

IGBT 방식의 고효율 도금용 정류기 개발

김세민, 우현욱, 이세나, 이인혁, 송성근, 박성준
 전남대학교 전기공학과

Development of high efficiency plating rectifier using IGBT

Se-Min Kim, Hyun-Wook Woo, Se-Na Lee, In-Hyuk Lee, Sung-Geun Song, Sung-Jun Park,
 Chonnam National University

Abstract - 본 연구는 도금용 정류기의 성능개선 및 부피저감을 위해 PWM 방식의 정류기 구성에 관한 것이다. 제안된 PWM(Pulse-width modulation) 정류기는 기존의 SCR 정류기에 비하여 전류제어의 속응성을 개선할 수 있었으며, 그 사이즈 면에서 기존방식에 비하여 대폭 감소할 수 있었다. 또한 출력전압 15[V], 출력전류 1,000[A]인 15[Kw]급 PWM정류기 프로토타입을 제작 및 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

1. 서론

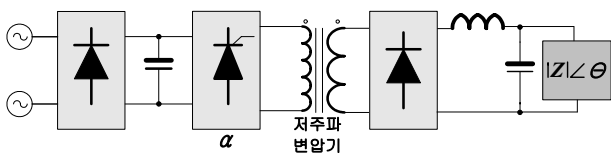
산업사회가 발달함에 따라 도금의 정도에 대한 중요도가 증가하고 있다. 도금용 정류기는 저전압 대전류 특성을 요구하고 있으므로 기존의 전원에서 정류기를 구성할 경우 감압변압기의 사용이 필수적이다. 기존의 도금용 정류기는 SCR 인버터와 저주파 변압기 및 다이오드 정류기로 구성되며, 변압기의 사이즈 및 경제성에 대한 부담으로 제품의 경쟁력을 잃고 있다. SCR 방식의 정류기는 저주파 방식으로 구동됨으로 출력전압의 제어정도가 크게 떨어지며, 변압기의 무게가 무겁고 소음과 효율이 좋은 편이 못된다. 최근 이러한 문제를 극복하기 위해 도금용 정류기에도 PWM 방식을 이용한 고성능 정류기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. PWM 정류기는 변압기에 대한 부담을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 에너지 절감의 효과와 고밀도 에너지 인가에 따른 전류 편차를 감소시킴으로써 도금의 균일성을 유지할 수 있다^[1].

본 논문은 IGBT를 이용하여 고주파 스위칭을 통한 PWM 제어를 함으로써 도금용 SCR 정류기 가격의 대부분을 차지하는 저주파 변압기를 제거할 수 있는 PWM 정류기 구성에 대한 연구이다. 본 연구에서 PWM 정류기는 Full-bridge inverter와 고주파 변압기를 결합하고, 전류 도통손실 저감을 위하여 변압기 2차 측 전류 루프내의 다이오드 수가 최소인 정류기로 구성하였다. 또한 본 연구에서 실제 도금용 정류기의 사양인 출력전압 15[V], 출력전류 1000[A]인 PWM정류기 프로토타입을 제작 및 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 본론

2.1 도금용 정류기의 원리

도금용 정류기는 저전압 대전류 특성을 요구함으로 SCR을 이용한 정류기의 구성은 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 기존의 SCR방식의 도금용 정류기의 구성

그림 1에서 보는바와 같이 기존의 SCR방식의 도금용 정류기는 SCR인버터의 α 각 제어에 의한 가변 교류전압을 발생시킨다. 이 전압을 낮은 전압으로 바꾸기 위해 저주파 감압변압기를 사용하고, 다이오드 정류기에 의해 정류를 행한다. 또한 정류전압의 리플을 보상하기 위해 큰 용량의 L-C평활용 필터를 구성하게 된다.

$$V_{dc} = a \frac{2V_m}{\pi} \cos\alpha \quad (1)$$

$$a_n = a \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$b_n = a \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

SCR 정류기에서 α 각에 따른 프리에 급수 항은 식 (1)과 같다. 지연각 α 는 0°~90도 범위 내에서 제어하여 출력전압은 $0 - aV_m/\pi$ 까지 가변이 가능하나, 출력전압의 고조파 성분은 크게 나타남으로 이를 제거하기 위한 필터회로가 필수적이다. 필터 커패시터 임피던스는 부하임피던스보다 훨씬 적어야 한다.

$$|Z| \gg \frac{1}{n\omega C} \quad (2)$$

식 (1)의 조건에서 일반적으로 다음관계가 성립하도록 콘덴서 용량을 결정한다.

$$|Z| = \frac{10}{n\omega C} \quad (3)$$

식 (3)의 조건에서 필터용 C가 결정되면 부하조건은 무시될 수 있다. 전압분배법칙에 의해 출력에 나타나는 n차 고조파 성분은 아래와 같다.

$$V_o(n\omega) = \left[\frac{-1}{(n\omega)^2 LC - 1} \right] V_n(n\omega) \quad (4)$$

