

여자코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 토폴로지

이재홍[†], 노중현[†], 김명룡^{*}, 이승환[†]

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과[†], 한국철도기술연구원^{*}

Multilevel IPT Topology with Excitation Coils

Jaehong Lee[†], Junghyeon Roh[†], Myung-Yong Kim^{*}, Seung-Hwan Lee[†]

School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, S. Korea[†]

Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute, S.Korea^{*}

ABSTRACT

기존의 철도차량용 무선전력전송 시스템은 Medium-voltage (MV) 60 Hz 중전압 AC 계통 전압을 Low-voltage (LV) DC로 변환하기 위해 저주파 변압기와 정류기를 사용한다. 하지만 수 MW급의 대전력을 낮은 DC 전압으로 전송하려면 인버터는 수백 A - 수 천 A 이상의 전류용량을 가져야하므로 정류기의 출력 단계 직렬 또는 병렬로 연결된 여러 개의 고주파 변압기를 필요하게 된다 (그림 1참조). 이러한 저주파 변압기, 정류기 및 고주파 변압기는 크고 무거우므로 낮은 전력밀도 및 높은 시스템 가격의 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 저주파변압기, 정류기, 고주파 변압기를 사용하지 않는, 여자 코일을 이용한 새로운 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 토폴로지를 제안한다.

제안된 멀티레벨 무선전력전송 시스템은 멀티레벨 인버터의 각 출력 단계 여자코일 (excitation coil) 이 연결되어 있다. 이 여자코일들은 급전코일 (transmitter coil) 에 전기적으로는 절연되었지만 자기적으로 강하게 결합된다. 여자코일들이 발생시킨 자기장은 급전코일에 유도전압을 발생시키고, 급전코일에서 수백 A 이상의 큰 전류를 흐르게 하여 급전코일에서 강한 자기장을 발생하도록 한다. 이 자기장은 급전코일과 수 cm 이상 떨어져 자기적으로 약하게 결합된 집전코일 (receiver coil) 에 다시 유도전압을 발생시켜 전력을 전달하게 된다. 제안한 새로운 멀티레벨 무선 전력 전송 시스템은 시뮬레이션을 통해 검증했다.

1. 서 론

무선전력전송 시스템은 전원에서 부하까지 물리적 접촉 없이 전달이 가능하다. 따라서 무선전력전송 기술은 기존의 플러그인 방식의 전력전달보다 편리함, 날씨 등 외부환경에 대한 안정성 등의 장점을 가지고 있다. 특히, 무선전력전송을 전기차, 전기버스, 그리고 전기기차에 대해 적용하고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있다 [1-4].

그림 1 에는 기존의 철도차량용 무선전력전송 시스템의 블록 다이어그램이 있다 [4]. 이 시스템은 저주파(50 Hz 혹은 60 Hz) 변압기를 통해 25 kV 의 중전압 계통을 저전압인 750 V 로 강압한다. 하지만 750 V에서 1 MW 이상의 전력을 무선으로 전달하려면 출력 전류가 고주파 (60 kHz) 이면서 동시에

1,300 A 이상이어야 한다. 따라서 기존 연구에서는 여러 개의 인버터를 직류 단계 병렬로 연결하고 각 인버터 출력 단계는 2차 측이 직렬 연결된 고주파 변압기들을 연결해 급전 코일에 인가된 전압을 키우고, 전류를 수백 A 정도로 낮춰 전력 전달에 필요한 전류를 공급해줬다. 급전 코일은 공진 커패시터로 튜닝이 되어있어 강한 자기장을 발생시킬 수 있으며 급전 코일로부터 수 cm 이상 이격된 집전코일에 유기전압을 발생시켜 부하까지 전력을 전달한다. 하지만 중전압 계통을 저전압으로 강압하기 위한 저주파 변압기와 정류기 및 고주파 변압기들은 크고 무거우므로 시스템의 전력밀도를 낮추고, 가격을 높이는 중대한 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 변압기들을 사용하지 않고 여자 코일을 사용하여 중전압 계통에 직결 가능한 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 제안한다.

