

2700kW급 고주파 유도가열장치의 전원시스템 시뮬레이션

이광수 고희석 이영호* 이현우
경남대학교 전기공학과 동서기전*

Simulation of High-Frequency Induction-Heating Application Power Supply at 2700kW Power

K.S. Lee, H.S. Koh, Y.H. Lee*, H.W. Lee,
KyungNam Univ. Dongseo Mechatronics Co. Ltd*

Abstract - Abstract -The development of the high-frequency induction-heating for 2700kW 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.

1. 서 론

유도 가열(induction heating)은 주로 산업계에서 주조, 열처리, 용접, 표면 처리 등에 많이 이용되고 있다. 유도 가열은 1831년 패러데이에 의해서 발견된 전자기 유도 현상을 기초로 하고 있다. 패러데이의 실험은 코일 내에서 자석을 이동시키면 폐회로를 형성하는 코일에 유도전류가 발생한다는 것인데, 유도 가열의 원리는 자석 대신 코일을 만들어 교류 전류를 흘려주면 교류 자속이 발생하고 이 자속과 금속 부하가 쇠교를 하면 금속 부하에는 맴돌이 전류가 흐르는 와전류가 발생한다. 이 와전류와 금속 부하의 고유 저항에 의해서 줄(joule)열이 발생하여 가열되게 된다.

유도 가열은 장비의 고가와 전기적으로 많은 비용이 필요함에도 불구하고 불순물의 포함이 없어 깨끗하고, 다른 가열에 비해 빠르며, 반복적인 수행을 할 수 있다. 또한 작업 부하와 가열원과의 접촉이 없으며, 가열을 부분적이거나 표면으로 제한 할 수 있다는 많은 장점이 있어 금속 등의 가열 분야에서 큰 몫을 차지하고 있다. 하지만, 비유도 담금질 방식은 기하학적으로 복잡한 제품이나 소형 제품에서는 여전히 사용되고 있다.

본 연구에서는 1800kW급 고주파 유도가열장치의 개발에 대한 노하우를 살려 2700 kW급 고주파 유도가열 장치의 개발을 위한 기초 메인 전력용 반도체 소자의 선정, 스너버회로 개발, 소자와 시스템 보호, 노이즈 문제 등에 대한 기초자료를 만들고자 한다.

2. 전원 공급 시스템

유도 가열의 전원 장치는 수년동안 계속 발전해왔다. 1945~1965년 사이 전원의 주된 형태는 선-주파수 전류(60Hz)를 사용하는 시스템, motor-generator 시스템, 진공관 시스템이 주를 이루었다. 그후, 1960년 후반에 solid-state 시스템이 motor-generator 시스템을 교체하면서 새롭게 소개되어 졌다. 표1은 각각의 전원 시스템에 대한 주파수, 출력 범위, 효율, 주요 특징 등을 간략하게 소개하고 있다.

전원 시스템의 선택은 주로 주파수에 의존한다. 그림1은 일반적인 유도 가열 장치에서 출력과 주파수의 관계를 나타내고 있다.

2-1. 컨버터부

유도 가열 장치에 사용되는 전원 장치는 대부분이 ac-dc-ac의 형태로 그림은 가장 일반적인 컨버터이다.

2-2. 인버터부

공진형 인버터는 일정한 출력전압이 요구되는 고주파 응용분야에서 사용된다. 최대 공진주파수는 다이오드나 트랜지스터의 턴오프시간에 의해 제한되어 진다. 공진형 인버터는 출력 전압을 제한된 범위내에서 조절할 수 있다.

병렬 공진형 인버터는 일정 직류원으로부터 전원을 공급받게 되고, 정전압 출력 전압을 출력하게 된다.

E급 인버터와 정류기는 기본적으로 간단하고 저전력·고주파 응용분야에서 사용된다. 영전압 스위칭과 영전류 스위칭 컨버터는 영전압·영전류에서 턴온, 턴오프를 하여 스위칭 손실이 제거되기 때문에 점차적으로 사용이 늘어가고 있다.

