

듀얼 액티브 브릿지 기반 직렬-직렬 보상 무선충전시스템의 제어 방법

류태규, 이민혁, 전유진, 정진혁, 정의훈
 명지대학교 전기공학과

Control Method for Dual Active Bridge Based Series-Series Compensated Wireless Charging System

Taegy Ryu, Minhyuk Lee, Yujin Jeon, Jinhyeok Jeong, and Euihoon Chung
 Department of Electrical Engineering, Myongji University

ABSTRACT

본 논문은 듀얼 액티브 브릿지 기반 직렬-직렬 보상 무선충전시스템의 효율을 개선하기 위한 제어 방식을 제안한다. 기존 무선충전시스템은 도통손실만을 고려하여 무효전력을 최소화하는 방식으로 제어하는 것이 일반적이다. 그러나, 특정 동작 조건에서 하드 스위칭이 발생하는 경우 과도한 스위칭 손실이 발생하여 시스템 효율이 저하되고, 노이즈로 인한 전자파 문제가 야기될 수 있다. 본 논문에서는 고조파를 포함한 회로 모델링을 통해 도통 손실과 스위칭 손실을 종합적으로 고려한 전체 시스템 효율을 개선하는 방식을 제안한다.

1. 서론

무선충전기술은 대부분 전력 인프라에서 전기기기로의 단방향 충전이 주를 이루었지만, 최근 전기기기 간의 양방향 무선충전 기술이 주목받고 있다. 양방향 무선충전을 구현하기 위해서는 1차측과 2차측 모두 능동 스위칭이 가능해야 한다. 대표적인 예시는 듀얼 액티브 브릿지 기반의 무선충전 시스템이며, 이 시스템은 1차측 시비율, 2차측 시비율, 그리고 1차, 2차측 간의 위상 차이를 제어 자유도로 갖는다. 기존 연구에서는 도통손실만을 고려하여 무효전력을 최소화하기 위해 1차, 2차측 간 위상차를 90도로 고정하였다.^[1,2] 다만, 코일 간 정렬 또는 부하 조건에 따라 하드스위칭이 발생할 경우 효율 감소와 전자파 문제가 야기될 수 있다. 기본과 가정을 통한 스위칭 손실의 고려가 연구된 바 있으나, 고조파가 포함되는 경우 적용에 한계가 있다.^[3] 따라서 본 논문에서는 고조파를 포함한 회로 모델링을 통해 듀얼 액티브 브릿지 기반 무선충전시스템의 제어 자유도에 따른 도통 손실과 스위칭 손실을 종합적으로 분석하여 시스템 효율을 최적화하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 500W 프로토타입을 통해 검증된다.

2. 본론

2.1 시스템 구조

본 논문에서 선정한 무선충전시스템의 구조는 그림 1과 같다. 전기기기 간의 양방향 무선충전을 고려하여 1차측과 2차측에 각각 배터리와 인버터가 위치한다. 1차, 2차측 인버터는 각각의

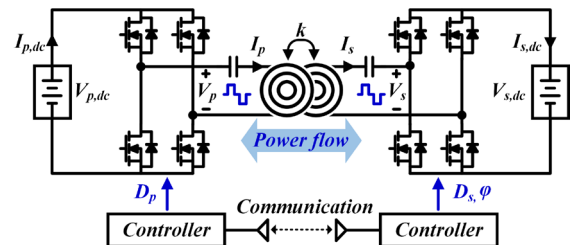


그림 1 듀얼 액티브 브릿지 기반의 양방향 무선충전 시스템
 Fig. 1 Wireless charging based on Dual Active Bridge (DAB)

시비율 (D_p, D_s) 제어를 통해 인버터의 출력 전압(V_p, V_s)의 기본파 크기를 조절할 수 있으며, 두 인버터 간 위상 차(ϕ)를 통해 에너지의 흐름을 제어할 수 있다. 직렬-직렬 보상된 공진기를 통해 에너지가 양방향으로 제어되며, 1차, 2차측의 제어기는 무선 통신을 통해 정보를 교환한다.

