

정전압 정전류 출력 특성을 갖는 보상 네트워크 재구성형 무선전력전송 시스템

박주한¹⁾ 강민석¹⁾ 조영균^{*2)} 이상원^{*1)}

공주대학교 전기전자제어공학부¹⁾ 충남대학교 전파정보통신학과²⁾

Compensation Network Reconfiguration Wireless Power Transfer System with Constant Voltage and Constant Current Output

Joo_Han Park¹⁾ Min_Seok Kang¹⁾ Sang_Won Lee^{*1)} Young_Kyun Cho^{*2)}

¹⁾ Division of Electrical Electronic and Control Engineering, Kongju National University

²⁾ Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

리튬이온 배터리의 충전은 주로 정전류 정전압 (CC-CV) 충전을 이용한다. 무선전력전송 시스템에서 정전류 정전압 충전을 구현하는 방법은 가변 주파수 제어, 위상 천이 변조 그리고 정전류 또는 정전압 출력 특성을 갖는 보상 네트워크를 이용하는 방법 등이 존재한다.

본 논문에서는 보상 네트워크를 이용하여 정전류, 정전압 출력 특성을 모두 갖는 새로운 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 제안하는 시스템은 보상 커패시터, 인덕터 사이에 스위치를 추가하여 S-S 구조의 정전류 출력 특성, LCC-S 구조의 정전압 출력 특성을 갖으며, 이 과정에서 무효 전력이 최소화 되도록 설계되었다. 또한 위상 천이 변조 방법을 채택하여 안정적인 CC-CV 충전을 수행하도록 하였다.

1. 서론

최근 무선 충전은 안전성, 편리함, 자동화 등의 장점으로 널리 이용되고 있는 기술이며 전기 자동차를 포함한 전동형 모빌리티, 가전 제품 및 여러 산업 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다^[1].

리튬이온 배터리는 높은 전력 밀도를 장점으로 에너지 저장원으로서 광범위 하게 사용되고 있으며, 그림 1 과 같은 정전류-정전압(CC-CV) 충전을 사용한다.

정전류 모드에서는 일정한 전류로 충전하며 배터리의 전압이 상승하게 되며, 전압이 미리 설정한 값에 도달하면 정전압 모드로 전환하게 된다. 정전압 모드에서는 일정한 전압으로 충전을 해주며, 컷 오프 전류에 도달할 때까지 충전을 진행한다. 이러한 충전을 무선전력시스템 시스템에 구현하기 위하여 일반적으로 1) 추가적인 DC-DC 컨버터를 도입하는 방법, 2) 송신기의 스위칭 주파수를 가변시키는 방법, 3) 송신기 브릿지 레그 간 위상을 천이 시키는 방법, 4) 부하 저항에 독립적인 정전류 및 정전압 특성을 갖는 보상 네트워크를 설계하는 방법 등을 도입할 수 있다. 만약 DC-DC 컨버터를 도입한다면^[2], 시스템 전체의 비용 상승과 전력 밀도 감소를 야기하게 되며, 가변 스위칭 주파수를 도입할 경우^[3] 주파수 변이에 따른 bifurcation 현상이 발생할 우려가 존재한다. 또한 위상 천이 방법을 도입할 경우^[4] 하드스위칭에 따른 전력 손실이 발생할

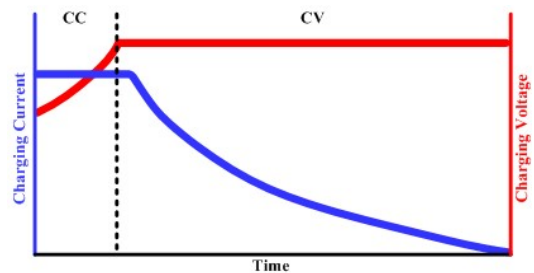


그림1 리튬이온 배터리의 CC-CV 충전 과정
Fig.1 CC-CV charging procedure of Li-ion battery

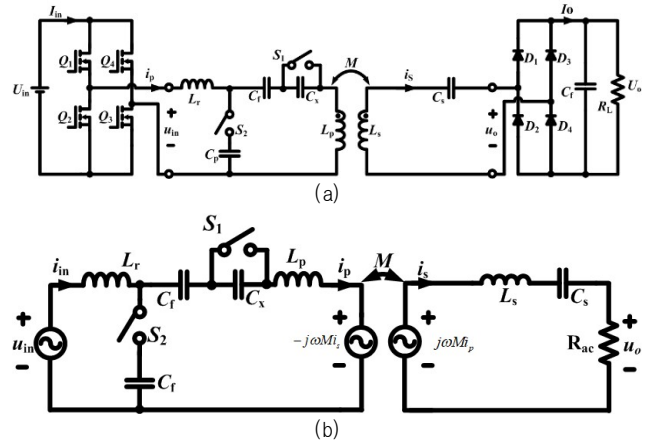


그림2 (a) 제안한 보상 네트워크 재구성형 무선전력전송 시스템 (b) 제안한 회로의 등가회로
Fig.2 (a) Proposed compensation network reconfiguration wireless power transfer system (b) Equivalent of the proposed circuit

