

# 신경 회로망을 이용한 전류 추종 제어형 인버터

김 종해<sup>\*</sup> 심 광열 배 상준 김 동희 이 달해  
영남 대학교 전기 공학과

## Current tracking Control type Inverter using Neural Network

Kim-Jong Hae, Sim-Kwang Yeal, Bae-Sang June, Kim-Dong Hee, Lee-Dal Hae  
Department of Electrical Engineering University Yeungnam

### <Abstract>

This paper describes the control method in order that output current of a voltage source inverter tracks reference sinusoidal current so that its harmonic current components are reduced. Operating character of this inverter is analyzed with normalized values of parameter. And the method that apply multilayered feedforward neural networks, which play excellent steady state operation in control system, to inverter control system and training method are presented. Then, the output current of inverter which is driven by the proposed method, is considered throughout computer simulation and safe operating range of inverter parameter is presented.

### 1. 서론

근래에 각종 산업의 발달과 더불어 에너지 수요가 급증함에 따라서 자원 절약이나 에너지 절약의 관점에서 태양 전지나 연료 전지 등과 같은 자연 에너지의 이용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그런데 이들 자연 에너지에 의한 발전은 대부분이 직류 전력이므로, 다양한 부하에 대응할 수 있는 전원으로 사용하기 위해서는 고조파 성분이 적고 가변 전압 가변 주파수 기능을 갖는 인버터가 필수적으로 요구된다. 이러한 기능을 갖는 인버터에 대한 여러 가지 방법들이 연구되어 왔고, 특히 태양광 발전이나 또는 연료 전지 발전용의 인버터에 관해서도 다양한 방법들이 보고되고 있다 [1][2]. DC/AC 전력 변환기, 즉 인버터는 스위칭 동작으로 전력 변환을 행하기 때문에 고조파 전류를 발생시켜 주변의 전기 기기나 통신 장비 등에 많은 장애를 주고 있다는 것이 문제점으로 되고 있다[3]. 최근 수년 사이에 병렬 처리 능력을 가지고 전통적인 해석적 접근법으로 해결될 수 없는 많은 문제를 처리할 수 있는 신경 회로망이 제어계의 관심의 대상이 되고 있는데, 이는 비선형 계통의 동정(Identification)이나 제어, 그리고 로보틱스 등과 같은 분야에 많이 적용되어 우수한 정상 상태 동작 특성과 Dynamic 응답 특성을 나타내고 있다[4]~[6]. 신경회로망은 특히 비선형 사상을 통해서 계통 특성을 학습하는 능력을 가지기 때문에 비선형 스위칭 동작에 의해 특성이 결정되는 전력 변환 계통에 잘 적용될 수 있다. 본 연구에서는 전류 제어되는 전압원 인버터의 제어기를 신경회로망을 사용한 적응 제어 계통으로 구성하여 그의 동작 특성을 평가하고, 이 제어기로 구동되는 인버터의 Parameter 변화에 따른 안정 동작 영역을 시뮬레이션을 통해서 나타냄으로서 인버터의 설계에 기초 자료로 제공하고자 한다.

### 2. 인버터의 동작 해석

그림 1은 전류 제어되는 3상 전압원 인버터 회로도를 나타내고 있다. 단상 인버터를 3단위 조합한 3상 전압원 인버터를 복소 상태 공간 벡터를 적용하면  $2^3=8$ 개의 상태 전압 벡터로서 동작을 설명할 수 있다.

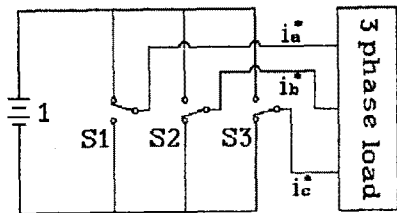


그림 1 3상 전압원 인버터

그림 1의 인버터의 출력 전압을 복소 벡터로서 나타내면  $U_k$ 의 값은 식(1)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$U_k = \begin{cases} \frac{2}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}k} & ; k = 1, \dots, 6 \\ 0 & ; k = 0, 7 \end{cases} \quad (1)$$

이와 같이 선택된 출력 전압과 부하에 따라서 출력 전류가 결정되는데, 이 출력 전류 파형이 정현파에 가깝게 되고, 역율이 1에 가깝도록 동작되는지를 알아보기 위해서는 인버터 Parameter 변화에 따른 출력 전류의 변화를 평가하는 것이 필요하다. 이를 평가 하는 한가지 방법은 인버터의 출력 전류의 실효치, 최대치, 왜형율의 변화를 조사하는 것이다. 여기서 왜형율 H는 식 (2)으로 정의된다.

