

2500kW 용해설비 시운전 결과 및 5000kW 용해로용 인버터 설계

유효열*, 심은용*, 정대환*, 김상중*, 강재봉*, 강호현**, 김왕래**

*(주)다원시스, **송실대학교 전기제어시스템공학부

The Result of 2500kW Induction Smelting System Trial Running and Basic Design of 5000kW Induction Smelting System

Yoo Hyo Yol*, Shim Eun Yong*, Jung Dae Hwhan*, Kimm Sang Jung*, Kang Jae Bong*, Kang Ho Hyun**, Kim Wang Rae**

*Dawonsys Co. LTD, ** Soongsil University

ABSTRACT

The authors, R&D member of DAWONSYS and Soongsil University, are developing 5000kW smelting inverter system by 2007 under the sponsor from Korea Energy Management Corporation. As a part of the project, 2500kW inverter system has developed in 2005[6], and installed in real production site, and has been running for 7 months successfully. This report deals with the test result of 2500kW smelting inverter system and design for 5000kW smelting inverter system which is final target of this project.

인버터 용량	2500kW
용해물 중량	5톤
입력 전압	575V
입력 역률	95% 이상
출력 전류	12kA
출력 전압	2250V
인버터 주파수	400Hz
정류기 회로	SCR 6상(12펄스) 정류
인버터 회로	전압원 직렬공진 인버터, 1정류기-2인버터
인버터 소자	고속 SCR
탄당 전기 소모율	주철: 1480도 출탕 기준 480kWh, 탄소강: 1650도 출탕 기준 524kWh

1. 서 론

금속공업은 많은 공정에서 금속을 가열하거나 녹이기 위한 공정을 포함한다. 유도가열 기술은 전자기 유도현상을 이용하여 금속에 직접 접촉 없이 전기 에너지를 가할 수 있다. 유도 가열 기술은 기존의 화석연료를 이용한 방식에 비하여 제품의 품질을 향상시키고 자동화를 가능하게하며 연기나 분진을 적게 발생시킨다는 큰 장점을 가지고 있다.

저자들은 2007년까지 에너지 관리공단의 지원을 받아 수행하고 있는 5000kW 용해로용 인버터 개발의 일환으로서 2006년 6월에 2500kW 용해로용 인버터를 개발 완료하였으며[6] 이를 실제 생산설비에 설치하여 현재까지 약 7개월 동안 상업 시험운전을 진행하고 있다. 본 논문에서는 그에 대한 결과 분석과 최종 목표인 5000kW 용해로용 인버터의 설계에 대하여 기술하고자 한다.

2. 2500kW 인버터 설치 시운전 결과

그림1은 2500kW 유도용해로의 현장 설치 사진이다. 2500kW 유도 용해로 인버터 시스템의 사양은 다음과 같다.



그림 1 2500kW 용해로의 현장 설치 사진
Fig. 1. Installed 2500kW smelting system.

시운전에서 다음과 같은 문제점이 나타났으며 최종 목표인 5000kW 유도 용해로 인버터 시스템에서는 이러한 문제를 보완할 예정이다.

- 6상 12펄스 정류를 위하여 D-Y/ D-D구성의 절연변압기에 3권선 변압기(하나의 코어 2차측에 D권선과 Y권선을 같이 감은 구조)를 사용하였으나 D측과 Y측 간 전류 불균형의 문제가 있었다. 문헌을 조사한 결과 독립된 2권선 변압기를 2대 사용

해야한다는 사실을 발견하였다.

- 5톤 로체는 3톤 로체보다 절연 코일과 습기를 포함한 내화 시멘트와의 접촉 면적이 커져 접지와 절연 저항이 작을 것으로 예견되었으나 오히려 3톤 로체의 경우보다 절연 저항이 큰 것으로 나타났다. 이로 인하여 누탕 감지기가 제대로 작동하지 않는 문제가 발생하였다. 이에 대해 새로운 방식의 누탕 감지기를 설계할 예정이다.

- 설치 공간의 제약으로 인하여 냉각장치를 10m 높이에 설치하였으며 이로 인하여 냉각수에 과한 압력이 발생하였다. 추후에는 적절한 높이 이하로 설치할 필요가 있다.

