

## 1800kW급 고주파 유도가열장치의 개발

이 광수<sup>\*</sup> 안 일매<sup>\*</sup> 이 영호<sup>\*</sup> 김 용환<sup>\*</sup> 이 현우<sup>\*</sup>  
 경남대학교<sup>\*</sup> 동서기전<sup>\*</sup>

### The Development of High-frequency Induction Heating with 1800kW Power

G.S.Lee, I.M.An, Y.H.Lee<sup>\*</sup>, Y.H.Kim<sup>\*</sup>, H.W.Lee<sup>\*</sup>  
 Kyungnam University, DongSeo Mechatronics co., LTD<sup>\*</sup>.

**Abstract** - The development of the high-frequency induction-heating for 1800kW power range intend to make localization at forging and rolling mill part by technical innovation. And, the development makes to increase our's competitive power at technique, quality and cost. This paper describes the heart of high-frequency induction-heating technique, switching technique, a few problem in common using as an unsatisfied technique, load adjustment technique, system control, diagnostic system, and auto-interface etc.

### 2. 1800kW급 시스템 개요

### 1. 서 론

유도 가열(induction heating)은 주로 산업계에서 주조, 열처리, 용접, 표면 처리 등에 많이 이용되고 있다. 현재 유도 가열 장치에 대한 연구는 유도 설비의 생산성과 효율의 증가를 위해 이루어지고 있다. 연속 가변 주파수를 가진 반도체 소자와 이중 주파수 발생장치는 이 영역에서 추진하고 있는 개발 목표이다. 고주파 유도 가열에 의해서 단위 체적당 단위 시간에 발생하는 열량은 주파수와 투자율의 곱의 제곱에 비례한다. 철을 가열하면 큐리점까지는 투자율이 높으나, 그 이상의 온도에서는 상자성체가 되므로 동일 효율로 가열하기 위해서는 큐리점까지는 낮은 주파수로, 그 이상에서는 높은 주파수로 전환하여 가열하는 것이 좋다. 이렇게 두 종류의 주파수를 조합하여 사용하는 방법으로 개발이 이루어지고 있다. 또한, 고출력·고주파 전원 공급 장치의 개발 또한 이루어지고 있다. 이 공급 장치는 더욱 효율적(약 90%)이고, 현재 사용되고 있는 vacuum-tube(약 450kHz)보다 가격이 싸다. 가변 주파수 제어부에서 마이크로프로세서를 사용하기 위해 센스의 개발 또한 필요하다.

시스템 효율 향상을 위해 유도 가열 시스템의 전체 효율의 향상은 열회복과 하이브리드 시스템의 사용이라는 관점에서부터 시작된다. 냉각수 온도, 코일 효율, 쿨링 펌프 에너지 요구 사이의 열역학과 경제적 균형이 연구되어지고 있다.

본 연구에서는 1800KW의 고주파유도가열장치의 개발은 단조 및 압연공장의 국산화 설비의 보급으로 개량기술을 확보하여 물론 선진국과의 경쟁력에서 기술·품질·가격면에서 월등한 단조공정 자동화 제품을 생산 보급하고자 한다. 단조공장, 압연공장 등에서 사용하는 고주파 유도가열장치의 핵심 기술과 고주파 장치에서 필요로 하는 고도의 스위칭기술과 소재의 내용과 그에 따른 기술적 테크닉의 미흡으로 제품의 상용화의 힘든 문제, 부하 정합 기술, 시스템제어, 진단 시스템기술, 자동화 인터페이스 기술 등에 대하여 보고하고자 한다.

### 2.1 병렬 공진

그림 1의 전류 급전 인버터 회로는 부하 코일이 병렬 결선된 커패시터로 역률이 보상될 때 사용된다. 직렬전류 리액터는 직류전류를 일정하게 유지한다. 전력은 직류전압을 따라서 출력 전압을 변화시켜 입력 컨버터를 제어함으로써 변화된다. 인버터 다이리스터는 출력 사이클의 180도에 대하여 각각 점호된다. 그리고 출력 주파수는 부하 자체의 공진 주파수에 의하여 지시된다.

