

무선 배터리 충전 시스템에서의 임피던스 매칭을 달성하기 위한 모드 변환 기반 온-오프 변조 기법

장현준, 김세환, 예재섭, 정일호, 한병철
 경북대학교 전자전기공학부

Mode-Switching based On-Off Keying modulation to achieve impedance matching in Wireless battery Charging System

Hyeonjun Jang, Saehwan Kim, Jaeseob Yea, Ilho Jung, Byeongcheol Han
 School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

ABSTRACT

배터리 충전에 사용되는 알고리즘 중 하나인 정전류/정전압 (Constant-Current/Constant-Voltage, CC/CV) 알고리즘에서 CV모드의 높은 효율을 달성하기 위해서는 넓은 부하 범위에 대해 임피던스 매칭을 달성해야 한다. 기존의 무선 배터리 충전 시스템들은 임피던스 매칭을 달성하기 위하여 출력 측에 컨버터를 추가하거나, 또는 추가적인 소자들이 포함된 복잡한 토폴로지를 사용하였다. 본 논문에서는 모드 변환 기반 온-오프 변조 기법과 출력 측 전파 정류기를 스위치로 구성된 듀얼 사이드 브릿지(Dual-Side Bridge)를 이용하여 듀티비와 DSB의 모드 변환을 통해 전송되는 전력량을 제한하는 부하 가변 기법을 사용하여 임피던스 매칭을 달성하는 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 320W 프로토타입을 통해 검증되었다.

1. 서론

무선 배터리 충전 시스템은 배터리의 State of Charge(SoC)가 증가할수록 배터리 내부 등가 저항도 함께 증가하게 되어 임피던스 미스매칭에 의해 점차 효율이 감소하는 문제가 발생한다. 최적의 임피던스 매칭을 달성하지 않으면 배터리 과충전 및 배터리 수명에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 위 문제를 해결하기 위해 제시된 기법 중 온-오프 변조 기법 (On-Off Keying, OOK)은 듀티비 조절을 통해 H-bridge의 동작 여부를 결정하여 부하에 공급되는 전력을 제한하였다 [1]. 단순히 온-오프 동작으로 임피던스 매칭을 달성하는 방법은 추가적인 소자가 사용되지 않아 높은 효율을 달성할 수 있다. 하지만, 경부하 동작에서 정확하지 않은 임피던스 매칭과 하드 스위칭 동작으로 인해 효율이 감소하고, 또한 큰 전류 오버슈트로 인하여 배터리 수명에 악영향을 끼치는 문제가 발생한다.

본 논문은 OOK의 기존 문제점들을 완화하기 위하여 Series-Series Inductive Wireless Power Transfer(SS-IPT)의 수신부 측 전파 정류기를 스위치들로 구성된 DSB에 양방향 동작과 단방향 동작으로 모드 변환을 하는 기법을 추가하여 경부하를 포함한 전체적인 범위에서 높은 효율을 달성하고, 단방향 동작에서 전류 오버슈트를 완화하여 배터리 수명에 악영향을 끼치는 문제를 해결하였다 [2].

2. 제안하는 모듈레이션의 동작 및 시스템

제안하는 모듈레이션 구동을 위한 시스템에는 H-bridge, 2개의 커패시터와 2개의 코일, 그리고 전파 정류기로 구성된 일

반적인 SS-IPT가 아닌 전파 정류기의 다이오드가 스위치로 구성된 DSB 방식을 사용하였다. DSB 방식은 양측의 동작을 똑같이 구성하여 모드가 변경되어도 전압 이득이 유지되도록 할 뿐만 아니라, 다이오드의 순방향 전압 강하와 역 누설 전류에 의한 효율 감소 및 스위칭 손실과 도통 손실을 감소시켜 하드 스위칭이 발생하는 온-오프 방식의 모듈레이션에 유리한 구조이다.

2.1 동작 및 시스템 구성

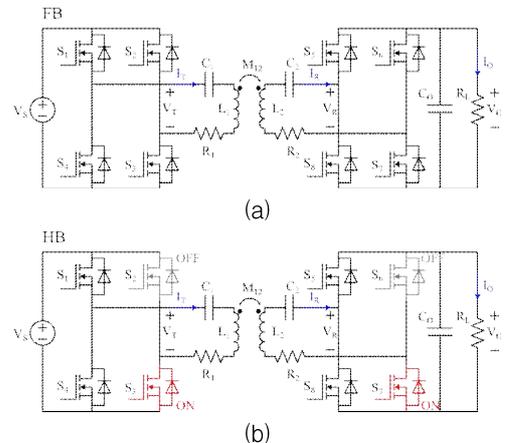


그림 1. 제안하는 시스템의 회로 다이어그램. (a) 풀 브릿지 모드. (b) 하프 브릿지 모드.

