전기자동차용 양방향 무선전력송전을 위한 공진 네트워크 분석
조단철, 손원진, 이재현, 안상준, 변종은, 이병국†
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Analysis of Resonant Network for Bidirectional Wireless Power Transfer System in EV Applications
Dajung Cho, Won-Jin Son, Jae Han Lee, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, and Byoung Kuk Lee†
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차용 inductive power transfer (IPT) 방식의 양방향 무선전력전송에 활용 가능한 공진 네트워크를 선정한다. 각 공진 네트워크별 수식을 통해 폐쇄의 인덕턴스를 설계하고, 공진 네트워크 종류에 따라 달라지는 양방향 전력 특성을 분석한다. 본 결과를 바탕으로 IPT 방식의 양방향 무선 전력전송을 위한 공진 네트워크를 선정하고 시뮬레이션을 통해 설계한 네트워크의 적합성을 증명한다.

1. 서론

전기자동차의 사용양이 점차 증가함에 따라 전기에너지를 효율적으로 사용하기 위한 vehicle to grid (V2G) 기술의 중요도가 늘어지고 있다. 이에 따라 전기자동차용 on board charger (OBC)의 V2G 둔화를 위한 양방향 전력전송 기술 연구가 활발히 진행되고 있는 반면에, 전기자동차용 양방향 무선 전력전송 기술에 대한 연구는 OBC에 비해 미흡하다. 그 이유는 첫째로 넓은 주파폭으로 인해 모든 조건을 만족하는 시스템 설계가 어렵다는 점이다. 오브젝트를 위해 공진 네트워크의 전압 이득 및 위상 군간이 크게 달라지는 때이므로, 인덕턴스 개발이 어렵다. 이러한 문제들로 인해 전기자동차용 양방향 무선전력전송 기술 개발이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 다양한 공진 네트워크 중 전기자동차용 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 선정한다. 전기자동차용 양방향 무선전력전송을 위한 공진 네트워크를 제안하기 위해 다양한 공진 네트워크를 시험시행을 통해 설계하고, 실제 폐쇄를 고려한 인덕턴스 허용 범위, 전압 및 전류 영역, 인덕턴스 성능 등을 비교 분석한다. 비교 분석한 결과를 바탕으로 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 선정하고, 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

표 1 시스템 설계 조건
Table 1 Design conditions of system

<table>
<thead>
<tr>
<th>Parameter</th>
<th>f [kHz]</th>
<th>k</th>
<th>VDC [V]</th>
<th>P0 [kW]</th>
<th>V0 [V]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Charge</td>
<td>85</td>
<td>0.083</td>
<td>380</td>
<td>3.3</td>
<td>330</td>
</tr>
<tr>
<td>Discharge</td>
<td>85</td>
<td>0.083</td>
<td>330</td>
<td>3.3</td>
<td>-</td>
</tr>
</tbody>
</table>

표 2 공진 네트워크별 패드 인덕턴스 설계
Table 2 Design of pad inductance according to resonant networks

<table>
<thead>
<tr>
<th>Sec No.</th>
<th>S</th>
<th>LCL</th>
<th>LCCL</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>S</td>
<td>Lp: 1357.5 [μH]</td>
<td>Lp: 737.3 [μH]</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>LCL</td>
<td>Lp: 2922.9 [μH]</td>
<td>Lp: 80.1 [μH]</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>LCCL</td>
<td>Lp: 270 [μH]</td>
<td>Lp: 160 [μH]</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

2. 양방향 무선전력전송 공진 네트워크 분석

2.1 시스템 사양

그림 1은 power factor correction (PFC) 컨버터, inductive power transfer (IPT) 컨버터, DC-DC 컨버터로 구성된 3-stage IPT 시스템을 나타낸다. 그 중 무선전력전송을 위한 IPT 컨버터는 공진 네트워크의 구조에 따라 각기 다른 출력 특성을 갖는다. 따라서 본 논문은 양방향 무선전력전송을 위한 IPT 컨버터의 공진 네트워크 별 특성을 비교하며, 이를 위한 시스템 설계 조건은 표 1과 같다. 각 공진 네트워크는 최소 설계 계수 조건에서 공진신호 주파수를 85 [kHz]로 동일하게 설계한다.\[1\]

2.2 공진 네트워크별 파라미터 설계

무선전력전송에 적합되는 공진 네트워크는 직렬 및 병렬 등 그 종류가 다양하다. 하지만 전류원을 이용하는 병렬 공진 네트워크는 전류원 생성용의 큰 인덕턴스가 추가되어 시스템

그림 1 IPT 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of IPT system.

그림 2 공진 네트워크별 공전 회로
Fig. 2 Primary resonant circuit by resonant network.
전력 밀도에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 고려 대상에서 제외하였으며, 적합한 공진 네트워크 설정을 위해 분석한 공진 네트워크의 종류는 그림 2에 나타나있다. 표 2는 각 공진 네트워크를 표 1의 시스템 사양을 고려하여 설계한 송수신 패드의 인터런스를 나타낸다.

