

2500kW 유도용해용 직렬공진형 인버터 개발

유효열*, 심은용*, 정대환*, 강재봉*, 강호현**, 김왕래**
 *(주)다원시스, **승실대학교 전기제어시스템공학부

Development of 2500kW Series Resonant Inverter for Induction Smelting

Yoo Hyo Yol*, Shim Eun Yong*, Jung Dae Hwhan*, Kang Jae Bong*, Kang Ho Hyun**, Kim Wang Rae**
 *Dawonsys Co. LTD, **Soongsil University

ABSTRACT

The smelting system using induction heating technology has many advantages over conventional fossil fuel regarding energy efficiency, environmental aspect and so on. This paper introduces the principal and technical trends of induction heating technology, and describes recently developed 2500kW induction smelting inverter. The developed inverter is a series resonant type using high speed Thyristor (SCR) and employs state-of-art digital controller using DSP.

1. 서론

1920년대 말 전동발전기를 사용한 유도용해로가 선을 보인 이후 철강산업과 기계산업의 발달에 따른 수요증가와 대용량 싸이리스터의 개발로 인하여 본격적으로 산업용으로 보급되기 시작하였으며 현재는 10,000kW급 이상도 상용화 되고 있다.

2000년 이전까지 국내 기술로 1000kW급까지 상용화된 이후 더 이상의 기술적 진척이 없는 상황에서 저자들은 2003년에 1200kW, 2004년에는 1600kW급 유도 용해 인버터를 개발하여 상용화하기에 이르렀다.

과거에는 1000kW 이하의 설비를 사용하는 소규모의 용해로 수요 업체들이 주를 이루고 있었으나 최근 들어 3D업종의 기피로 인한 인력수급의 어려움 때문에 업체가 점차 통합, 대형화되고 있으며 이에 따라 수요 설비도 2000kW급 이상의 대형으로 옮겨가고 있다. 에너지 절감과 화석연료의 사용규제로 인한 시장의 요구에 따라 저자들은 에너지 관리공단의 자금지원으로 2007년까지 5000kW급 유도용해 인버터를 개발하는 것을 목표로 프로젝트를 진행하고 있다. 본 논문에서는 1차년도 결과물인

2500kW 유도용해 인버터 시스템에 관하여 기술적인 내용을 소개하고자 한다.

2. 유도용해의 원리

그림 1은 유도 용해로의 구조를 보여준다. 용해될 금속은 내화물로 만들어진 용기에 담겨있고 가열 코일이 내화물 외곽에 슬레노이드 형태로 감겨져 있다. 코일에 교류 전류를 흘리면 용해될 금속의 원주방향을 따라 자기장의 생성을 방해하려는 방향으로 전류가 유도되며 이 전류의 크기는 금속이 자성물질 여부와는 무관하게 표면에서 내측으로 들어갈수록 지수 함수적으로 감소한다. 이러한 현상을 표피효과(Skin Effect)라 한다.

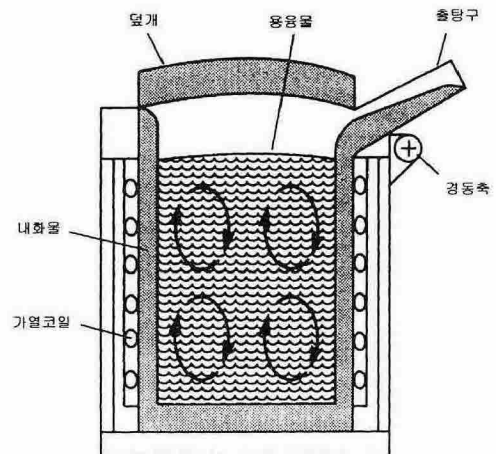


그림 1 유도 용해로의 구조
 Fig.1 section view of induction furnace

즉 단순히 표현하면 표면에서 일정 깊이까지만 전류가 존재한다고 할 수 있고 이 깊이를 침투깊이(Skin Depth)라 하며 다음과 같이 정의된다.

$$d = 5000 * \sqrt{\rho / \mu / f} \quad (1)$$

여기서 $d[cm]$: 침투깊이
 $\rho[\Omega cm]$: 금속의 전기저항
 μ : 금속의 비투자율
 $f[Hz]$: 코일 자속의 주파수

침투깊이 d 는 유도되는 전류가 표면에서의 37%(=1/e)로, 전력 밀도는 14%(=1/e²)로 감소되는 깊이이다.

