

GaN을 적용한 고주파 Hybrid-LLC 컨버터

한기태, 이동욱, 최대훈
인피니언 테크놀로지스 코리아

High frequency Hybrid-LLC Converter with GaN Implementation

Jitai Han, Dongwook Lee, Daehoon Choi
Infineon Technologies Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 고주파에서 동작 가능한 하이브리드 LLC 공진형 컨버터(Hybrid-LLC Resonant Converter)를 GaN을 적용하여 제안하였다. GaN을 적용하여 높은 동작 주파수를 가지는 공진형 토폴로지는 공진 소자의 크기가 줄어 높은 전력밀도를 구현 가능하다. 제안된 설계에서는 필요한 전압 이득에 따라 주파수 제어(FM) 모드와 위상천이 제어(PSM) 모드가 있다. 제안하는 디자인의 타당성 검증을 위해 500kHz 스위칭 주파수를 가지는 1kW 공진형 컨버터의 시뮬레이션을 통해 동작특성을 확인하였다.

1. 서론

고효율, 고밀도, 고주파 응용에 대한 관심으로 LLC 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LLC 공진형 컨버터는 높은 효율성, 소프트 스위칭(soft-switching), 낮은 전자기 간섭(EMI) 등 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 GaN 소자를 활용하여 스위칭 주파수를 높여 전력밀도를 증가시킬 수 있다.

기존의 LLC 컨버터는 넓은 전압 이득을 얻기 위해 넓은 스위칭 주파수 범위를 가지고 있는데, 이는 자기 부품의 설계 및 최적화가 어려운 단점을 가지고 있다. 특히 출력 전압이 낮을수록, 컨버터를 안정화하기 위해 더 낮은 전압이득이 필요하며, 이때 스위칭 주파수가 높아지면 손실이 증가하고 전체 효율이 낮아진다. 본 논문에서는 주파수 제어 모드와 위상천이 제어 모드를 결합한 하이브리드 제어 방법을 제안한다. 전압 이득이 1보다 높을 때 컨버터는 FM 모드로 동작한다. 최대 동작 주파수를 공진 주파수로 고정하여 전압 이득이 1보다 낮을 때 고정 주파수에서 PSM 모드로 위상각을 이용하여 출력전압을 조절한다.

2. Hybrid LLC 공진 컨버터 동작원리

2.1 토폴로지의 구성

그림 1은 Hybrid-LLC 공진 컨버터 회로 토폴로지를 보여주는데, 이는 기존 풀 브릿지 LLC 컨버터와 동일하다. 공진 탱크는 L_r , L_m , 그리고 C_r 으로 구성되어 있다. N 와 R_L 는 각각 트랜스포머의 턴비와 부하측 등가저항 값을 나타낸다.

FM 모드에서는 스위칭 Q_1, Q_4 와 Q_2, Q_3 두 스위치씩 동시

에 온, 오프 시켜줌으로써 1차측에서 2차측으로 전력을 전달한다. 동작 주파수가 공진주파수까지 증가 후 동작모드는 위상천이 동작 모드로 전환한다. PSM 모드에서는 주파수를 고정하고 리딩-레그(Leading-leg) 스위치와 래깅-레그(Lagging-leg) 스위치의 위상차를 줌으로써 1차측에서 2차측으로 전력을 전달하고 위상차를 조절하여 출력전압을 제어하는 방식이다. 게이트 신호들은 그림 2에서 확인할 수 있다.

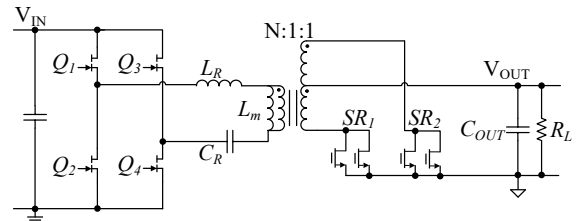


그림 1 Hybrid-LLC 공진형 컨버터 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of Hybrid-LLC Resonant Converter

