

출력 대전류 특성을 갖는 PSFB 컨버터 2차측 구조 비교 분석

오준택, 김철민, 김종수†
 대진대학교 전기공학과

Comparison and Analysis of Secondary-side Structures in PSFB Converter with Huge Output Current

Jun-Taek Oh, Chul-Min Kim, Jong-Soo Kim†
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

본 논문에서는 출력 대 전류 특성을 갖는 PSFB Converter에 적합한 2차측 구조를 비교 분석한다. 비교를 위해 세 가지 구조(Center-Tapped, Current-Doubler, Two-Transformer)를 각각 적용한 전기자동차(Electric Vehicles, EV)용 2.5kW급 Wide Input LDC를 설계하였으며 부하 조건에 따른 각 구조별 효율 및 자성 소자 크기를 비교한다. 이를 통해 주로 사용되는 부하 수준에 따라 적합한 2차측 구조를 선정하였으며 이를 수식 및 시뮬레이션(PSIM)을 통해 검증하였다.

1. 서 론

LDC(Low Voltage DC-DC Converter)는 EV의 고전압 배터리로부터 차량 내 12V 전장 부하에 전력 전달 및 12V 보조 배터리를 충전하는 DC-DC Converter이다. 따라서 LDC의 입력 전압은 고전압 배터리의 출력 전압과 같으며 2차측 출력 전류가 매우 큰 특징을 갖는다. 이러한 특징을 갖는 LDC에 일반적으로 많이 사용되는 토폴로지는 추가 회로 없이 Soft Switching이 가능한 위상천이 풀브리지 컨버터(Phase Shift Full Bridge Converter, PSFB Converter)이다. PSFB Converter의 2차측 구조는 다양한 형태로 구성될 수 있으며 통상 적용되는 2차측 구조는 Center-Tapped, Current-Doubler 그리고 Two-Transformer 방식이 있다.^[1]

최근 전기자동차에 사용되는 고전압 배터리가 400V급, 800V급 두 종류로 나뉘므로 이에 맞는 사양을 갖춘 각기 다른 LDC 개발이 요구된다는 설계의 난점이 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 모든 전기자동차에 탑재 가능한 넓은 입력 전압 범위를 갖는 LDC 개발이 이루어지고 있는 추세이다.

따라서, 본 논문에서는 입력 전압의 범위가 288V~830V로 매우 넓은 2.5kW급 LDC에 PSFB Converter를 사용할 때 2차측 구조에 적용 가능한 방식들을 효율 및 자성 소자 크기 측면에서 비교하고 주로 사용되는 부하 수준에 따라 가장 적합한 2차측 구조를 확인하였다.

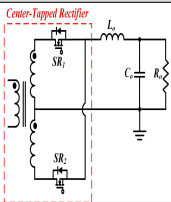
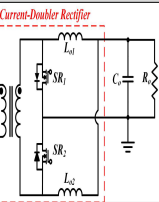
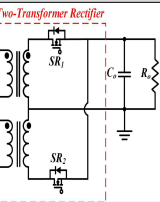
2. 본 론

2.1 토폴로지 고찰

위상천이 풀브리지 (Phase Shift Full Bridge, PSFB)는 추가 회로 없이 스위치 기생 커패시터와 변압기의 누설 인덕터 및 출력 필터 인덕터 간의 공진으로 인해 Soft Switching을 통한

표 1 Rectifier 구조 비교

Table 1 Comparison of Rectifier Structure

Rectifier Circuit	Center-Tapped	Current-Doubler	Two-Transformer
Structure			
Number of magnetics	1 transformer	1 transformer	2 transformer
Transformer	1 inductor	2 inductor	0 inductor
I_{sec}	171.2 [A]	93.5 [A]	171.2 [A]

효율 향상을 기대할 수 있고 고주파 스위칭 동작이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 Lagging Leg의 경우 출력 필터 인덕터가 공진에 참여하지 않아 경부하 조건에서 Soft Switching의 동작이 어렵다는 단점이 존재한다. 이러한 PSFB Converter는 2차측 구조를 다양하게 구성할 수 있으며 표1과 같이 사용되는 자성소자의 개수, 2차측 전류 특성 등의 차이를 갖는다.