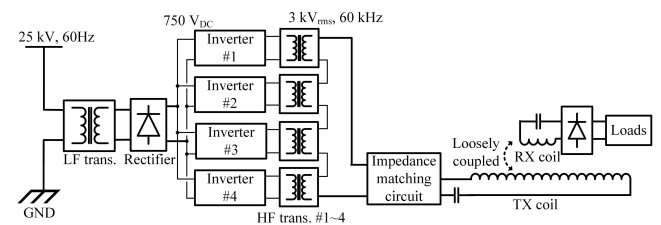


그림 1 기존의 1 MW급 철도차량용 온라인 무선전력전송 시스템
Fig. 1 Conventional 1 MW-level on-line IPT system for train

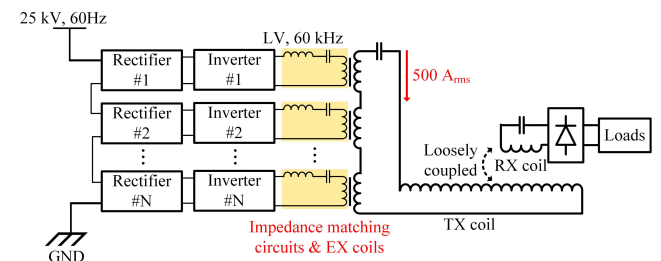


그림 2 제안하는 여자코일을 이용한 멀티레벨 무선전력전송 시스템
Fig. 2 Proposed multi-level IPT system with excitation coils

2. 제안한 멀티레벨 무선전력전송 토폴로지

그림 2에는 제안하는 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 블록

다이어그램이 있다. 멀티레벨 정류기, 인버터, 임피던스 매칭 회로는 중전압 계통과 직결되어 있다. 멀티레벨 정류기는 중전압 계통을 여러 개의 DC 전압원으로 만들게 되고 멀티레벨 인버터는 각각의 DC 전압원을 스위칭하여 60 kHz의 전압을 만들게 된다. 각 인버터의 출력 단에는 여자코일이 연결되어 있으며 이 여자코일들은 급전코일과 자기적으로 강하게 결합되어 있다. 하지만 이 여자코일들과 급전코일은 전기적으로는 절연이 되어 있다. 이 여자코일에 흐르는 전류의 주파수와 위상이 모두 동일하다면 여자코일이 급전코일에 유도하는 전압의 크기는 모두 더해지게 된다. 이 때 급전코일이 공진 튜닝이 되어있어 임피던스가 매우 작다면 급전코일에는 여자코일에 흐르는 전류보다 수십 배 이상 큰 수백 A의 전류가 흐르게 되며 급전코일 전체 구간에 강한 자기장을 발생시켜 다시 집전코일에 유도전압을 발생시켜 전력전달이 가능하다. 여자코일은 급전코일의 일부 구간에만 설치를 해도 급전코일 전체에 전류를 발생시킬 수 있고 여자코일에 흐르는 전류가 작기 때문에 소형화가 가능하다. 따라서 여자코일을 이용하면 전력밀도를 효과적으로 높일 수 있고 인버터와 급전코일을 전기적으로 절연시킬 수 있는 장점도 있다.

3. 제안한 멀티레벨 무선전력전송시스템 모델링

그림 3에는 여자코일과 임피던스 변환회로가 포함된 무선전력전송 시스템의 등가회로가 있다. 인버터의 ZVS 스위칭을 위해 임피던스 변환회로가 여자코일과 직렬 연결되어 있다. 그림 3은 T-model을 이용하여 그림 4와 같이 변환시킬 수 있다. LTspice 회로 시뮬레이션과 등가모델을 이용하여 임피던스를 그려보면 그림 5와 같이 일치한다. 회로의 파라미터는 표 1에 정리되어 있다. 여러 개의 여자 코일이 포함된 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 등가회로는 그림 6과 같다. 멀티레벨 인버터의 AC 전압들은 회로적으로 병렬 연결된 것과 같다. 마찬가지로 T-model로 다시 그린 등가회로는 그림 7에 있다. 그림 8에는 4 개의 여자코일이 포함된 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 입력 임피던스가 그려져 있으며 회로 시뮬레이션과 등가모델이 서로 일치하는 것을 볼 수 있다.

