

공진형 무선전력전송공진기를 삽입하여 무선충전 범위를 극대화하는 라스트마일 모빌리티 멀티충전시스템 설계

유명종*, 정윤도**, 김호민***

(주)블루더스트*, 수원과학대학교**, 국립제주대학교***

Design of a Multi-Charging System for Last-Mile Mobility Using Embedded Resonant Wireless Power Transfer Resonators

Yoo Myong Jong*, Yoon Do Chung**, Ho Min Kim***

BlueDust Inc*, Suwon Science College**, Jeju National University***

Abstract - 최근 라스트마일 모빌리티(전동 킥보드, 전기 자전거 등) 시장이 급성장함에 따라 사용자 편의성을 높이고 유지보수 비용을 절감할 수 있는 새로운 충전 인프라의 확충이 필수적으로 요구되고 있다. 기존의 유선 충전 방식은 빈번한 케이블 훼손 및 커넥터 파손 문제를 야기하며, 기존 자기유도방식 무선충전은 전송 거리가 수 cm 이내로 짧고 기기의 정렬 상태에 따라 효율이 급감하는 한계가 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하고 충전 범위를 극대화하기 위해 '다중 공진형(Multi-resonance) 자기공명 방식'을 적용한 라스트마일 모빌리티 멀티 충전시스템을 제안한다. 특히, 송수신 안테나 코일 사이에 고효율 공진기를 삽입하여 강한 자기적 결합(Strong Coupling)을 유지함으로써, 최대 1m까지 전송 거리를 극대화하고 최대 6대의 기기를 동시에 간섭 없이 충전할 수 있는 방안을 설계하였다. 장치의 소형화와 상호 인덕턴스 증가에 유리한 나선형(Spiral) 코일 권선 방식을 적용하였으며, 극한의 옥외 환경 및 다양한 부하 변화에도 송신 전력을 극대화할 수 있도록 가변 인덕턴스와 가변 커패시터를 활용한 임피던스 매칭(Impedance Matching) 시스템을 구축하였다. 이를 통해 안테나와 수신기 사이의 반사 전력(Reflection Power)을 입력 전력 대비 5% 미만으로 최소화하는 성과를 도출하였다. 결과적으로 본 연구에서 설계된 다중 공진형 무선충전 시스템은 스마트 모빌리티의 운영비용(OPEX)을 혁신적으로 절감하고, 사용자 경험(UX)을 극대화하여 미래 스마트시티의 무선충전존(WCZ) 구축을 위한 핵심 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

최근 도심 교통 혼잡 및 환경 문제 해결을 위해 전동 킥보드, 전기 자전거 등 라스트마일 모빌리티(Last-mile Mobility) 시장이 급성장하고 있으며, 미래 이동 수단의 패러다임이 점차 'Door to Door' 서비스로 변화하고 있다. 그러나 이러한 스마트 모빌리티의 확산에도 불구하고, 기존의 유선 충전 방식은 야외 환경에서의 잦은 케이블 훼손, 커넥터 파손, 감전 위험 등의 고질적인 문제를 안고 있으며, 이는 인프라의 불량률 증가와 운영사의 유지보수 비용(OPEX)의 급증으로 직결되고 있다.

이러한 유선 충전의 한계를 극복하기 위한 대안으로 무선 전력전송(Wireless Power Transfer, WPT) 기술이 주목받고 있다. WPT 기술 중 자기유도방식(Magnetic Induction)은 전송 효율이 높지만 전송 거리가 수 cm 이내로 매우 짧고, 송수신 코일 간의 정렬 상태나 각도 변화에 따라 효율이 급감하는 한계가 있어 다양한 모빌리티가 무작위로 거처되는 환경에 적용하기 어렵다. 반면, 2007년 제안된 자기공명방식(Magnetic Resonance)은 송수신 코일 간의 공진 주파수를 일치시켜 중거리 전력 전송이 가능

하며, 다수의 기기를 동시에 충전할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 자기공명방식 역시 송수신 코일 간의 전송 거리가 안테나 직경의 50%를 초과하면 전송 전력이 급격히 감소하는 물리적 한계가 존재한다. 더욱이 여러 대의 수신기를 사용하는 멀티 충전 환경에서는 전송 거리와 효율이 추가로 제약되어 산업용 및 옥외 인프라 상용화에 큰 장벽이 되고 있다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 송수신 안테나 코일 사이에 고효율 공진기(Resonator)를 삽입하여 자기적 결합(Strong Coupling)을 강하게 유지하고, 전송 거리를 극대화하는 라스트마일 모빌리티용 다중 공진형 멀티 충전 시스템을 제안한다.

본 연구에서 제안하는 시스템은 전송 거리를 최대 1m까지 늘리고 최대 6대의 기기를 동시에 충전(1:N)하는 것을 목표로 한다. 또한, 극한의 옥외 환경 및 기기 대수 등 다양한 부하 변화에서도 송수신 안테나 사이의 반사 전력(Reflection Power)을 5% 이하로 최소화하기 위해 가변 인덕턴스 및 커패시터를 활용한 임피던스 매칭 시스템(Impedance Matching System)을 설계 및 적용하였다. 본 논문을 통해 도출된 시스템 최적화 설계는 향후 스마트시티 내 무선충전존(Wireless Charging Zone, WCZ) 인프라 구축과 사용자 편의성 극대화를 위한 핵심 기반 기술이 될 것으로 기대된다.

