

Integrated coil을 적용한 MVDC 센서 공급용 무선충전시스템 설계

조승진, 신창수, 사준신, 김동희
전남대학교 전기공학과

Design of a Wireless Charging System for MVDC Sensor Power Supply using an Integrated coil

Seungjin Jo, Chang-Su Shin, Junchen Xie, and Dong-Hee Kim[†]
Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 고전압절연과 신뢰성이 요구되는 MVDC 배전망의 일체형 센서에 자기 유도 방식을 활용하여 전력을 공급하는 방식을 제안한다. MVDC 배전망에서 요구하는 절연전압과 정격 전력을 만족하고, 일체형 센서의 부피를 고려하여 패드 디자인을 선정한다. 고전력밀도를 달성하기 위해 통합형 코일이 적용된 LCC-S 토폴로지를 적용한 후 100[W]급 전력 전달이 가능하도록 제작 및 검증한다.

1. 서론

MVDC 배전망에 연계되는 신재생에너지원과 전기자동차, ESS, 데이터센터 등 직류 부하가 증가하면서, 배전망의 전력 불안정성이 증가되고 있다. 전력 수요와 공급량이 실시간으로 변동되는 것에 대응하기 위해 배전선에 부착되는 센서가 고성능화되면서 전력소모량도 함께 증가한다. MVDC 배전선로 전압이 1.5 - 100 kV 수준이므로 고전압절연이 확보되면서 안정적으로 전력을 공급하는 방안이 필요하다. 기존 광컨버터의 경우, 20 - 30 [%] 효율, 5 W 미만의 출력 특성을 보였으나^[1], 고성능 일체형 센서가 요구하는 전력이 50 W 이상이 되면서 광컨버터로 센서 소비전력을 전송하는 데 한계가 있다.

고전압절연을 확보하면서 기존 광컨버터 방식보다 높은 효율과 출력 특성을 만족할 수 있는 전원 공급 방식으로 자기 유도 방식 무선 전력 전송 (Inductive Power Transfer, IPT) 시스템 적용을 고려할 수 있다. 무선 전력 전송은 송신부와 수신부 패드 간 넓은 공극이 존재하여 절연전압을 확보하기 쉬우며, 충전 케이블이 외부에 노출되지 않아 안전하다는 장점이 있다. 그러나 넓은 공극에 의해 결합 계수가 낮으며, 결합 계수를 확보하기 위해 송수신 패드 부피가 커지며, 무효 전력 보상을 위한 보상 수동 소자가 추가되어 전력밀도가 낮아지는 단점이 있다. 따라서, IPT 시스템을 구성할 때, 전력밀도를 높일 수 있는 방안이 필요하다.

본 논문은 IPT 시스템에 포함되는 공진 인덕터 소자를 송신부 패드에 통합하여 부피를 줄이는 통합형 코일 구조를 적용한다. 배전반 내 설치된 일체형 머징 유닛과 배전선에 부착되는 일체형 센서의 부피를 고려하여 송수신 패드를 설계한 후, 통합형 코일 구조가 적용된 LCC-S 토폴로지를 설계한다. 시뮬레이션과 실제 100 W급 프로토타입 동작 실험을 통해 제안하는 IPT 시스템이 기존 광컨버터 방식보다 적절함을 검증한다.

표 1 IPT 시스템 기본사항

Table 1 IPT System Specifications

Parameter	Value [Unit]
MVDC 배전 전압	1.5 - 100 [kV]
절연전압(공기)	3 [kV/mm] ^[2]
U_{DC}	110 [V]
U_L	24 [V]
P_L	100 [W]
송신패드 부피	100 x 100 x 30 [mm^3]
수신패드 부피	140 x 95 x 20 [mm^3]
결합계수 범위	0.01 - 0.04

