

Loosely Coupled Dual Active Bridge Converter 용 무선 전력 전송 코일 개발

이재홍[†], 이승환[†], 김성민^{*}, 한동엽^{*}, 김명룡^{**}
 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과[†], 한양대학교 전자공학부^{*}, 한국철도기술연구원^{**}

Development of Wireless Power Transfer Coils for Loosely Coupled Dual-Active-Bridge Converter

Jaehong Lee[†], Seung-Hwan Lee[†], Sungmin Kim^{*}, Dongyeop Han^{*}, Myung-Yong Kim^{**}
 School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, S. Korea[†]
 Division of Electrical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus, S. Korea^{*}
 Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute, S.Korea^{**}

ABSTRACT

본 논문에서는 고주파 변압기 대신 무선 전력 전송 시스템을 적용해 양방향 전력 전송을 가능케 해주는 loosely coupled dual-active-bridge 컨버터에서, 코일 간 전송 효율을 높이기 위한 코일 형상 설계에 관한 연구를 진행하였다. 유한 요소법을 통해 여러 형태의 페라이트 코어에 대해 해석했다. 페라이트 코어 형태가 I-자 일 때 가장 높은 quality factor 의 코일을 얻을 수 있었다. 또한, I-core의 ferrite plate의 크기에 따라 무선 전력 전송의 효율을 결정하는 코일의 coupling coefficient와 코일의 quality factor가 변하고 trade-off 관계가 있음을 확인하였다. 3 cm 의 air-gap에 대해 최대 효율을 가지는 코일 형상을 설계하여 시뮬레이션을 통해 97.8 %의 코일 간 전송효율을 얻었다.

종지 못해 99 % 정도의 높은 효율을 갖는 고주파 변압기를 대체하기 어려웠다. 본 논문에서는 높은 효율을 가질 수 있게 무선 전력 전송 코일 형상에 대한 연구를 진행하였다. 무선 전력 전송 코일 간 전송효율은 송신 코일과 수신 코일의 quality factor (Q-factor) 와 둘 사이의 coupling coefficient, 그리고 부하에 의해 결정된다. 코일의 형상에 따라 Q-factor와 coupling coefficient가 변하고 둘 사이의 trade-off 관계가 있음을 ANSYS HFSS를 통해 시뮬레이션으로 확인하였다.

앞으로 이어지는 내용은 다음과 같다. 2.1절에서는 1 kW급 LC-DAB 회로 설계에 대한 내용으로 parallel-series 무선 전력 전송 시스템과 이의 임피던스 변환 회로에 대해 설명한다. 2.2절에서는 유한요소해석을 통한 무선전력전송 코일 형상 설계에 대해 설명하고, 마지막 3절에서는 회로 simulation을 통해 검증 하였다.

1. 서 론

SiC, GaN 등 반도체 스위칭 소자의 성능이 향상됨에 따라 컨버터들의 스위칭 주파수가 점점 높아지는 추세이다^{[1]-[4]}. 또한 스위칭 주파수를 수~수십 kHz이상을 가져 전력을 변환하는 반도체 변압기 (Solid state transformer)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다^[5]. 반도체 변압기는 높은 주파수에서 스위칭 하기 때문에 전력밀도가 높다는 장점이 있다. 따라서 기존의 50 내지 60 Hz에서 동작하는 변압기에 비해 부피가 작고 무게가 가볍다. 반도체 변압기의 1차 측과 2차 측은 dual active bridge (DAB) 컨버터로 구성이 되어 양방향 전력 전송도 가능하다. 기존의 일반적인 고주파 변압기의 경우 높은 전력 전달 효율을 얻기 위해 1차 측과 2차 측 권선이 물리적 거리가 가깝게 배치되어 있다. 따라서 1차 측과 2차 측 권선의 절연 및 냉각을 위해 절연유 등을 사용하며 이는 변압기 무게 증가의 원인이 된다. 또한, 절연유는 온도에 따라 팽창과 수축을 하므로 공기에 노출이 되어있어야 하는데 이는 이물질 유입 또는 절연유가 유출될 위험이 있다. 절연유의 교체 및 누출 시 환경오염 또한 발생한다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 이전 논문인 무선전력전송을 이용한 loosely coupled dual active bridge (LC-DAB) 컨버터에서 무선 전력 전송용 코일을 DAB에 적용하였으나 무선 전력 전송 코일 간의 효율이 90 % 정도로

