

다양한 배터리 충전전압 대응 가능한 3-Bridge 공진컨버터

김태란, 박경수, 전찬우, 국자표, 전용석, 김은수[†]
 전주대학교

3-Bridge Resonant Converter for Various Battery Charging Voltages

Tae-Ran Kim, Kyung-Su Park, Chan-Woo Jeon, Ja-Pyo Kook,
 Yong-Seog Jeon, Eun-Soo Kim[†]
 JeonJu University

1. 서론

최근 E-mobility의 사용은 계속 증가하고 있으며 적용되는 분야에 따라 다양한 정격전압의 배터리팩이 사용되고 있어 단일 전원공급장치로 다양한 기기의 배터리 충전을 지원할 수 있는 LLC DC-DC 컨버터가 요구되고 있다^[1]. 그러나 공진주파수(f_r) 이상에서 입출력전압이득 특성이 완만해지는 LLC 공진컨버터 특성상 두 배 이상의 넓은 출력전압 제어범위를 얻기 위해서는 변압기 자화인덕턴스를 과도하게 저감해야 하고 이에 따라 도통손실이 증가하는 문제가 있었다^[2].

이에 대응하여 본 논문에서는 개선된 5가지 동작모드 전환을 통해 좁은 스위칭주파수범위 내에서 넓은 출력전압을 제어할 수 있는 5-Mode LLC DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 주 스위칭소자의 스위칭 패턴에 따라 5가지 동작모드를 가져 자화인덕턴스의 과도한 저감 없이 넓은 출력전압 제어를 구현할 수 있다. 또한 보다 좁은 스위칭주파수범위 내에서 동작모드 전환이 가능하여 스위칭손실 저감이 가능하다. 이에 대한 실험을 통해 회로의 적용 가능성을 검증하였다.

2. 5-Mode로 동작하는 3-브리지 LLC 컨버터

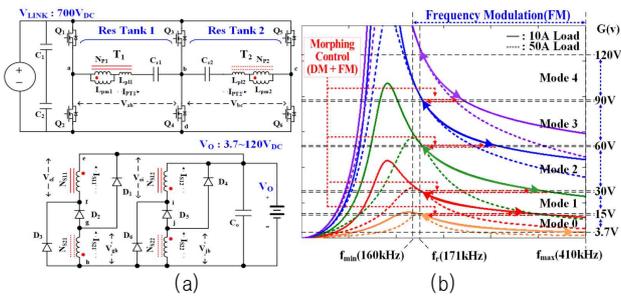


그림 1 이득특성곡선

제안된 5-Mode로 동작하는 3-브리지 LLC 공진컨버터는 그림 1 (a)에 나타난 바와 같이 1차 측에 3-브리지 형태로 연결된 6개의 주 스위칭소자($Q_1 \sim Q_6$)의 스위칭 패턴에 따라 5가지 동작모드(Mode M, M: 0, 1, 2, 3, 4)로 전환되며 각 동작모드에 따라 그림 1 (b)와 같이 입출력전압이득 특성을 결정하게 된다. 각 동작모드는 가변스위칭주파수제어(FM, Frequency Modulation)를 통해 변화하며 넓은 출력전압(V_O : 3.7 V_{DC}~120 V_{DC}) 제어범위를 갖는다. 동작모드 전환 도중 발생하는 과도현상을 억제하기 위해 가변스위칭주파수제어(FM)와 듀티제어(DM, Duty-Cycle Modulation)가 동시에 이루어지는 모핑제어(Morphing Control)를 적용하였다.

