

## High Performance Control of Induction Motor Drive using GAT

高在涉\* · 崔正植\* · 鄭東和†  
(Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Dong-Hwa Chung)

**Abstract** - This paper is proposed genetic algorithm tuning(GAT) controller for high performance of induction motor drive. We employed GA to the classical PI controller. The approach having ability for global optimization and with good robustness, is expected to overcome some weakness of conventional approaches and to be more acceptable for industrial practices.

The control performance of the GAT PI controller is evaluated by analysis for various operating conditions. The results of experiment prove that the proposed control system has strong high performance and robustness to parameter variation, and steady-state accuracy and transient response.

**Key Words** : induction motor drive, GAT, high performance, robustness, optimization

### 1. 서 론

최근 퍼지제어, 신경회로망 및 GA(Genetic Algorithm) 등을 이용한 인공지능 제어는 전력전자 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 기법으로 인식되고 있다. 이중 GA는 복잡한 최적화 문제를 위한 수학적 기법으로 매우 호응을 받았다. GA의 적용은 다양한 분야로 확대되어 산업계에서도 매력을 느끼고 있는 기법이다.

간접 벡터제어는 유도전동기의 고성능을 위한 드라이브 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. PI 제어기는 정상상태의 응답은 양호하게 나타나므로 산업현장에서는 PI 제어기를 많이 사용하고 있다. 그러나 PI 제어기는 유도전동기의 비선형 때문에 과도상태에서는 양호한 성능을 기대할 수 없다. 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다. PI 제어기의 비례이득  $k_p$ 가 크면 상승시간이 작고 오버슈트는 커지며 안정시간이 길어진다.  $k_p$ 가 작으면 상승시간이 크고 오버슈트는 작으며 안정시간이 작아진다. 따라서 PI 제어기에서는 이득계수를 조절하여도 드라이브의 성능을 향상시키는데는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위한 노력은 많이 이루어졌으며 적응제어[4], 퍼지제어[5] 및 신경회로망[6]-[7] 등의 연구가 진행되었다. 이 연구들은 대부분 다양한 부하변동과 관성 변화에 대하여 강인성의 응답특성을 기대하기가 어려우며 만족할만한 성능을 얻을 수 없다.

중래의 최적화 기법에서는 하나의 점을 찾아가는 지역 최적점인

반면, GA는 점들의 군집을 찾는 전역 최적점을 찾는다. GA는 추적공간의 해석적인 한계를 극복하기 위하여 파라미터 자체가 아닌 파라미터 집합의 코딩에 의하여 수행한다. GA는 미분을 사용하지 않고 단지 목적정보가 필요하며 다중, 비선형 및 지식 등 다양한 목적함수를 이용한다. 그리고 최적 해의 근방을 효율적으로 추적하기 위하여 확률 전이률을 이용한다. 따라서 GA는 다변, 고결합 및 비선형인 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 속도제어기에서 PI 제어기의 파라미터의 설정을 조절하기 위하여 GA를 이용한다. 정의된 성능지수 또는 평가함수를 설정하고 중래의 PI 제어기에서 PI 파라미터의 최적 설정치를 GA를 이용하여 구한다. 이 PI 제어기는 GAT(GA Tuning) PI 제어기라고 정의하고 비선형 최적화 문제로서 고려되는 설정점을 향하여 유도전동기의 고성능 제어를 수행한다. 본 논문에서 제시하는 GAT PI 제어기의 성능을 구하고 그 결과를 제시한다.

### 2. 유도전동기의 모델링

그림 1은 동기 회전 좌표계에서  $d-q$  축 등가회로를 나타낸다.