유도가열은 표면에 원 둘레를 따라 유도된 전류가 자체 저항에 흐르면서 발생하는 열을 이용한 것이다. 다른 방식에 비하여 유도 용해로의 가장 큰 장점은 직접 가열로서 에너지 효율이 높고, 환경적으로 깨끗하며, 이 물질의 유입이 적고 전자기적인 힘에 의하여 스스로 교반이 이루어져 합금을 만드는데 유리하다는 것이다.

유도가열기술은 용해뿐 아니라 열처리, 압연 전 가열, 도료건조 등 금속공업에 있어서 다양한 목적으로 사용되고 있다.

3. 용해설비 사양

본 과제의 용해설비 사양은 시간당 5톤을 용해하는 것이다. 이를 위하여 인버터 용량은 2500kW로 선정되었으며 출탕온도는 탄소강의 경우 1650도이며 순철의 경우 1490도이다.

4. 용해로의 등가회로

부하인 용해로의 규격은 표 1과 같다. 용해로를 간략하게 표현하면 그림 2와 같다. 여기서 R_1 은 가열코일의 도선저항, R_2 는 용해물의 1차 측 등가저항, L 은 직렬 인덕턴스이다. L 에 인가되는 전압은 R_1 과 R_2 에 인가되는 전압의 약 10배 정도가 되며 따라서 거의 순수 인덕턴스 부하라고 해도 무방하다. 이 중 R_2 에 발생한 열이 용해에 사용된다고 할 수 있다.

표 1 용해로 규격
 Table 1 Dimension of induction furnace

높이	1130[mm]
코일 내경	1175[mm]
용융물 외경	925[mm]
턴 수	12
코일 점적률 (코일 높이 중 동이 차지하는 비율)	0.84

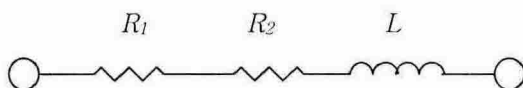


그림 2 유도로의 간략화된 등가회로

Fig. 2 simplified model of induction furnace

4.1 코일의 도선저항, R_1

가열코일의 도선저항 R_1 은 다음 식으로 구해진다^[1].

$$R_1 = \pi * \rho l * (b l + d l) * N^2 / (d l * H * s f) \quad (2)$$

여기서 ρl : 동선의 비저항
 $b l$: 코일 내경
 $d l$: 동선의 침투깊이
 N : 코일 턴 수
 H : 코일 높이
 $s f$: 코일 점적률

4.2 용해물의 등가 저항, R_2

용해 과정 중 용해물의 저항은 일정하지 않다. 그 이유는 용해재료로서 압축고철, 선철, 스크랩 등 재료의 상태와 장입 상태에 따라 달라진다. 또한 철과 같이 자성체인 경우 자기장의 세기에 따라 침투 깊이가 달라지며 용해가 진행됨에 따라 온도가 상승하면서 저항율의 변화에 따라 달라진다. 다만 용탕이 완전히 코일을 채워져 있고 완전히 녹았을 때를 기준으로 등가저항을 구하고 이 저항값이 2배정도 증가하여도 정격 전력이 인가될 수 있는 조건이면 무방하다.

용탕 시로의 가열코일에서 본 용해물 등가저항 R_2 는 다음 식으로 나타낼 수 있다^[1].

$$R_2 = [K r 2 * \pi * \rho 2 * a 0 * / (H * d 2)] * K s 2 * N^2 \quad (3)$$

여기서 $K r 2$: 저항계수
 $\rho 2$: 용탕의 비저항
 $a 0$: 용탕의 외경
 H : 코일 높이
 $d 2$: 용탕의 침투깊이
 $K s 2$: 단락계수
 N : 코일 턴 수

4.3 코일의 인덕턴스

솔레노이드 코일의 인덕턴스는 다음의 Wheeler 공식에 의하여 구해진다.

$$L = (b l * N)^2 / (457 * b l + 1016 * H) \quad (3)$$

여기서 L : 솔레노이드 코일의 L값(in uH)
 $b l$: 코일 내경
 N : 코일 턴 수
 H : 코일 높이

이 값은 솔레노이드 코일 내에 금속이 없을 때의 값이며 금속이 있을 때는 단락 효과에 의하여 이 값보다 감소한다.

