

# 30kW 고주파 용접 전원용 Full-Bridge 컨버터의 분산설계에 관한 연구

김민우\*, 허경현\*, 이우석\*, 최승원\*, 이일운\*, 이준영\*, 정계수\*\*, 이토 에이지\*\*, 변동섭\*\*  
 명지대학교\*, 현대중합금속(주)\*\*

## Research for distributed design for 30kW Full-Bridge converter for in high frequency welding machine

Min-Woo Kim\*, Gyeong-Hyeon Heo\*, Woo-Seok Lee\*, Seung-Won Choi\*, Il-Oun Lee\*,  
 Jun-Young Lee\*, Kye-Soo Jeong\*\*, Ei-Ji Ito\*\*, Dong-Seob Byun\*\*  
 Myongji University\*, Hyundai Welding Co, Ltd\*\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 용접 전원의 전력단 스위치로 MOSFET을 사용하는 ZVS-PWM 스위칭 방식의 풀브리지 회로에 대한 연구결과를 발표한다. 제안된 ZVS-PWM 풀브리지 컨버터는 스위칭 주파수를 60kHz로 사용하고 변압기를 병렬로 적용해 고전력밀도를 갖도록 설계되었다. 변압기 병렬 구동 시 발생하는 전력 불균형 현상은 공통모드 결합 인덕터(CMCI; Common Mode Coupled Inductor) 부착을 통해 개선되었다. 본 논문은 제안된 회로의 연구를 실험을 통해 검증하고 이에 대한 실험 결과 및 분석을 나타내고 있다.

### 1. 서론

용접기의 출력은 저전압과 고전류의 특성을 가지기 때문에 용접 전원의 인버터 부에서 사용하는 스위치 소자는 IGBT와 같은 고전류용 소자가 주로 사용된다.<sup>[1]</sup> 이때 용접 전원에 사용되는 고전류 스위치 소자의 Tail Current 특성 때문에 고전류 스위치를 사용한 용접 전원은 높은 스위칭 주파수에 동작될 수 없고, 고전력밀도 달성에 불리하게 작용한다. 이는 변압기나 인덕터와 같은 자성체의 크기가 스위칭 주파수에 반비례하는 특성을 가지기 때문인데, 낮은 스위칭 주파수의 사용은 큰 자성체의 사용을 동반하게 되어 전력밀도가 낮아지는 주 원인이 된다. 이에 제안하는 컨버터는 인버터부의 스위칭 소자로 MOSFET을 사용하고 고주파 동작을 구현하여 자성체 소자의 크기를 줄이고 더 높은 전력밀도를 달성하였다.

고주파 용접기의 경우 변압기 설계시 페라이트 계열의 코어를 사용해야 하고, 용접기와 같이 대용량 전력변환기의 경우 단일 코어로 설계하기 어렵다. 이에 제안하는 용접 전원의 변압기는 전력밀도 및 부품 배치를 고려하여 병렬구조를 채택하였다. 병렬구조는 변압기에 인가되는 전력 스트레스를 낮추고 코어 높이를 감소시켜 전력밀도를 고려한 구조 설계를 용이하게 한다. 설계된 변압기의 최대 용량은 17.5kW이며, 설계된 변압기 두 개를 병렬로 연결하여 30kW의 회로를 구현하였다. 이때, 변압기를 병렬로 사용 시 발생하는 임피던스 차이에 의한 전력 불균형 현상을 보정하기 위해 공통모드 결합 인덕터(이하 CMCI)를 사용한다.

