

동시 이중주파수 구동을 이용한 유도가열용 인버터

申玆錫[†], 朴喜昌*

Inverter for Induction Heating using Simultaneous Dual-Frequency Method

Woo-Seok Shin, and Hee-Chang Park

요 약

단일 주파수로 유도가열에 의한 표면 경화 열처리 공정에서 생기는 설비의 이중 투자 문제 및 열처리 공정시간을 단축할 수 있도록 하기 위해 하나의 공정에서 두가지 공정을 동시에 처리할 수 있도록 해주는 동시 이중 주파수(Simultaneous dual frequency: SDF) 구동기법 기술에 대해 설명한다. 본 논문에서는 듀얼 방식의 인버터를 제안하여 이중 주파수(Dual frequency) 구동기법을 구현하였으며 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 인버터의 이중 주파수 제어 및 전력제어를 검증하였다.

ABSTRACT

Single-frequency induction heating equipment caused by a hardening heat treatment process of the double investment in the issue and allow the heat treatment process in order to shorten the time from one process to work simultaneously on two kinds of processes that allow Simultaneous Dual Frequency(SDF) drive scheme technology are described. In this paper, we propose a dual way to drive a simultaneous dual-frequency drive scheme has been implemented. Through simulations and experiments, we can obtain the validity of the proposed inverter for dual-frequency control and power control.

Key Words : Induction Heating, Inverter, Resonant Frequency, Simultaneous Dual Frequency(SDF)

1. 서 론

유도가열 장비는 생산설비의 합리화, 품질향상의 필요성, 전력의 절감을 위해 전자, 정밀기계, 금속, 자동차공업 등 여러 분야에 이용되고 있다. 최근에는 새로운 고속 대전력 반도체 전력 소자들의 개발에 의해 가능한 스위칭 범위가 20kHz~수백kHz인 공진형 인버터의 설계와 대용량을 위한 병렬운전에 관련된 기술이 용이해졌다^[1].

이러한 유도가열분야 중에서 경화처리 방식은 기어와 같은 기계 부품의 성형 후 마모나 피로균열, 표면 결함과 같은 마모현상을 해결하기 위해 사용되고 있다. 경화처리 방식에서 단일 주파수만으로 인버터 및 매칭 회로를 적용할 경우는 고주파 구동에서는 치고만 열처리가 되고, 저주파 구동에서는 치저(골)만 열처리가 되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 중주파수(Medium Frequency : MF) 열처리 공정 및 고주파(High Frequency : HF) 열처리 공정으로 구분해서 생산 프로세스를 갖춰야 하며, 이 경우 변형의 원인이 되는 full heating을 방지하기 위하여 열처리 공정이동이 매우 빨라야하는 어려움이 있으며 공정이 복잡해지고 설비의 이중 투자 문제등과 같은 단점이 있다.

