

철도 전차선의 보조전원을 위한 전력선 커플러 연구

Study on Power Line Coupler for Auxiliary Power to Overhead Line

이건복 · 이경표 · 김명룡 · 이수길 · 창상훈

Gunbok Lee · Kyung-Pyo Yi · Myung Yong Kim · Su Gil Lee · Sang Hoon Chang

요 약

철도 전차선 구조에 고주파 전력을 인가할 수 있는 전력선 커플러에 대해 분석하였다. 전차선 구조는 고압의 환경에서 보조전원을 공급하기가 어렵고, 먼 거리까지 전력을 전달하는 방법이 필요하다. 이를 위해 코어를 사용하지 않는 로고스키 코일에 공진을 활용하는 방법을 제안하였다. 조가선, 전차선, 드로퍼로 구성된 간이 전차선 구조를 제작하였고, 여러 사이즈의 커플러를 제작하여 조가선에 연결한 다음 일정 거리만큼 떨어진 두 커플러의 전달 특성을 비교하였다. 가장 성능이 좋은 커플러에 매칭 회로를 적용하여 측정한 결과, 2.5 m 거리에서 53 %의 전달 효율을 나타내었다. 제안하는 방법은 전차선과 같은 특수한 구조물에서 기존의 도선을 활용하여 보조전원을 인가할 수 있음을 보여준다.

Abstract

A power line coupler that can apply high-frequency power to a railway overhead line structure was analyzed. It is difficult to supply auxiliary power to an overhead line in a high-voltage environment, and doing so requires a long-distance transfer. A method is proposed that utilizes the resonance on the Rogowski coil, which does not use a magnetic core. A simple overhead line structure was fabricated that consisted of a contact wire, messenger wire, and dropper. Couplers of various sizes were fabricated and deployed on the messenger wire, and the transfer characteristics of the two couplers were compared at a distance. As a result of applying the matching circuit to the coupler, the transmission efficiency was 53% at a distance of 2.5 m. The proposed method shows that it is possible to apply the auxiliary power by using the existing conductor in a special structure, such as the overhead line.

Key words: Contactless, Wireless Power, Overhead Line, Power Coupler, Powerline Communication

I. 서 론

전차선은 전기철도에서 차량에 전력을 전달하는 매개체로서 상부에 설치되는 가선이며, 보조가선인 조가선, 전차선과 조가선을 연결해 주는 드로퍼, 대지에서 지지해주는 전주, 각종 절연 애자 등으로 구성되어 있다. 전차선에는 25 kV의 고전압이 가압되어 있어 철도 차량이 지나

갈 때 큰 전류가 흐르고 사람이 접근하면 매우 위험한 설비이다. 이 때문에 안전사고를 예방하기 위해 역사 근처의 조가선에는 고압위험표지판이 설치되어 있다. 지금까지의 표지판은 기본적인 인쇄패널이며, 어두운 곳에서는 잘 눈에 띄지 않고 작업자들에게는 활선상태 정보도 제공해주지 않는다. 최근에는 이를 개선하여 고압위험표지에 LED를 설치하고, 활선표시장치를 설치하려는 수요가

「본 연구는 한국철도기술연구원 주요 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

한국철도기술연구원 추진시스템연구팀(Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute)

· Manuscript received October 20, 2017 ; Revised January 10, 2018 ; Accepted July 9, 2018. (ID No. 20171020-110)

· Corresponding Author: Gunbok Lee (e-mail: gunbok@krii.re.kr)

증가하고 있지만 보조전원의 부재로 적용되지 못하고 있다. 또한, 전차선의 유지보수 효율화를 위한 모니터링 시스템도 수요가 발생하고 있으나, 전원을 공급하는 어려움으로 용이하게 적용되지 못하고 있다^[1].

보조전원공급이 어려운 이유는 전차선의 고압환경에 의해 외부에서 유선으로 전원이 공급될 경우, 장치에서 절연 파괴가 일어나기 때문이다. 전주도 전차선과는 절연체자로 전기적인 분리가 되어 있는 만큼 일반적인 방법으로는 외부 전원을 공급할 수 없다. 기존에는 태양광 발전, CT (current transformer)를 이용한 에너지 하베스팅 방법^[2]이나 배터리를 이용한 방법이 제안되었지만, 상시 전원 공급이 어렵고, 발전 용량이 적거나 정기적으로 교체를 해주어야 하는 문제점이 나타났다.

본 논문에서는 전차선 구조에 보조전원을 공급하는 기술 중에 전력선 커플러를 이용한 전력 전달 방법에 대해 분석하였다. 여러 사이즈의 전력커플러를 비교하였고, 전차선 구조에서의 전달 특성에 대해 분석하였다.

