

강판 합금화 용융아연도금용 2000kW-50kHz 유도가열 장치 개발

유효열, 심은용, 강제봉, 박형진, 윤형진, 윤형민, 임진섭, 이찬교
(주)다원시스

Development of 2000kW-50kHz induction heating equipment for galvanized sheet steel

Yoo Hyoyol, Shim Eunyong, Kang Jaebong, Park Hyoungjin, Yun Hyoungjin, Yun Hyoungmin, Lim Jinsup, Lee Changyo
Dawonsys Co. LTD

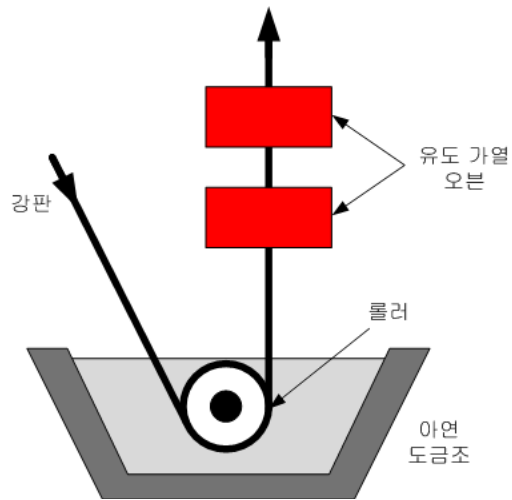
ABSTRACT

Galvanized Sheet Steel, which is being widely used in the automotive industry, is made by reheat after dip zinc galvanizing process. By this, A Fe-Zn alloy is created which enhance anticorrosive property and weldability. This paper describes basic design for 2000kW induction heating inverter system for galvannealing process and test result of 250kW inverter module which is used in parallel to form 2000kW inverter system.

1. 서론

그림1과 같이 강판을 아연이 녹아있는 약 420도의 아연 도금조에 통과시켜 도금을 한 후 다시 가열하면 강판과 아연막 사이에 Fe-Zn계 합금이 만들어진다. 이렇게 생산된 강판은 두 금속사이의 접착 강도가 강해져 내식성이 향상되고 스폿 용접 시에 용접품질이 좋아져 자동차 외장용으로 주로 사용된다. 재 가열시 사용되는 유도 가열 오븐은 강판의 폭 방향으로 온도차를 줄이기 위하여 50kHz 이상의 고주파를 사용하며 가열 코일도 1턴으로 제작된다. 1턴 가열코일은 여러 턴으로 제작된 코일에 비하여 폭 방향의 플럭스가 적어져 비교적 온도 편차가 적다[1].

본 논문에서를 강판 합금화 용융아연도금용 2000kW 용량의 유도가열 장치 설계에 대하여 기술하고 단위 모듈인 250kW 인버터 성능검증 시험에 대하여 기술하고자 한다.



[그림1] 강판 합금화 용융아연도금 및 합금화 공정 간략도

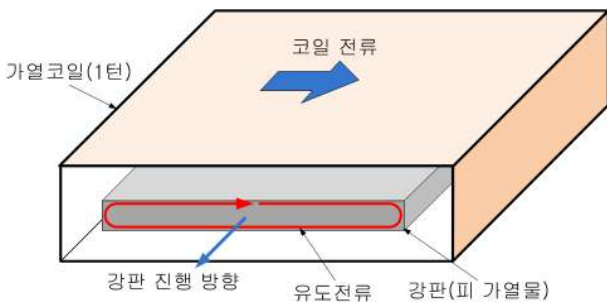


[그림2] 강판 합금화 용융아연도금 및 합금화 공정 설비

그림3은 유도가열에 의한 강판 가열의 원리를 보여준

다[2-3]. 강판의 주위에 코일을 감고 코일에 교류 전류를 흘리면 변압기의 원리에 의하여 강판의 폭 방향 주위에 유도 전류가 발생하고 이 유도 전류가 강판의 저항에 흘러 강판이 가열된다.

