

무선 전력 전송 기술을 이용한 무선 에너지 허브 시스템 개발

김민아, 박화평, 정지훈
UNIST 전기전자컴퓨터공학부

Development of Wireless Energy Hub System using Wireless Power Transfer Technology

Mina Kim, Hwa Pyeong Park, and Jee Hoon Jung
School of Electrical and Computer Engineering, UNIST

ABSTRACT

본 논문에서는 무선 전력 전송 시스템의 어플리케이션을 실내 어플리케이션으로 확장하여 무선 에너지 허브 시스템을 제안한다. 제안하는 무선 에너지 허브 시스템은 높은 전력 밀도 및 비용 효과를 얻기 위하여 일반적인 무선 전력 전송 시스템에 비해 적은 Power Stage 및 능동 소자를 가지며 부하 단에서 요구하는 여러 가지 부하 종류에 대응할 수 있다. 또한 에너지 허브 시스템의 편리성을 높이기 위하여 2차 측 기구의 허용 가능한 배치 면적을 늘릴 수 있는 디자인 방법을 제시한다. 본 무선 에너지 허브 시스템은 500 W 급 시험 시스템을 통하여 시스템의 효율성 및 디자인 방법을 실험적으로 검증하였다.

1. 서 론

무선 전력 전송 기술을 실내 어플리케이션에 적용하여 실내용 무선 에너지 허브 시스템을 개발할 수 있다. 하지만 무선 전력 전송 기술의 실내 가진 어플리케이션에 대한 개발은 연구 진행 속도가 낮으며, 그로 인해 기술적 성숙도는 매우 낮다. 본 논문에서는 무선 전력 전송 기술의 적용 분야를 실내 어플리케이션으로 확장하여 무선 에너지 허브 시스템에 적합한 무선 전력 전송 시스템을 제안한다. 제안하는 무선 에너지 허브 시스템의 회로도는 그림 1과 같다. 그림 1에 따르면 본 시스템은 공진 회로와 2차 측 PFC로 구성되어 있어 높은 비용 효과를 가지며, 1차 측에 두 개의 공진 커패시터를 사용하여 하프 브릿지 형태이지만 연속적인 입력 전류를 얻을 수 있다. 또한 2차 측의 구조에 따라 저항 부하 및 DC 부하에 대해 대응 가능하다.

무선 에너지 허브 시스템의 편리성을 높이기 위하여 2차 측 기구의 허용 배치 면적을 늘릴 수 있다. 이 때, 코일 간의 배열 불량이 발생하기도 하는데 이는 무선 전력 전송 코일의 인덕턴스를 변화시키며 시스템의 동작에 악영향을 끼칠 수 있다. 본 논문에서는 코일의 배열 불량에 대한 영향을 최소화하기 위한 공진 회로의 디자인 방법을 제안한다. 제안하는 무선 에너지 허브 시스템은 500 W 급 시험 시스템을 이용하여 시스템의 효율성 및 디자인 방법을 실험적으로 검증하였다.

2. 무선 에너지 허브 시스템의 분석 및 설계

2.1 1차 측 공진 커패시터의 설계 방법

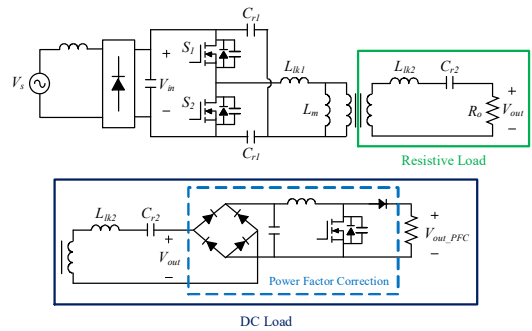


그림 1 무선 에너지 허브 시스템 회로도
Fig. 1 Schematic of Wireless Energy Hub System

무선 에너지 허브 시스템의 공진 네트워크는 1차 측 커패시터와 2차 측 커패시터, 코일의 인덕턴스로 구성된다. 이 때, 1차 측과 2차 측 공진 커패시터의 관계를 식 (1)에 나타내었다.