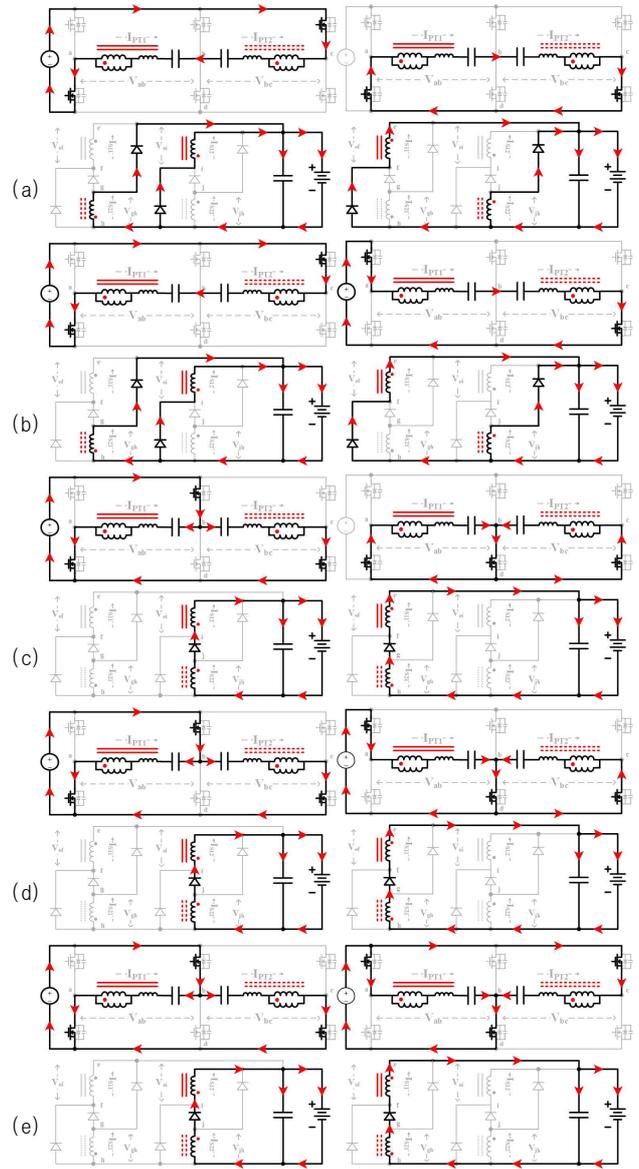


그림 2 3-브리지 LLC 컨버터의 각 동작모드별 전류 흐름도
 (a) Mode 0, (b) Mode 1, (c) Mode 2, (d) Mode 3, (e) Mode 4

2.1 동작모드

Mode 0: 주 스위칭소자 Q_2 가 항상 Turn-on, Q_1, Q_3, Q_4 는 항상 Turn-off 되어있고, Q_5 와 Q_6 가 매주기 50% 듀티로 턴-온/턴-오프 한다. 따라서 그림 2 (a)와 같이 회로의 1차 측 두 공

진회로는 직렬로 연결되고 변압기의 2차 측 권선은 변압기 극성에 따라 병렬로 연결되어 하프-브리지 동작을 통해 2차 측에 전력을 전달한다. 이때 기준이 되는 출력전압 V_o 를 12 V 정격 배터리팩의 최소 전압보다 낮은 7.5 V_{DC}로 선정하였을 때, 가변스위칭주파수제어(FM)를 통해 1/2V_o부터 12 V 정격 배터리팩의 최대전압 14.8 V_{DC} 이상인 2V_o까지 제어 가능하다.

Mode 1: 주 스위칭소자 Q₃, Q₄는 항상 Turn-off 되어있고, Q₁/Q₂와 Q₆/Q₅가 매주기 50% 듀티로 턴-온/턴-오프 한다. 따라서 그림 2 (b)와 같이 Mode 0과 동일하게 회로가 연결되지만 풀-브리지 동작을 통해 2V_o에서 24 V 정격 배터리팩의 최대전압 29.6 V_{DC} 이상인 4V_o까지 출력전압제어 가능하다.

