Phase-Shift Full-Bridge 컨버터의 변압기 설계 기법에 관한 연구

이기철, 장푸름, 박상민, 현병조, 최준혁†
한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

A Study on Transformer Design Techniques for Phase-Shift Full-Bridge Converters

Ki Cheor Lee, Poo Reum Jang, Sang Min Park, Byong Jo Hyon, Jun-Hyuk Choi†
Korea Electronice Technology Institute Power System Research Center

ABSTRACT

위상 천이 풀 브릿지 (Phase-Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터를 설계, 개발하는데 있어, 전력반도체, 전력반도체 구동회로, 변압기, 인덕터, 정류기 등 많은 설계 요인들이 존재한다. 그중 변압기 설계는 PSFB 컨버터의 부하 변동에 따른 효율 특성과 전체 시스템의 성능을 결정하는 핵심 소자다. 본 논문은 PSFB 컨버터에서의 변압기 설계 기법을 제안한다.

1. 서 론

전력 변환 장치를 개발하는데 있어 사용될 수 있는 다양한 토폴로지들이 존재한다. 그중 kW급 대용량 분야에서 추가적인 소자 없이도 소프트 스위칭 동작이 가능하고, 출력 LC필터에 의한 낮은 출력 전류 리플 등의 장점으로 위상 천이 풀 브릿지 (Phase-Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터가 널리 사용되고 있다.

PSFB 컨버터를 개발하는데 있어 다양한 설계 요소들이 있다. 그중에 변압기 설계는 PSFB 컨버터의 부하 변동에 따른 효율 특성에 아주 큰 영향을 끼치고, 전체 시스템의 성능을 결정하는 핵심 소자이다. PSFB 컨버터에 사용되는 변압기는 기성품을 사용하기보다는 최적 설계를 위해서 컨버터의 사양을 고려하여 엔지니어가 직접 설계해야 하는 부품이다.

2. PSFB 컨버터 설계

2.1 PSFB 컨버터

PSFB 컨버터는 간단한 제어와 소프트 스위칭으로 인한 낮은 스위칭 손실 등 여러 가지 장점으로 인해 다양한 전력변환 장치에 응용되고 있다. PSFB는 그림 1과 같이 변압기 1차측의 Zero Voltage Switching (ZVS) 풀 브릿지 회로와 2차측의 전파 정류회로로 구성된다. PSFB는 추가적인 회로 없이 스위치들의 게이트 신호에 지연시간을 둠으로써 스위칭 손실을 저감하여 고효율을 달성할 수 있다. 또한 PSFB는 제어의 용이성, 전력반도체 스위치의 전압/전류 스트레스 및 고전압 응용의 적합성과 같은 장점 때문에 중대용량 전력 변환 장치에서 많이 사용된다.

2.2 PSFB 컨버터 설계

PSFB 컨버터를 설계함에 있어 표 1에 있는 PSFB 컨버터의 사양에 맞춰 변압기의 턴 비 n, 코어 선정, 턴 수를 선정한다.

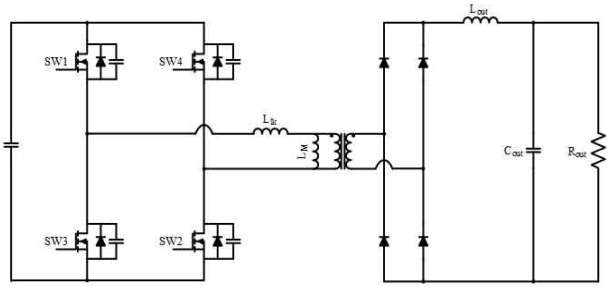

그림 1 PSFB Converter 회로도
fig. 1 Phase-Shift Full-Bridge Converter

표 1 PSFB 컨버터 주요 사양
Table 1 Phase-Shift Full-Bridge Converter Secification

Parameter	Value	Unit
Input Voltage (V_{in})	690	V
Output Voltage (V_{out})	380 - 420	V
Output Current (I_{out})	15	A
Output Ripple Voltage ($\triangle V_{out}/V_{out}$)	0.25	%
Output Ripple Current ($\triangle I_{out}/I_{out}$)	10	%
Switching Frequency (f_{sw})	150	kHz
Rated Output Power (P_{out})	6000	W

2.2.1 변압기 설계

변압기 설계에 여유를 두어 V_{in}을 650V로 설정하면 변압기의 턴비는 2차측 전파 정류회로로부터 유도한 식 (1)을 이용하여 n=1.25로 결정되며, 이때 정상 동작 시비율은 식 (2)에 의해 정상 동작 시비율 D_{nom}은 0.76이 된다. 하지만 PSFB 컨버터의 데드타임 및 유효 듀티의 손실을 고려하지 않은 식이므로 실제 동작 시에는 이를 고려하여 턴비 및 동작 시비율을 설정하여야 한다. 컨버터 스위칭 동작 모드 중에 2차측 정류단의 입력전압에는 전압이 인가되지 않는 상황으로 인하여 항상 D_{loss}만큼 듀티의 손해를 보게되므로 1-D_{loss}가 실제 PSFB 컨버터가 얻을 수 있는 최대 유효 듀티 D_{max}가 된다.

$$n = D_{\max} * \frac{V_{in}}{V_{out}} = 0.85 * \frac{650}{440} = 1.25 \quad (1)$$

$$D_{nom} = \frac{n * V_{out}}{2 * V_{in}} = \frac{1.2 * 440}{690} = 0.76 \quad (2)$$

2.2.2 변압기 코어 선정

코어 선정에는 Area Product A_P=A_C·A_w를 이용한 방식이 많이 사용된다. A_C는 코어의 단면적, A_w는 코어의 창면적, A_P는 변압기 전력 용량을 나타내고 각각 권선의 턴 수와 총 단면적에 관계가 있기 때문에 용량에 맞는 적절한 코어 선정이 가능하다. A_P는 수식 (3)으로 나타낸다.