- 역시 설치공간의 제약으로 인하여 인버터 패널을 용해 작업면의 아래 반 지하에 설치하였는데 공간이 협소하여 설치에 어려움이 있었다. 따라서 되도록 패널을 나누어 설계할 필요가 있다.

- 로체의 프레임이 적절한 강도를 갖지 못하여 경동 시 한쪽으로 기우는 문제가 있었으나 프레임을 보강하여 해결하였다.

- 인버터 상부의 출력 버스바를 평행으로 인출되지 않고 인버터 상부 철판이 버스바와 가까워 인버터 패널이 유도되어 가열되는 문제가 있었다. 5000kW 인버터에서는 이를 보완하였다.

그림2는 철 스크랩(탄소강)을 로체에 장입하면서 1650도 출탕 시까지 용해작업을 하는 과정 동안의 인버터 전력, 전력량, 출력전압, 출력전류와 이로부터 계산된 로체 부하의 등가회로 정수변화를 도시한 것이다. 로체의 용량은 5톤이나 과장입 하여 최종 중량은 5.5톤이었다. 초기에는 냉재이며 철 조각끼리의 높은 접촉저항으로 인하여 등가 저항이 최저치의 5배 가량 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 때는 작은 전류로도 전력의 흡수가 좋기 때문에 전체적인 효율은 커지지만 정격 전력을 공급할 만큼 인버터 전압이 크지 못하기 때문에 정격 전력을 내지 못하고 있다. 이런 경우 작업 방법을 바꿔서 철 스크랩을 로체의 반 이하로 장입하거나 이전 용해 작업에서 잔탕을 남겨 작업하면 문제를 완화할 수 있다. 또 하나 흥미로운 것은 등가 인덕턴스가 용해작업 초기에는 최대값을 보이며 시간이 지나면서 점차 감소하여 초기의 2.4배까지 감소하였다. 이는 초기에 자성물질인 철 때문에 인덕턴스가 큰 값을 보였으며 나중에는 큐리 온도를 넘어서면서 자성의 성질을 잃었기 때문으로 해석된다. 출탕 직전 로체의 등가회로 저항과 인덕턴스는 각각 20mΩ , 80uH로서 설계 초기에 계산으로 추정한 17mΩ , 65uH에 매우 근접한 값을 보여 주었다. 한편 투입된 전력량은 2.86MWh로서 520KWh/톤을 기록하여 목표치를 달성하였다.

2500kW 인버터의 설치와 시운전을 통하여 많은 경험과 지식을 쌓을 수 있었다. 이는 최종 목표인 5000kW 인버터를 설계하고 설치 시운전하는데 매우 유용한 경험이 될 것이다.

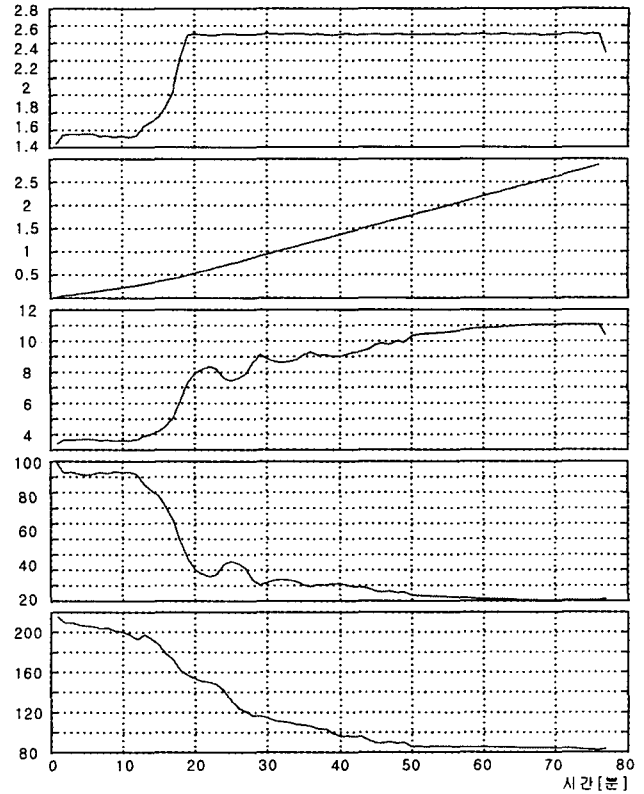


그림 2 시간에 따른 값들의 변화: 위로부터 전력(MW), 전력량(MWh), 전류[kA], 부하 등가저항(mΩ), 부하 등가 인덕턴스(uH)

