

보조 회로를 이용한 LLC 컨버터의 홀드 업 시간 보상

허준익, 김종우
 건국대학교 전기전자공학부

LLC Converter using Partial Power Processing Circuit for Hold-Up Time Compensation

Jun-Ik Heo, Jong-Woo Kim
 Konkuk University, Electrical Engineering

ABSTRACT

데이터센터 전원 공급 장치의 DC/DC 컨버터에서 홀드 업 시간 요구 사항은 필수적이다. 본 논문에서는 보조 전력 처리 회로를 통해 홀드 업 시간 동안 자체적으로 이득 부스팅이 가능한 LLC 컨버터를 제안한다. 공진점에서 해당 회로는 전체 출력 전력의 일부를 공급하는 역할을 하며 홀드 업 시간 동안 보조 회로는 위상 편이 변조를 통해 통합된 부스트 컨버터로서 공진 탱크에 걸리는 전압을 늘려 이득을 증가시킬 수 있다. 제안하는 회로는 보조 회로 이외에 추가적인 컨버터나 부품을 필요로 하지 않으며 위상 편이 변조로 인해 발생하는 공진 전류의 최대값을 제한할 수 있다는 장점을 가진다. 제안된 컨버터의 효율 및 성능은 400-300V 입력 및 50V/10A 출력을 가지는 프로토타입의 실험 결과를 통해 검증하였다.

1. 서론

데이터 센터의 전력 안정성을 유지하기 위해 데이터센터의 전원 장치는 홀드 업 시간이 필수적으로 요구된다. 일반적인 전원 장치의 구조는 그림 1에서 볼 수 있듯이 PFC와 DC/DC단으로 구성되어 있다. 데이터 센터의 전원장치는 AC 손실이 발생하더라도 출력전압을 수십 ms동안 유지해줘야 한다. 이는 AC 전원의 손실이 발생하더라도 데이터 센터가 가동 중단되는 것을 방지하기 위한 것으로, 이를 홀드 업 시간 요건이라고 부른다. 홀드 업 시간 동안 DC/DC단은 링크 커패시터에 저장된 에너지를 통해 출력 전력을 공급한다. 홀드 업 시간 동안 DC/DC 컨버터는 입력 전압이 감소하며, 입력 전압의 범위가 넓어지게 되면 DC/DC 컨버터는 효율과 전력 밀도가 저하될 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 연구가 이루어졌다. 첫 번째는 베이비 부스트 방식으로 링크 커패시터를 두 개로 나누고 그 사이에 부스트 컨버터를 삽입하는 것이다.^[1] 부스트 컨버터는 홀드 업 시간동안 작동하여 DC/DC 컨버터의 입력 전압 범위를 좁게 만든다. 그러나 해당 부스트 컨버터는 홀드 업 시간 동안에만 사용되므로 효율 측면에서 바람직하지 않으며 바이패스 경로를 위해 추가적인 반

