

평판형 급집전코일의 공진주파수 변화를 이용한 접촉식 무선충전 시스템

이병훈, 김현재, 임춘택

Dept. of Nuclear and Quantum Eng, KAIST

Abstract

본 논문에서는 휴머노이드 로봇 등에 적용하기 위해, 평판형 급전코일과 집전코일의 접촉 유무에 따라 공진주파수가 변화하는 접촉식 무선충전 시스템을 제안하였다. 다양한 급집전코일에 대해 코일의 형상과 위치별 급집전효율 및 EMF(ElectroMagnetic Field)의 영향을 연구했다. 평판형 집전코일은 어레이 형태로 바닥에 설치되는데, 입력전원에 대해 각각 병렬로 연결되어 있어서 집전코일이 접촉하지 않는 경우에는 공진주파수가 입력전원의 주파수를 크게 벗어나서 자동으로 전원공급이 최소화된다. 집전코일이 급전코일 어레이 위에 위치하는 경우에는, 급전코일의 공진주파수가 입력전원의 주파수와 일치하게 되어 전력이 공급되게 된다. 따라서 집전코일이 덮고 있는 부분만 급전코일 어레이에 전력이 공급되므로, 급집전 효율이 높고 인체에 대한 자기장 노출이 작아져서, 경제적이고 안전한 무선충전 시스템을 구성할 수 있다.

1. 서론

모든 이동기기의 전력수급 문제를 해결하는 것은 유틸리티 실현을 위한 필수조건이다. 이를 위해 이동기기(mobile device)를 중심으로 무선 전력전송기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고, 최근에는 로봇에도 적용되고 있다.

지금까지 제시된 모바일용 자기유도방식 평판형 급집전코일은 급전코일과 집전코일을 배치시키는 방법에 따라서 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 고정 위치(fixed-positioning) 방식으로서, 전동 칩솔과 같이 집전코일이 지정된 위치의 급전코일에 놓일 수 있도록 구조적으로 설계된 것이다. 이 방법은 집전코일이 놓일 수 있는 위치가 제한적이며, 급전코일 위에 정확히 배치되지 않은 경우에는 상호 인덕턴스가 감소하여 전력 전달효율이 좋지 않게 된다 [1]. 두 번째는 기계적으로 움직이는 급전코일에 의한 자유 위치(free-positioning) 방식으로서, 집전코일이 위치한 곳으로 급전코일이 이동하여 전력전달 효율을 높이게 된다. 하지만 급전코일이 한 개 이상인 경우에는 급전코일을 이동시키기 위한 모터와 집전코일의 위치를 찾기 위한 장치가 필요하므로 시스템이 복잡하다는 단점이 있다 [1]. 마지막으로 세 개의 급전 레이어로 구성된 평판형 급전코일로서, 이 방법은 각각의 레이어가 다른 레이어의 자기장이 약한 부분을 보완해주게 되어 전체적으로 균일한 자기장을 발생시킨다 [2]. 이러한 방식은 다중 집전과 자유 위치충전 면에서 장점이 있으나, 집전코일이 위치하지 않은 부분에서의 EMF 발생 문제와 급전코일이 하나의 극성을 가지는 코일로 제작되어 집전 코일을 통과하는 자기장의 크기가 작다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 집전

코일이 위치하지 않는 부분에서의 전력공급을 차단하여 EMF 발생을 최소화하는 동시에 전력소모를 최소화하는 경제적이고 안전한 무선충전 시스템을 제안하였다.

2. 제안된 평판형 급집전코일의 원리

Fig. 1은 공진주파수 변화를 이용한 휴머노이드 로봇용 접촉식 무선충전 시스템의 평판형 급집전코일이다. 로봇에 전력을 전송하기 위하여 로봇의 발에는 집전코일을 부착하였고 급전코일은 바닥에 평판형으로 설치하였다. 그래서 로봇 발이 있는 급전코일에만 자장이 발생되고 그렇지 않은 곳에서는 자장발생을 억제되도록 하였다.