Fig. 2 Time trace of, from top, power(MW), energy(MWh), output current[kA], equivalent load resistance(mΩ), equivalent load inductance(uH)

3. 5000kW 인버터 설계

3.1 시스템 기본 설계

전체 시스템은 정류기 하나에 인버터가 2개 연결된 듀얼 소스 시스템으로 구성하였다. 듀얼 소스 시스템은 6000kW의 제한된 전력을 두 개의 인버터에 적절히 배분하게 된다. 즉, 한쪽의 로에서 정격 인버터 전력을 이용하여 용해하는 동안 다른 쪽 로에서는 작은 전력으로도 충분한 장입, 온도유지, 성분분석, 출탕 등을 동시에 할 수 있어 전력 설비 이용률을 극대화할 수 있다.

최종 목표인 5000kW 유도 용해로 인버터 시스템의 사양은 다음과 같다.

인버터 용량	2500kW
용해물 중량	10톤
입력 전압	600V
입력 역률	95% 이상
출력 전류	20kA
출력 전압	2537V
인버터 주파수	300Hz
정류기 회로	SCR 6상(12펄스) 정류
인버터 회로	전압원 직렬공진 인버터, 1정류기-2인버터
인버터 소자	고속 SCR
톤당 전기 소모율	주철: 1480도 출탕 기준 480kWh, 탄소강: 1650도 출탕 기준 524kWh

그림3은 본 과제의 최종 목표인 5000kW 용해로용 인버터의 주회로를 도시한 것이다. [6][7]에서 이미 검토된 바와 같이 유도로용 인버터의 주회로는 전원의 역률면에서 유리하고 제어 성능이 우수한 전압원 구동 직렬공진회로를 채택하였다. 전체 시스템은 정류부를 전기적으로 공유하면서 용해로 2대에 각각 독립적으로 전력을 공급하는 듀얼 소스 인버터의 구성이다.

입력 전원전압은 전력이 증가함에 따라 배선에 의한 전압강하와 그에 따른 전력 손실을 줄이기 위하여 600V로 채택하였다. 600V는 국내 기준 상 저압으로 분류되는 가장 큰 전압으로서 저압용 설비를 사용할 수 있는 원가절감사항도 고려된 것이다.

입력 측의 정류부에는 6상(12펄스) 정류기를 채택하여 입력 측의 고조파 왜율을 감소시켰다. 또한 기존 방식에 비하여 정류부의 반도체 소자인 SCR의 소손여부를 판단하는 회로를 추가하고 초기 충전 시퀀스를 변경하여 재 기동 시 SCR의 소손에 의하여 퓨즈와 초기 충전 저항의 소손가능성을 제거하였다.

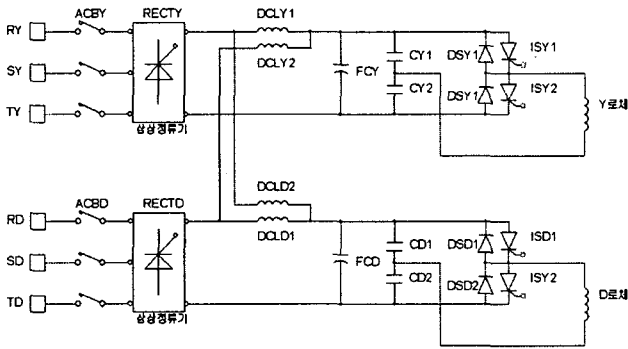


그림 3 주회로도
Fig. 3 Main circuit diagram

3.2 운전 주파수 선택

유도 용해로의 최대 장점중의 하나는 교반작용에 의하여 온도의 불균형이 적고, 성분의 조정이 용이하며 균질의 용탕이 얻어진다는 것이다. 그 반면에 주의해야 할 것은 교반력이 지나치게 크면 도가니 내면의 내화재를 기계적으로 침식, 마모시켜 도가니의 수명이 짧아진다는 것이다. 따라서 교반력을 최적으로 선정하는 것이 유도로의 장점을 살리는 것이다.