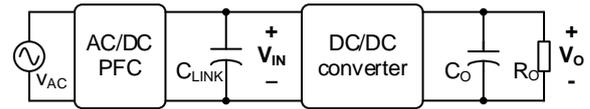


그림 1 데이터센터 전원 공급 장치의 구조

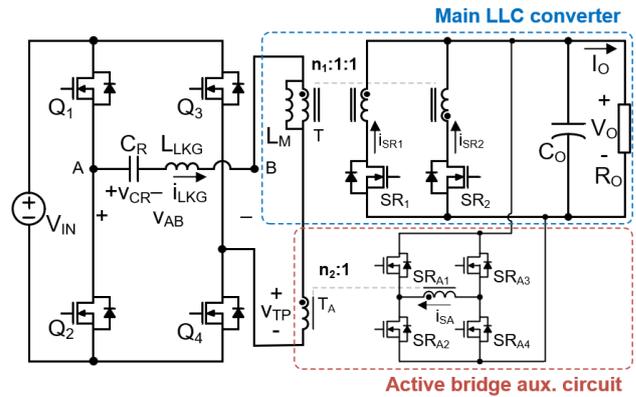


그림 2 제안하는 DC/DC 컨버터의 회로 구성

도체 스위치가 필요하다. 이는 시스템의 전체적인 전력 밀도를 떨어뜨린다. 또 다른 방법은 DC/DC단에 LLC 컨버터를 사용하고 펄스 폭 제어를 통해 홀드 업 시간 동안 컨버터의 이득을 증가시키는 것이다.^[2] 그러나 펄스 폭 제어의 경우 부스팅 시 공진탱크에 큰 전압이 인가되어 공진전류의 파형에 큰 피크가 발생하게 된다는 단점이 존재한다. 이러한 피크 전류의 증가는 인덕터에 요구되는 최대 지속 밀도를 증가시켜 인덕터의 크기가 커지게 한다.

본 논문에서는 능동 브릿지 정류기를 사용하는 보조 회로를 통해 홀드 업 시간 동안 부스팅 이득을 제공하는 LLC 컨버터를 제안한다. 이 보조 회로는 홀드 업 시간에서 위상 편이 변조를 통해 통합된 부스트 컨버터로 동작한다. 또한, 홀드 업 시간 뿐만 아니라 nominal 상태에서도 전력의 일부를 제공하여 추가 소자의 사용이 효율적이라는 장점을 가진다.

2. 제안하는 컨버터 분석

2.1 제안하는 컨버터의 회로 구성

그림2는 제안하는 컨버터의 회로 구성을 나타낸다. 제안하는 컨버터는 LLC 컨버터 및 액티브 브리지를 가지는 보조 회로로 구성되어 있다. LLC 컨버터의 변압기는 데이터센터 어플리케이션과 같은 저전압 고전류 출력에 적합한 센터 탭 변압기를 사용한다. 보조

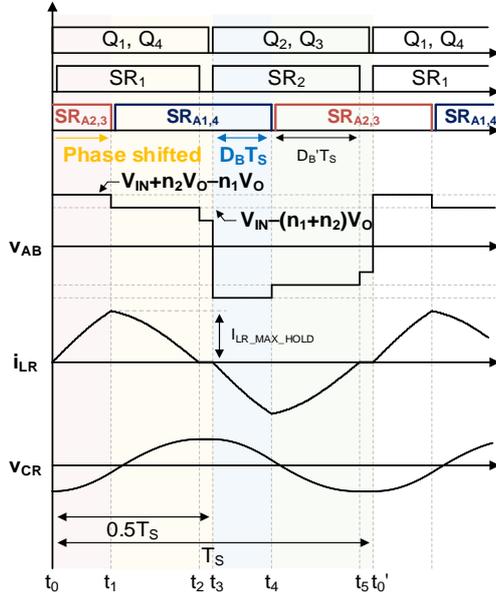


그림 3 $V_{IN_MIN} < V_{IN} < V_{IN_NOM}$ 일 때 홀드업 시간에서 제안하는 컨버터의 주요 파형

회로 변압기의 1차측 권선은 메인 LLC 컨버터 변압기의 1차측 권선과 직렬로 연결되어 있다. 보조 회로의 2차측은 풀 브리지 동기 정류기로 구성되어 있으며 메인 컨버터와 병렬로 연결되어 있다. 제안하는 컨버터는 보조 회로가 부분 전력 처리 회로로서 nominal 상태에서 출력 전력의 일부를 전달한다. 따라서 메인 LLC 회로의 변압기 크기가 줄어들어 전체적인 전력밀도를 증가시키지 않는다. 홀드업 시간 동안 보조 회로는 메인 회로와 통합된 부스트 컨버터로 작동한다.