Center-Tapped 구조는 1개의 출력 필터 인덕터만을 사용하며 인덕터의 유효주파수가 스위칭 주파수의 2배이기 때문에 크기가 작은 인덕터를 사용할 수 있다는 특징이 있다. Current-Doubler 구조는 2배의 인덕턴스를 갖는 출력 필터 인덕터를 2개 사용하기 때문에 2차측에 흐르는 전류가 Center-Tapped 구조보다 절반이라는 장점이 있고, Center-Tapped 구조와 비교하였을 때 변압기 턴 비가 절반이며, 2차측 전류 정격이 작기 때문에 변압기의 단면적이 작은 특징을 갖는다. 그리고 Two-Transformer 구조는 두 개의 변압기가 반주기마다 변압기와 출력 필터 인덕터 역할을 반복하기 때문에 출력 필터 인덕터가 필요하지 않아 전력 밀도 및 효율 측면에서 매우 우수하다는 장점이 있는 반면에 두 변압기 각각 1차측 와이어와 2차측 와이어가 필요하기 때문에 변압기의 크기와 전력 손실이 증가하게 된다는 특징을 갖는다.

이렇게 2차측의 구조에 따라 여러 장단점이 존재하므로 시스템의 전력밀도와 손실 등을 고려하여 2차측 구조를 선정해야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 표2의 설계 사양을 고려하여 PSFB Converter의 세 종류의 2차측 구조에 대한 설계를 진행하였으며 그림1은 각 구조에 따른 자성체 크기를 나타낸다.

표 2 2.5kW급 LDC 설계 Parameters
Table 2 2.5kW LDC Design Parameters

Parameter	Specification	Parameter	Specification
Input Maximum Voltage	830 [V]	Output Maximum Voltage	15.3 [V]
Input Minimum Voltage	288 [V]	Output Minimum Voltage	12.8 [V]
Output Power	2.5 [kW]	Frequency	200 [kHz]
Primary Switch	SCT4062KW AHRTL	Secondary Switch	AUIRFS84 09-7TRL
Switch Output Capacitance	45 [pF]	Core	PC95

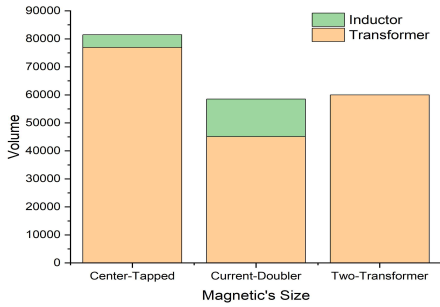


그림 1 각 구조의 자성소자 크기 비교
Fig. 1 Comparison of the magnetic's size of each structure

2.2 Wide Input 2.5kW급 LDC 설계

2차측 정류단의 구조마다 표2와 같은 사양으로 30[%] 경부하 조건에서도 Lagging Leg의 Soft Switching이 가능하도록 고려하여 동일한 조건으로 각각 설계했다. 또한 2차측의 경우도 손실을 줄이기 위해 SR 스위치로 고려하였다. 이때 손실을 명확히 비교하기 위해 각 구조 모두 1차측 스위치는 Rds(on) 이 62[mΩ]인 ROHM(社)의 SCT4062KWAHRTL Model, 2차측 SR 스위치는 Rds(on) 이 0.69[mΩ]인 Infineon(社)의 AUIRFS8409-7TRL Model, 그리고 PC95 재질의 Core를 사용한다고 가정했다.

위 세 가지 구조 모두 설계 Flow는 동일하다. 하지만 사용되는 자성소자의 개수 및 크기가 서로 다르기 때문에 자성소자의 손실 분석이 효율을 비교하기 위해 가장 중요한 요소가 된다. 식(1)과 식(2)를 사용하여 자성소자의 손실을 계산하고, 식(3)과 식(4)를 사용하여 스위칭 손실을 구하며 최종적으로 식(5)을 사용하여 토폴로지의 전체 손실을 계산하고 효율을 비교한다.

