

# 모핑제어를 적용하여 4가지 동작모드로 동작하는 3-브리지 LLC 공진컨버터

유상재, 장기찬, 우정원, 김은수<sup>†</sup>, 전용석  
전주대학교

## A 3-Bridge LLC resonant converter operating with 4 operation modes by applying morphing control

S.J Yoo, K.C Jang, J.W Woo, E.S Kim<sup>†</sup>, Y.S Jeon  
JeonJu University

### 1. 서 론

전기이송기기는 기존 내연기관이 적용된 이송기기에 비해 연료, 유지비용 등에서 유리하며, 특히, 전기지체차나 전동청소차 등은 실내사용 시 작업환경오염 측면에서 이점이 커 여러 산업현장에서 이용이 갈수록 증가하고 있다. 이러한 전기이송기기에서 사용되는 배터리를 충전하기 위한 충전장치에는 충전 단계에 따라 최소전압, 벌크충전전압, 플로팅충전전압과 같이 충전전압제어범위가 요구된다. 또한, 용도 및 출력에 따라  $24 V_{DC}/48 V_{DC}/96 V_{DC}$ 의 다양한 정격전압의 배터리팩이 사용되기 때문에 단일전원장치에서 이를 충족할 수 있도록 넓은 출력전압제어범위를 갖는 DC/DC 컨버터가 필요하다<sup>[1]</sup>.

출력전압제어범위를 확보하기 위한 토폴로지로서 영전압스위칭을 통해 고효율이 가능하고, 동작주파수의 상승을 통해 전력밀도의 상승을 꾀할 수 있는 LLC 공진컨버터의 적용이 확대되고 있다. 최근에는 넓은 출력전압제어범위를 위해서 하프-브리지에서 풀-브리지로 토폴로지를 변경함으로써 전압이득을 제어하는 방식이 제시되고 있으나 제어범위를 4배 이상까지는 확대가 불가하며<sup>[2]</sup>, 충전용량이 증가하여 중부하동작 시에도 넓은 출력전압제어범위를 확보하기 위해서는 변압기 설계 시 자화인덕턴스를 감소시켜야 한다. 이 경우 증가된 자화전류로 인해 스위치와 권선의 도통손실과 권선손실이 증가하기 때문에 효율을 떨어뜨리는 악영향을 줄 수 있다.

전압( $V_O$ )을 제어할 수 있는 3-브리지 LLC 공진컨버터를 제안하였다. 특히, 주파수제어(FM)와 듀티제어(DM)가 동시에 이루어지는 모핑제어(Morphing Control)를 적용함으로써 토폴로지 전환으로 인한 전압이득변화를 보상하여 안정적인 출력전압제어를 구현하였으며, 이를 정격  $100 V_{DC}/5 kW$ (최대  $120 V_{DC}/6 kW$ )급 시제품을 제작하여 실험 및 검증 수행하였다.