Mode 2: 주 스위칭소자 Q₂, Q₆가 항상 Turn-on, Q₁, Q₅는 항상 Turn-off 되어있고, Q₂와 Q₃가 매주기 50% 듀티로 턴-온/턴-오프 한다. 따라서 그림 2 (c)와 같이 회로의 1차 측 두 공진회로는 병렬로 연결되고 변압기의 2차 측 권선은 변압기 극성에 따라 직렬로 연결되어 하프-브리지 동작을 통해 4V_o에서 48 V 정격 배터리팩의 최대전압 59.3 V_{DC} 이상인 8V_o까지 출력전압제어 가능하다.

Mode 3: 주 스위칭소자 Q₆가 항상 Turn-on, Q₅는 항상 Turn-off 되어있고, Q₁/Q₂와 Q₄/Q₃이 매주기 50% 듀티로 턴-온/턴-오프 한다. 따라서 그림 2 (d)와 같이 Mode 2와 동일하게 회로가 연결되지만 변압기 1(T₁)은 풀-브리지, 변압기 2(T₂)는 하프-브리지 스위칭동작을 통해 8V_o에서 72 V 정격 배터리팩의 최대전압 88 V_{DC} 이상인 12V_o까지 출력전압제어 가능하다.

Mode 4: 주스위칭소자 Q₁, Q₄, Q₅와 Q₂, Q₃, Q₆가 매주기 50% 듀티로 턴-온 및 턴-오프 한다. 따라서 그림 2 (e)와 같이 Mode 2와 동일하게 회로가 연결되지만 풀-브리지 동작을 통해 12V_o에서 96 V 정격 배터리팩의 최대전압 118 V_{DC} 이상인 16V_o까지 출력전압제어 가능하다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 5가지 동작모드 전환을 통해 다양한 배터리 충전전압에 대응 가능한 3-브리지 LLC 공진컨버터에 대하여 시제품 제작 및 경부하 실험(0 V_{DC}~120 V_{DC}/10 A/1.2 kW)을 통해 적용 가능성을 검증하였다. 표 1은 실험에 적용된 주요 정격과 공진회로 및 변압기 파라미터를 나타내었다.

그림 3은 모핑제어(DM+FM)를 통해 동작모드 전환이 이루어지는 것을 확인하기 위한 출력전압 증감 실험(3.7 V_{DC}→120 V_{DC}→3.7 V_{DC}) 실험파형이다. 주 스위칭소자 Q₁/Q₃/Q₅의 양단 전압(V_{Q1_DS}/V_{Q3_DS}/V_{Q5_DS}) 파형을 통해 동작모드의 변화를 확인할 수 있다. Mode 0에서 Q₃ 양단 전압(V_{Q3_DS})은 Q₃과 Q₄의 기생 커패시터 충-방전의 영향으로 인한 기생진동파형이며 이는 그림 4 (a), (b)의 1차 측 공진회로 전압(V_{ab})에서도 나타난다. 10 A 부하전류조건에서 출력전압 레퍼런스가 총 3.2초간 변화함에 따라 출력전압(V_o)이 1.6초간 최소출력전압 3.7 V_{DC}에서부터 최대출력전압 120 V_{DC}까지 상승하고 다시 하강하는 것을 볼 수 있다. 또한 동작모드 전환 구간에서 출력전압(V_o)의 큰 과도상태가 일어나지 않고 선형적으로 제어됨을 확인할 수 있다.

그림 4는 10 A 부하 조건에서 각 동작모드별 영전압스위칭(ZVS, Zero Voltage Switching) 동작을 확인하기 위해 측정된 파형이다. 1차 측 공진회로의 전압(V_{ab})과 전류(I_{PT1})의 위상 관계를 통해 모든 동작모드 및 최대 전압에서 영전압스위칭(ZVS) 동작 가능함을 확인할 수 있다.

