

넓은 출력전압 제어를 위한 보조권선 적용 LLC 공진컨버터

김진우, 박경수, 공성운, 국자표, 전용석, 원종섭, 김은수[†]
 진주대학교

LLC resonant converter with auxiliary winding for wide output voltage control

JW Kim, KS Park, SU Gong, KJ Pyo, YS Jeon, JS Won, ES Kim[†]
 JeonJu University

1.서론

자동차, 산업용 이동기기 등 다양한 분야에서 기존의 내연기관을 대체하는 전기모터와 배터리의 사용이 증가하는 추세이고, 가까운 거리를 이동하기 위한 NEV(Neighborhood Electric Vehicle)의 사용이 확대되고 있다. 이를 위한 넓은 출력전압 제어범위를 갖는 영전압스위칭(ZVS) LLC 공진컨버터들이 적용 검토되고 있다. 하지만 LLC 공진컨버터의 전압이득특성상 승·강압 동작을 위한 이득변화가 적어 전체적인 제어전압 범위를 넓히기에는 한계가 있었다. 이러한 문제에 대응하기 위해 그림 1에 나타난 바와 같이 LLC 공진컨버터에 있어서 토폴로지[FB(Full Bridge) ⇌ HB(Half Bridge)] 동작모드 전환 및 구간 중 정밀한 전압제어를 위한 모핑제어[Morphing Control, Frequency(FM) + Duty Modulation(DM)]를 통해 넓은 출력전압 제어범위를 갖게 되었다^[1, 2]. 하지만, 기존 모핑제어를 통한 동작모드 전환구간(FB ⇌ HB) 중에 듀티제어(DM)에 의해 하드스위칭(Hard Switching) 동작하는 문제점이 있었다.

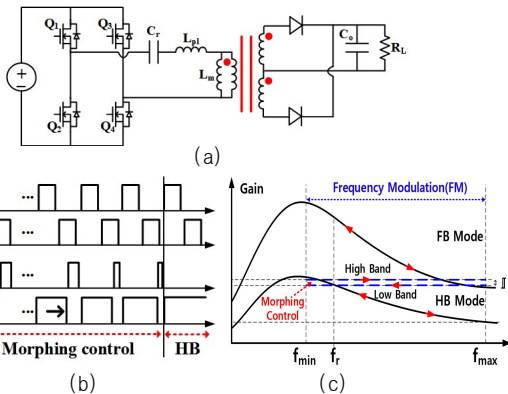


그림 1. (a) LLC공진컨버터 회로도, (b) 모핑제어, (c) LLC 공진이득특성

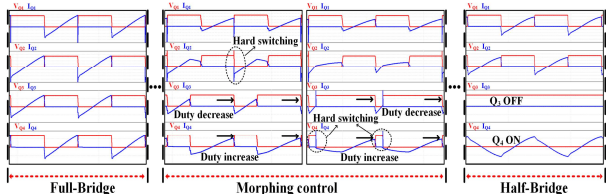


그림 2. 모핑제어(FM+DM)시 주 스위치 전압 및 전류 시뮬레이션 동작파형

본 논문에서는 동작모드전환구간(FB ⇌ HB) 중 모핑제어시 하드스위칭에 의한 문제점을 개선하기 위해 영전압스위칭(ZVS) 동작이 가능한 모핑제어[Phase-Shift Modulation(PM) + Frequency Modulation(FM)] 및 보조권선 적용 LLC 공진컨버터를 제안, 발표하고자 한다.