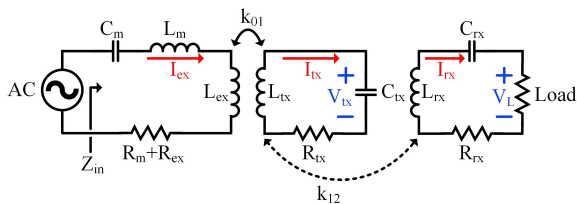


그림 3 여자코일이 포함된 무선전력전송 시스템 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of IPT system with an excitation coil

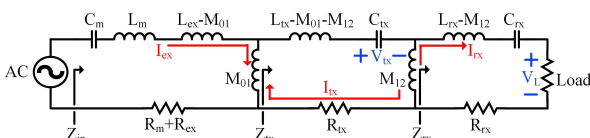


그림 4 T-model로 변환된 무선전력전송 시스템 등가회로
Fig. 4. T-model of IPT system with an excitation coil

표 1 무선전력전송 시스템 파라미터
Table. 1 Parameters of proposed IPT system

L_m	200 μH	R_m+R_{ex}	100 $\text{m}\Omega$
L_{ex}	50 μH	R_{tx}	20 $\text{m}\Omega$
L_{tx}	14.7 μH	R_{rx}	50 $\text{m}\Omega$
L_{rx}	17.2 μH	RL	0.8 Ω
C_m	440 nF	k01	0.43
C_{tx}	545 nF	k12	0.1
C_{rx}	409 nF	Freq	60 kHz

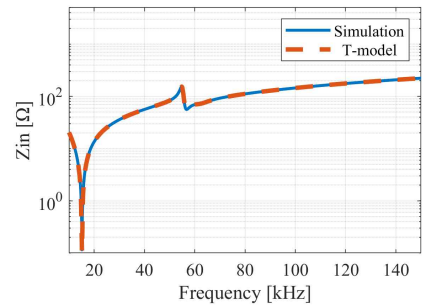


그림 5 여자코일이 포함된 무선전력전송 시스템의 입력 임피던스
Fig. 5 Input impedance of IPT system with an excitation coil

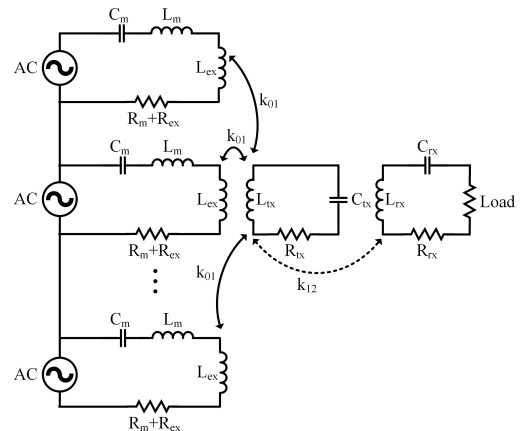


그림 6 여러 개의 여자코일이 포함된 멀티레벨 무선전력전송 시스템 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit of multi-level IPT system with excitation coils

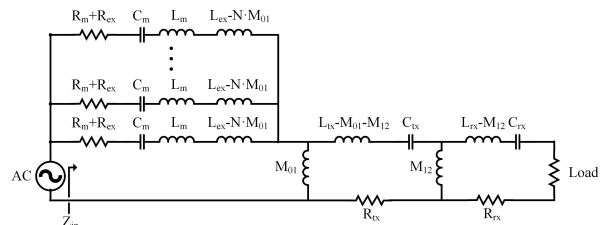


그림 7 T-model로 변환된 멀티레벨 무선전력전송 시스템 등가회로
Fig. 7 T-model of multi-level IPT system with excitation coils