교반력은 출력이 클수록, 주파수가 낮을수록, 로체 크기가 작을수록 증가한다. 따라서 주파수를 선정하는 것은 교반력과 관계가 있다.

본 과제의 최종 목표는 10톤 용해로와 5000kW의 전력으로서 200Hz에서는 적정 범위를 초과하여 교반력이 지나치게 크며 500Hz에서는 교반력이 작은 것으로 조사되었다. 그리고 주파수가 너무 낮아지면 직류단 리플이 증가하여 정류부 후단의 필터의 크기가 커져 경제적인 설계가 되지 못하는 것을 감안하여 300Hz가 적합하다는 결론을 내리게 되었다.

3.3 10톤 용해로 등가회로 계산

그림4는 5000kW 인버터의 부하인 10톤 로체의 기본 치수를 보여준다. 이를 바탕으로 용해로의 전기적 등가회로를 구하면 다음과 같다.[6]

그림5는 위 등가회로를 이용하여 PSIM으로 모의실험한 결과이다.

코일 인덕턴스, L_r	61.2[μ H]
코일 저항, R_l	2.16[m Ω]
용해물 등가저항, R_2	10.4[m Ω]
공진 콘덴서	4.24[mF]

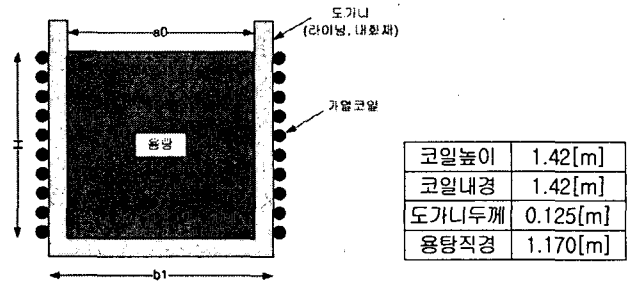


그림 4 10톤 로체 치수
Fig. 4 10Ton furnace dimension

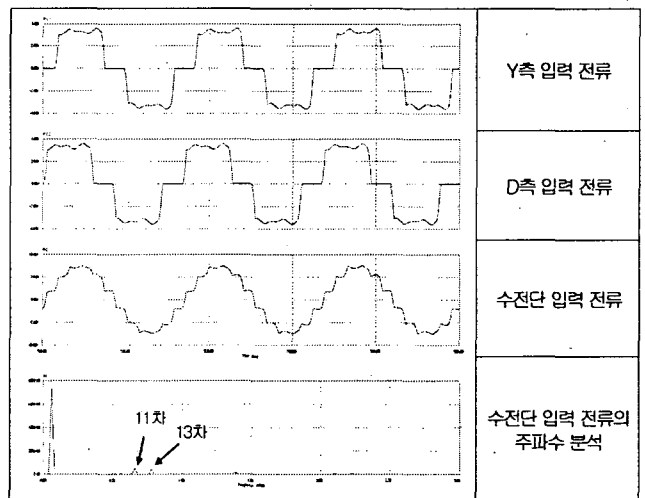
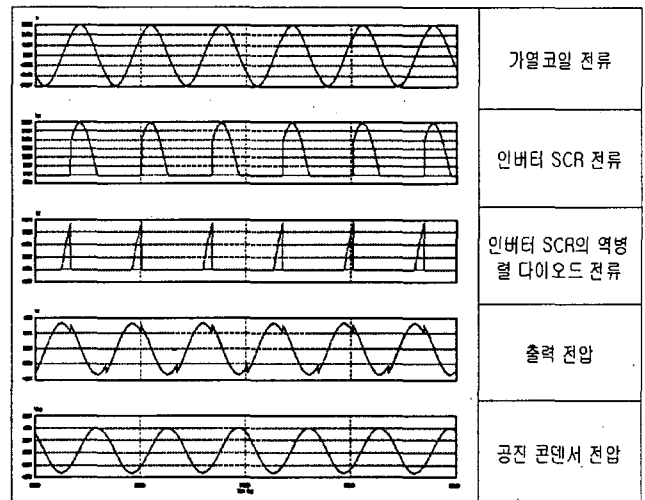