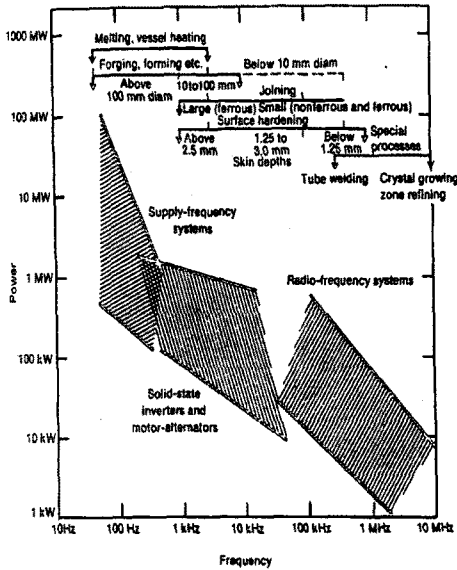
[표 1] 각 유도가열 전원장치의 특징

전원 시스템	주파수 영역	출력 범위	효율 %	특징
선주파수	60Hz	100kW ~ 100MW	90 ~ 95	고효율, 저비용, 간단한 장비, 깊은 침투 깊이
motor-generator	500Hz ~ 10kHz	10kW ~ 1MW	75 ~ 85	온도변화에 대한 저항도, 라인 서지에 대한 저항도, 고정 주파수, 저유지비용
solid-state	180Hz ~ 50kHz	1kW ~ 2MW	75 ~ 95	고효율, 움직임 없음, 가동시간 없음, 출력측 보호, 부하 변동에 따른 임피던스 매칭
진공관	50kHz ~ 10MHz	1kW ~ 500kW	50 ~ 75	얕은 가열 깊이, 부분 가열, 고비용, 저 효율, 부하변동에 따른 임피던스 매칭

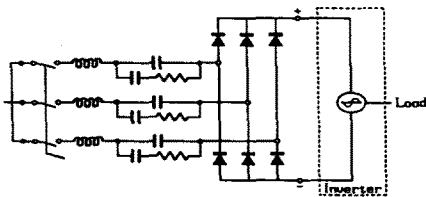
공진형 직류링크 인버터에서 공진회로는 인버터와 직류 전원사이에서 연결된다. 인버터의 입력단에서 공진 전압 펄스가 발생하며, 인버터 소자는 영전압에서 턴온과 턴오프하게 된다.

2-3. 직렬 공진 인버터

직렬공진 인버터는 공진 전류 발진(resonant current oscillation)을 기본으로 한다. 전류 소자와 스위칭 소자는 감쇠 회로를 만들기 위해 부하와 직렬로 위치하게 된다. 스위칭 소자에 흐르는 전류는 회로의 고유특성으로 인하여

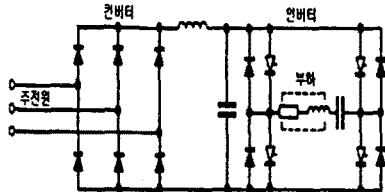


[그림 1] 유도가열장치의 일반적인 출력과 주파수의 관계



[그림 2] 일반적인 컨버터 회로

0으로 떨어진다. 스위칭 소자가 다이리스터라면, 이것을 자기전류라 한다. 이러한 형태의 인버터는 높은 출력주파수 즉, 200Hz~100kHz 정도에서 근사적으로 거의 정현파형을 만들어내며 상대적으로 일정출력이 요구되는 응용(유도가열, 음파전파기(sonar transmitter), 형광등, 초음파 발전기)에서 보편적으로 널리 사용된다. 높은 스위칭 주파수로 인하여 전류소자의 크기는 작다.



