

7m 원격 무선전력전송 개발 사례

최보환*, 이은수*, 김지훈**, 임춘택*
KAIST 원자력 및 양자공학과*, KAIST 전기 및 전자공학과

Development of 7m-off-Long-Distance Wireless Power Transfer System

Bo H. Choi*, Eun S. Lee*, Ji H. Kim**, Chun T. Rim*

Dept. of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST*, Dept. of Electrical Engineering, KAIST**

ABSTRACT

본 논문은 다이폴 코일 공진방식(DCRS, Dipole Coil Resonant System)을 사용한 원격 무선전력전송 개발 사례를 소개한다. 제안된 다이폴 코일 공진방식은 기존의 자기결합 공진방식(CMRS, Coupled Magnetic Resonance System)에 비하여 송신, 수신코일로만 이루어진 간단한 코일 구조와 작은 부피를 가지며, 공진도 Q 를 100이하로 설계하여 주변 환경 변화에 강인한 전력전달 특성을 가진다. 본 논문에서는 원전 중대사고 시 격납건물 필수계측기용 소형 비상전원으로 개발된 10W급 7m 원격 무선전력전송 장치의 구성 및 설계과정을 제시한다.

1. 서론

최근 무선전력 전송은 가전, 전기자동차, 조명, 국방, 의료, 그리고 원자력산업에 이르기까지 적용 분야가 크게 확대되고 있다^[1]. 장거리 무선전력 전송기술은 지난 2007년 미국 MIT(메사추세츠 공과대학교)에서 자기결합 공진방식(CMRS, Coupled Magnetic Resonance System)을 사용해 2.1m 거리에서 60W 전력 전송에 성공한 이후 세계적으로 커다란 관심을 받았다. 그러나 일반적으로 4개(입력코일, 송신코일, 수신코일, 부하코일)의 복잡한 코일구조, 10MHz 이상의 높은 동작주파수, 2,000 이상의 높은 공진도를 가지는 기존의 자기결합 공진방식은 송수신코일의 큰 부피와 낮은 효율, 온도변화 등 주변 환경 변화에 지나치게 민감한 특성 등의 문제로 상용화에 어려움을 겪어왔다.

특히 장거리 무선전력전송 기술이 후쿠시마 원자력 발전소 사고와 같은 중대사고 시 필수 계측기용 비상전원으로 사용될 경우 급격히 변화하는 격납건물 내부의 높은 온도 및 습도는 물론 무선전력전송 범위 내에 임의로 위치할 수 있는 다양한 형태의 금속 장애물에도 강인한 전력전달 특성을 유지 할 수 있어야 한다. 2012년 KAIST에서는 기존 기술의 단점을 극복 할 수 있는 다이폴 코일 공진방식(DCRS, Dipole Coil Resonant System)을 제시하고, 이를 사용하여 세계 최장거리 무선전력전송(5m, 209W) 기술 개발에 성공하였다^[2].

다이폴 코일 공진방식은 기존의 자기결합 공진방식과 비교하여 코일 수를 2개(송신코일, 수신코일)로 줄이고 최적화된 다이폴 구조의 고주파 자성체(페라이트 코어)를 사용해 부피를 10배 이상 축소했으며 주파수 변동이 적어 주변 환경변화에는 20배 이상 강인하면서도 100kHz대의 낮은 주파수에서 동작해 비교적 높은 효율을 가지는 장점을 가진다.

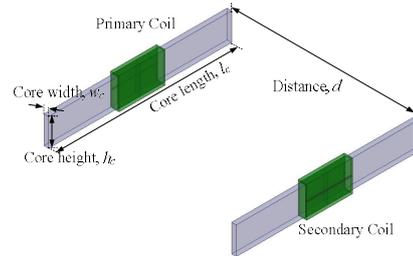


그림 1 제안하는 다이폴 코일 공진방식 송수신코일

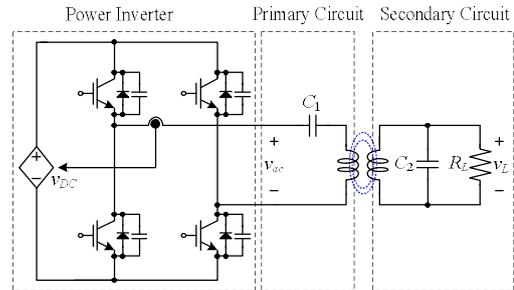


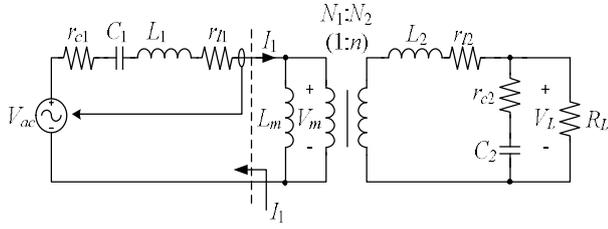
그림 2 직렬-병렬 공진회로를 포함하는 다이폴 코일 공진방식 원격 전력전송 시스템

본 논문에서는 그림 1과 같이 다이폴 코일 공진방식을 사용하여 원전 중대사고 시 격납건물 필수계측기용 소형 비상전원으로 개발된 10W급 7m 원격 무선전력전송 기술의 개발 사례를 소개한다.

