

자기유도방식 무선전력전송 시스템의 수신패드 측 전력변환회로 구성에 따른 손실 분석

안상준, 김민국, 김민중, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Loss Analysis of Inductive Power Transfer System according to Secondary Side Power Conversion System Configuration

Sangjoon Ann, Min-Kook Kim, Min-Jung Kim, and Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 무선전력전송 시스템의 수신패드 측 전력변환회로 구성 방식에 따른 손실을 분석한다. 수신패드 측 전력변환회로를 DC-DC 컨버터로 구성한 구조와 bridgeless active rectifier (BAR)로 구성된 구조에 대해서 손실을 비교 분석한다. 수동소자에서의 손실은 수식적으로 계산하고, 전력용 반도체에서의 손실은 PSIM thermal module을 이용하여 분석한다.

1. 서론

전기자동차용 배터리 무선충전을 위한 자기유도방식의 무선전력전송 시스템은 역률 제어를 위한 power factor correction (PFC) 컨버터와 무선전력전송을 위한 inductive power transfer (IPT) 컨버터를 포함한다. IPT 컨버터의 정류회로와 배터리 사이의 전력변환회로 구성 방식은 크게 DC-DC 컨버터를 사용하는 방식과 bridgeless active rectifier (BAR)를 사용하는 방식이 있다^[1-2]. 기존의 논문들은 두 구조 중 하나의 구조를 택하여 시스템을 구성하였지만 시스템 구성에 앞서 두 구조에 대한 성능 비교는 하지 않았다. 수신패드 측 회로 구조의 최적 설계를 위해서는 두 구조에 대한 손실 분석이 필요하다.

본 논문에서는 3.3 [kW] IPT 시스템에서 수신패드 측 회로를 DC-DC 컨버터로 구성한 방식과 BAR로 구성한 방식에 대해서 배터리의 충전 프로파일 내 4개의 충전 조건에 대해 손실을 분석한다. 수동소자에서 발생하는 손실은 수식적 계산을 이용해 도출하고 전력용 반도체 소자에서 발생하는 손실은 PSIM thermal module을 이용해 손실을 분석한다.

2. 수신패드 측 회로 구성 방식에 따른 비교

자기유도방식의 무선전력전송 시스템에서 IPT 컨버터의 교류 출력전압 ($V_{o,ac}$)은 송신패드와 수신패드의 결합계수에 비례하여 변한다. 배터리 충전을 위해서는 결합계수에 따라 변하는 IPT 컨버터의 출력전압을 배터리 충전 프로파일에 맞추어 제어해야 한다. 본 절에서는 IPT 컨버터 출력전압을 제어하기 위한 수신패드 측 전력변환회로의 두 가지 구성 방식에 따른 특징을 비교한다.

그림 1은 수신패드 측 전력변환회로를 cascade buck-boost 컨버터로 구성한 것이다. 이 구조는 buck과 boost 스위치의 duty를 제어함으로써 승강압제어가 모두 가능하다는 장점이 있

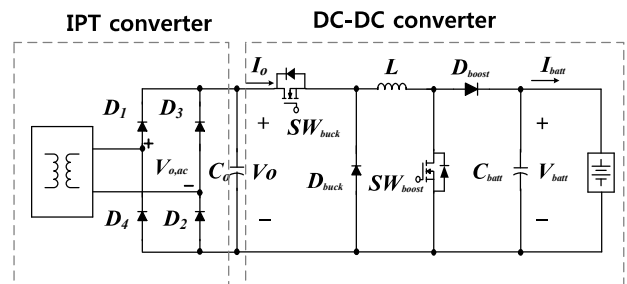


그림 1 DC-DC 컨버터를 사용한 수신패드 측 회로 구성
Fig. 1 Circuit configuration of the secondary side with DC-DC converter.

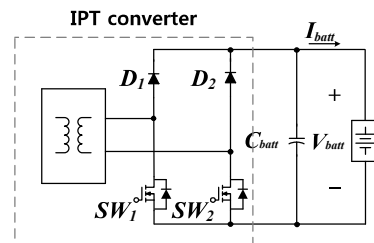


그림 2 BAR을 사용한 수신패드 측 회로 구성
Fig. 2 Circuit configuration of secondary side with BAR.