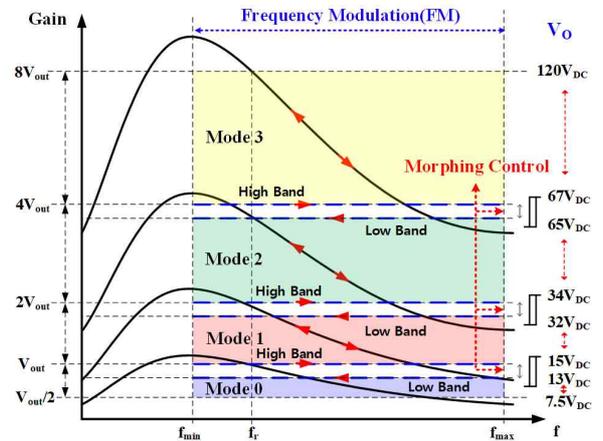


그림 2. 이득제어개념도

### 2. 본 론

#### 2.1 4가지 동작모드로 동작하는 3-브리지 LLC 공진컨버터 구성 및 동작모드

본 논문에서는 충전전원장치에서 요구되는 넓은 출력전압제어범위를 갖기 위해서 그림 1과 같은 3-브리지 LLC 공진컨버터를 구성하였으며, 이는 1차측 주 스위치  $Q_1 \sim Q_6$ 에 의해서 연결되는 공진회로 1과 공진회로 2로 이루어진 1차측 회로와 출력정류다이오드  $D_1 \sim D_6$ 로 정류되는 변압기 2차측 센터-탭 권선으로 연결된 2차측 회로로 구성된다. 각 공진회로 1차측(Res Tank 1, Res Tank 2)은 변압기 1차측 누설인덕턴스( $L_{p11}$ ,  $L_{p12}$ )와 자화인덕턴스( $L_{pm1}$ ,  $L_{pm2}$ ) 성분을 갖는 1차측 권선( $N_{P1}$ ,  $N_{P2}$ )과 공진커패시터( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ )로 이루어져 있으며, 2차측 회로는 센터-탭으로 구성되어 있어 동일한 턴-수를 갖는 변압기  $T_1$ 과 변압기  $T_2$ 의 2차측 권선( $N_{S11}/N_{S12}$ ,  $N_{S21}/N_{S22}$ )이 연결되어 있다.

이와 같이 구성된 3-브리지 LLC 공진컨버터는 주 스위칭 패턴에 따라 그림 3, 4, 5, 6과 같이 동작모드 0에서 3까지 4가지 동작모드로 전환함으로써 1차측의 공진회로 1과 공진회로 2가 직렬 또는 병렬로 연결되어 하프-브리지 또는 풀-

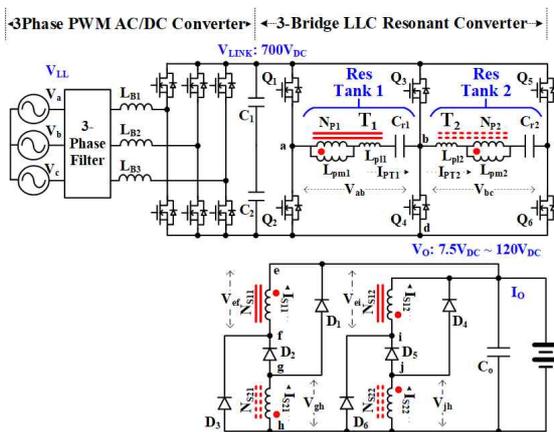


그림 1. 제안된 3-브리지 LLC 공진컨버터 적용 충전시스템 주회로도

따라서 본 논문에서는 더 넓은 출력전압제어범위를 확보하기 위해서 그림 2와 같이 4가지 동작모드(Mode 0, Mode 1, Mode 2, Mode 3)로 토폴로지를 전환하여  $V_{out}/2 \sim 8V_{out}$ 로 출력

브리지로 동작하며, 2차측은 변압기 극성으로 인해 동작모드 별로 병렬 또는 직렬로 연결되어 부하전류가 흐름으로써 각 동작모드 별 전압이득범위를 제어한다. 각 동작모드 구간 내에서는 LLC 공진컨버터의 전압이득 특성에 따라 동작주파수를 가변함으로써 출력전압을 제어하며, 4가지 동작모드 전환을 통해 출력전압을  $V_{out}/2 \sim 8V_{out}$ 까지 최대 16배의 범위로 제어가 가능하다<sup>[3]</sup>.