상기의 단일 주파수 유도가열 표면경화 열처리 공정

[†]교신저자 : 정회원, 두원공대 전기과 교수

E-mail : wsshin@doowon.ac.kr

*정회원, 한국기계연구원 책임연구원

접수일자 : 2011. 9. 5

2차 심사 : 2011. 10. 7

1차 심사 : 2011. 9. 16

심사완료 : 2011. 10. 17

에서 생기는 설비의 이중투자 문제 및 공정시간을 단축할 수 있도록 하기 위해 하나의 공정에서 두 가지 공정을 동시에 처리할 수 있도록 해주는 동시 이중 주파수 구동기법 기술에 대해 개발하고자 한다. 이를 통해 기어와 같은 요철이 있는 복잡한 기계부품의 Tip과 Root 부분이 균일하고 신속하게 열처리 가능하게 하고 열처리 공정을 간소화를 통한 생산성 향상과 열처리의 정밀화에 기여할 수 있다. 또한 동시 이중 주파수 구동기법을 적용하면 수초이내의 순간적 열처리가 가능하며 탄화처리 공정 대비 약 50% 에너지절약, 기존 유도가열 열처리 공정 대비 15% 에너지를 절약할 수 있다. 더불어 구동장치가 간단해지므로 30% 공간절약을 할 수 있으며 기어, 스프로킷 등 복잡한 형상도 원형의 코일사용으로 간소화 가능하며 기어의 Distortion 또는 Runout 최소화 시킬 수 있다. 기존의 동시 이중 주파수 구동기법은 인버터 1대로 동시에 MF와 HF출력할 수 있도록 4개의 수동소자를 사용하여 2개의 공진점을 설계하였다. 이 방식은 인버터 1개로 MF와 HF출력을 독립적으로 전압 또는 전류의 크기를 제어하므로 하드웨어 구성은 간단하나 제어방법이 어려운 방식이다^{[2][3]}.

본 논문에서는 MF 인버터와 HF 인버터를 독립적으로 분리하여 합성한 출력을 통하여 동시 이중주파수 (Simultaneous dual frequency: SDF) 출력을 부하에 공급하도록 구성 하였다. 제안하는 방식은 인버터 2대를 통하여 MF 출력과 HF 출력을 각각 독립적으로 제어 가능하다. 이 방식은 전력부회로는 복잡하지만, 제어성과 안정성이 우수한 장점을 갖는다. 제안하는 인버터에 대한 설계와 시험을 수행하였고 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 고주파 유도가열의 원리

유도가열의 기본원리는 그림1과 같이 원기둥모양의 피 가열물 주위에 가열 코일을 감고 이 가열 코일에 고주파 전류를 흘리면 가열 코일 내부의 피 가열물에 열이 발생한다. 이것은 전기적으로 1차 권선을 N턴 감고 2차 권선을 1턴 감은 변압기와 그 구조와 원리가 매우 유사하다. 다만 2차 권선을 단락시키는 것이 일반 변압기와 다른 점이다. 또한 일반 변압기는 1차 권선과 2차 권선의 자기적 결합도를 높이기 위하여 철심을 사용하는 반면 유도가열에서는 공심구조를 가지고 있다. 경우에 따라서 자기력선을 집중할 목적으로 가열 코일 외측에 자성 코어를 사용하기도 하나 전체적으로는 공심이라 할 수 있다.

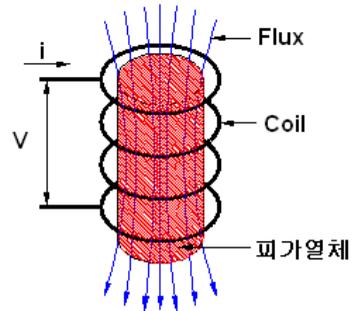


그림 1 유도가열 구성
Fig. 1 Configuration of Induction Heating

이를 변압기로 등가화시키면, 변압기 2차측 저항 R은 피 가열물이 1차 권선을 감은 방향으로 전류를 흘리면서 갖게 되는 전기 저항을 등가적으로 나타낸 것이다. 이 때 만일 1차 권선에 I_1 의 전류가 흐를 경우 2차 권선에는 변압기의 원리에 의하여 수식(1)과 같은 전류가 흐르게 된다.

$$I_2 = N \times I_1 \tag{1}$$

유도가열의 부하는 코일의 인덕턴스와 피가열물의 유효전력성분에 해당하는 저항으로 등가화 할 수 있다. 또한 식(2)와 같이 코일의 인덕턴스와 저항의 비를 Q(Quality Factor)로 나타낸다.

