Savart's Law)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$dB = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \cdot \frac{i \cdot dl \cdot \sin\theta}{r^2} \quad (1)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [T \cdot m/A]$$

그림 4의 오른쪽 위에 표현된 자기장의 세기는, 코일 내부에서는 일정한 값으로 나타나고, 도선 부근에서 가장 큰 값을 가지며, 루프 코일에서 멀어질수록, 거리의 제곱에 반비례하는 정도로 점점 작아진다. 정량적으로는 거리가 10배가 되면, 자기장의 세기는 1/100 즉 -40 dB 만큼 축소된다. 이는 전자기장의 세기는 발원지 (Source, 전압 변화 및 전류 흐름이 존재하는 곳)에서 가까울

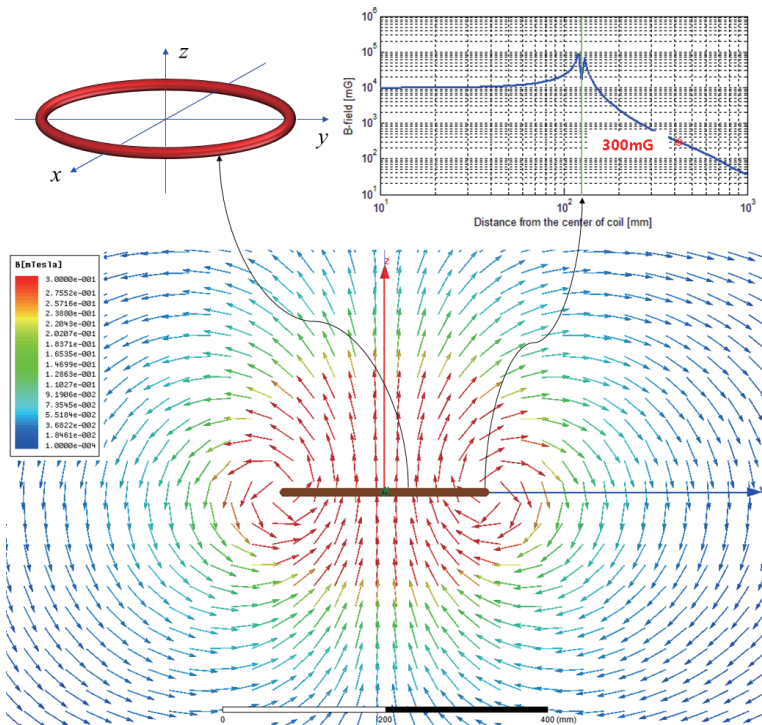


그림 4. 환형 (Loop) 형태의 도선에 흐르는 전류에 의한 도선 주위의 자기장의 분포

어진 지점에서의 자기장의 세기가 300 mG 라고 한다면, 이 값이 강한 값인지, 약한 값인지, 생각해 볼 필요가 있다. 상대적인 비교를 위하여 기준 값이 필요한데, 그 기준은 그림 5의 ICNIRP Guidelines에서 제시하고 있다 [6]. 그림 5에는 2개의 Guideline이 표현되어 있는데, 하나는 1998년에 제정된 기준이고, 다른 하나는 2010년에 제정된 기준이다. 현재 대한민국은 1998년 기준을 상한선으로 채택하고 있으므로, 전자파 노이즈는 1998년 기준을 넘지 않도록 설계되어야 한다. 예를 들어서, 주파수를 20 kHz라고 가정한다면, 그림 5를 통하여 ICNIRP 기준은 62.5 mG (1998년 기준에 근거), 270 mG (2010년 기준에 근거) 이므로, 그림 4에서 관찰된 값 300 mG는 모두 ICNIRP Guideline을 초과하는 큰 값이므로, 자기장의 세기가 축소되도록 설계 변경이 필요하다는 것을 의미한다.

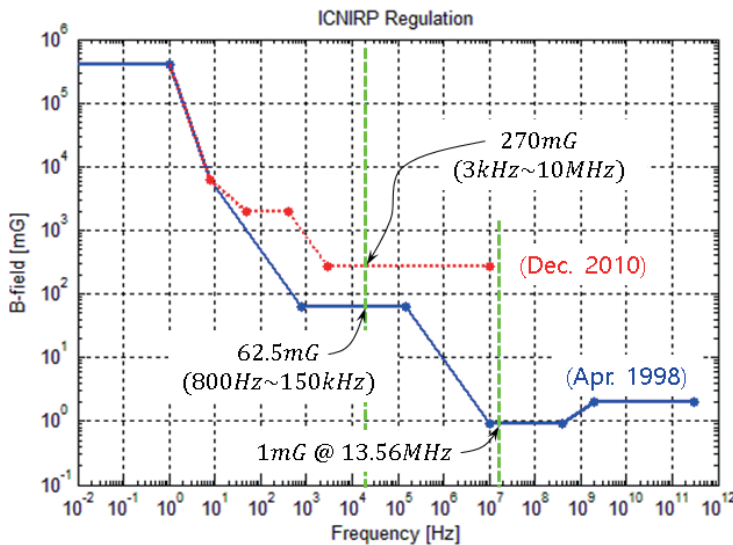


그림 5. ICNIRP Guidelines, 1998, 2010 [6]