Fig. 1. Circuit diagram of proposed system. (a) Full-bridge mode. (b) Half-bridge mode

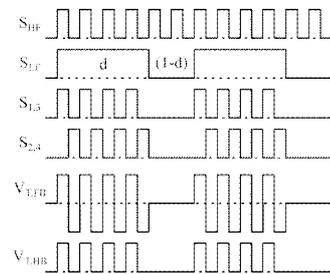


그림 2. 제안하는 시스템의 스위칭 동작. Fig. 2. Switching operation of proposed system.

그림 1은 DSB 형태로 구성된 시스템을 나타낸다. S1-S8은 스위치, C1과 C2는 각 회로의 보상 커패시터, L1과 L2는 코

일, M_{12} 은 상호 인덕턴스, C_O 는 출력 커패시터, 그리고 R_L 은 부하 저항을 나타낸다. 각 H-bridge는 상보적인 동작을 수행하며, 0.5의 고정 듀티비를 가진다. 양측 회로의 소자는 동일하며, 공진 각 주파수 ω 가 동작 각 주파수 ω_s 와 일치하여 회로 내 임피던스는 최소 상태라고 가정한다.

제안하는 시스템은 부하의 크기가 증가로 인한 출력 전압이 상승하는 문제를 해결하여 CV 모드를 달성하기 위해서 DSB에 적용된 듀티비를 통한 DSB의 동작 결정과 모드 변환을 이용한다. 듀티비는 그림 2와 같이 스위칭 신호인 S_{HF} 의 주기보다 긴 온-오프 신호 S_{LF} 에 적용하여 $S_{LF} = 1$ 이면 H-bridge가 정상적으로 동작하고, $S_{LF} = 0$ 이면 모든 스위치가 꺼지는 동작을 통해 부하에 공급되는 전력량을 듀티비로 제한한다. 모드 변환은 그림 1(a)와 같이 DSB가 고정듀티비 0.5로 상보적인 동작을 수행하면 풀 브릿지(FB) 모드로 동작하며, 그림 1(b)와 같이 S2와 S6는 꺼진 상태를 유지하고, S3와 S7은 켜진 상태를 유지한 채 고정듀티비 0.5로 상보적인 동작을 하면 하프 브릿지(HB) 모드로 동작한다. 이해를 돕기 위해 DSB의 양측 동작 중 송신부 측 H-bridge의 풀 브릿지 동작만을 그림 2에 나타내었고, $V_{T,FB}$ 는 FB 모드에서 송신부 측 공진 탱크에 걸리는 전압을, $V_{R,HB}$ 는 HB 모드에서 송신부 측 공진 탱크에 걸리는 전압을 나타내었다.

2.2 CV모드 달성을 위한 방법 분석

제안하는 시스템은 듀티비를 통해 출력 전압(V_O)이 다음과 같이 나타난다.

$$V_O = \frac{T_{on}}{T_s} V_S = d V_S \quad (2)$$

T_{on} 은 S_{LF} 가 1일 때의 시간이고, T_s 는 S_{LF} 의 1주기 시간이다. 모드 변환으로 결정되는 각 측 공진 탱크에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_{T,FB} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_S \\ V_{T,HB} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_S \\ V_{R,FB} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_O \\ V_{R,HB} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_O \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)은 기본 고조파 성분의 RMS값을 나타낸다. 계산의 편의를 위해 G_{inv} 와 G_{rec} 으로 모드 변환에 대한 이득을 나타낸 후, 수신부 측 H-bridge에서 바라본 등가 저항(R_{EL})을 계산 시 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_T = G_{inv} V_S \\ V_R = G_{rec} V_O \end{cases} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{V_T}{\omega M_{12}} = \frac{V_T}{R_{EL}} = \frac{V_O}{d G_{rec} R_L} \quad (5)$$

$$R_{EL} = \frac{V_R}{I_R} = d G_{inv} G_{rec} R_L \quad (7)$$

회로가 최대 효율로 동작할 때 필요한 부하 저항이 $R_{EL,\eta,max}$ 라고 가정한다면, $R_{EL} = R_{EL,\eta,max}$ 로 설정한

