

넓은 결합계수 범위를 갖는 IPT 시스템의 제어방법

김민중*, 주동명*, 최준혁*, 이병국**

전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터*, 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과**

Control Method for IPT System with a Wide Range of Coupling Coefficient

Min-Jung Kim*, Dong-Myoung Joo*, Jun-Hyuk Choi*, and Byoung Kuk Lee**

Korea Electronics Technology Institute (KETI)*,

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University**

ABSTRACT

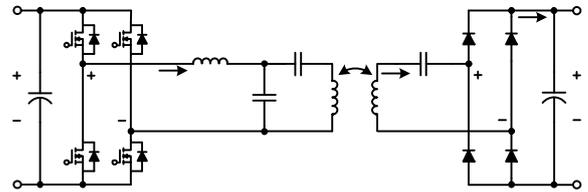
자기유도 무선전력 전송 (Inductive Power Transfer, IPT) 시스템에서 송·수신패드의 결합계수 k 는 송신패드와 수신패드의 이격거리에 따라 가변된다. 송·수신패드의 결합계수에 따라 IPT 컨버터의 동작특성이 바뀌기 때문에, 일반적인 스위칭 주파수 제어 방법으로는 IPT 컨버터의 정상 동작 영역이 제한된다. 본 논문에서는 송·수신패드의 결합계수 계수에 따라 풀브릿지 구조의 IPT 컨버터 1차 측을 풀브릿지 또는 하프브릿지로 제어하여 동작 가능한 결합계수 범위를 확장할 수 있는 제어 방법을 제안하고, LCCL-S 구조의 IPT 컨버터에 적용하여 실험을 통하여 제어 방법의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

휴대용 기기, 전기자동차 충전기 등의 분야에서 수 cm 내의 근거리 무선전력전송을 위해 송수신 코일 간 전자기유도 현상을 이용한 자기유도 방식 (Inductive Power Transfer, IPT)의 무선전력전송 기술이 연구되고 있다.^[1] IPT 시스템은 송·수신 코일간의 전력전송을 보상하기 위해 송·수신 측에 인덕터와 커패시터 등으로 구성된 보상회로가 포함되며, 이러한 보상회로의 구성 방식에 따라 직렬-직렬 방식, 병렬-병렬 방식, 직병렬 혼합 방식 등의 IPT 시스템 구조가 있다. 각각의 IPT 시스템의 입·출력 동작 특성은 송·수신 패드의 결합계수 k 와 보상회로의 구조에 따라 결정된다. 송·수신 패드의 결합계수 k 는 패드의 모양과 패드 간의 거리에 의해 결정되며, 결합계수 k 의 변동범위는 IPT 시스템의 토폴로지 선정 및 보상회로 설계에 고려해야 할 중요한 요소이다.^[2]

본 논문에서는 넓은 결합계수 범위를 갖는 IPT 시스템의 제어를 위해서, IPT 컨버터의 1차 측 컨버터를 풀브릿지 또는 하프브릿지로 제어하는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 IPT 시스템의 결합계수에 따라 풀브릿지와 하프브릿지 제어 영역을 구분하고, 시스템 초기에 결합계수를 예측하여 IPT 컨버터의 동작을 결정하는 방법이다. 제안한 제어 알고리즘을 실제 LCCL-S 구조의 보상회로를 갖는 IPT 시스템에 적용하여 기존 풀브릿지 시스템과 동작 가능 영역을 비교하고, 실험을 통하여 제어방법의 타당성을 검증한다.

2. IPT 시스템 및 제어 알고리즘



2.1 LCCL-S IPT 시스템 구성

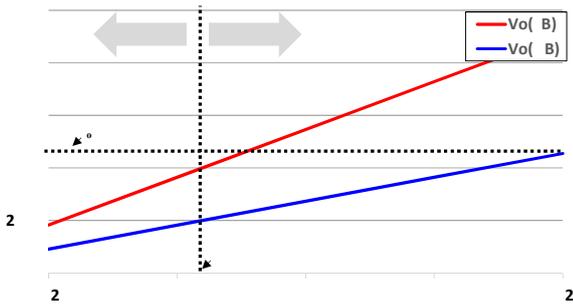
그림 1은 LCCL-S 구조의 보상회로를 갖는 IPT 시스템의 회로도이다. LCCL-S 보상회로 구조는 공진주파수 동작 시 송·수신패드의 결합계수 k 에 따라 부하변동에 무관하게 송신 측 코일 정전류에 의한 수신 측 정전압 출력 특성을 갖기 때문에 출력전압 제어 및 안정성 확보에 용이하여 IPT 시스템에 사용된다. LCCL-S IPT 컨버터가 공진주파수에서 동작 시 입력력 관계식은 아래 식 (1)과 같다. 여기서 L_p , L_s 는 송·수신 코일의 자기인덕턴스, C_f , C_p 는 보상 커패시턴스이다. 식을 통해 출력 전압 $V_{o,ac}$ 는 공진주파수로 동작 시 결합계수 k 에 비례한 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 LCCL-S IPT 시스템은 송·수신 효율을 높이기 위해서 공진주파수에서 동작시키기 때문에 IPT 컨버터 출력전압은 결합계수 k 에 의해 결정되며, IPT 컨버터 출력 단에 DC-DC 컨버터를 추가하여 출력전압을 제어한다.

$$V_{o,c} = \frac{in^k \overline{L_p L_s}}{L_{in}} \quad L_{in} = \frac{C}{C + C_p} L_p \quad (1)$$