그림 5의 시변 전기장, 자기장, 및 전자기장의 세기에 관한 ICNIRP Guideline을 고려하면, 일상생활을 하는 공간에서의 자기장 세기의 최대 값을, 각각의 주파수 별로 개략적으로 추정할 수 있다. 물론 모든 전자기기가 ICNIRP Guideline을 준수한다고 가정했을 때의 추정이므로 정확한 값을 예측할 수는 없겠지만, 터무니없는 실수는 줄일 수는 있을 것으로 기대한다. 에너지 하베스팅을 하려면, ICNIRP Guideline을 참고하여, 3차원 공간에서의 주파수 별 자기장의 세기가 어느 정도인지 설계 초기 단계에서 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

수록 강하게 나타난다는 것이다. 에너지 하베스팅을 통하여, 좀 더 많은 전기 에너지를 생성하려면, 이왕이면 전자기파 발생원과 가까운 곳에서 에너지를 변환하는 것이 유리하다는 것을 의미한다.

그림 4에 표현된 바와 같이, 코일의 가장자리에서 300 mm 떨

3. 전자기파 에너지 하베스팅의 구현 2단계 : 전자기파 에너지의 변환 및 저장

자연적인 형태의 전자기파 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생성하기 위하여, 그림 6과 같은 과정을 거쳐야 한다. 자연계

에 존재하는 전자기파 에너지는 의도적으로 발생되었을 수도 있고, 의도적이지 않게 발생되었을 수도 있으며, 그냥 자연계에 존재할 수도 있다. 전자기파 에너지는 전기장의 세기 [V/m] 혹은 자기장의 세기 [A/m]로 표현되므로, 전기 에너지의 단위인 전압 [V] 및 전류 [A]의 형태로 표현될 수 있도록 변환되어야 한다. 그렇게 변환된 전기 에너지는 저장되어야 효율적으로 사용할 수 있지만, 저장하지 않고 곧바로 사용될 수도 있다.

전자기파 에너지를 전기 에너지로 바꾸기 위하여, 주로 이용되는 물리 현상은 압전효과 (Piezoelectric effect), 열전효과 (Thermoelectric effect), 광전효과 (Photoelectric effect), 전자기효과 (Electromagnetic effect) 등이 있으며, 전자기파 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위하여 전자기효과를 이용한다. 전자기효과는 무선전력전송 기술을 다루면서 일부 설명될 것이다.

무선전력전송 (WPT) 기술은, 도선 (Wire) 형태가 아니라, 주로 공기 (Air) 형태를 통하여 에너지를 전달하는 기술이다. 도선과 같은 유선을 사용하지 않고, 공기와 같은 매질을 통하여 무선으로 에너지를 전송하기 때문에 무선전력전송이라고 한다.

무선전력전송을 위하여, 그림 7와 같은 시스템 구성이 주로 활용된다. 송전 모듈 (Power transmission module)에서 의도적으로 공간상에 전자기파를 형성 시키면, 그 전자기파는 코일 모듈 (Coil module)에서 공기와 같은 매질을 통하여 공간적으로 전달된다. 전자기파가 전파 (Propagation)되는 속도는 유한하므로, 3차원 공간상의 특정한 지점에서 시간에 따라 전자기파의 세기와 방향은 동일하게 유지 될 수 없다. 3차원 공간에 시간 차

원을 더하여, 4차원 시공간이라고 하며, 전자기파는 4차원 시공간 상의 함수이다. 그렇게 공간에 분포된 전자기파 에너지는 수전 모듈 (Power receiving module)을 지나면서 전기 에너지로 변환된다. 이 때 무선전력전송 시스템에서 수전 모듈이 하는 역할이 전자기파 에너지 하베스팅 기술과 매우 유사하므로, 전자기파 에너지 하베스팅에 관한 깊은 이해를 위하여, 무선전력전송 기술을 분석하는 것이다.

4. 무선전력전송(WPT, Wireless Power Transfer) 기술

이제부터 무선전력전송 기술에 대하여 조금 더 자세하게 이해하여 보자. 무선전력전송 시스템의 구성은 그림 7과 같으며, 코일 모듈에서 에너지는 전자기파 형태로 전송되며, 전송되는 방법은 그림 8과 같이 유도 자기장, 유도 전기장, 전자기장으로 구분 된다 [6]. 그 중에서도 최근에 가장 많이 활용되고 있는 유도 자기장을 이용하는 무선전력전송 기술에 대하여 분석하고자 한다. 주로 자기장을 이용한 무선전력전송 기술이 소개될 것이므로, 전기장을 이용하거나, 전자기장을 이용하는 무선전력전송 기술은 다른 문헌을 참고 하기 바란다.

