

스위치드 커패시터를 활용한 V2G용 양방향 무선충전 시스템에 관한 연구

이영선, 조승진, 강소정, 김동희†
 전남대학교 전기공학과

Research on Bidirectional Wireless Charging System for V2G Operation Using Switched Capacitors

Yeong-Seon Lee, Seungjin Jo, So-Jeong Kang, and Dong-Hee Kim†
 Department of Electrical Engineering Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차의 배터리를 에너지저장장치로 활용하여 V2G (Vehicle-to-Grid)기능을 지원하는 무선충전 시스템을 제안한다. V2G 동작 시 계통에 인가되는 전력 품질을 유지하기 위해 안정적인 출력 전압 범위를 달성해야 한다. 이를 위해 DS-LCC에 스위치드 커패시터를 활용한 토폴로지(SCC)가 적용되며, 배터리 SoC에 따라 CC 또는 CV 동작을 달성한다. DS-LCC 토폴로지의 모드 별 이론적 분석을 수행한 후, 3.3 kW급 IPT 시스템 시뮬레이션을 통해 DC링크 출력 특성을 검증한다.

1. 서론

V2G(Vehilce-to-Grid) 기술은 전기자동차(EV)의 배터리를 에너지저장장치로 활용하여 계통에 전력을 공급하는 기술이다. V2G 운용 방안으로 IPT(Inductive Power Transfer) 시스템을 적용할 수 있다. IPT는 송신 코일과 수신 코일 사이의 자기적 결합에 의해 전력을 전달하는 기술로, 양방향 전력 전달이 용이하다는 장점이 있다. 이를 통해 사람이 직접 플러그를 연결할 필요가 없어 충전 프로세스의 자동화가 가능해지고 사용자의 편의성이 크게 향상된다. 또한 자율 주행 기술이 적용된 EV의 경우 자체적으로 충전소를 찾아 충전할 수 있는 환경을 조성하는데 기여할 수 있다. 일반적으로 전기자동차용 IPT 시스템에는 정전류 특성을 갖는 DS-LCC 보상 토폴로지가 사용되며 배터리의 방전 과정에서 배터리 전압이 낮아질수록 출력 전류가 감소하는 문제가 있다. 이로 인해 정격 전력을 유지하기 위해 과전압이 인가되거나 계통 연계를 위한 DC링크 전압 범위를 달성할 수 없다는 한계가 있다.

본 논문은 안정적으로 계통의 DC링크 전압을 달성하기 위해 SCC(Switched Capacitor Circuit) 보상 토폴로지를 제안한다. 토폴로지의 공진 회로 구성에 따라 정전류(CC), 정전압(CV) 특성이 변화되며^[1] 배터리 SoC에 따라 350 - 400 V 범위에서는 CC 동작을 수행하고, 300 - 350 V 범위에서는 CV 동작을 수행하도록 3.3 kW급 시스템을 설계한다. 마지막으로 PSIM을 통해 제안된 설계의 타당성을 검증한다.

2. 제안하는 SCC 토폴로지 설계

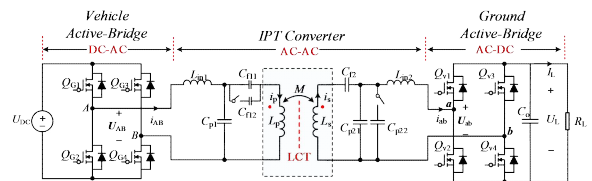


그림 1 DS-LCC 보상 토폴로지
 Fig.1 DS-LCC compensation topology

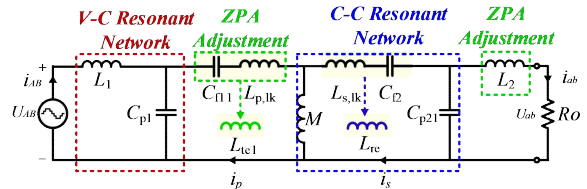


그림 2 정전류 출력 특성을 갖는 DS-LCC 보상 토폴로지
 Fig.2 DS-LCC compensation topology for CC output

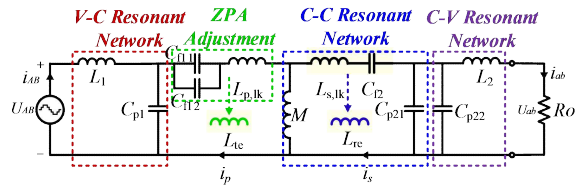


그림 3 정전압 출력 특성을 갖는 DS-LCC 보상 토폴로지
 Fig.3 DS-LCC compensation topology for CV output