2.2 고조파를 포함한 회로 모델링

시비율(D_p, D_s)을 통해 제어되는 1차측 인버터 출력전압(V_p)와 2차측 인버터 출력 전압(V_s)는 아래와 같이 기본파와 고조파들의 합으로 표현된다.

$$V_p = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{p,dc} \sin(n\pi D_p)}{\pi n} \angle 0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{p,n} \quad (1)$$

$$V_s = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{s,dc} \sin(n\pi D_s)}{\pi n} \angle(n\phi) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{s,n} \quad (2)$$

여기서, $V_{p,n}$ 과 $V_{s,n}$ 은 각각 1차, 2차측 인버터 전압의 n 차 고조파를 나타낸다. (1)과 (2)로부터 2차측 배터리로 출력되는 전류를 계산할 수 있다.

$$I_{s,dc} = \frac{8V_{p,dc}}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{M \sin(n\pi D_p) \sin(n\pi D_s) \sin(n\phi)}{n^3 \omega_o \left[M^2 - \left(L_p - \frac{1}{n^2 \omega_o^2 C_p} \right) \left(L_s - \frac{1}{n^2 \omega_o^2 C_s} \right) \right]} \quad (3)$$

임의의 two port network에서 1차, 2차측 고조파 전압에 의해 발생하는 고조파 전류의 식은 기존문헌^[4]에서 일반화되어 있으며, 이를 그림 1의 시스템에 적용하면 다음과 같다.

$$I_p = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} I_{p,n}, \quad I_s = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} I_{s,n}$$

$$\begin{bmatrix} I_{p,n} \\ I_{s,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j(n\omega L_p - 1/(n\omega C_p)) & jn\omega M \\ jn\omega M & j(n\omega L_s - 1/(n\omega C_s)) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{p,n} \\ V_{s,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $I_{p,n}$ 과 $I_{s,n}$ 은 각각 1차측과 2차측 인버터 출력 공진전류의 n 차 고조파 성분을 나타낸다.

2.3 최소 손실 제어 변수 도출

(3)을 통해 동일한 전류를 출력하는 제어 변수(D_p , D_s , ϕ)의 조합이 무수히 많이 존재함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 코일과 인버터의 도통 손실과 인버터의 스위칭 손실 모델이 적용된 MATLAB 알고리즘을 이용하여 최적 해를 도출하였다. 본 논문에서 사용한 알고리즘은 그림 2와 같은 순서로 동작한다.

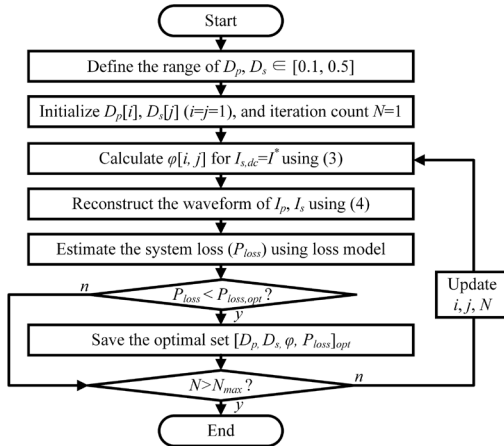


그림 2 최소 손실 제어 변수 도출을 위한 순서도
Fig. 2 Flow chart for finding minimum loss point

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문의 설계 파라미터는 표 1과 같으며, 손실 최적화의 결과는 그림 3에서 나타내었다. 그림에서 가로축은 D_p , 세로축은 D_s 를 나타내며, 목표 출력 전류를 달성하기 위해 계산된 ϕ 를 색상 막대로 나타내었다. 여기서 검은색 점은 기존 논문^[1,2]에서 제안한 최소 도통 손실점, 붉은색 점은 본 논문에서 제안하는 운전점을 나타낸다.

