

무선전력전송 시스템의 공진주파수 변동을 보상하기 위한 Bridgeless 정류기 동작 분석

손원진, 이재광, 안상준, 변중은, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Performance Analysis of Bridgeless Rectifier for Inductive Power Transfer System to Compensate Resonance Frequency Variation

Won Jin Son, Jae Gwang Lee, Sang Joon Ann, Jong Eun Byun, and Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 자기유도방식 무선충전 시스템의 송·수신 패드 위치 변화에 따른 공진주파수 변동을 보상하기 위한 bridgeless 정류기 동작에 대해 분석한다. Bridgeless 정류기의 스위칭 시점 및 duty 변화에 따른 공진네트워크 입력임피던스의 위상 변화를 수식적으로 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 분석 결과를 검증한다.

1. 서 론

전기자동차 충전용 자기유도방식 무선충전 (inductive power transfer, IPT) 시스템에서 송·수신패드의 인덕턴스는 송·수신 패드 사이의 거리에 따른 함수로 나타나기 때문에, 차량의 주차 위치가 변하면 인덕턴스가 변동하여 회로의 공진주파수가 달라진다. 공진주파수가 달라지면 설계된 주파수에서 동작 시 송신측의 전압과 전류의 위상차가 커져 VA정격이 높아지고 입력 전류의 크기 증가로 인해 전력전달효율이 감소할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 주파수제어 방법과 커패시터 스위칭을 이용하여 공진주파수 변동을 보상하는 방법이 있다. 주파수 제어 방법은 송·수신패드의 인덕턴스 변화에 따라 1차측 공진주파수를 추종하는 제어 방법으로 zero phase angle (ZPA) 동작을 통해 VA 정격을 줄일 수 있지만, 동작주파수가 2차측 공진주파수에서 멀어져 전력이 전달되지 않을 수 있다. 커패시터 스위칭 방식은 공진네트워크의 커패시턴스를 스위칭을 통해 변동된 공진주파수를 보상하는 방법이다. 하지만 변화하는 모든 인덕턴스 값에 대응할 수 없어 정밀도가 떨어지고 추가적인 하드웨어로 인해 시스템 부피가 커지게 되는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 bridgeless 정류기를 이용한 무선전력 전송 시스템 공진주파수 변동 보상 방법을 제안한다. Bridgeless 정류기의 스위칭 시점과 duty의 변화에 따른 송신측 입력 임피던스의 위상 변화를 수식적으로 분석하고, 공진주파수 변동 보상 가능성을 확인한다. 분석 결과를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 진행한다.

2. Bridgeless 정류기 동작 분석

2.1 시스템 구성

그림 1은 수신측에 bridgeless 정류기를 사용한 IPT 시스템을

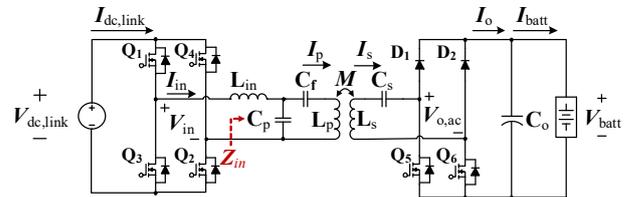


그림 1 Bridgeless 정류기를 적용한 무선전력전송 시스템
Fig. 1 IPT system with bridgeless rectifier.

표 1 IPT 시스템 설계조건

Table 1 Design conditions of IPT system.