그림 5 PSIM 모의실험 파형
Fig. 5 PSIM simulation waveform

3.4 기구설계

인버터부에는 그림6과같이 모듈설계의 개념을 도입하였다. 즉 500kW 기본 모듈 2개를 병렬로 연결하여 1000kW 기본 모듈을 구성하였고 다시 1000kW 기본 모듈 5개를 병렬로 연결

하여 5000kW 인버터를 구성하였다. 이러한 모듈 개념을 도입함에 따라 추후 2500kW 이상의 대용량에서 다양한 용량변화에 대응하는 것이 가능해 졌으며 대전류 버스바를 효율적으로 배치함으로써 제한된 공간에 간결하게 수납할 수 있었다.

그림7은 3차원 그래픽 캐드인 솔리드웍으로 설계한 내부 모습이다. 총 길이는 12.2[m]이며 높이는 2[m], 깊이는 1.5[m]이고 총 중량은 20톤이다.

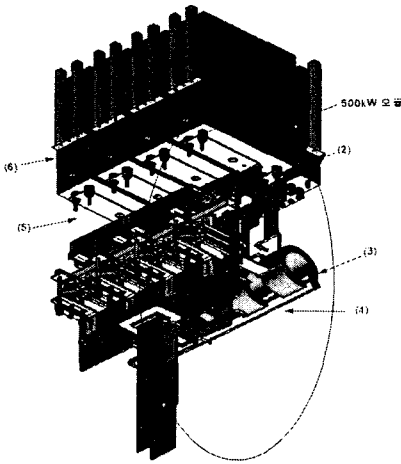


그림 6 1000kW 인버터 모듈
Fig. 6 1000kW inverter module

- (1) 출력 전류 센서, (2) SCR 전류 기울기 제한 리액터
- (3) 직류 필터 콘덴서, (4) 공진 콘덴서
- (5) 스너버 패널, (6) SCR 스택

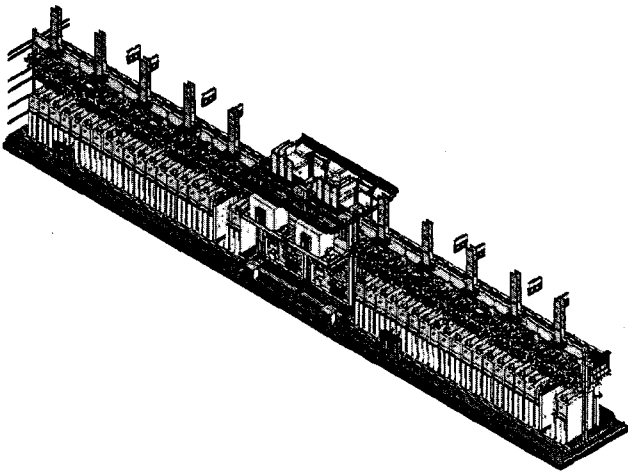


그림 7 3D 캐드 모델링
Fig. 7 3D cad modelling

4 결 론

본 논문에서는 2500kW 유도용해시스템을 실제 설치하고 시운전을 실시하였다. 결과는 매우 성공적이었다. 이를 바탕으로 최종 목표인 5000kW 유도용해용 인버터를 설계 완료하였으며 앞으로는 이를 실제 제작하고 시험을 거쳐 개발을 완료할 예정이다.

이 논문은 에너지 관리공단의 에너지 절약과제 [2004-E-EL02-P-05-0-000]의 2차년도 결과를 정리한 것입니다.

참 고 문 헌

- [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.
- [6] 유효열, 심은용, 정대환, 강재봉, 강호현, 김왕래, "2500kW 유도용해용 직렬공진형 인버터 개발", 2005 하기 전력전자학술대회 논문집, pp. 366-369
- [7] 유효열, 심은용, 정대환, 김상중, 강재봉, "유도용해로 인버터 기술", 전력전자학회지, The Journal of the Korean Institute of Power Electronics, 1226-623X, 제10권4호, pp.20-24, 2005