

1kW 고주파 위상천이 풀브리지 컨버터 동작분석 및 최적 설계에 대한 연구

이우석, 김민우, 이일운
계명대학교

Research on Operation Analysis and Optimal Design in 1kW High-frequency Phase-Shift Full-Bridge Converter

Woo Seok Lee, Min Woo Kim, IL Oun Lee
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문은 1kW급 통신용 전원장치에 가장 많이 사용되는 위상천이 풀브리지 컨버터를 고주파 스위칭 주파수별 동작분석 및 최적 설계에 관한 연구 결과를 발표한다. 이 연구는 100kHz/Si전력반도체, 100kHz/GaN전력반도체, 500kHz/Si전력반도체, 500kHz/GaN전력반도체 4가지 방식의 위상천이 풀브리지 컨버터를 각 조건에서 최적 설계를 하고 그 실험 결과를 추출하여 성능을 비교함으로써 고주파 최적 설계 방법과 GaN전력반도체의 그 우수성을 확인하는 것이다. 일차적으로 이 번 논문에서는 100kHz/Si전력반도체 조건에서 위상천이 풀브리지 컨버터의 최적 설계 과정과 그 실험 결과를 발표한다.

1. 서론

지난 수십여년 동안 통신시스템은 현대사회에 없어서는 안 되는 중요한 핵심요소로 여겨져 왔다. 특히 작은 사이즈를 가지면서 고품질의 전원을 높은 효율로 공급해줄 수 있는 전력공급장치가 이 분야에서 요구된다. 필요로 하는 전력량은 대개 수백 Watt 급의 중대형이며, 최근 통신 분야의 발달과 더불어서 낮은 전압과 큰 전류를 출력으로 하는 중대용량의 고효율 컨버터 개발이 필요하다.

위상천이 풀브리지 컨버터(PSFB)는 스위치들의 게이트 신호에 시간지연을 두는 것만으로도 별도의 추가 회로 없이 능동 소자들을 소프트 스위칭 할 수 있으므로, 스위칭 손실을 줄여 효율을 높일 수 있고 출력 LC 필터에 의한 낮은 출력 전류 리플 등의 장점을 갖고 있다는 점에서 중대용량에 가장 많이 쓰이고 있는 회로 중 하나이다.^[1]

하지만, 위상천이 풀브리지 컨버터는 다음과 같은 두 가지 단점을 갖고 있다. 첫째, 주 트랜스포머와 출력 필터 등 자기소자들의 사이즈는 여전히 전체 크기를 좌우하는 가장 큰 요소가 된다. 특히 입력전압동작범위가 넓고 큰 전류를 출력으로 하는 컨버터의 경우에는 출력 인덕터의 사이즈가 상당히 커진다. 그러므로 작은 사이즈에 고전력밀도 컨버터를 요구하는 통신용 전원에는 적합하지 않다. 둘째, 위상천이 풀브리지 컨버터의 진상 레그(leading leg)에 있는 스위치들의 경우 출력인덕터가 1차측에 반영되어 에너지가 충분하여 영전압 스위칭 하는데 문제가 없다. 하지만 지상 레그(lagging leg)는 1차측에 존재하는 누설인덕턴스에 의해서 영전압 스위칭 하므로 부하가 작을 때 영전압 스위칭을 보장 할 수 없어 효율을 감소시키는 단점을 가지고 있다.

첫째 문제를 해결하기 위하여 고주파 스위칭을 사용함으로써 주 트랜스포머와 출력 인덕터의 사이즈를 작게 설계함으로써

고전력밀도를 달성할 수 있다.

본 연구는 100kHz/Si전력반도체, 100kHz/GaN전력반도체, 500kHz/Si전력반도체, 500kHz/GaN전력반도체 4가지 방식의 위상천이 풀브리지 컨버터를 각 조건에서 최적 설계를 하고 그 실험 결과를 추출하여 성능을 비교함으로써 고주파 최적 설계 방법과 GaN전력반도체의 그 우수성을 확인하는 것이다. 일차적으로 이 번 논문에서는 100kHz/Si전력반도체 조건에서 위상천이 풀브리지 컨버터의 최적 설계 과정과 그 실험 결과를 발표한다.