다. 따라서 넓은 범위의 IPT 컨버터의 출력전압을 배터리 충전 프로파일에 맞게 승압 또는 강압시킬 수 있다.

그림 2는 IPT 컨버터의 정류기를 BAR로 구성한 회로이다. 이 구조는 수신패드와 스위치, 다이오드가 boost 형태로 연결되어 승압만 가능하고 이는 IPT 컨버터의 출력전압범위가 제한되는 단점을 갖는다. 하지만 DC-DC 컨버터를 포함한 회로에 비해 소자 수가 감소하므로 전기자동차 내부에 탑재되는 수신패드 측 전력변환회로의 경량화가 가능하다는 장점이 있다.

3. 시스템 사양 및 손실 분석

손실 분석에 사용된 전기자동차용 무선충전시스템은 수신패드 측 두 가지 회로는 모두 정격출력 3.3 [kW]로 설계하였으며 $V_{o,ac} < V_{batt}$ 일 때 4개의 충전 조건에서의 손실 분석을 수행하였다. 출력부하는 240-410 [V]의 충전 전압 범위를 갖는 전기자동차용 배터리이며 충전 프로파일은 그림 3과 같다.

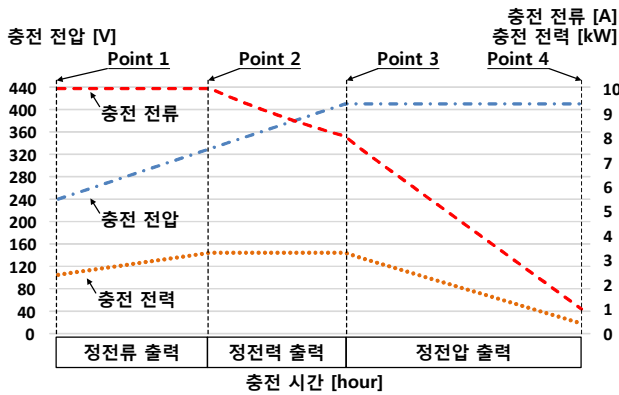


그림 3 전기자동차용 배터리 충전 프로파일
Fig. 3 Charging profile of battery for electric vehicles.

배터리의 최대 충전 전류는 10 [A], 최소 충전 전류는 1 [A]로 가정하고 충전 구간은 충전 시간에 따라 정전류, 정전력, 정전압 충전으로 나뉜다^[1]. 손실 계산은 충전이 시작되는 지점과 충전 모드가 변하는 지점, 충전이 끝나는 지점을 기준으로 총 4개의 조건으로 구분하여 계산하고 각각의 조건에 대해서 수신펠드 측 회로 구성에 따른 손실을 분석한다. 표 1은 4개의 손실 계산 조건에서 충전 전압, 충전 전류 및 출력전력을 나타내고 표 2는 손실 분석에 사용된 소자를 나타낸다.

수동소자에서 발생하는 손실 중 인덕터에서 발생하는 손실은 철손 및 동손으로 나눌 수 있다. 인덕터의 철손은 자속의 변화와 스위칭주파수, 코어의 유효 부피를 이용하여 계산한다. 인덕터의 동손은 권선 전체의 직렬 저항과 인덕터에 흐르는 전류의 rms 값을 이용하여 구한다^[3]. 수동소자 손실 중 커패시터 내부의 직렬 등가 저항 equivalent series resistance (ESR)에 의한 손실은 데이터시트로 제공되는 dissipation factor와 커패시터에 흐르는 전류의 rms 값을 이용해 계산한다. 전력용 반도체 소자에서 나타나는 손실은 크게 도통손실 스위칭손실로 나눌 수 있고, 손실 계산은 PSIM의 Thermal module 시뮬레이션을 통해 실시하였다.