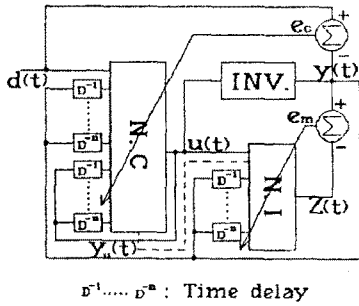
$$H = \frac{\text{고조파의실효치}}{\text{기본파의실효치}} = \sqrt{\frac{(\text{실효치})^2}{(\text{기본파의실효치})^2} - 1} \quad (2)$$

### 3. 신경회로망에 의한 인버터의 제어

그림 1의 인버터의 출력 전류를 정현파에 가깝도록 제어 하는데 사용한 제어계통은 그림 2와 같은 간접적인 제어 방법의 일종인 적응 제어 계통으로 구성하였다.

그림 2에서 신경회로망 제어기(NC)와 신경회로망 Identifier(NI)는 둘 다 그림 3과 같은 3층 Feedforward 신경회로망으로 구성되었다.

오차함수를 최소화 시키는데 일반화된 Delta rule을 적용하기 위해서 임의의 접속강도에 편미분을 구하면 식(3),(4)와 같다.



$D^{-1} \dots D^{-n}$  : Time delay  
 그림 2 적응 제어 계통도

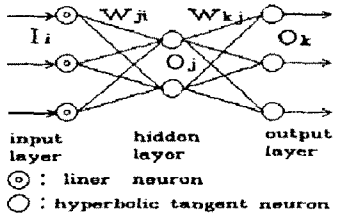


그림 3 Feedforward 신경회로망의 구조

$$\frac{\partial e_m}{\partial W_e} = - \sum_k (y_k(t) - z_k(t)) \frac{\partial O_{k(t)}}{\partial W_e} \quad (3)$$

$$\frac{\partial e_c}{\partial W_c} = - \sum_k (d_k(t) - y_k(t)) y_o(t) \frac{\partial O_{k(t)}}{\partial W_c} \quad (4)$$

$y_n(t) = \frac{\partial y_k(t)}{\partial u(t)}$  이고, 이는 입력에 대한 Plant의 감도를 나타낸다. 적응강도를 새롭게 하는 규칙은 다음과 같다.

$$W_e(t+1) = W_e(t) + \eta \cdot \left(-\frac{\partial e_m}{\partial W_e}\right) + \mu \cdot \Delta W_e(t) \quad (5)$$

식(4)에서  $y_o(t)$  는 식(6) 으로 표현된다.

$$y_o(t) = \frac{\partial y_k(t)}{\partial u(t)} \approx \frac{\partial O_k(t)}{\partial u(t)} = f'(x_k(t)) \cdot \sum_j W_{kj} \cdot f'(x_j(t)) \cdot W_{ji} \quad (6)$$

그림 5 는 NI 의 학습시에 학습율과 Momentum 이 다른 경우에 출력 평균 오차를 나타낸 것으로서  $\eta = 0.01, \mu = 0.03$  일 때 가장 빠르게 학습된다는 것을 알 수 있다.

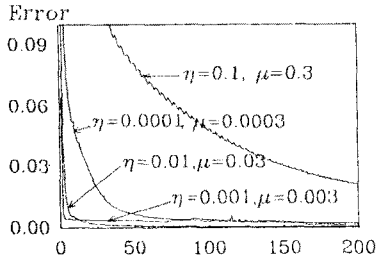
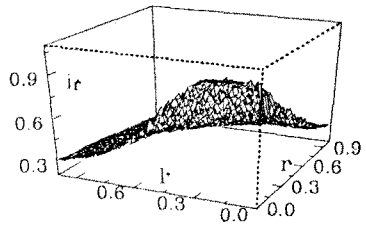


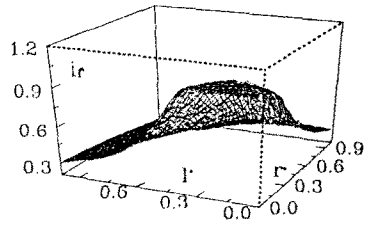
그림 4 학습율과 Momentum 에 따른 평균 출력 오차  
 NC 의 학습이 끝난 후 적응 강도는 고정시키고, NI 도 더 이상 필요하지 않으므로 제거하고 실제 전류 제어 계통에 적용하게 된다.