평판형 급전코일은 N개의 급전코일과 직렬공진을 위한 커패시터가 일정한 주파수를 갖는 전압원에 병렬 연결된 형태로 구성되어 있다. 집전코일이 부착되어 있는 집전플레이트는 이 중 M개의 급전코일 위를 덮게된다. L_p 와 C_p 는 각각 급전코일의 인덕턴스와 공진 커패시턴스이며, L_m 는 급전코일의 누설 인덕턴스, L_m 은 집전코일과의 자화 인덕턴스, L_s , C_s 와 R_L 는 집전코일의 누설 인덕턴스, 공진 커패시턴스, 부하저항이다. 이때 1차에서 보이는 2차의 등가 임피던스는 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$Z_o = \frac{j\omega L_m(j\omega L_s/n^2 + \frac{1}{j\omega n^2 C_s} + R_L/n^2)}{j\omega L_m + j\omega L_s/n^2 + \frac{1}{j\omega n^2 C_s} + R_L/n^2} \quad (1)$$

(1)에서 (2)를 만족하는 공진 커패시터 C_s 를 선택한다면 등가 부하 임피던스는 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

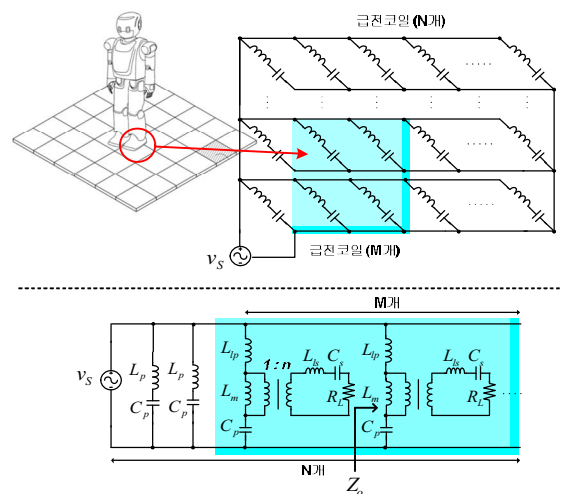


Fig. 1 로봇 무선전력전송을 위한 평판형 급전코일의 구조(위)와 집전코일이 위치하였을 경우의 등가회로(아래)

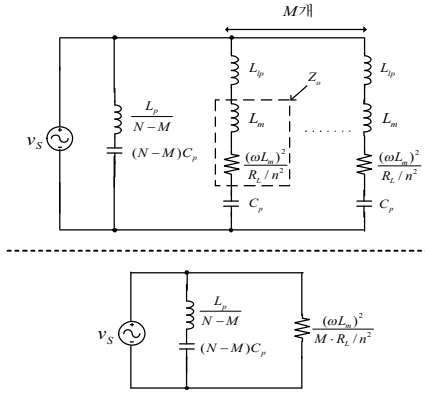


Fig. 2 집전코일 부분의 등가 임피던스가 포함된 단순화된 평판형 급집전 시스템의 등가회로(위)와 급전 공진 커패시터가 식 (3)과 같은 경우의 등가회로(아래)

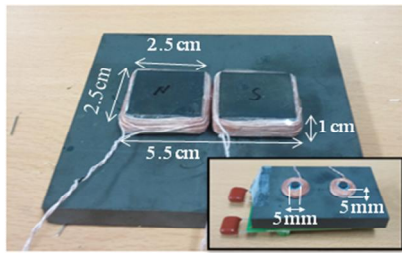


Fig. 3 서로 다른 자극 한 쌍으로 구성된 평판형 급집전 코일과 집전플레이트 단위모듈

$$j\omega L_m + j\omega L_{ls} / n^2 + \frac{1}{j\omega n^2 C_s} = 0 \quad (2)$$

$$Z_o = j\omega L_m + \frac{(\omega L_m)^2}{R_L / n^2} \quad (3)$$

(3)을 이용하면 급집전코일 등가회로는 Fig. 2(위)와 같다. 따라서 급전측 공진을 위한 커패시터 C_p 는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 (L_p + L_m)} \quad (4)$$

