

효율이 개선된 새로운 유도가열용 전원장치

정재혁* · 최세완* · 이정민**

*서울산업대학교 · **효성중공업연구소

New Power Supply for Induction Heating with Improved Efficiency

JaeHyuck Jung* · Sewan Choi* · JungMin Lee**

*Seoul National University of Technology · **Industrial Performance Group, Hyosung Crop.

ABSTRACT

본 논문에서는 유도가열용 전원장치의 효율을 개선함으로써 효율을 극대화 시킬 수 있는 새로운 기법을 제안한다. 일반적으로 유도가열 부하의 경우 전기적인 특성상 Q(quality factor) 값이 매우 크므로 인해 전원장치에서 공급되는 대부분의 전력은 위상차에 따른 무효전력이며 더불어 입력전류 고조파에 의한 무효전력도 포함되어 있다. 이러한 무효전력 성분을 보상하기 위해 유도가열용 전원장치 인버터부에 역률보상용 콘덴서를 부착하고 적절하게 운전하여 위상차에 따른 무효전력 성분을 보상할 수 있다. 또한 컨버터부에 간단한 보조회로를 추가하여 입력전류의 고조파를 제거함으로써 고조파에 의한 역률도 개선할 수 있을 뿐만 아니라 고조파로 인해 야기되는 문제도 사전에 차단할 수 있다.

1. 서론

기존의 연소에 의한 직접적인 가열시스템에 비해 유도가열 시스템은 환경 친화적일뿐만 아니라 안전성, 고효율, 고출력 밀도, 신뢰성, 제어의 용이성 등의 많은 장점을 지니고 있어 중·대용량의 주조 및 열처리 응용분야에서 각광받고 있다. 그러나 막대한 전기를 소모해야 하는 유도가열시스템이 열효율을 극대화한 직접적인 가열방식보다 항상 에너지를 절감한다고 볼 수 없고, 또한 스위칭 소자의 동작으로 인해 고조파 문제를 야기할 수도 있다. 최근에는 세계적인 고유가 현상으로 인해 전기요금을 절감하려는 인식이 확대되었고, 고조파 규제에 대해서도 관심이 점차 증대되고 있어 유도가열용 전원장치의 진보를 요구하고 있다.

일반적으로 유도가열용 부하의 경우 전기적으로 누설인덕턴스가 큰 2차가 단락된 공심변압기이다. 이로 인해 전기적으로 저항특성을 갖는 가열물이 삽입되더라도 Q(quality factor) 값이 커 공급하는 대부분의 전력이 무효성분을 가지게 된다. 다시 말해 등가적으로 인덕턴스와 저항이 직렬로 연결된 형태이거나 하나 인덕턴스에 비해 저항이 매우 작아 역률은 대략 0.03~0.08 사이의 값을 가지게 되어 160[kW]의 유효전력을 얻기 위해서는 2[MVA]~5[MVA]의 피상전력이 공급되어야 한다.^[1] 이러한 역률문제는 유도가열용 전원장치의 인버터부에 역률보상용 콘덴서를 부하와 연결해 공진회로를 구성하여 적절하게 운전함으로써 효과적으로 해결할 수 있다. 유도가열용 전원장치의 운전방법으로는 인버터의 스위칭 주파수를 조정하여

