

위상 천이 제어 기법을 적용한 IPT 컨버터의 손실분석

서준원, 이현상, 안상준, 변중은, 김민중, 이병국
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Loss Analysis of Inductive Power Transfer Converter with Phase-shift Control

Jun Won Seo, Hyeon Sang Lee, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, Minjung Kim,
and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 위상 천이 제어 기법이 적용된 전기자동차 배터리를 충전용 무선 전력 전송 시스템의 손실을 분석한다. PSIM 시뮬레이션을 통해 결합계수에 따른 전력반도체 소자 및 공진 네트워크의 손실을 이론적으로 계산하며, 송·수신패드의 손실을 FEM 시뮬레이션을 이용하여 도출한다. 계산 결과를 바탕으로 각 결합계수에 따라 소자에서 손실 분포를 확인하고 전체 효율에 영향을 미치는 요소를 분석한다.

1. Introduction

그림 1은 Inductive power transfer (IPT) system의 IPT 컨버터, DC DC 컨버터 그리고 전기자동차용 배터리 부하를 나타낸다. IPT 컨버터에 적용한 공진 네트워크는 LCCL S 토폴로지로서, 출력전압이 부하 변화에 무관하고, 결합계수에 비례하는 특성을 갖는다^[1]. 이러한 특성 때문에 결합계수가 높아지면 IPT 컨버터의 출력전압이 과도하게 증가하여 DC DC 컨버터의 정격을 초과할 수 있다. 따라서 높은 결합계수 조건에서는 위상 천이 제어를 적용하여 공진 네트워크 입력전압을 감소시키고 출력전압을 제한하지만 동일한 부하에서 입력전압이 감소하게 되면 입력전류가 증가하여 손실이 증가할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 위상 천이 제어 적용 시 손실 증가분에 대한 분석을 위해 3.3kW IPT 컨버터에 낮은 결합계수에서는 위상 천이 제어를 적용하지 않고, 높은 결합계수에서만 위상 천이 제어를 적용하여 이론적으로 손실을 계산한다. 계산 결과를 바탕으로, 전체 결합계수 범위에 대해서 각 소자별 손실 분포 및 위상 천이 제어가 시스템 전체 손실에 미치는 영향에 대하여 분석한다.

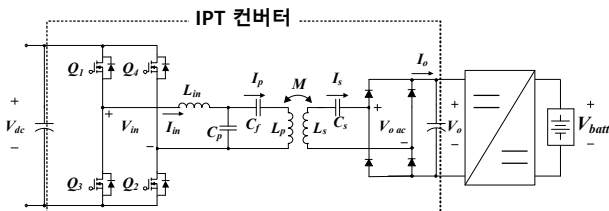


그림 1 IPT 컨버터 회로도
Fig. 1 The circuit diagram of IPT converter.

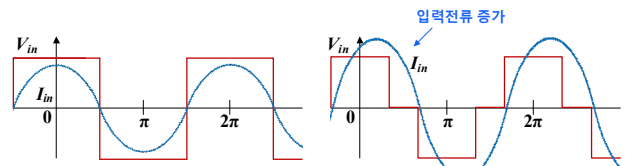
표 1 IPT 컨버터의 사양 및 파라미터
Table 1 Parameters and specification of IPT converter

Parameter	Value [Unit]	Parameter	Value [Unit]
V_{dc}	380 [V]	V_o	165.546 [V]
P_o	3300 [W]	f_o	85 [kHz]
L_{in}	38.43 [μ H]	C_f	9.97 [nF]
L_p	174.31 [μ H]	C_p	91.23 [nF]
L_s	389.98 [μ H]	C_s	20.11 [nF]
k	0.064 0.212		

