

EV 배터리 충전기용 무선전력전송 시스템의 주파수 추종 알고리즘

변중은, 김민국, 주동명, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Frequency Tracking Algorithm of Inductive Power Transfer System for EV Battery Charger

Jong Eun Byeon, Min Kook Kim, Dong Myoung Joo, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 SP 토폴로지를 가지는 무선전력전송 시스템에서 결합 계수 및 부하 변화에 따른 Zero phase angle (ZPA) 주파수 추종 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 추가적인 아날로그 회로 없이 기존의 디지털 제어기에 적용되어 ZVS 영역에서 동작하도록 공진 주파수를 추종한다. PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 주파수 추종 성능을 검증한다.

1. 서론

무선전력전송 시스템은 일반적으로 VA 정격의 최소화 및 효율 상상을 위해 Zero phase angle (ZPA) 주파수에서 동작한다. 하지만 실제 시스템에서 ZPA 주파수는 송수신패드의 수직/수평이격, 결합계수 또는 부하 조건에 따라 변하기 때문에 고정주파수 동작으로는 일정한 출력 전압을 얻을 수 없으며 1차측 브리지 토폴로지의 ZCS 동작에 의해 시스템이 소손 될 수 있다. 하지만 기존의 제어방식은 구성이 복잡하고, 송신측의 공진 파라미터를 불연속적으로 제어하기 때문에 모든 부하에 대해 유연한 대응이 어렵다^[1]. 따라서 시스템 파라미터 변화를 고려하여 시스템을 항상 ZPA 주파수에서 동작하도록 하는 주파수 제어 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 무선전력전송 시스템의 주파수 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 수신측과의 통신이 불필요하며 추가적인 아날로그 회로 없이 1차측 브리지의 ZPA 동작이 가능하다. 제안한 알고리즘을 DSP에 적용하여 3 kW급 SP 토폴로지를 통해 주파수 제어 성능을 검증한다.

2. 제안하는 주파수 제어 알고리즘

2.1 시스템 구성

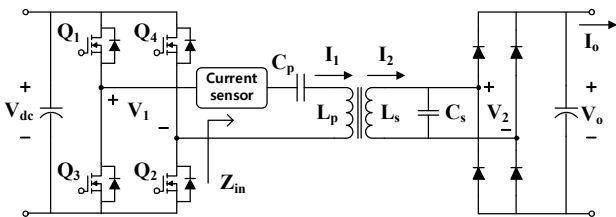


그림 1 SP 토폴로지 IPT 시스템 회로도
 Fig. 1 Circuit of SP Topology in IPT system.

표 1 SP 토폴로지 IPT 시스템 사양

Table 1 Specifications of SP topology in IPT system.

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{dc}	380 V	k	0.13, 0.155
C_p	3.86 nF	L_p	940 uH
C_s	237.13 nF	L_s	15.85 uH

그림 1은 SP 토폴로지 회로를 나타낸다. 시스템은 IPT 컨버터, 보상 네트워크 그리고 다이오드 정류기로 구성되어 있으며 주파수 제어를 위한 공진 전류 센싱 회로를 송신측 보상 네트워크 입력 단에 추가하였다. 시스템 사양은 표 1 과 같다.

2.2 주파수 제어 알고리즘

특정 설계 조건에서는 IPT 컨버터가 ZPA 주파수에서 동작할 수 있다. 그러나 실질적인 동작 상황에서 ZPA 주파수는 결합계수 및 부하의 변동에 따라 변하며, 조건에 따라 ZCS 영역에서 동작하게 되어 스위치 소손을 초래할 수 있다. 따라서 시스템의 안정성 및 효율 향상을 위해 ZPA 주파수에 가까운 ZVS 영역에서 동작하도록 하는 주파수 제어 알고리즘이 필요하다. 이를 위해 그림 1과 같이 공진 전류 센싱 회로를 추가한다. DSP 제어 특성 상 공진 전류 센싱은 Q_1 및 Q_2 가 턴 온되는 시점과 Q_3 및 Q_4 가 턴 오프 되는 시점에서 가능하다. 그림 2는 IPT 컨버터의 주요 파형 및 가능한 공진 전류 센싱 시점을 나타낸다. Q_3 및 Q_4 가 턴 오프 되는 시점에서 전류를 센싱하는 경우 Q_1 및 Q_2 가 턴 온되는 시점에서 음의 값이 될 수 있도록 하는 전류 값을 식 (1) (3)과 같이 계산해야 한다^[2].