출력을 제어하는 De-turning 방식과 인버터 스위칭 주파수를 공진 주파수에 고정된 후 싸이리스터 컨버터를 이용하여 DC 전압을 가변함으로써 출력을 제어하는 위상제어 방식이 가장 흔하게 사용되고 있다.^[2] De-turning 방식의 경우 공진 주파수 부근에서의 제한적인 운전을 통해 무효전력 성분을 보상할 수 있으나 공진 주파수를 벗어난 영역에서 운전되기 때문에 어느 정도의 무효전력 성분은 항상 존재하게 된다. 위상제어 방식의 경우에는 공진 주파수에서의 운전을 통해 이러한 무효전력 성분을 모두 보상할 수 있다는 장점이 있으나 위상제어로 인해 역률이 나빠지는 단점도 가지고 있다. 또한 두 방식 모두 컨버터의 스위칭 동작으로 발생한 입력전류의 고조파로 인해 무효전력 성분의 증가하여 역률이 나빠지고 고조파 문제를 야기시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 유도가열 부하의 특성상 나타나게 되는 위상차에 따른 무효전력 성분을 보상하는 것과 더불어 입력전류 고조파에 의해 발생하는 무효전력 성분 모두를 제거함으로써 역률을 개선하여 효율을 극대화 시킬 수 있는 새로운 유도가열용 전원장치를 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증한다.

2. 제안하는 유도가열용 전원장치

2.1 시스템 구성

그림 1에 제안한 전원장치의 인버터 방식은 직렬공진을 이용하는 Half-bridge 전압원 인버터이기 때문에 역률보상용 콘덴서를 추가적으로 부착할 필요가 없다. 즉, Half-bridge 인버터 구성 시 들어가는 콘덴서를 이용하여 부하와 직렬공진을 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 직렬공진 특성상 부하전압이 Q

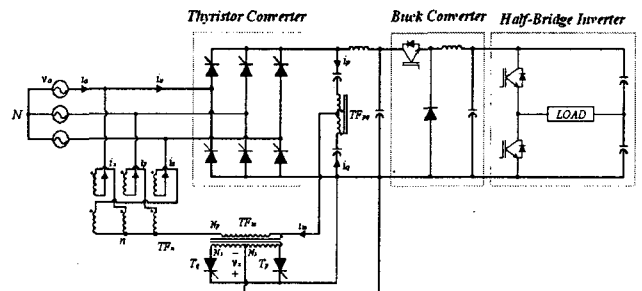


그림 1 제안하는 새로운 유도가열용 전원장치
Fig. 1 Proposed new power supply for induction heating

배 만큼 증폭되므로 인버터의 출력전압이 작아도 부하는 충분히 큰 전압을 확보할 수 있다. 여기서 Q값은 설계 시 중요하게 다루어져야 하며 아래와 같이 R, L, C 값에 의해 결정된다.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

인버터의 스위칭 주파수는 시스템의 공진주파수와 일치시켜야 하며 시스템의 공진주파수는 다음 수식으로 구할 수 있다. 시스템의 합성 임피던스 $Z_{j\omega}$ 는

$$Z_{j\omega} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

이며 공진 시에는 허수부분이 0이 되므로 다음과 같은 수식을 만족해야 한다.

$$\omega L = \omega C \quad (3)$$

따라서 공진주파수를 ω_0 라고 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

여기서, L은 부하의 인덕턴스이며 C는 역률보상용 공진콘덴서의 커패시턴스의 값이다. 공진 시에는 전압과 전류의 위상각이 동상이 되어 인버터에서는 오직 가열에 기여하는 유효전력만 부하에 공급하게 된다. 아울러 최소 임피던스 상태를 유지하고 있으므로 주어진 전압에 대해 최대의 전류를 흘려줄 수 있다.

한편, 인버터의 스위칭 주파수를 고정함으로 인해 출력 제어는 DC 전압의 가변을 통해 이루어져야 한다. 싸이리스터 컨버터의 위상각을 조정할 경우 역률이 나빠지게 됨으로 싸이리스터 컨버터와 인버터 사이에 벅 컨버터를 추가하여 출력을 제어할 수 있도록 하였다. 싸이리스터 컨버터는 다이오드 모드로 항상 동작을 시키며 응급상황 등이 발생할 경우에는 게이트 펄스를 차단하여 NFB (no fuse breaker) 대응으로 사용할 수 있다.

