

LLC 공진형 인버터를 이용한 IPT 전력전송 효율 특성 분석

Characteristic Analysis of The Efficiency of the Power Transfer of the IPT Using LLC Resonant Inverter

김기병† 이형우* 박찬배* 이병송* 김남포*
Ki-Byoung Kim Hyung-Woo Lee Chan-Bae Park Byung-Song Lee Nam-Po Kim

ABSTRACT

Nowadays, the development of sustainable transportation has been researched all over the world and Korea Railroad Research Institute (KRRRI) is conducting a study in order to apply the sustainable Contactless Inductive Power Supply Technology to the electric railway system. But, inherent large flux leakage has limited the high power transmission because the gap of the Inductive Power Transformer(IPT) is much larger than one of the conventional transformers.

In this study, a method to compensate the leakage flux and improve the power transmission by using LLC resonant inverter was proposed, incorporated in a built system, and verified by experimental work.

1. 서론

전 세계적으로 친환경적, 에너지 효율적인 교통수단에 관심을 집중하고 있다. 이에 친환경적 교통수단인 철도가 각광 받고 있고, 철도에 공급하는 에너지의 효율을 높이기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 에너지 효율을 높이기 위한 방식으로 무접촉 급전장치를 이용한 방식이 현재 국·내외에서 연구 및 시험 운행되고 있다. 국외에는 Wampfler사에서 캐나다의 퀘베히차량, 이탈리아의 버스에 적용시켜 시험 운행 중에 있다. 국내에는 KAIST에서 온라인 버스에 적용시켜 시험 운행 중에 있으며 전기연구원에서도 현재 연구가 진행되고 있다. 한국철도기술연구원(KRRI)에서는 유도급전용 변압기(Inductive Power Transformer, IPT)를 적용하여 각 역사에서 정차 중일 때 배터리(Battery)나 슈퍼커패시터(Super Capacitor)에 에너지를 충전할 수 있는 무접촉 급전 기술(Contactless Inductive Power Supply Technology)을 전기철도 시스템에 도입하기 위한 연구를 진행하고 있다.

하지만 IPT는 기존 변압기에 비해 공극(Gap)이 크기 때문에 결합계수가 낮아 누설자속이 필연적으로 증가하여 대전력 전송이 제한되어 효율 개선의 필요성을 가지고 있다.

본 연구에서는 전력 전송의 효율을 높이기 위해 IPT의 누설 자속(Leakage Flux)을 보상할 수 있는 LLC 공진형 인버터(LLC Resonant Inverter)를 적용 하였으며, 한국철도기술연구원에서 제작한 5kW급 축소형 차량 시스템에서 IPT 전력 전송 효율을 측정하여 특성을 분석하였다.

† 교신저자, 한양대학교
E-mail : kbkim@hanyang.ac.kr
* 한국철도기술연구원, 주행추진연구실

2. 본 론

2.1 철도 차량용 IPT

유도급전용 변압기(Inductive Power Transformer, IPT)는 비접촉 전력전송장치로써, 응용범위는 전동칫솔 충전기, 핸드폰 충전기와 같은 소용량 시스템뿐만 아니라, 전기자동차, 산업용 이송장치와 같은 대용량 시스템에까지 확대되고 있다. IPT의 원리는 전력 변환을 위해 변압기에서 주로 사용되어 온 방식으로 절연된 두 개의 권선 사이에 발생하는 전자기유도를 이용하는 것이다. 즉, 권선 중 하나의 1차 권선에 교류 전압을 가하게 되면 자속이 쇄교하는 철심을 공유하여 감겨있는 2차 권선에 전자기 유도가 발생하여 전력을 전달 할 수 있게 되고, 각 권선에 감은 턴수에 따라 전압 크기를 조절 할 수 있다. 하지만 IPT는 철심을 공유하지 않고 1,2차 철심 사이에 공극을 가지는 것이 큰 특징이다 .

그림 2-1은 Bombardier사의 PRIMOVE라는 경량전철을 보여준다. 이 시스템은 추진을 위한 250[kW]급 전력을 바닥급전식 IPT 시스템을 이용하여 정차 또는 운행 중에 전달받는 방식이다. 이 방식은 노선 전체에 IPT 시스템이 설치되어야 하므로, 초기 투자비가 많이 드는 단점이 있다.

한국철도기술연구원에서도 경량전철(트램)용 무접촉 급전시스템으로써 IPT 시스템 적용을 위한 기초 연구를 진행하고 있으며, 차량이 일정시간 역에 정지해 있는 동안 지상의 급전 전력을 차량으로 전달하는 급속 충전 방식을 검토하고 있다.