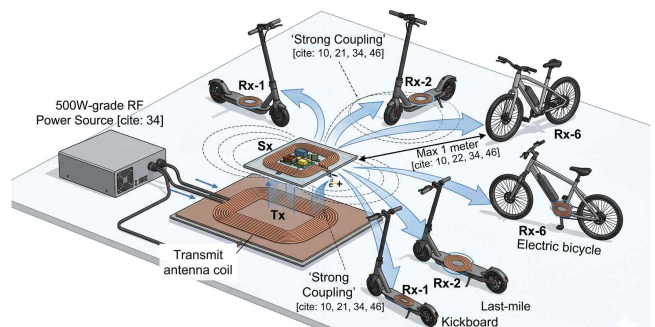


Figure 1. Concept diagram of multi-resonance wireless charging system for last-mile mobility

[그림1] 다중공진형 멀티 무선충전 시스템 개념도

2. 본 론

본 연구에서 제안하는 라스트마일 모빌리티 멀티 충전시스템은 상용화 및 경제성을 확보하기 위해 고비용의 초전도 코일을 배제하고, 일반 상전도(구리) 코일을 기반으로 전송 효율과 동시 충전(1:N) 성능을 극대화하도록 4가지 핵심 모듈로 설계되었다. 고효율 상전도(구리) 코일 및 나선형(Spiral) 권선 설계 경제성과 상용화를 고려하여 실제 상전도(구리) 선재를 활용한 송수신 안테나 코일을 설계 및 제작하였다.

나선형(Spiral) 권선 방식 적용: 장치의 소형화에 유리하며, 도선 방향을 일치시킬 경우 상호 인덕턴스(Mutual Inductance)

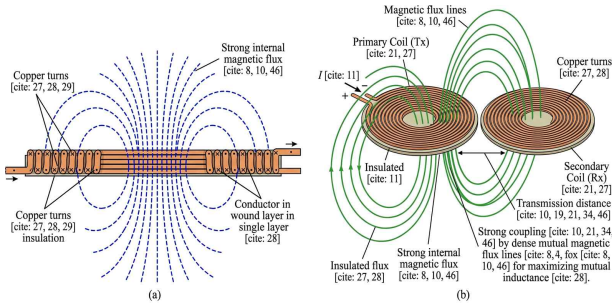


Figure 3(a). Cross-section of a spiral coil [cite: 27, 28, 60] with current direction and internal magnetic flux [cite: 8, 10, 46].
Figure 3(b). Isometric view of a spiral coil [cite: 27, 28, 60] illustrating external magnetic flux and coupling with another coil [cite: 28].

Figure 3. Spiral copper coil design structure for maximizing mutual inductance [cite: 28].

[그림2]상호 인덕턴스 극대화를 위한 나선형(Spiral) 코일 설계 구조

값을 극대화할 수 있는 스파이럴(Spiral) 방식을 우선적으로 적용하였다. 내구성 강화 및 인덕턴스 유지: 옥외 환경에서 외부 충격이나 진동에 의해 코일 형상이 변형되어 인덕턴스 값이 변하는 것을 방지하기 위해, 구리 선재를 보빈(Bobbin)에 감은 후 견고하게 합침 및 고정하여 시제품의 내구성을 확보하였다.

전송 거리 극대화: 입력 500W급 RF 전원 기반의 구리 송신 안테나와 수신기 사이에 고효율 멀티 공진기를 삽입하여 강한 자기적 결합(Strong Coupling)을 유도, 최대 1m의 전송 거리를 확보하였다.

High Q-factor 유지 및 다중 충전: 최대 6대의 기기를 간섭 없이 동시에 충전할 수 있도록 송수신부에 서로 다른 멀티 공진 주파수(예: 370kHz, 750kHz 등)를 배분하였다. 또한 상전도 코일 내부 저항으로 인한 에너지 소멸을 막기 위해 공진기의 내부 반경, 턴(Turn) 수, 코일 두께 및 도선 간의 거리를 정밀하게 조절하여 좁은 주파수 대역에서도 높은 전송 특성(High Q-factor)을 유지하도록 설계하였다.

임피던스 매칭(Impedance Matching) 시스템 최적화 다수의 모빌리티가 무작위로 접근하는 환경 부하 변화에 대응하고, 상전도 코일의 전송 효율 한계를 극복하기 위해 동적 임피던스 매칭 회로를 적용하였다. 가변 소자 활용 및 반사 전력 최소화: 가변 인덕턴스 및 가변 커패시터를 활용한 임피던스 매칭 모듈을 수신부와 연동시켜 부하 및 대기 환경 변화에 유연하게 대응하도록 구성하였다. 이를 통해 안테나와 수신기 사이의 반사 전력(Reflection Power)을 입력 전력 대비 5% 미만으로 억제하였다.