유도 자기장 (Induced Magnetic Field)를 이용하는 무선전력전송 시스템의 구성은 그림 7에서 소개되었으며, 조금 더 자세한 내부 Block Diagram은 그림 9에서 확인할 수 있다.

송전부 (Power Transmission Module)은 AC 220V 60Hz의 전원을 입력 받아서 코일 모듈 (Coil Module)에서 요구하는 주파수의 신호로 변환하는 모듈이다. 먼저 정류기 (Rectifier)를 이용하여 DC 전원으로 바꾸고, DC-DC 컨버터를 이용하여 적절한 전력을 송전할 수 있도록 DC 전압을 가변시킨다. 일반적으로 무선전력전송 시스템을 설계할 때, 코일 모듈에 정전류원 (Constant Current Source)를 입력으로 사용하도록 설계하는데, 이는 부하 (Load)에 정전압원 (Constant Voltage Source)가 인가되도록 제어하기 위함이다. 부하 저항에 정전압원이 인가되므로, 유효 부하 저항 값에 따라, 부하 저항에 흐르는 전류 값이 결정되며, 부하 저항으로 전달되는 전력 (Power)도 부하

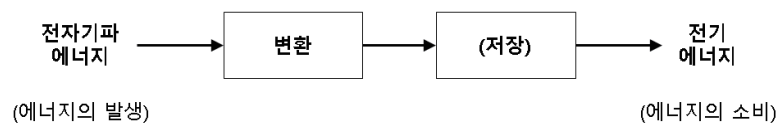


그림 6. 전자기파 에너지 하베스팅 기술의 단계별 프로세스

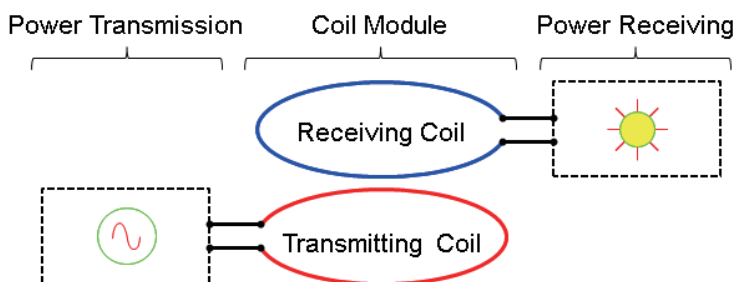


그림 7. 자기장을 이용하는 무선전력전송 시스템 구성도. (송전부 + 코일모듈 + 수전부)

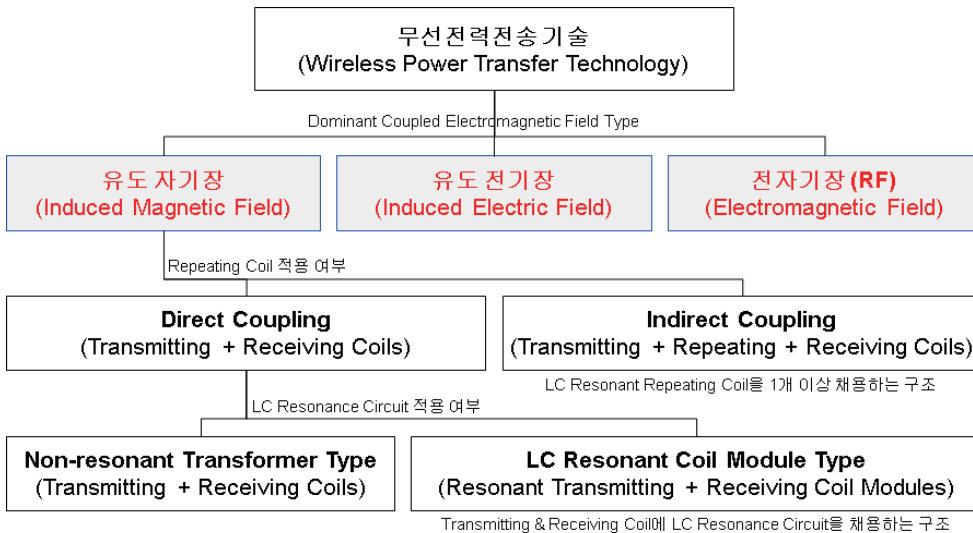


그림 8. 무선전력전송 기술의 분류, 3종류의 Field로 구분할 수 있다. (6)(유도 자기장, 유도 전기장, 전자기장)

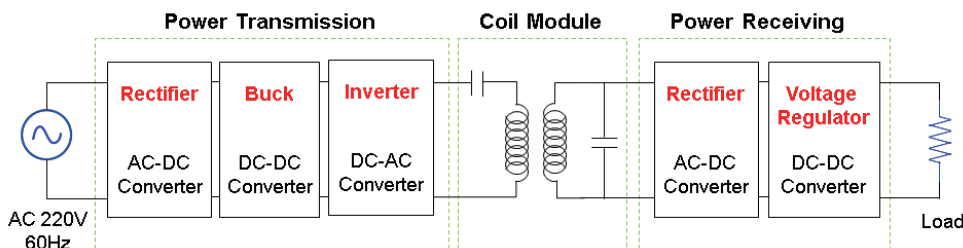


그림 9. 무선전력전송 시스템의 Block Diagram

저항 값에 따라 결정되게 된다. 부하로 전달되는 전력이 변화하더라도, 부하 저항에 인가되는 전압을 일정하게 유지시키기 위하여, Buck Converter의 출력 전압 값을 제어하게 된다. Buck Converter에서 제어된 전압은 인버터 (Inverter)를 통하여 AC 신호로 변환되어 코일 모듈에 인가된다.