우려가 있다. 마지막 방법인 보상 네트워크 재설계 방법^[5]은 양방향 스위치, 추가적인 공진 소자 사용으로 시스템 비용을 다소 상승시킬 수 있지만, 각 정전류 및 정전압에서 공진을 최적화할 수 있는 장점이 존재한다.

본 논문은 S-S 구조와 LCC-S 구조 모두를 활용하여 정전류와 정전압 출력 특성을 구현하는 재구성형 토폴로지에 대해서 제안하며, 안정적인 CC-CV 충전을 위하여 소프트 스위칭 보장 범위 내에서 위상 천이 변조 방식을 적용하였다.

2. 제안된 구조의 이론 분석

2.1 제안하는 구조

제안하는 구조의 재구성형 토폴로지는 그림 2. (a)에서 확인할 수 있다. 여기서 U_{in} 은 입력 전압, I_{in} 은 입력 전류, Q_{1-4} 는 스위치이며, u_{in} 은 인버터 출력 전압, i_{in} 은 인버터 출력 전류이다. S_{1-2} 는 모드 전환용 스위치, C_p , C_f , C_x 는 수신 측 보상 커패시터, L_r 송신 측 공진 인덕터 L_p 는 수신 측 인덕터이다. L_s 는 송신 측 인덕터, C_s 는 송신 측 보상 커패시터, u_o 는 정류기 입력 전압, i_s 는 정류기 입력 전류, D_{1-4} 는 정류 다이오드, C_o 는 출력 커패시터, R_o 는 부하 저항이며, U_o 는 출력 전압이다. 그림 2. (b)에서는 제안된 토폴로지의 등가회로를 확인할 수 있다. 모드 전환용 스위치의 상태에 따라 정전류 및 정전압 모드가 정해지며 각 모드에 대한 동작 설명은 아래의 결과 같다.

2.2 재구성형 토폴로지의 정전류 모드

정전류 모드에서는 S-S 구조로 동작하며, 동작 설명은 다음과 같다. Q_{1-4} 의 스위치는 (Q_1 , Q_3), (Q_2 , Q_4)가 한 쌍을 이뤄 50%의 듀티 비를 가지며 동작한다. 이때 S_1 , S_2 는 항상 꺼져 있다. 그리고 보상 커패시터 C_f , C_x 는 하나의 커패시터로 동작하며, L_p , L_r 과 직렬로 구성되어 S-S 구조로 동작한다. 해당 보상 네트워크의 무효전력을 최소화 시키기 위해서는 공진주파수(ω_o)에서 무선 전력 전송이 수행되어야 하며, 입력 임피던스 (\bar{Z}_m)의 허수부가 0인 조건에서 동작되어야 한다. 위의 동작 조건에 따라 아래와 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$\omega = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{(L_p + L_r) \cdot \left(\frac{C_f C_x}{C_f + C_x} \right)}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (1)$$

추가적으로 S-S 구조에 대해서 KVL을 사용하여 입력 임피던스 (\bar{Z}_m), 출력전류 (i_o)에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{Z}_m = \frac{\omega_o^2 M^2}{R_{ac}} \quad (2)$$

$$i_o = j \frac{u_m}{\omega_o M} \quad (3)$$

위의 수식을 통해 해당 보상 네트워크의 입력 임피던스는 공진 주파수에서 Zero Phase Angle (ZPA)를 달성한 것을 알 수 있으며, 출력 전류는 부하 저항에 독립적인 정전류 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

