

뉴로퍼지제어기를 이용한 고주파 유도가열기의 정전력제어

The power regulation of a High-Frequency Induction Heating System using Neuro-Fuzzy controller

장 중승, 설 재훈, 박 종오, 임 영도*, 최 부귀*

Jong-seung Jang, Jae-hoon Sul, Jong-oh Park, Young-do Lim, Boo-Ki Choi

Control Lab, Dept. of Electronics Engineering, Dong A University

요 약

본 논문에서는 뉴로퍼지제어기를 이용한 유도가열기의 시변부하에 대한 적응 정전력 제어를 하고자 한다. 유도가열기의 정전력 조절을 위해 IGBT를 사용한 위상전이형 펄스폭변조(PWM)와 PLL에 의한 부하 공진주파수 추종형 펄스 주파수변조(PFM)가 조절되는 공진 고주파 인버터를 응용한 유도가열기를 설명하고, 실험 제작된 유도가열기에서의 부하에 대한 규정 전력 추종이 잘되고 있음이 실제로 논증되어졌다.

I. 서론

고주파 유도 가열 방식은 90년대 후반에서는 수십 kHz~수천kHz대, 출력 수kW~수백kW대의 유도 가열장치의 개발에 주력하고 있으며 그 응용범위도 다양하게 산업현장에 적용 확장시여나가고 있다.

본 논문에서는 뉴로퍼지를 이용한 디지털식 제어기를 사용하여 유도 가열기의 시변부하에 대한 전력 조절을 위해 IGBT를 사용한 위상 전이(Phase- Shift) 펄스폭 변조(PWM)와 펄스 주파수 변조(PFM)가 조절되는 공진 고주파 인버터를 설명한다. 철과 같은 금속 물체에 있어서 일정한 어느 온도 이상으로 올라갈 때 인버터의 부하 임피던스가 급격하게 변화하여 부하의 공진 주파수가 달라지게 될 때 부하의 공진 주파수를 추종하면서 전력 조절을 행할 수 있는 인버터를 설계함으로써 보다 효과적이고 능률적인 유도 가열을 행할 수 있도록 하였다.

뉴로퍼지를 이용한 제어기로서 전문가의 지식을 기반으로 효율적인 제어가 가능한 퍼지제어기를 주제어기로 하고 퍼지제어기에서 설계하기 힘든 지식기반을 바탕으로 한 소속함수형태 또는 규칙을 적절한 학습율을 선택· 조정하여 시스템에 적합한 제어신호를 얻도록 신경망으로 구성하여 실험에서 다루게 되는 피가열체의 특성변화에 대해 적용시키고자 한다. 신경

회로망의 함수 근사화를 이용하여 비퍼지화 연산부분을 MLP로 구성하며 비퍼지화 부분의 학습을 위한 데이터는 결론부에 나타나는 언어항에 대한 기존의 추론법을 사용하였다.

II. 본론

1. 고주파 유도가열 원리

전계전류의 시간적 변화는 자계(자속)의 변화를 동시에 유발한다. 이 시변자속이 강자성체 코어(core)에 흐를 때 유도기전력이 Faraday 법칙의 결과에 따라 발생하게 된다. 이 유도기전력을 자속에 수직한 도전 코어내에 국부전류를 발생시킨다. 이들 전류를 와전류(맴돌이 전류)라고 하며, 전류는 오음성 전력손실을 일으키고 국부적으로 열을 발생시킨다. 이를 유도 가열이라 한다.

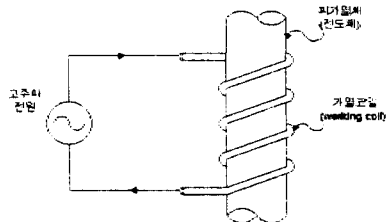


그림 1. 유도가열원리.

가. 와전류 손실(Eddy Current Power Loss)

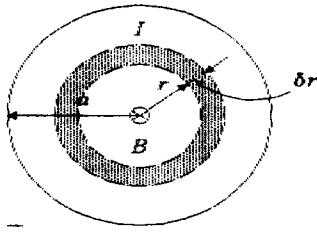


그림 2. 원주의 와류손.