### 2. 본론

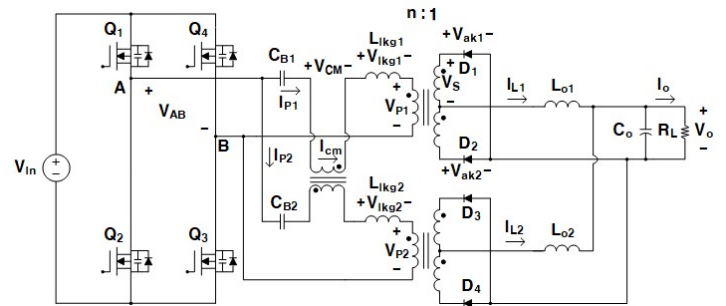


그림 1 용접 전원 DC-DC 풀브리지 컨버터

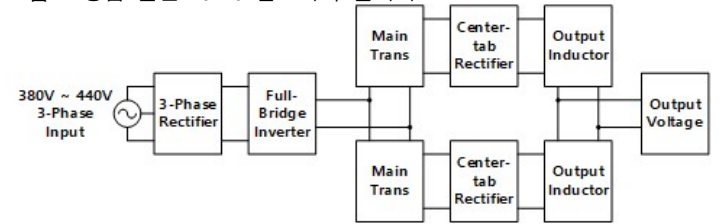


그림 2 용접 전원용 DC-DC 컨버터의 구조도

#### 2.1 용접 전원용 풀브리지 컨버터의 개요

그림 1은 30kW급 용접 전원을 위한 본 논문에서 발표할 DC-DC컨버터를 나타내고, 그림 2는 용접 전원에 적용된 풀브리지 컨버터의 전체적인 구조를 나타내고 있다. 제안된 컨버터의 토폴로지는 중급 용량의 전력전달에 알맞은 토폴로지인 풀브리지 컨버터를 채택 하였으며 ZVS-PWM 스위칭 방식으로 영 전압 스위칭을 달성하였다. 하나의 풀브리지 인버터에서 두 개의 변압기가 병렬로 연결된 구조를 취하고, 연결된 두 변압기의 입력을 CMCI로 커플링 하였다. 각 변압기의 2차측에는 센터탭 방식의 정류단이 있고, 센터탭의 중심점이 출력 인덕터에 연결되는 구조를 갖는다.

#### 2.2 CMCI 동작 분석

제안하는 컨버터에서 CMCI는 병렬로 연결된 변압기의 입력측을 역방향 도트로 커플링 시킨다. 누설 인덕턴스 등의 차이로 각 변압기의 임피던스가 서로 다를 때, 두 변압기의 전압 차이만큼 CMCI에 전압이 인가되는 방식으로 균형을 잡아주게 된다.

그림 3은 CMCI의 주요파형과 변압기의 주요파형을 비교하

여 나타난 것이다. CMCI동작 파형은 각 변압기의 임피던스 균형이 맞지 않아야 보이므로, 해당 파형은 누설인덕턴스  $L_{lkq1}$ 의 값 보다  $L_{lkq2}$ 의 값이 더 큰 것으로 가정하여 분석하였다. PSIM tool을 이용한 분석 결과, 자화 인덕턴스를 고려하여 계산된  $V_{CM}$  값과 자화인덕턴스를 고려하지 않고 계산된  $V_{CM}$  값의 차이가 적으므로 본 논문의 분석 수식은 자화인덕턴스를 거의 고려하지 않고 계산한 값으로 전개한다.

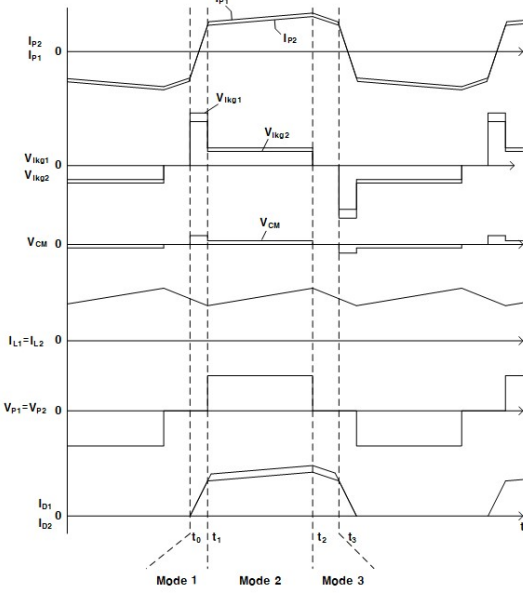


그림 3 풀브리지 컨버터 변압기의 파형과 CMCI 파형

그림 3은 CMCI의 동작은 크게 세 가지로 나뉘며 이는 Mode 1, Mode 2, Mode 3으로 나누어 분석한다.