$$Q = \frac{\omega L}{R} \tag{2}$$

일반적으로 유도가열용 부하의 경우 전기적으로 누설인덕턴스가 큰 2차가 단락된 공심변압기이기 때문에 전기적으로 저항특성을 갖는 가열물이 삽입되더라도 Q값이 커 공급하는 대부분의 전력이 무효성분을 가지게 된다. 다시 말해 등가적으로 인덕턴스와 저항이 직렬로 연결된 형태이기는 하나 인덕턴스에 비해 저항이 매우 작아 역률은 대략 0.03~0.08 사이의 값을 갖는다. 그러므로 인덕턴스에 의한 무효전력분을 상쇄시키기고 전원측의 피상전력분을 유효전력과 동일하게 하기 위하여 그림 2와 같이 병렬 커패시터를 연결한 공진회로가 필수적이다. 공진회로에서 특성임피던스는 식(3)과 같이 나타내며, 공진주파수는 식(4)와 같다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3}$$

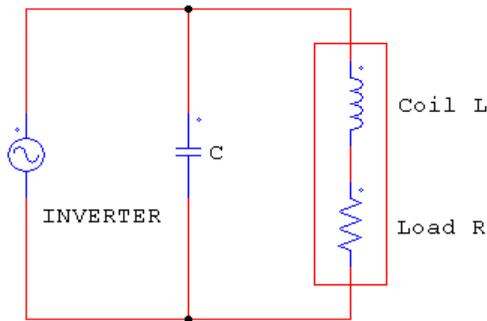


그림 2 공진회로 구성
Fig. 2 Configuration of Resonant Circuit

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

일반적으로 인버터의 공진주파수는 피가열체의 표피 효과에 의한 전류침투 깊이에 따라 결정되어 진다. 표피 효과는 교류자속에 따른 도체 중심부 일수록 쇠교자속수가 많아져 인덕턴스가 커지면서 교류전류가 흐르기 어렵기 때문에 도체표피로 흐르는 것을 의미한다. 따라서 표피 효과는 주파수와 재료에 의해 결정되면 관계식은 식(5)와 같다.

$$\delta = 5.033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu s \times f}} \quad (5)$$

여기에서 δ 전류침투깊이[cm], ρ 재료의 고유저항[uΩcm], f 주파수[Hz], μs 비투자율 (강자성체 $\mu s > 1$, 상자성체 $\mu s \approx 1$, 반자성체 $\mu s \approx (\mu s < 1)$)

3. 동시 이중주파수 구동원리

유도코일에 의해 기어와 같은 복잡한 형상을 열처리할 경우 공급 전원장치 주파수에 따라 기어의 산과 골이 일정하지 않게 열처리되는 현상이 있다. 즉, 그림 3은 HF 방식을 열처리에 적용한 것으로 A는 유도코일의 전류이며 B와 C는 그때 유도전류의 경로를 나타낸 것으로 이 경우 기어의 산(치고)만 표면 열처리됨을 알 수 있다. 그림 4는 MF 방식을 열처리에 적용한 것으로 유도전류의 경로가 골(치저)쪽으로 몰려 표면처리 됨을 알 수 있다. 그림 5는 인버터를 통해 MF 방식과 HF 방식을 동시에 입력한 것으로 기어의 산과 골이 동시에 열처리되어 일정한 두께로 경화됨을 알 수 있다.

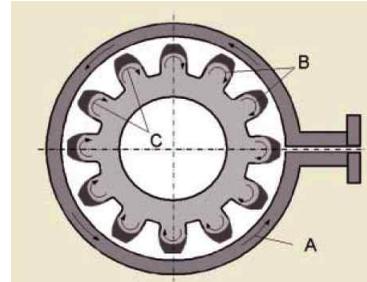


그림 3 고주파에 의한 기어휠 표면처리
Fig. 3 Gear hardening process with high frequency

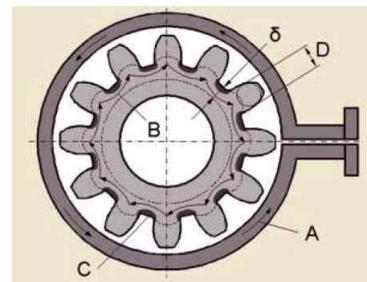


그림 4 중주파에 의한 기어휠 표면처리
Fig. 4 Gear hardening process with medium frequency

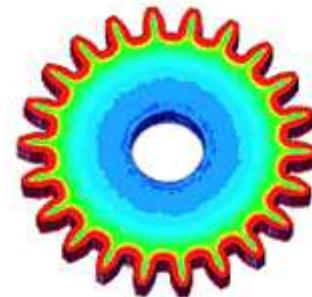


그림 5 동시 이중주파수에 의한 기어휠 표면처리
Fig. 5 Gear hardening process with simultaneous dual frequency