J_P, J_S는 변압기 1차측과 2차측 권선의 전류밀도, B_{max}는 최대 자속 밀도, K_u는 윈도우 활용 인자이다. J_P, J_S의 전류 밀도는 7[A/mm^2]로 두고 B_{max}는 0.42[T], K_u는 창면적에 대한 권선 면적으로 0.165을 기준으로 설계한다. 계산된 A_P의 값을 만족하는 코어를 PQ3535 CORE의 Datesheet를 참조하여 표2의 조건으로 선정하였다.

$$A_P = A_C A_w = \frac{V_{in} I_{out} D_{\max}}{n B_{\max} f_{sw} K_u}\left(\frac{1}{J_P}+\frac{\sqrt{2}}{J_S}\right) = 2.222[cm^4] \quad (3)$$

표 2 PQ3535 코어 단면적 및 윈도우 영역
Table 2 PQ5050 Core Cross-Section Area and Window Area

Parameter	Value	Unit
A_C	1.61	cm^2
A_w	1.96	cm^2
A_P	3.1556	cm^4

2.2.3 변압기 턴 수 선정

변압기의 1차측 턴 수는 패러데이 법칙에 의해 식 (4)로 부터 설계되며, 2차측의 턴 수는 턴 비 관계로부터 구해진다. 변압기의 A_C, A_w, A_P는 식 (5), 식 (6), 식 (7)과 같이 나타내어진다. 코어 선정시 사용된 파라미터 값을 적용하여 구한값의 곱인 A_P가 식 (3)에서 구한값과 동일하다는 것을 알 수 있다.

$$N_P = \frac{D_{\max} V_{in}}{B_{\max} A_C f_{sw}} \quad (4)$$

$$A_C = \frac{D_{\max} V_{in}}{n B_{\max} f_{sw}} = 0.0783[cm^2] \quad (5)$$

$$A_w = \frac{I_{out}}{K_U}\left(\frac{1}{J_P}+\frac{\sqrt{2}}{J_S}\right) = 28.84[cm^2] \quad (6)$$

$$A_P = A_C A_w = 2.222\,[cm^4] \quad (7)$$

3. 시뮬레이션

그림 2는 PSFB 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 구성도이다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 표 3의 파라미터 값을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였고, 그림 3의 주요 동작 파형을 토대로 PSFB 컨버터가 정상 동작하는 것을 확인하였다. 따라서 PSFB 컨버터의 설계 요소 중 본 논문에서 제안한 변압기 설계 기법의 타당성을 검증하였다.

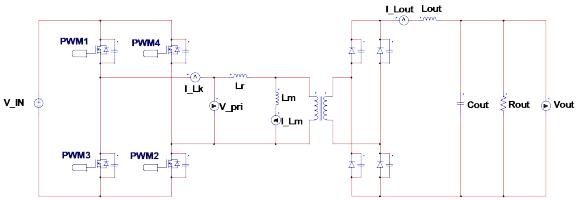

그림 2 PSFB Converter 시뮬레이션 구성도
fig. 2 Phase-Shift Full-Bridge Converter Circuit

표 3 PSFB 컨버터 변압기 설계 조건
Table 3 PSFB Converter Transformer Design Conditions

Parameter	Value	Unit
Magnetizing Inductance (L_m)	2.57	mH
Leakage Inductance (L_r)	22.49	μH
Output Inductance (L_{out})	745.39	μH
Output Capacitance (C_{out})	2415.06	μH

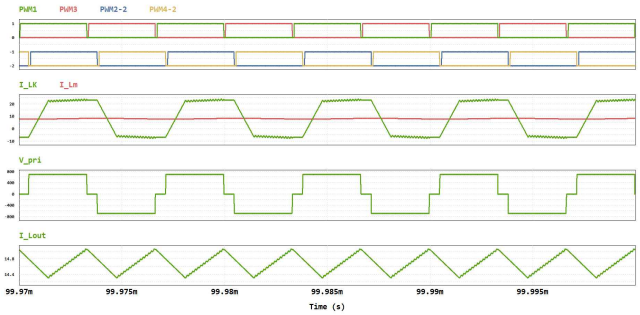

그림 3 PSFB Converter 시뮬레이션 주요 동작 파형
fig. 3 PSFB Converter Simulation Operating Waveforms

4. 결 론

전원 시스템 응용에서는 PSFB 컨버터가 널리 사용되고 있다. 그중 본 논문에서는 부하 변동에 따른 효율 특성에 큰 영향을 끼치는 중요 부품인 변압기 설계 기법을 제안하였고, 설계한 변압기를 적용한 PSFB 컨버터의 특성을 시뮬레이션으로 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20212020800020)

참 고 문 헌

[1] 이일운(Il Oun Lee). "PSFB 컨버터에서 변압기 최적 설계에 관한 연구." 한국전자통신학회 논문지 11.9 (2016): 869-876.

[2] 송현석. "마이크로 ESS에 사용되는 저전압 대전류 PSFB 컨버터 연구." 국내석사학위논문 계명대학교 일반대학원, 2021. 대구

[3] 이형란. "Integrated magnetic transformer for ZVS phase shift full bridge converter." 국내석사학위논문 경상대학교 대학원, 2008. 경상남도