후 부하 저항이 증가 시 듀티비와 이득을 조절하여 회로가 항상 최대 효율로 동작하도록 만족시킬 수 있다. 또한, 아래의 수식을 통해 CV 모드도 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V_R}{V_T} &= \frac{I_R R_{EL}}{R_1 I_T + j\omega M_{12} I_R} \\ &= \frac{R_{EL}}{\sqrt{\left(\frac{R_1(R_2 + R_{EL})}{\omega M_{12}}\right)^2 + (\omega M_{12})^2}} \approx \frac{R_{EL}}{\omega M_{12}} \end{aligned} \quad (8)$$

3. 제안하는 시스템의 특징

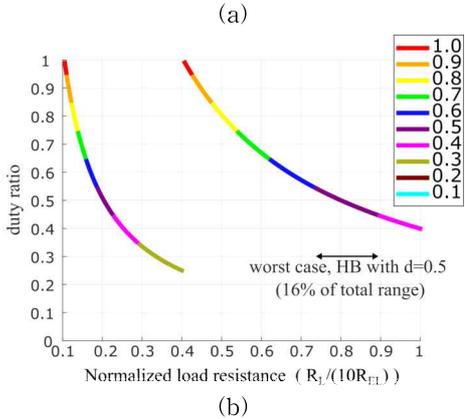
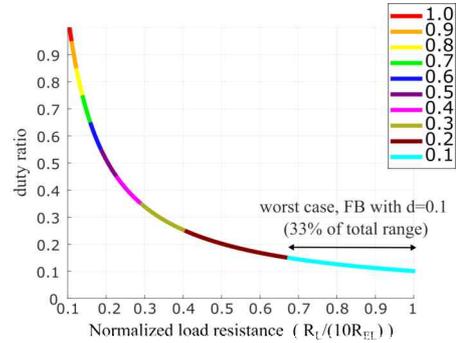


그림 3. 듀티비 변화에 따른 임피던스 매칭 범위의 비교.

(a) 기존 모듈레이션. (b) 제안하는 모듈레이션

Figure 3. Comparison of load matching coverage as duty varies. (a) Existing modulation (OOK). (b) Proposed modulation.

제안하는 시스템의 모듈레이션이 기존 모듈레이션에 비해 임피던스 매칭의 정확도가 높다는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 색상으로 구분된 범위는 $\Delta d = 0.1$ 듀티비 간 임피던스 매칭이 이뤄지는 부하의 범위를 $10R_{EL}$ 에 대해 정규화하여 나타내었다.

기존 모듈레이션의 경우 듀티비가 감소함에 따라 기울기가 감소하여, 최악의 경우 그림 3(a)의 $d=0.1$ 과 같이 전체 부하 범위의 약 33%와 임피던스 매칭이 이뤄지게 된다. 하지만, 제안하는 모듈레이션은 기존 모듈레이션의 $d=0.4$ 지점에서 모드 변환을 통해 $d=1$ 로 초기화되며, 그림 3(b) HB 모드의 $d=0.5$ 과 같이 전체 부하 범위의 약 16%와 임피던스 매칭이 이뤄지므로 더욱 높은 임피던스 매칭률을 통하여 전체적인 효율이 증가한다.

추가로, 모드 변환 시 식(3)과 같이 공진 탱크의 전압 RMS값이 감소하게 될 때 시스템에 흐르는 전류도 감소하게 된다. 그러므로 경부하에서 온-오프 동작 시 발생하는 큰 전류 오버슛 또한 감소하게 되므로 배터리 수명에 악영향을 끼치는 문제를 완화할 수 있다. 또한, 그림 1(b)와 같이 HB 모드 동작일 때 스위치 2개가 항상 꺼진 상태를 유지하므로 스위치 2개의 도통 손실이 감소하고, 전체적인 스위칭 손실이 감소하기 때문에 모드 변환 시 기존보다 효율이 증가하게 된다.