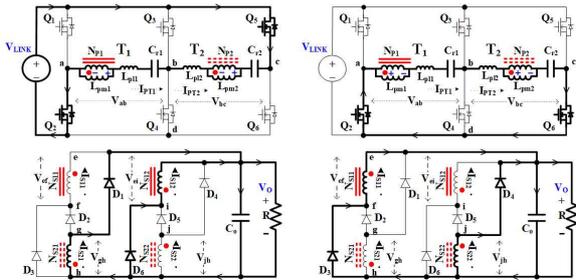


그림 3. 동작모드 0 전류흐름도

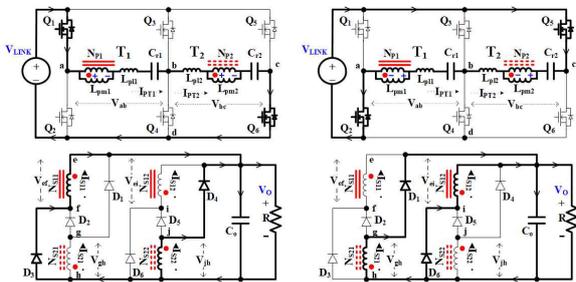


그림 4. 동작모드 1 전류흐름도

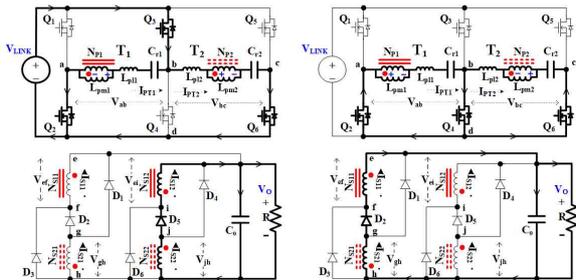


그림 5. 동작모드 2 전류흐름도

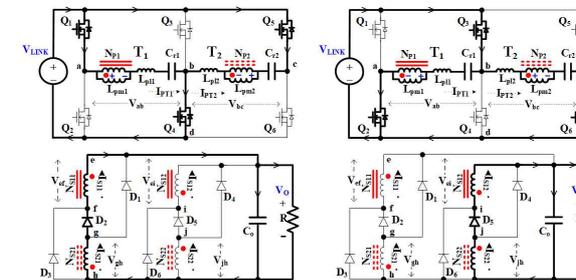


그림 6. 동작모드 3 전류흐름도

## 2.2 3-브리지 LLC 공진컨버터 이득특성

4가지 동작모드로 동작하는 3-브리지 LLC 공진컨버터의 제어를 위해서 Mathcad 프로그램을 통해 그림 7과 같이 동작모드 별 이득특성( $G_V = V_o/V_{LINK}$ )을 시뮬레이션 하였다. 부하조건에 따라 이득이 달라지는 LLC 공진컨버터의 특성상 경부하 10A 부하조건과 중부하 50A 부하조건에서 입출력전압이득특

성을 확인하였으며, 이에 따라 동작모드 별 전압구간과 동작주파수 제어범위를 결정하였다.

각 동작모드 구간 내에서 출력전압을 제어하기 위한 동작주파수 제어범위는 최소주파수( $f_{min}$ ) 158 kHz에서 최대주파수( $f_{max}$ ) 400 kHz의 범위로 제한하였으며, 이를 통해 동작모드 0에서 7.5 V<sub>DC</sub>~15 V<sub>DC</sub>, 동작모드 1에서 13 V<sub>DC</sub>~34 V<sub>DC</sub>, 동작모드 2에서 32 V<sub>DC</sub>~67 V<sub>DC</sub>, 동작모드 3에서 65 V<sub>DC</sub>~120 V<sub>DC</sub>의 출력전압제어범위로 동작하도록 하였다.

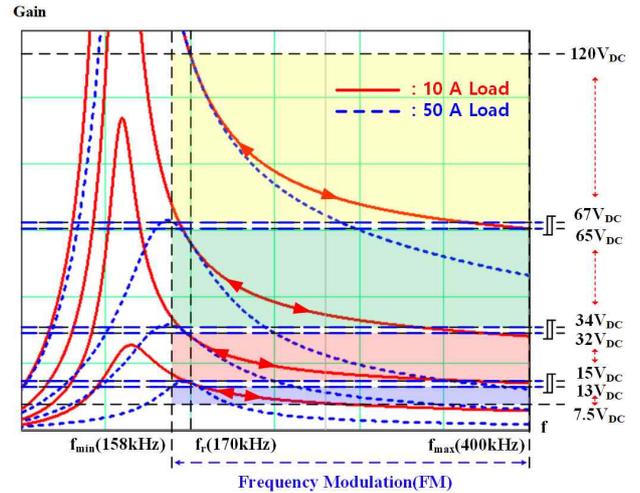


그림 7. 동작모드별 이득특성 곡선

## 2.3 3-브리지 LLC 공진컨버터 제어 블록다이어그램

3-브리지 LLC 공진컨버터를 4가지 동작모드로 전환하고, 각 동작모드에서 동작주파수 가변변조를 통해 출력전압을 제어하기 위한 제어블록도를 그림 8에 나타냈다. 제어블록도에서 동작모드 전환을 위한 모핑제어는 동작스위칭주파수를 제어하는 주파수제어(FM: Frequency Modulation)와 동작모드를 전환하는 듀티제어(DM: Duty Modulation)로 나눈다.