표 1 손실 계산 조건
Table 1 Conditions for loss calculation.

No.	손실 계산 지점	배터리 전압	출력 전류	출력 전력
1	시스템 구동 시	240 [V]	10 [A]	2400 [W]
2	정전류 충전과 정전력 충전의 경계	330 [V]	10 [A]	3300 [W]
3	정전력 충전과 정전압 충전의 경계	410 [V]	8.05 [A]	3300 [W]
4	충전 종료 시	410 [V]	1 [A]	410 [W]

표 2 손실 분석에 사용된 소자
Table 2 Devices used for loss analysis.

Component	Company	Model
IPT 컨버터 정류기, BAR diode	Microsemi	APT15DQ100BCT
DC-DC 컨버터 diode	Infineon	IDW30G65C5
DC-DC 컨버터, BAR MOSFET	Infineon	IPW60R075CP
Inductor core	Changsung	CH610060
IPT 컨버터 capacitor	Samyoung	TDA series 450[V], 470[μF]
DC-DC 컨버터, BAR capacitor	Samyoung	TDA series 250[V], 680[μF]

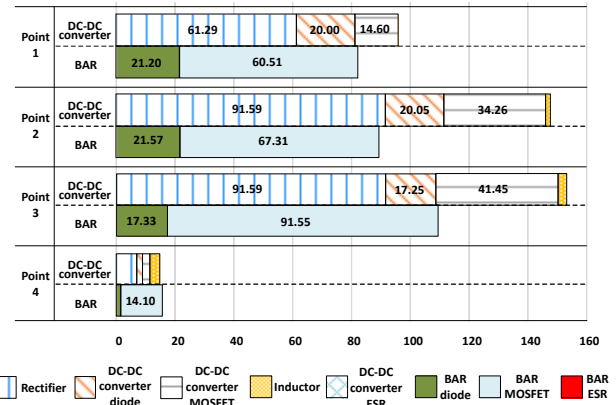


그림 4 손실 계산 조건 1-4에서 수신펠드 측 회로 구성에 따른 손실 분석

Fig. 4 Loss analysis according to secondary side circuit configurations at condition 1-4.

그림 4는 손실 분석 결과를 나타낸다. DC-DC 컨버터를 사용한 구조에서는 IPT 컨버터의 정류 다이오드에서 발생하는 도통손실이 가장 크고, BAR을 사용한 구조에서는 BAR의 MOSFET에서 발생하는 도통손실이 가장 큰 것을 확인하였다. BAR을 사용한 구조가 DC-DC 컨버터를 사용한 구조에 비해 조건 1에서는 14.45 [W], 조건 2에서는 58.63 [W], 조건 3에서는 44.27 [W]만큼 손실이 적게 나타나고, 경부하인 조건 4에서는 반대로 DC-DC 컨버터를 사용한 구조에서 0.74 [W]만큼 더 적은 손실이 나타나는 것을 확인하였다. 구조적 특징 비교 및 손실 분석 결과, BAR을 사용한 구성 방식은 DC-DC 컨버터를 사용한 경우에 비해 회로 경량화가 가능하고 시스템 효율도 높일 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

본 논문에서는 자기유도방식의 무선전력전송 시스템에서 수신펠드 측 회로를 DC-DC 컨버터를 사용한 구조와 BAR을 사용한 구조로 나누어 각각의 특징을 비교하고 4개의 배터리 충전 조건에서 각각의 구조에서 발생하는 손실을 분석하였다. 구조적 특징 비교와 손실 분석 결과, 수신펠드 측 회로 구성 방식 중 BAR을 사용한 구조가 회로 경량화 및 손실 측면에서 유리함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Dong-Gyun Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Ph.D Thesis paper, 2016.
- [2] Kerim Colak, Erdem Asa, Mariusz Bojarski, Dariusz Czarkowski, "A Novel Phase-Shift Control of Semibridgeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6288-6297, Nov., 2015.
- [3] C. W. T. McLyman, "Transformer and inductor design handbook", 3rd Ed, Marcel Dekker Inc. New york, 2008.