2.본론

2.1 보조권선적용 모핑제어 LLC 공진컨버터

보조권선 적용 LLC 공진컨버터는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 2개의 센터-탭(Center-Tap) 변압기에 2개의 추가 보조권선을 사용한 HB LLC 공진컨버터로 구성되어 있다. 회로의 1차 측은 주 스위칭소자(Q₁/Q₂, Q₃/Q₄)에 결선된 변압기(T₁, T₂)의 1차 누설인덕턴스(L_{pl}=L_{p11}, L_{p2})와 자화인덕턴스(L_m=L_{m1}, L_{m2}), 공진커패시터(C_r=C_{r1}, C_{r2}) 및 공진인덕터(L_r=L_{r1}, L_{r2})로 구성된다. 또한 회로의 2차 측에는 브리지정류다이오드(D₁~D₆)와 이에 결선된 2차측 누설인덕턴스(L_{s1}=L_{s11}, L_{s2}/L_{As1}=L_{As11}, L_{As2})를 갖는 2차측 주권선(N₂)과 보조권선(N_A)으로 구성된다.

제안된 회로는 1차측 상호교번 동작하는 주스위칭소자(Q₁/Q₂, Q₃/Q₄)의 위상관계에 따라 회로의 2차측 변압기권선은 인가되는 1차측 변압기 전압극성으로 인하여 연결된 정류다이오드를 통해 직병렬 연결되어 동작하고, 결과적으로 그림 3(b)과 같이 2가지 동작모드(In-Phase : 0°, Out-Phase : 180°)를 가져 넓은 출력전압범위(V_o: 18V_{DC}~120V_{DC})로 제어 동작할 수 있다. Q₁과 Q₃가 같은 위상일 때를 In-Phase 동작모드라 하고, 이와 반대로 Q₁과 Q₃이 반대 위상 스위칭 동작일 때를 Out-Phase 동작모드라 정의했지만, 변압기 1차측 권선의 극성 방향에 따라 다르게 대응할 수 있다. 따라서 In-Phase와 Out-Phase 동작모드에 따른 주권선 및 보조권선 연결로 인해 전류불평형을 저감할 수 있고, 주 스위칭소자(Q₁/Q₂, Q₃/Q₄)의 위상관계에 따라 변압기 2차측의 턴-수를 변화시켜 이득특성을 개선할 수 있어 다양한 성격의 배터리에 대응할 수 있다.

또한 In-Phase ⇌ Out-Phase 동작모드 전환시 급격하게 변화하는 임출력전압 이득특성으로 인해 발생할 수 있는 과도상태에 대응하기 위한 모핑제어로서 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 기존 모핑제어(DM+FM)와 다르게 영전압스위칭동작이 가능한 모핑제어(PM+FM)를 사용하여 토폴로지 동작모드전환 중 하드스위칭 방지와 정밀한 출력전압제어를 구현할 수 있었다.

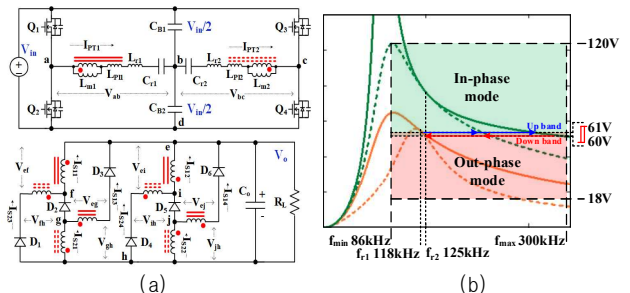


그림 3 제안된 보조권선 적용 LLC DC-DC 컨버터 제어개념도

그림 3(b)와 같이 출력전압이 $61V_{DC}$ 미만에는 Out-Phase로 동작하며 스위칭주파수를 저감하며 주파수제어(FM)을 통하여 전압이득을 높여 출력전압을 제어하게 된다. 출력전압이 Up Band인 $61V_{DC}$ 에 도달하게 되면 위상제어(PM, Out-Phase \Rightarrow In-Phase)를 통해 동작모드 전환하게 된다. 이때 위상제어에 따라 전압이득이 급격하게 상승하여 과도전압이 발생하는 것을 가변주파수제어(FM, $f_1 \Rightarrow f_{max}$)을 통해 상승한 입출력 전압이득을 보상한다. 이후 모핑제어 동작구간이 끝나면 In-Phase 모드에서 가변주파수제어(FM, $f_{max} \Rightarrow f_1$)를 통해 출력전압(V_o)을 제어하게 된다. 그림 4에 동작모드 전환시 제안된 모핑제어 (PM+FM) 개념도를 나타냈다.

