

전기자동차용 IPT 컨버터의 풀브릿지-하프브릿지 제어를 통한 고효율 운전 방법

안상준, 주동명, 김민국, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

High Efficiency Operation of the IPT converter with Full and Half bridge Control for Electric Vehicles

Sangjoon Ann, Dong Myoung Joo, Min Kook Kim, and Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 배터리 충전용 자기 유도 방식 무선 전력 전송 (Inductive power transfer, IPT) 컨버터의 풀브릿지 하프브릿지 가변 제어 방법을 제안한다. 제안한 방법을 검증하기 위해 3.3kW IPT 컨버터에 풀브릿지 제어와 하프브릿지 제어를 각각 적용하여 결합계수 및 부하에 따른 이론적인 손실을 분석하고 고효율 운전 방법을 제안한다.

1. 서 론

LCCL S 보상 네트워크를 적용한 IPT 컨버터는 부하에 관계없이 정전압 출력 특성을 갖기 때문에 전기자동차 배터리 충전용으로 적합하다. 하지만 출력전압과 결합계수가 정비례하는 특성으로 인해 높은 결합계수에서는 출력전압이 과도하게 높아질 수 있다^[1]. 본 논문에서는 과도하게 증가하는 출력전압의 대응과 효율 개선을 목적으로 특정 결합계수 이상에서 풀브릿지 제어를 하프브릿지 제어로 전환하는 제어 방법을 제안한다.

제안한 방법을 검증하기 위하여 본 논문에서는, 3.3kW IPT 컨버터에 풀브릿지 제어와 하프브릿지 제어를 각각 적용 시 특성을 비교한다. 또한 제어 방식별 결합계수 및 부하에 따른 이론적 손실을 분석하고, 결과를 바탕으로 고효율 운전 방법을 제시한다.

2. 시스템 구성 및 제어 방식 비교

2.1 시스템 구성

그림 1은 무선 전력 전송을 담당하는 IPT 컨버터와 DC DC 컨버터, 전기자동차용 배터리 부하를 나타낸다. 이 중 IPT 컨버터는 풀브릿지 인버터, LCCL S 보상 네트워크, 다이오드 정류기로 구성되며 출력전압은 부하에 관계없이 결합계수에 비례한다. 결합계수는 무선 충전용 송신패드와 수신패드의 물리적 위치에 의해 정해지는 값으로, 본 논문에서는 결합계수의 변동 범위를 0.07 ~ 0.21로 가정하였다. 식 (1)은 결합계수 k 에 비례하는 IPT 컨버터의 교류 등가 출력전압 $V_{o,ac}$ 을 나타낸다^[1].

$$V_{o,ac} = \frac{MV_{in}}{L_{in}} = k \frac{V_{in} \sqrt{L_p L_s}}{L_{in}} \quad (1)$$

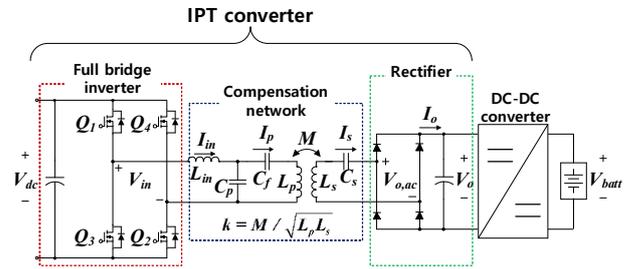


그림 1 LCCL-S 보상 네트워크를 적용한 IPT 컨버터
Fig. 1 IPT converter with LCCL-S compensation network.

IPT 컨버터는 2차 측 수신패드에 전류가 가장 많이 흐르는 최소 결합계수 $k_{min} = 0.07$ 에서 $V_{o,min} = 165V$ 를 출력하도록 설계한다. 충전 상태에 따른 V_{batt} 의 범위가 240 ~ 410V 일 때, DC DC 컨버터의 승압비는 최대 2.5가 된다. DC DC 컨버터의 전압 정격은 $k_{max} = 0.21$ 에서의 출력전압 $V_{o,max} = 495V$ 를 고려하여 650V로 선정하였다.