수전부(Power Receiving Module)는 일반적으로 정류기 (Rectifier)와 전압 조정기 (Voltage Regulator)로 구성되어 있다. 코일 모듈에서 출력되는 전원은 무선전력전송에 유리한 주파수의 AC 전원이므로, 이를 DC 전원으로 변환시키기 위하여 정류기를 사용한다. 정류기 출력 전압 변동을 무시할 수 없을 때, 부하에 안정된 DC 전압원을 제공하기 위하여 전압 조정기를 사용한다. 부하에 인가되는 전원 전압의 변동이 허용 한계 보다 작은 경우, 가끔 전압 조정기를 생략할 수도 있다.

그림 9의 Block Diagram은, 3개의 모듈이 아니라, 코일 모듈의 좌측 인덕터를 송전부에 포함시키고, 우측 인덕터를 수전부에 포함시켜서, 송전부와 수전부로 2개의 모듈로 구분 할

수도 있다. 전자기파 에너지 하베스팅의 개념으로 볼 때, 송전부는 전자기파를 방사시키고, 수전부는 전자기파 에너지를 수집하여 활용 가능한 전원 형태로 변환하는 역할을 수행하게 된다.

코일 모듈 (Coil Module)의 분석

이제부터 실제 무선으로 전력이 전송되는 코일 모듈에 대하여 살펴보기로 한다. 코일 모듈의 구성 (Topology)은 그림 10과 같이 24 종류

의 기본 회로 구성으로 표현 할 수 있다 [8]. 물론 기본 회로를 조합하여, 훨씬 더 다양한 토폴로지가 존재 할 수도 있다. 현재까지 알려진 자료를 보면, 24 종류의 기본 토폴로지 중에서, 대략 4 종류 정도만 분석된 것으로 추정되므로, 코일 모듈 토폴로지 분석만으로도 해야 할 연구가 매우 많음을 알 수 있다.

코일 모듈에서 가장 대표적인 토폴로지는 그림 11과 같은 CSSR 토폴로지이다. CSSR 토폴로지의 장점은, 입력으로 정전류를 인가하면, 부하에 정전압원이 형성된다는 것이다. 또한 회로가 간단하여 분석도 매우 용이하며, 수식이 복잡하지 않고 간결하게 나타난다. CSSR 및 CSPR 토폴로지를 갖는 무선전력 전송 시스템의 회로 분석 결과는 참고 문헌 [8]에 설명되어 있다. 토폴로지 마다 장단점이 있으므로, 부하에서 요구하는 조건에 따라, 최적의 코일 모듈 토폴로지를 선택하는 것이 좋다. 예를 들어서 CSPR 토폴로지의 장점은 수신 코일의 크기를 줄일 수 있다는 것이므로, 모바일 기기에 유리한 토폴로지라고 할 수 있다. 이처럼, 전자기파 에너지 하베스팅 구현 관점에서, 4차원

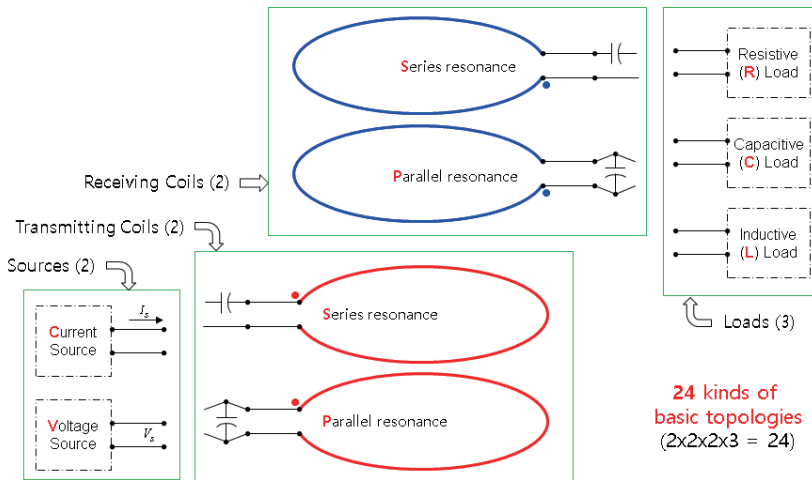


그림 10. 코일 모듈 (Coil Module)의 구성 (Topology) [8]



그림 11. 대표적인 코일 모듈 토폴로지 : CSSR [9] (Constant Current Source + Series Resonance + Series Resonance + Resistive Load)