[그림 3] 일반적인 직렬부하 공진회로

직렬 인버터는 높은 전압과 낮은 전류가 요구되는 응용 분야에 가장 적합하다. 공진형 인버터는 일반적으로 단지 고정된 출력 전압만이 요구되는 응용분야에서 사용된다. 그러나, 무부하시에 레귤레이션은 공진주파수보다도 낮은 주파수에서 시비율(time ratio)을 제어하여 얻을 수 있다. 하지만, 다음과 같은 두가지 단점이 있다. (1) 동작 주파수가 공진 주파수로부터 위 아래로 변할 수 있는 폭이 제한되어 있다. 그리고 (2) 낮은 Q값 때문에, 넓은 범

위의 출력전압을 제어하기 위해서는 주파수의 변화가 커야만 한다.

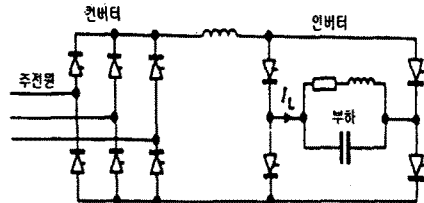
병렬부하에 대한 직렬 공진형 인버터는 자연적으로 단락회로로 안정되므로 단락회로가 빈번한 응용분야에 바람직하다. 이 인버터는 대부분 저전압이며, 높은 전류가 요구되는 응용분야에 널리 이용된다. 입력 전압범위는 상대적으로 작으며, 약 $\pm 15\%$ 까지 된다.

2-4. 병렬 공진 인버터

그림 4의 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 공진주파수에 의하여 지시된다.

이 회로에서 부하 전압은 정현적이며 인버터 전류는 직류 초크의 작용으로 인하여 구형파가 된다. 큰 공진 정현 전류는 커패시터

와 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



[그림 4] 일반적인 병렬부하 공진회로

고장 전류를 차단하기 위하여 필요하게 된다.

다이리스터에는 높은 dt/dv 상태나 과도한 침투 전압이 과해지지 않는다. 전류의 크기는 제어되며 맥동은 직류 초크에 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 조건들이 다이리스터 능력 내에 있는 것을 보증하기 위하여 주의 깊게 고려되어야 한다.

3. 2700kW급 전체 시스템 개요

인덕션 코일은 2세트가 한 몸체로 되어 있으며 동 튜브에 냉각수로서 냉각시키는 강제 수냉 방식을 채택하고 있고 스키드레일(skid rail)은 sus 환봉으로 구성되어 있다. 전도성이 높은 동 튜브를 사용하여 가열하고자 하는 소재를 가장 효율적으로 가열할 수 있는 형태로 코일을 만들고 실리콘 니스에 함침된 석면 테이프로 감은 후 3회에 걸쳐 실리콘 니스 함침, 건조의 공정으로 절연 처리하였다. 석면판으로 된 박스에 코일을 넣고 코일 캐스타블로 모델링을 하고 안전에 대비하여 백크라이트로 보호를 하였다.

냉각수 및 전기적인 연결은 인덕터의 교환이 용이하도록 사각 동판에 볼트를 4개소만 체결하는 구조로 되어 있으며 냉각수는 사각 동판 내부로 공급되고 자연 드래

인(drain) 되는 방식으로 구성되어 있다.

인덕터의 고정은 4개소의 잠금핀(locking pin)에 의하여 인덕터를 제자리에 놓으면 자동적으로 잠기는 방식이다. 인덕터는 소재의 규격에 따라 선정된 것으로 예비 인덕터의 보관 및 교환이 용이하도록 인덕터 보관대 및 교환 장치를 옵션에 의해 제공한다.

고주파 전원 장치는 입력 차단기, 필터 회로, 순 변환부, 역 변환부, 메칭부, 제어부로 구성되어 있다. 입력 차단기는 공기 차단기 (air circuit breaker)이다. 필터 회로는 라인 리액터(line reactor) 및 R.L.C 필터 회로로 구성되어 있으며 서지 보호(surge suppressor) 기능을 가지고 있다.

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

역 변환부는 순 변환부에서 변환된 DC 전원을 SCR 단상 순 브릿지에 의해 요구하는 주파수의 단상 고주파 AC로 역 변환하는 장치이다.