II. 전차선 보조전원 공급과 전력선 커플러

제안하는 전차선 보조전원 공급 방법은 두 가지 기술이 합쳐진 형태이다(그림 1). 첫 번째는 절연거리극복기술로서 기존에 소개된 자기공진 무선전력전송 기술이다^{[3][4]}. 이 방법으로 외부 전원을 절연성이 유지된 상태로 조가선에 전력을 전달할 수 있다. 두 번째는 전력선 결합기를 이용한 전력전달 방법이다. 첫 번째 방법으로 외부 전원을 저압부(전주)에서 고압부(조가선)로 수신한 후 이를 다시

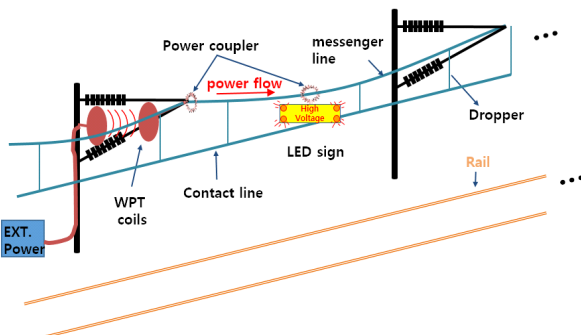


그림 1. 전차선 보조전원 공급 방법
Fig. 1. Method of supplying auxiliary power to overhead line.

먼 거리에 있는 장치에 보내줄 경우에 전차선 구조를 매개체로 활용하여 전력을 전달해 주는 방법이다. 첫 번째 기술은 기존 연구된 내용을 활용할 수 있으므로 본 논문에서는 두 번째 기술인 전력선 커플러를 이용한 방법에 대해 분석하였다.

전차선 구조를 이용한 전력전달 방법은 토로이달 형태의 전력선 커플러를 조가선에 설치하여 송신 커플러에서는 전차선 구조에 전력을 인가하고, 수신 커플러에서 전력을 수신하는 원리이다. 이 방법은 기존의 CT나 비접촉식 전력선 통신^[5]과 유사한 코일 형태를 사용하는 방법이지만 코어를 사용하지 않고 공진을 이용한다는 점에서 차이가 있다. 코어를 사용하게 되면 수백 암페어의 전류에 대한 자기 포화가 발생할 수 있고, 조가선과의 상호 인덕턴스가 매우 높아져서 메인 전원인 60 Hz의 전압이 수신 장치에 크게 유기되어 장치가 파손될 우려가 있다. 또한 메인 전류는 중간에 드로퍼에 의해 조가선과 전차선에 일정한 비율로 나뉘어 진행하게 되는데, 코어가 연결된 조가선 구간의 임피던스가 높아져 전차선 쪽에 전류가 집중되는 현상이 발생하여 전력 품질 및 전차선 열화에 영향을 줄 수도 있다. 반면에 코어를 사용하지 않는 토로이달 코일(로고스키 코일^[6])은 조가선과의 결합계수가 낮아지지만 공진 현상을 이용하면 낮은 결합계수에서도 높은 비율의 전력을 보낼 수 있다.

III. 간이 전차선 실험

전차선 구조와 전력선 커플러의 특성을 측정하기 위해 그림 2와 같은 전차선 구조(한국철도시설공단 KR E-03130 기준)를 제작하였다. 선로와 지지대는 절연되어 있

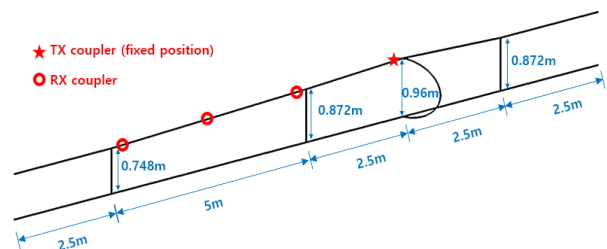


그림 2. 간이 전차선 구조
Fig. 2. Overhead line structure.

고 실제 철도에서 사용하고 있는 도선을 사용하였다. 가동브래킷은 약 2 m 전기적 길이를 감안하여 일반도선으로 대체 제작하였다.

전력선 커플러는 그림 3과 같이 자성체가 포함되지 않는 플라스틱 재료를 이용하여 지지대를 제작하였고, 외부 지름 50 mm, 높이 50 mm, 10턴의 기본 로고스키 코일(A 코일)을 기준으로 높이, 두께, 턴 수 등이 서로 다른 코일을 제작하였다(표 1). 각각의 전력선 커플러를 송수신기 쌍으로 거리 2.5 m, 5 m, 7.5 m로 바뀌가며, 네트워크 분석기(N9915A, Keysight)로 측정하였다. 하나의 커플러는 고정(그림 2의 별표)되어 있고, 다른 하나의 커플러의 위치만을 변경하였다.