일반적인 유도가열시스템은 그림 6과 같이 단일 고주파 공진회로 구성을 갖는다. 인버터와 같은 전원장치를 통해 이중 주파수와 전력량을 제어한다면 기어와 같은 복잡한 형상의 열처리시 산과 골 그리고 경화의 깊이를 조절할 수 있다. 이를 위하여 기존 방식으로 그림 7과 같은 시분할 이중 주파수 구동방식이 있다. 시분할 이중주파수 방식은 스위치에 의해 시간적 간격을 두고 먼저 MF 방식을 인가하고 HF 방식을 적용하는 방법으로 기어의 산과 골을 차례로 열처리하고 있다. 반면에 그림8과 같이 제안하는 동시 이중주파수 방식은 인버터에서 MF 방식과 HF 방식을 동시에 출력하면 매칭 회로를 통해 합성된 주파수가 출력하는

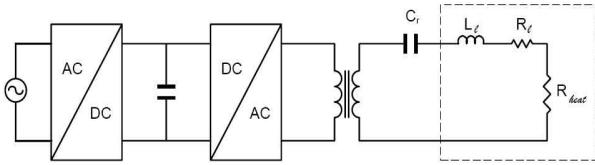


그림 6 기존 단일 고주파 인버터 유도가열 회로
Fig. 6 Conventional single High frequency Inverter Scheme

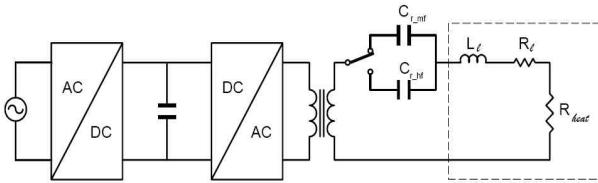


그림 7 시분할 이중주파수 방식
Fig. 7 Time sharing dual frequency method

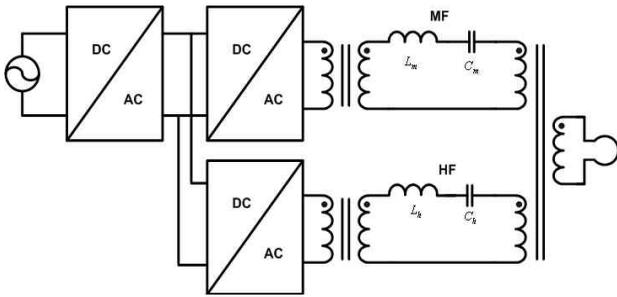


그림 8 듀얼 인버터에 의한 동시 이중 주파수 방식
Fig. 8 Simultaneous dual frequency method with Dual inverter

방식이다. 이 방식은 두 개의 공정을 하나로 간소화시킴으로써 공정시간 축소와 설비투자 감소 효과를 얻을 수 있다.

4. SDF 인버터 설계

SDF 인버터는 정류기, 인버터, 듀얼 필터 및 유도가열부로 크게 4개의 요소로 구성되어 있다. 정류부에서는 제어정류를 통해 유도가열에 의한 열처리를 위해 출력력을 조절하는 역할을 하며 인버터부에서는 시료의 형상에 적절한 열처리를 위한 필요 주파수를 하프브리지 인버터로 구성하여 출력하며 이때 MF 방식과 HF 방식을 각각 만들어 공급한다. 이를 통해 생성된 MF 출력과 HF 출력은 듀얼 필터를 통해 합성된 출력 형태로 유도가열부에 전달하는 역할을 한다.