2.3 재구성형 토폴로지의 정전압 모드

정전압 모드에서는 LCC-S 구조로 동작하며, 동작 설명은 다음과 같다. Q_{1-4} 의 스위치는 (Q_1 , Q_3), (Q_2 , Q_4)가 한 쌍을 이뤄 50%의 듀티 비를 가지며 동작한다. 이때 S_1 , S_2 는 항상 켜져 있으며, 직·병렬로 구성된 L_r , C_f , C_p 에 의해 LCC-S 구조를 이뤄 동작한다. 해당 보상 네트워크의 무효전력을 최소화시키기 위해서는 공진주파수(ω_o)에서 무선 전력 전송이 수행되어야 하며, 입력 임피던스 (\bar{Z}_m)의 허수부가 0인 조건에서 동작되어야 한다. 위의 동작 조건에 따라 아래와 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$\omega = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

$$j\omega_o L_r = \frac{1}{j\omega_o C_f} + j\omega_o L_p \quad (5)$$

표 1 시뮬레이션 파라미터 값

Table 1 Simulation parameter value

파라미터	값	파라미터	값
U_{in}	60 V	L_p	120 μ H
f_s	85 kHz	C_p	128 nF
k	0.25	C_f	37.4 nF
M	21.9 μ H	C_x	64.2 nF
U_o	48 V	L_r	27.3 μ H
P_o	200 W	L_s	106 μ H
		C_s	33.1 nF

추가적으로 LCC-S 구조에 대해 KVL을 적용하여 \bar{Z}_m , 출력 전압 (u_o)에 대해서 정리하면 아래와 같다.

$$\bar{Z}_m = \frac{L_r^2 R_{ac}}{M^2} \quad (6)$$

$$u_o = \frac{M u_m}{L_r} \quad (7)$$

위의 수식을 통해 해당 보상 네트워크의 입력 임피던스는 공진 주파수에서 Zero Phase Angle (ZPA)를 달성한 것을 알 수 있으며, 출력 전압은 부하 저항에 독립적인 정전압 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3. CC 및 CV 모드를 구현하기 위한 파라미터 값 선정

그림 1에서 회로를 FHA 분석을 이용 후^[6], u_{in} , u_o , i_o 를 RMS 값으로 표현 하면 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$u_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{in} \quad (8)$$

$$u_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_o \quad (9)$$

$$i_o = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} I_o \quad (10)$$

식 (3), (7), (8), (9), (10)을 활용하여 L_r , C_p , C_f , C_x 에 대해서 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$L_r = \frac{8u_m^2}{\omega_o \pi^2 i_o u_o} \quad (11)$$

$$C_p = \frac{\pi^2 i_o u_o}{8u_m^2} \quad (12)$$

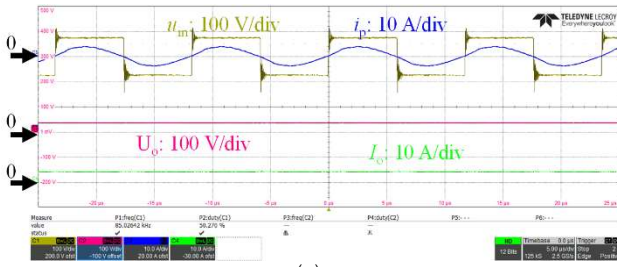
$$C_f = \frac{\pi^2 i_o u_o}{L_p \omega_o \pi^2 i_o u_o - 8u_m^2} \quad (13)$$

$$C_x = \frac{\pi^4 i_o^2 u_o}{\omega_o \cdot (8u_o + L_p \omega_o \pi^2 i_o) \cdot \{\pi^2 i_o u_o \cdot (1 - L_p \omega_o) - 8u_m^2\}} \quad (14)$$

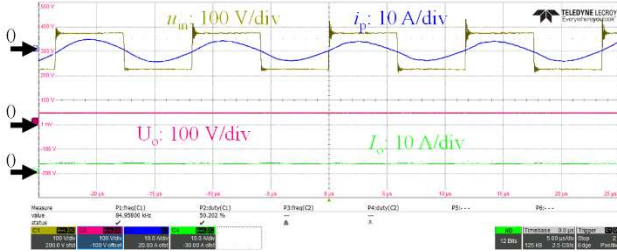
4. 실험 및 결과

4.1 실험 과정

제안하는 보상네트워크 재구성형 무선전력전송 시스템을 검증하기 위하여 프로토타입을 제작하였다. 프로토타입은 정전류 모드에서 4A의 출력을 갖도록 설계하였으며, 정전압 모드 전환은 48V에서



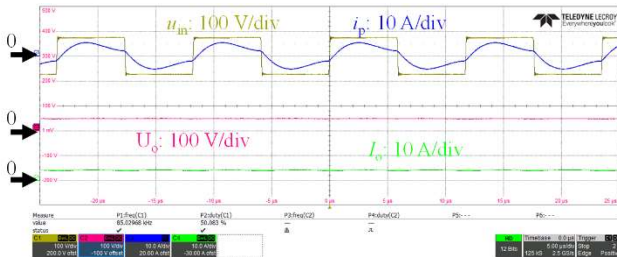
(a)