이 회로에서 부하 전압은 정현적이며 인버터 전류는 직류 쇼크의 작용으로 인하여 구형파가 된다. 큰 공진 정현 전류는 커패시터와 부하 코일 사이를 순환한다. 다이리스터간의 만족스러운 전류를 보증하기 위하여 점호점은 항상 부하 전압이 영이 되기 전 충분히 앞서야 한다. 이것은 부하 동작 주파수가 급속히 변하지 않는 한 보증될 수 있다. 만일 다이리스터가 너무 늦게 점호되면 전류는 일어나지 않으며 단락 회로 고장은 인버터를 거쳐 만들어진다. 보호는 이 고장 전류를 차단하기 위하여 필요하게 된다.

그림1의 파형에서 알 수 있는 바와 같이 다이리스터에는 높은 dv/dt 상태나 과도한 침투 전압이 과해지지 않는다. 전류의 크기는 제어되며 맥동은 직류 쇼크에 의하여 의하여 최소화된다. 초기 스위치 온 di/dt 는 적은 인덕턴스에 의하여 제어된다. 그리고 전류 상승 주기의 주된 부분은 출력 케이블 등에서의 전류 인덕턴스에 의하여 제어된다. 이들 회로들은 가끔 높은 주파수에서 동작되기 때문에 턴오프 시간이 아주 짧을 수 있고 회로 표류 인덕턴스는 큰 영향을 가질 수 있다. 기계적 설계는 모든

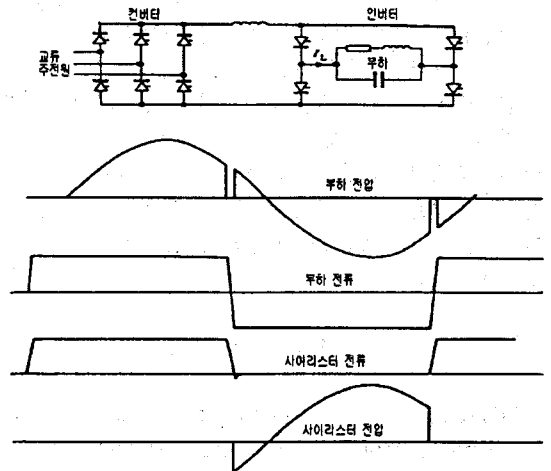


그림 1 일반적인 병렬부하 공진 회로와 출력 파형

조건들이 다이리스터 능력 내에 있는 것을 보증하기 위하여 주의 깊게 고려되어야 한다.

## 2.2 냉각

은 상태와 스위칭 손실로 인하여 전력용 소자 내에 열이 발생한다. 이러한 열은 소자로부터 냉각 매개체로 전달되어 특정 범위의 접합 온도에서 유지하도록 한다.

고 전력 응용 부분에서 소자로 액체, 즉 기름이나 물등을 이용하여 효과적으로 냉각해야 한다. 수냉 방식은 기름 냉각 방식보다 매우 효율적이고 3배 이상 효율을 발휘한다. 그러나 이 방법은 부식을 피하기 위하여 증류수를 사용할 필요가 있으며, 빙결이 되지 않도록 하여야 한다. 반면 기름은 불이 붙을 수 있다. 일부 응용에만 제한되어 사용되는 기름 냉각 방식은 좋은 절연 상태를 유지하며, 부식 및 빙결의 문제가 없다.

이번에 개발한 유도 가열기의 시스템 냉각 장치의 냉각수 및 전기적인 연결은 인덕터의 교환이 용이하도록 사각 동판을 볼트를 4개소만 체결하는 구조로 되어 있으며 냉각수는 사각 동판 내부로 공급되고 드레인온은 자연 드레인되는 방식으로 구성되어 있다.

## 2.3 스너버 회로

일반적으로 RC 스너버는 dv/dt를 허용치 이내로 제한하기 위하여 반도체 양단에 연결하여 사용한다. 또한 역회복 시간과 회복 전류에 의해 회로 인덕턴스에 축적되는 에너지가 소자 양단에 과도 전압을 나타나게 한다. 이때 스너버 회로는 소자 양단의 피크 과도 전압을 제한한다.