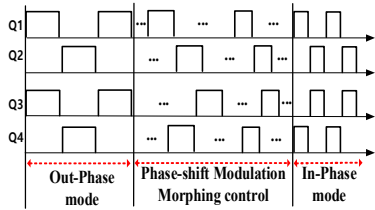


그림 4 제안된 모핑제어[Frequency(FM)+Phase-shift Modulation(PM)]

2.2 실험결과

표 1 보조권선 적용 LLC DC-DC 컨버터의 주요 정격 및 파라미터

Specification	Parameters
Input voltage, V_{in}	$700V_{DC}$
In-phase/Out-phase output voltage range, V_o	$18V_{DC} \sim 120V_{DC}$
Output current(I_o)/Power range(P_o)	$10A \sim 50A/6kW$
Out-phase/In-phase resonant frequency, f_{r1}/f_{r2}	$118 kHz/125 kHz$
Switching frequency range, f_s	$86 kHz \sim 300 kHz$
Switching devices, Q1 ~ Q6	UJ3C120040K3S ($1200V_{DC}$, $65A$, $35m\Omega$, SiC)
Output diodes, D1, D3, D4, D6/ D2, D5	UJ3D06560KS/UJ3D06560KS $\times 2$ ($650V_{DC}$, $60A$, $V_f: 1.5V_{DC}$, SiC)
Transformer turn ratio (Out-phase)	$N(=N_p/(N_s+N_A)) = 6(18/(2+1))$
Transformer turn ratio (In-phase)	$N(N_p/N_s) = 9(18/2)$
Pri./Sec. leakage inductance($L_{Lp1}/L_{Lp2})/(L_{L1}/L_{L2})$	($932nH/540nH$)/($314nH/322nH$)
Secondary auxiliary winding leakage inductance, L_{As1}/L_{As2}	$157 nH/161 nH$
Magnetizing inductance, L_{m1}/L_{m2}	$183.60 \mu H/182.35 \mu H$
Equivalent leakage inductance (Out-phase/In-phase) ,	(L_{eq1}/L_{eq3} , $16.45\mu H/16.41\mu H$)/ (L_{eq1}/L_{eq2} , $23.27\mu H/23.36 \mu H$)
Resonant inductor($L_{r1}/L_{r2})/capacitor(C_{r1}/C_{r2})$	($50.4\mu H/49.7\mu H$)/($22nF$)

본 논문에서는 다양한 배터리 정격에 대응할 수 있도록 넓은 출력전압 제어범위를 갖는 보조권선 적용 LLC 공진컨버터에 대해 표 1의 조건을 가지고 실험 검증하였다. 제안된 공진회로의 위상관계에 따라 Out-Phase(180°)모드와 In-Phase(0°)의 두 가지 동작모드를 가지며, 회로의 동작모드를 전환시킴으로써 넓은 출력전압제어범위로 동작 가능함을 보였다. 동작모드 전환 시 기존 모핑제어(DM+FM)에서 발생할 수 있는 하드스위칭 문제를 개선한 모핑제어(PM+FM)를 적용하여 동작모드 전환 중에도 영전압스위칭(ZVS) 동작이 유지되고 입출력이득 특성의 변화로 인해 생기는 출력전압 과도현상을 억제할 수 있었다. 또한 두 공진회로의 부하가 병렬로 연결되어 생기는 전류 불평형에 대해 보조권선을 적용하여 개선할 수 있었다. 이에 대한 검증은 위해 $6kW$ 시제품을 제작하여 입력전압 $700V_{DC}$ 조건에서 출력 기준전압(V_{ref})을 변경함으로써 넓은 출력전압제어범위($18V_{DC} \sim 120V_{DC}$) 동작과 동작모드 전환 중 급격한 출력전압 변동이 발생하지 않음과 공진회로의 전류의 위상 관계를 통해 ZVS 동작 유지, Out-Phase(180°)모드 동작 시 전류불평형 개선을 확인할 수 있었다. 또한 출력전압별 실험