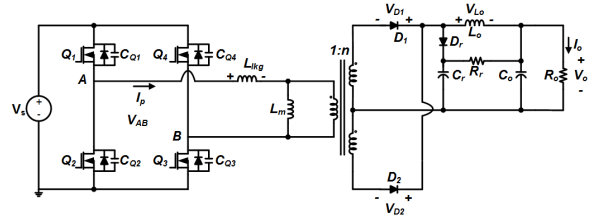


그림 1. 위상천이 풀브리지 컨버터

2. 1kW 100kHz 위상천이 풀브리지 컨버터

2.1 컨버터 동작분석

그림 1은 위상천이 풀브리지 컨버터의 회로도이다. 네 개의 스위치가 풀브리지로 구성되어 있고, 하나의 트랜스포머, 센터 탭 정류기(CTR), CDR스너브 회로, 출력필터로 구성되어 있다.

그림 2는 정상상태에서 컨버터의 주요 동작파형을 나타낸다. 동작파형을 보면서 동작원리를 설명한다.

모드 1 $[t_0, t_1]$: 1차측에서 2차측으로 전력을 전달하는 powering mode이다. 이때 V_{AB} 걸리는 전압은 입력전압 V_S 와 같고 이때 출력인덕터 전압은 $nV_S V_0$ 가 걸리고 인덕터 전류는 $(nV_S V_0)/L_0$ 로 선형적으로 증가한다.

모드 2 $[t_1, t_2]$: Q_3 꺼지면서 모드 2가 시작된다. C_{Q3} , C_{Q4} , L_0 가 공진하는 공진모드로 동작한다. 이 공진을 통해 C_{Q3} 가 충전되고, C_{Q4} 는 방전된다. 따라서, V_{AB} 전압은 0V로 감소한다.

모드 3 $[t_2, t_3]$: Q_4 가 ZVS turn on 하면서 모드 3이 시작된다. 이때 다이오드 D_1 , D_2 가 모두 켜지면서 Freewheeling mode로 동작한다. L_0 에 전압은 V_0 가 걸리게 되고 출력인덕터의 전류는 V_0/L_0 로 선형적으로 감소한다.

모드 4 $[t_3, t_4]$: Q_1 꺼지면서 모드 4가 시작된다. 2차측은 여전히 Freewheeling 하고 있다. 모드 4는 C_{Q1} , C_{Q2} , 1차측의 누설인덕턴스와 공진하는 공진모드이다. 이 공진을 통해 C_{Q1} 가 충전되고 C_{Q2} 는 방전된다. V_{AB} 전압은 V_S 로 감소한다.

모드 5 [t_4 , t_5] : 스위치 Q_4 켜져 있고, Q_2 가 ZVS turn on 하면서 모드 5가 시작된다. 모드 5는 2차측의 다이오드의 역할이 바뀌는 Commutation mode로 동작한다. V_{AB} 전압은 V_S 이고 1차측 전류는 V_S/L_{lk} 로 선형적으로 감소한다. 다이오드 D_1 꺼지면서 모드 5는 종료된다.

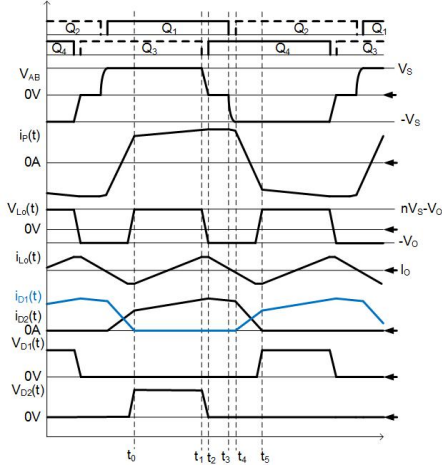


그림 2. 컨버터의 주요 동작 파형

2.2 100kHz 최적설계

컨버터를 최적설계 하였고, 사용된 부품들은 표 1에서 보여진다. 트랜스포머의 설계과정은 아래에 정리한다.

2.2.1 트랜스포머 설계

트랜스포머 설계를 위해 우선 코어가 선정되어야 한다. 코어 선정은 Area Product $A_p = A_c A_w$ 를 사용하였다. A_c 는 단면적 A_w 는 창면적을 나타낸다. 코어 최소 사이즈는 식 (1)을 통해 계산된다. 코어 데이터시트를 참조하여 A_p 3.573[cm²] 가지는 삼화코어 PQ3535를 선택하였다.

$$A_c A_w \geq \frac{P_o}{B_{max} \times J \times k \times f_s} = \frac{1000}{0.25 \times 500 \times 0.3 \times 100000} = 2.6666 [cm^4] \quad (1)$$

트랜스포머의 턴 비는 식 (2)로 결정한다. D_{max} 는 0.45로 선정 하였다. 그리고 최소 입력전압은 340V 이다.

$$n = \frac{V_o}{V_{in, min} \times 2 \times D_{max}} = \frac{48}{340 \times 2 \times 0.45} = 0.157 \quad (2)$$

턴 비는 2차측 턴 수를 결정할 때 사용된다.