메칭부는 coupling capacitor, output transformer matching capacitor로 구성이 되며 고주파 전원 장치에서 변환된 전력을 효율적으로 인덕터에 최대 전력을 공급할 수 있도록 부하 정합을 시키는 기능을 한다.

제어부는 지시제기, 소재 공급 제어기, 피드백(feed back) 변환 회로 및 전자회로로 구성되어 있으며 지시제기는 DC 전압, 전류계, 전력, 전력량계, 주파수계로 구성되어 있다.

4. 회로 및 시스템 보호

회로 인덕턴스가 있을 때 전력용 소자의 역회복 과정과 스위칭 동작에 의하여 전압과도 현상이 컨버터 회로에 나타나게 된다. 주의하여 설계된 회로에서도 단락 사고가 일어날 수 있으며, 이에 따라 소자에 과전류가 흐르게 된다. 반도체 소자에서 손실에 의하여 발생하는 열은 충분히 분산시키도록 해야 하며, 온도 상한치 이내에서 소자를 동작 시켜야 한다. 컨버터의 신뢰성 있는 동작을 위해서는 항상 회로가 소자의 정격을 초과하지 되도록 해야 한다. 그렇게 하기 위해서는 과전압, 과전류 및 과열에 대한 보호 대책이 필요하다.

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

고 전력 응용 부분에서 소자로 액체, 즉 기름이나 물 등을 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. 방열 파이프 또는 액체 냉각에 의한 방열판 등이 많이 사용되고 있다.

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.

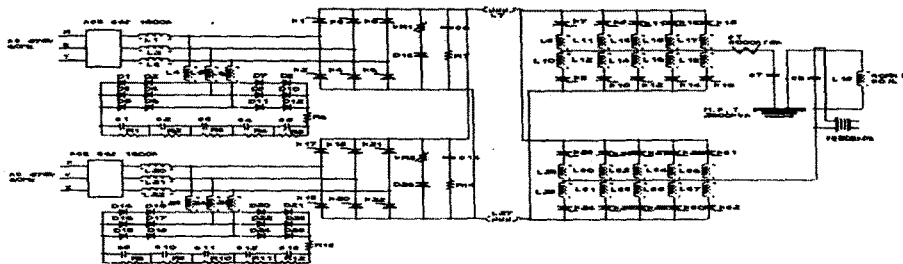
5. 결 론

이와 같이, 유도 가열 장치를 대용량화하는 데에는 냉각, 효율 향상에 대한 코일 설계 기술, 고 출력, 고주파 전원 공급 장치, 가변 주파수 제어, 소자 보호와 시스템 전체의 보호, 노이즈 대책 등 많은 어려움이 따른다. 그리고, 그것에 대해 많은 연구가 되어야 할 것이다. 이번 에 개발 하고자 하는 2700kW급 유도 가열 장치에서는 이러한 관점에서 만들 고자 한다. 또한 하드 스위칭보다 소프트 스위칭을 응용하여 고 효율을 취하고자 한다.

이 논문은 '98 중소기업청의 중소기업 기술혁신 개발사업으로 연구됨

참고문헌

- (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-heating appliance", 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, et al ; "Instantaneous current vector control-based soft-switched high-frequency resonant inverter using static induction transistors for induction-heatingpower supply". IEEE, pp.218-224, 1995
- (4)J.Vitins, J.L.Steiner;"Fast Reverse Conducting Thyristors for High Power Series Resonant Circuits", IEEE,1984, pp.715-722
- (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",IEEE1995, pp.212-217
- (6)Wilson Komatsu, Waldir Po;"A method for control and protection of series resonant induction furnaces",IEEE1997, pp. 1661-1666
- (7) 이광수, 이현우 등; "1800kW급 고주파 유도가열장치 개발", 대한전기학회 하계학술발표대회는문집, 1998.7.20
- (8) 이현우 등; "유도가열 조리기용 고주파 인버터의 특성 해석" : '95전기학회 부산경남합동학술대회 논문집, pp.33-38, 1995.11.25.



[그림 5] 유도 가열장치의 전체 회로도