2. 시스템 구성 및 손실 분석

2.1 시스템 구성

IPT 컨버터는 그림 1과 같이 풀브릿지 인버터와 LCCL S 공진 네트워크, 다이오드 정류기로 구성된다. IPT 컨버터를 구성하는 사양 및 파라미터는 표 1과 같다. IPT 컨버터의 출력전압 V_o 는 송·수신패드의 결합계수에 비례하기 때문에 시스템 설계 시 결합계수 변동 범위를 고려해야 한다. 배터리의 전압 범위를 240~410V로 가정하고, 결합계수 변동 범위가 0.064~0.212일 때, 최소 결합계수 조건인 0.064에서 출력전압이 165V가 되도록 설계하였다. 위와 같이 설계하면 $k=0.212$ 에서는 출력전압이 546V까지 상승할 수 있다. DC DC 컨버터를 구성하는 전력반도체 소자는 최대 출력전압보다 큰 전압 정격을 갖는 650V급 소자를 선정하였으나, 결합계수 혹은 부하의 갑작스러운 변화에 따른 서지 전압을 고려하여 최대 출력전압 제한 값을 450V로 설정하고 제어를 통해서 출력전압을 제한해준다. 따라서 출력전압이 450V를 초과하게 되는 결합계수 조건인 $k=0.17$ 보다 높은 결합계수에서는 위상 천이 제어를 통해 출력전압을 450V로 제한한다. 하지만 위상 천이 제어 시 동일한 출력에서 그림 2와 같이 입력전압 감소로 인해 입력 인덕터 전류 I_{in} 이 증가하여 손실이 증가할 수 있다.



(a) 위상 천이 제어 미적용 (b) 위상 천이 제어 적용

그림 2 제어 방법에 따른 IPT 컨버터의 입력전압 및 전류
Fig. 2 Input Voltages and currents of IPT converter in accordance with control methods.

2.2 소자별 손실 분석^[2]

손실 분석을 위해 결합계수 0.07에서 0.21까지 0.02 간격으로 결합계수에 따른 IPT 컨버터의 각 요소별 손실을 계산하였다. 손실은 전력반도체, 수동소자 및 송·수신패드로 나누어 계산하였다. 전력반도체 소자 중 MOSFET의 손실은 도통 손실, 스위칭 손실, 역병렬 다이오드에서 발생하는 손실을 고려하였다. IPT 컨버터의 풀브릿지 인버터는 영진압 턴 온 하기 때문에 턴 온 손실은 발생하지 않고, 위상 천이 제어 미적용 시에는 Zero phase angle (ZPA) 주파수에서 동작하고, 위상 천이 제어 적용 시에는 환류구간에서 MOSFET이 on되어 채널로 전류가 흐르므로 역병렬 다이오드의 손실은 발생하지 않는다.

다이오드의 손실은 도통 손실과 역회복 손실을 고려하였지만 IPT 컨버터 2차 측의 다이오드 정류회로에는 정현파 형태의 공진전류가 흐르기 때문에 역회복 손실은 발생하지 않는다.

인덕터의 손실은 코어에서 발생하는 철손과 권선에서 발생하는 동손을 고려하였다. 철손은 인덕터 내부의 자속변화, 스위칭주파수, 코어의 부피를 이용해 구하였고, 동손은 권선의 직렬 저항과 인덕터 전류의 실효값을 이용하여 계산하였다.

커패시터의 직렬 등가저항을 Dissipation Factor를 이용하여 구하였으며 직렬 등가저항과 커패시터 전류의 실효값을 이용하여 커패시터 손실을 계산하였다.

본 논문에서는 알루미늄 실드는 손실이 없다고 가정하고 송·수신 코일 손실과 페라이트 손실만을 고려하였으며, FEM 시뮬레이션을 통해 송·수신패드의 손실을 계산하였다.

2.3 결합계수별 IPT 시스템 손실

그림 3은 3.3kW 부하 조건에서 IPT 컨버터의 손실 요소 및 손실 값을 결합계수별로 나타낸 그래프이다. k=0.07 0.19인 조건에서는, 결합계수가 커짐에 따라 IPT 컨버터의 출력전압이 증가하기 때문에 동일한 부하에서 출력전류가 줄어든다. 출력전류 감소에 의해서 송·수신패드, C_s 및 다이오드 정류기의 도통 손실이 감소하여 시스템의 전체 손실이 감소한다.