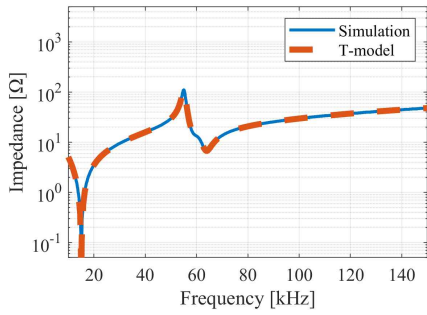


그림 8 4개의 여자코일이 포함된 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 입력 임피던스

Fig. 8 Input impedance of multi-level IPT system with four excitation coils

4. 회로 시뮬레이션

그림 6의 회로를 LTspice를 이용하여 회로시뮬레이션을 진행하였다. 여자 코일의 개수는 4개이고 표 1의 파라미터를 사용하였다. 이 때 급전코일과 집전코일 사이의 air-gap은 7 cm이다. 그림 9-11에는 제안한 멀티레벨 무선전력전송 시스템의 회로 시뮬레이션 결과가 있다. 300 V의 DC 전압을 4개로 나눠 멀티레벨 인버터의 레벨별 출력전압이 75 V 일 때 여자 코일에 흐르는 전류는 1.28 A_{rms}이다. 급전코일에는 여자코일보다 약 21배 증폭된 27.3 A_{rms}가 흐른다. 집전 단에 유도된 전압은 16.5 V_{rms}이다. 4 개의 여자코일, 급전코일, 집전코일에서 발생한 손실은 각각 0.6 W, 14.9 W, 18.9 W이다. 입력전력과 출력전력은 각각 333 W와 302 W로 코일 간 효율은 90 %이다.

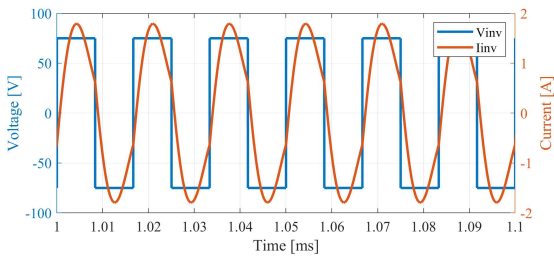


그림 9 시뮬레이션 인버터 출력 전압, 전류
Fig. 9 Simulated inverter output voltage and current

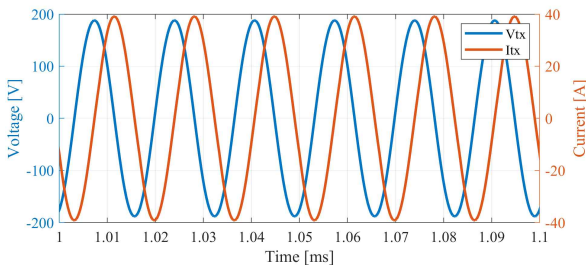


그림 10 시뮬레이션 급전코일 전압, 전류
Fig. 10 Simulated transmitter coil voltage and current

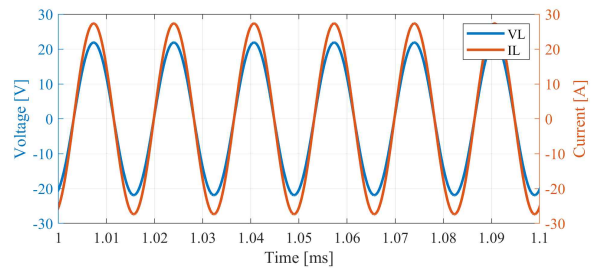


그림 11 시뮬레이션 부하 전압, 전류
Fig. 11 Simulated load voltage and current

5. 결론

기존의 MW 급 철도차량용 무선전력전송 시스템에서 전력 밀도를 낮추는 저주파 변압기, 정류기, 고주파 변압기를 대체하기 위해 중전압 계통에 직결 가능한 온라인 멀티레벨 무선전력전송 시스템을 제안했다. 서로 전기적으로 절연된 여자코일이 급전코일에 발생시킨 유도전압을 모두 더해 급전 코일에 큰 전류를 발생시켜 강력한 자기장을 이용해 집전 코일까지 전력을 무선으로 전달시킬 수 있다. 제안한 시스템은 회로 시뮬레이션 통해 입력 임피던스 및 전력 변환 가능성을 검토했다.

참고 문헌

- [1] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.
- [2] A. El-Shahat, E. Ayisire, Y. Wu, M. Rahman, and D. Nelms, "Electric Vehicles Wireless Power Transfer State-Of-The-Art," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 24–37, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004.
- [3] A. Zaheer, G. A. Covic, and D. Kacprzak, "A Bipolar Pad in a 10-kHz 300-W Distributed IPT System for AGV Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3288–3301, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281167.
- [4] J. H. Kim *et al.*, "Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6242–6250, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2417122.