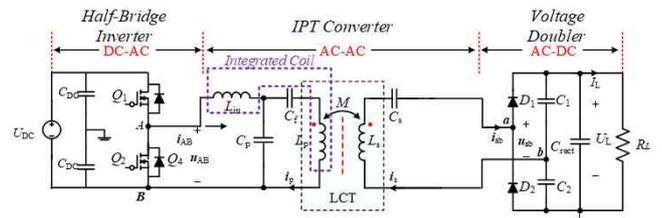


그림 1 LCC-S 토폴로지 IPT 시스템

Fig. 1 IPT System with LCC-S Topology

2. IPT 시스템 설계

2.1 코일 구조 및 공진 네트워크 선정

IPT 시스템 설계에 앞서, 입출력 사양, 절연전압, 이격거리, 송수신 패드 크기 규정을 고려하여 코일 디자인과 공진 네트워크를 설계할 필요가 있다. 표 1은 IPT 시스템 기본 사양이다. FEM 시뮬레이션을 통해 다양한 송수신 패드의 결합 계수 측정 결과 0.05 미만으로 매우 낮은 특성을 갖는다. 패드 디자인에 따라 0.01 - 0.04 사이의 결합 계수를 가지며, 제안하는 MVDC 보조전원 어플리케이션의 경우, 별도의 외부 충격 등에 의한 이격거리 변동이 없음을 가정하므로 최대 결합 계수를 갖는 송수신 패드 디자인을 선정한다. FEM 시뮬레이션 결과, 가장 넓은 내경을 갖는 Rectangular pad가 준수한 결합 계수를 갖는 것을 확인했으며, 해당 방식으로 코일 권선을 진행한다. 입출력 사양 만족과 공차 발생 시 특성 변동을 최소화하기 위해 고차 보상 토폴로지인 LCC-S 토폴로지를 선정했다.

그림 1은 LCC-S 토폴로지로 구성된 IPT 시스템이다. DC 전원 110 V에서 하프브리지 인버터를 통해 교류로 변환하며, 전자기 유도 원리를 통해 에너지를 전달하는 송수신 패드, 패

드 리액턴스 성분을 보상하는 공진 네트워크, 교류 전력을 직류로 정류하는 하프브리지 정류기, 필터 커패시터로 구성되어 있다. L_{in} 은 공진 인덕터, L_p, L_s 는 송수신 패드 인덕턴스, C_p 는 L_{in} 과 공진하는 커패시터, C_f 는 송신 패드와 직렬 연결된 커패시터, C_s 는 수신 패드와 직렬 연결된 커패시터이다. 공진 네트워크의 공진 조건은 (1)과 같다.

$$\frac{1}{\omega^2 L_{in} C_p} = \frac{C_p + C_f}{\omega^2 C_p C_f L_p} = \frac{1}{\omega^2 L_s C_s} = 1 \quad (1)$$

공진 조건 확인 후, 보상 네트워크 설계 시, LCC-S 토폴로지의 전압, 전류 특성은 아래와 같다.

$$i_p = \frac{u_{AB}}{j\omega L_{in1}}, \quad i_s = i_{ab} = \frac{u_{AB}M}{L_{in1}R_{o,ac}}, \quad u_{ab} = \frac{u_{AB}M}{L_{in1}} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 송신 패드에 흐르는 전류는 일정하고, 정전압 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 공진 네트워크 구성 시, 하프브리지 인버터와 정류기를 고려하여 입력력 교류 전압 값을 선정한다. 입력 직류 전압이 하프브리지 인버터를 통해 기본과 교류 전압의 RMS는 다음과 같다.

$$u_{AB} = \frac{\sqrt{2} U_{DC}}{\pi} \quad (3)$$

교류 RMS 전압은 기본 주파수 성분만을 포함하며, 시비를 0.5 동작을 기준으로 한다. 공진 네트워크와 송수신 패드를 거쳐 전달된 교류 출력과 하프브리지 정류기를 통해 정류된 수식은 아래와 같다.

$$u_{ab} = \frac{\pi\sqrt{2}}{2} U_L, \quad i_{ab} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_L \quad (4)$$

2.2 제안하는 통합형 코일 구조와 시뮬레이션 검증

LCC-S 토폴로지는 송신부에 3개의 공진 수동 소자가 요구되며, 시스템의 전력밀도가 낮아진다는 단점이 있다. 특히, 시스템에서 요구되는 L_{in} 의 경우, 코일과 자성체로 구성된 인덕터로 통합형 코일은 송신부 또는 수신부 패드를 구성하는 자성체를 활용하기 위해 공진 인덕터를 통합시키는 방식으로 낮은 자속밀도를 갖는 송수신 패드의 자성체를 활용하여 자성체 부피를 줄일 수 있다^[3].

통합형 코일 구조 구성 시, 공진 인덕터와 송수신 패드 간 결합 계수는 전기적 특성에 영향을 미친다. 송신 패드와 공진 인덕터 간 상호 인덕턴스는 송신 패드에 흐르는 전류에 영향을 미쳐 수신부에 인가되는 기전력에 영향을 미치며, 수신 패드와 공진 인덕터간 상호 인덕턴스는 수신부에 인가되는 기전력 증가로 출력 특성이 변동되며, 설계 난이도가 증가한다. 설계의 복잡성을 줄이기 위해, 제안하는 통합형 코일 구조는 공진 인덕터와 송수신 패드 간 상호 인덕턴스가 0이 되도록 제작한다.