2.2 고조파를 제거하기 위한 보조회로

싸이리스터 컨버터의 스위칭 동작으로 인해 입력전류와 출력전압에 펄스수와 관련한 고조파 성분이 발생하게 된다. 즉, 6-펄스 컨버터를 사용할 경우 입력전류에는 5, 7, 11, 12차 등의 고조파가 출력전압에는 6, 12, 18, 24차 등의 고조파가 발생되게 된다. 이로 인해 역률이 나빠지는 물론 각종 고조파 문제를 야기할 수 있다. 제한하는 유도가열용 전원장치의 경우 6-펄스 싸이리스터 컨버터에 보조회로를 추가하여 펄스수를 늘리는 기법을 사용하고 있다.^[3] 이 보조회로는 저 용량의 직류전압 분할용 단권변압기 TF_{p0} , 전류주입용 단상변압기 TF_{m} , 주입전류를 3상에 균등하게 나누기 위한 Zigzag형 변압기 TF_n 과 변압기 TF_{p0} 와 TF_m 에 각각 연결된 2개의 콘덴서와 싸이리스터 T_p 와 T_q 로 이루어져 있다. 그림 2는 전류주입용 변압기 TF_m 에 연결된 2개의 보조 싸이리스터의 동작을 나타낸다. 변압기 TF_m 의 1차측 전압 v_m 의 상승모서리(rising edge)를 각

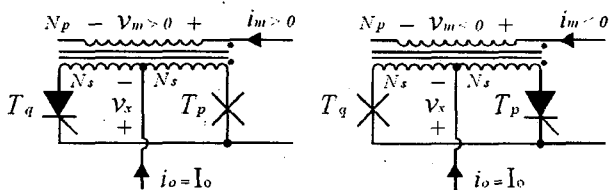


그림 2 보조회로의 동작
Fig. 2 Operation of auxiliary circuit

싸이리스터 T_p 와 T_q 의 점화각인 β_p 와 β_q 의 기준점으로 하며 싸이리스터 T_p 와 T_q 는 둘 중의 하나가 항상 부하전류를 도통 시키도록 한다. 전압 v_m 이 양(음)일 때 $T_q(T_p)$ 가 도통하고 있다고 가정하면 $T_p(T_q)$ 가 순바이어스 되어 $\beta_p(\beta_q)$ 에서 $T_p(T_q)$ 를 점화하면 전류(commutation)되어 그림 2와 같이 출력전류 I_o 를 도통시켜 변압기 TF_m 의 1차측에 정(부) 방향의 전류 $i_m = (N_s/N_p)I_o$ ($i_m = -(N_s/N_p)I_o$)을 유기 시킨다. 이러한 방식으로 반복하여 주입전류를 생성하며 Zigzag형 변압기 TF_n 을 통해 3상에 균등하게 분배한다. 이때 입력전류 i_a 와 컨버터의 출력전압 v_o 는 다음과 같다.

$$i_x = \frac{1}{3}i_m \quad (5)$$

$$i_a = i_u - i_x, \quad (6)$$

$$v_o = v_d + v_x \quad (7)$$

여기서 v_d 는 기존의 6-펄스 싸이리스터 컨버터의 출력전압이며 그림 3은 보조회로가 부착된 싸이리스터 컨버터의 주요파형을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 입력전류와 출력전압 모두 12-펄스 특성을 나타내고 있다. 또한 본 기법은 보조 싸이리스터의 추가만으로도 펄스수를 무한히 증가시킬 수 있어 이론적으로 역률이 1이 되는 유도가열용 전원장치를 구현할 수 있게 된다.