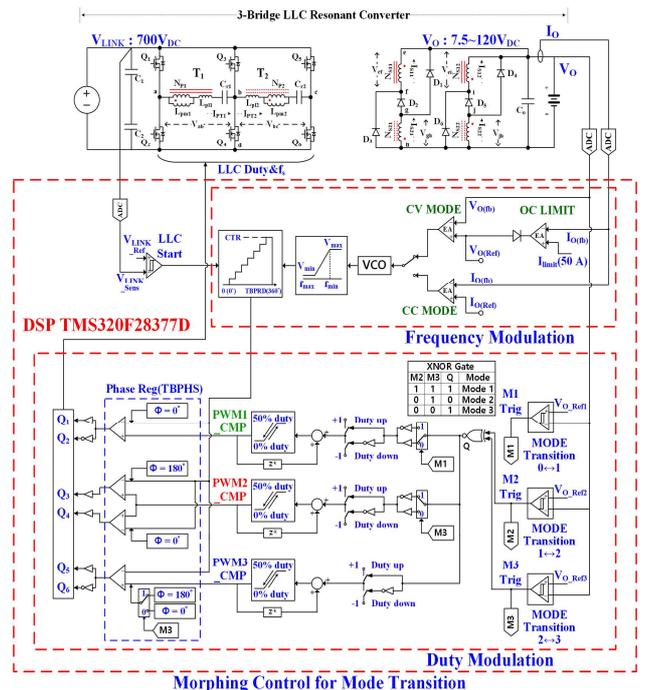


그림 8. LLC 공진컨버터 제어 블록도

그림 8에서 확인할 수 있듯이 주파수제어(FM)는 검출된 출력전압( $V_{O(fb)}$ )을 출력전압 레퍼런스( $V_{O(Ref)}$ )와 비교하여 PWM 모듈의 주파수를 제어함으로써 최소 및 최대동작주파수 범위 내에서 주 스위치의 동작주파수를 가변하여 위에서 분석한 이득특성에 따라 출력전압을 제어한다. 듀티제어(DM)는 출력전압( $V_{O(fb)}$ )이 미리 설정된 히스테리시스 밴드 전압( $V_{O,Ref1}$ ,  $V_{O,Ref2}$ ,  $V_{O,Ref3}$ )에 도달하였을 때 동작모드를 전환하며, 모핑제어를 적용하기 위해서 각 PWM 모듈의 듀티가 순간적으로 변화하는 것이 아니라 점진적으로 증가 혹은 감소하여 목표 듀티에 도달하도록 한다. 이때, 주파수제어(FM)와 듀티제어(DM)가 동시에 이루어지기 때문에 점진적으로 변화하는 듀티로 인한 이득변화가 주파수제어를 통해 보상되어 동작모드 전환 중에도 출력전압을 안정적으로 제어할 수 있다.

### 3. 실험 결과

본 논문에서는 4가지 동작모드로 동작하여 넓은 출력전압 제어범위로 동작하고, 동작모드 전환에 모핑제어를 적용하여 안정적으로 출력전압을 제어하는 3-브리지 LLC 공진컨버터를 검토하고 정격 100 V<sub>DC</sub>/ 50 A/5 kW 시제품을 통해 실험을 진행하였다. 이때 적용된 각종 주요사양과 공진회로의 파라메타는 표 1과 2에 표현하였다.

표 1 3-브리지 LLC 공진컨버터 입출력사양 및 적용 소자

Major ratings	Link voltage( $V_{LINK}$ )	700V <sub>DC</sub>
	Output Voltage( $V_O$ )/ Output current( $I_O$ )	7.5 V <sub>DC</sub> /50 A/900 W ~ 100 V <sub>DC</sub> /50 A/5 kW ~ 120 V <sub>DC</sub> /50 A/6 kW
Device	Switching elements ( $Q_1 \sim Q_6$ )	UJ3C120040K3S (1200 V, 65 A, 35 mΩ, SiC Mosfet)
	Output diodes ( $D_1, D_3, D_4, D_6$ )/( $D_2, D_5$ )	UJ3D06560KS/ UJ3D06560KS×2 (650 V, 60 A, $V_F$ : 1.5 V, SiC Diode)

표 2 공진회로 파라메타

Parameters	Resonant capacitors( $C_{r1}, C_{r2}$ )	7.33nF/3200 V <sub>DC</sub>
	Resonant frequency ( $f_r$ )	170kHz
Transformer ( $T_1, T_2$ )	Primary leakage inductance( $L_{p11}, L_{p12}$ )	37.06 uH/34.64 uH
	Secondary leakage inductance( $L_{s11}, L_{s12}$ )	431.2 nH/442.8 nH
	Magnetizing inductance( $L_{pm1}, L_{pm2}$ )	205.3 uH/ 207.8 uH
	Equivalent leakage inductance( $L_{eq1}, L_{eq2}$ )	120.2 uH/119.5 uH
	Turn-ratio ( $N_{P1}/N_{S11\&12}, N_{P2}/N_{S21\&22}$ )	18 (36/2)