이러한 구성 요소를 실현하기 위해 유도 가열부 하 부분에 대한 파라미터가 필요하며 이를 통해 듀얼

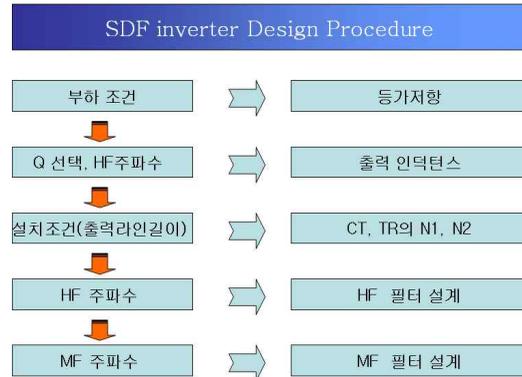


그림 9 SDF 인버터 설계 절차
Fig. 9 SDF inverter design procedure

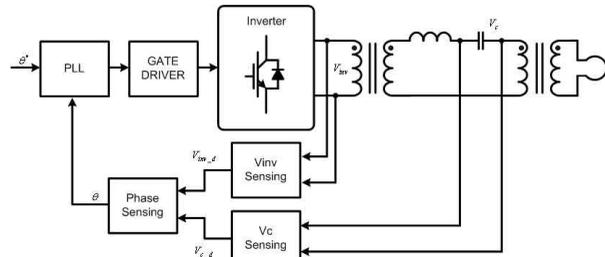


그림 10 위상동기루프 구성
Fig. 10 Phase Locked Loop Configuration

필터의 LC 설계를 수행하는 데 이때 유도가열을 위한 Q, HF, MF 출력을 고려하여 필터 값을 선정한다. 또한 인버터부는 두 개의 주파수를 발생하기 위해 안전성과 편리성 및 제어성을 고려하여 듀얼 인버터 타입으로 설계를 수행하였다. 인버터의 각 요소를 설계하기 위한 설계 절차는 그림 9와 같이 화살표 순서에 따라 각 요소들을 계산하고 인버터 설계 파라미터를 결정한다. 유도가열 부하 조건을 등가저항으로 연산하고 Q와 출력 주파수에 적합한 출력 인덕턴스를 결정한다. 출력라인의 길이, 설치 조건 등을 고려하여 전류 센서와 변압기의 1, 2차 턴수를 설정하며 이를 통해 MF 방식과 HF 방식의 필터를 설계한다.

5. 위상동기루프 구성

그림 10은 유도가열코일의 공진점을 찾기 위한 위상 동기루프(Phase Locked Loop : PLL)의 기본 구성도이다. 제어변수 θ 를 얻기 위하여 인버터 출력전압 V_{inv} 와 공진용 커패시터 전압 V_c 를 측정하는 것이 필요하다. 측정된 전압은 각각 디지털 신호인 “1 또는 0”으로 변환하여 V_{inv-d} 와 V_{c-d} 를 얻는다.

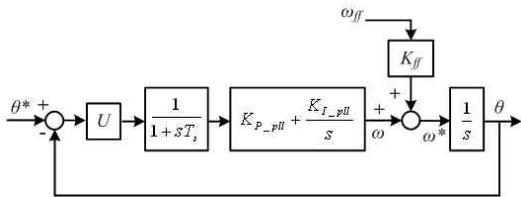


그림 11 위상동기루프 제어기
Fig. 11 Controller of Phase Locked Loop

Phase Sensing블록에서는 변환된 2개의 디지털 신호를 “XOR” 하고, 적분하여 최종 제어변수 θ 를 얻을 수 있다.

위상동기루프 제어기 구성은 그림 11과 같으며, 위상지령값 θ^* 로 위상동기하기 위하여 Feedforward항인 운전주파수와 적분제어기를 통하여 VCO(Voltage Controlled Oscillator)에 인가할 제어값을 구한다. VCO는 입력된 제어값에 따라 출력주파수를 Gate Driver에 인가하여 인버터를 구동하며 위상지령값 θ^* 에 동기되도록 피드백 루프를 수행하게 된다. 위상동기루프는 MF 방식과 HF 방식에 대해서 각각 독립적으로 구성하고 제어하도록 한다.