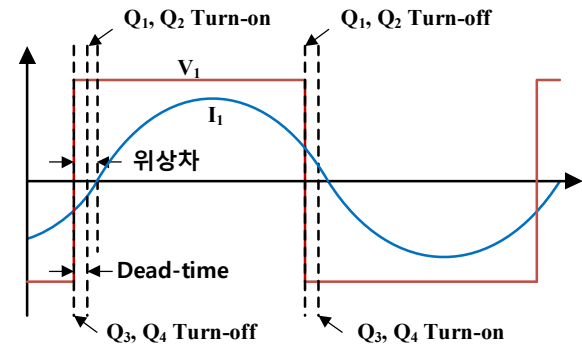


그림 2 공진 전류 센싱 개념도
 Fig. 2 Conceptual diagram of resonant current sensing.

$$Z_{in} = Z_r + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \quad (1)$$

$$I_p(t) = \frac{|V_1|}{|Z_{in}|} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$I_p(t_{deadtime}) < 0 \quad (3)$$

이 때 Z_r 은 반사 임피던스, M 은 상호인덕턴스, Z_{in} 은 송신측에서 바라본 임피던스를 나타낸다. 식 (1)에서 Z_{in} 은 부하 및 상호인덕턴스에 따라 변하기 때문에 실시간으로 계산이 불가능하다. 또한 ZVS 동작시에는 턴 오프 시점에서 하드 스위칭으로 인한 노이즈가 발생하기 때문에 정확한 전류 센싱이 어려울 수 있다. 따라서 센싱 시점을 스위치 Q_1 및 Q_2 가 온 되는 시점으로 설정한다. 그림 2에서 dead time이 너무 짧을 경우 arm short로 인해 시스템이 될 수 있으며, 너무 길면 스위치 턴 오프 시 큰 전류가 흐르게 되어 스위칭 손실이 커지기 때문에 적절한 dead time값을 선정해야 한다. ZVS 동작을 위해 Q_1 및 Q_2 가 켜지는 시점에서의 공진 전류는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$I_L < i_1 < 0 \quad (4)$$

이 때 I_L 은 최소 전류 제한값을 의미한다. 따라서 스위칭 주파수는 (4)의 조건을 만족하도록 센싱한 공진 전류에 따라 주파수의 증감을 통해 제어한다. 이러한 제어 방법은 매 스위칭 주기마다 한 번의 전류 센싱이 필요하므로 기존의 DSP 제어기도 적용 가능하다. SP 토폴로지에서의 ZPA 주파수 추종 알고리즘은 그림 3과 같다. SP 토폴로지 특성상 주파수가 증가 할수록 입력 임피던스가 증가하기 때문에 센싱 시점에서의 공진 전류가 식 (4)의 조건 내에 있으면 주파수를 유지하고, 센싱 전류 값이 0보다 클 경우는 주파수를 감소시키며, I_L 보다 작아지면 주파수를 증가시켜 조건 범위 내로 공진전류를 유지한다.

