

전기자동차 충전기용 2 stage IPT 시스템 설계

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

Design of Two Stage Inductive Power Transfer System for Electric Vehicle Chargers

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

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 배터리 충전기의 특징과 설계 조건을 반영한 2 stage 자기유도방식 무선전력전송 (inductive power transfer, IPT) 시스템의 설계 방법을 제안한다. 시스템 설계 시 고려사항은 송신측 DC link 전압 범위와 수신측 듀티 가변 범위, 배터리 전압 범위 등이 있다. 이와 같은 고려사항을 반영하여 2 stage IPT 시스템의 입·출력전압 범위를 선정하고 전압·전류 스트레스 분석을 통해 공진네트워크를 설계한다.

1. 서 론

전기자동차 (electric vehicle, EV) 충전기용 2 stage 자기유도방식 무선전력전송 (inductive power transfer, IPT) 시스템은 3 stage IPT 시스템에서 배터리 충전 제어를 담당하는 DC DC 컨버터를 제거하고, 송신측에는 승·강압형 PFC 컨버터를, 수신측에는 bridgeless 정류기를 사용하는 시스템이다. 2 stage IPT 시스템은 3 stage IPT 시스템에 비해 전력반도체 소자 및 수동 소자의 개수가 감소하여 효율 향상이 가능하며 EV 내부 전력 변환회로의 전력밀도를 향상 시킬 수 있다는 장점이 있다^[1].

2 stage IPT 시스템은 수신측 bridgeless 정류기의 구조적 특징과 EV용 배터리의 넓은 충전전압 범위를 고려하였을 때 승·강압형 PFC 컨버터가 필요하며, DC link 전압 범위 선정이 필요하다. 본 논문에서는 DC link 전압 범위 선정과 더불어, 승·수신페드의 결합계수 변동 범위와 bridgeless 정류기 스위치의 듀티 가변 범위, 배터리의 충전전압 범위 등을 고려하여 공진네트워크 출력전압 범위를 선정한다. 선정된 공진네트워크의 입·출력전압 조건을 바탕으로 전압 및 전류 스트레스 분석을 수행하고 공진네트워크를 설계한다.

2. 시스템 설계

2.1 시스템 구성 및 설계 조건

그림 1은 3.3kW급 2 stage IPT 시스템과 EV용 배터리 부하를 나타낸다. 공진네트워크는 결합계수 및 부하의 변동에도 zero phase angle 주파수가 변하지 않으며 bifurcation에 강인한 특징을 갖는 LCCL S 토폴로지를 사용하였으며, 토폴로지 특성상 공진네트워크의 교류 등가 출력전압 $V_{o,ac}$ 는 부하 변동에는 무관하고 결합계수 k 에만 비례하는 특징이 있다^[1]. 2 stage IPT 시스템의 수신측 회로인 bridgeless 정류기는 승압

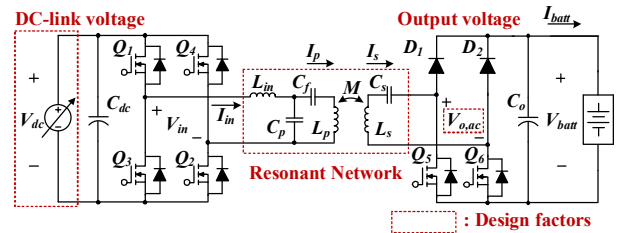


그림 1 EV 충전용 2 stage IPT 시스템 구성 및 설계 인자
 Fig. 1 2stage IPT system for EV chargers and design factors.