4.4 가열 효율

전술한 바와 같이 용해재료가 고체의 덩어리에서 용탕

이 되는 과정 동안 등가저항이 변화하므로 등가저항으로 전 용해시간 동안의 가열 효율을 계산하는 것은 불가하나 4.1절과 4.2절에서 구한 등가저항을 이용하여 다음 식으로 코일 후단의 대략적인 가열효율을 구할 수 있다^[1].

$$\eta = R_2 / (R_1 + R_2) = 0.82 \quad (3)$$

그러나 용해 시간을 근거로 하여 계산하면 인버터로 유입되는 전기에너지의 약 76%정도가 순수 용해에 사용된다는 결과를 얻게 된다. 그 차이는 코일의 도통손실과 내화물 통하여 발생하는 손실이 전체손실의 절반 이상을 차지하며 그 외에 인버터 손실, 인버터와 코일간의 버스바 손실, 용탕 상부를 통한 대류 손실, 섀트코어와 프레임의 유도 손실 등이 포함된다^[5].

표 2 용해로 인버터의 전기적 사양
Table 2 electrical specifications of inverter

인버터 전력	2500[kW]
입력 전압	575[V]
직류 전압	772[V]
직류 전류	3.4[kA]
출력 전압	2250[V]
출력 전류	12[kA]
동작 주파수	400[Hz]
공진 콘덴서, C_r	2120[μ F]
코일 인덕턴스(만용탕시), L_r	65.3[μ H]
코일 저항, R_l	14[m Ω]
용해물 등가저항, R_2	3.2[m Ω]

5. 인버터 시스템 구현

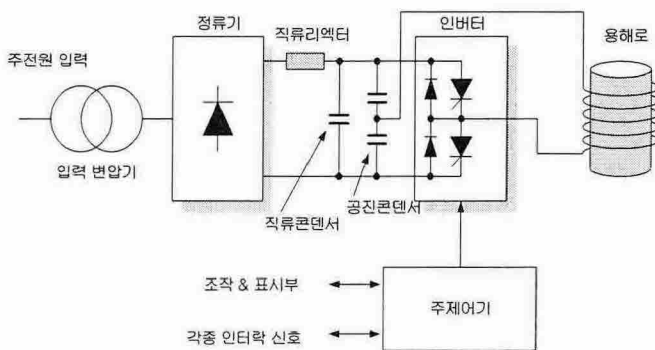


그림 3 2500kW 유도로 용해로 인버터 시스템
Fig 3 2500kW inverter system for induction smelting

그림 3은 2500kW 유도로용 인버터 시스템의 전체 구성을 보여준다.

입력 전압은 3상 575V이며 정류부에 의하여 직류로 변환된다. 정류기는 SCR을 도통각 0도로 제어하여 다이

오드 정류기와 동일한 동작을 한다. 이는 사고 시에 입력을 빠르게 차단하기 위한 것이다. 고조파 저감을 위하여 12펄스 정류기를 사용하였으며 입력 역률은 기본과 기준으로 0.97 이상이다. 정류된 직류는 직류 리액터와 직류 콘덴서에 의하여 평활된 후 그림 4의 인버터부에 인가된다.

인버터에는 스위칭 소자로서 고속 SCR을 6병렬로 사용하고 있다. 인버터는 그림 4에서 L_r 과 C_r 이 이루는 공진주파수보다 낮은 주파수에서 동작함으로써 공진에 의하여 전류의 극성이 바뀔 때 SCR은 자연적으로 소호된다.