2.3 주파수 제어 알고리즘 검증

제안한 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션 및 3 kW급 프로토타입 실험결과에 대하여 결합계수 및 부하 변화에 따른 ZPA 주파수 값을 그림 4에 나타내었다. $k=0.13$ 에서는 최대 0.63% 오차를 나타내며 $k=0.155$ 에서는 최대 0.65%오차를 보였으며 이는 패드의 인덕턴스 변화에 기인한다. 그림 5는

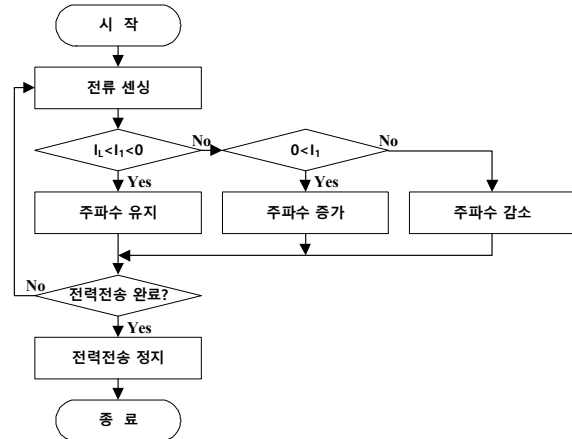


그림 3 ZPA 주파수 추종 알고리즘
Fig. 3 ZPA frequency tracking algorithm.

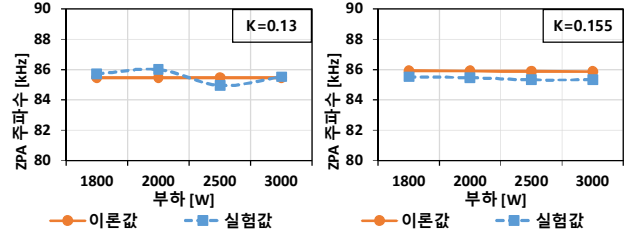


그림 4 결합계수 별 부하변화에 따른 ZPA 주파수 비교
Fig. 4 ZPA frequency comparison according to load and k.

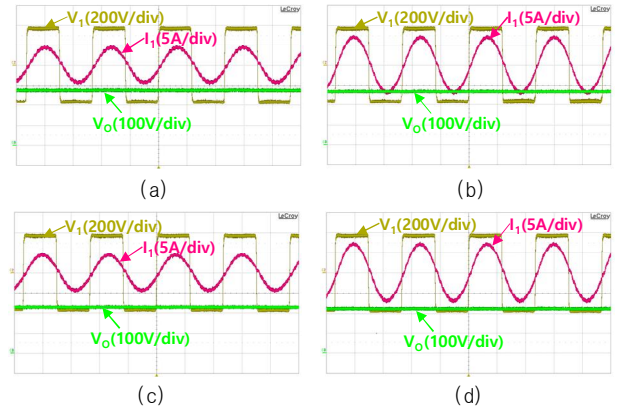


그림 5 ZPA 주파수 추종 실험 결과
Fig. 5 Experimental results of ZPA frequency tracking.
(a) $k=0.13$, 1800 W (b) $k=0.13$, 3000 W (c) $k=0.155$, 1600 W (d) $k=0.155$, 3000 W

각 결합계수 별 IPT 컨버터의 공진전압 (V_I) 및 공진전류 (I_I), 출력전압 (V_o) 파형을 나타낸다. 각 결합계수 및 부하 조건에서 입력전압 및 출력전압이 ZPA에 가까운 ZVS 영역에서 제어 되고 있다. 따라서 제안한 주파수 추종 알고리즘이 정상적으로 수행되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 시스템의 효율, 안정성 증대 및 VA 정격 최소화를 위한 ZPA 주파수 추종 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 디지털 제어기에 적용 가능하며, 매 센싱 주기의 전류 값이 ZPA 주파수에 가까운 ZVS 동작 영역에 있도록 주파수를 제어한다. 따라서 송신측의 단독 제어로 간단한 주파수 제어가 가능하다. 3 kW급 프로토타입의 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

이 논문은 (주)현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Eberhard Waffenschmidt, "Dynamic Resonant Matching Method for a Wireless Power Transmission Receiver", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6070-6077, Nov. 2015.
- [2] Chwei Sen Wang, Oskar H. Stielau, and Grant A. Covic, "Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger", *IEEE Trans. Ind Electron.*, vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, Oct. 2005.