표 1 2 stage IPT 시스템의 설계 조건

Table 1 Design specifications for 2 stage IPT system

Parameters	Value	[Unit]
Battery voltage range, ΔV_{batt}	240 410	[V]
Battery power range, ΔP_{batt}	400 3300	[W]
Switching frequency, $f_{sw,IPT}$	85	[kHz]
Coupling coefficient, Δk	0.08 0.2	

만 가능한 구조로서 배터리 충전을 위해서는, bridgeless 정류기가 다이오드 정류기처럼 동작한다고 가정했을 때의 출력전압 V_o 가 전체 k 범위에서 240V보다 낮아야한다. 즉, V_o 의 최댓값이 배터리 전압 V_{batt} 의 최솟값보다 작아야한다. 따라서 본 논문에서는 높은 k 조건에서 공진네트워크의 입력전압인 DC link 전압을 낮게 제어하여 네트워크 출력전압을 감소시킴으로써 항상 $V_o < V_{batt,min}$ 조건을 만족하며 동작하도록 제한한다. 공진네트워크의 입력전압 및 출력전압 범위는 표 1의 시스템 설계 조건을 반영하여 선정하고 이를 바탕으로 2 stage IPT 시스템의 전압·전류 스트레스 분석 및 공진네트워크 설계를 진행한다.

2.2 입·출력전압 범위 설계

본 논문에서는 V_o 가 최대가 되는 최대 결합계수 k_{max} 조건을 설계 포인트로 선정하고 최대 출력전압 $V_{o,max}$ 를 설계한다. $V_{o,max}$ 는 Q_5 와 Q_6 를 제어하는 micro controller unit (MCU)에서 구현 가능한 최소 듀티 D_{min} 과 스위치의 동특성을 고려해서 설계한다. 송신측 스위칭주파수가 85kHz일 때 150MHz의 clock 주파수를 갖는 MCU로 구현 가능한 스위치 하나의 D_{min}

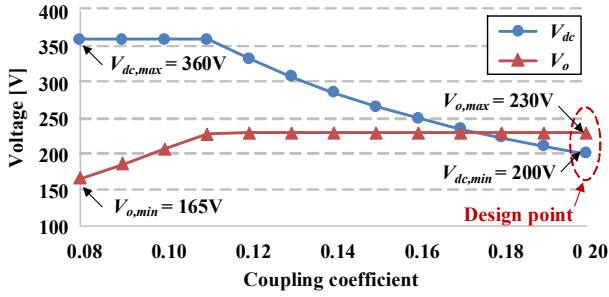


그림 2 결합계수에 따른 공진네트워크 입·출력전압
Fig. 2 Input and output voltage of resonant network in accordance with coupling coefficient.

은 0.017이다. Q_5 와 Q_6 는 각각 $V_{o,ac}$ 의 양의 반주기와 음의 반주기에서 턴 온 되기 때문에 $V_{o,ac}$ 의 한 주기 동안 승압에 관여하는 실제 듀티는 D_{min} 의 2배인 0.034이다. 따라서 $V_{o,max}$ 는 약 230V로 계산할 수 있다. V_o 의 최솟값 $V_{o,min}$ 은 bridgeless 정류기의 최대 승압비를 2.5로 설정하여 165V로 선정하였다.

높은 k 조건에서도 bridgeless 정류기는 승압 동작해야하기 때문에 k_{max} 에서 DC link 전압은 최솟값 $V_{dc,min}$ 으로 제어되며 식 1과 같이 k 와 반비례하도록 제어한다.

$$V_{dc} = \frac{L_{in} V_{o,max}}{\sqrt{L_p L_s}} \cdot \frac{1}{k} \quad (1)$$

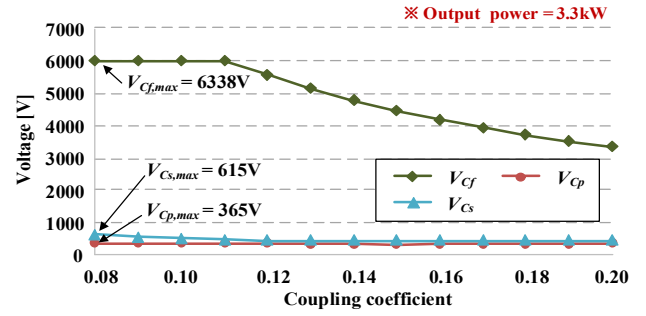
여기서, $V_{dc,min}$ 은 0.95 이상의 역률 조건을 만족할 수 있도록 200V로 선정하였으며, $k > 0.11$ 인 조건에서 V_o 는 최댓값으로 유지된다. $V_{dc,max}$ 는 PFC 컨버터의 스위치 및 수동소자의 전압 정격과 $V_{o,min}$ 을 고려하여 360V로 선정하였다. 따라서 그림 2와 같이 $k \leq 0.11$ 인 조건에서는 V_{dc} 가 최댓값에 도달하여 일정하게 유지되며 V_o 는 설계 최솟값인 165V까지 감소한다.