2.2 제어 방식별 특징 비교 및 손실 분석

풀브릿지 (Full bridge, FB) 제어는 그림 2(a)와 같이 풀브릿지 인버터의 스위치 Q_1, Q_2 와 Q_3, Q_4 가 50% 듀티를 갖고 상보적으로 on/off 하도록 제어하는 방식이다. FB 제어를 적용할 때, 높은 결합계수 조건인 $k > 0.19$ 에서는 시스템 동작 시 안전성을 고려하여 IPT 컨버터의 출력전압 제한 값 $V_{o,limit}$ 을 450V로 선정하고, 위상 천이 제어를 부가적으로 적용하여 출력전압을 450V 이하로 유지한다^[1].

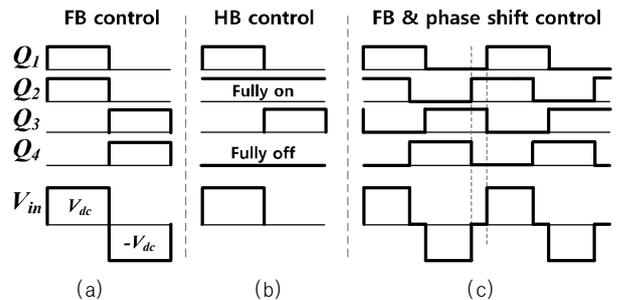


그림 2 제어 방식별 스위칭 신호 및 공진 네트워크 입력전압
Fig. 2 Switching signals and input voltage of resonant network in accordance with control methods.

표 1 동일 부하에서의 제어 방식에 따른 전압 및 전류
Table 1 Voltages and currents at the same output power in accordance with control methods

	보상 네트워크		송신패드	출력전압	출력전류
	입력전압	입력전류	전류		
FB	$\pm V_{dc}$	I_{in}	I_p	V_o	I_s
HB	0 or V_{dc}	$2I_{in}$	$I_p/2$	$V_o/2$	$2I_s$

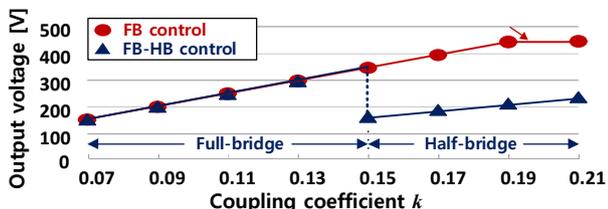


그림 3 제어 방식별 결합계수 변동에 따른 출력전압
Fig. 3 Output voltages of IPT converter in accordance with control methods and k variation.

FB 구조를 HB처럼 동작하기 위한 제어는 Q_2 를 상시 on, Q_4 를 상시 off 하고, Q_1, Q_3 를 상보적으로 on/off 하여 구현할 수 있다^[2]. 그림 2는 제어 방식별 스위칭 신호와 공진 네트워크 입력 전압을 나타내고, 표 1은 FB 제어 또는 HB 제어 적용 시의 주요 전압 및 전류를 나타낸다.

FB HB 제어는 출력전압이 낮을 때에는 FB로 동작하다가 특정 출력전압 이상이 되면 HB로 전환하여 동작하는 제어이다. $k < 0.15$ 인 조건에서 HB로 전환 시 출력전압이 $V_{o,min}$ 보다 낮아져 I_s 가 과도하게 증가할 수 있기 때문에 FB로 동작해야 한다. FB HB의 전환점을 $k = 0.15$ 로 선정하면 전환 시 출력전압은 176V가 되어 $V_{o,min}$ 보다 큰 값이 되기 때문에 설계 포인트 내에서 동작할 수 있다. 그림 3은 FB 제어와 FB HB 제어의 결합계수에 따른 출력전압을 나타낸다.

FB HB 제어의 타당성 검증은 위하여 3.3kW IPT 컨버터에 FB와 HB 제어를 각각 적용하고 표 2의 결합계수 및 부하 조건에 따른 손실을 분석하였다. 전력반도체 소자의 스위칭 손실과 도통 손실, 인덕터 및 커패시터에서 발생하는 손실, 송·수신 패드의 저항성분에 의한 손실을 고려하였으며, 송·수신패드의 알루미늄 실드 및 페라이트 손실은 고려하지 않았다.