3. 시뮬레이션

그림 4는 인버터부를 등가적으로 구성한 후 P-SIM에 의한 시뮬레이션을 통해 검증한 결과이다. 그림 4(a)는 인버터의 출력전압 v_{inv} 와 부하전류 i_{out} 을 나타내는 것으로 공진주파수로 인버터를 구동하기 때문에 동상이 됨을 알 수 있다. 또한 시스템 공진주파수에 스위칭 주파수를 일치시킬 경우 스위칭 양단 전압이 0이 되는 시점에서 스위치의 On, Off가 이루어져 스위

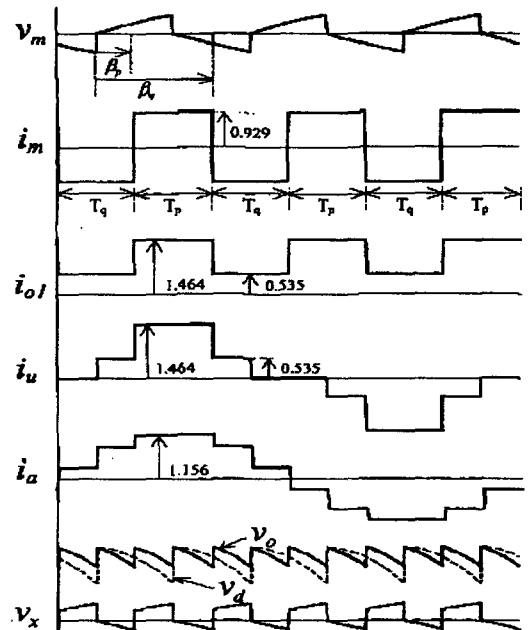
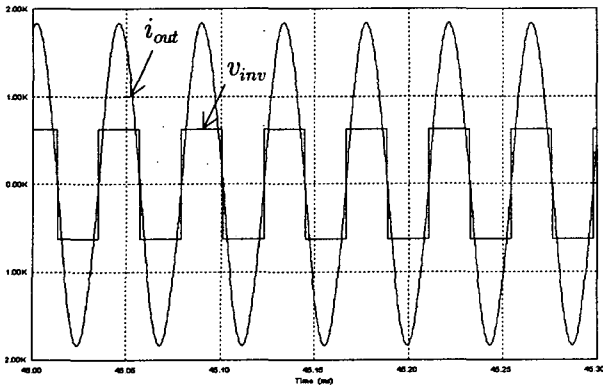
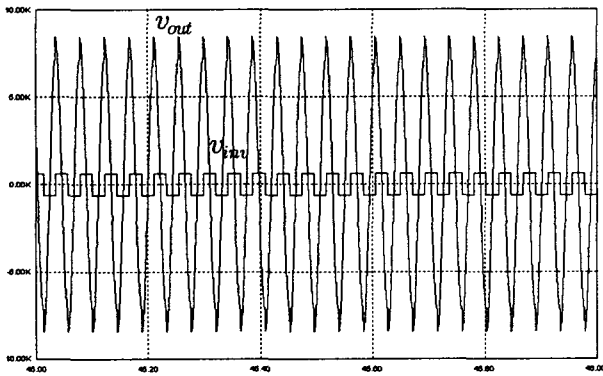


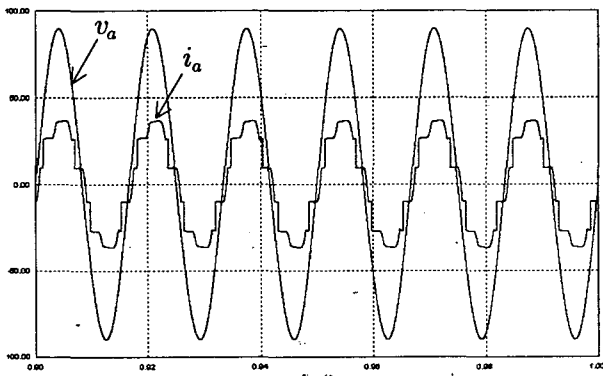
그림 3 싸이리스터 컨버터의 각부파형
Fig. 3 Variable waveform of thyristor converter



