

고정주파수에서 동작하는 SRC를 이용한 차량탑재형 충전기 최적설계

박준성, 김민재, 최세완
서울과학기술대학교

Optimum Design of On-Board Charger Using SRC Operated at Fixed Frequency

Junsung Park, Minjae Kim, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 직렬공진 컨버터를 이용한 3kW급 차량탑재형 배터리 충전기의 최적설계 방법을 제안한다. 제안한 충전기의 부스트컨버터는 역률보상과 동시에 배터리의 전압 또는 전류제어를 수행하여 절연부 직렬공진컨버터(SRC)를 고정주파수에서 동작시킴으로서 전부하 영역에서 스위치와 다이오드의 ZCS 턴온과 턴오프가 성취되고 모든 소자 정격을 최소화 할 수 있다. 또한 공진소자 공차에 따라 공진주파수가 변동되도 기존 방식과 달리 출력전압 변동이 거의 없고 하드스위칭 전류를 작게 할 수 있는 최적설계방법을 제시한다. 3kW 시작품을 통해 제안한 방식의 타당성을 검증하였다.

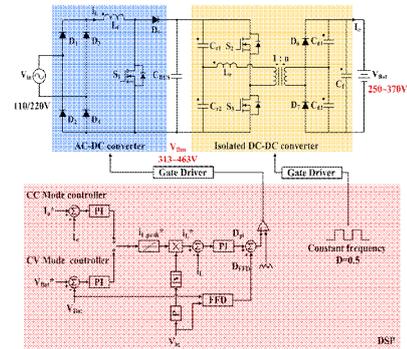


그림 1 제안하는 차량탑재형 충전기의 시스템 구성도

1. 서론

일반적으로 배터리 충전기는 앞단의 역률보상을 위한 부스트 컨버터와 후단의 배터리의 전압 또는 전류 제어를 위한 고주파 절연 컨버터로 구성된다. 고주파 절연 컨버터로는 PWM 컨버터와 공진형 컨버터가 있다. PWM 컨버터는 구현이 용이하고 스위치의 ZVS턴온이 가능하지만 턴 오프 전류가 큰 단점이 있다. 공진형 컨버터는 ZVS턴온이 가능하고 턴오프전류가 작아지는 장점이 있지만 공진소자 공차에 의해 공진주파수가 변경되어 출력전압 조정을 위해 스위칭주파수의 변동 폭이 커져 변압기가 포화가 되거나 스위칭손실이 증가 될 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는 앞단의 부스트컨버터가 역률보상과 동시에 배터리의 전압 또는 전류 제어를 수행하고 후단의 절연형 컨버터인 SRC는 고정듀티와 고정주파수로 동작시킴으로서 공진소자 공차에 의해 공진주파수가 변동되는 기존 주파수 제어방식의 단점을 극복하고 전부하영역에서 스위치와 다이오드의 ZCS 턴온 및 턴오프가 가능한 배터리 충전기를 제안한다^[1]. 또한 제안하는 SRC는 작은 L_r 를 사용하여 이득곡선의 기울기를 완만하게 하여 공진소자 공차에 의한 전압이득 변동이 거의 없고 하드스위칭 전류를 작게 할 수 있는 최적설계방법을 제시한다.

2. 제안하는 배터리충전기

그림 1은 제안하는 배터리충전기의 구성도를 나타낸다. 제안한 컨버터는 2단방식으로 비절연부는 부스트컨버터를 사용하였으며 절연부는 SRC를 적용하였다. 부스트컨버터는 역률보상과 배터리 전압제어 또는 전류제어를 수행하며, 절연부의 SRC는

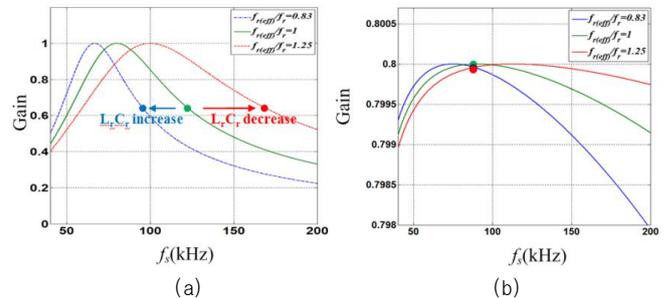


그림 2 공차에 따른 SRC의 전압 이득곡선 특성 (a) 주파수 제어방식 (b) 제안한 고정주파수 방식

듀티(D=0.5)와 스위칭 주파수를 고정하여 동작한다. 이로 인해 변압기 및 스위치 등 절연부를 최적화 할 수 있고 공진주파수와 스위칭주파수가 같은 지점에서 사용해 모든 동작영역에서 스위치 및 다이오드가 ZCS 턴온 및 턴오프가 가능하다.