표 1 3-브리지 LLC 컨버터 주요 정격 및 공진회로 파라미터

주요 정격	링크 전압 (V _{LINK})	700 V _{DC}
	출력전압(V _o)/출력전류(I _o)/출력용량(P _o)	0 V _{DC} ~120 V _{DC} /50 A/6 kW
	스위칭 주파수 (f _s)	160 kHz~410 kHz
공진 회로 파라미터	LLC 공진주파수 (f _r)	171 kHz
	공진 커패시턴스 (C _{r1} /C _{r2})	6.3 nF/6.33 nF
	1차 측 누설인덕턴스 (L _{p11} /L _{p12})	28.2 μH/28.1 μH
	2차 측 누설인덕턴스 (L _{s11} /L _{s12})	541 nH/545 nH
	자화인덕턴스 (L _{pm1} /L _{pm2})	291.1 μH/288.5 μH
	등가누설인덕턴스 (L _{eq1} /L _{eq2})	137.7 μH/137.6 μH
턴-수비 (N=N ₁ /N _{S1&12} , N _{P2} /N _{S2&22})	18 (36/2)	

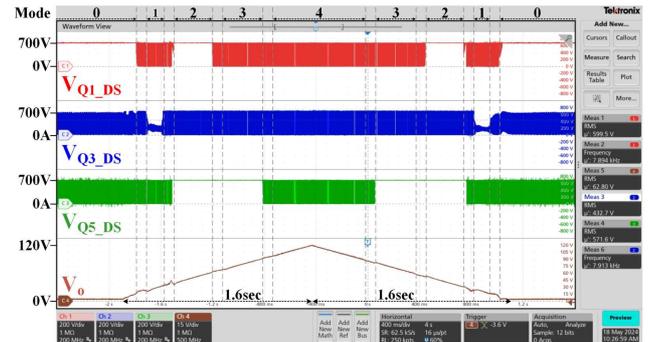


그림 3 동작모드 전환에 따른 출력전압 증감 실험 파형(부하전류 10 A) [CH 1: 200V/div, CH 2: 200V/div, CH 3: 200V/div, CH 4: 15V/div]

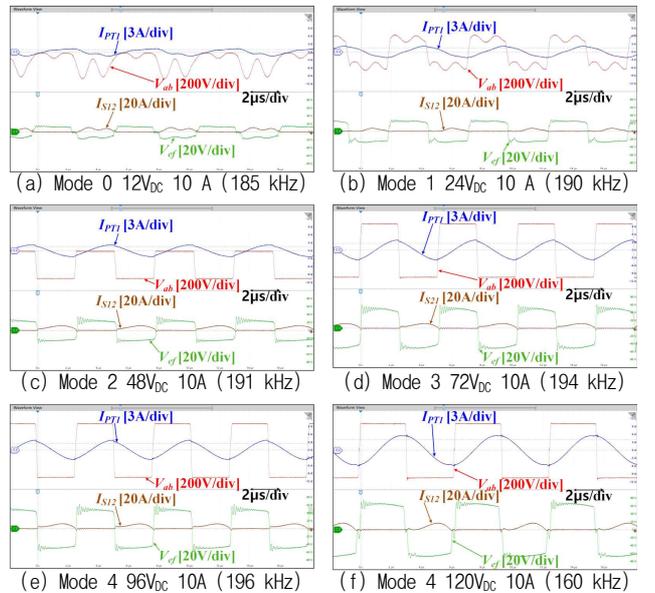


그림 4 Mode 0~4 1차 측 공진탱크 전압/전류(V_{ab}/I_{PT1}), 2차 측 공진탱크 전압/전류(V_{er}/I_{S12}) 실험 파형

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000220, 전북지역에너지 클러스터 인재양성)

참고 문헌

- [1] J. Deng, C. C. Mi, R. Ma and S. Li, "Design of LLC resonant converters based on operation-mode analysis for level two PHEV battery chargers," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 1595-1606, Aug. 2015.
- [2] R. Beiranvand, B. Rashidian, M. R. Zolghadri and S. M. H. Alavi, "Using LLC resonant converter for designing wide-range voltage source," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 5, pp. 1746-1756, May. 2011.