결합계수 k가 0.17 이상인 조건에서 위상 천이 제어를 적용하면, 그림 3과 같이 결합계수 k=0.19인 조건에서는 위상 천이 제어를 적용하였을 때 전체 손실이 감소하였다. 그 이유는 위상 천이 제어 시 식 (1)과 같이 V_{in} 의 감소로 인한 송신패드 전류 I_p 의 감소로 송신패드 손실이 감소하는데 그 영향이 MOSFET과 L_{in} 에서의 손실 증가에 비해 더 크기 때문이다.

$$I_p = -j \frac{V_{in}}{\omega_o L_{in}} \quad (1)$$

표 2 손실분석에 사용된 소자
Table 2 Devices used for loss analysis

Component	Model
IPT 컨버터 1차측 MOSFET	IPW65R080CFD
IPT 컨버터 2차측 Diode	APT15DQ100BCT
1차측 입력 인덕터 (L_{in})	PC40PQ5050
1차측 보상 커패시터 (C_p)	C1812C222JDGAC, 2.2[nF] (7 직렬 x 24 병렬)
1차측 필터 커패시터 (C_f)	C1812C222JDGAC, 2.2[nF] (1 직렬 x 35 병렬)
2차측 보상 커패시터 (C_s)	C1812C222JDGAC, 2.2[nF] (4 직렬 x 37 병렬)

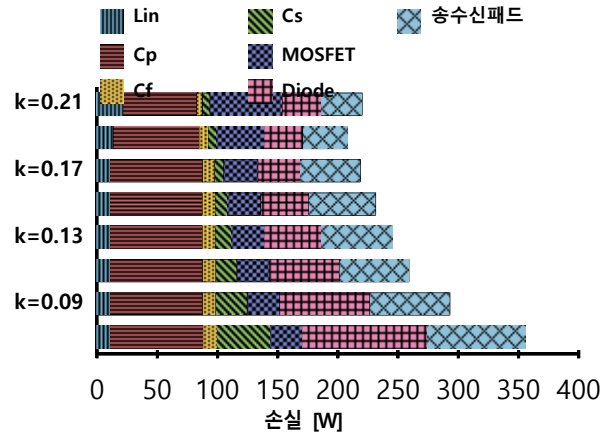


그림 3 결합계수 조건에 따른 손실 분석
Fig. 3 Loss analysis according to coupling coefficients.

k=0.21에서는 k=0.19에서 보다 위상 천이 각도가 증가하여 출력전압은 450V로 동일하게 유지되기 때문에 동일 부하 조건에서 수신패드 전류는 결합계수에 관계없이 동일하다. 따라서 결합계수 증가 시 수신패드 손실은 일정하지만, 식 (1)에 의한 I_p 의 감소로 송신패드의 손실은 감소하여 송·수신패드 전체 손실은 감소한다. 반면에 공진 네트워크 입력전류가 증가하여 MOSFET과 L_{in} 에서의 손실이 증가한다. 송·수신패드의 손실 감소보다 MOSFET과 L_{in} 에서의 손실 증가가 전체 손실에 더 큰 영향을 미치기 때문에 시스템 전체 손실이 증가하는 것을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 3.3kW 무선 전력 전송용 IPT 컨버터의 결합계수에 따른 이론적인 손실 분석을 수행하였다. 위상 천이 제어를 미적용 시 결합계수가 증가함에 따라 IPT 컨버터의 전체 손실은 감소하는 경향을 보였으나, 높은 결합계수에서 위상 천이 제어 적용 시 손실이 증가함을 확인하였다. 각 소자별 손실 분포를 분석한 결과, 위상 천이 제어 시 동일한 부하에서 공진 네트워크의 입력전압 감소로 인해 송신패드 전류가 감소하여 송신패드의 손실은 감소하였다. 반면에 공진 네트워크의 입력전류는 증가하기 때문에 MOSFET의 도통 손실과 입력 인덕터에서 발생하는 손실이 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

- 우동균, "전기자동차용 무선충전 시스템 최적 설계 및 통합 제어 기법", 박사학위논문, 성균관대학교, 2016.
- 김민국, 우동균, 이병국, 김남준, 김중수, "전력변환장치 효율 개선을 위한 손실 분석 연구", 전력전자학회논문지, Vol. 19, No. 1, pp. 80-90, 2014.