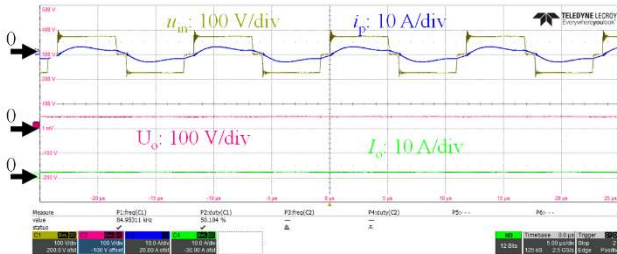
(b)

그림3 정전류 모드에서 u_m , i_p , U_o , I_o 의 실험 파형 (a) $R_L = 8.5 \Omega$ (b) $R_L = 11.5 \Omega$

Fig.3 Experimental waveforms of u_m , i_p , U_o , I_o in CC mode (a) $R_L = 8.5 \Omega$ and (b) $R_L = 11.5 \Omega$



(a)



(b)

그림4 정전압 모드에서 u_m , i_p , U_o , I_o 의 실험 파형 (a) $R_L = 14 \Omega$ (b) $R_L = 88 \Omega$

Fig.4 Experimental waveforms of u_m , i_p , U_o , I_o in CV mode (a) $R_L = 14 \Omega$ and (b) $R_L = 88 \Omega$

수행되도록 하였다. 마지막으로 컷 오프 전류는 0.5A로 설정하였다. 세부적인 소자값 및 파라미터는 표 1과 같다.

4.2 실험 결과

I_o 는 그림 3 (a)와 같이 배터리 전압 $U_b = 36 \text{ V}$ 에서 4.2 A로 측정되었으며, 충전이 진행됨에 따라 그림 3 (b)와 같이 배터리 전압 $U_b = 48 \text{ V}$ 에서 4.08 A로 측정되었다. 모사하는 배터리팩의 정전류 충전 구간인 $U_b = 36 \text{ V} \sim 48 \text{ V}$ 에서 I_o 의 변동률은 2.8 %로 원활한 정전류 충전이 진행됨을 확인할 수 있었다. 배터리 전압 $U_b = 48 \text{ V}$ 에서 그림 4 (a)와 같이 정전압 충전으로 전환되었으며, 이때 I_o 는 3.5 A로 측정되었다. 충전이 진행됨에 따라 그림 4 (b)와 같이 I_o 는 컷오프 전류인 0.5 A로 감소하였으며, 이 때 전압은 48.66 V로 측정

되었다. 모사하는 배터리팩의 정전압 구간에서 U_b 의 변동률은 0.98 %로 원활한 정전압 충전이 진행됨을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 정전류와 정전압을 달성하기 위한 새로운 보상 네트워크 재구성형 토폴로지에 대하여 제안하였다. 제안하는 토폴로지는 양방향 스위치의 제어를 통해 S-S 구조의 정전류 동작, LCC-S 구조의 정전압 동작을 수행한다. 이를 검증하기 위하여 프로토타입을 제작하였으며, 48 V 배터리팩 충전을 모사하였다. 실험 결과, CC-CV 충전과정에서 전류, 전압 변동률은 각각 $\Delta 2.8 \%$, U_b 0.98 %였으며, 모드간 원활한 변환을 확인할 수 있었다.

이 연구는 2023년 중소벤처기업부의 기업연계형 연구개발인력양성사업(RS-2023-00258860) 연구비 지원에 의한 연구임.

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원되었음. (과제번호:R22X002-09)

참고 문헌

- [1] Y. Zhang, T. Kan, Z. Yan, Y. Mao, Z. Wu and C. C. Mi, "Modeling and Analysis of Series-None Compensation for Wireless Power Transfer Systems With a Strong Coupling," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1209-1215, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2835307.
- [2] H. Li, J. Li, K. Wang, W. Chen and X. Yang, "A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 7, pp. 3998-4008, July 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2349534.
- [3] W. Zhang, S. -C. Wong, C. K. Tse and Q. Chen, "Design for Efficiency Optimization and Voltage Controllability of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 191-200, Jan. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2249112.. 4768-4778, June 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2454292.
- [4] A. Berger, M. Agostinelli, S. Vesti, J. A. Oliver, J. A. Cobos and M. Huemer, "A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, pp. 6338-6348, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2410216.
- [5] W. Zhang and C. C. Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, June 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2454292.
- [6] R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 3rd ed. Norwell, MA, USA: Kluwer, 2020.