인버터 내부의 버스바는 수냉 파이프를 붙여 냉각하도록 하였으며 정류부 SCR, 인버터 SCR, 직류 콘덴서, 교류 콘덴서, 전류제한 리액터, 직류 리액터 등이 냉각수에 의하여 냉각되도록 설계하였다. 냉각수로는 물때를 방지하고 높은 전기저항을 갖도록 증류수를 사용하여 펌프를 순환하도록 하였고 최종 냉각기로는 일반수의 증발열에 의하여 냉각되는 에바콘을 사용하였다.

제어기는 32비트 신호처리용 마이크로 프로세서인 TMS320C32를 사용하여 구성되었으며 내부에는 고장이력을 저장하여 수리에 빠르게 대처할 수 있게 하였다. 또한 각종 센서의 이상 유무와 소자의 소손여부를 스스로 판단할 수 있게 하였으며, 각종 운전 파라미터는 노트북 컴퓨터를 이용하여 설정하고 내부의 플래시 메모리에 저장하도록 하였다. 각종 전류센서는 2중 절연을 하였으며 게이트 트리거 신호는 광파이버를 사용하여 노이즈에 둔감하도록 하였다.

그림 6은 인버터 패널의 사진으로서 8400W x 1500D x 2000H의 크기이다. 중앙에는 정류부가 위치하며 양쪽에 두 대의 인버터가 연결되어 수전설비가 허용하는 용량 내에서 두 인버터를 동시에 운전할 수 있다. 이는 한쪽을 출탕하거나 용해재료를 장입하는 동안 다른 쪽 인버터를 이용하여 용해작업을 하게함으로써 설비의 이용률을 최대화 하기 위한 것이다.