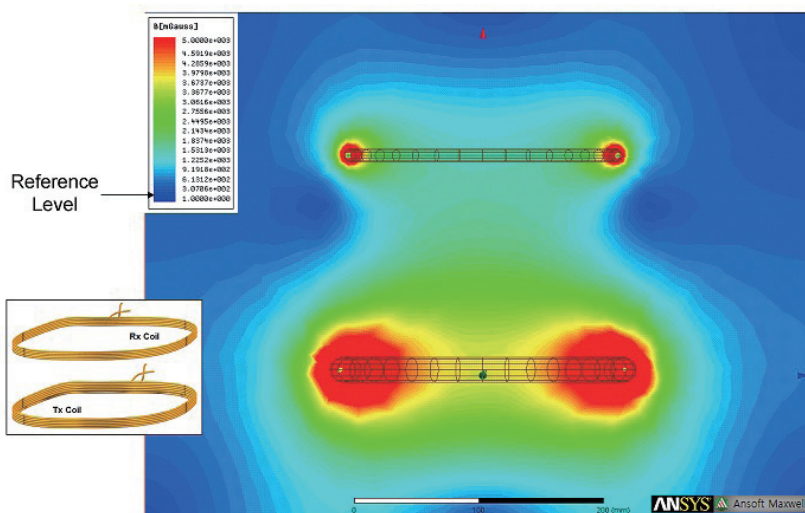


그림 12. 코일 모듈에서 TX 코일 및 RX 코일 주변에서의 자기장 분포 [9]

시공간 상의 전자기파를 수집하기 위한 수신 코일 (혹은 수신 안테나) 토폴로지는 부하의 제약 사항을 고려하여 선정되어야 한다는 것을 의미한다.

무선전력전송 시스템에서 코일 모듈을 통하여, 그림 12와 같이 전자파의 형태로 에너지가 전달된다. 대부분의 전자파 에너지가 Transmitting Coil (TX)와 Receiving Coil (RX) 사이에 존

재함을 확인할 수 있다. 그러나 대 전력을 전송해야 하는 경우에는 외부로 방사되는 전자기파 에너지가 무시할 수 없을 정도로, 즉 ICNIRP Guideline 보다 클 수도 있다. 그러므로 무선전력전송 시스템에서 방사되는 전자파가 허용하는 ICNIRP Guideline 보다 작은 값을 갖도록 신중하게 설계하여야 한다.

코일 모듈에서 중요한 변수는 수식 (2)~(3)을 이용하여 설명한다. 수신 코일 (RX Coil)에 유도되는 기전력 V_{emf} (Voltage, electro-motive force)는 수식 (2)와 같이 표현되며, 유도 기전력이 수신 코일에서 발생하는 전압원 (Voltage Source)이므로, 가능한 유도 기전력이 크게 되도록 코일 모듈을 설계하는 것이 유리하다.

$$V_{emf} = j\omega M \cdot I_{LTX} \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$M = k \cdot \sqrt{L_{TX} \cdot L_{RX}} \quad (3)$$

유도 기전력은 주파수 f 에 비례하므로, 전자기파 에너지 하베스팅 관점으로 볼 때, 전자기파의 주파수가 높을수록 유도 기전력을 증가시키기 유리하므로, 가급적 높은 주파수의 전자기파 에너지를 하베스팅 하는 것이 유리하다고 할 수 있겠다.

유도 기전력은 송신 코일(TX

Coil)에 흐르는 전류 (I_{LTX})의 세기에도 비례하므로, 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 상대적으로 강한 전자기파를 방사시키는 전자기파 발생원 주변에서 높은 유도 기전력을 확보할 수 있다는 것도 확인된다.

유도 기전력은 상호 인덕턴스 (M , Mutual Inductance)에 비례하므로, 높은 상호 인덕턴스 값을 갖도록 코일 모듈을 설계하

여야 한다. 상호 인덕턴스 값은 수식 (3)과 같이 송전 코일 (TX coil)의 Inductance (L_{TX})와 수전 코일 (RX coil)의 Inductance (L_{RX}) 값의 곱의 제곱근에 비례한다. 그러므로 코일의 인덕턴스가 큰 값이 되도록 설계 하는 것이 유리하다. 그러나 인덕턴스가 증가하게 되면 코일 양단에 인가되는 전압의 세기도 높아져서 코일이 파손될 수 있고, 인덕턴스를 증가시키기 위하여 코일의 턴수 (turn)를 높이면, 코일이 무거워지는 단점도 있다. 그래서 절연 파괴가 발생하지 않고 무게에 관한 제한을 만족하는 범위 내에서 가능한 인덕턴스가 크게 되도록 설계하는 것이 유리하다. 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 본다면, 송전 코일 (TX coil)은 제어할 수 없는 변수이므로 무시하고, 수전 코일 (RX coil)은 ① 절연 파괴가 일어나지 않고, ② 무게 및 부피에 관한 제약 사항도 만족하는 범위 내에서 가능한 큰 인덕턴스가 되도록 설계하는 것이 유리하다는 점을 잊지 말아야 한다.