2.1 CC mode DS-LCC 구성

제안된 토폴로지는 SCC를 1차 측 직렬 보상 커패시터와 2차 측 병렬 보상 커패시터에 각각 하나씩 추가한 구조로 그림 1과 같다. V2G 동작에서 CC 출력을 얻기 위해 C_{f12} 와 C_{p22} 를 개방시키고 C_{f11} 과 C_{p21} 만으로 공진시킨다. 그림 2는 토폴로지를 분석하기 위해 M-type 회로를 T-type으로 등가화시킨 모습이다. 식 (1)에 각 파라미터 간의 관계를 수식으로 나타냈다.

$$L_{pe1} = L_p - \frac{1}{\omega^2 C_{f11}} \quad L_{se} = L_s - \frac{1}{\omega^2 C_{f2}} \quad (1)$$

정전류 출력을 달성하기 위한 공진 조건은 아래와 같다.

$$\omega_o^2 L_1 C_{p1} = \omega_o^2 L_{se} C_{p21} = \omega_o^2 L_2 C_{p21} = 1 \quad (2)$$

$$\omega_o^2 (L_p - L_1) C_{f11} = \omega_o^2 (L_s - L_2) C_{f2} = 1 \quad (3)$$

식 (2)는 CC 출력 공진 조건이며, 식 (3)은 ZPA 동작을 위

해 필요한 조건이다. i_o, i_p 의 값은 다음과 같다.

표 1 제안된 토폴로지의 파라미터 설계 값

Table 1 Parameters Design Values for the Proposed Topology

f_o	85 kHz	L_2	92 μH
P_o	3.3 kW	C_{p1}	302.234 nF
k	0.15	C_{p21}	37.95 nF
U_{DC}	300 - 400 V	C_{p22}	38.10 nF
U_L	380 - 450 V	C_{f11}	39.66 nF
L_p	100 μH	C_{f12}	2.31 nF
L_s	100 μH	C_{f2}	459.68 nF
L_1	11.6 μH		

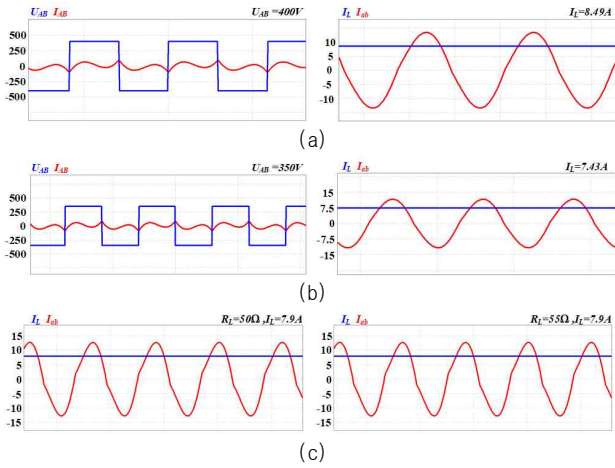


그림 4 시뮬레이션 결과(CC 모드)

(a) $U_{DC} = 400 V$ (b) $U_{DC} = 350 V$ (c) $U_{DC} = 375 V$

Fig.4 Simulation Results (CC mode)

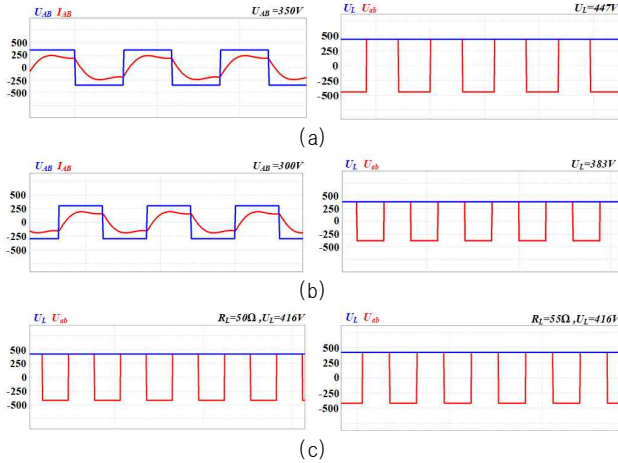


그림 5 시뮬레이션 결과(CV 모드)