표 1은 16 MHz에서 각 커플러의 S_{21} 을 측정한 결과를 SPICE 시뮬레이터로 공진 및 임피던스 매칭하여 계산한 결과이다(16 MHz는 측정 데이터 분석을 통해 전달 계수가 가장 높게 나오는 주파수로 분석되었다. 이는 전차선 구조의 고유 공진모드에 따른 것으로 판단된다.). 결과에서 커플러의 길이가 길고 부피가 크며, 턴 수가 증가할수

표 1. 커플러 종류별 파라미터와 거리에 따른 S_{21}

Table 1. Coil parameters and S_{21} vs. distances for each coupler type.

Case	Coil parameters (mm)				S_{21} (dB) vs. distances (m)		
	r_i	r_o	h	t	2.5	5	7.5
A	11	25	50	10	-2.85	-2.44	-7.13
B	11	25	100	10	-2.17	-2.51	-10.01
C	11	25	25	10	-8.64	-5.58	-6.16
D	11	40	50	10	-2.35	-3.17	-8.02
E	11	17.5	50	10	-3.85	-3.30	-4.5
F	11	25	50	15	-2.08	-2.09	-5.92
G	11	25	50	5	-7.37	-8.45	-13.07

록 최대 전달 계수가 증가하는 것으로 나타났다. 자기장이 쇄교하는 면적이 넓어지고 권전수가 증가하면 조가선과 커플러의 결합계수가 증가하여 더 많은 전력이 전달되는 것으로 판단된다. 그 중 F는 기본 커플러(A)와 부피가 동일하고 턴 수만 증가한 것인데, 전달 계수가 가장 높게 측정되어 가능한 턴 수를 높게 제작하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그림 2에서 측정 위치를 살펴보면 수신 커플러의 위치는 송신커플러에서 드로퍼 한 개를 건너뛴 위치로 설정하였다. 이는 고주파 전력이 드로퍼를 지나서 전달될 수 있는지를 검증해 본 것이다. 송신커플러의 위치는 조가선-드로퍼-전차선에 의해 형성된 루프(혹은 조가선-드로퍼-전차선-가동브래킷 도선)에 포함돼 있기 때문에 송신 커플러의 전력이 조가선에 전달되더라도 전류의 흐름은 루프에 갇혀 드로퍼를 넘지 못할 수도 있기 때문이다. 그러나 실험을 통해 특정 공진 주파수에서는 드로퍼를 지나 전력이 전달될 수 있음을 증명하였다.

가장 효율이 좋은 F 커플러를 선택하여 송수신 커플러의 매칭회로를 설계하였다. 매칭회로는 커플러와 가까운 쪽에서부터 직렬-병렬 캐패시터 회로이며, 2.5 m에서 매칭이 되도록 제작하였다. 송신기는 직렬 캐패시터(26.8 pF)만 연결하였고, 수신기는 직렬 캐패시터(26.8 pF)와 병렬 캐패시터(195 pF)를 같이 연결하였다(그림 4). 측정 결과 최대 효율은 약 15.7~15.9 MHz에서 측정되었으며, S_{21} 이 2.5m에서 -2.73 dB, 5m에서 -3.65 dB, 7.5m에서 -14 dB로 측정되었다(그림 5). 앞선 시뮬레이션 매칭 결과보다는 낮게 측정되었지만, 2.5 m에서 53 % 이상 전력이 전달됨을 알 수 있다. 표 1의 F결과를 참고하면 5 m에서 매

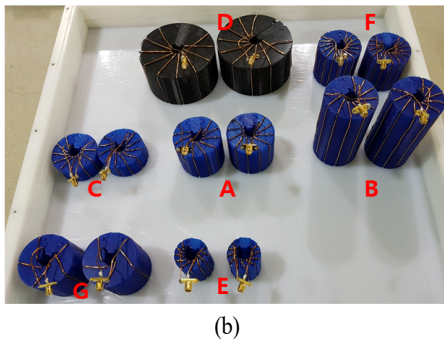
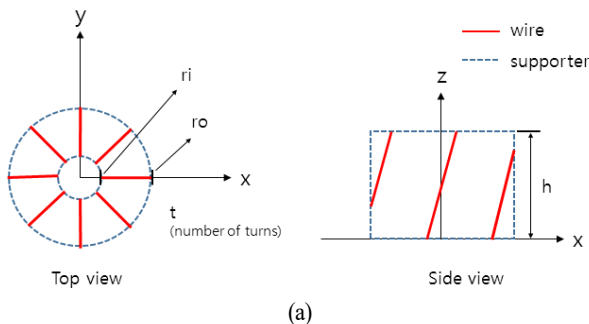


그림 3. (a) 전력선 커플러 구조, (b) 제작된 커플러
Fig. 3. (a) Structure of power coupler, (b) Fabricated couplers.