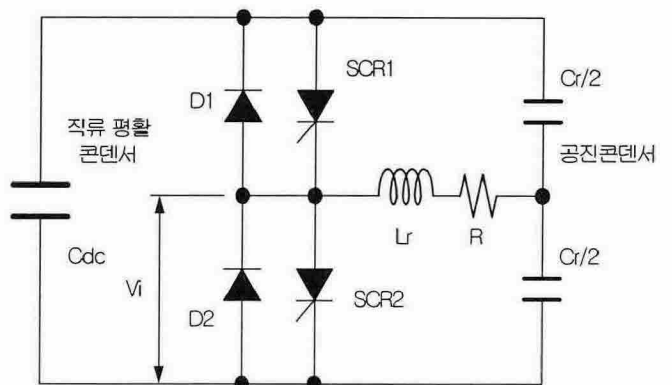


그림 4 인버터부 등가회로
Fig. 4 equivalent circuit of inverter part

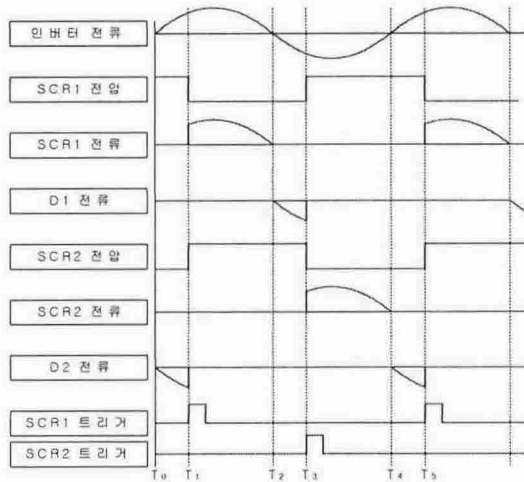


그림 5 인버터 각 부분 전압, 전류 파형
Fig. 5 current and voltage waveform of inverter

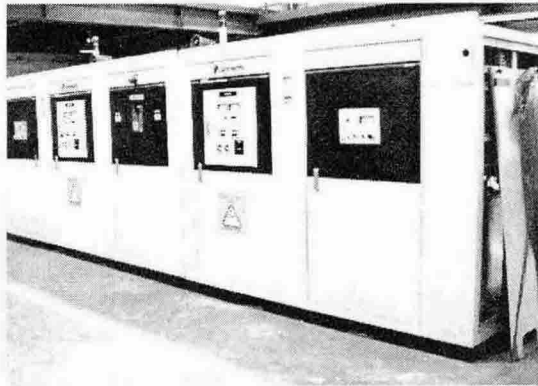


그림 6 인버터 패널
Fig. 6 view of inverter panel

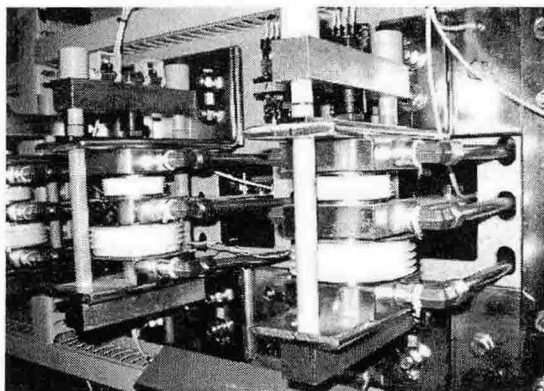


그림 7 인버터 SCR 스택
Fig. 7 view of inverter SCR stack

6. 시험 및 추후 계획

현재로서 기본적인 시험을 거의 완료한 상태이다. 시험전원은 1MW 디젤 발전기를 사용하였으며 정격전류를 한꺼번에 시험하기에는 용량이 부족한 실정이다. 따라서 인버터의 SCR 스택을 반씩 나누어서 정격전류의 1/2씩

흘리는 방식으로 시험하였으며 전체 SCR간의 분담 전류의 편차는 $\pm 5\%$ 를 넘지 않는 것을 확인하였다. 그림 8의 CH3은 출력전류가 7000A일 때의 실험 파형을 보여준다. 로가 빈 상태에서 시험한 파형이므로 90도에서 스위칭이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 자체적인 시험은 거의 마친 상태이며 보완작업이 마무리 되는대로 현장에 설치하여 실제 용해작업을 진행하면서 목표로 했던 성능이 얻어지는지 검증할 예정이다.

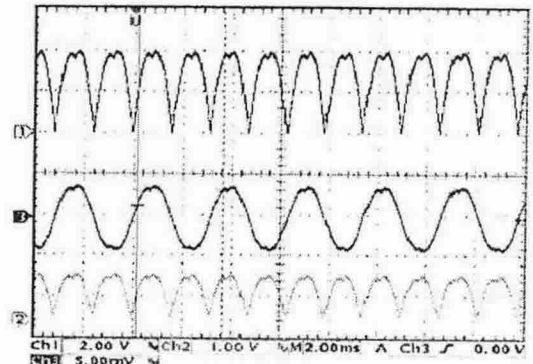


그림 8 출력 전류가 7000A일 때 출력 전류
CH3: 출력 전류 (15kA/div), CH1&2: 출력 전류신호 정류파형
Fig. 8 inverter output current waveform: CH3, 7000Arms

7. 결론

본 논문에서는 5톤 용해로용 2500kW 유도 용해로 인버터의 구현에 대하여 기술하였다. 용해로의 전기적인 등가모델을 계산했으며 이를 바탕으로 SCR을 이용하여 하프브리지 방식의 인버터시스템을 구현하였다. 1MW 디젤 발전기를 이용한 자체 시험 결과 설계대로 운전되는 것을 확인하였다. 최종적으로는 용해작업을 수행하면서 검증이 필요하다.

이 논문은 에너지관리공단의 에너지 절약과제 [2004-E-EL02-P-05-0-000]의 1차년도 결과를 정리한 것입니다.

참고 문헌

- [1] Chester A. Tudbury, "Basics of Induction Heating", vol.1, 1960.
- [2] S. Zinn and S. L. Semiatin, "Elements of Induction Heating", Electric Power Research Institute, Inc., 1988.
- [3] M.G. Lozinskii, "Industrial Application of Induction Heating", Pergamon Press, 1969.
- [4] Bendaas, M.L., Ferrieux, J.P., Rognon, J.P., "Modelling and control of power supplies for induction heating", Power Electronics and Applications, vol.4, pp. 27-34, 1993.
- [5] 김봉완, 이계완, "유도로의 주철용해에 있어서 에너지 절감", 구조공학회지 제11권 제1호, 1991.