열풍 혹은 적외선 등의 가열장치와 달리 유도가열 장치는 피 가열물 스스로 열을 내므로 효율이 매우 높고, 장치 길이가 짧아져 공장의 공간 이용이 효율적이며, 깨끗한 조업 환경이 가능해져 고급 강판을 생산하는 공정에는 이상적이 가열 장치라 할 수 있다.



[그림3]유도가열을 이용한 강판 가열 원리

2. 본론

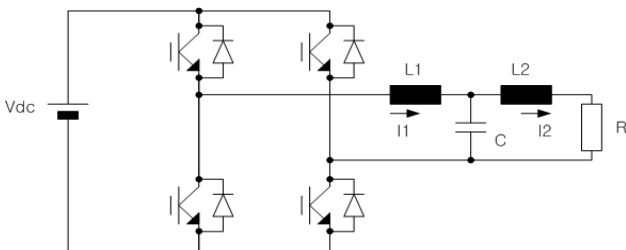
2.1 장치 사양

최종 목표인 유도가열 장치의 사양은 다음과 같다.

- 피가 열물 강판(steel)
- 강판 폭 1400(800~1900)mm
- 강판 두께 1.2(0.4~2.0)mm
- 코일 길이 805mm
- 코일 입구 2184x203mm
- 전력 2000kW
- 부하 전압 2.2kV
- 부하 피상 전력 28MVAR
- 주파수 50kHz
- 입력 전압 460V-3상
- 직류 전압 525V

2.2 공진 방식

본 논문에서는 그림4에 도시한 바와 같이 LCL 공진 방식이 사용되었다.



[그림4] LCL 공진방식

LCL 공진 방식은 타 방식에 비하여 고주파 인버터에서 스위칭 손실을 줄이기 위한 영전압 스위칭을 가능하게 하고 구조가 간단해 지는 장점이 있다[4].

인버터의 전류와 전압은 항상 영전압 스위칭이 되도록 위상 동기회로(PLL)을 사용하여 동상이 되도록 제어함으로써 인버터 전류가 거의 영일 때 IGBT의 스위칭이 이루어져 스위칭 손실이 최소가 되도록 한다. 스위칭 시에 전류가 약간 (+)가 되어야 IGBT의 기생 콘덴서를 충전하면서 전압 파형이 부드럽게 된다. 전력은 위상제어 정류기에 의하여 직류 전압을 제어하여 조절된다.

2.3 회로 정수 설계

부하인 가열 코일은 인덕턴스와 저항의 직렬로 나타내어지며 위 사양의 경우 등가회로는 다음과 같다[1].



[그림5] 부하 등가회로, L2=0.54uH, R=11.9mΩ

가열 코일 전류는 $I_2^2 \cdot R = P$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \sqrt{P/R} && \text{(식1)} \\
 &= \sqrt{2.00e6/1.19e-4} \\
 &= 12.9kA \\
 &\text{여기서 P는 전력}
 \end{aligned}$$

직류 전류 I_{dc} 는 $I_{dc} \cdot V_{dc} = P/E_{eff}$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= P/E_{eff}/V_{dc} && \text{(식2)} \\
 &= 2.00e6/0.95/525 \\
 &= 4.01kA \\
 &\text{여기서 } E_{eff} \text{는 효율 가정치}
 \end{aligned}$$

인버터 전류 I_1 은 $I_{dc} = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2/\pi$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{dc} \cdot \pi / \sqrt{2} / 2 && \text{(식3)} \\
 &= 4.01e3 \cdot \pi / \sqrt{2} / 2 \\
 &= 4.45kA
 \end{aligned}$$

인버터 직렬 인덕터 L_1 는 $L_1/L_2 = I_2/I_1$ 로부터 다음과 같이 계산된다[4].

$$\begin{aligned}
 L_1 &= L_2 \cdot I_2 / I_1 && \text{(식4)} \\
 &= 0.54e-6 \cdot 12.9 / 4.45 \\
 &= 1.57uH
 \end{aligned}$$