그림 2-1 Bombardier사의 PRIMOVE 경량전철 시스템

2.2 U-U 타입 IPT

본 연구에서는 철도차량에 적용하기 위한 축소형 IPT 모듈을 설계하였다. 그림 2-2는 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT의 시작품을 보여준다. 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT의 출력은 모두 5[kW]이며, 턴 수는 IPT의 1차측이 10턴, 2차측이 6턴이며, IPT의 공극은 모두 5[mm]이다. IPT용 1차/2차 코어에 적용된 재료는 Nano-Crystalline 프로세스에 의해 제작된 아몰포스 메탈이다. 표 2-1에 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT의 주요 설계 사양을 정리하였다.



그림 2-2 U-U 타입 IPT 시작품

표 2-1 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT의 주요 설계 사양

Contents	U-U Type IPT
Output Power	5 kW
Core Material	Amorphous metal (Nano-Crystallization Process)
Number of Turns	Primary 10 Turns / Secondary 6 Turns
Ritz Wire Spec.	Φ3 mm / Φ7 mm

2.3 IPT 파라미터 도출 시험

본 연구에서는 U-U type IPT의 파라미터는 Additive polarity, Subtractive polarity의 두 방식을 이용하여 각 파라미터를 측정하였고, 측정된 파라미터는 식 (2-1), (2-2)을 이용하여 1, 2차측 자기(self) 인덕턴스와 상호(mutual)인덕턴스를 도출하였다. 1, 2 차측 누설(leakage)인덕턴스는 식 (2-3), (2-4)을 이용하여 도출하였다. 그림 2-3은 IPT의 등가회로를 나타낸다.

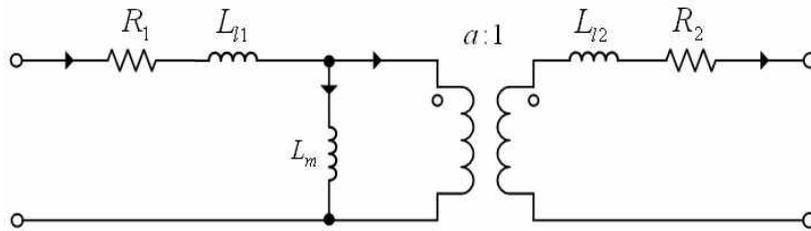


그림 2-3 IPT의 등가회로

$$L_{additive}, L_{subtractive} = L_1 + L_2 \pm 2L_m \quad \text{식 (2-1)}$$

$$L_m = (L_{additive} - L_{subtractive})/4 \quad \text{식 (2-2)}$$

$$L_{lk1} = L_1 - L_u \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad \text{식 (2-3)}$$

$$L_{lk2} = L_2 - L_u \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{식 (2-4)}$$

여기서, a : Turn Ratio

L1, L2 : Primary and secondary self-inductance (H)

Lm : Mutual inductance (H)

Ladditive : Total additive inductance (H)

Lsubtractive : Total subtractive inductance (H)

Ll1, Ll2 : Primary and secondary leakage inductance (H)

R1, R2 : Primary and secondary resistance (Ω)

그림 2-4은 IPT 파라미터 도출 시험을 보여주며, 표 2-2는 공극(Gap)이 5mm일 때 U-U type IPT의 파라미터 도출 결과를 정리하였다.



(a) Additive polarity



(b) Subtractive polarity

그림 2-4 IPT 파라미터 도출 시험

표 2-2 IPT 파라미터 도출 결과

(단위:uH)

측정 파라미터 \ 공극(Gap)	5mm
1차측 자화인덕턴스(L1)	49.3
2차측 자화인덕턴스(L2)	18.4
상호 인덕턴스(Lu(=Lm))	24.1
1차측 누설인덕턴스(Llk1)	8.96
2차측 누설인덕턴스(Llk2)	3.88

2.4 LLC 공진형 인버터 (LLC Resonant Inverter)

공진형 인버터는 원리적으로 스위칭 손실이 없기 때문에 높은 효율, 높은 주파수와 높은 전력밀도를 갖는 인버터를 설계할 수 있어서 설계시 주목받고 있다. 소프트 스위칭 기술을 사용하기 때문에 스위칭 손실이 적고, 변압기와 주요 스위치에 흐르는 전류의 실효값이 작기 때문에 고효율 운전이 가능하다.

본 연구에서는 IPT의 누설 자속을 보상할 수 있는 LLC 공진형 인버터를 적용하였다. 그림 2-5은 공진형 인버터 회로도를 보여주고, 그림 2-6은 실제 설계하여 제작한 공진형 인버터 시작품이다. 표 2-3는 공진형 인버터의 설계 사양을 정리하였다.

