

전류원 급전-변압기 공진형 자기유도 전력전달시스템 특성연구

허진*, 이우영*, 조정구***, 조규형*, 임춘택**

*Dept. of EE,

**Dept. of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST

335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, KOREA

***Green Power Co., Ltd.

Abstract

일반도로에서 자유주행이 가능한 온라인 전기자동차(On-Line Electric Vehicle, OLEV)에 적용하기 위해 전류원 급전방식의 직렬-직렬 공진형 자기유도 전력전달시스템(Inductive Power Transfer System, IPTS)을 개발하였다. OLEV용 IPTS에서는 급전선로의 누설 인덕턴스가 크고 집전픽업의 유무에 따라 입력측에 유기되는 전압변동이 심한 특성을 반영하여 급전측에 공진형 전류원을 사용한다. 또한 차화 인덕턴스와 집전픽업의 누설 인덕턴스를 포함하여 변압기를 완전 공진시킨다. 본 논문에서는 이러한 방식의 IPTS에서 최대출력을 전달하기 위한 조건을 찾고, 이로써 최대 출력전류 및 출력전력을 제한하는 요인을 찾아 최적설계를 할 수 있도록 하였다. 또한 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

1. Introduction

지금부터 100여년 전 테슬라는 공진형 변압기 형태의 테슬라코일^[1]을 제안하여, 비접촉 자기유도에 의한 무선 전력전달이 가능함을 보였다. 현재 IPTS 기술은 광산, 해양 크레인, 반도체 및 디스플레이 공장의 자동이송장치 및 모바일 기기의 충전장치, 인체 내 의료장치 등에 적용되고 있으며, 최근에는 전기자동차에도 적용되고 있다.

미국 California PATH(Partners for Advanced Transit and Highways)팀은 도로를 주행하면서 자동차 운행에 필요한 전력을 공급받을 수 있는 IPTS 전기자동차를 1989년부터 연구^[2]했다. 뉴질랜드 오클랜드대학 연구팀도 IPTS에 대한 많은 연구결과^[3,4,5]를 발표하였다.

우리나라에서도 카이스트가 새로운 형태의 IPTS를 적용한 OLEV를 제안^[6], 공극간격을 세계 최고수준인 20cm로 높이고, 집전전력과 효율 등에 있어서도 실용화에 근접했다는 평가를 받고 있다. OLEV용 IPTS는 급전선로의 누설 인덕턴스가 크고 집전픽업의 유무에 따라 입력측에 유기되는 전압변동이 심하기 때문에 이를 극복하기 위해 급전측에 공진형 전류원을 사용하였다. 그런데 현재까지 발표된 IPTS관련 연구 결과들은 대부분 전압원 입력을 바탕으로 한 자기공명회로에 관한 것이기 때문에 온라인 전기자동차에 직접 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 전류원 입력방식의 자기공명 IPTS에 대해 새롭게도 다양한 해석을 하였다. 이를 통해 최대출력을 전달하기 위한 조건과 이를 제한하는 요인을 찾고, EMF 관련 최적설계를 할 수 있도록 하였다. 또한 실험을 통해 본 논문에서 제안한 해석결과의 타당성을 검증하였다.

2. 전류원 입력 직렬-직렬 자기공명 회로

2.1 OLEV용 전류원 입력 자기공명 회로

온라인 전기자동차용 IPTS는 그림 1과 같이 직렬-직렬 공진방식을 사용하였다. 인버터의 전류제어를 위해서 급전선로에 직렬로 보상 커패시터를 연결하고 선로의 공진 주파수(f_1)보다 높은 주파수(f_2)로 스위칭함으로써, 잔여 누설 인덕턴스(ΔX_{L1})를 남긴다. 급전선로의 전류(I_s)는 식 (3)으로 정해지고 부하변동에 상관없이 항상 일정하도록 입력 전압(V_{in})을 가변 시킨다. 그림 2는 입력단을 등가의 전류원으로 바꾸고 2차측의 임피던스와 저항을 턴수비(n)를 고려하여 1차측으로 환산해서 나타낸 등가회로다.

$$\Delta X_{L1} = X_{L1} - \frac{1}{X_{C1}} \quad (1)$$

$$X_{L1} = 2\pi f_s L_1, \quad X_{C1} = \frac{1}{2\pi f_s C_1} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{V_{in}}{\Delta X_{L1}} \quad (3)$$