2. LC-DAB 시스템 회로 설계

2.1 LC-DAB 시스템

설계 목표인 LC-DAB 용 무선전력전송 시스템의 air-gap 은 3 cm 이다. 따라서 송신 코일과 수신 코일 사이의 coupling coefficient 가 0.2 - 0.4 정도로 작다. Coupling coefficient 가 작기 때문에 목표로 하는 출력 측 전압을 얻기 위해서는 transmitter 및 receiver 코일들의 self- 및 mutual-inductance 가 커져야 한다. 하지만 self-inductance는 코일의 크기와 비례하므로 시스템의 크기가 커지게 된다. 만약 1차 측 코일에 캐패시터를 이용해 병렬 공진회로를 만들고, 2차 측에 직렬 공진 회로를 구성하게 되면 병렬 보상된 송신 코일에 흐르는 전류는 수 배로 증폭되어 필요한 mutual-inductance 가 감소하게 된다. 하지만 parallel-series resonant 시스템의 input impedance는 공진주파수에서 최대가 되므로 고조파 전류가 크다. 따라서 커패시터와 인덕터를 추가하여 DC와 고조파에 대한 임피던스를 증가시켜야 한다. 표 1에는 시스템 설계 스펙이 있고 그림 1에는 LC-DAB의 회로도도 있다.

표 1 시스템 설계 스펙

입력 전압	300 V	수신 코일 전류	7.8 A
입력 전류	20 A	출력 전력	1.4 kW
송신 코일 전류	50 A	공극	3 cm

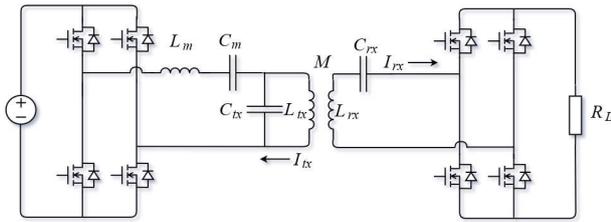


그림 1. LC-DAB 시스템

2.2 LC-DAB용 코일 형상 설계

공극이 3 cm 인 1 kW 급 LC-DAB 의 구현을 위해 선정된 mutual inductance는 13.7 μH 이다. Coupling coefficient가 0.3 일 때 송신 코일과 수신 코일의 self-inductance는 각각 15.5 μH , 134 μH 로 선정했다. Self-inductance와 coupling coefficient를 높이기 위해 페라이트 코어를 사용해 코일을 설계했다. 코일 간 전송효율을 높이기 위해서는 코일의 Q-factor를 높이는 것이 중요하다. 따라서 유한요소해석 시뮬레이션 소프트웨어인 Ansys HFSS로 다양한 코어 형상을 시험했다. 시뮬레이션 결과로 코어의 형상이 그림 2와 같은 I-core 일 때 가장 높은 Q-factor를 얻을 수 있었다. I-core는 두 코일 사이의 air-gap 쪽의 안쪽 ferrite plate와 바깥쪽 ferrite plate의 크기를 조정할 수 있다. 바깥쪽 ferrite plate의 크기를 키우면 자기장이 두 코일 사이로 집중되므로 코일의 coupling이 강해지고 코일의 self-inductance와 Q-factor가 커진다. 안쪽 ferrite plate를 크게 하면 코일의 Q-factor가 증가하지만 coupling-coefficient가 감소한다. 이는 두 코일 사이의 자기장을 안쪽 ferrite plate가 가로막기 때문이다. Q-factor와 coupling-coefficient 둘 다 효율에 관계있기 때문에 내측 ferrite plate의 형상을 적절히 설계할 필요가 있다. 병렬-직렬 튜닝된 LC-DAB 시스템의 경우 송신 코일에 흐르는 전류가 증폭되기 때문에 수신 코일에 흐르는 전류보다 더 크므로 송신 코일의 conduction loss가 주요 손실이다. 따라서 송신 코일의 안쪽 ferrite plate 크기를 키워 Q-factor를 높이고 수신 코일의 안쪽 ferrite plate 크기는 작게 하면서 coupling coefficient를 크게 해야 한다. Ansys HFSS simulation을 통해 송신 코일과 수신 코일의 안쪽 ferrite plate 크기를 각각 12 cm, 11 cm으로 설계했다. 바깥쪽 ferrite plate 크기는 두 코일 다 20 cm 으로 설계 했다.