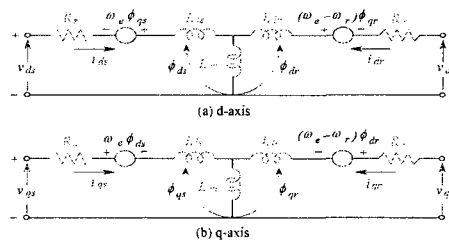


그림 1 동기회전 좌표계에서  $d-q$  등가회로  
Fig. 1  $d-q$  equivalent circuit at synchronously rotating reference frame

\* 學生會員 : 順天大 工大 電氣工學科 碩士課程  
† 교신저자, 正會員 : 順天大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博  
E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr  
接受日字 : 2006年 1月 18日  
最終完了 : 2006年 3月 20日

그림 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_e L_s & L_m p & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s + L_s p & \omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & R_r + L_r p & -\omega_s L_r \\ \omega_s L_m & L_m p & \omega_s L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

- $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$  : 슬립 각속도
- $i_{ds}, i_{qs}$  :  $d, q$ 축 전류
- $v_{ds}, v_{qs}$  :  $d, q$ 축 고정자 전압
- $R_s, L_s$  : 고정자의 저항 및 자기 인덕턴스
- $R_r, L_r$  : 회전자의 저항 및 자기 인덕턴스
- $L_m$  : 상호 인덕턴스

유도전동기의 기계적인 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_l \quad (2)$$

$$\omega_r = \frac{P}{2} \omega_m \quad (3)$$

여기서  $T_e$ 는 발생토크,  $T_l$ 은 부하토크,  $J$ 는 관성계수 및  $B$ 는 마찰계수이다.

발생토크를 구하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (4)$$

### 3. GAT PI 제어기

GAT PI 제어기의 기본적인 구조는 그림 2와 같다.

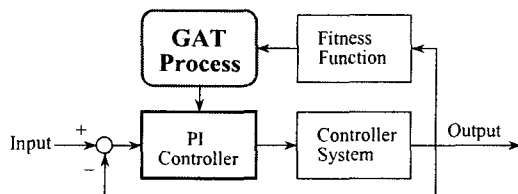


그림 2 GAT PI 제어기의 기본 구조  
Fig. 2 Basic structure GAT controller

GAT의 동작원리는 다음과 같다.

(1) PI 제어기의 속도와 전류제어기인 2개의 파라미터는 2개의 2진 비트 서브스트링으로 변환한다. 각 서브스트링의 길이는  $l_i (i=1, 2)$ 이며 시간  $t$ 에서 일치하는 2진 서브스트링의 10진 값은 다음 식과 같다.

$$K(t) = K_{\min} + \frac{\text{binrep}(t)}{2^i} [K_{\max} - K_{\min}] \quad (5)$$

여기서  $\text{binrep}(t)$ 는 서브스트링의 2진 값이며 파라미터  $K$ 는 폐구간  $[K_{\min}, K_{\max}]$ 의 영역에 있다고 가정한다. 이 서브스트링은 하나의 긴 스트링으로 코드화된다. 스트링의

길이는  $L = \sum_{i=1}^2 l_i$ 이며 각 시그먼트는 2개의 파라미터 중 하나의 값으로 표현된다.

(2) 코딩의 룰에 따라 랜덤하게 군집을 초기화한다.

(3) 현재의 세대에서 각 스트링은 실제 파라미터와 일치하게 디코드화시킨다. 그런 다음, 이 파라미터는 조절 시스템으로 보낸다. 그리고 각 그룹 제어 파라미터의 영향을

평가한다. 여기서 적합도의 함수는  $f_i = \min_j |\omega_j^* - \omega_j|$ 이며  $\omega_j^*$ 는 상수 100으로 정한다.

(4) 비례치  $P_c$ 와  $P_m$ 에 따라서 선정된 스트링은 교배와 돌연변이이다. 학습과정을 안정화시키기 위하여 최적은 다음 세대의 수로서 유전자 동작 없이 남는다.

해에 접근할 때까지 (2)와 (3)을 반복한다. 이러한 과정을 흐름도로 나타내면 그림 3과 같다.