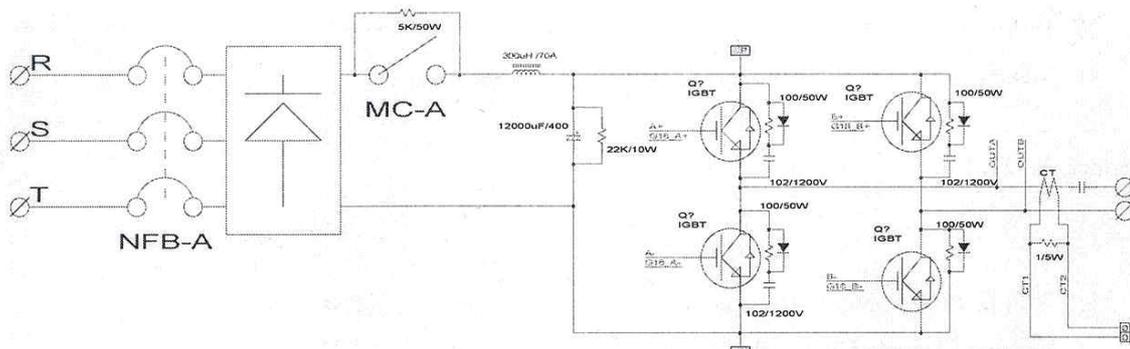


그림 2-5 공진형 인버터 회로도



그림 2-6 공진형 인버터 시작품

표 2-3 공진형 인버터 제품 사양

입력	Input main power	0-220V 3 ϕ 25KVA 가변
	Control Input	220V 단상
출력	Rated Output Power	20kW
	Average DC current	70A
	Inverter Peak current	300A Max
일반성능	Power factor	0.9
	Efficiency	90%
	Switching Frequency	12 - 27kHz 가변
	AC line filtering	power factor correction and EMI filters included

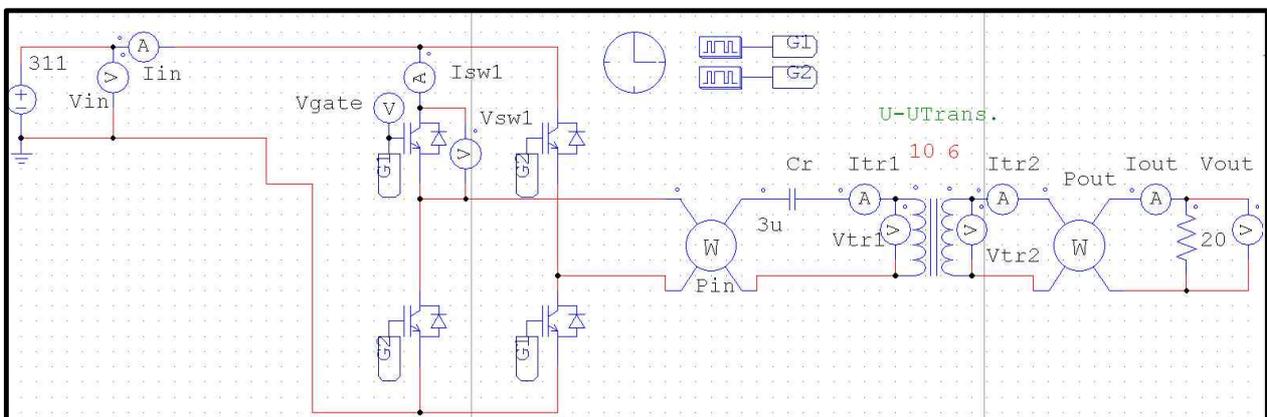
2.5 급집전체 효율

Simulation을 이용한 급집전체(IPT)의 효율과 실험을 통해 측정된 급집전체(IPT)의 효율을 비교·분석하였다.

2.5.1 Simulation

스위칭 주파수(f_s) : 19.6kHz

공진 커패시터(C_r) : 3 μ F



(a) LLC 공진형 인버터 Simulation 회로도



(b) 급집전체(IPT) 입·출력 전력 Simulation 결과 파형
 그림 2-7 급집전체(IPT) Simulation

표 2-4 Simulation을 이용한 급집전체(IPT) 효율

입력전력 (Pin)	출력전력 (Pout)	급집전체 효율 (%)
2.9 kW	2.4 kW	82%

2.5.2 실험

급집전체 효율은 공진형 인버터 dc-link 전압, 전류를 그림 2-9의 계측기로 측정하여 입력 전력을 구하였고, IPT 2차측 부하의 충전기 출력전압(DC), 전류(DC)는 PT, CT로 측정 한 후 출력 전력을 구하여 효율을 계산하였다. 급집전체 효율 측정 위치는 그림 2-8에서와 같다. 급집전체 효율은 인버터 효율(90%), 충전기 효율(85%)를 고려하였다.