2.2 제안하는 제어 알고리즘

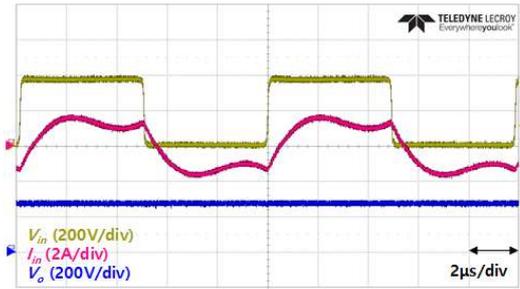
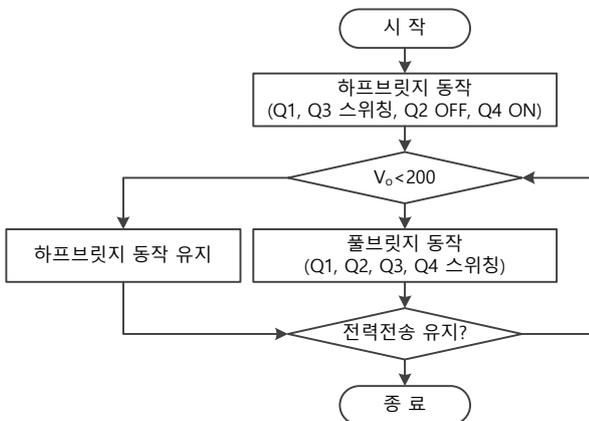
본 논문의 IPT 시스템 test-bed의 사양은 표 1과 같다. 입력 전압은 역률 보상 컨버터의 출력전압인 380V 고정이며, 결합

Parameter	Value	[Unit]
입력전압, $V_{dc,link}$	380	[V]
출력전압, V_o	220-400	[V]
공진주파수, f_r	100	[kHz]
결합계수, k	0.031-0.105	[V]

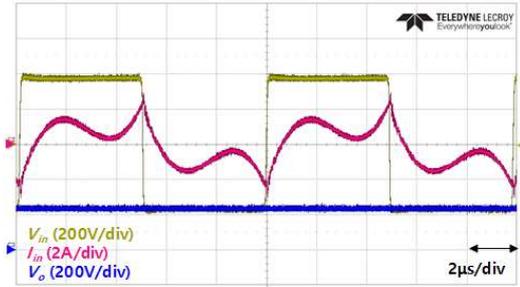


계수의 범위가 0.031-0.105로 최댓값과 최솟값의 차이가 약 4 배이며, 이는 식 (1)에 의해 출력전압의 최댓값과 최솟값의 차이가 약 4배가 발생한 다는 것을 그림 2와 같이 나타낸다. IPT 컨버터의 출력전압을 제한하기 위한 방법으로는 입력 단의 전압을 가변하는 방법, 컨버터 스위치의 위상 또는 듀티를 제어하는 방법 등이 있다. 하지만 입력전압을 가변하는 경우에도 출력전압 범위와 비례하여 입력전압 가변범위가 필요하기 때문에, 상황에 따라서는 역률보상 컨버터의 토폴로지의 변경이 필요할 수 있다. 또한 스위치의 위상 또는 듀티를 제어하는 방법의 경우는 스위칭 시점의 입력전류 크기가 증가하여 스위칭 손실이 증가하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 IPT 컨버터의 출력전압을 제한하기 위하여 일정 결합계수 이상에서는 스위치 Q2를 항시 꺼주고, Q4를 항시 켜준 상태에서 Q1, Q2 만의 하프브릿지 동작을 통해 V_{in} 전압을 풀브릿지 동작 시에 비해 절반으로 줄이는 제어 방법을 적용하였다.

본 논문에서는 IPT 컨버터 출력 단의 커패시터 내압(450V)을 고려하여서 IPC 컨버터가 풀브릿지 동작 시 출력전압이 400V인 경우를 기준으로 풀브릿지 동작과 하프브릿지 동작 영역을 구분하였다. 본 논문의 IPT 시스템 Test-bed에서 동작 구분 기준이 되는 점에서의 결합계수 k 는 0.55이며, 이때의 출력전압은 200V이다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 제어 알고리즘을 순서도로 표현한 것이다. 시스템의 초기 동작 시 풀브릿지로 동작하게 되면, 결합계수에 따라서 출력전압 V_o 이 설계값보다 높아져서 문제를 야기시킬 수 있으므로, 초기엔 IPT 컨



(a) $k=0.075$



(b) $k=0.031$

버터가 하프브릿지 동작을 한다. 그 후에 출력전압 200V를 기준으로 IPT 컨버터의 동작 모드를 결정하게 된다.

2.3 실험 결과

그림 4는 150W IPT test-bed에 제안한 제어방법을 적용하여 실험한 결과 파형이다. IPT 시스템의 결합계수 k 값이 0.075인 구간에서는 그림 4(a)처럼 하프브릿지 동작을 하며, 이때의 출력전압은 273V이다. 그림 4(b)는 결합계수 k 값이 0.031인 구간이며, 이때의 출력전압은 270V이다.

3. 결론

본 논문에서는 IPT 시스템의 출력전압을 제한하여 넓은 결합계수 범위에서 시스템의 동작을 위해, 결합계수에 따라 IPT 컨버터의 동작모드를 결정하는 제어방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 통해 하드웨어의 추가 또는 변경없이 기존 풀브릿지만으로 동작할 때에 비해 동작 가능한 결합계수의 범위를 약 2배 향상시켰다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2018201010650A)

참고 문헌

- [1] 김성민, 김상원, 문정익, 조인귀, "무선충전 기술동향과 발전방향", Electronics and Telecommunications Trends, vol. 31, no. 3, pp. 32-41, 2016, Jun.
- [2] Dong-Gyun Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Ph.D Thesis paper, 2016.