### 2.4 주파수 선정과 reference depth

표피 효과는 원통형 가공품내에 흐르는 와류가 표면에 대부분 밀집되는 현상이다. 반면 중심에서의 전류는 거의 0이다. 따라서 거의 표면에 가열이 일어난다. 유도전류는 표면에서 가공품이나 부하 내부로 들어 갈수록 지수적으로 감소한다.

"Reference Depth" 또는 "Skin Depth"라고 하는 이 깊이는 AC 자기장 주파수와 고유 저항, 가공품의 자기적 투자율과 관계가 있다. d는 다음과 같이 정의한다.

$$d = 3160 \sqrt{\rho / \mu f} \quad (\text{english units})$$

$$d = 5000 \sqrt{\rho / \mu f} \quad (\text{metric units})$$

여기서 d는 reference 깊이(inch 또는 cm),  $\rho$ 는 가공품의 고유저항 ( $\Omega$ -inch 또는  $\Omega$ -cm),  $\mu$ 는 가공품의 자기적 투자율, f는 work 코일의 교번 자장의 주파수(Hz)이다.

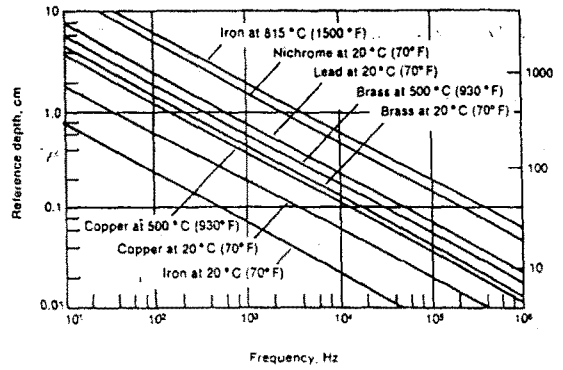


그림 2 출력 밀도와 주파수 관계에 대한 reference depth 관계

그림 2에서 각종 금속에 대한 주파수와 Reference depth를 보여 주고 있다. 고정 주파수에서 온도의 변화에 따라 Reference depth가 변하는 것은 도체의 고유저항이 온도에 따라 변하기 때문이다. 더욱이 철에 대한 투과율은 온도에 따라 변하고 Curie 온도라고 하는 하나의 값으로 감소한다. 또한 전력 밀도가 증가함에 따라 철은 자기적 포화가 일어나고 투과율은 감소하고 결과 Reference 깊이는 증가한다.

유도 가열기의 용량 계산은 다음의 대략적인 계산식으로 구할 수 있다.

$$[Kw] = [Kg/h] / ((Kg/kWh) \times [EFF])$$

- [Kw]: 용량
- [Kg/h]: 생산량
- $[Kg/kWh] \times [EFF]$ : kWh당 가열 능력
- [EFF]: 효율

그림 3은 개발된 1800kW급 고주파 유도 가열 장치의 회로도이다. 인덕터 코일은 2set가 한 몸체로 되어 있으며 동 튜브에 냉각수로서 냉각시키는 강제 수냉 방식을 채택하고 있고 스킨드 레일은 sus 환봉으로 구성되어 있다. 전도성이 높은 동 튜브를 사용하여 가열하고자 하는