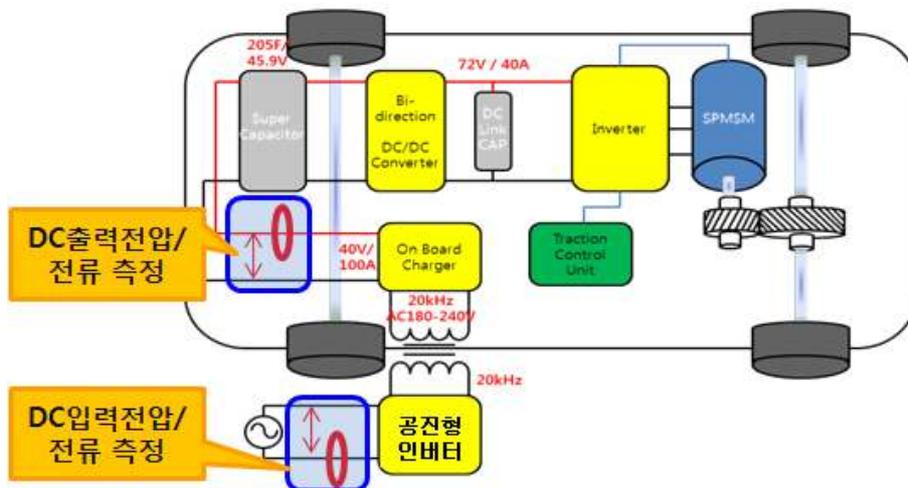


그림 2-8 급집전체(IPT) 효율 측정 위치



그림 2-9 공진형 인버터 dc-link 전압, 전류 계측기(효율 측정용)

표 2-5 공진형 인버터 입력 전압에 따른 급집전체(IPT) 효율

AC입력 (3Φ) 전압 (V)	입력(인버터 DC link)				출력(Super Cap. 입력)				급집전체 효율 (%)
	전압 (V)	전류 (A)	전력 (kW)	환산 전력	전압 (V)	전류 (A)	전력 (kW)	환산 전력	
205	286.7	8.8	2.5	2.2	36	43	1.5	1.8	80.2
210	299.6	9.4	2.8	2.5	40	43	1.7	2.0	79.8
220	303.8	10	3.0	2.7	39	43	1.6	1.9	72.1

표 2-5처럼 슬라이다스를 이용하여 공진형 인버터 입력전압을 205~220V로 인가하였을 때 입력전압 205V 에서 80.2%의 효율이 측정되었고, 입력전압을 205V 이상으로 점차 상승 시킬 때는 효율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 2-10는 입력전압에 따른 IPT 에너지 효율을 그래프로 나타냈다.

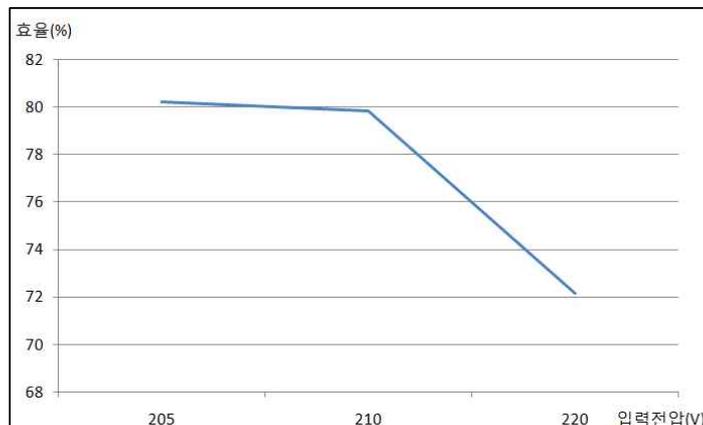


그림 2-10 입력전압에 따른 IPT 에너지 효율

3. 결론

본 논문에서는 5kW급 축소형 차량 시스템을 제작하여 IPT 효율을 측정하였고, Simulation을 통해 효율을 비교하였다. 정격일 때, Simulation결과 효율은 82%이고 실험을 통해 측정된 효율은 72.1%로

10%의 차이를 보이고 있다. 또한, 입력전압이 205V 일 때 정격전압보다 더 높은 에너지 전달 효율을 갖는 것을 확인 하였다.

향후, 실제 IPT 에너지 효율과 Simulation 상에서 효율의 오차를 줄이기 위해 요구되는 파라미터를 찾아내야 하며, IPT 에너지 효율의 개선을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Kyung-Hee Han, Byung-Song Lee, and Soo-Hyun Baek1 ‘ The design evaluation of inductive power-transformer for personal rapid transit by measuring impedance ’ JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 103, 07E928 2008
2. 이현관, 김은수, 허동영 ‘LLT 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터 동작 특성’ 2006년 전력전자학회
3. Fairchild Korea Semiconductor(최한석) ‘ Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter ’2007년 Journal of Power Electronics
4. 한경희, 이병송, 권삼영, 박현준, 백수현 ‘ PRT Cut core 공극 및 권선위치에 따른 IPT 결합계수 특성 ’ 2007년도 대한전기학회