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---------------|---------------|-----------|----------|
| $V_{dc,link}$ | 200~420 [V] | P_o | 3300 [W] |
| k | 0.062 ~ 0.218 | f_o | 85 [kHz] |

표 2 최소 및 최대 결합계수에서의 시스템 파라미터

Table 2 System parameters at minimum and maximum coupling factor.

| Parameter | $k = 0.062$ (Design point) | $k = 0.218$ |
|-----------|-------------------------------|-------------|
| | C_f | 7.67 [nF] |
| C_p | 72.416 [nF] | |
| C_s | 15.419 [nF] | |
| L_{in} | 48.41 [μH] | |
| L_p | 505.55 [μH] | 503.11 [μH] |
| L_s | 227.38 [μH] | 240.73 [μH] |
| M | 20.97 [μH] | 76.01 [μH] |

나타낸다. 공진 네트워크는 부하 변화에 무관한 출력전압을 가지며 부하 및 결합계수의 변화에도 bifurcation 현상의 발생 가능성이 적은 LCCL S 토폴로지로 선정하고, 최소 결합계수 조건에서 송·수신측 공진주파수를 85kHz로 동일하게 설계한다^[1]. 표 1은 시스템 설계 조건을 나타내며, 표 2는 최소 및 최대 결합계수 조건에서의 시스템 파라미터를 나타낸다.

2.2 입력 임피던스 위상 변화 분석

그림 2는 송신측의 전압 (V_{in}), 수신패드의 출력전압 ($V_{o,ac}$), 출력전류 ($I_{o,ac}$)와 $V_{o,ac}$ 의 기본파 성분 ($V_{o,ac,1}$)을 표현한 그림이다. $V_{o,ac}$ 의 파형에서 α , β 는 스위칭 시점 및 duty에 의해 결정되는 값이며, 식 (1) (3)과 같이 Fourier 분석을 통하여 $V_{o,ac,1}$ 을 도출할 수 있다. 이 때 ϕ 는 $I_{o,ac}$ 의 위상각을 나타낸다.

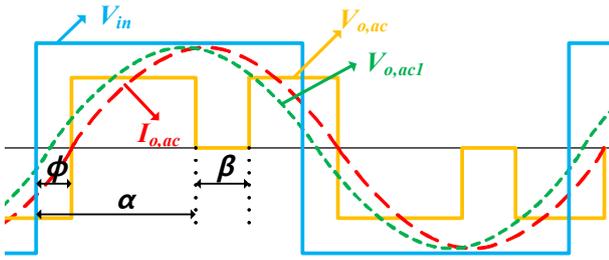


그림 2 IPT 시스템 공진 네트워크의 입출력 전압 및 전류 파형
Fig. 2 Voltage and current waveforms of the resonant network in the 2-stage IPT system.

$$V_{o,ac1} = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{2V_m}{\pi} [\sin \alpha - \sin(\alpha + \beta) + 2 \sin \phi] \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{2V_m}{\pi} [-\cos \alpha + \cos(\alpha + \beta) + 2 \cos \phi] \quad (3)$$

$V_{o,ac1}$ 과 출력전력을 $V_{o,ac1}$ 로 나누어서 구한 $I_{o,ac1}$ 을 이용하여 식 (4)와 같이 등가 출력 임피던스 ($Z_{o,ac}$)를 구할 수 있다. 그리고 $Z_{o,ac}$ 를 이용하여 식 (5)와 식 (6)과 같이 수신측의 전체 등가 임피던스 (Z_{22})와 송신측에서 바라본 수신측의 임피던스 (Z_r)를 구할 수 있다.

$$Z_{o,ac} = \frac{V_{o,ac1}}{I_{o,ac1}} \quad (4)$$

$$Z_{22} = Z_{o,ac} + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (5)$$

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_{22}} \quad (6)$$

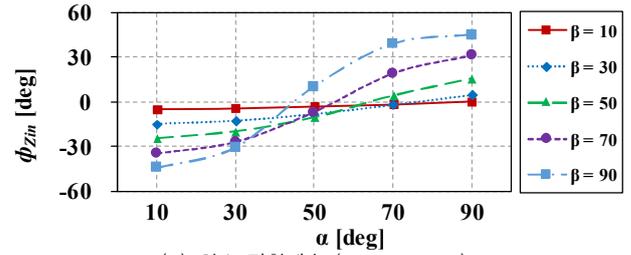
계산된 Z_r 을 통해 송신측 임피던스 (Z_{in})을 식 (7)과 같이 계산할 수 있다. 식 (7)에서 Z_{in} 은 Z_r 의 영향을 받기 때문에 α 와 β 값의 변화에 따라 입력 임피던스의 위상각 ($\phi_{Z_{in}}$)이 변화할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_f + Z_r}} + j\omega L_{in}}} + j\omega L_{in} \quad (7)$$