내환경성 매칭 박스 설계: 외부 노출이 불가피한 옥외 환경의 극한 상황(온도, 습도 등)에서도 시스템이 안정적으로 건널 수 있도록 매칭 박스(Matching Box) 디자인을 고안 및 제작하여 상용 시스템의 신뢰성을 확보하였다.상용화 시스템 통합 및 성능 검증 설계된 구리 송수신 코일과 멀티 공진기, 가변 매칭 모듈을 결합하여 실제 도심 인프라에 적용 가능한 상용화 모델을

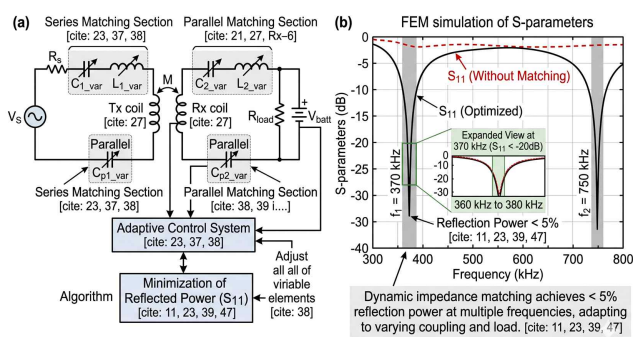


Figure 2. Schematic of dynamic impedance matching circuit using variable elements.

[그림 3] 가변 소자 기반 동적 임피던스 매칭 회로도

구축하였다. 1kW급 멀티 무선충전 스테이션 조립: 최적화된 개별 모듈들을 통합하여 1kW급 라스트마일 모빌리티용 멀티 무선충전 스테이션 시제품(Prototype)을 최종 조립 및 테스트하였다. 배터리 경량화 및 비용 절감 기대: 구리 코일 기반의 다중 공진형 시스템을 통해 중거리에서도 안정적인 전력 전송이 가능해짐에 따라, 모빌리티 기기에 탑재되는 기존 배터리 용량을 대폭 줄일 수 있어 제품 경량화 및 인프라 구축 비용 절감 효과를 동시에 달성할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 라스트마일 모빌리티의 유선 충전 인프라가 지닌 잦은 케이블 파손 및 감전 위험 등의 고질적인 유지보수 문제를 해결하고, 기존 무선충전의 짧은 전송 거리 한계를 극복하기 위해 상용화에 적합한 구리 코일 기반의 다중 공진형(Multi-resonance) 멀티 무선충전 시스템을 제안하고 설계하였다.

경제성을 고려한 상전도(구리) 송수신 안테나 코일 사이에 고효율 멀티 공진기를 삽입하여 강한 자기적 결합(Strong Coupling)을 유도함으로써 전송 거리를 최대 1m까지 극대화하였다. 또한, 가변 인덕턴스 및 가변 커패시터를 활용한 동적 임피던스 매칭 회로를 적용하여 옥외 환경의 다양한 부하 변화 속에서도 안테나와 수신기 사이의 반사 전력(Reflection Power)을 5% 미만으로 최소화하였으며, 좁은 주파수 대역에서도 높은 Q-factor를 유지해 최대 6대의 기기를 간섭 없이 동시에 충전할 수 있는 최적의 시스템을 구현하였다.

본 연구에서 도출된 공진기 기반 구조를 실제 모빌리티에 적용할 경우, 중거리에서도 안정적인 전력 공급이 가능해져 기기에 탑재되는 기존 배터리 용량을 줄일 수 있으며, 이는 제품의 경량화와 직접적인 비용 절감 효과로 이어진다. 나아가 충전 인프라 운영사의 유지보수 비용(OPEX)을 혁신적으로 절감시켜 도심 내 무분별한 킥보드 방치 문제를 해결하는 데 기여할 수 있다. 향후 본 시스템은 서울 및 수도권 등 주요 도심 거점의 무선충전존(Wireless Charging Zone, WCZ) 구축을 위한 핵심 기술로 활용될 것이며, 나아가 드론, 자율주행 배송 로봇, 전기차(EV)용 대용량 무선충전 시장까지 인프라 확장의 유연성을 제공하는 스마트시티의 필수 기반 시설로 자리매김할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 (재)경기테크노파크 경기기술닥터 중기애로지원사업의 연구비 지원에 의해 이루어진 연구성과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 대한전기학회 기획시리즈, "무선 전력 전송 기술의 동향 및 현황", 대한전기학회지, vol. 9 no. 1, 2010.
- [2] J.W.Kim, H.H.Ji, Y.G.Choi, Y.H.Yun, H.C.Son, K.H.Kim, Y.J.Park, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", IEEK, vol. 21, 2010.
- [3] Aristlidis Karalis, J. D. Joannopoulos and Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", Annals of Physics 323, pp. 34~38, 2008.
- [4] 신용희, 김창선, "근거리 무선 전력전송 장치 연구", 전기의 세계, 제59권 제1호, pp. 56~59, 2010.