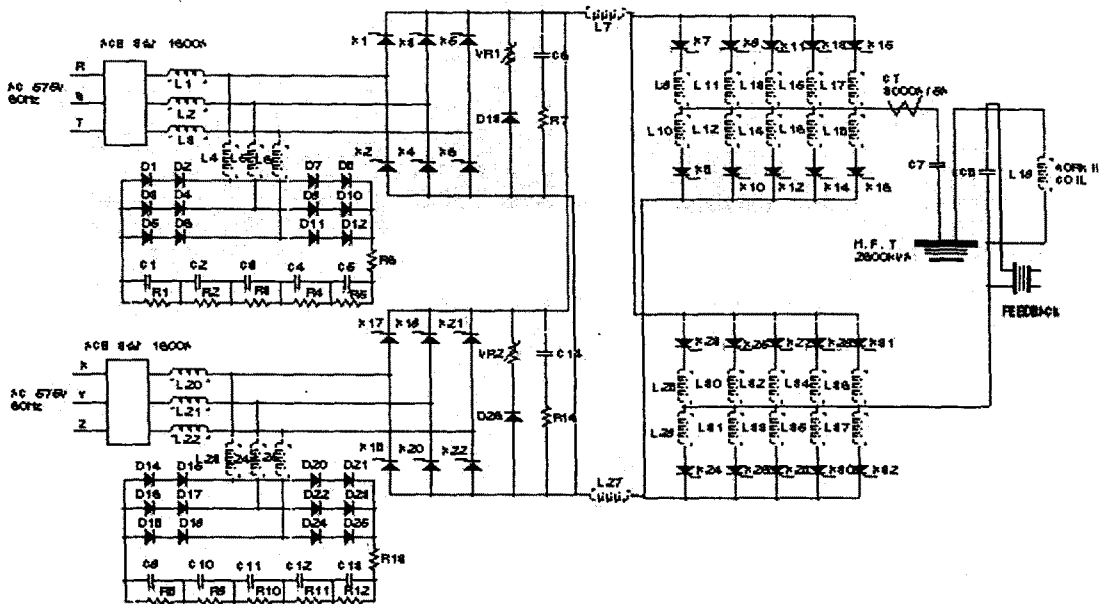


그림 3 개발된 1800kW급 유도 가열 시스템의 전체 회로도

소재를 가장 효율적으로 가열할 수 있는 형태로 코일을 만들고 실리콘 니스에 함침된 석면 테이프를 감은 후 3회에 걸쳐 실리콘 니스 함침, 건조의 공정으로 절연 처리하였다. 석면판으로 된 박스에 코일을 넣고 코일 캐스타블로 몰딩을 하고 안전에 대비하여 베크라이트로 보호를 하였다.

필터 회로는 라인 리액터 및 R.L.C 필터 회로로 구성되어 있으며 서지 억제 기능을 가지고 있다.

컨버터 변환부는 AC 상용 전원을 DC로 순 변환하는 장치로서 SCR 6상 순 브리지에 의해 위상제어를 하여 조작반에서 요구하는 출력을 얻을 수 있도록 DC로 변환하는 장치이다.

인버터부는 컨버터부에서 변환된 DC 전원을 SCR 단상 순 브리지에 의해 요구하는 주파수의 단상 고주파 AC로 역 변환하는 장치이다. 이때, 인버터에 사용되는 SCR은 충분한 허용 전류와 내압을 견디기 위해 두 개를 결합하여 사용하고 있다.

매칭부는 커플링 캐패시터, 출력 전달 매칭 캐패시터로 구성이 되며 고주파 전원 장치에서 변환된 전력을 가장 효율적으로 인덕터에 최대 전력을 공급할 수 있도록 부하 정합을 시키는 기능을 합니다.

제어부는 지시 계기, 소재 공급 제어기, 피드백 변환 회로 및 전자 회로로 구성되어 있으며 지시 계기는 DC 전압, 전류계, 전력, 전력량계, 주파수 계로 구성되어 있다.

- ◆ 입력 전원 - 전압:575v, 위상:3 $\phi$ ×2, 주파수:60Hz, kVA:2000kVA
- ◆ 출력 - 전압:850V, 위상:1 $\phi$ , 주파수:1000Hz, kW: 1800kW
- ◆ 가열능력 - 3700Kg/Hr

사진1은 개발된 1800kW 유도 가열 장치이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 1800KW의 고주파유도가열장치의 개발은 단조 및 압연공장의 국산화 설비의 보급으로 개량기술을 확보하여 물론 선진국과의 경쟁력에서 기술·품질·가격면에서 월등한 단조공정 자동화 제품을 생산 보급하고자 한다. 단조공장, 압연공장 등에서 사용하는 고주파 유도가열장치의 핵심 기술과 고주파 장치에서 필요로 하는 고도의 스위칭기술과 소재의 내용과 그에 따른 기술적 테크닉의 미흡으로 제품의 상용화의 힘든 문제, 부하 정합기술, 시스템제어, 진단 시스템기술, 자동화 인터페이스 기술 등에 대한 만족한 성과를 거두었다.