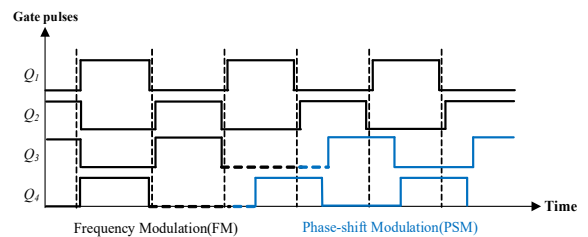


그림 2 FM 모드와 PSM 모드 게이트 신호 파형
Fig. 2 Gate pulse of the FM mode and PSM mode

2.2 전압 이득 제어

LLC 공진 컨버터는 단일 제어 방법으로 넓은 이득 범위를 확보하는데 어려움이 있다. FM 모드에서는 전압 이득이 1보다 높을 때에만 일차측 영 전압 스위치(ZVS), 이차측 영 전류 스위치(ZCS) 스위칭을 동시에 만족할 수 있다. PSM 모드에서는 위상차를 100%에서 줄이는 것이기에 이득은 항상 1보다 낮다.

1. $M > 1$ (Boost conversion)

스위칭 주파수가 공진주파수보다 낮을 때에는 FM 모드에서 동작하게 되고 전압이득 감소에 따라 스위칭 주파수는 증가하게 된다. 이는 출력 전압 높을 경우에 해당된다.

2. $M = 1$ (Equal voltage conversion)

스위칭 주파수와 공진 주파수가 동일할 때 동작 모드 전환하게 된다. (FM \rightarrow PSM 또는 PSM \rightarrow FM)

3. $M < 1$ (Buck conversion)

스위칭 주파수를 공진 주파수에 고정하고 PSM 모드에서 동작한다. 필요한 출력 전압에 따라 위상차를 제어하며 전압 이득을 조절한다. 이는 출력 전압이 낮은 경우에 해당된다.

2.3 고주파 Hybrid-LLC 컨버터 설계시 고려사항

L_m/L_r 값이 작으면 주파수 변동범위가 작아져 출력 전압을 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있지만, L_m 값이 작으면 순환 전류도 증가하여 전도 손실이 늘어나며, 효율성과 온도 특성도 약화될 수 있다. 반면에 L_m/L_r 값이 크면, 과부하 상황에서도 이득 범위 내에서 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있지만, 공진 주파수에서 최대 이득 간의 거리가 멀어져 부하 변동에 따라 스위칭 주파수의 변화가 커져 제어가 어려워진다. 또한 L_m 값이 크면 PSM 모드 구간에서 래그-레그 스위치들의 ZVS 범위는 상대적으로 줄어든다. ZVS 동작을 보증하는 L_m 의 최대 값은 아래 식(1)과 같이 나타난다.

$$L_{m_MAX} \leq \frac{t_d * N * V_{OUT_MAX}}{8 * C_{ds} * V_{LN} * f_r} \quad (1)$$

고주파 구동 시 데드타임(t_d) 설정은 매우 중요하다. 100ns의 데드타임을 500kHz 주파수에서 사용한다면, 5% 듀티에 해당된다. 이는 상당 부분을 차지하게 되어 실제 계산 시 데드타임을 고려하여 기존 수식(1)을 (2)로 변경하여 계산할 수 있다.

$$L_{m_MAX} \leq \frac{t_d * N * V_{OUT_MAX} * (T - 2 * t_d)}{8 * C_{ds} * V_{LN}} \quad (2)$$

Hybrid 토폴로지에서 출력 전압이 가장 높을 때 FM 모드에서 전압 이득 $M(f)$ 은 최대 값이고 출력 전압 가능 낮을 때 PSM 모드에서 전압 이득 $M(D)$ 은 최소 값이다. 입력전압과 턴비는 일정하다고 가정하고 아래 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{M(f)_{MAX}}{V_{OUT_MIN}} = \frac{M(D)_{MIN}}{V_{OUT_MAX}} = \frac{N}{V_{LN}} \quad (3)$$

출력 전압을 $\pm 20\%$ 의 동작 범위까지 고려 시,

$$V_{OUT_MAX} = V_{OUT_MIN} * 1.5 \quad (4)$$

식(3)와 식(4)으로부터 아래 식(5)을 유도할 수 있다.

$$1 \leq M(f) \leq 1.5 \quad (5)$$

$$0.66 \leq M(D) \leq 1$$

3. 시뮬레이션 결과

제안한 고주파 Hybrid-LLC 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 아래 설계 사양으로 시뮬레이션을 진행하였다.