반지름 : a , 길이 : l , 체적 : $V(=\pi a^2 l)$

저항율 : ρ , 자속밀도 : $B_m = \sin \omega t$

와전류(맹돌이 전류)는 일반적으로 도체를 관통하는 자속이 변하거나 자속과 도체가 상대적으로 운동하여 도체내의 자속이 시간적으로 변화를 일으키면 이 변화에 역작용하여 도체내에 국부적으로 형성되는 임의의 폐회로를 따라 유기되는 전류이다.

$$\text{와전류 } I = \int_0^a dI = -\frac{\omega a^2 l B_m}{4\rho} \cos \omega t$$

$$\text{손실전력 } P = \int_0^a dP = \frac{\pi}{8\rho} \omega^2 a^4 l B_m^2 \cos^2 \omega t$$

나. 침투깊이(Skin Depth : 표피두께)

도체의 전도도 : σ [S/m]

투자율 : μ [H/m]

주파수 : f [Hz]

표면전류밀도의 $1/e = 0.368$ 배 되는 표피에서의 길이 δ [m]은

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]}$$

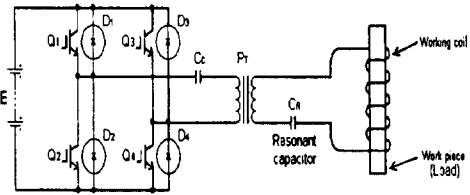
2. 시변부하에 대한 PFM제어

일반적으로 비철금속이 아닌 철과 같은 금속의 경우에 있어서 고주파 가열을 행할 때 큐리점(currie point)부근의 온도에서는 시간에 따라 부하의 임피던스가 급격하게 변함에 따라 부하 공진 주파수 또한 달라지게 된다. 따라서, 부하의 공진 주파수를 추종하기 위해 PFM제어 방식을 채택하였다. PFM을 위한 방법중 가장 보편적이고 효과적인 방식인 PLL을 이용하여 부하공진 주파수를 추종하도록 하였다.

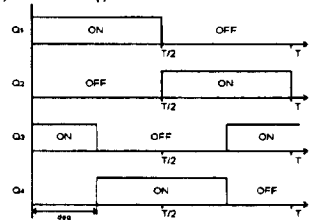
PLL(Phase Locked Loop)은 두신호의 위상을 동기 시킴으로써 주파수를 추종하기 위한 방식으로 위상비교회로(PD), 저역필터회로(LPF), 전압제어발진기(VCO)로 구성된다.

3. 정출력을 위한 PWM제어

기존의 PFM방식만을 사용하는 경우에 있어서는 시변 부하인 금속 물체가 가열되어짐에 따라 부하 임피던스가 변화되면서 부하에 과도한 전류가 흘러 규정 부하 전력조절을 할 수 없다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 PLL에 의한 부하공진주파수를 추종하면서 출력전력 조절을 위해 그림3의 (a)에서와 같이 IGBT스위칭 소자를 사용한 전압 공급형 Full-bridge식 직렬 공진 인버터를 그림3의 (b)와 같이 위상전이 PWM제어를 하였다.



(a) Full-Bridge inverter and load circuit



(b) PWM switching signal pattern.

그림 3. 전압 공급형 직렬공진 PWM 제어원리

4. 신경망을 이용한 퍼지제어기 소속함수 조정

단순 퍼지제어기에 신경망의 학습법을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수 형태를 조정하여 시스템에 적합한 제어신호를 얻도록 구성한다. 본 논문의 모델 구조는 그림4와 같이 퍼지추론 방법에 의한 입력과 퍼지규칙의 조건부와 소속정도를 계산하는 부분과 신경망에 의한 비퍼지화 연산 부분으로 나누어진다.

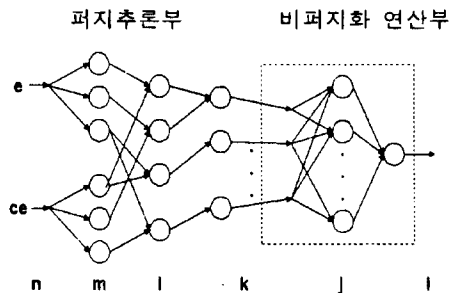
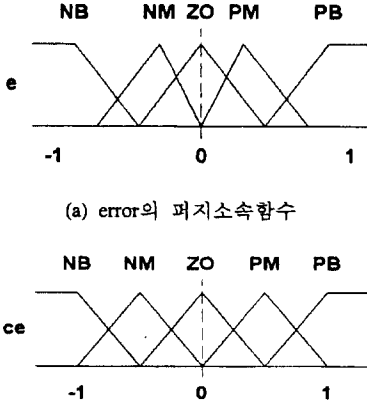


그림 4. 퍼지 신경회로망의 구조.