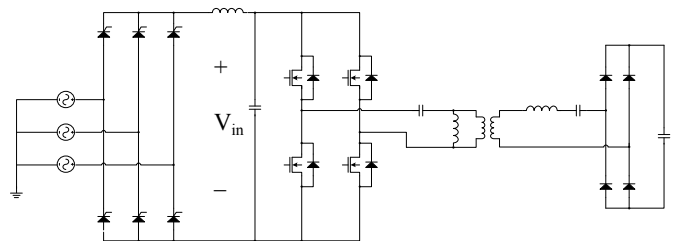


Fig. 1 The IPTS circuit for OLEV

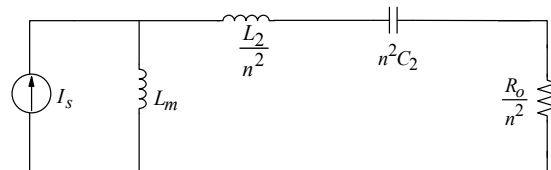


Fig. 2 An equivalent circuit of the IPTS reflected to the primary

2.2 2차측만 공진시키는 픽업의 출력특성

IPTS의 집전픽업은 부하에 최대전력을 공급하기 위해서 보상 커패시터를 누설 인덕턴스에 연결하고 스위칭 주파수(f_2)에 LC공진시킨다. 그 결과 그림 2의 등가회로에서 누설 인덕턴스와 보상 커패시터에 의한 임피던스는 LC공진으로 서로 상쇄되고, 출력전압과 출력전력은 다음과 같다.

$$V_o = n\omega_s L_m I_s \sqrt{1 - \frac{n^2 L_o^2}{I_s^2}} \quad (4)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_o} = \frac{R_o (n\omega_s L_m I_s)^2}{R_o^2 + (n^2 \omega_s L_m)^2} \quad (5)$$

위 식에서 L_m 은 차화 인덕턴스, ω_s 는 스위칭 각주파수다.

집전픽업의 누설 인덕턴스(L_2)만 보상한 직렬공진회로에서는 출력전류를 증가시키면 출력전압이 급격하게 감소한다. 최대 출력전력은 부하저항(R_o)과 자기 임피던스(ωL_m)가 등가적으로 같아졌을 때 얻어지며, 부하저항이 이보다 크거나 작아지면 출력전력이 감소한다. 결국 최대 출력전력은 자기 임피던스(ωL_m) 크기에 의해 좌우되며, 이렇게 되면 OLEV에서 원하는 큰 출력을 얻을 수는 없다.

2.3 제안된 완전 공진형 픽업

출력전력을 대폭 증가하기 위한 방안으로 본 논문에서는 자화 인덕턴스를 포함하여 집전픽업의 2차측이 완전공진하는 방식을 제안하였다. 공진 주파수(f_s)에서 L_2 와 $n^2 L_m$ 을 모두 포함한 리액턴스는 보상 커패시턴스(C_2)에 의해 상쇄되고, 1차측으로 환산된 등가 출력전압(V_o^*)의 크기는 입력전류에 자기 임피던스를 곱한 값의 크기와 같아진다.

$$|V_o^*| = \omega_s L_m I_s \quad (6)$$

또한, 공진 주파수(f_s)에서 자화 인덕턴스 양단의 자기전압(V_{Lm}), 자기전류(I_{Lm}), 그리고 1차측으로 환산한 등가 부하전류(I_o^*)는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$V_{Lm} = j\omega_s L_m I_s (1 - j\omega_s L_m / R_o^*) \quad (\because R_o^* = R_o / n^2) \quad (7)$$

$$I_{Lm} = V_{Lm} / j\omega_s L_m \quad (8)$$

$$|I_{Lm}| = I_s \sqrt{1 + Q_m^2} \quad (\because Q_m = \omega_s L_m / R_o^*) \quad (9)$$

$$I_o^* = I_s \frac{j\omega_s L_m}{R_o^*}, \quad |I_o^*| = I_s Q_m \quad (10)$$

자기전압(V_{Lm})은 부하저항이 자기 임피던스($\omega_s L_m$) 보다 작아지면 급격히 증가하며 위상도 입력전류(I_s)와 동위상에 가까워지게 된다. 1차측으로 환산한 등가 출력전류(I_o^*)는 입력전류(I_s)와 90도의 위상 차이(lead)가 나고, 부하저항이 자기 임피던스($\omega_s L_m$) 보다 매우 작아지면 자기전류(I_{Lm})와 등가 출력전류(I_o^*)의 크기는 비슷해진다. 이 회로에서 IPTS 출력전압(V_o)과 출력전력(P_o)은 다음과 같다.

$$V_o = n\omega_s L_m I_s \quad (11)$$

$$P_o = V_o^* / R_o = \frac{(n\omega_s L_m I_s)^2}{R_o} \quad (12)$$

완전공진회로에서 출력전압은 식 (4)와 달리 출력전류에 의존하지 않으며, 그림 3과 같이 출력전력은 부하저항이 작으면 이론상 무제한으로 증가할 수 있다.