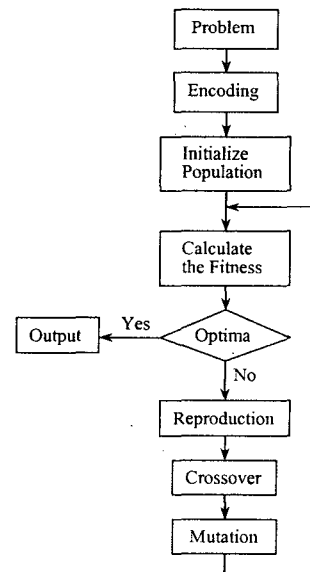


그림 3 GA의 흐름도  
Fig. 3 The flowchart of GA

이러한 제어방법으로 GA의 최적화 과정은 온라인 추정이며 제어신호는 종래의 PI 제어기에 의하여 수행된다. 처음, 초기의 PI 파라미터는 GA에 의하여 오프라인으로 최적화한다. 그런 다음, 2개의 PI 파라미터의 적합도는 제어 시스템에 적용한다. 따라서 이 파라미터는 제어목적의 변화에 적응하기 위하여 연속적으로 학습되고 조절된다.

GAT PI 제어기에 의해 제어되는 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 4와 같고 인버터는 공간벡터 PWM 방식을 사용한다.

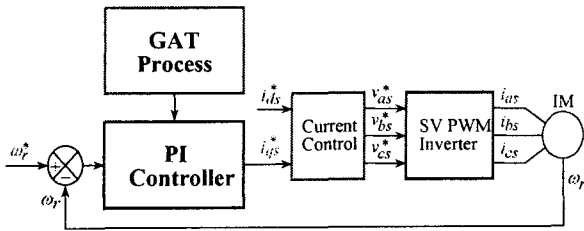


그림 4 유도전동기의 드라이브 시스템의 구성도  
Fig. 4 Configuration diagram of induction motor drive

4. 시스템의 성능결과

그림 5는 0.3[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중 1[sec]에서 지령속도를 1000[rpm]으로 감소시켰을 경우 PI, DFC(Direct Fuzzy Controller) 및 GAT PI 제어기 속도를 비교한 결과이다.

그림 6은 그림 5의 응답특성에서 지령속도가 증가하였을 경우 명확하게 나타내기 위하여 비교 확대한 속도와 q축 전류를 나타낸다. 지령속도를 상승시켰을 경우 GAT PI 제어기는 PI 제어기의 속도에 비해 오버슈트가 적고 DFC에 비해 상승시간이 짧고 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 7은 그림 5에서 지령속도를 감소시켰을 경우를 확대한 것으로 GAT PI 제어기는 PI 나 DFC에 비해 지령속도에 빠르게 추종한다.

그림 8은 속도의 2승에 비례하는 팬 부하를 인가한 상태에서 0.3[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중 1.0[sec]에서 1.5[sec]까지 부하토크를 5 [N·m]인가하였을 경우에 속도와 q축 전류를 비교한 그림이다. 그림 8(a)는 지령속도와 PI, DFC 및 GAT PI 제어기의 실제속도를 나타내고 그림 8(b)는 q축 전류를 나타낸다.

그림 9는 관성을 정격의 3배 증가시키고 속도를 변화시켰을 경우의 응답비교이다. 부하토크를 증가하거나 관성을 증가시키면 PI제어기와 DFC는 오버슈트가 증가하고 정상상태 도달시간이 길어지지만 GAT PI 제어기의 실제속도는 속도변화가 적고 지령속도에 빠르게 추종한다.

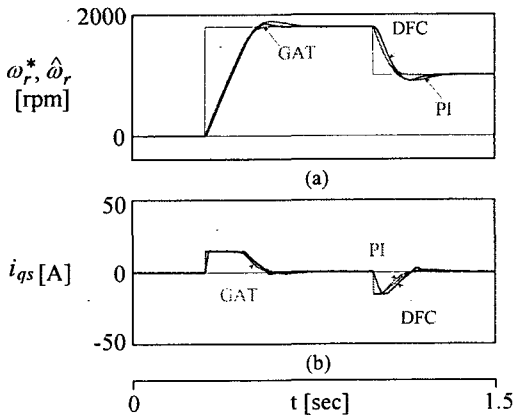


그림 5 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답 비교  
Fig. 5 Response comparison with change of step command speed