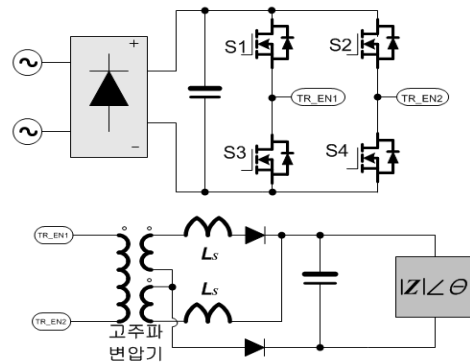
이때 모든 고조파에 의한 리플전압의 총합은 아래식과 같이 결정된다.

$$V_{ac} = \sqrt{\sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} V_o(n\omega)^2} \quad (5)$$

따라서 리플율은 식 (6)과 같이 정의되고, 일반적으로 SCR정류기에서 이 리플율을 만족하기 위해서는 매우 큰 필터가 요구되는 단점이 있다.

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \times 100 [\%] \quad (6)$$

따라서 본 논문에서는 변압기 및 필터의 사이즈를 줄이기 위해 IGBT를 이용하여 도금용 PWM 정류기를 그림 2와 같이 구성하였다. 필터용 리액턴스는 변압기 자체의 누설리액터를 사용하였다.



〈그림 2〉 본 논문에서 제안한 IGBT 방식의 도금용 정류기의 구성

그림 2에서 보는바와 같이 본 논문에서 제안한 IGBT 방식의 도금용 PWM 정류기는 단상 220V의 입력을 받아서 정류회로를 거치고 정류된 DC 전압을 IGBT를 이용한 Full-bridge inverter를 이용하여 고주파 감압변압의 1차 측에 인가된다. 고주파 변압기의 2차 측 출력은 2권선방식의 양과 다이오드 정류기를 통하여 전류 루프시 전력반도체 소자수를 최소한 대 전류용에 적합한 구성을 취하였다.

제안된 도금용 정류기의 출력전압은 스위칭 소자인 IGBT의 시비율

(duty ratio)에 따라 제어된다. 따라서 필터단의 입력 전압은 식(7)과 같다.

$$V_j = dV_i + \frac{2V_i}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi d) e^{j(2\pi f_n)t} \quad (7)$$

양과 정류기를 거친 필터단 입력전압은 스위칭 주파수의 배수인 고조파 성분과 직류성분으로 구성되어 있다. 필터를 통해 고조파 성분이 제거되면 부하에 걸리는 출력 전압은 직류 성분만 남게 되고 관계식은 식(8)과 같다.

$$V_o = dV_i \quad (8)$$

또한 그림 2의 인덕터 전류 리플은 식(9)와 같다.

$$\Delta I_L = \frac{V_i - V_o}{L} dT_s \quad (9)$$

평활 콘덴서의 전압리플은 인덕터의 전류 리플을 나타내며 출력전압 리플 식은 식(10)와 같다.

$$\Delta v_o = \frac{1}{LC} \frac{V_i(1-d)d}{8f_s^2} \quad (10)$$

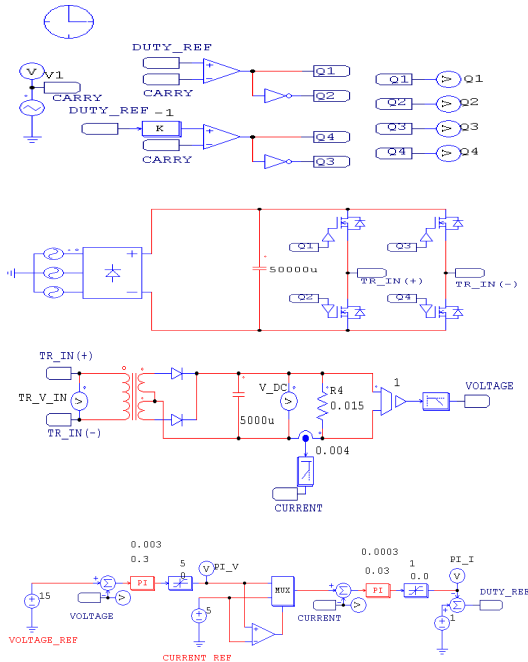
식(10)을 통하여 출력 전압의 최대 리플을 구할 수 있으며 다음 식 (11)과 같다.

$$\Delta v_o = \frac{1}{32} \frac{V_i}{LCf_s^2} \quad (11)$$

도금용 정류기의 고주파 변압기 2차 측 출력을 입력으로 받은 양과 정류기의 출력전압 리플은 스위칭 주파수와 인덕터 및 콘덴서의 용량과 시비율에 따라서 결정된다. 출력전압의 리플을 감소시키기 위해서는 필터단의 인덕터와 콘덴서의 용량을 높이는 것과 스위칭 주파수를 높이는 방법이 있다. 그러나 스위칭 주파수를 높이는 것은 스위칭 손실의 증가로 인한 효율 감소의 한계가 있으며, 인덕터와 콘덴서의 용량 증가는 프로토타입의 부피증가와 비례하며 가격 면에서도 부담을 피할 수 없다.