상호 인덕턴스 (M)은, 수식 (3)에서 볼 수 있듯이, 자기 결합 계수 (k , Magnetic Coupling Coefficient)에도 비례한다. 자기 결합 계수는 송전 코일 및 수전 코일의 배치와 주변 환경에 의하여 결정된다. 자기 결합 계수에 영향을 주는 설계 변수는 송전 코일의 크기 (직경), 수전 코일의 크기 (직경), 두 코일 사이의 거리, 두 코일의 상대적인 배치 방향, 코일 주변의 Ferrite와 같은 자성 재료의 형상, 코일 주변의 금속성 물질의 종류 및 형상 등에 따라 결정된다. 코일의 직경은 크게, 두 코일 사이의 거리는 가깝게, 자성 재료 및 금속성 물질의 형상은 자속의 흐름이 가능한 두 코일 사이에 모일 수 있도록, 금속성 물질의 경우 비투자율이 가급적 낮은 재료를 사용하도록 설계하는 것이 유리하다. 이왕이면, 3D EM simulation을 통하여 자기 결합 계수가 최대가 되도록 설계하는 것이,

설계 품질을 높일 수 있는 제품 개발 프로세스라고 할 수 있겠다. 결과적으로, 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 자기 결합 계수 (k)를 높이기 위하여, ① 수전 코일의 직경을 크게 하고, ② 수전 코일의 위치는 전자기파 발생원

에 가깝게 배치하고, ③ 수전 코일의 방향은 쇠교 자속이 많도록 4차원 공간상의 자기장 방향과 수직이 되는 방향으로 배치하고, ④ 자성 재료와 금속성 물질의 형상은 3D EM simulation을 통하여 자기 결합 계수 값이 최대가 되는 형상을 찾고, ⑤ 금속성 물질의 종류는 비투자율이 1에 가까워서 손실이 작은 물질을 선택하여, 자기 결합 계수를 증가시켜서 유도 기전력을 높이도록 하는 것이 유리하다고 말할 수 있다.

수전부 모듈 (Power Receiving Module)의 분석

마지막으로 수전부에 관하여 분석 해 보자. 수전 코일 (RX coil)에 유도되는 기전력을 V_{emf} (Voltage, electro-motive force) 라고 할 때, 수전 코일 및 수전부 모듈을 모두 포함하는 회로 구성 사례를 그림 13과 같이 표현하였다. 전자기파 에너지 하베스팅을 위한 회로도도 그림 13과 유사할 것이다.

CSSR 토폴로지가 가정되었으므로 수전 코일의 인덕턴스 (L_{RX}) 성분과, 튜닝 커패시터 (C_{RX})는 직렬로 연결되어 있다. 코일의 내부 저항 $R_{L_{RX}}$ 값과 커패시터의 내부 저항 $R_{C_{RX}}$ 값도 중요하므로 회로에 포함되어 있다. 무선전력전송 효율을 높이기 위하여, 동작 주파수는 수식 (4)의 LC 공진 주파수와 일치시키는 것이 유리하다. 이는 공진 주파수에서 최소 임피던스가 되며, 최대 전류가 흐르기 때문이다. 반대로 동작 주파수가 이미 결정되었다면, LC 공진주파수가 동작 주파수와 일치하도록 수식 (5)를 이용하여, 튜닝 커패시터 값을 결정해야 한다. 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 수집하려는 전자기파의 주파수와 수전 코일 (RX coil)의 LC 공진 주파수를 동일하게 설계하는 것이 효율 관점에서 유리하다고 할 수 있다.

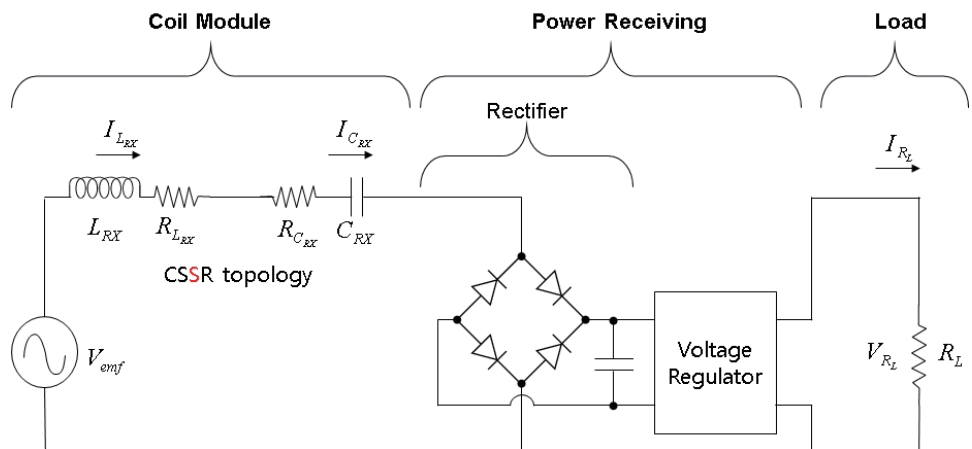


그림 13. 수전부 모듈 (Power Receiving Module)의 구성 사례

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{RX} \cdot C_{RX}}} \quad (4)$$