공진 콘덴서 C는 $F=1/(2\pi\sqrt{C*Leq})$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C = (1/2\pi/F)^2/Leq \quad (\text{식5})$$

$$= (1/2\pi/50e3)^2/0.40e-6$$

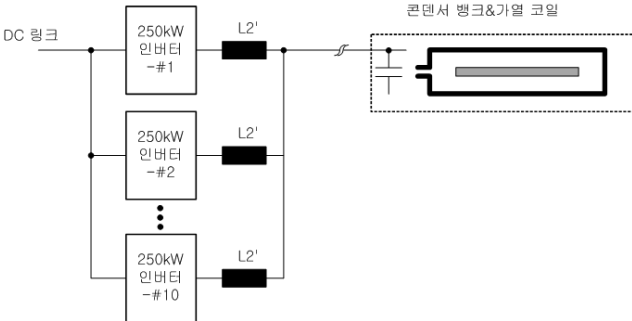
$$= 25.3\mu\text{F}$$

여기서 $Leq=L1*L2/(L1+L2)$, F는 주파수

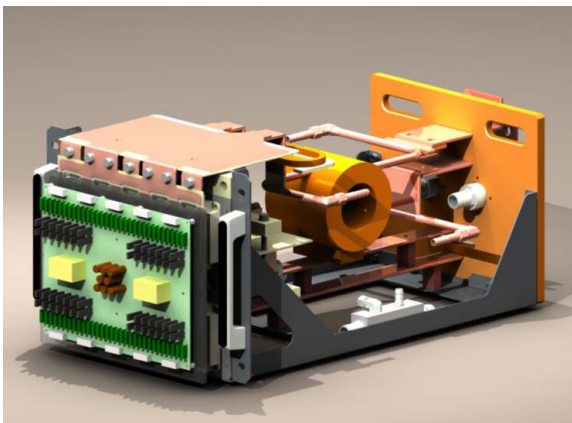
2.4 시스템 구성

2000kW 전체 장치는 그림6과 같이 10개의 250kW 단위 인버터 모듈이 병렬로 연결되며 각 250kW 모듈은 400A IGBT 10개를 사용하여 풀브리지로 구성된다. 즉, 2000kW 전체 시스템은 100개의 IGBT를 사용하여 구성된다. 10개의 단위 인버터 모듈 중 1개가 고장 날 경우에도 고장난 인버터 모듈을 분리한 후 9개의 인버터 모듈만으로 정격운전이 가능하다. 인버터 모듈에는 세미크론의 고주파 스위칭용 IGBT인 400GB125D를 사용하였다.

그림7는 250kW 단위 인버터 모듈의 3D 설계이다. 랙 형태로 설계하였으며 고장날 확률이 상대적으로 높은 IGBT와 게이트 드라이버를 전면에 배치하여 유지보수가 편리하도록 설계하였다.



[그림6] 2000kW 인버터 구성



[그림7] 250kW IGBT 단위 인버터 모듈

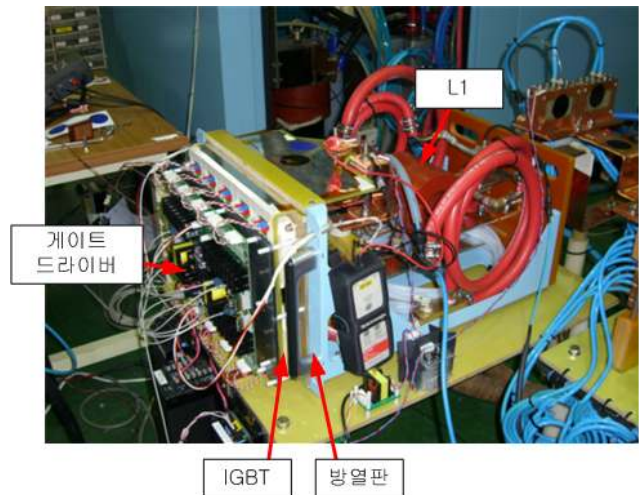
2.5 250kW 단위 인버터 모듈의 형식 시험

설계된 인버터의 신뢰성을 검증하기 위하여 250kW 단위 인버터 모듈은 45도 냉각수를 공급한 상태에서 400kW까지 시험하여 이상 없이 동작함을 확인하였다. 버스바 등은 주위온도 40도에서 70도 이하가 되도록 하였다.