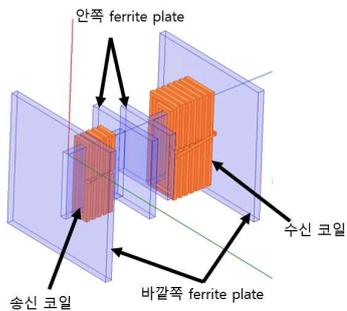


그림 2 제안하는 송신 코일과 수신 코일

표 1 안쪽 Ferrite plate 크기에 따른 송신 코일의 Q-factor

TX core \ RX core	10 cm	11 cm	12 cm
10 cm	459	530	544
11 cm	489	550	613
12 cm	489	515	552

표 2 안쪽 Ferrite plate 크기에 따른 Coupling coefficient

TX core \ RX core	10 cm	11 cm	12 cm
10 cm	0.275	0.272	0.266
11 cm	0.271	0.269	0.265
12 cm	0.265	0.264	0.261

3. 무선전력전송 회로 시뮬레이션

설계한 회로를 검증하기 위해 LTspice를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3에 시뮬레이션 모델이 나타나있다. 표 3에 유한요소 해석법으로 얻은 파라미터들이 정리되어 있다. 입력전력과 출력전력은 1.42 kW와 1.39 kW 으로 측정되어 효율은 97.8 % 이었다. 손실은 임피던스 변환 인덕터가 7.9 W, 송신 코일이 51 W, 수신 코일이 4.3 W가 발생하였다. 송신 코일에서 대부분의 손실이 발생하므로 송신 코일의 Q-factor 를 높여야 LC-DAB 시스템에서 고효율을 달성 가능함을 알 수 있다.

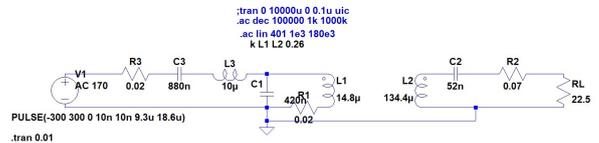


그림 3 Ltspice 시뮬레이션 모델

표 3 무선전력전송 시스템 파라미터

Rtx	20 m Ω	Rrx	70 m Ω
Ltx	14.8 μH	Lrx	134 μH
Ctx	420 nF	Crx	52 nF
Rm	20 m Ω	Lm	10 μH
Cm	880 nF	RL	22.5
Freq	60 kHz	k	0.26

4. 결론

기존의 DAB에 사용되는 고효율 고주파 변압기를 대체할 수 있도록 고효율 무선 전력 전송 코일을 설계하였다. 무선 전력 전송 시스템의 손실을 대부분 송신 코일에서 발생하므로 송신 코일의 Q-factor를 높이는 것이 중요했다. 유한요소해석법으로 시뮬레이션 한 결과 I-core 형태의 코어가 가장 Q-factor가 높은 코일을 만들 수 있었다. I-core의 바깥쪽 ferrite plate를 크게 하면 코일의 Q-factor와 coupling coefficient를 동시에 개선할 수 있었으나 안쪽 ferrite plate의 크기의 경우 Q-factor와는 비례하지만 coupling coefficient와는 반비례했다. 따라서 송

신 코일의 손실이 크기 때문에 송신 코일의 안쪽 ferrite-plate의 크기를 키워 Q-factor를 높이고 수신 코일의 안쪽 ferrite-plate의 크기는 작게 하여 coupling이 약화되지 않도록 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 3 cm air-gap에서 97.8 %의 효율을 얻었다.

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (19RTRP-B146487-05)에 의해 수행되었습니다.
--

참 고 문 헌

- [1] Ross P. Twiname, "A Dual-Active Bridge Topology With a Tuned", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 12, December 2015.
- [2] Gabriel Ortiz, "Modeling of Soft-Switching Losses of IGBTs in High-Power High-Efficiency Dual-Active-Bridge DC/DC Converters", IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol. 60, No. 2, February 2013.
- [3] Juergen Biela, "Design of a 5-kW, 1-U, 10-kW/dm³ Resonant DC-DC Converter for Telecom Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 7, July 2009.
- [4] Myung-Yong Kim et al., "Wireless power supply and pickup coil for solid-state transformer of railway vehicle and module thereof", KOREA Patent 10-2004230-0000, filed November 29, 2017, and issued July 22, 2019.
- [5] Xu She, Alex Q. Huang, Rolando Burgos, "Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Sept. 2013.