앞으로 개발에 착수 할 2700kW급 유도 가열 장치에서는 이러한 어려움에 대해 충분히 만족하는 연구를 하여 고효율, 초 대용량급의 유도 가열장치를 개발하고자 한다.

#### (참고 문헌)

- (1)Izuo Hirota, Hideki Omeri, Kundu Arun Chandra, and Mutsuo Nakaoka:Practical evaluations of Single-ended load-resonant inverter using application-specific IGBT &driver IC for induction-heatingappliance", IEEE1995, pp.531-537
- (2)S.L.Semiatin and D.E.Stutz, I.Leslie Harry: "Induction Heat Treatment of Steel"American Society for Metals, 1986
- (3)Hiroyuki Ogiwara, Biswas satyendra Nath, Mutsuo Nakaoka: "Instantaneous current vector control-based soft-switched high-frequency resonant inverter using static induction transistors for induction-heating power supply". IEEE, pp.218- 224, 1995
- (4)J.Vitins, J.L.Steiner: "Fast Reverse Conducting Thyristors for High Power Series Resonant Circuits", IEEE, pp.715-722, 1984
- (5)A.Okuno, M.Hayashi, H.Kawano, H.Yasutsune, M.Nakaoka: "Series Resonant frequency tracking-based high-frequency inverter using static induction power transistors for electromagnetic industrial induction metal surface heating and feasible evaluations", IEEE, pp.212-217, 1995
- (6) 이현우 등: "유도가열 조리기용 고주파 인버터의 특성해석" : '95전기학회 부산경남합동학술대회 논문집, pp.33-38, 1995.11.25.

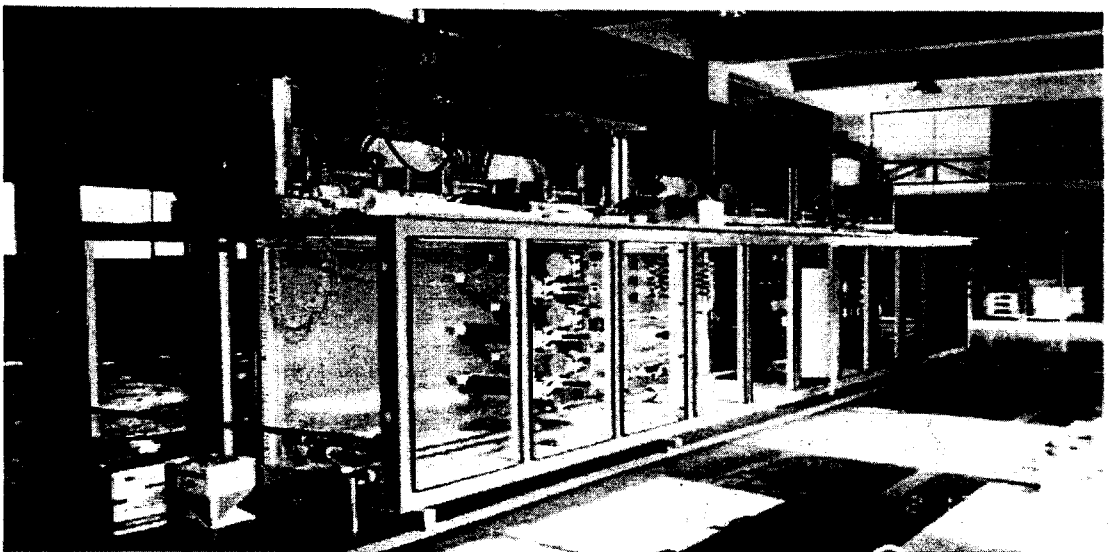


사진1 개발된 1800kW 유도 가열 장치도