(a) $U_{DC} = 350 V$ (b) $U_{DC} = 300 V$ (c) $U_{DC} = 325 V$

Fig.5 Simulation Results (CV mode)

식 (5)을 통해 부하와 관계없이 일정한 크기의 전류가 출력된다는 것을 확인할 수 있다.

$$I_p = \frac{U_{AB}}{j\omega_o L_1} = \frac{U_{AB}}{\omega_o L_1} \angle -90^\circ \quad (4)$$

$$I_o = \frac{M}{M + L_{re}} I_p = \frac{M_{AB}}{j\omega_o L_1 L_{se}} = \frac{M_{AB}}{\omega_o L_1 L_{se}} \angle -90^\circ \quad (5)$$

2.2 CV mode DS-LCC 구성

그림3은 C_{f12} 와 C_{p22} 의 스위치가 턴 온 된 모습이다. 각각의 파라미터들 사이의 관계식은 아래와 같다.

$$C_{f1} = C_{f11} + C_{f12}, C_{p2} = C_{p21} + C_{p22}, L_{pe} = L_p - \frac{1}{\omega^2 C_{f1}} \quad (6)$$

CV 출력을 얻기 위해 각각의 파라미터들은 다음과 같이 공진하며 출력 전압을 구할 수 있다.

$$\omega_o^2 L_1 C_{p1} = \omega_o^2 L_{se} C_{p21} = \omega_o^2 L_2 C_{p22} = 1 \quad (7)$$

$$U_{ab} = -\frac{L_2 M_{AB}}{L_1 L_{se}} = \frac{L_2 M_{AB}}{L_1 L_{se}} \angle 180^\circ \quad (8)$$

식 (8)를 통해 부하와 관계없이 일정한 크기의 정전압이 출력되는 것을 확인할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{\omega_o^2 M^2 C_{p21} C_{p1} L_2}{L_1 C_{p22} L_{se} R_o} + j\omega_o \left(\frac{C_{p1} L_{pe} - C_{p1} L_1}{L_1} - \frac{M^2 C_{p1} C_{p2}}{L_1 C_{p22} L_{se}} \right)} \quad (9)$$

$$I_m Z_{in} = 0 \rightarrow L_{pe} - L_1 = \frac{M^2 C_{p2}}{C_{p22} L_{se}} \quad (10)$$

식 (10)을 통해 ZPA가 달성을 위한 C_{f1} 을 설계할 수 있다.

2.3 시뮬레이션 검증

제안된 토폴로지의 타당성 검증을 위해 PSIM Simulation을 진행한다. 토폴로지 변수는 표 1에 명시했다. 그림 4를 통해 CC 동작 시 DC링크 전압 범위 달성함을 확인할 수 있다. $U_{DC} = 400 V$ 일 때는 출력 전류 $I_L = 8.49 A$ 로 388 V의 출력 전압이 달성되며, $U_{DC} = 350 V$ 일 때, $I_L = 7.43 A$ 로 444 V의 출력 전압이 달성되는 것을 확인했다. 또한 부하와 관계없이 CC 출력을 달성했음을 알 수 있다. 그림 5는 CV 동작 시 입출력 파형이며, ZVS를 달성했음을 알 수 있다. $U_{DC} = 350 V$ 일 때 출력 전압 $U_L = 447 V$ 의 출력으로, $U_{DC} = 300 V$ 일 때는 $U_L = 383 V$ 출력으로 계통의 DC링크 전압 범위를 달성함을 확인했다. 마지막으로 부하와 관계없이 CV 출력이 달성됐음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 전기자동차의 배터리 SoC에 따라 CC 또는 CV 출력으로 계통에 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 IPT용 토폴로지의 설계 방법을 제안했다. SCC를 통해 1차 측 직렬 보상 커패시턴스와 2차 측 병렬 보상 커패시턴스 값을 변경하며 배터리 SoC에 관계없이 380 - 450 V 사이로 3.3 kW급 출력 달성을 시뮬레이션으로 확인했다. 향후 실험을 통해 설계의 타당성을 검증하고, 최적 효율 달성 방안을 연구할 예정이다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 '차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업'으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00281219)

참고 문헌

- [1] W. Zhang and C. C. Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, June 2016.