

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.^[1] 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

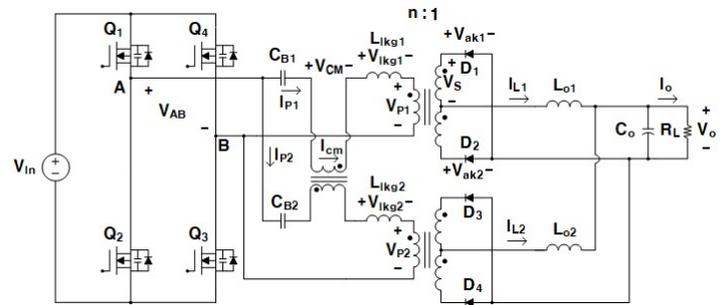


그림 1 용접 전원 DC-DC 풀브리지 컨버터

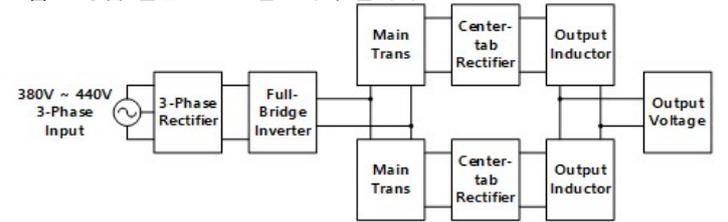


그림 2 용접 전원용 DC-DC 컨버터의 구조도

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. CMCI 동작 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.

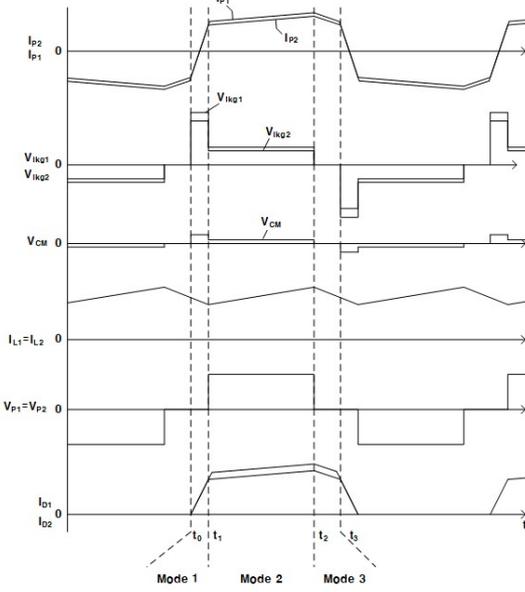


그림 3 풀브리지 컨버터 변압기의 파형과 CMCI 파형

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.

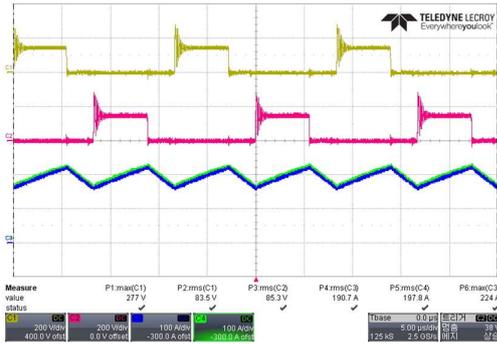


그림 4 CMC1 미부착시 컨버터 파형 CH1: Vak1, CH2: Vak2, CH3: IL1, CH4: IL2 (@20kW)

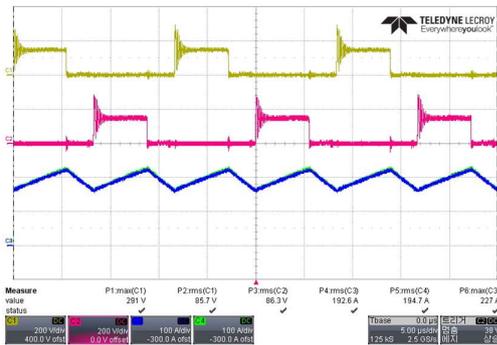


그림 5 CMC1 부착시 컨버터 파형. CH1: Vak1, CH2: Vak2, CH3: IL1, CH4: IL2 (@20kW)

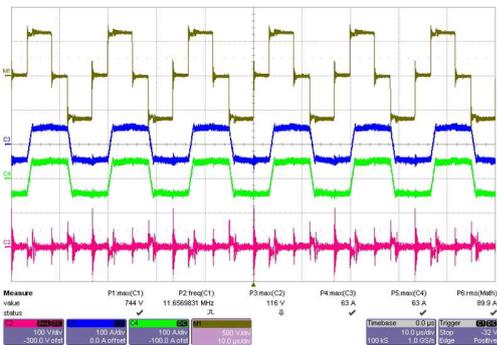


그림 6 용접전원 DC Stack 파형 CH1: VAB, CH2: VCM, CH3: IP1, CH4: IP2 (@30kW)

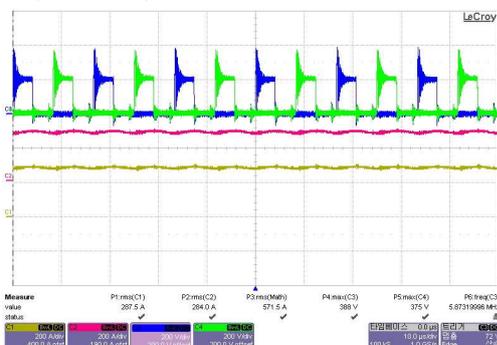


그림 7 용접전원 DC Stack 파형 CH1: IL1, CH2: IL2, CH3: VD1, CH4: VD2 (@30kW)



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