$$C_{RX} = \frac{1}{L_{RX} \cdot (2\pi f_r)^2} \quad (5)$$

수전 코일과 튜닝 커패시터의 내부 저항 값은 손실을 결정하며, 저항 값이 큰 경우 열 (Thermal) 문제로 인하여, 온도가 매우 높아질 수 있다. 이는 시스템의 신뢰성에 영향을 주므로, 가급적 저항 값이 작게 되도록 설계하여야 한다. 이는 대전력의 전력을 전송하려 할 때, 매우 심각하게 고려해야 하는 변수이기도 하다. 저전력일 경우에는 열 문제 보다는 “유효 전력 전송 효율”을 높이기 위하여, 내부 저항 값은 작게 되도록 설계해야 한다. 결과적으로, 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 수전 코일과 튜닝 커패시터의 내부 저항 값이 작게 되도록 설계해야 열 (Thermal) 문제로 인한 신뢰성을 높일 수 있고, “유효 전력 전송 효율”을 높일 수 있다는 점을 주의해야 한다.

정류기 (Rectifier) 회로에서 주의 깊게 관찰해야 하는 변수는, 다이오드 (Diode)에 의한 전압 강하 (Voltage Drop)와, 다이오드의 내부 저항 값이다. 내부 저항 이슈는 앞에서 다룬 코일과 커패시터의 내부 저항 이슈와 거의 동일하다. 여기에서 주의 깊게 살펴 봐야 할 변수는 다이오드의 문턱 전압 (VTH, Threshold Voltage)이며 대체로 0.7 V 정도의 값을 갖는다. 다이오드 양단의 순방향 전압이 문턱 전압 보다 높아야 다이오드가 정상적으로 동작하기 때문에, 수전 코일에 유도되는 기전력의 값이 최소한 0.7 V 혹은 1.4 V 보다 클 때에만 정류기가 정상 동작한다는 것을 의미한다. 아주 저전력을 전송하려는 경우, 수신 코일에 형성되는 유도 기전력을 높일 수 있도록 코일 모듈을 설계해야 한다. 그러므로 전자기파 에너지 하베스팅을 위하여, 수전부 (Power Receiving Module)의 정류기 (Rectifier) 회로의 다이오드 (Diode)에 의한 전압 강하 (Voltage Drop)를 고려하여 설계해야 하며, 가능한 내부 저항이 낮은 다이오드를 선정하는 것이 유리하다고 말할 수 있다.

무선전력전송 시스템의 수전부에 포함되는 전압 조정기 (Voltage Regulator)에서 중요한 변수는, 일반적으로 사용되는 전압 조정기와 크게 다르지 않다. 주의해야 할 주요 설계 변수는 “유효 전력 전송 효율”과 “출력 전압 안정도”이다. 최근에는 상용으로 구매할 수 있는 다양한 제품이 많으므로, 직접 설계하는 것도 좋지만, 상용 제품을 구매하는 것도 효과적일 수 있다.

마지막으로, 본 원고에서 다루지는 않았지만, 무선전력전송 시스템의 성능 및 품질을 향상시키기 위한 다양한 기술들이 지속적으로 소개되고 있다. 예를 들면, 부하에 전달되는 전력 및 전압 안정도를 높이기 위하여, 수전부에서의 주요 전압 전류 값을 송전부로 WIFI 등의 방법으로 전송하게 되면, 보다 안정된 부하 전압을 구현할 수 있다. 또한 수신 코일의 방향성을 고려하여 회전 전자파의 개념도 도입되고 있다.

5. 결 론


전자기파 에너지 하베스팅 (Electromagnetic Energy Harvesting) 시스템의 구현을 위하여 중요하게 관리되어야 하는, 설계 관점의 주의 사항들을, 무선전력전송 (WPT, Wireless Power Transfer) 기술 관점에서 분석하였다. 아래에서 다시 정리하는 설계 가이드를 활용하여, 시행착오를 줄일 수 있게 되기를 바란다.

