

전기자동차 충전기용 양방향 절연형 DC-DC 컨버터 효율 개선 제어기법 비교 분석

안효민, 조용기, 우동균, 이병국[†]
 성균관대학교 정보통신대학

Comparison and Analysis of Control Strategies to Improve Bidirectional Isolated Charger Efficiency for Electric Vehicles

Hyo Min Ahn, Yong Ki Cho, Dong Gyun Woo, and Byoung Kuk Lee[†]
 College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 DAB(Dual Active Bridge)로 구성된 양방향 절연형 DC DC 컨버터의 제어 기법인 SPS(Single Phase Shift)와 DPS(Dual Phase Shift)를 양방향 OBC(On Board Charger)의 충전 및 방전모드에 적용한다. 그리고 각 모드의 입출력 조건에 따라 전력 반도체 소자에서 발생하는 손실을 PSIM 시뮬레이션과 수학적 분석을 통해 예측하고, 이를 비교 분석한다.

1. 서론

최근 화석연료 사용증가로 인한 환경문제와 에너지 고갈 문제를 해결하기 위해 전기자동차에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 단순히 배터리 충전기능 (Grid to Vehicle, G2V) 뿐만 아니라 V2G (Vehicle to Grid) 기능과 V2H (Vehicle to Home) 기능까지 수행함으로써 무정전 전원장치로 동작할 수 있는 양방향 OBC (On Board Charger)가 주목받고 있다. 그림 1과 같이 DAB로 구성된 절연형 DC DC 컨버터는 양방향 충전기에 적용이 가능하고 소프트 스위칭 동작을 쉽게 적용할 수 있으며 높은 파워 밀도와 소자의 스트레스가 작다는 장점이 있다. 이 토폴로지에 SPS 제어기법을 적용할 경우, 넓은 범위의 출력 파워를 갖고, 쉽게 적용 및 제어가 가능하나 순환전류가 증가하기 때문에 소자에서의 손실이 크게 발생한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 DPS 제어기법이 제안되었다.^{[1][2]}

본 논문에서는 양방향 OBC의 사양과 배터리 충전 프로파일을 고려하여 SPS 제어기법과 DPS 제어기법을 그림 1의 양방향 충전기에 적용하였다. 또한 수학적 모델과 PSIM 시뮬레이션 내의 Thermal module을 사용하여 충전모드와 방전모드일 때 스위치 소자에서 발생하는 손실을 비교 및 분석하였다.

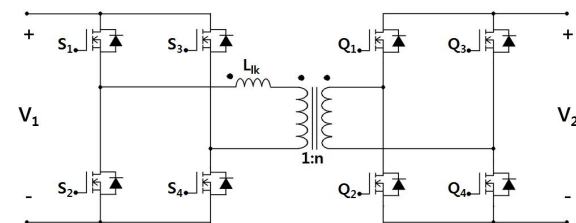


그림 1. DAB 절연형 DC-DC 컨버터 토폴로지.
 Fig. 1. DAB isolated DC-DC converter topology.

2. SPS와 DPS 제어기법 비교 및 분석

2.1. 기본 이론

그림 2의 스위칭 파형에서 1차 측과 2차 측간의 위상차는 D_1 , $S_{1,2}$ 와 $S_{3,4}$ 그리고 $Q_{1,2}$ 와 $Q_{3,4}$ 간의 위상차를 D_2 라 한다. SPS는 D_1 으로만, DPS는 D_1 과 D_2 를 이용하여 제어를 한다. DPS 적용 시 D_2 구간에서 그림 1의 leakage 인덕터 (L_{lk})의 전압이 0인 구간이 발생하므로, 소자의 손실을 야기하는 1차 측 전류의 크기와 출력 전류의 맥동이 감소하게 된다.^{[2][3]}

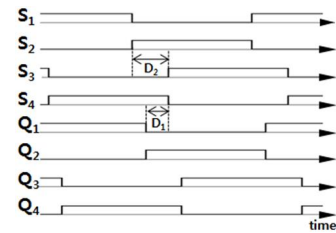


그림 2. DPS 스위칭 파형.
 Fig. 2. DPS switching signal.