$C_{r1,a} = C_{r1,b} = C_{r1}, 2C_{r1} = C_{r2}$ (1) 이 때, $C_{r1,a}$ 와 $C_{r1,b}$ 는 1차 측 공진 커패시터, C_{r1} 은 동일한 값을 가지는 1차 측 공진 커패시터를 대표하는 값, C_{r2} 은 2차 측 공진 커패시터를 의미한다.

이 때, 무선 에너지 허브 시스템의 동작점은 식 (2)로 설계한다. 식 (2)의 동작점에서 동작 시, 무선 에너지 허브 시스템의 공진 네트워크 및 등가 회로는 일반적인 무선 전력 전송 시스템의 Series Series (SS) 토폴로지와 같다.^[1]

$$\omega_s = \omega_r = 2\pi f_s = \frac{1}{\sqrt{2L_{lk1}C_{r1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{lk2}C_{r2}}} \quad (2)$$

이 때, ω_s 는 동작 주파수를 나타내고, ω_r 는 공진 네트워크의 공진 주파수를 나타낸다.

2.2 무선 전력 전송 코일의 배열 불량 분석

그림 2는 무선 에너지 허브 시스템 코일의 배열 불량 상태 시 등가회로를 나타낸다. 이 때, 각 배열 불량 정도 (Δ)에 대한 코일 변수들을 식 (3) (5)에 나타내었다.

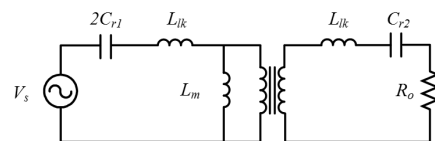


그림 2 코일 배열 불량 상태의 공진 네트워크 등가 회로
Fig. 2 Equivalent Circuit Diagram of Misalignment Condition

$$k - k_m = \Delta k, \Delta k L_{self} = \Delta L, \quad (3)$$

$$L_{m,m} = k_m L_{self} = (k - \Delta k) L_{self} = L_m - \Delta L \quad (4)$$

$$L_{lk,m} = (1 - k_m) L_{self} = (1 - (k - \Delta k)) L_{self} = L_{lk} + \Delta L \quad (5)$$

이 때, Δ 는 배열 불량 정도, k 및 k_m 는 배열 정렬 상태 및 배열 불량 상태의 커플링 계수, Δk 및 ΔL 은 배열 불량으로 인해 변화하는 커플링 계수와 인덕턴스, L_{self} 은 코일의 자기 인덕턴스, L_m 과 L_{lk} 는 배열 정렬 상태의 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스, $L_{m,m}$ 와 $L_{lk,m}$ 는 배열 불량 상태의 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스를 의미한다.

무선 에너지 허브 시스템의 동작점이 코일의 배열 정렬 상태로 설계되면 코일의 배열 불량으로 인해 입·출력 전압 이득이 변화하게 된다. 코일 배열 불량으로 인해 변화하는 전압 이득을 식 (6)에 나타내었다.

$$G_{vm} = \left[\left\{ 1 + \frac{\Delta k}{k - \Delta k} \right\}^2 + \left\{ Q \frac{\Delta k}{1 - k} \left(1 + \frac{\Delta k}{2(k - \Delta k)} \right) \right\}^2 \right]^{-1/2} \quad (6)$$

때, G_{vm} 은 변화된 전압 이득, $Q = \frac{2\omega_r L_{lk}}{R_o}$ 는 공진 네트워크의 첨예도를 나타낸다.

식 (6)을 통해 유도한 공진 네트워크의 첨예도, 코일의 배열 불량 정도에 대한 전압 이득을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 결과에 따르면 입·출력 전압 이득은 코일의 배열 불량 정도가 같은 조건에서 공진 네트워크의 첨예도가 높아짐에 따라 전압 이득이 더욱 낮아진다. 따라서 공진 네트워크의 첨예도를 제한함으로써 코일의 배열 불량 정도에 따라 낮아지는 전압 이득을 비교적 높게 유지할 수 있다.