$$P_{TR, Core} = P_{cv} \times V_e \quad (1)$$

$$P_{TR, Wire} = I_{rms}^2 \times N \times \frac{\rho \times MLT}{\pi r^2 \times N_{nos}} \quad (2)$$

$$P_{SW} = P_{sw, con} + P_{sw, diode} + P_{sw, turnoff} + P_{sw, driving} \quad (3)$$

$$P_{SR} = P_{sr, con} + P_{sr, switching} + P_{sr, driving} \quad (4)$$

$$P_{Total} = P_{SW} + P_{SR} + P_{TR} + P_{Lo} \quad (5)$$

2.2.1 시뮬레이션 결과

전기자동차의 전장 부하는 출력 전류 20[A] 이상의 부하 영역에서 동작하므로 30[%]~100[%] 부하 조건에서 효율을 비교했으며, 이때 Battery Profile의 CV(Constant Voltage)-Mode로 진행했다. Center-Tapped 구조, Current-Doubler 구조, Two-Transformer 구조 순서로 변압기 1차측에 흐르는 RMS

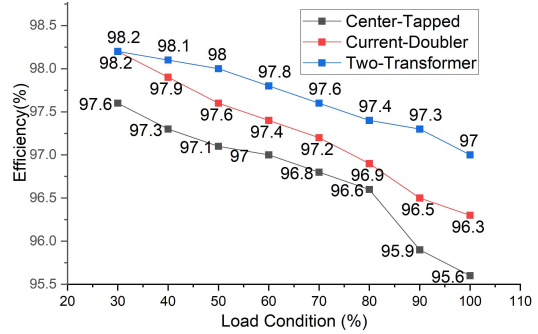


그림 2 각 구조의 효율 비교(CV 모드)
Fig. 2 Comparison of each structure's efficiency(CV Mode)

전류는 10.7[A], 10.6[A], 11.6[A] 이고, 2차측에 흐르는 RMS 전류는 163.4[A], 81.2[A], 163.5[A]이다. 이를 바탕으로 손실을 계산했고, 그림2는 계산한 손실을 기반으로 각 구조마다 효율을 나타냈다. 이때 30[%] 부하 조건에서 효율이 각각 97.6[%], 98.2[%], 98.2[%]이고, 100[%] 부하 조건에서 효율은 각각 95.6[%], 96.3[%], 97[%]이다. Center-Tapped 구조의 경우 Current-Doubler 구조에 비해 출력 필터 인덕터가 1개 사용됨에도 불구하고 변압기 턴 비가 다른 두 가지 구조에 비해 가장 크기 때문에 고려한 부하 영역에서 효율이 가장 낮게 나왔다. 또한 30[%] 부하 조건에서는 Current-Doubler 구조와 Two-Transformer 구조의 효율이 동일하지만 Two-Transformer 구조는 출력 필터 인덕터가 존재하지 않고 코어 손실이 작아 이후 부하 조건에서는 Two-Transformer 구조의 효율이 지속적으로 가장 우수한 것을 확인했다.

3. 결 론

본 논문에서는 PSFB 토폴로지의 2차측 구조 간의 전체 토폴로지 효율 및 자성체 크기 비교를 위해 2.5kW급 Wide Input LDC 사양으로 설계하고, 시뮬레이션(PSIM)을 통해 30[%]~100[%] 부하 영역에서의 결과값을 기반으로 수식적으로 효율을 각각 분석하였다. 결과적으로 효율 측면에서 중부하 영역에서 주로 운전하는 시스템의 경우 Current-Doubler 구조와 Two-Transformer 구조 모두 효율이 97[%] 이상이므로 둘 다 적용이 가능해 보인다. 다만, 전력밀도 향상을 위해 자성소자의 크기를 함께 고려한다면 출력 필터 인덕터가 없어 사용되는 자성소자의 크기가 가장 작은 Two-Transformer 구조의 적용이 가장 적합하다고 사료된다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(K_G012002434801)

참 고 문 헌

- [1] D. -W. Lee, H. -S. Youn and J. -K. Kim, "Development of Phase-Shift Full-Bridge Converter With Integrated Winding Planar Two-Transformer for LDC," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 1, pp. 1215-1226, March 2023
- [2] 김현빈. "마일드 하이브리드 차량용 양방향 LDC 설계 및 제어." 국내석사학위논문 대전대학교 대학원, 2017. 경기도