#### 4. 특성 평가와 동작영역

그림 1 의 인버터의 출력 전류는 회로 정수와 입력 전압의 크기 그리고 기준 정현파의 크기와 주파수에 따라서 기준 정현파를 추종하는 경우와 추종할 수 없는 경우가 있는데, 이는 신경회로망 제어기로 동작되는 인버터의 출력 전류 특성에 의해 안정된 동작 영역을 알 수 있다.



(a)  $f_s^* = 100$



(b)  $f_s^* = 400$

그림 5  $r^*$  과  $l^*$  의 변화에 따른 출력 전류의 최대치

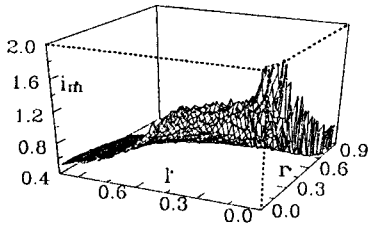
그림 5~그림 7 은 각각 스위칭 주파수  $f_s^*$  를 일정하게 유지하면서  $l^*$  과  $r^*$  을 변화시킨 경우의 출력 전류 최대치와 실효치 그리고 왜형률의 변화에 관한 특성으로서, 그림에서 보는 바와 같이  $f_s^*$  가 큰 경우에, 기준 정현파 전류에 가까운 출력 전류를 발생하는  $l^*$  과  $r^*$  의 영역이 커지는 것을 알 수 있다.  $f_s^* = 400$  인 경우를 보면,  $r^*$  이 0.4 보다 크고 0.01 보다 작은 영역과 그리고  $l^*$  이 0.4 보다 크고 0.04 보다 작은 영역에 있어서는 최대치와 실효치 그리고 왜형률 등이 기준 전류에서 벌어지고 있는데, 이는  $r^*$  이 큰 경우에는 전류의 최대치가  $r^*$  에 의해 제한되기 때문이고,  $r^*$  이 작은 부분은 시정수가 크게되어 기준 전류를 추종할 수 없기 때문이라고 사료된다.

그리고  $l^*$  가 큰 경우에는 회로의 시정수가 크게되어,  $l^*$  가 적은 경우는 시정수가 너무 빠르기 때문에 기준 전류를 추종하지 못하는 것으로 사료된다. 출력 전류의 최대값과 실효치가 기준 전류에 가까워지고 왜형률을 5% 이하로 제한하는 경우의 안정된 동작 영역은 그림 5~그림 7 에 의해서 그림 8 와 같이 된다.

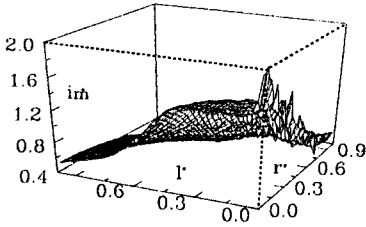
인버터를 그림 8 에서 결정된 안정 동작 영역 내에서 동작시킨다면 부하에 공급되는 전력을 변화시켜 주는 기준 전류의 변화도 제한되게 되는데, 이의 변화 범위는 다음과 같은 방법으로 계산될 수 있다. R 과 L 의 값이 일정하더라도 기준 전류를 변화시킨 경우 무차원화 Parameter 의 정의에서 기준 전류와  $r^*$  과  $l^*$  에 대한 관계 식(7) 과 (8) 에 따라  $r^*$  과  $l^*$  은 변화된다.