2.1 제안하는 컨버터의 작동 원리

2.1.1 $V_{IN} = V_{IN_NOM}$ 에서 회로의 작동 원리

컨버터의 nominal 상태 $V_{IN} = V_{IN_NOM}$ 에서 LLC 변압기의 권선비는 $n_1:1:1$ 이며, 직렬로 연결된 보조 회로의 변압기 권선비는 $n_2:1$ 이다. nominal 상태에서 LLC 컨버터의 공진전류 i_{LR} 이 양의 반주기일 때 Q_1, Q_4, SR_1 이 켜진다. 이때 보조 회로에서는 SR_{A1}, SR_{A4} 가 켜진다. 음의 반주기 동안은 Q_2, Q_3, SR_2 , 보조 회로에서는 SR_{A2}, SR_{A3} 가 켜진다. nominal 상태에서 메인 변압기 1차측에 걸리는 전압은 $\pm n_1 V_{out}$ 이며, 보조 회로의 1차측 변압기에 걸리는 전압은 $\pm n_2 V_{out}$ 이다. 두 변압기에 걸리는 전압의 방향은 항상 동일하며 공진탱크에 걸리는 전압 V_{AB} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{in} - (n_1 + n_2)V_{out} \quad (i_{LR} > 0) \\ V_{AB} &= -V_{in} + (n_1 + n_2)V_{out} \quad (i_{LR} < 0) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 제안하는 컨버터의 전압 변환비는 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{1}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

이를 통해 nominal 상태에서 제안하는 컨버터는 보조 회로가 메인 회로와 합쳐져 출력 전력의 일부를 담당한다는 것을 알 수 있다.

2.1.2 $V_{IN_MIN} < V_{IN} < V_{IN_NOM}$ 에서 회로의 작동 원리

그림 3은 $V_{IN_MIN} < V_{IN} < V_{IN_NOM}$ 조건에서 홀드업 시간 동안 제안하는 컨버터의 주요 파형을 나타내며 그림 4는 그림 3의 $t_0 \sim t_1$

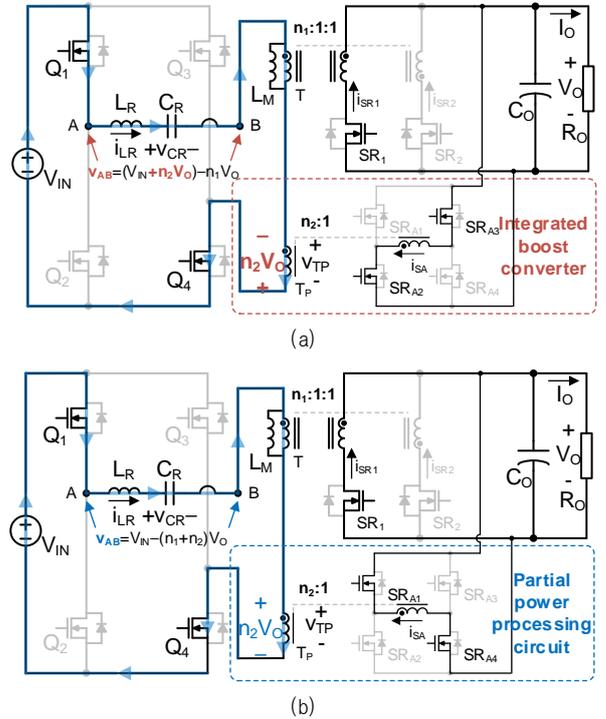


그림 4 (a) $t_0 \sim t_1$ 일 때 제안하는 컨버터의 전류 경로

(b) $t_1 \sim t_2$ 일 때 제안하는 컨버터의 전류 경로

및 $t_1 \sim t_2$ 에서 컨버터의 전류 경로를 나타낸다. 이때 컨버터의 동작은 기본적으로 nominal 상태와 같으나, 이때 보조 회로의 게이트 신호는 이득 증가를 위해 $D_B T_s$ 만큼 위상 천이 되어 동작한다. 따라서 공진 전류의 부호가 바뀌더라도 보조 회로의 SR은 $D_B T_s$ 만큼 늦게 꺼진다. 공진 전류의 값이 음에서 양으로 바뀔 경우, 반 주기 동안 컨버터의 공진 탱크에 걸리는 전압 V_{AB} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{in} - (n_1 - n_2)V_{out} \quad (D_B T_s) \\ V_{AB} &= V_{in} - (n_1 + n_2)V_{out} \quad (D_B' T_s) \end{aligned} \quad (3)$$