Mode 1 ( $t_0 \leq t < t_1$ ) : freewheeling 구간으로, 변압기 양단의 전압이 0V인 구간이므로 다음 조건을 유추 할 수 있다.

$$V_{P1} = V_{P2} = 0V \quad (1)$$

또,  $L_{lkq1}$ 보다  $L_{lkq2}$ 가 더 크지만, CMCI에 의해 전체적인 인덕턴스 값이 보정되어 양측 변압기의 1차측 전류 상승비는 동일하다. 따라서 Mode 1에선 수식 2가 성립하고, 수식 2로부터 수식 3도 유추 가능하다.

$$I_{P1} = I_{P2} \quad (2)$$

$$\frac{V_{lkq1}}{L_{lkq1}} = \frac{V_{lkq2}}{L_{lkq2}} \quad (3)$$

또, Mode 1 구간에서 각 변압기의 전압 루프는 아래와 같이 수식 (4), (5)로 표현된다.

$$V_{AB} = V_{CM} + V_{lkq1} + V_{P1} \quad (4)$$

$$V_{AB} = -V_{CM} + V_{lkq2} + V_{P2} \quad (5)$$

여기서, 위의 수식 (1), (2), (3)으로부터 Mode 1구간에서의  $V_{CM}$ ,  $V_{lkq1}$ ,  $V_{lkq2}$ 를 유도 할 수 있다.

$$V_{CM} = \frac{(L_{lkq2} - L_{lkq1}) V_{AB}}{L_{lkq1} + L_{lkq2}} \quad (6)$$

$$V_{lkq1} = \frac{2L_{lkq1} V_{AB}}{L_{lkq1} + L_{lkq2}} \quad (7)$$

$$V_{lkq2} = \frac{2L_{lkq2} V_{AB}}{L_{lkq1} + L_{lkq2}} \quad (8)$$

Mode 2 ( $t_1 \leq t < t_2$ ) : Powering 구간으로, 수식 (9), (10), (11)의 조건을 만족한다고 가정하고 해석한다.

$$V_{P1} = V_{P2} \quad (9)$$

$$I_{L1} = I_{L2} = \frac{V_{P1}/n - V_o}{L_o} \quad (10)$$

$$I_{P1} = I_{P2} = \frac{I_{L1}}{n} = \frac{V_{P1}/n - V_o}{L_o} \quad (11)$$

수식 (4), (5)로부터 수식 (12)를 유도 가능하고, 이를 수식 (13), (14)로 변환 가능하다.

$$V_{AB} = V_{lkq1} + V_{P1} + V_{CM} = L_{lkq1} I_{P1} + V_{P1} + V_{CM} \quad (12)$$

$$= L_{lkq1} \frac{V_{P1}/n - V_o}{nL_o} + V_{P1} + V_{CM} \quad (13)$$

$$= L_{lkq2} \frac{V_{P2}/n - V_o}{nL_o} + V_{P2} + V_{CM} \quad (14)$$

수식 (13), (14)를 이용하여 수식 (15), (16), (17)을 유도한다.

$$V_{P1} = V_{P2} = \frac{2V_{AB}nL_o + V_o(L_{lkq1} + L_{lkq2})}{(L_{lkq1} + L_{lkq2})/n + 2nL_o} \quad (15)$$

$$V_{lkq1} = L_{lkq1} \frac{V_{P1}/n - V_o}{nL_o} \quad (16)$$

$$V_{lkq2} = L_{lkq2} \frac{V_{P2}/n - V_o}{nL_o} = L_{lkq2} \frac{V_{P1}/n - V_o}{nL_o} \quad (17)$$