공진 인덕터의 상호 인덕턴스를 0으로 만들기 위해, 송수신 패드와 공진 인덕터의 극성을 반대로 구성하거나, 전류 위상과 디자인 구조를 상호 디커플링 구조로 구성할 수 있다. 본 논문에서는 공진 인덕터를 송신 패드와 수직으로 권선하여 자기전속을 디커플링 하는 구조를 적용했다. 시뮬레이션을 통해, 제안하는 IPT 시스템의 동작 타당성을 검증한다.

그림 2는 FEM 시뮬레이션을 활용한 IPT 시스템이다. 송신부 패드의 경우, 통합형 코일이 포함되어 있다. 시뮬레이션을 토대로 도출된 패드 인덕턴스와 LCC-S 공진 네트워크 소자 값은 표 2에 명시되어있다. FEM 시뮬레이션을 진행한 결과, 송신 패드에 약 70 mT 수준의 자속 밀도가 분포되며, 수신부

표 2 IPT 시스템 사양

Table 2 IPT System Specifications

Parameter	Value [Unit]
동작 주파수 (f_s)	100 [kHz]
수직 이격거리	100 [mm]
결합 계수 (k)	0.04
L_p	148.8 [μH]
L_s	31.7 [μH]
L_{in}	8.01 [μH]
C_p	311.3 [nF]
C_f	18.09 [nF]
C_s	79.8 [nF]

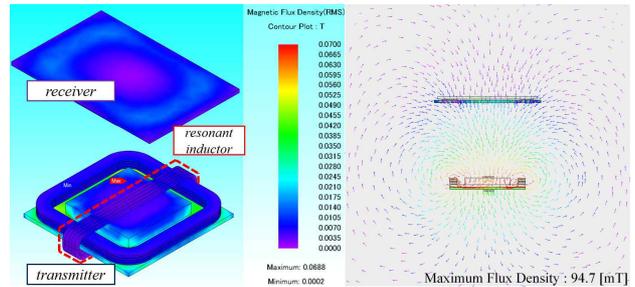


그림 2 IPT 3D Pad FEM Simulation 결과

Fig. 2 IPT 3D Pad FEM Simulation results

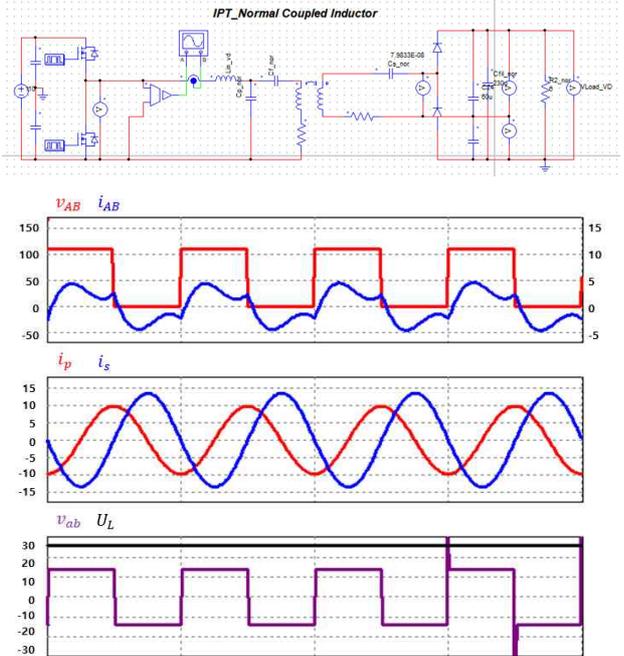


그림 3 PSIM Simulation 결과 파형

Fig. 3 PSIM Simulation result waveforms

에 자기전속이 쇄교되는 것을 확인했다. FEM 시뮬레이션은 교류 기본과 전원 인가 시 교류 출력 특성만 확인 가능하므로, 하프브리지 인버터와 정류기 동작을 확인하기 위해 전기회로 시뮬레이션을 별도로 구성할 필요가 있다. 그림 3은 표 2를 토대로 제작한 PSIM 시뮬레이션 회로도도와 결과 파형이다. 송신 패드가 통합형으로 구성되나, 결합 계수가 0이므로 별도의 인덕터로 모델링했다. 시뮬레이션을 통해, MVDC 일체형 센서가 요구하는 전압 특성을 만족하는 것을 알 수 있다.