$t_0 \sim t_1$ 에 해당하는 $D_B T_s$ 동안 메인 회로 변압기와 보조 회로 변압기에 인가되는 전압의 방향은 반대이며, 보조 회로는 부스트 컨버터의 역할을 하여 이득을 상승시킨다.

2.1.3 $V_{IN} = V_{IN_MIN}$ 에서 회로의 작동 원리

홀드업 시간 중 $V_{IN} = V_{IN_MIN}$ 일 때 출력 전압을 유지하기 위해 컨버터의 이득은 최대가 되어야 한다. 이때 제안하는 컨버터의 보조 회로 게이트 신호는 180도 위상 천이 되어 있다. 공진 전류가 양수이고 Q_1, Q_4, SR_1 이 켜질 때 보조 회로에서는 SR_{A2}, SR_{A3} 이 켜진다. 공진 전류가 음수이고 Q_2, Q_3, SR_2 가 켜질 때 보조 회로에서는 SR_{A1}, SR_{A4} 가 켜진다. 따라서 메인 회로의 변압기와 보조 회로의 변압기에는 항상 반대 방향의 전압이 인가된다. 이때 공진탱크에 걸리는 전압 V_{AB} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{in} - (n_1 - n_2)V_{out} \quad (i_{LR} > 0) \\ V_{AB} &= -V_{in} + (n_1 - n_2)V_{out} \quad (i_{LR} < 0) \end{aligned} \quad (4)$$

이를 통해 제안하는 컨버터의 전압 변환비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{1}{n_1 - n_2} \quad (5)$$

이때 보조 회로는 홀드업 시간 동안 부스트 컨버터의 역할을 하여 공진 탱크의 전압을 최대로 증가시키며 컨버터의 이득 역시 최대가 된다. 그러나 보조 회로의 게이트 신호가 nominal

Component	Details
$Q_1 \sim Q_4$	IPW60R070C6
SR_1, SR_2	FDH055N15A
L_R	PQ 2016 75 μ H
C_R	66nF
$SR_{A1} \sim SR_{A4}$	IRFS3607
T	PQ 3230 Np:Ns = 7:1 800 μ H
T_p	PQ 2620 Np:Ns = 1:1 110 μ H

표 1 실험에 사용된 소자의 종류 및 특성

상태 대비 정확히 180° 위상 천이 되므로 제안하는 컨버터는 최대 이득 동작점에서 공진전류 파형의 피크 증가로 인한 왜곡 없이 순수한 정현파와 전류 파형을 갖는다.

이에 따라 제안하는 회로는 홀드 업 시간동안 입력 전압이 V_{IN_NOM} 일 때와 V_{IN_MIN} 일 때 공진 전류가 정현파가 되어, 기존 PWM을 이용한 홀드 업 시간 확장 방식에 비하여 공진전류 피크 값을 줄여줄 수 있다는 장점을 가진다.

3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 효율성을 검증하기 위해서 입력전압 400~300V, 출력전압 50V, 출력전류 10A의 프로토타입을 설계하였다. 공진주파수는 60kHz이다. 표 1은 실험에 사용된 각 소자들의 종류 및 특성을 나타낸다.

그림 5는 실험 결과에 따른 각 동작 구간에서의 주요 파형을 나타낸 것이다. 각 파형은 메인 스위치 및 보조회로 스위치의 구동 신호, 보조회로 변압기 1차측 전압, 공진전류 파형을 나타낸다. 입력전압이 홀드 업 시간동안 400V에서 300V로 낮아짐에 따라, 보조 회로 스위치의 게이트 신호의 위상 천이 시비율 D_B 가 0에서 0.5로 증가하여 출력전압을 일정하게 유지한다.