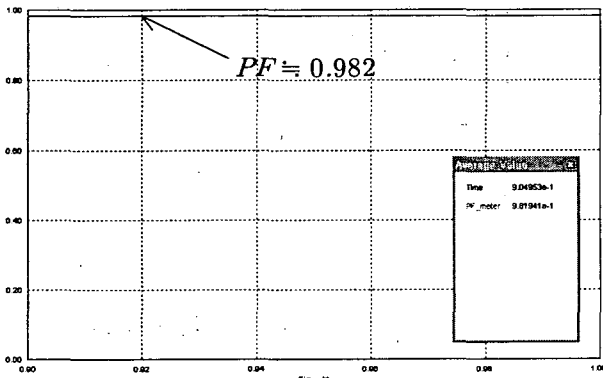
(a) v_{inv} & i_{out}



(b) v_{inv} & v_{out}



(c) v_a & i_a



(d) PF

그림 4 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveform

칭 손실을 제거할 수도 있다. 그림 4(b)는 인버터의 출력전압 v_{inv} 와 부하전압 v_{out} 을 나타내는 것으로 대략 Q배 만큼 전압이 증폭되는 것을 살펴 볼 수 있다. 그림 4(c)는 입력전압 v_a 와 입력전류 i_a 를 나타내는 것으로 입력전류의 경우 12-펄스 특성을 나타냄을 알 수 있고 이를 통해 5차 및 7차의 고조파가 제거되어 역률이 개선된다. 마지막으로 그림 4(d)는 입력 측에서 PF meter를 이용해 역률을 측정하는 것으로 역률이 1에 근접함을 알 수 있고 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 선간전압 $V_{LL} = 460 [V]$
- 가열코일 인덕턴스 $L = 29.7 [\mu H]$
- 등가 저항 $R = 0.431 [\Omega]$
- 역률보상용 공진 캐패시턴스 $C = 1.64 [\mu F]$
- 공진주파수 $\omega_0 = 2\pi \cdot 22804.47$
- Quality factor $Q = 9.87$

4. 결 론

본 논문에서는 무효전력 성분을 제거함으로써 효율을 극대화할 수 있는 새로운 유도가열용 전원장치를 제안하였고 P-SIM을 통한 시뮬레이션으로 타당성을 입증하였다. 제안한 새로운 기법의 특징은 다음과 같다.

- Half-bridge 전압원 인버터가 포함하고 있는 콘덴서를 이용하여 부하와 직렬공진 회로를 구성함으로써 추가의 역률보상용 공진콘덴서를 삽입하지 않고도 위상차에 따른 무효전력 성분을 보상할 수 있다.
- 인버터의 스위칭 주파수와 시스템의 공진주파수가 항상 일치함에 따라 ZVS가 가능하여 스위칭 손실을 최소화 할 수 있다.
- 별도의 벡 컨버터를 사용하여 DC 전압을 가변함으로써 출력력을 제어할 수 있다.
- 싸이리스터 컨버터에 간단한 보조회로를 추가하여 입력전류의 고조파를 제거함으로써 역률을 개선할 수 있다.

본 방식은 이론적으로 무효전력을 완전히 제거할 수 있기 때문에 전원장치는 실제 가열에 기여하는 유효전력만을 소모하게 된다. 이로 인해 전기 에너지를 절감할 수 있고 또한 입력전류의 고조파를 제거함으로써 고조파 문제를 사전에 차단할 수 있는 장점도 가지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Dieckerhoff, M. J. Ryan and R. W. De Doncker. "Design of an IGBT-based LCL-Resonant Inverter for High-Frequency Induction Heating". in Proc. IEEE Industry Applications Conf., Vol. 3, pp. 2039-2045, 1999.
- [2] 유효열, 심은용, 정대환, 김상중, 강재봉, "유도용해로 인버터 기술", 전력전자학회지, 제10권 4호, pp.20-24, 2005년.
- [3] 정재혁, 최세완, 이인환, 황용하, "간단한 보조회로 추가에 의한 6-펄스 싸이리스터 컨버터의 다펄스화", 전력전자학회 논문지, 제5권 6호, pp.568-574, 2000년.