$$r^* = \frac{I_b R}{E} \quad (7)$$

$$l^* = \frac{2\pi f_r L}{R} \times r^* \quad (8)$$

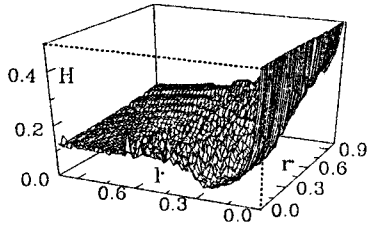


(a)  $f_s^* = 100$

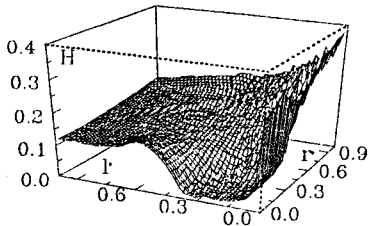


(b)  $f_s^* = 400$

그림 6  $r^*$  과  $l^*$  의 변화에 따른 출력 전류의 실효치



(a)  $f_s^* = 100$



(b)  $f_s^* = 400$

그림 7  $r^*$  과  $l^*$  의 변화에 따른 출력 전류의 왜형률

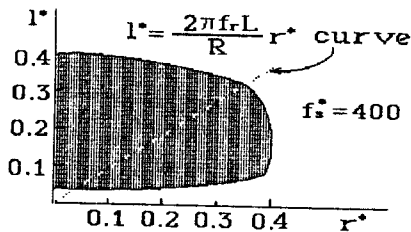


그림 8 안정된 동작 영역 ( $f_s^* = 400$  인 경우) 따라서 안정 동작 영역내에서  $r^*$  의 변화량이 가장 크게되 는  $\frac{2\pi f_r L}{R}$  을 결정한다. 즉, 식(8)에서  $r^*$  과  $l^*$  의 관계는 원점을 지나는 직선으로 되고 그림 8 에서 보는 바와

같이  $\frac{2\pi f_r L}{R} \approx 1$  일 때  $r^*$  의 변화가 가장 크게 된다. 따

라서 식(8)에 의해  $f_r, R, L$  을 결정한 후 식(7)의  $r^*$  의 값이 안정 동작 영역내에 있도록 하는  $E$  와  $I_b$  의 범위를 결정하면 된다. 그러나 실제의 경우에는 기준 주파수  $f_r$  은 상용 주파수로 하고, 계통의 전압  $E$  는 일정한 값으로 결정되므로 이를 기초로 하여  $L$  의 값과  $I_b$  의 가변 범위를 상술한 방법으로 설계할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 AC 구동 계통에 광범위하게 사용되고 있는 전류 제어되는 3상 전압원 인버터의 제어 계통을 다층 Feedforward 신경회로망으로 구성하는 방법과 이를 훈련시키기 위한 Delta rule 을 적용하는 구체적인 방법을 나타내었다. 그리고 이 제어 계통으로 구동되는 인버터의 출력 전류 파형을 무차원화된 Parameter 를 사용하여 분석하였고, 이 인버터가 안정된 동작을 할 수 있는 영역을 시뮬레이션을 통해서 명확히 나타내었다. 따라서 이를 기초로하여 인버터의 Parameter 를 설계할 수 있고, 안정 동작 영역 내에서는 출력 전류 파형에 포함된 고주파 전류 성분이 5% 이내로 거의 기준 정현파를 추종할 수 있으므로 향후 태양광 및 연료 전지 등의 신에너지에 의한 전력 변환 장치나 유도기의 가변속 등에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

### [참고 문헌]

- [1] Fumio Harashima, Yuzo Demizu, Seiji Kondo and Hideki Hashimoto, "Application of Neural Networks to Power Converter Control", Conf. Record of IEEE, IAS Annual Meeting, pp.1086-1091, 1989.
- [2] Michael R. Buhl and Robert D. Lorenz, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF NEURAL NETWORKS FOR DIGITAL CURRENT REGULATION OF INVERTER DRIVES", IEEE/IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.415-421, 1991.
- [3] Geunhie Rim and R. Krishnan, "AC to DC Power Converter with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current", IEEE APEC, PP.400-406, June 1991.
- [4] Toshio Fukuda and Takanori Shibata, "Theory and Applications of Neural Networks for Industrial Control Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.39, No.6, pp.472-489, December 1992.
- [5] Julio Tanomaru and Sigeru Omatu, "Process Control by On-Line Trained Neural Controllers" IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol.39, No.6, pp.511-521, December 1992
- [6] 이 달해, 김 동희, 배 상준, "신경회로망을 이용한 Buck Type 콘버터의 출력 전압 제어에 관한 연구", 영남대학교 공업기술연구소논문집 제21권 2호, 1993.