2.3 공진네트워크 설계

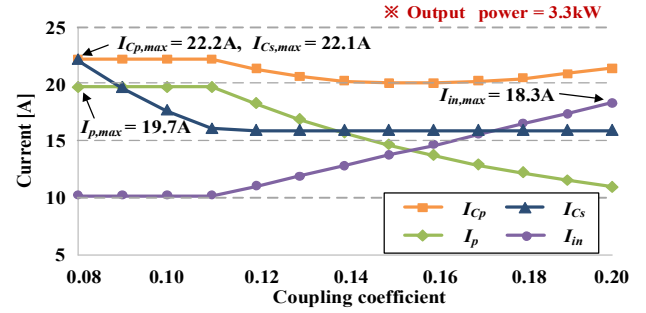
송신패드의 턴 수는 SAE J2954 규격에서 제시하는 사이즈 내에서 충분한 인덕턴스를 확보함으로써 송신패드에 흐르는 전류 I_p 를 작게 할 수 있도록 24턴으로 선정하였다. 수신패드 턴 수 역시 규격 사이즈 내에서 bifurcation 현상이 발생하지 않는 범위 내에서 최대한 큰 인덕턴스를 확보할 수 있도록 11턴으로 선정하였다. 송·수신패드의 턴 수가 결정되면 자기 해석 시뮬레이션을 통하여 송·수신패드의 인덕턴스를 계산하고 2.2절에서 선정한 설계 포인트 ($V_{dc,min}$, k_{max})에서 공진주파수 85kHz로 동작 시 230V, 3.3kW를 출력하도록 공진네트워크 파라미터를 설계한다. 표 2는 네트워크 파라미터 설계 결과를 나타낸다.

표 2 공진네트워크 파라미터 설계 값
Table 2 Design parameter values of LCCL-S resonant network

Parameters	Value	[Unit]
Primary inductance, L_p	601.6	[μ H]
Secondary inductance, L_s	52.01	[μ H]
Primary compensation capacitance, C_p	114.0	[nF]
Primary filter capacitance, C_f	6.148	[nF]
Secondary compensation capacitance, C_s	67.42	[nF]



(a) Voltage stress



(b) Current stress

그림 3 공진네트워크의 전압 및 전류 스트레스
Fig. 3 Voltage and current stresses of resonant network.

그림 3은 2.2절에서 설계한 입·출력전압 조건과 공진네트워크 파라미터 설계 값을 바탕으로, 최대부하 3.3kW 조건에서 수식적으로 계산한 결합계수에 따른 공진네트워크 구성 소자의 전압 및 전류 스트레스와 최댓값을 나타낸다.

3. 결론

본 논문에서는 2 stage IPT 시스템에 사용되는 bridgeless 정류기의 구조적인 특징과 더불어 스위치의 동특성, MCU의 구현 가능한 실제 듀티 등을 고려하여 공진네트워크의 입·출력 전압 범위를 설계하였다. 또한 bifurcation 현상 발생 여부를 고려하여 송·수신패드의 턴 수를 설계하여 공진네트워크 파라미터를 선정하였으며, 네트워크의 전압 및 전류 스트레스 분석을 통하여 공진네트워크를 설계하였다.

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

참고 문헌

- [1] M.J. Kim, D.M. Joo, S.J. Ann, and B.K. Lee, "Two-Stage Inductive Power Transfer Charger for Electric Vehicles", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 22, No. 2, pp. 134-139, Apr. 2017.
- [2] D.G. Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Ph.D dissertation, Dept. of Elect. and Comput. Eng., Sungkyunkwan Univ., Suwon, 2016.