48V 산업용 전원은 일반적으로 $\pm 20\%$ 의 동작 전압 범위까지 고려하여 설계하고 있다. 시뮬레이션에서는 1차측 HV GaN은 IGLD60R190D1(Infineon, 600V, 190m Ω , 16nC), 2차측 MV GaN은 EPC2304(EPC, 200V, 5m Ω , 115nC)을 적용하였다.

P_{OUT}	1kW	L_m	73 μ H
V_{LN}	400V	L_r	21 μ H
V_{OUT_TYP}	48V	C_r	4.8nF
V_{OUT_MIN}	38.4V	Turnratio	9:1:1
V_{OUT_MAX}	57.6V	f_{res}	500kHz
I_{OUT}	21A		

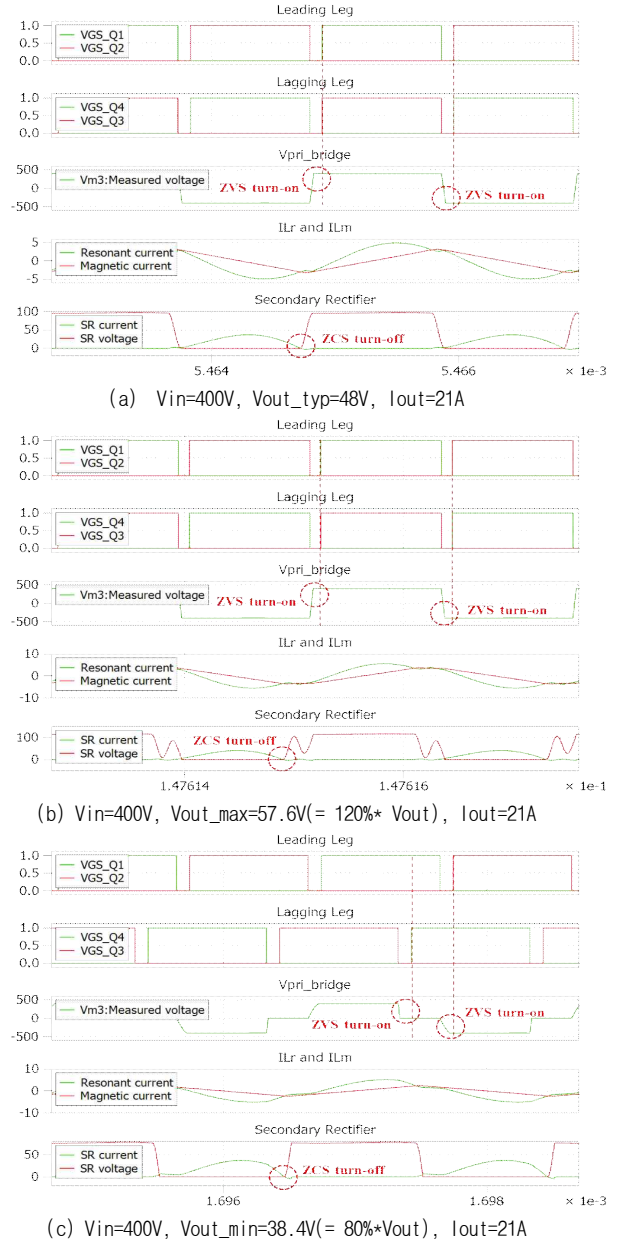


그림 3 (a) V_{out_max} (b) V_{out_typ} (c) V_{out_min} 파형
Fig. 3 Waveforms at (a) V_{out_max} (b) V_{out_typ} (c) V_{out_min}

4. 결론

본 논문은 고주파 Hybrid-LLC 컨버터의 회로 구성, 동작 원리, 전압 이득 제어에 대해 살펴보고 고주파 구동 시 고려사항들을 확인했다. 제안한 설계에 대해 500kHz, 1kW급 회로 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이는 고주파, 고밀도 어플리케이션의 경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] K. Zhou, Y. Liu, X. Wu "Research on Wide Input Voltage LLC Resonant Converter and Compound Control Strategy", Electronics, 2022, 11(20): 3379