그림11의 위상동기루프 제어기는 디지털제어기로 구성하였기 때문에 식(6)과 같은 디지털구현에 의한 대역폭(Bandwidth)인 1차 지연요소를 포함하고 있으며, 제어기 개루프 전달함수 $G_{OL}(s)$ 를 통하여 제어기 폐루프 전달함수 $G_{CL}(s)$ 를 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B.W. = \frac{1}{1 + sT_s} \quad (6)$$

여기에서 B.W.는 Bandwidth이고, T_s 는 sampling period이다.

$$G_{CL}(s) = \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)} = \frac{K_{P_pll}U \cdot s + K_{I_pll}U}{s^2 + K_{P_pll}U \cdot s + K_{I_pll}U} \quad (7)$$

6. 시뮬레이션

동시 이중주파수 인버터를 이용한 유도가열의 모의시험을 위해 그림 12와 같이 회로도를 구성하였다. 시뮬레이션 조건에서 MF 방식과 HF 방식을 구현하기 위한 인덕턴스와 커패시터의 값은 표 1과 같다.

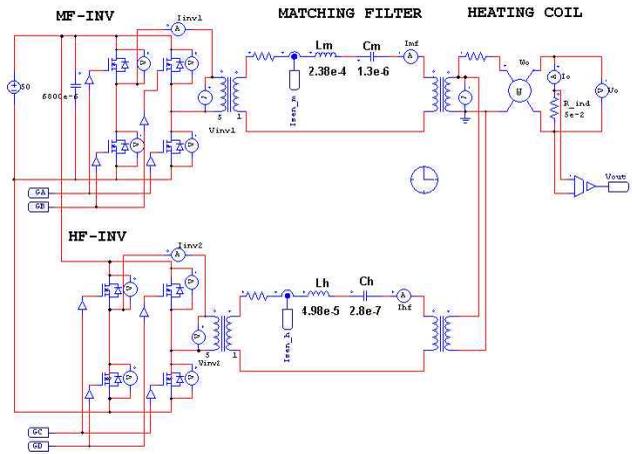


그림 12 시뮬레이션 회로도
Fig. 12 Schematics for Simulation

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation Conditions

Parameters		Values
MF	L_m	238[μ H]
	C_m	1.3[μ F]
	F_m	9.05[kHz]
HF	L_h	49.8[μ H]
	C_h	0.28[μ F]
	F_h	42.6[kHz]
DC Link Voltage		50[Vdc]

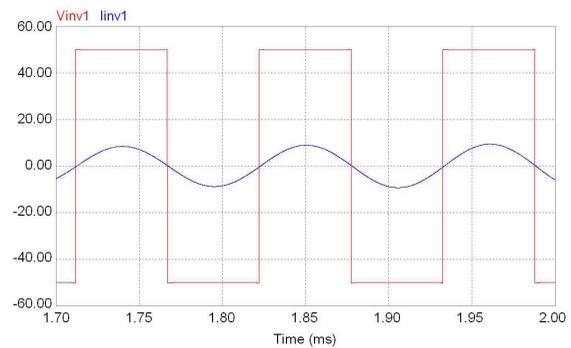


그림 13 MF 시뮬레이션 결과
Fig. 13 Simulation Results of MF

그림 13은 MF 인버터의 출력 시뮬레이션 결과로써 공진주파수 9.05[kHz]에서 출력전압과 출력전류가 위상동기를 제어함을 알 수 있다. 그림 14는 HF 인버터의 출력 시뮬레이션 결과로써 공진주파수 42.6[kHz]에서 출력전압과 출력전류가 위상동기를 제어함을 알 수