전자기파 에너지 하베스팅 시스템 구현을 위한 설계 가이드

1. 좀 더 많은 전기 에너지를 생성하려면, 이왕이면 전자기파 발생원과 가까운 곳에서 에너지를 변환하는 것이 유리하다.
2. ICNIRP Guideline을 참고하여, 3차원 공간에서의 주파수별 자기장의 세기가 어느 정도인지 설계 초기 단계에서 추정할 수 있다.
3. 4차원 시공간 상의 전자기파를 수집하기 위한 수신 코일 (혹은 수신 안테나) 토폴로지는 부하의 제약 사항을 고려하여 선정되어야 한다.
4. 전자기파의 주파수가 높을수록 유도 기전력을 증가시키기 유리하므로, 가급적 높은 주파수의 전자기파 에너지를 하베스팅 하는 것이 유리하다.
5. 상대적으로 강한 전자기파를 방사시키는 전자기파 발생원 주변에서 높은 유도 기전력을 확보할 수 있다.
6. 송전 코일 (TX coil)은 제어할 수 없는 변수이므로 무시하고, 수전 코일 (RX coil)은 ① 절연 파괴가 일어나지 않고, ② 무게 및 부피에 관한 제약 사항도 만족하는 범위 내에서 가능한 큰 인덕턴스가 되도록 설계하는 것이 유리하다.
7. 자기 결합 계수 (k)를 높이기 위하여, ① 수전 코일의 직경을 크게 하고, ② 수전 코일의 위치는 전자기파 발생원에

가깝게 배치하고, ③ 수전 코일의 방향은 쇠교 자속이 많도록 4차원 공간상의 자기장 방향과 수직이 되는 방향으로 배치하고, ④ 자성 재료와 금속성 물질의 형상은 3D EM simulation을 통하여 자기 결합 계수 값이 최대가 되는 형상을 찾고, ⑤ 금속성 물질의 종류는 비투자율이 1에 가까워서 손실이 작은 물질을 선택하여, 자기 결합 계수를 증가시켜서 유도 기전력을 높이도록 하는 것이 유리하다.

8. 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 수집하려는 전자기파의 주파수와 수전 코일 (RX coil)의 LC 공진 주파수를 동일하게 설계하는 것이 효율 관점에서 유리하다.
9. 전자기파 에너지 하베스팅 관점에서 볼 때, 수전 코일과 튜닝 커패시터의 내부 저항 값이 작게 되도록 설계해야 열 (Thermal) 문제로 인한 신뢰성을 높일 수 있고, “유효 전력 전송 효율”을 높일 수 있다.
10. 전자기파 에너지 하베스팅을 위하여, 수전부 (Power Receiving Module)의 정류기 (Rectifier) 회로의 다이오드 (Diode)에 의한 전압 강하 (Voltage Drop)을 고려하여 설계해야 하며, 가능한 내부 저항이 낮은 다이오드를 선정하는 것이 유리하다

이제부터, 전자기파 에너지 하베스팅 관련하여 좋은 아이디어가 발생한다면, 잊지 않도록 반드시 메모해 두고, 필자를 비롯한 주변의 전문가들과의 상담을 통하여, 아이디어의 실현 가능성을 높일 수 있기를 희망한다. 향후, 전자기파 에너지 하베스팅 기술이 더 많이 발전되기를 기원하며, 지금까지 미처 생각하지 못했던 다양한 제품들이 제안되고 협의되어, 상품까지 개발되기를 기원한다. 너무나도 완벽한 제품을 개발해야 한다고 생각하지 말고, 틈새시장을 잘 공략한다면, 반드시 좋은 결과가 있을 것으로 확신한다. 

참고문헌

[1] 나무위키(<https://namu.wiki>)에서 “하이브리드 자동차”로 검색, 나무위키, 2018.03<https://namu.wi/w/%ED%95%98%EC%9D%B4%EB%B8%8C%EB%A6%AC%EB%93%9C%20%EC%9E%90%EB%8F%99%EC%B0%A8>

[2] Britannica Visual Dictionary © QA International 2012. (www.ikonet.com) [http://terms.naver.com/entry.nhn?](http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1835329&cid=49068&categoryId=49068)

[docId=1835329&cid=49068&categoryId=49068](http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1835329&cid=49068&categoryId=49068)

[3] 우아영, “에너지 하베스팅 스마트 시티를 책임진다”, 과학동아 - 물리산책, 2015.04<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3579425&cid=58941&categoryId=58960>

[4] 국립중앙과학관 - 사물인터넷 (<http://www.science.go.kr/>), 에너지 하베스팅<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3386849&cid=58369&categoryId=58369>

[5] 두산백과, 에너지하베스팅<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2847680&cid=40942&categoryId=32375>

[6] ICNIRP Guidelines, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)”, 1998, 2010

[7] Jonghoon Kim, “Design of Resonant Coil Module for Wireless Power Transfer System,” KOITA Tech-Issue Paper (TIP), www.koita.or.kr, Vol. 2-3, pp. 6-14, 2013

[8] Jonghoon Kim, Hongseok Kim, In-Myoung Kim, Young-il Kim, Seungyoung Ahn, Jiseong Kim, and Joungho Kim, "Comparison of Series and Parallel Resonance Circuit Topologies of Receiving Coil for Wireless Power Transfer," International Forum on Electric Vehicle (IFEV), pp. 123-141, Nov, 2011

[9] Jonghoon Kim, Hongseok Kim, Mijoo Kim, Seungyoung Ahn, Jiseong Kim, and Joungho Kim, "Analysis of EMF Noise from the Receiving Coil Topologies for Wireless Power Transfer," Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Best Paper Award, pp. 645-648, TH-AM-PE2-2, May 2012.