Fig. 2(아래)는 C_p 를 이용하여 공진된 후의 단순화된 등가회로를 나타낸 것이다. 집전플레이트가 없는 경우, 급전코일의 인덕턴스가 L_b 로 줄어들어 입력측에서는 커패시터 부하로 작용하여 유효전력이 이상적으로 0이 된다. 집전플레이트가 급전코일을 덮고 있는 경우에는, 급전코일의 인덕턴스가 $L_b + L_m$ 으로 증가하여 입력측의 주파수에 공진하므로 집전코일에 전력을 전달하게 된다.

3. 실험 및 고찰

Fig. 3은 실험을 위해 한 쌍의 서로 다른 자극으로 제작된 평판형 급집전코일의 단위모듈이다. 공진주파수는 74kHz이며, 급집전코일 사이의 공극은 1mm의 두께를 갖는 아크릴 판으로 구성된다. 급집전코일의 특성은 Table. 1에 정리하였으며, 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스는 직렬-커플링 측정(series-coupling tests) 방법으로 정했다 [3]. 공진을 위한 커패시터는 (2), (4)를 이용하여 계산하였다. 부하가 없는 상태에서 급전코일 1개의 임피던스는 집전코일과 접촉했을 경우 2.09Ω, 집전코일이 없을 경우에는 33.16Ω으로 약 15.8배 증가하는 것을 확인하였다.

Table. 1 74kHz에서의 급집전코일의 특성

	급전코일(1개)	집전코일(1개)
Turn	30 turn	60 turn
L_p	151.30uH	-
L_m	38.13uH	142.21uH
L_{lp}	181.88uH	-
L_{ls}	-	37.5uH
내부저항	0.55Ω	-



Fig. 4 제안된 평판형 급집전코일을 휴머노이드 로봇 무선전력전송에 적용한 사례

평판형 급집전코일 단위모듈에서 부하저항이 100Ω인 경우, 집전코일이 급전코일에 접촉하였을 때의 입력 파워는 100mW인 반면에, 접촉하지 않은 경우의 파워 소모는 2.88mW 정도로 줄어드는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 4는 평판형 급전코일 단위모듈을 다량으로 제작하여 휴머노이드 로봇 무선전력전송에 적용한 사례다. 로봇에 전달하는 전력과 전체 시스템의 전력전달효율은 집전코일의 형상에 따라 좌우되며, 향후 이를 최적화하는 연구가 진행될 것이다.

4. 결론

본 논문에서 제안된 로봇용 무선충전 시스템은 로봇 발의 유무에 따른 공진주파수 변화를 이용하여 효율적인 무선전력전달이 가능하다. 또한, 집전코일의 위치에 관계없이 평판형 급전코일로부터 항상 일정한 전력을 공급받을 수 있다. 무엇보다 별도의 센서나 전력제어 스위치가 없다는 점에서 현재까지 제시된 어떤 로봇용 무선전력전송 시스템보다 간단하다. 본 논문의 무선충전시스템은 휴머노이드 로봇 뿐만 아니라 광범위하게 움직이는 다양한 이동기기에도 적용될 수 있다. 본 무선충전시스템은 국내특허 출원되었다 [4].

Acknowledgment

본 연구는 KAIST EEWs 과제의 예산 지원을 받아 진행되었다.

Reference

- [1] W.X. Zhong, "Analysis on a Single-Layer Winding Array Structure for Contactless Battery Charging System with Free-positioning and Localized Charging Features," IEEE ECCE, September 2010.
- [2] Xun Liu, "Simulation Study and Experimental Verification of a Universal Contactless Battery Charging Platform With Localized Charging Features," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 6, November 2007.
- [3] John G. Hayes, "Inductance Characterization of High-Leakage Transformers," IEEE APEC '03, vol. 2, pp. 1150-1156, Feb. 2003.
- [4] 임춘택 외, "무선 전력전달 장치," 대한민국특허 10-2010-0082489.