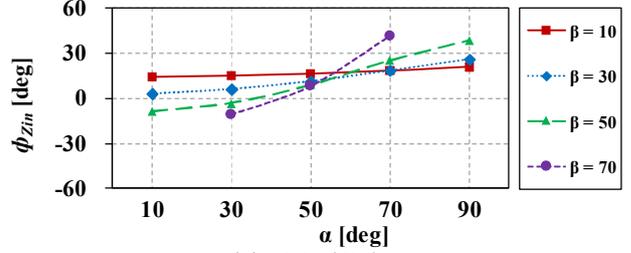
그림 3은 최소 결합계수 및 최대 결합계수에서 α 와 β 의 변화에 따른 $\phi_{Z_{in}}$ 을 나타낸다. 이처럼 bridgeless 정류기의 α , β 를 조절함으로써 $\phi_{Z_{in}} = 0$ 이 되는 ZPA 주파수에서 동작시켜 공진주파수 변동을 보상할 수 있음을 확인하였다.

2.3 시뮬레이션을 통한 검증

제한한 설계 포인트에서 벗어난 최대 결합계수 조건에서 2.2 절의 α , β 에 따른 $\phi_{Z_{in}}$ 의 수식 분석 결과를 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4 (a)는 최대 결합계수 조건에서 공진주파수를 보상하기 전의 시뮬레이션 결과이다. 송신측과 수신측 공진주파수가 달라 공진네트워크 입력 전압 V_{in} 과 교류 출력 전압 $V_{o,ac}$ 의 위상 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 4 (b)는 그림 3 (b)에서 분석한 결과를 바탕으로 $\phi_{Z_{in}} = 0$ 이 될 수 있도록, $\alpha = 36^\circ$, $\beta = 50^\circ$ 로 제어한 시뮬레



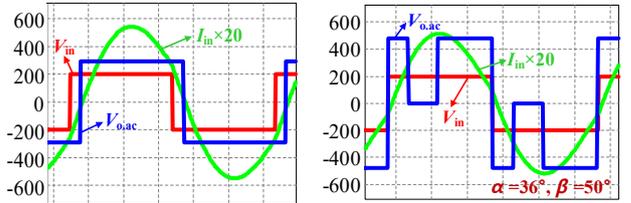
(a) 최소 결합계수 (design point)



(b) 최대 결합계수

그림 3 α , β 변화에 따른 입력 임피던스의 위상각

Fig. 3 The phase angle of the impedance according to α , β .



(a) 공진주파수 보상 전

(b) 공진주파수 보상 후

그림 4 최대 결합계수 조건에서의 시뮬레이션 파형

Fig. 4 Simulation waveforms at the maximum k .

이션 결과이며 bridgeless 정류기의 동작을 통하여 공진주파수가 변동한 조건에서도 ZPA 동작이 가능한 것을 확인하였다. 이와 같이 IPT 시스템 bridgeless 정류기의 스위칭 시점과 duty를 변화시킴으로써 공진주파수 변동을 보상할 수 있음을 수식적으로 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

3. 결론

본 논문에서는 IPT 시스템의 bridgeless 정류기 동작에 따른 공진네트워크 입력 임피던스의 위상 변화를 분석하였다. 또한 bridgeless 정류기의 스위칭 시점과 duty를 조절함으로써 공진주파수 변동 보상이 가능함을 수식적으로 확인하였으며 분석 결과를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

[1] M. J. Kim, D. M. Joo, S. J. Ann, and B. K. Lee, "Two stage inductive power transfer charger for electric vehicles," *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, vol. 22, No. 2, pp. 134-139, Apr. 2017.