기존의 주파수를 변동하여 출력전압을 제어하는 방식은 그림 2(a)에서 보듯이 공진소자 공차에 의해 $L_r C_r$ 이 감소하면 스위칭 주파수가 증가해 스위칭 손실이 증가하고 공진소자 공차에 의해 $L_r C_r$ 이 증가하면 스위칭주파수가 감소해 변압기가 포화될 수 있다. 하지만 제안하는 고정주파수 방식은 부스트컨버터에서 전압조정을 하고 SRC는 고정주파수를 사용하기 때문에 공진소자 공차가 발생해도 위의 기존방식과 같은 문제가 없다. 또한 기존의 주파수 제어방식은 주파수동작 범위를 줄이기 위해 큰 L_r 를 사용하여 이득곡선을 뾰족하게 만든다. 하지만 제안하는 고정 주파수방식은 작은 L_r 를 사용하여 이득곡선의 기울기를 완만하게 하여 그림 2(b)와 같이 공진소자 공차에 의한 전압이득의 변동을 최소화 한다.

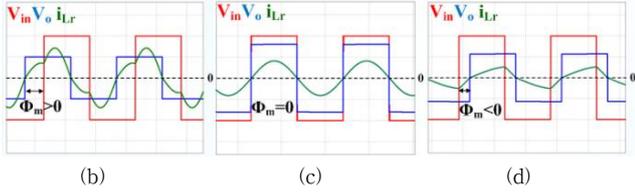
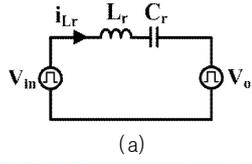


그림 3 공진주파수 변화에 따른 소프트 스위칭 (a) SRC의 등가모델 (b) ZCS 턴오프 (c) ZCS 턴온 및 턴오프 (d) ZVS 턴온

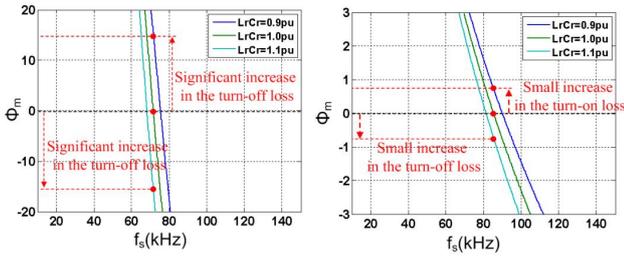


그림 4 공진소자 공차에 따른 Φ_m (a) 주파수 제어방식 (b) 제한한 고정주파수 방식

그림 3은 제안한 고정주파수 방식에서 공진주파수 변화에 따른 공진탱크의 동작파형을 나타낸다. 그림 3 (a)는 SRC의 공진 등가회로이며 공차에 따라 (b)~(d)와 같이 소프트 스위칭 종류가 달라진다. 공진탱크의 V_{in} 과 V_o 의 위상차를 Φ_m 이라 할 때 V_{in} 를 기준으로 (b) $\Phi_m > 0$ 일 때 ZCS 턴오프, (c) $\Phi_m = 0$ 일 때 ZCS 턴온 및 턴오프, (d) $\Phi_m < 0$ 일 때 ZVS 턴온되는 것을 볼 수 있다. $|\Phi_m|$ 이 커질수록 ZVS 턴온이나 ZCS 턴오프는 잘되지만 하드스위칭 전류 또한 커지게 된다. 기존의 주파수 제어방식은 큰 L_r 을 사용하여 그림 4 (a)와 같이 공진소자 공차로 인해 공진주파수가 변동하여 Φ_m 이 크게 변해 하드스위칭 전류가 커지는 단점이 있다. 하지만 제한하는 고정 주파수 방식은 L_r 을 작게 최적 설계하여 그림 4 (b)와 같이 공진소자 공차로 인해 공진주파수가 변해도 Φ_m 의 변동이 작아 공진소자 공차에 따라 생기는 하드스위칭 전류가 작게 된다.