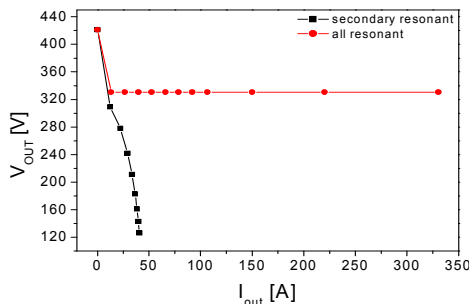


Fig. 3. Comparison of the V_{out} between secondary resonant and all resonant: simulation, $I_s=200A$ (rms), $n=4$.

2.4 제안된 완전 공진회로의 특징

2차측의 누설 인덕턴스만 커패시터로 공진시키는 기존의 IPTS와 달리, 본 논문에서 제안한 자화 인덕턴스를 포함한 완전공진회로는 다음과 같은 특징을 가진다

- 1) 출력전압은 자기포화나 공진 주파수의 변동만 없다면 부하저항과 무관하고 입력전류보다 상당히 큰 전류라도 출력전류로 흘릴 수 있다
- 2) 등가 출력전류(I_o^*)는 자기전류에 의해 생성된 허상전류이며 이론적으로 무한정 증가할 수 있다
- 3) 급전측에서 입력전류(I_s)와 자기전압(V_{Lm})은 작은 부하전류에서 거의 90도 위상차를 가지다가 부하전류가 커지면 동위상에 근접하게 된다.
- 4) 자화 인덕턴스를 포함한 완전공진회로에서 출력전력은 부하전류에 무관하고 누설 인덕턴스에 의해 제한을 받지 않는다.
- 5) 입, 출력전류는 90도 위상차를 가지므로 입, 출력전류 각각에 대하여 EMF를 상쇄시켜 주어야 한다

그림 4는 IPTS 출력전류(I_o)와 출력전압(V_o) 실험결과로 출력전류가 입력전류(I_s/n)보다 클 수 있음을 보여준다.

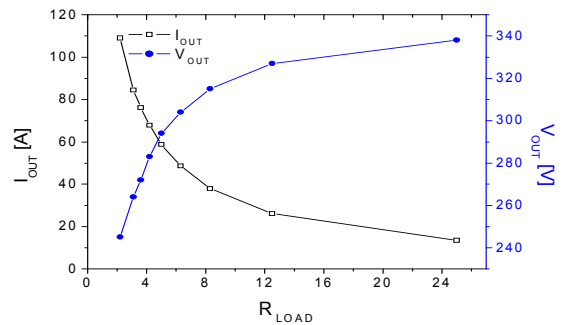


Fig. 4. Measurement result of the proposed IPTS: $I_s=200A$ (rms), Resistive load, air-gap=19.5cm, $n=8$ ($N_1=4$, $N_2=32$).

3. Conclusion

OLEV용 IPTS는 1차측을 전류원으로 하고 L_m 을 포함한 완전공진회로를 집전픽업에 적용함으로써 일반변압기와는 달리 출력전류를 입력전류와 상관없이 크게 하여 최대출력을 크게 얻을 수 있다. 본 논문을 통해 OLEV의 IPTS 특성을 정량적으로 해석하고 최대 출력전류 및 출력전력을 제한하는 요인을 찾아, 이를 바탕으로 IPTS의 최적설계가 가능해졌다.

Acknowledgment

본 연구는 교육과학기술부에서 지원한 카이스트 온라인 전기자동차 원천기술개발 사업의 일환으로 진행되었다.

Reference

- [1] N. Tesla, U.S. Patent 1,119,732, 1914
- [2] California Partners for Advanced Transit and Highways, <http://www.Path.berkeley.edu>
- [3] G. A. Covic, G. Elliott, O. H. Stielau, R. M. Green, and J. T. Boy, "The design of a contact-less energy transfer system for a people mover system", in Proc. Int. Conf. Power Syst. Technol., Perth, Australia, Dec. 4-7, 2000, vol. 2, pp. 79-84.
- [4] Chewei-Sen Wang, O. H. Stielau, G. A. Covic, "Design consideration for a contactless electric vehicle battery charger" IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 52, 2005, pp.1308-1314.
- [5] G. A. Covic, J. T. Boy, H. G. Lu, "A three-phase inductively coupled power transfer system", IEEE conf. on Ind. Electronics and Applications, 2006, pp. 1-6.
- [6] J. Huh, E. H. Park, G. H. Jung, C. T. Rim, "High efficient inductively power supply system implemented for On Line Electric Vehicles", 전력전자 추계학술대회, 2009, pp.105-110.