4. 실험 결과

제안하는 시스템을 검증하기 위해 320W의 프로토타입을 구성하였고, 파라미터들은 표 1에 정리하였다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameter

V_O	80 V	P_O	320 W
f_{HF}	100 kHz	f_{LF}	5 kHz
L_1	74.8 μ H	L_2	75.2 μ H
C_1	36 nF	C_2	36 nF
R_1	0.52 ohm	R_2	0.51 ohm
M_{12}	23.2 μ H	C_O	90 μ F

모드 변환은 그림 4(a)와 (b)를 통해 $d=1$ 일 때 각 모드별 동작을 확인할 수 있다. 그림 4(c)와 (d)는 온-오프 동작으로 인해 주기적으로 발생하는 전류 오버슛이 모드 변환으로 감소함을 확인할 수 있다.

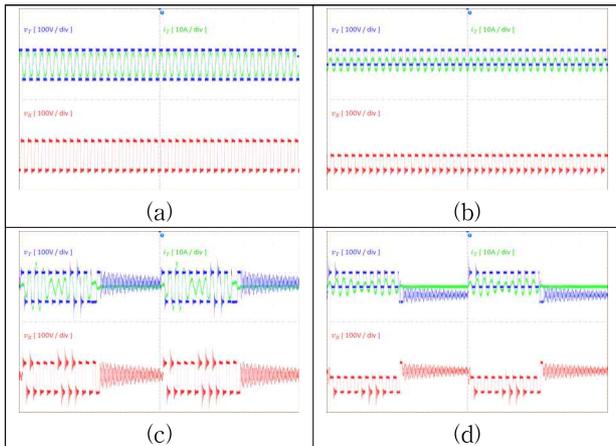


그림 4. 제안하는 시스템의 파형들. (a) 풀 브릿지 모드, $d=1$. (b) 하프 브릿지 모드, $d=1$. (c) 풀 브릿지 모드, $d=0.5$. (d) 하프 브릿지 모드, $d=0.5$.

Figure 4. Waveforms of the proposed system (a) full-bridge mode, $d=1$. (b) half-bridge mode, $d=1$. (c) full-bridge mode, $d=0.5$. (d) half-bridge mode, $d=0.5$.

그림 5는 같은 DSB 시스템에서 기존의 OOK 모듈레이션과 모드 변환이 추가된 제안하는 모듈레이션의 효율을 나타내었다. 그래프에는 각 듀티비에서 최대 효율을 달성하는 부하의 경우에 대해 표시하였다. 부하의 크기가

작을수록 둘의 효율은 크게 차이가 발생하지 않지만, 부하의 크기가 증가하여 제안하는 모듈레이션이 HB 모드로 동작하기 시작하는 80 ohm 구간부터 모드 변환을 통해 효율이 증가한 것을 확인할 수 있다.

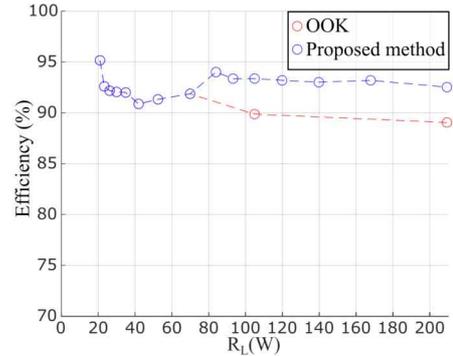


그림 5. 기존 모듈레이션과 제안하는 모듈레이션의 효율 비교

Figure 5. Comparison of the efficiency of existing and proposed modulation.

5. 결론

본 논문은 CV 모드 조건에서 최대 10배 이상의 넓은 부하 범위에서도 높은 효율을 달성하기 위해 모드 변환 기법과 온-오프 변조 기법을 적용한 모듈레이션을 제안한다. 제안하는 모듈레이션은 하프 브릿지 모드 동작으로 인해 기존보다 경부하 조건에서 효율이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 임피던스 매칭에 필요한 듀티비의 간격이 기존 시스템에 비해 작아짐으로써 전체적인 효율이 상승할 것으로 기대된다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] W. Zhong and S. Y. R. Hui, "Maximum Energy Efficiency Operation of Series-Series Resonant Wireless Power Transfer Systems Using On-Off Keying Modulation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 4, pp. 3595-3603, April 2018.
- [2] S. Chen et al., "An Operation Mode Selection Method of Dual-Side Bridge Converters for Efficiency Optimization in Inductive Power Transfer," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 10, pp. 9992-9997, Oct. 2020.