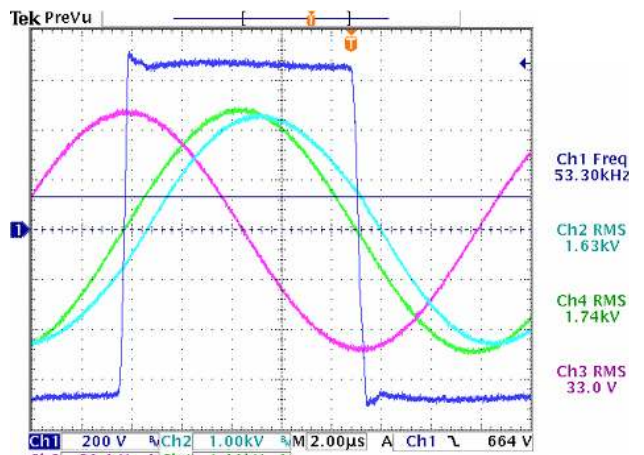
전원은 1MW 디젤 발전기를 사용하였으며 부하는 25mm 직경의 스텐레스 파이프를 사용하고 내부에는 냉각수를 흘려 냉각하였다.

인버터의 스위칭 손실은 냉각수량과 온도상승을 이용한 열량법으로 측정하여 정격에서 약 10kW의 손실이 발생함을 확인하였다.

그림9는 스위칭시에 인버터 전류가 거의 영인 상태에서 일어남을 보여준다.



[그림8] 250kW IGBT 단위 인버터 모듈



Ch1:인버터 전압(200V/div), Ch2:인버터 전류(500A/div), Ch3:코일 전압(1.7kV/div), Ch4:코일 전류(1kA/div)

[그림9] 각 부 파형

2.5 보호기능

시스템의 보호를 위하여 다음과 같은 기능을 갖는다.

- 인버터 과전류 보호
- 코일 과전압 보호
- 부하 단락 감지
- 강판 절단 감지
- 직류 과전압 시 크로바 스위치 보호
- 기동 시 IGBT 소손 여부 감지
- 인버터 모듈 간 전류 균형 감지
- 공진 콘덴서 소손여부 및 소손 부위 감지
- 냉각수 누수 감지
- PLL 정상 동작 여부 감지

3. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 강판 합금화 용융아연도금용 2000kW-50kHz 유도가열 장치의 설계에 대하여 기술하였으며 이에 사용될 250kW 단위 인버터 모듈을 제작하고 형식 시험한 내용에 대해 기술하였다. 현재는 250kW 단위 인버터 모듈을 10개 병렬 연결하여 구성되는 2000kW 유도가열 인버터 패널과 가열 코일의 기구설계가 진행되고 있다. 제작이 완료되는 대로 사내에서 모의 부하를 구성하여 조합시험을 수행하면서 발생하는 문제점을 보완해 나갈 예정이다.

본 논문은 에너지 관리공단의 에너지 절약과제 [2007-E-EL02-P-01-0-000]의 1차년도 결과를 정리한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook, Micah Black, "Handbook of Induction Heating", pp.580-611, Marcel Dekker, Inc.
- [2] Chester A. Tudbury, "Basics of Induction Heating", vol.1, 1960.
- [3] M.G. Lozinskii, "Industrial Application of Induction Heating", Pergamon Press, 1969.
- [4] S Dieckerhoff, MJ Ruan, RW De Doncker, "Design of an IGBT-based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating", Industry Applications Conference, vol.3, pp.2039-2045, 1999