제한한 배터리 충전기는 $P_o=3kW$, $V_{in}=110/220V$, $V_{Bat}=250\sim 370V$, 공진소자 $L_r C_r$ 의 공차율= $\pm 20\%$ 의 사양으로 설계하였다. 변압기는 제한된 공간을 고려하여 OP45530EC ($W_a = 376mm^2$, $A_c = 420mm^2$, $B_{sat} = 0.5T$)를 선정하였으며 식 (1)을 이용하여 공진주파수를 67kHz로 선정하였다. SRC의 전압전달비와 공차에 의한 전압변동 허용범위를 제한하여 식(2)를 이용해 최대 L_r 값을 구하였고 최종 공진소자 값은 $L_r=2.5\mu H$, $C_r=2.44\mu F$ 을 선정하였다.

$$\omega_s > \frac{2 \cdot I_{pri(rms)} \cdot V_{pri(max)}}{J \cdot K_f \cdot B_m \cdot A_p} \quad (1)$$

$$L_r < \frac{8 \cdot R_L \cdot (n - M)}{M \cdot j \cdot \pi^2 \cdot \omega_r(eff) \cdot n^2 \cdot \left[\frac{\omega_s}{\omega_r(eff)} - \frac{\omega_r(eff)}{\omega_s} \right]} \quad (2)$$

3. 실험 결과

제한한 배터리 충전기의 타당성을 입증하기 위해 큰 L_r 을 사용하는 기존 주파수 제어방식과 작은 L_r 을 사용하는 제안한 고

정주파수 방식의 공진소자 공차에 의한 영향을 실험하였다. 그림 5는 공진소자 공차에 따른 스위치의 전압, 전류 및 배터리 전압을 나타내며 그림 5의 (a), (c)는 L_r 을 20 μH , (b), (d)는 2.5 μH 를 사용하였다. 그림 5의 (a), (b)는 모두 f_r 과 f_s 가 같아 ZCS 턴온 및 턴오프를 성취하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 5의 (a), (c)와 같이 주파수제어 방식은 20 μH 의 큰 공진인덕터를 사용하여 공진소자 공차로 공진주파수가 0.91 f_r (61kHz)로 변경됨에 따라 배터리 전압이 2V 감소하며 2A의 하드스위칭 오프 전류를 갖는다. 하지만 그림 5의 (b), (d)와 같이 제안하는 고정주파수 방식은 2.5 μH 의 작은 공진인덕터 값을 사용하여 공진소자 공차로 주파수가 0.91 f_r (61kHz)로 변경되어도 출력전압은 0.2V로 작게 변동되고 하드스위칭 오프 전류 또한 1.3A로 작은 것을 볼 수 있다. 그림 6은 제한한 배터리 충전기의 3kW급 시작품으로 공냉방식을 적용하였으며 총 부피는 7.6L이다.

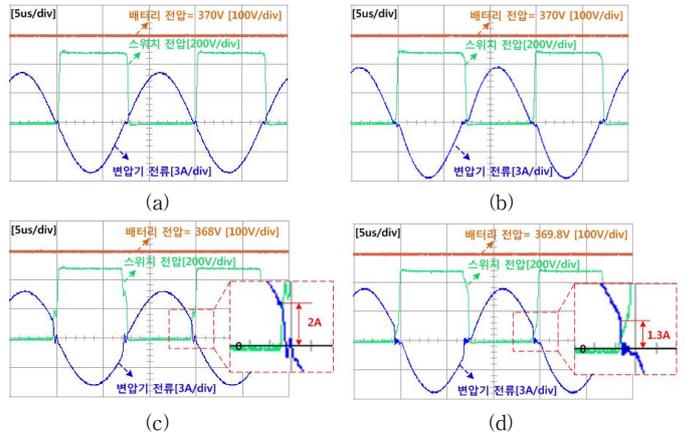


그림 5 공차에 따른 스위치 전압, 전류 및 배터리 전압 파형 (a) $f_r=f_s=67kHz @ L_r=20\mu H$ (b) $f_s=f_r=67kHz @ L_r=2.5\mu H$ (c) $f_s=67kHz$, $f_{r(eff)}=61kHz @ L_r=20\mu H$ (d) $f_s=67kHz$, $f_{r(eff)}=61kHz @ L_r=2.5\mu H$



그림 6 제한한 3kW급 배터리 충전기 시작품

4. 결론

본 논문에서는 SRC를 이용한 3kW급 고효율 차량탑재형 충전기 제안하였다. 제한한 SRC 공진소자의 최적 설계방식을 제시하였으며 공진소자 공차에 따라 유효공진주파수가 변동되도 기존 방식과 달리 출력전압 변동이 거의 없고 하드스위칭 전류 또한 작다. 효율과 역율은 [1]과 같이 1kW에서 최고 효율 94.6%(3.3kW에서 92.6%) 1kW이상에서 역률 0.98이상 달성하였다.

참고 문헌

- [1] 김민재, 박준성, 최세환, "전부하영역에서 영전류 턴온 및 턴오프 스위칭을 하는 직렬공진 컨버터를 이용한 차량탑재형 충전기" *전력전자학회 2011년도 학술대회 논문집*, 2011. 7, pp. 338-339.
- [2] Daocheng Huang, Lee, F.C, Dianbo Fu, "Classification and selection methodology for multi element resonant converters" in *Proc. IEEE APEC*, 2011, pp. 558-565.