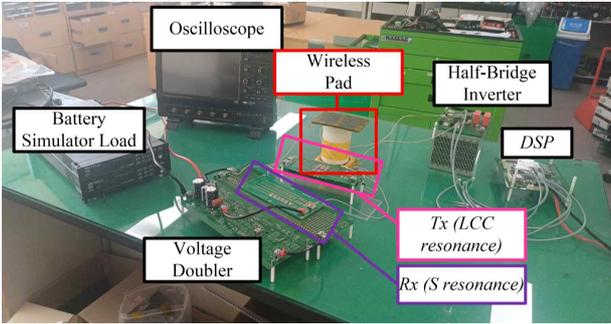


그림 4 LCC-S 토폴로지 IPT 시스템
Fig. 4 IPT System with LCC-S Topology

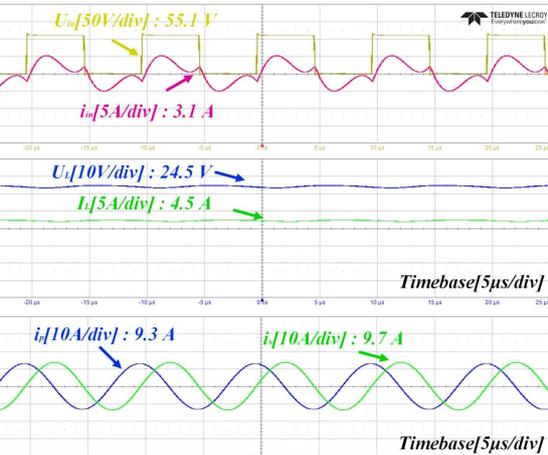


그림 5 LCC-S 토폴로지 IPT 시스템 결과
Fig. 5 IPT System with LCC-S Topology

2.4 실험 검증

그림 4는 실제 구성한 IPT 시스템 프로토타입이며, 실제 제작한 IPT 시스템 사양은 표 2에 명시되었다. 그림 5는 전력분석기로 측정된 실험 결과와 오실로스코프 파형들이다. 실험을 통해 입출력 사양을 만족시키며 69.8 % 효율을 가지는 것을 확인했다.

표 3은 기존 광컨버터와 IPT 시스템으로 구성된 보조 전원을 비교했다. 광컨버터는 낮은 출력 특성과 효율로 100 W 정격 전력 달성을 위해 약 40개의 광컨버터가 필요하다. 또한, 30 % 미만의 낮은 효율로 인한 발열에 따른 성능 저하 해소를 위해 방열판이 부착되며 부피가 증가되는 것을 알 수 있다. 반면, IPT 컨버터는 정격 출력을 만족시키며 약 70 %의 효율로 광컨버터보다 2배 이상의 높은 효율을 만족시킬 수 있으며, 통합형 코일 구조 적용으로 시스템의 부피가 감소함을 알 수 있다. 따라서, 제안하는 통합형 코일 구조 IPT 시스템은 MVDC 일체형 센서의 보조전원으로 적용하기에 적합하다.

표 3. 광컨버터와 IPT 컨버터 비교

Table 3. Comparison of optical and IPT converters

	Optical Converter	IPT Converter
사진		
효율	20 ~ 30 [%]	65 ~ 70 [%]
출력 전력	약 3 W	100 W
출력 전압	5 V 미만	24 V
부피 (100 W 기준)	32 x 24 x 50 [mm^3] * 50 [pcs]+ α (광패널, 정류기 등) > 2,000,000[mm^3]	Tx : 100 x 100 x 30 [mm^3]+ α (공진 회로, 전력 변환부) Rx : 140 x 90 x 10 [mm^3]+ α > 1,000,000[mm^3]

3. 결론

본 논문은 MVDC 배전선에 부착되는 일체형 센서에 고전압절연을 확보하면서 전력을 전송하는 방식으로 IPT 시스템을 제안했다. 입출력 사양과 송수신 패드 구조를 고려하여 무선패드와 공진 네트워크를 설계했으며, 전력밀도 개선을 위해 통합형 코일 구조를 적용했다. 설계의 복잡성을 낮추기 위해 공진 인덕터를 수직 구조로 적용했다. 100 W급 프로토타입을 구성 후 실험을 통해 기존에 사용했던 광컨버터 방식보다 높은 출력 특성, 효율을 가지며 고전압절연을 확보할 수 있음을 확인했다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 ‘차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업’으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00281219)

참고 문헌

- [1] Q. Zhang, W. Fang, Q. Liu, J. Wu, P. Xia and L. Yang, "Distributed Laser Charging: A Wireless Power Transfer Approach," IEEE Internet Things J, vol. 5, no. 5, pp. 3853-3864, Oct. 2018,
- [2] International Electrotechnical Commission, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements," IEC 60060-1:2010, 2010. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/2220>.
- [3] T. Kan, T. D. Nguyen, J. C. White, R. K. Malhan, and C. Mi, "A new integration method for an electric vehicle wireless charging system using LCC compensation topology: Analysis and design," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 2, pp. 1638 - 1650, Feb. 2017.