그림 9는 동작모드 전환 동작을 확인하기 위한 실험파형으로써 측정위치는 주 스위치  $Q_2$ 의 양단전압( $V_{Q2,DS}$ )과 1차측 공진회로 전류( $I_{PT1}$ ) 및 출력전류( $I_O$ )와 출력전압( $V_O$ )이다. 해당 실험파형에서 출력전류 20 A 부하조건으로 동작모드 0/출력전압 7.5 V<sub>DC</sub>에서 동작모드 3/출력전압 120 V<sub>DC</sub>까지 1.125 초에 걸쳐 상승하였다가 다시 하강하는 전압파형을 확인할 수 있다. 이처럼 출력전압 레퍼런스가 변화함에 따라 짧은 시간동안 동작모드가 전환되면서 넓은 출력전압제어범위로 동작하며, 동작모드 전환에 모핑제어가 적용됨으로써 동작모드 전환시간 중에도 출력전압이 안정적으로 제어되는 것을 알 수 있다.

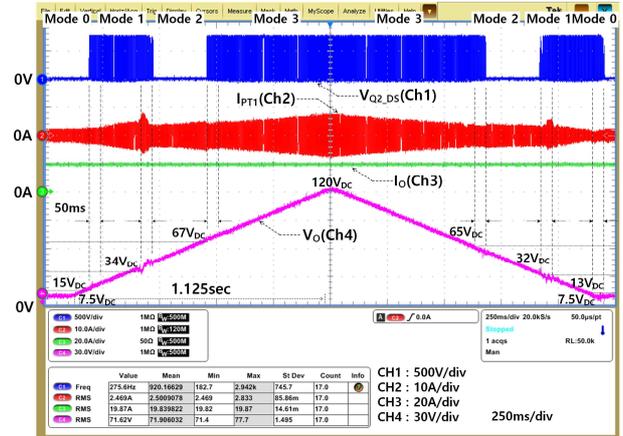


그림 9. 동작모드 전환 실험파형

그림 10은 동작모드 전환 실험파형을 자세히 보기 위해서 확대한 것으로 주 스위치  $Q_2$ 의 듀티가 동작모드 0에서 1로 전환 시 100%에서 50%로 변화하는 도중 70% 듀티를, 동작모드 1에서 2로 전환 시 50%에서 100%로 변화하는 도중 75% 듀티를, 동작모드 2에서 3으로 전환 시 100%에서 다시 50%로 변화하는 도중 82%의 듀티를 보이는 것을 확인할 수 있다.

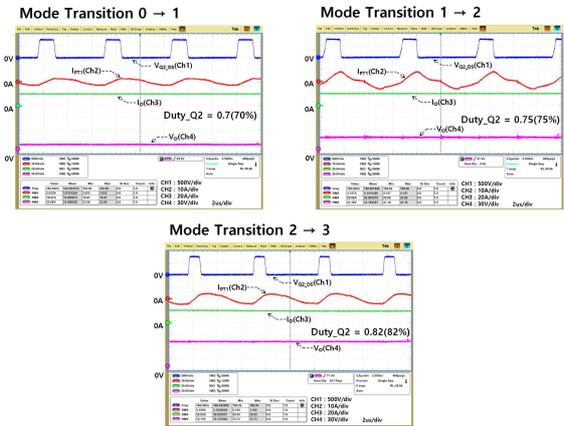


그림 10. 동작모드 전환 중 확대 실험 파형

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 지원 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20172020108500)입니다.

### 참고 문헌

- [1] Junjun Deng, Chunting Chris Mi, Ruiqing Ma, Siqi Li, "Design of LLC resonant converters based on operation-mode analysis for level two PHEV battery chargers," IEEE Trans. Mechatronics, vol. 20, no. 4, pp. 1595-1606, Aug. 2015.
- [2] Milan M. Jovanovic and Brian T. Irving, "On-the-Fly Topology - Morphing Control - Efficiency Optimization Method for LLC Resonant Converters Operating in Wide Input- and/or Output-Voltage Range," 2016 IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 2596-2608, March. 2016.
- [3] 김은수, "넓은 입력 전압 범위 또는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하는 LLC 공진 컨버터", 특허등록 1018376030000(2018.03.06.)