수식 (15), (16), (17)을 이용하여  $V_{lkq1}$ 과  $V_{lkq2}$ 를 구하면

$$V_{lkq1} = L_{lkq1} \frac{V_{P1}/n - V_o}{nL_o} \quad (18)$$

$$V_{lkq2} = L_{lkq2} \frac{V_{P2}/n - V_o}{nL_o} \quad (19)$$

$$= L_{lkq2} \frac{V_{P1}/n - V_o}{nL_o}$$

수식 (18), (19)로 수식(12)에서 표기된  $V_{CM}$ 를 구하면

$$V_{CM} = \frac{(V_{AB} - nV_o)(L_{lkq2} - L_{lkq1})}{L_{lkq1} + L_{lkq2} + 2n^2L_o} \quad (20)$$

Mode 3 ( $t_2 \leq t < t_3$ ) : freewheeling 구간으로, 이때는 1차측에서 에너지 전달이 되지 않고, 출력인덕터에 전압이  $-V_o$

만큼 걸리므로 인덕터전류  $I_{L1}$ 과  $I_{L2}$ 는  $-\frac{V_o}{L_o}$ 의 기울기로 감소

한다.

## 2.3 실험 결과

표 1 용접 전원 풀브리지 컨버터의 설계사양

$V_{in}$	620[Vdc]	$V_o$	50[Vdc]
$f_s$	60[kHz]	$P_o$	30[kW]

위 표 1은 설계된 컨버터의 사양을 표기하고 있고, 그림 4와 그림 5는 20kW 부하조건에서 CMCI의 부착여부에 따른 파형의 차이를 나타내고 있다. 실제로 제작한 용접 전원의 변압기 누설인덕턴스의 값 차이는 거의 없으므로 100A/div의 단위에 서 눈에 띄는 차이를 구별하긴 힘들지만, 두 파형을 비교하였을 때 CMCI를 부착하지 않은 그림 4의  $I_L$  전류의 균형이 그림 5의  $I_L$  전류균형보다 나쁜 것을 확인 할 수 있다.

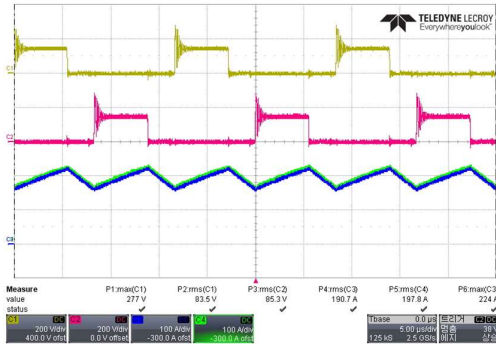


그림 4 CMC1 미부착시 컨버터 파형 CH1: Vak1, CH2: Vak2, CH3: IL1, CH4: IL2 (@20kW)

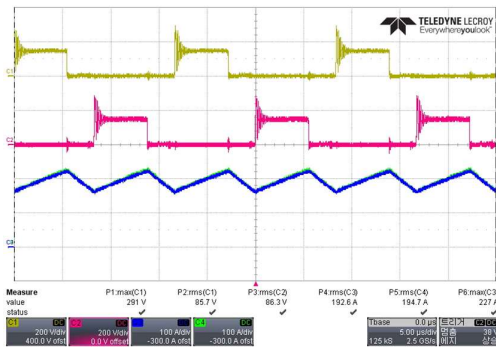


그림 5 CMC1 부착시 컨버터 파형. CH1: Vak1, CH2: Vak2, CH3: IL1, CH4: IL2 (@20kW)