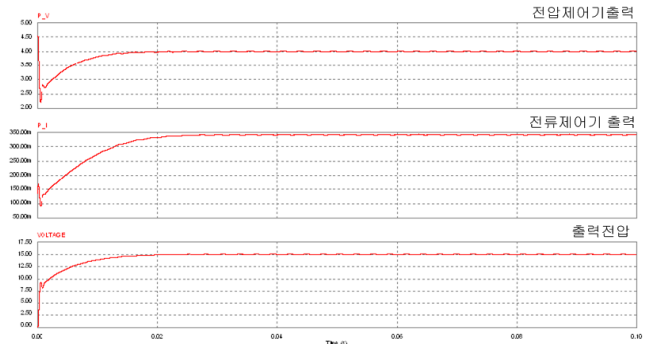
2.2 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3은 제안된 IGBT 방식의 고효율 도금용 정류기의 타당성을 입증하기 위한 PSIM 시뮬레이션 회로도이다.

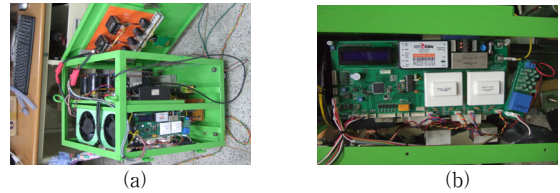


〈그림 3〉 시뮬레이션 회로도

그림 4는 기동특성을 조사하기 위해 전압제어기 출력, 전류제어기 출력, 출력전압에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이때 부하저항은 0.015[Ω]으로 출력전압 15 [V]에서 15 [Kw]출력이 되도록 하였다. 전류제어기의 직류이득은 0.03, 시정수는 0.3 [ms]로 설정하였고, 전압제어기의 직류이득은 0.04, 시정수는 3 [ms]로 설정 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 그 특성은 양호하게 나타남을 알 수 있다.

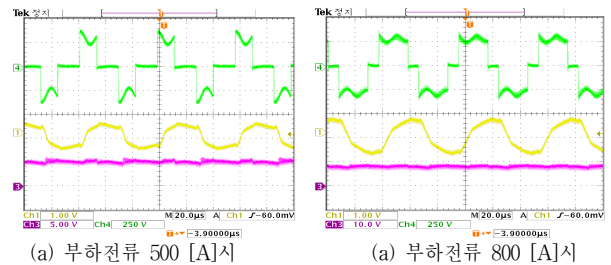


〈그림 4〉 시뮬레이션 파형



〈그림 5〉 도금용 PWM정류기의 프로토타입

그림 5는 제작한 도금용 정류기의 프로토타입으로 (a)는 전체 모습이고, (b)는 제어기의 모습이다. 프로토타입에서 IGBT는 Semikron사의 SKM200GB128D를 사용하였다. 제어용 마이컴은 Atmel사의 Atmega128을 사용하였고, Phase-shift방식으로 그 스위칭 주파수는 17[KHz]이다.



〈그림 6〉 PWM 정류기의 실험 결과

그림 6은 PWM정류기의 인버터 출력 전압, 전류 및 DC출력 파형이다. 변압기의 2차 측 권선은 부스바를 이용하여 1턴을 사용하였고, 1차 측은 리츠 와이어를 사용하여 11턴으로 설정하였다. 입력 DC전압의 리플은 약 30%로 나타났으며, 그 영향이 2차 측에 나타남을 알 수 있었다. 실험 결과 출력 기준은 15V이며 약 0.6 [V]의 리플이 있었다.

3. 결 론

본 논문에서 제안한 Full-bridge inverter를 이용한 IGBT형 PWM방식의 도금용 정류기는 SCR방식의 도금용 정류기에 비해서 감압 변압기의 크기를 대폭 줄일 수 있었다. 또한 변압기의 갭을 이용하여 직류 필터용 리액터를 변압기 자체의 누설 인덕터로 사용함으로써 시스템 전체적인 크기와 무게의 축소를 통해 비용 절감의 효과를 얻을 수 있었다. 또한 도금용 정류기의 제어부를 Full-digital화함으로써 제어기의 신뢰성을 증대시켰으며, SCR방식의 도금용 정류기에 비하여 제어기의 성능 및 속도성 개선이 가능하여 효과적인 도금이 가능하다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.
본 연구는 지식경제부의 에너지지원 인력양성 사업을 통한 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 권형남, 전운석, 반한식, 최규하, 배영찬, "MOSFET와 IGBT를 이용한 DC/DC 컨버터의 효율 증대", 전력전자 학술대회 논문집, 2001년 7월
- [2] 박성준, 강필순, 박노식, 김철우, "변압기 직렬 결합을 이용한 새로운 멀티 레벨 인버터", 전력전자학회 논문지, 제 8권, 제 1호, PP. 9-16, 2003년 2월.