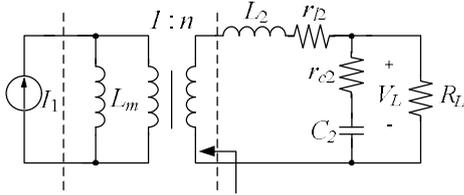
2. 다이폴 코일 공진 방식

제안하는 다이폴 코일은 1개의 송신코일과 1개의 수신코일의 조합으로 이루어져 있다. 각 코일은 얇고 길쭉한 모양의 고주파 자성체를 포함하고 있으며, 고주파 전류 구동을 위해 리츠(Litz) 와이어를 권선으로 사용하였다. 그림 2는 원격 무선전력전송 시스템을 구성하는 고주파 인버터, 송신회로, 수신회로의 구성을 나타낸다. 고주파 인버터는 송신코일 구동을 위한 전류제어 회로를 포함하며 송신회로의 공진주파수 보다 약간 높은 스위칭 주파수를 선택하여 영전압 스위칭으로 동작한다. 송신회로와 수신회로는 각각 직렬, 병렬로 연결된 공진 커패시터를 포함한다. 직렬-병렬 방식(SP)을 사용한 공진 커패시터 구조는 수신회로에서 직렬-직렬(SS) 방식에 비하여 높은 출력전압을 얻을 수 있도록 한다.

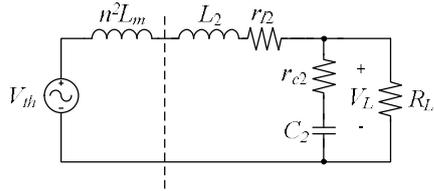
송수신코일 및 공진 커패시터의 내부저항(Equivalent series resistance)을 고려한 경우 제안하는 원격 무선전력전송



(a) 전류제어형 인버터를 포함한 등가회로



(b) 정전류로 제어되는 송신회로를 포함한 등가회로



(c) 테브난 등가전압원을 포함하는 수신코일측 등가회로

그림 3 제안하는 원격 무선전력전송 시스템의 등가회로 변환 시스템은 그림 3의 등가회로로 나타낼 수 있다. 고주파 인버터가 송신코일 전류를 일정하게 제어할 경우, 수신회로의 공진도 Q , 출력전압 V_L , 출력전력 P_L 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\omega_r r_2}{\Delta\omega} = \frac{R_L // r_e}{\omega_s L_2} \quad (1)$$

$$V_L = \omega_s L_m I_1 Q \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{V_{th}^2 Q (r_e - \omega_s L_2 Q)}{\omega_s L_2 r_e} \quad (3)$$

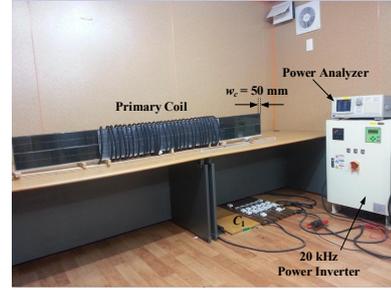
이 때 등가 내부저항 r_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_e \equiv \frac{(\omega_s L_2)^2}{r_{l2}} // \frac{1}{r_{c2} (\omega_s C_2)^2} = \frac{(\omega_s L_2)^2}{r_{el} + r_{ec} (\omega_s^2 L_2 C_2)^2} \quad (4)$$

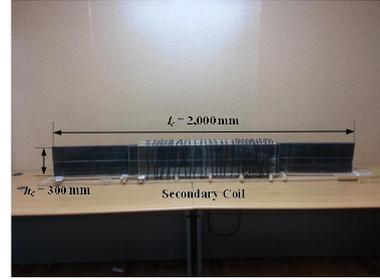
제안하는 다이폴 코일 공진방식에서 수신회로의 공진도는 통상 100 이하로 설계되어 1% 정도의 공진주파수 변동시에도 강인한 전력전달 특성을 가진다. (3)과 같이 정의되는 출력전력은 수신회로의 등가 내부저항에 의해 제한됨을 알 수 있다.

3. 실험 결과

다이폴 코일 공진방식을 사용한 7m 원격 무선전력전송 기술의 구현을 위하여 그림 4와 같이 가로, 세로, 높이 각각 2,000mm, 300mm, 50mm인 다이폴 구조의 페라이트 자성체가 송수신 코일에 사용되었다. 송신코일 권선수는 사용된 자성체의



(a) 송신코일 및 20kHz 고주파 인버터



(b) 수신코일

그림 4 제안하는 원격 무선전력전송 시스템 시작품

포화를 고려하여 30턴으로 선택하였다. 20kHz로 동작하는 고주파 인버터가 송신코일 전류의 첨두치를 40A로 제어하고 수신코일의 권선수가 20턴일 때, 출력전압은 320V, 출력전력은 11.1W임을 실험적으로 확인하였다. 보다 높은 동작주파수를 사용하면 제안하는 원격 무선전력전송 시스템의 크기를 축소할 수 있으나, 송수신 코일의 권선에 존재하는 기생 커패시턴스 및 자성체의 철손이 증가하게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 원전 중대사고시 격납건물 필수계측기용 비상전원으로 사용할 수 있는 다이폴 코일 공진방식 7m 원격 무선전력전송 기술을 제안하였다. 제안하는 다이폴 공진방식은 페라이트 자성체를 사용한 다이폴 구조의 송신, 수신 코일 두 개로 이루어져 있으며, 송수신단에 직렬-병렬 공진회로를 사용하여 11.1W 전력전송을 확인 하였다. 또한 공진도를 100 이하로 제한하여 인체나 금속과편이 주변에 산재하여도 무선전력 전송에는 아무런 지장이 없어 재난재해에 아주 강한 특성을 가지는 장점이 있다.

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20121610100030)

참고 문헌

- [1] S. J. Yoo, B. H. Choi, S. Y. Jung, and C. T. Rim, "Highly reliable power and communication system for essential instruments under a severe accidents of NPP," *Transactions of Korean Nuclear Society*, vol. 2, pp. 1005–1006, Oct. 2013.
- [2] C. Park, S. Lee, and C. Rim, "5m-off-long-distance inductive power transfer system using optimum shaped dipole coils," in *2012 IPEMC conf.*, pp. 1137–1142.