표 2에서 알 수 있듯이 S-LCL, LCL-S, LCL-LCL의 경우, 송신 패드 인터런스 $L_1$ 또는 수신 패드 인터런스 $L_2$가 짧거나 짧거나 적절한 값으로 설계되었다. 그 이유를 분석하기 위해 각 토폴로지의 $L_p$, $L_s$ 관계식을 (1) - (3)에 나타내었다.

$$L_p = \frac{8L_1 V_{in}^2}{\pi^2 k P R_p}$$  
(1)

$$L_p = \frac{8L_2 V_{in}^2}{\pi^2 k P R_p}$$  
(2)

$$L_p = \frac{8k R_1 V_{in}^2}{\pi^2 k P R_p}$$  
(3)

이 때 $k$는 결합계수, $R_p$는 출력 등가 지항이다. 위 식에서 $L_1$와 $L_2$는 편리 또는 반비용 관계에 있기 때문에 값을 변경하기 위해서는 시스템 사양이 변경되어야 한다. 따라서 현재 시스템 사양에서는 위 제한 공진 네트워크 정의에 어려움을 meet하고, 나머지 공진 네트워크에 대하여 분석을 진행한다.

2.3 전압 및 전류 정격 검증
공진 네트워크에 따른 각 소자의 전압 및 전류 정격을 검증하기 위해 설계 조건과 2.2절의 $L_p$, $L_s$를 적용한 시뮬레이션을 실시하였다. 실제 해드의 안정적인 동작 및 전원 관리 등의 확보를 위하여 최대 전압은 10 [kV], 최대 전류는 50 [A]를 기준으로 공진 네트워크를 설정하였다. 표 3은 각 공진 네트워크에서 소자에 걸리는 최대 전압 및 전류를 나타내는데, S-S, LCL-LCL, LCL-LCL은 앞서 설정한 전압 또는 전류 기준을 초과하였기 때문에 이후의 추가적인 분석에서 제외하였다.

2.4 임피던스 특성 분석
S-LCL, LCL-S, LCL-LCL의 bifurcation 발생 여부를 확인하기 위하여 주파수에 따른 임피던스의 특성을 분석하였다. 각 공진 네트워크별 충전 및 방전 시 주파수에 따른 임피던스의 변환 변화는 그림 3과 같이 나타난다. S-LCL은 그림 3 (a)와 같이 충전 시 주파수가 3.3 [kHz]일 때 bifurcation이 발생하며, LCL-LCL은 그림 3 (c)와 같이 충전 시 주파수가 400 [W]일 때 bifurcation이 발생한다. 반면에 LCL-LCL은 그림 3 (c), (d)와 같이 방전 시와 방전 시 모두 bifurcation이 발생하지 않는다. 따라서 공진네트워크 분석 결과를 기반으로 양방향 무

표 3 공진 네트워크별 소자의 전압 및 전류 최대값
Table 3 Voltage and current maximum value of device by resonant network

<table>
<thead>
<tr>
<th>Pri</th>
<th>Sec</th>
<th>S</th>
<th>LCL</th>
<th>LCCL</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>$V_{in}$</td>
<td>10.3 [kV]</td>
<td>19.7 [kV]</td>
<td>21.6 [kV]</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>$I_{in}$</td>
<td>15.7 [A]</td>
<td>21.6 [A]</td>
<td>32.4 [A]</td>
</tr>
<tr>
<td>S</td>
<td>$V_{out}$</td>
<td>24.8 [kV]</td>
<td>48.5 [kV]</td>
<td>589.3 [V]</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>$L_{out}$</td>
<td>48.1 [A]</td>
<td>149.0 [A]</td>
<td>58.1 [A]</td>
</tr>
<tr>
<td>LCL</td>
<td>$V_{in}$</td>
<td>6.6 [kV]</td>
<td>21.1 [kV]</td>
<td>6.6 [kV]</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>$I_{in}$</td>
<td>6.6 [A]</td>
<td>21.1 [A]</td>
<td>6.6 [A]</td>
</tr>
<tr>
<td>LCL</td>
<td>$V_{out}$</td>
<td>21.1 [kV]</td>
<td>1187.3 [A]</td>
<td>58.1 [A]</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3. 결론
본 논문에서는 전기차동차용 inductive power transfer (IPT) 방식의 양방향 무선전력전송에 활용 가능한 공진 네트워크를 설계하였다. 각 공진 네트워크에 따라 패드의 파라미터를 설계하고 실제 폐쇄의 크기와 전압 및 전류의 정격을 고려하였으며, 임피던스 분석 결과를 통해 양방향 무선전력전송에 적합한 공진 네트워크를 설정하였다.

참고 문헌