4. 결론

제안하는 회로는 입력전압이 감소함에 따라 이득 증가를 위해 보조회로의 스위치 신호가 위상 천이 되며, 입력전압이 V_{IN_NOM} 일 때와 V_{IN_MIN} 일 때 공진 전류는 정현파가 되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 제안하는 컨버터는 높은 이득에서 공진전류 피크 전류 값이 제한된다는 사실을 실험 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 결론적으로 제안하는 회로는 효율 및 전력밀도 측면에서 기존 연구 에서 나타나는 단점들을 개선할 수 있으며 데이터 센터 어플리케이션에 적용하기 적합한 컨버터 토폴로지라고 할 수 있다.

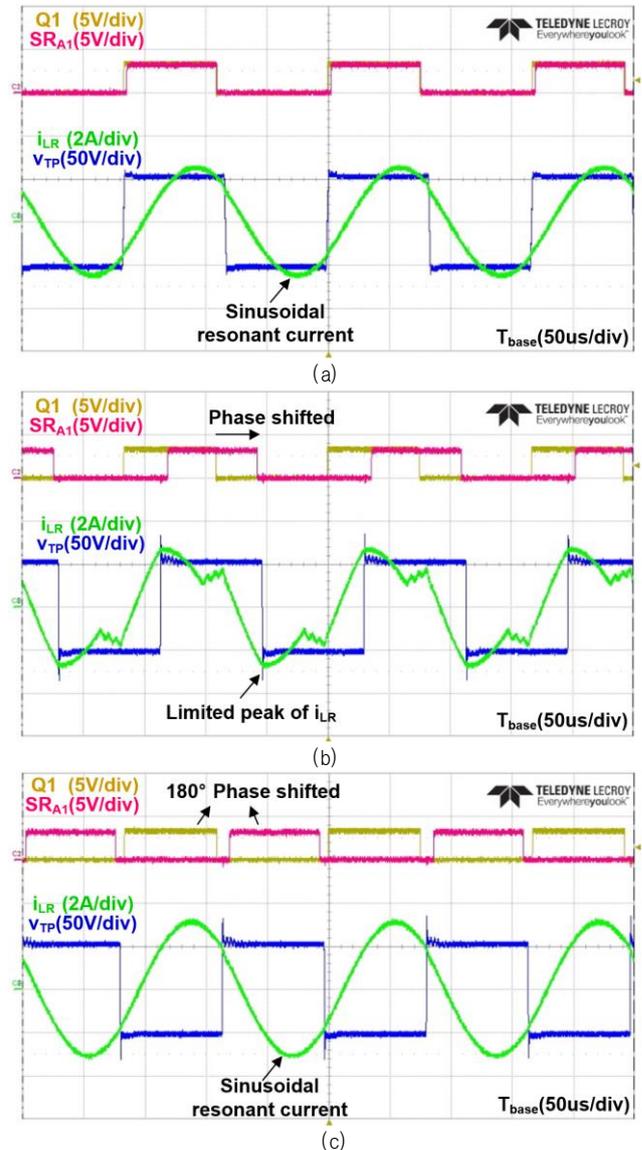


그림5 (a) 400V 입력, 50V/10A 동작 주요 파형
(b) 350V 입력, 50V/10A 동작 주요 파형
(c) 300V 입력, 50V/10A 동작 주요 파형

참 고 문 헌

- [1] B. Sun, S. -Y. Yu, B. Genereaux and L. Yin, "Design and Control Strategy of PFC During AC Dropout in a High Reliability and High-Power Density Server Power Supply," 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Nashville, TN, USA, 2023, pp. 2473-2477.
- [2] J. -W. Kim and G. -W. Moon, "A New LLC Series Resonant Converter with a Narrow Switching Frequency Variation and Reduced Conduction Losses," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 8, pp. 4278-4287, Aug. 2014.