2.2. 수학적 모델

D_1 과 D_2 의 값에 따른 출력전압 (V_2)과 도통 손실을 야기하는 1차 측 전류의 RMS값 (I_p)은 식 (1)과 (2)로 나타낸다.^[4]

$$V_2 = \frac{nV_1R}{2f_sL} D_1(1 - D_2 - 0.5D_1) \quad (1)$$

$$I_p = \frac{\sqrt{3}nV_2}{12f_sL} \sqrt{(k-1)^2(1+2D_2)(1-D_2)^2 - 4kD_1^2(3D_2 + D_1 - 3)} \quad (2)$$

$0 \leq D_1 \leq D_2 \leq 1$, $n = N_1/N_2$, $k = V_1/nV_2$, f_s : 스위칭주파수
 V_1 : 입력전압, V_2 : 출력전압, R : 출력저항, L : 누설인덕턴스

D_2 가 증가하면 동일한 출력 전압을 내기 위해 D_1 이 증가한다. 또한 D_1 이 증가하면 전류가 증가하고 D_2 가 증가하면 전류는 감소한다. 그림 3과 4는 D_1 , D_2 값에 따라 고정부하에서의 출력 전압과 동일출력전압에서의 1차 측 전류를 나타낸 그래프이다.

2.3. 시뮬레이션 결과

표 1은 시뮬레이션 설계 사양으로 실제 OBC의 입출력 사양, 리튬이온 배터리 충전 프로파일^[5], MOSFET STW45NM50의 Datasheet를 고려하였으며, 동일한 토폴로지에서 충전모드와 방전모드로 나누어 시뮬레이션을 진행하였다.

표 1 시뮬레이션 사양
Table 1 Simulation specification

	충전모드	방전모드
입력전압	380V	270~420V
출력전압	270~420V	380V
출력파워	1.8~3.3kW	3.3kW
스위칭 주파수	30kHz	
MOSFET	550V, 45A, 0.08Ω	
변압기 권선비	1:1.5	
누설 인덕턴스	40μH	

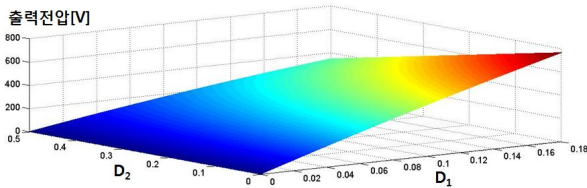


그림 3. 고정부하에서 D_1 , D_2 에 따른 출력전압.
Fig. 3. Output voltage by D_1 , D_2 in fixed load.

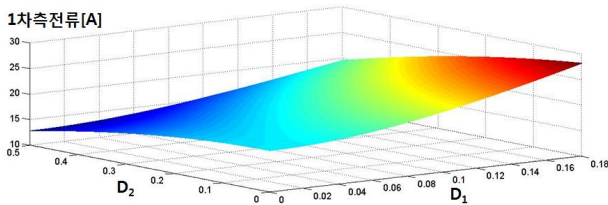


그림 4. 동일출력전압에서 D_1 , D_2 에 따른 I_{rms} .
Fig. 4. I_{rms} by D_1 , D_2 in fixed output voltage.

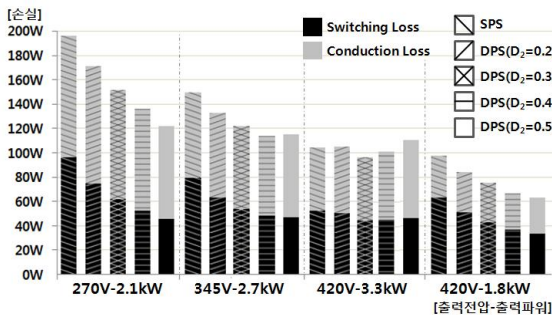


그림 5. 충전모드 - 도통 손실, 스위칭 손실.
Fig. 5. Conduction and switching loss of charge mode.

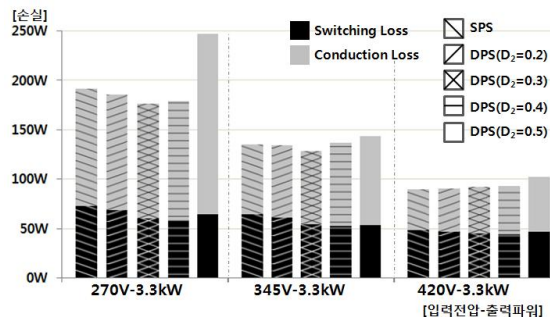


그림 6. 방전모드 - 도통 손실, 스위칭 손실.
Fig. 6. Conduction and switching loss of discharge mode.