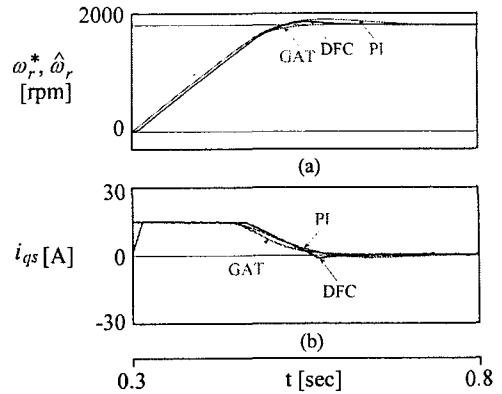


그림 6 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답 비교  
Fig. 6 Response comparison with change of step command speed

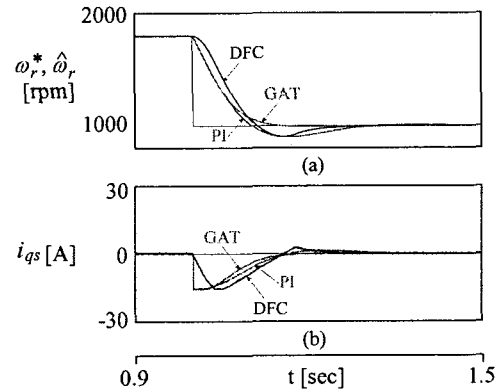


그림 7 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답 비교  
Fig. 7 Response comparison with change of step command speed

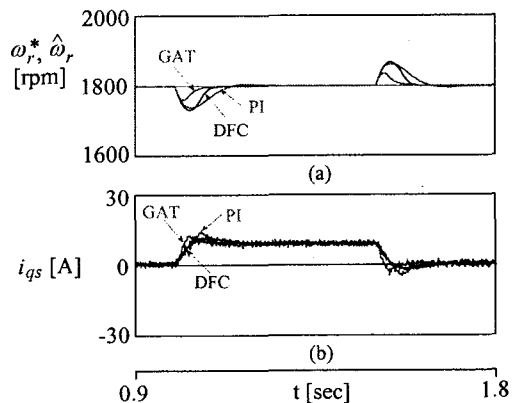


그림 8 부하토크의 변화에 대한 응답비교  
Fig. 8 Response comparison with change of load torque

그림 10은 무부하 상태에서 4상한 운전시 GAT PI 제어기와 DFC 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 10(a)는 DFC 제어기의 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 10(b)는 GAT PI 제어기의 지령속도와 실제속도를 나타낸다. 그림 10(c)는 DFC 제어기의 q축 전류를 나타내고 그림 10(d)는 GAT PI 제어기의 q축 전류를 나타낸다. 그림 10(e)는

지령속도와 실제속도의 오차를 나타내며 GAT PI 제어기의 오차가 DFC에 비해 감소한다.

GAT PI 제어기는 종래의 PI 제어기와 비교하여 오버슈트가 감소하고 정상상태에 빠르게 도달하며 DFC와 비교하여 상승시간이 단축되며 부하인가, 지령속도 변화에 속도변화의 폭이 감소하고 안정화 시간이 짧아진다.

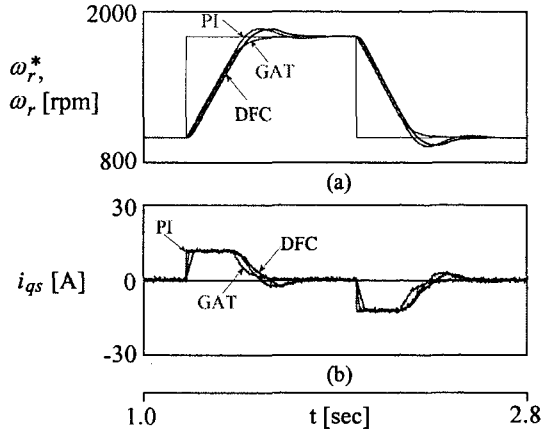


그림 9 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교 ( $J=3J_n$ )  
 Fig. 9 Response comparison with change of step command speed