트랜스포머의 1차측 턴 수는 식 (3)을 통해 25턴으로 선정되었다.

$$N_p = \frac{V_{in, nom} \times D}{2 \times A_c \times f_s \times B_{max}} \times 10^4 = \frac{400 \times 0.5}{2 \times 1.62 \times 100000 \times 0.25} \times 10^4 = 25 \quad (3)$$

2차측 턴 수는 식 (2)와 (3)을 곱하여 4턴으로 결정한다. 결정된 턴 수를 이용해 Duty를 재설정하면 D_{max} 0.44, D_{min} 0.38 이 된다.

표 1 프로토타입 컨버터의 설계사양

V_{in}	340 400 [V _{DC}]	V_o	48 [V _{DC}]
f_s	100 [kHz]	P_o	1000 [W]
L_o	15.453 [uH]	C_r	4.7 [uF]
C_o	330 [uF]	R_r	410 [Ω]
Q_1 , Q_4	IPW60R075CP	D_1 , D_2 , D_r	ATP30S20BG
T Core	PQ3535	$N_p:N_{S1}:N_{S2}$	25:4:4

2.3 실험결과

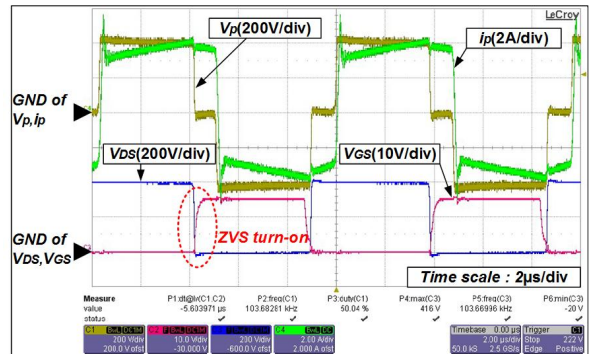


그림 3. 트랜스포머 일차측 전압, 전류, 스위치 Q_2 의 ZVS파형

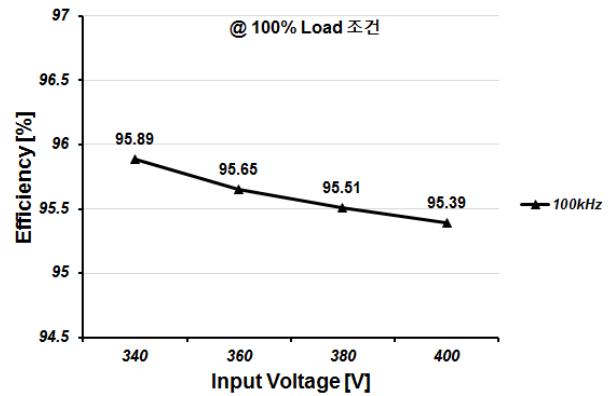


그림 4. 1kW 부하에서 입력전압 변동에 따른 효율 그래프

그림 3은 입력 400V, 출력 48V 1kW 부하에서 트랜스포머 1차측 전압과 전류 및 래깅 래그 스위치 Q_2 의 V_{DS} , V_{GS} 파형을 보여주며, 래깅 래그 스위치 Q_2 가 ZVS turn on 하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 1kW 부하에서 입력전압 변동에 따른 효율 그래프를 보여주며, 모든 입력전압 범위에서 95% 이상의 효율을 나타내고, 최대 95.89% 효율을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 100kHz/Si전력반도체 조건에서 위상천이 폴브리지 컨버터를 최적설계하고 340 400V입력, 48V 출력의 1kW급 프로토타입 컨버터를 제작하여 검증하였다. 모든 입력 전압 범위에서 95% 이상의 효율을 얻었다. 차후 100kHz/GaN 전력반도체, 500kHz/Si전력반도체 500kHz/GaN전력반도체를 적용한 위상천이 폴브리지 컨버터를 최적설계 하여 각 성능을 비교분석하여 GaN전력반도체의 우수성을 확인하려 한다.

본 논문은 2015년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분야기초연구사업임.
(NRF 2015R1C1A1A01051992)

참고 문헌

- [1] Loveday H. Mweene, Chris A. Wright, and Martin F. Schlecht, "A 1kW 500kHz Front End Converter for a Distributed Power Supply System", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 6, No. 3, pp. 398 407, 1991
- [2] J.A. Sabate, V. Vlatkovic, R.B. Ridley, F.C. Lee, and B.H. Cho, "Design Considerations for High Voltage High Power Full Bridge Zero Voltage Switched PWM Converter", in Proc, IEEE APEC, pp. 275 284, 1990