표 2 결합계수 및 부하 조건
Table 2 Conditions of coupling coefficient and load

Coupling coefficient k	Output power [W]
0.15, 0.17, 0.19, 0.21	400, 1000, 1500, 2400, 3300W

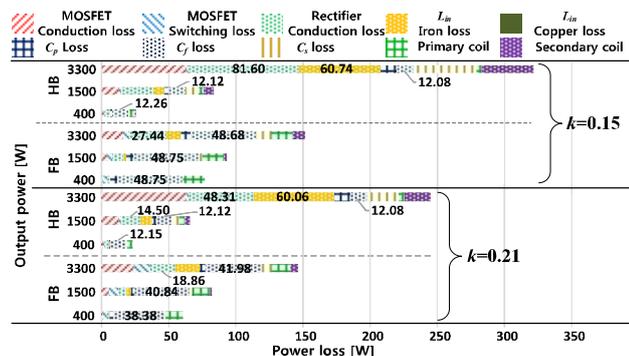


그림 4 손실 분포도 (@ $k = 0.15, k = 0.21$)
Fig. 4 Loss distribution chart (@ $k = 0.15, k = 0.21$).

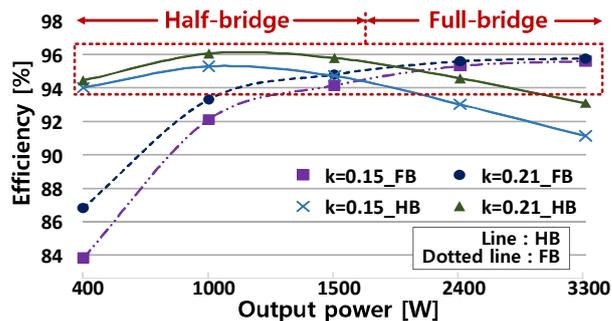


그림 5 결합계수 및 부하별 효율 그래프
Fig. 5 Efficiency graph in accordance with k and load.

손실 분석은 표 2의 모든 결합계수 및 부하 조건에 대하여 실시하였으며, 그 중 $k = 0.15$ 와 $k = 0.21$ 의 부하 조건 400, 1500, 3300W에서의 손실 분포도를 그림 4에 나타내었다. HB 제어는 경부하에서 부하 변화에 무관하게 일정한 손실을 발생시키는 I_p 가 FB에 비해 절반으로 감소하기 때문에 HB 제어의 경부하 효율이 우수하다. 반면 중부하에서는 FB에 비해 입력 전류 I_{in} 과 2차 측 전류 I_s 가 두 배가 되기 때문에 L_{in} 에서 발생하는 철손과 2차 측 도통손실이 크게 증가하여 HB 제어의 중부하 효율은 FB 제어에 비해 낮다.

그림 5는 분석 내용을 기반으로 한 IPT 컨버터의 제어 방식에 따른 결합계수 및 부하별 효율 그래프를 나타낸다. FB 제어 및 HB 제어 시 부하별 효율 그래프의 교차점을 FB 제어와 HB 제어의 전환점으로 선정하면, $k = 0.15$ 에서는 약 1700W, $k = 0.21$ 에서는 2000W를 전환점으로 선정할 수 있다. 결합계수별로 전환점을 선정하여, 선정한 전환점보다 낮은 부하영역에서는 HB 제어를, 높은 부하영역에서는 FB 제어를 적용한다면, 전체 결합계수 및 부하영역에서 고효율 운전이 가능하다.

3. 결론

본 논문에서는 LCCL S 보상 네트워크를 적용한 IPT 컨버터에 풀브릿지 제어와 하프브릿지 제어를 각각 적용하여 특징을 비교하고, 결합계수 및 부하에 따른 손실 분석을 수행하였다. 분석 결과, IPT 컨버터가 출력전압이 낮은 $k < 0.15$ 인 결합계수 조건에서는 풀브릿지 제어와 하프브릿지 제어 시의 부하에 따른 효율 그래프의 교차점을 기준으로 낮은 부하에서는 하프브릿지 제어, 높은 부하에서는 풀브릿지 제어 동작하면 전체 결합계수 및 부하 조건에서 고효율 동작이 가능함을 확인하였다.

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

참고 문헌

- [1] 우동균, “전기자동차용 무선충전 시스템 최적 설계 및 통합 제어 기법”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2016.
- [2] 정용민, 유승희, 김동희, 이병국 “LLC DC DC 컨버터의 풀브릿지 및 하프 브릿지 하이브리드 운전을 통한 효율 향상”, 전력전자학술대회 논문집, 2013. 7, pp. 301-302.