그림 5와 6은 각각 충전 및 방전모드에서 SPS와 DPS의 D_2 값에 따라 MOSFET에서 발생하는 스위칭 손실과 도통 손실을 나타낸다. 충전모드는 동일한 입력전압에서의 정전류충전

(270V 2.1kW ~ 420V 3.3kW)과 정전압충전 (420V 1.8kW)구간으로 나누었으며, 방전모드는 동일한 출력을 갖도록 하였다. 기본적으로 충전 및 방전모드의 1차 측 스위치에서는 ZVS (Zero Voltage Switching) Turn on 동작, 2차 측에서는 ZVS Turn off 동작을 하며 이를 바탕으로 스위칭 손실에 대해 분석하면, DPS에서 전류의 최대값은 D_2 로 인하여 SPS보다 작기 때문에 스위칭 손실이 적게 발생된다.

식 (1)과 (2), 그림 3과 4를 이용하여 전류에 의한 도통 손실을 분석하면 충전모드일 경우, 경부하일수록 D_2 의 증가에 따라 동일한 출력을 내기 위한 D_1 의 증가량이 작아진다. 따라서 경부하인 경우 D_2 값이 클수록 전류에 의한 도통 손실이 줄어든다. 반면, 중부하인 경우 경부하에 비해 D_2 값의 증가에 따른 D_1 의 증가량이 상대적으로 커지게 된다. 따라서 SPS와 DPS의 도통 손실 차이가 경부하일 때보다 상대적으로 적게 발생되거나, SPS에서의 도통 손실이 적게 발생된다. 수학적 분석을 통한 부하에 따른 도통 손실 변화 양상은 충전모드에서 경부하 (420V 1.8kW)와 중부하 (420V 3.3kW)인 경우의 시뮬레이션 결과와 비슷한 양상을 가진다.

충전모드 시, D_2 의 값이 0.3과 0.4인 경우에 모든 구간에서, D_2 의 값이 0.2와 0.5인 경우에는 '420V 3.3kW'조건을 제외한 구간에서 DPS의 손실이 적게 발생된다. 방전모드의 경우, DPS의 스위칭 손실이 전 구간에서 적게 발생되나 추가적으로 도통 손실을 고려했을 때 '420V 3.3kW'인 조건에서 DPS의 총 손실은 SPS보다 크게 나타난다. 따라서 표 1의 사양인 경우, 충전모드 시 DPS가 적합하고 방전모드인 경우 입력전압이 270V와 345V일 때 DPS, 420V에서는 SPS가 적합하다.

3. 결론

본 논문에서는 DAB로 구성된 양방향 OBC에 절연형 DC DC 컨버터의 충전기 제어기법인 SPS와 DPS를 배터리 충전 및 방전모드에 적용하고 스위치에서 발생하는 손실을 시뮬레이션과 수학적 접근을 통하여 비교 분석하였다. 스위치의 손실이 최소로 발생하는 D_2 값은 부하조건에 따라 다르다. 따라서 스위치의 손실을 최소로 하기 위해서는 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 적절한 D_2 값을 선정하는 것이 필요하다.

참고 문헌

- [1] 원재혁, 남광희 "PHEV용 단상 양방향 on board 충전기," 전력전자학회 2011년도 학술대회 논문집, pp.449-450, 2011
- [2] MyoungHo Kim, Martin Rosekeit, Seung Ki Sul, Rik W. A. A. De Doncker, "A Dual Phase Shift Control Strategy for Dual Active Bridge DC DC Converter in Wide Voltage Range," 8th International Conference on Power Electronics, pp 364-371, 2011
- [3] Hua Bai, Ziling Nie, Chris Chunting Mi, "Experimental Comparison of Traditional Phase Shift, and Model Based Control of Isolated Bidirectional DC DC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 25, NO.6, June. 2010
- [4] Biao Zhao, "Efficiency Characterization and Optimization of Isolated Bidirectional DC DC Converter Based on Dual Phase Shift Control for DC Distribution Application," IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 28, NO.4, April. 2013
- [5] Sandeep Dheameja, Electric vehicle battery systems, Boston, Newnes, 2002