그림 4는 기존 제어 방식과 제안하는 제어 방식을 적용했을 때의 인버터 전압, 전류를 비교한 실험 결과이다. 기존 제어 방식은 무효전력을 최소화하기 위해 위상 차(ϕ)를 90도로 고정하므로 시비율 제어 시 하드스위칭이 발생하지만, 제안하는 동작점에서는 시비율과 위상차의 조절을 통하여 영전압 스위칭(ZVS)이 달성되는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 첫번째 실험 조건 ($V_{p,dc}=100V$, $V_{s,dc}=100V$, $I_{s,dc}=5A$)에서는 효율 92.52%로 기존 방식 대비 0.12% 상승, 두번째 실험조건 ($V_{p,dc}=100V$, $V_{s,dc}=75V$, $I_{s,dc}=5A$)에서는 효율 92.34%로 기존 방식 대비 0.20% 상승함을 확인하였다.

표 1 설계 파라미터

Table 1 Design parameters

| 공진기 파라미터 | 값[단위] | 인버터 파라미터 | 값[단위] |
|-------------|---------------|----------------------|-----------|
| $L_p = L_s$ | 54[μF] | $V_{p,dc}, V_{s,dc}$ | 50~100[V] |
| $C_p = C_s$ | 64[nF] | $I_{p,dc}, I_{s,dc}$ | 0~5[A] |
| k | 0.3~0.5 | f_s | 85 [kHz] |

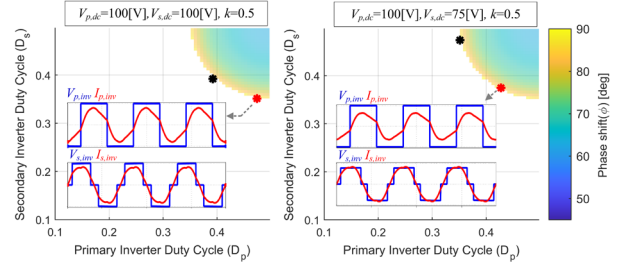


그림 3 운전 조건에 따른 최적 운전점 및 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Optimal operating point and simulation results

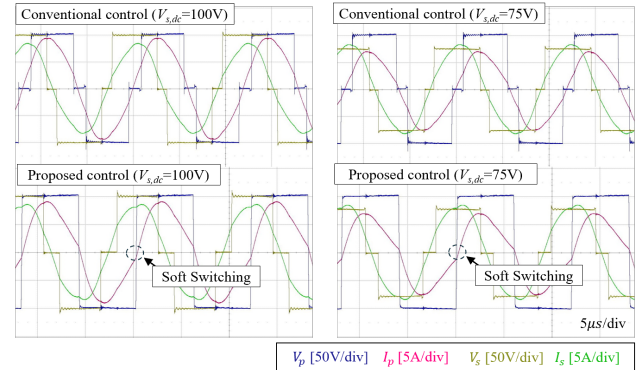


그림 4 운전 조건에 따른 1, 2차측 인버터의 실험 파형
Fig. 4 Experimental results of primary and secondary inverters

4. 결론

본 논문에서는 듀얼 액티브 브릿지 기반 직렬-직렬 보상 무선충전 시스템의 효율을 개선하기 위해 세 가지 제어 변수를 최적화하는 방식을 제안하였다. 이를 위해 세 가지 제어 변수에 따른 인버터의 순시 전류를 계산하였으며 이를 손실 최적화 알고리즘에 적용함으로써 도통 손실과 스위칭 손실을 포함하는 최적 운전점을 도출하였다. 실험적 검증을 위하여 양방향 무선충전이 가능한 500W급의 프로토타입을 설계하였으며, 무효전력을 최소화하는 기존 방식과의 비교를 통해 제안하는 제어 방식의 효율 개선 효과를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] T. Diekhans et al, "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load," in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6320-6328, Nov. 2015
- [2] 성민재, 2020, 상호 인덕턴스 추정을 통한 양단 제어 무선 전력 전송 시스템의 구동 방법, 서울대학교 석사학위 논문
- [3] Y. Jiang et al, "An optimized frequency and phase shift control strategy for constant current charging and zero voltage switching operation in series-series compensated wireless power transmission," in *Proc. IEEE ECCE*, 2017, pp. 961-966
- [4] J. Lee et al, "Design and Analysis of Resonant Network for Dual Active Bridge Converter," in *IEEE JESTPE*, vol. 12, no. 4, pp. 3784-3799, Aug. 2024