칭을 해도 50 % 이상의 효율이 나올 것으로 예상 가능하기 때문에 거리를 늘리더라도 효율이 크게 떨어지지 않을 것임을 알 수 있다. 7.5m 거리에서는 약 16 MHz에서 송신커플러 매칭이 이루어졌음에도 불구하고 전달 효율이 낮았는데, 이는 16 MHz의 주파수를 갖는 전류가 전차선 구조에 분포할 때 7.5 m 위치에 음영구간이 나타나 전달이 안 된 것으로 판단된다. 세 가지 측정 위치가 모두 하나의 루프에 포함되어 있더라도 모든 위치에서 전력 수신이 가능한 것은 아님을 알 수 있다. 결과에서는 주파수가 낮을 때 전송 효율이 급격히 하락하였는데, 이는 커

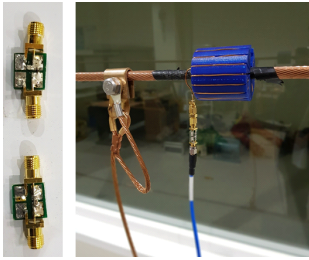


그림 4. 매칭 회로와 S-parameter 측정 사진
Fig. 4. Photograph of matching circuit board and S-parameter measurement setup.

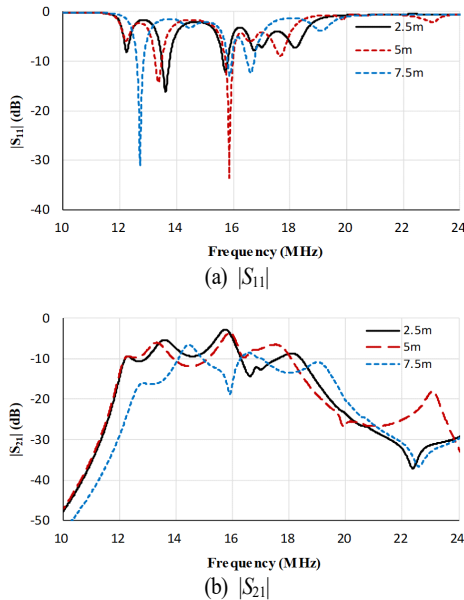


그림 5. 거리에 따른 S-parameter 측정값 vs. 주파수
Fig. 5. S-parameter vs. freq. for each transfer distance.

플러가 전차선의 메인 전력인 60 Hz와는 상호작용을 일으키지 않을 것임을 예측할 수 있다.

IV. 결 론

전력선 커플러를 이용하여 전차선 구조에 보조전원을 전달하는 방법에 대해 분석하였다. 전력선 커플러는 부파가 크고 권선수가 높을수록 전력 전달이 잘 일어났고, 전달과정에서 드로퍼가 있더라도 공진 주파수를 이용하면 이를 극복할 수 있었다. 매칭회로를 설계하여 2.5m의 거리에서 53 %의 전력을 송수신하였다. 이 결과는 전차선 구조의 보조전원 공급 기술의 기초연구로서 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, H. Jung, H. Kim, and S. Kwon, et al, "Development of an FPGA-based online condition monitoring system for railway catenary application," in *8th World Congress on Railway Research (WCRR)*, Seoul, 2008, pp. 1-7.
- [2] Z. Wu, Y. Wen, and P. Li, "A power supply of self-powered online monitoring systems for power cords," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 4, pp. 921-928, Dec. 2013.
- [3] 이승환, 이경표, "6.78 MHz, 거리 60 cm, 50 W급 무선 전력 전송 시스템용 high quality factor PCB 코일 개발," *한국철도학회논문집*, 19(4), pp. 468-479, 2016년 8월.
- [4] 이건복, 박위상, "4-코일 자기 공진 무선 전력 전송 시스템의 해석법 연구," *한국전자파학회논문지*, 24(2), pp. 168-179, 2013년 2월.
- [5] O. Bilal, E. Liu, Y. Gao, and T. O. Korhonen, "Design of broadband coupling circuits for power line communication," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Power Line Communications (ISPLC)*, Mar. 2004.
- [6] D. S. In, S. Shon, and J. J. Lee, "A study on the implementation of inductive coupler with Rogowski coil for BPLC," in *2008 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Hanoi, 2008, pp. 327-330.