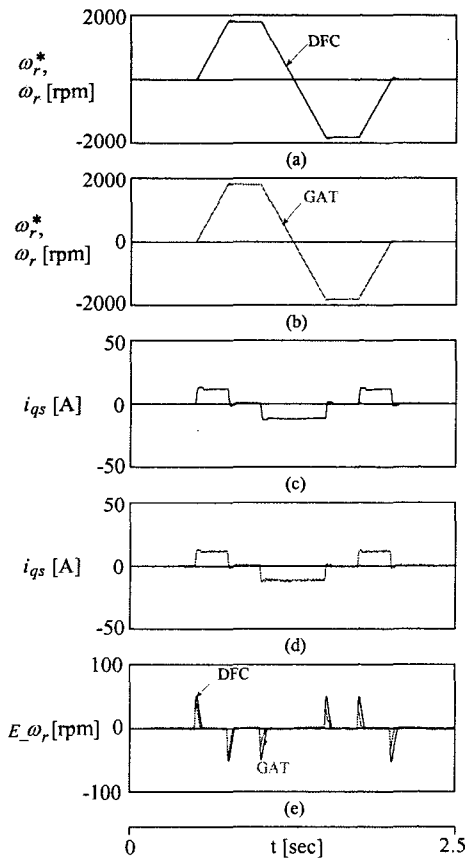


그림 10 4상한 동작에서 DFC와 GAT PI 제어기의 응답비교  
 Fig. 10 Response comparison with DFC and GAT PI controller in quadrant operation

## 5. 결 론

본 연구에서는 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 GAT PI 제어기를 제시하였다. GAT PI 제어기는 비선형 최적화 문제점을 고려하여 최적의 설정점을 추종하여 유도전동기의 고성능 제어를 수행하였다.

GAT PI 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 샘플링 시간, 속도, 부하토크 및 관성의 변화에도 GAT PI 제어기는 PI, DFC 제어기 보다 상승시간은 빠르고 오버슈트는 작게 나타나며 고성능으로 적용 추정할 수 있었다. 그리고 전동기의 정·역회전인 4상한 운전에서도 GAT PI 제어기의 성능은 우수하게 나타났다.

본 연구에서는 제시한 GAT PI 제어기는 파라미터의 변동 및 과도상태에서 드라이브의 응답특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

본 과제는 교육인적자원부와 산업자원부와 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Cerruto, A. Consoil, A. Raciti and A. Testa, "Adaptive fuzzy control of high performance motion systems," in Proc. IEEE IECON Conf. Rec., San Diego, CA, Nov. 9-13, pp. 88-94, 1992.
- [2] H. Hong, et al., "A design of auto-tuning PID controller using fuzzy logic," in Proc. IEEE IECON Conf. Rec., San Diego, CA, Nov. 9-13, pp. 971-976, 1992.
- [3] E. Cerruto, A. Consoil, P. Kucer and A. Testa, "A fuzzy logic quasi sliding mode controlled motor drive," in Proc. IEEE ISIE Conf. Rec., Budapest, Hungary, June 1-3, pp. 652-657, 1993.
- [4] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.
- [5] D. H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KIEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.
- [6] M. G. Simoes and B. K. Bose, "Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 620-629, 1995.
- [7] M. T. Wishart and R. G. Harley, "Identification and control of induction machines using neural networks," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 612-619, 1995.
- [8] D. H. Chung, et al., "MRAC fuzzy control for high performance control of induction motor," The Trans. of KIEE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.

저 자 소 개



최 정 식 (崔 正 植)

2005년 순천대학교 공대 전기제어 공학과 졸업 2005년 3월 순천대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 061-750-3543,

Fax : 061-752-9841

E-mail : 1108cjs@daum.net



고 재 섭 (高 在 涉)

2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업 2005년 3월 순천대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 061-750-3543,

Fax : 061-752-9841

E-mail : kokos22@naver.com



정 동 화 (鄭 東 和)

1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업.

1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

1987년 동 대학원 전기공학과 졸업

(박사). 1988년~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원.1989년~현재 순천대

학교 정보통신공학부 교수

Tel :061-750-3543, Fax : 061-752-9841

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

WebPage: <http://pelab.sunchon.ac.kr/~hwa777>