4.1 입력과 퍼지규칙의 조건부와의 소속정도를 계산하는 부분



(a) error의 퍼지소속함수
(b) change error의 퍼지소속함수
그림 5. 퍼지 소속함수

입력과 소속정도를 계산하는 부분은 그림 5의 퍼지추론부와 같이 4개의 층으로 구성한다.

각층 유니트의 구조를 살펴보면 n층은 입력 변수(e, ce)에 해당되며 m층의 각 유니트는 언어항을 의미하며, 이 층에서는 입력에 대하여 해당 언어항의 소속정도를 계산한다. 삼각 퍼지 숫자의 경우 각 유니트에 있어서 언어항의 수식적 표현은 다음과 같다.

$$U^m(x) = \begin{cases} 1 - \frac{x - c^m}{s_R^m} & x \in [c^m, c^m + s_R^m] \\ 1 + \frac{x - c^m}{s_L^m} & x \in [c^m - s_L^m, c^m] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

1층의 각 유니트는 각각 퍼지규칙의 조건부에 해당되며, m층에서 계산된 소속정도를 최소값 연산을 통해 합성한다.

그리고 k층의 각 유니트는 결론부의 언어항에 대응한다. 대응하는 언어항을 결론부에 있는 퍼지규칙들의 소속정도를 최대값 연산을 통해 합성한다. 층과 층 사이의 연결된 노드간의 연결강도는 1로 고정한다.

4.2 소속함수 수정을 위한 학습방법

학습방법으로 최대경사법(gradient descent method)을 사용하고, 직접적인 방법으로 퍼지 신경회로망의 출력에 대한 성능평가를 할 수 없으므로 이미 신경망으로 학습된 비퍼지화 연산부분의 오차를 역전파 시켜서 입력과 각 규칙의 소속

정도에 대한 오차값을 간접적으로 계산하는 방법을 사용한다.

5. 고주파 유도가열 시스템구성

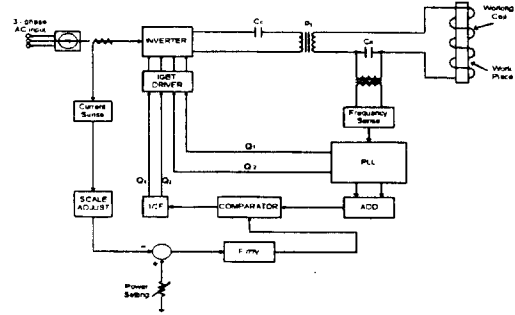


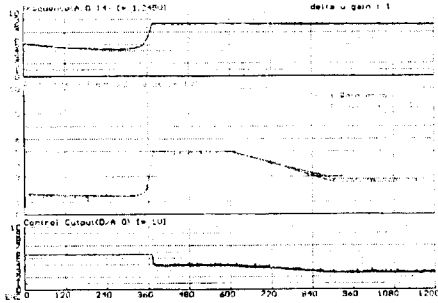
그림 6. 유도가열기의 전체구성도.

유도가열의 입력전원은 3상 교류전원을 정류한 초오크 입력형 여파기를 사용하여 직류로 만들어 인버터의 주전원으로 인가하였다.

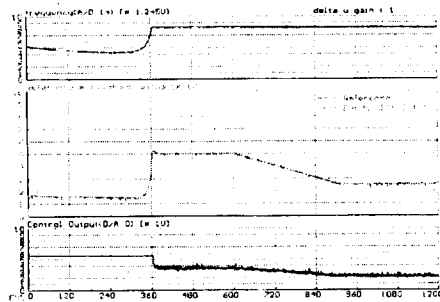
전압공급형 Full-Bridge 인버터는 스위칭 소자인 IGBT를 이용하여 구성하고, 인버터의 출력을 변압기를 사용하여 부하 공진회로에 인가하였다. L-C직렬 공진부하는 2차측에 접속되어 고주파 전력을 공급받아 금속물체를 유도가열시킨다. 부하 공진주파수 추종을 위해 공진 커패시턴스(C_R) 양단으로부터 주파수를 검출하고 이를 파형 정형하여 PLL의 위상검파(PD)회로의 입력에 인가한다.