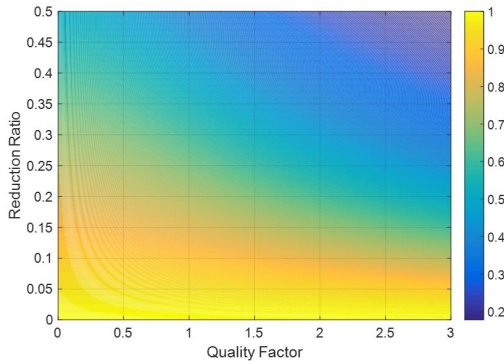
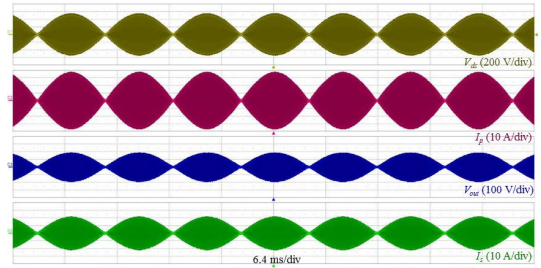


그림 3 코일 배열 불량 상태의 입 출력 전압 이득 그래프
Fig. 3 Input-Output Voltage Gain at Coil Misalignment Condition

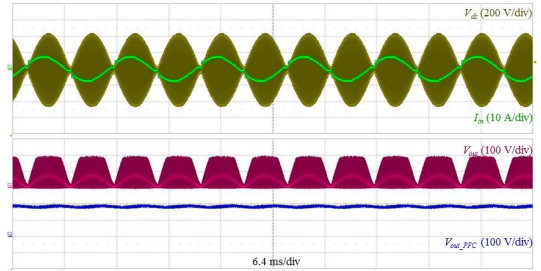
3. 실험 결과 및 검증

그림 4는 무선 에너지 허브 시스템의 저항 부하 및 DC 부하에 대한 500 W 정상상태 실험 결과를 나타낸다. 실험 결과에 따르면 무선 에너지 허브 시스템은 저항 부하 및 DC 부하에 모두 대응 가능하다.

그림 5는 코일의 배열 불량 (커플링 계수)에 따른 시스템의 출력 전압 변동 실험 결과를 나타낸다. 코일 저항에 따른 전압 감소로 인해 계산 결과와 실험 결과의 차이가 생기기 때문에 코일 저항을 포함한 계산 결과를 점선으로 나타내었다. 코일의 배열 불량 상태가 최대일 때, 첨예도에 따라 약 23%의 출력 전압 차이가 있다. 실험 결과에 따르면 상기의 분석 결과와 같이 공진 네트워크의 첨예도가 낮을수록 출력 전압 감소 기폭이 낮아지는 것을 알 수 있다.



(a) 500 W 저항 부하 정상상태



(b) 500 W DC 부하 정상상태

그림 4 무선 에너지 허브 시스템의 정상상태 실험 결과

Fig. 4 Steady State Waveforms of Wireless Energy Hub System

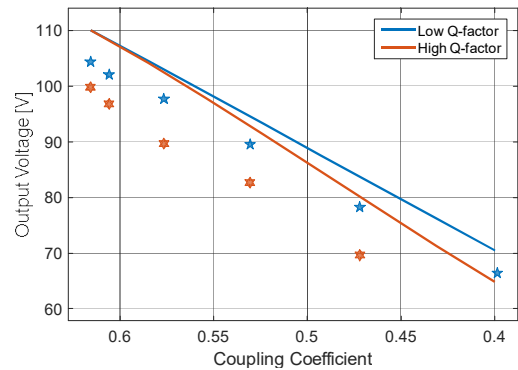


그림 5 코일의 커플링 계수에 따른 출력 전압 감소

Fig. 5 Output Voltage Reduction according to Coil Coupling Coefficient

3. 결론

본 논문에서는 무선 전력 전송 기술을 실내 어플리케이션으로 확장하여 무선 에너지 허브 시스템을 제안하였다. 제안하는 무선 에너지 허브 시스템은 높은 비용 효과를 가지며 저항 부하 및 DC 부하에 대응 가능하다. 또한 2차단의 배치 허용 가능 면적을 넓혀 무선 에너지 허브 시스템의 편리성을 높이기 위하여 코일의 배열 불량 정도에 따른 출력 전압 이득을 유도하였다. 무선 에너지 허브 시스템의 효용성 및 분석 결과는 500 W 급 시작품을 사용하여 검증하였다.

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF2016R1A2B4011934)

참고 문헌

- [1] J. F. Lazar and R. Martinelli, "Steady state analysis of the LLC series resonant converter," *APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181)*, Anaheim, CA, 2001, pp. 728-735 vol.2.