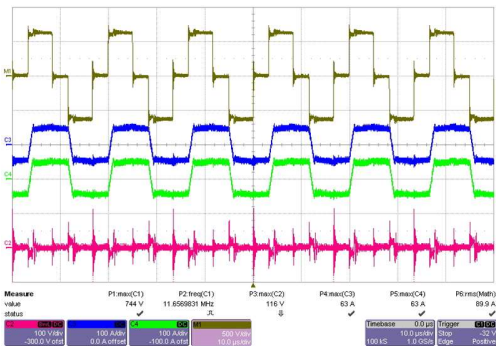


그림 6 용접전원 DC Stack 파형 CH1: VAB, CH2: VCM, CH3: IP1, CH4: IP2 (@30kW)

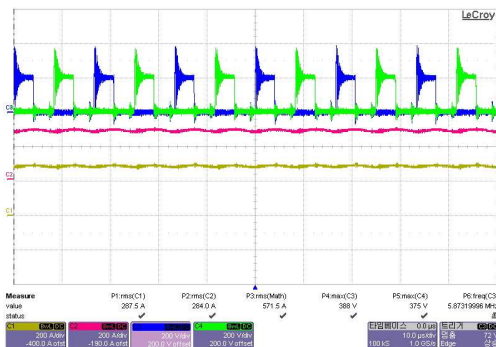


그림 7 용접전원 DC Stack 파형 CH1: IL1, CH2: IL2, CH3: VD1, CH4: VD2 (@30kW)



그림 8 용접전원 DC Stack 효율 데이터 @30kW

그림 6과 그림 7은 30kW 전부하 조건에서 1차측, 2차측의 주요 전압, 전류 파형을 보여준다. 그림 6과 그림 7에서는 변압기 양단 전압과 병렬 연결된 변압기의 균형을 확인하기 위해  $V_{CM}$  파형과  $I_P$  전류를 각각 측정하였고, 2차측의 균형 또한 확인하기 위해서 다이오드 양단전압과 인덕터의 출력전류를 비교하여 측정하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 MOSFET를 사용한 고주파 용접 전원 구조 및 병렬구조의 변압기를 제안하여 고전력밀도를 달성하였고, CMC1를 사용하여 기존에 존재하던 병렬구조의 균형문제를 개선하였다. 실험 결과, 입력 620V 조건에서 93.97%의 효율을 달성하였다.

이 논문은 현대중합금속(주)과 2019년도 정부(통상산업부)의 재원으로 한국산업 기술 평가위원회의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 10076430)

### 참고 문헌

- [1] 안우영, 이원구, 한명수 “인버터 용접기의 기술 개발 사례”, 전력전자 학회, 전력전자 학회지 19-3, 2014.06, page(s): 38-46
- [2] 조인호, 문건우 “영전압-영전류 스위칭 위상천이 풀브리지 컨버터”, 전력전자 학회, 전력전자 학술대회 논문집, 2011.07, page(s): 362-363
- [3] 신준영, 이재민, 최승원, 이준영 “액티브 스너버를 이용한 고주파 용접기 컨버터 개발”, 전력전자 학회, 전력전자 논문지, 2016.08, page(s): 351-355
- [4] 권순걸, 문상필 “새로운 하프브리지 소프트 스위칭 PWM 인버터를 이용한 용접기용 DC-DC 컨버터의 개발”, 대한전자공학회, 전자공학회 논문지, 2008.07, page(s): 60-67
- [5] 허경현, 최진용, 최승원, 이일운, 이준영, 송형석 “Coupled Inductor를 사용한 대형수소전기화학차용 7kW급 LDC개발”, 전력전자 학회, 전력전자학회 학술대회 논문집, 2019.07, page(s): 263-264
- [6] 최진용, 허경현, 이우석, 최승원, 이일운, 이준영, 이승준, 오광호, 이상혁 “커먼모드 커플드 인덕터를 적용한 위상천이 풀브리지 컨버터 LDC 설계 및 분석”, 전력전자학회, 전력전자학회 학술대회 논문집, 2019.07, page(s): 20-22