파형을 통해 공진회로의 전압과 전류 위상 관계를 확인하여 각 동작모드의 ZVS 동작이 이루어짐을 확인하였으며, 전체 출력전압제어 범위에서 최소 90.54% 최대 96.47%의 효율을 갖으며 동작함을 볼 수 있었다. 향후 추가 연구를 통해 개선된 효율특성을 제공하고자 한다.

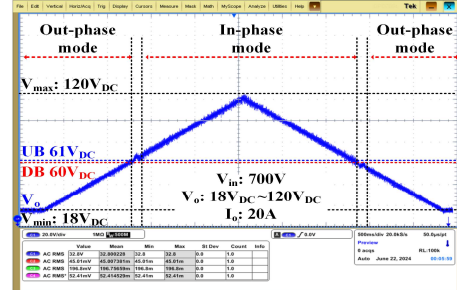


그림 5. 제안된 모핑제어(PM+FM)가 적용된 보조권선적용 LLC 공진컨버터 출력전압 증감 실험파형 ($20V/Div$, $500ms/Div$)

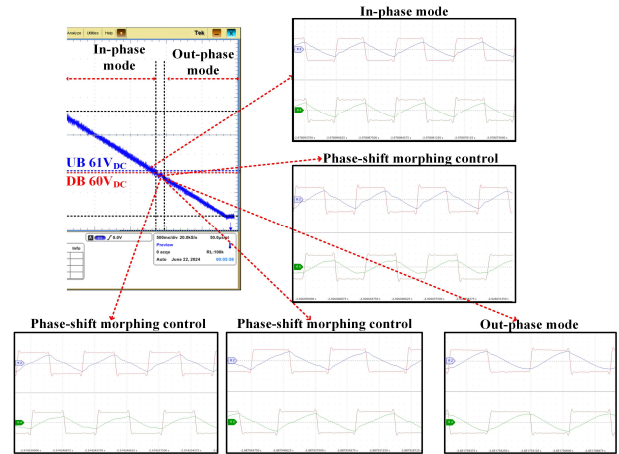


그림 6 출력전압 저감 동작실험 시 공진회로 전압, 전류 파형

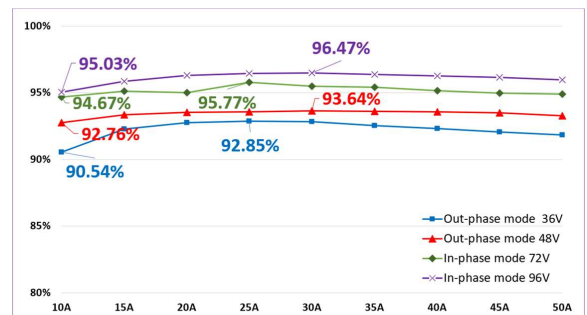


그림 7 출력전압별($96V_{DC}/72V_{DC}/48V_{DC}/36V_{DC}$) 효율 특성

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000220, 전북 지역에너지 클러스터 인제양성)

참고 문헌

- Jovanović, M. M.; Irving, B. T. "On-the-Fly Topology-Morphing Control-Efficiency Optimization Method for LLC Resonant Converters Operating in Wide Input- and/or Output-Voltage Range. IEEE Transactions on Power Electronics. 2016, 31, 2596-2608.
- Sang-Jae Yoo, Min-Ji Kim, Eun-Soo Kim and Yong-Seog Jeon. (2020). 3 Bridge LLC resonant converter for achieving wide output voltage control range based on topology morphing. Journal of Power Electronics, 20(6), 1420-1432.