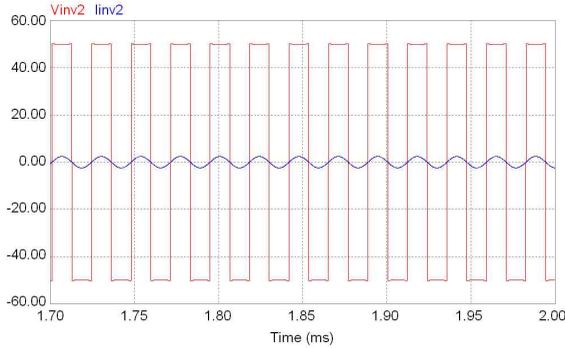


그림 14 HF 시뮬레이션 결과
Fig. 14 Simulation Results of HF

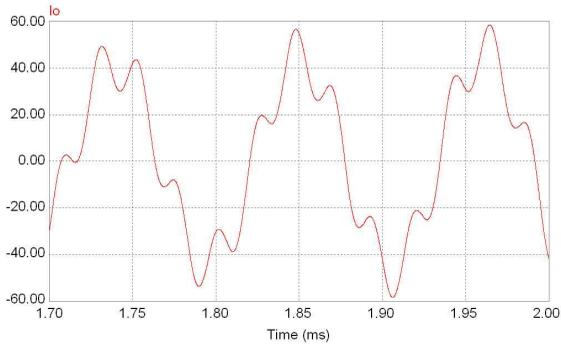


그림 15 MF, HF 합성 출력전류 시뮬레이션 결과
Fig. 15 Simulation Results of Output Current of MF and HF

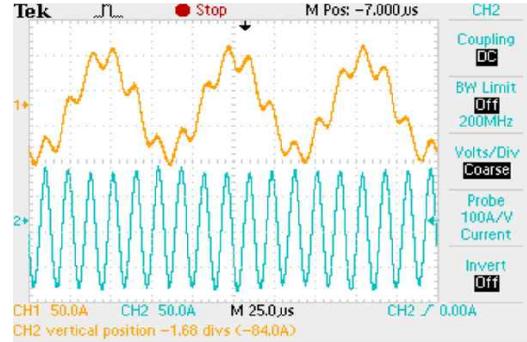
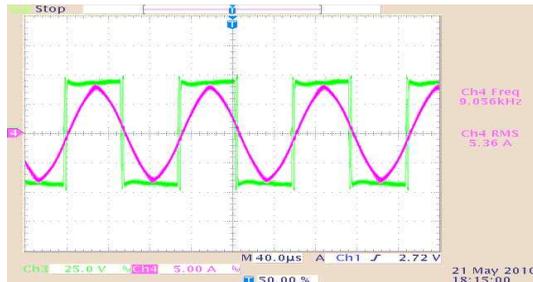


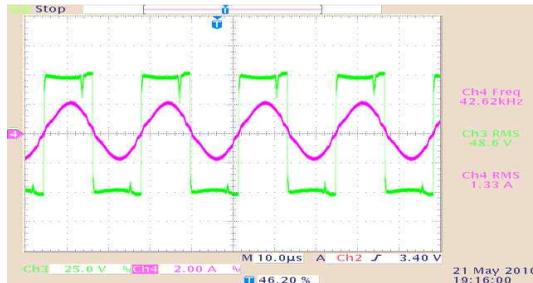
그림 17 부하측 출력전류
ch1 : 합성 출력전류[50A/div]
ch2 : HF 출력전류[50A/div]
Fig. 17 Output current of load side
ch1 : Composition output current[50A/div]
ch2 : HF output current



그림 18 SDF 인버터 유도가열 장치
Fig. 18 SDF Inverter for Induction Heating



(a) MF 전압, 전류



(b) HF 전압, 전류

그림 16 MF와 HF 전압, 전류 시험 결과
Fig. 16 Experimental Results of MF and HF

있다. 그림 15는 MF 인버터와 HF 인버터의 합성 출력 시뮬레이션 결과 파형으로 2개의 주파수 성분이 부하에 인가됨을 알 수 있다. 이때 MF 인버터의 공진주파수는 9.05[kHz]이고 HF 인버터의 공진주파수는 42.6[kHz]이다.