PLL은 검출된 부하 공진주파수와 VCO에서 출력된 출력 주파수와 위상을 일치시켜 항상 부하 공진주파수를 추종하도록 한다. 그리고 PLL의 출력은 인버터의 왼편가지 PWM도통신호로 사용되고, 인버터의 오른편 가지의 PWM도통신호를 만들기 위해 PLL에서 VCO의 발진 커패시터 양단 전압을 가산기(ADD)를 이용하여 삼각파를 얻었다. 제어신호와 삼각파를 비교회로로 사용하여 PWM파를 생성시키고, 이 PWM 주파수는 2배의 공진주파수이므로 ÷2분주하여 IGBT DRIVE회로에 인가하였다. IGBT DRIVE회로는 인버터의 스위칭 소자인 IGBT를 구동하기 위한 것으로서 IGBT의 Gating신호를 만든다.

III. 실험결과



(a) 퍼지 출력 파형



(b) 뉴로 퍼지 출력 파형

그림 7. 설정치, 레환신호, 제어신호, 부하 공진주파수 출력 파형

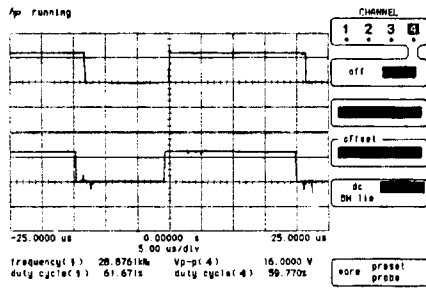


그림 8. 초기 가열시의 인버터 스위칭 출력파형

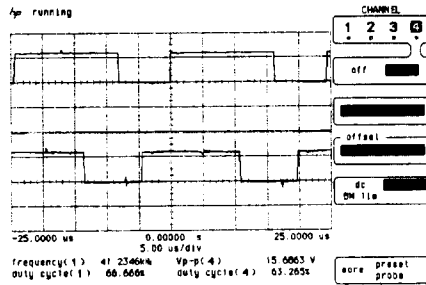


그림 9. 설정치 가변후의 인버터 스위칭 출력파형

그림10은 유도가열기 실험장치이다.

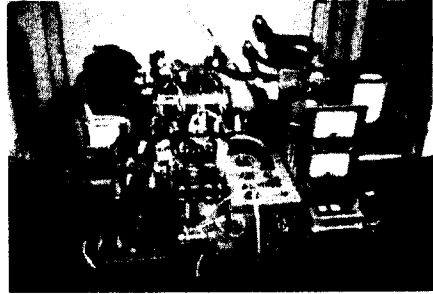


그림 10. 유도가열기 실험장치

IV. 결론

그림7 (a)의 출력파형은 설정치 5v에서 2.5v 가변시 정상상태 오차가 존재함으로써 추종이 되지 않음을 볼 수 있다. 그러나 그림7 (b)의 뉴로퍼지의 적응 알고리즘으로써 정상상태 오차 문제를 개선할 수 있었다.

본논문의 응용범위는 국소가열이나 용접 등의 순간가열, 정밀가열에 응용할수 있으리라 본다.

참고문헌

- [1] R. L. Steigerwald, "High Frequency Resonant Transistor DC-DC Converters", *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. IE-31, No.2, p.181, May, 1984.
- [2] M. Nakaoka, T. Maruhashi, "A Phase-Difference Angle Control Mode PWM High-Frequency Resonant Inverters Using Static Induction-Transistors and Thyristers", *IEEE PESC '87 Record*, p.674, June, 1987.
- [3] 장종승, 강신출, 임영도, "퍼지뉴럴 네트워크를 이용한 고주파 유도부하의 온도제어기 구성", *동아대학교 부설 한국정보통신연구소 논문집*, 제4권, p.243~248
- [4] 장종승, 박종오, 설재훈, 임영도, "펄스 주파수 변조(PFM)와 위상전이 펄스폭 변조(PWM)제어방식을 이용한 고주파 유도가열기 설계", *대한전자공학회·한국통신학회, 부산·경남지부 춘계 합동 학술논문발표회 논문집*, 제6권, p.145~150