7. 실험 결과

동시 이중주파수 인버터를 이용한 유도가열의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 동일한 조건으로 시험 장치를 구성하고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 16은 유도가열 부하에서 MF와 HF 공진 시험 시 출력전압과 출력전류 결과이다. 이때 인버터의 DC 링크 전압은 50[V]이며, MF 인버터 출력전압과 출력전류는 주파수 9.056[kHz]에서 공진 운전하였고, HF 인버터에서는 출력전압과 출력전류가 주파수 42.62[kHz]에서 공진 운전함을 확인 하였다.

그림 17은 유도가열시 MF와 HF의 출력을 합성한 출력전류 파형의 결과로 운전주파수는 MF와 HF가 동시에 합성되면서 시뮬레이션과 유사한 특성을 보이는 결과를 확인하였다. 그림 18은 구현된 SDF시작품을 보여준다.

8. 결론

기존 유도가열장비의 시분할 이중주파수 방식이 갖는 스위치에 의한 시간적 간격으로 MF와 HF 정합회로를 통해 기어의 산과 골을 차례로 열처리하는 단점을 보완하기위하여 MF와 HF 동시 이중주파수 방식의 인버터를 제안하였다. MF와 HF를 동시에 출력하면서 정합회로 간에 간섭을 최소화 하는 위상동기제어를 통해 주파수와 전력을 동시에 제어하는 효과를 얻을 수 있었다.

제안하는 유도가열용 MF와 HF 인버터와 정합회로를 설계 및 시뮬레이션을 수행하였고, 실험결과를 통하여 동시 이중주파수 구동 및 그 타당성을 검증할 수 있었다.

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2008EEL02P010000)

참고 문헌

[1] Schonknecht, A, De Doncker, R.W.A.A, "Novel topology for parallel connection of soft-switching high-power high-frequency inverters," *Industry Applications IEEE Transactions on*, Vol. 39, pp.550-555. March-April 2003.

[2] V. Esteve, J. Jordán, E. J. Dede, E. Sanchis-Kilders, E. Maset, "Induction heating inverter with simultaneous dual frequency output", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006*, pp. 1505-1509, Mar., 2006.

[3] V. Esteve, J. Pardo, J. Jordán, E. J. Dede, E. Sanchis-Kilders, E. Maset, "High Power Resonant Inverter with Simultaneous Dual-frequency Output", *IEEE Power Electronics Specialists Conference 2005*, pp. 1278-1281, June, 2005.

[4] Schwenk W., "Simultaneous Dual-Frequency Induction Hardening", *Heat treating Progress 2003*, pp.35-38,

May, 2003.

[5] N.S. Bayindir, O. Kukrer and M. Yakup, "DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications", *IEE Proceedings 2003*, pp.365-371, May, 2003.

[6] M. Kamli, S. Yamamoto, M. Abe, "A 50-150 kHz half-bridge inverter for induction heating applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, pp. 163-172, Feb., 1996.

[7] Bayindir, N.S., Kukrer, O., Yakup, M. "DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications," *Electric Power Applications IEE Proceedings*, Vol. 150, pp.365-371, May 2003.

[8] 신우석 외, "동시 이중주파수 구동 유도가열 인버터 설계", *전력전자학회 하계학술대회 논문집*, pp. 82-84, 2009.

저 자 소 개

신우석(申玆錫)



1960년 12월 24일생. 1986년 건국대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공박). 1988년~1996년 LG전자 생활시스템 연구소 선임연구원. 1996년~현재 두원공대 전기과 교수. 당 학회 조사이사.

박희창(朴喜昌)



1956년 6월 5일생. 1980년 동국대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 동 대학원 졸업(공박). 1982년~현재 한국기계연구원 책임연구원.