

하이브리드 퍼지-PID 제어기에 의한 3상 유도 전동기의 속도제어  
: 유전자 알고리즘에 의한 파라미터의 자동 동조

권양원\*, 안태천\*, 강학수\*\*, 윤양웅\*  
\*원광대학교 전기·전자공학부, \*\*전주공업대학교 전기공학과

The Control of 3-Phase Induction Motor by Hybrid Fuzzy-PID Controller  
: Auto-Tuning of Parameters using Genetic Algorithms

Yangwon Kwon\*, Taechon AHN\*, Haksu Kang\*\*, Yangwoong Yoon\*

\*School of Electrical & Electronics Eng., Wonkwang University, Iksan, Chonbuk

\*\*Electrical Eng., Jeonju Technical College, Jeonju, Chonbuk

**Abstract** - 본 논문에서는 3상 유도전동기의 속도를 제어하는데 기존 제어기의 문제점을 해결하고 최적화하기 위해서 유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지-PID(HFPID) 제어기를 고안하고, 이에 대한 파라미터 설정 방법을 제안한다. 유도전동기의 제어는 지연시간이 길고, 비선형성이 강하며, 부하변동이 잦은 프로세스이기 때문에, 기존의 제어방식으로는 만족할만한 결과를 얻을 수 없다. 제안한 하이브리드 퍼지-PID 제어기는 PID 제어기의 장점인 과도기의 우수성과 퍼지 제어기의 장점인 정상기의 우수성을 퍼지 변수로 결합시켜 설계한다. 이 제어기에 유전자 알고리즘을 적용하여 최적의 퍼지 및 PID 파라미터를 설정한다. 그리고 이 제어기를 3상 유도전동기의 속도 제어에 응용한다. 또한 속도오차에 대한 특업 표를 만들어 온라인 실시간 제어를 가능하게 한다. 이상의 과정을 3상 유도전동기에서 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 비교해 볼 때, 하이브리드 퍼지-PID 제어기는 기존의 제어기 보다 전동기의 속도 및 토크성분 전류 등의 특성에서 우수한 성능을 보였다.

1. 서 론

최근들어 환경문제나 에너지 대책의 일환으로 전기자동차의 개발에 대한 중요성이 증대되고 있다. 그러나 전기자동차용 전동기의 제어는 아직까지 많은 문제를 남겨두고 있다.

3상 유도전동기는 견고하며 신뢰성이 높고, 직류전동기에 비해서 고속 운전이 가능하여 전동기의 크기를 작게 할 수 있고, 영구자석형 전동기에 비해 가격도 싸므로 전기자동차용 전인전동기로는 능형 유도전동기가 최적이라고 생각할 수 있다. 지금까지 Fuzzy-PID(FPID) 제어기(2)를 설계하고 시뮬레이션하여 이론적으로 성능을 Test 하는 연구(4)는 활발히 진행되어있으나 실질적으로 플랜트에 직접 적용하여 성능을 Test 하게 된 것은 극히 최근의 일이다. 특히 비선형성이 강한 플랜트에는 아직까지 제대로 적용하지 못하고있는 실정이다. 비선형성이 강한 대표적인 플랜트로서 지금까지는 Ziegler-Nichols 방법(1)에 의해 파라미터를 구하는 PID 제어기에 의해 제어되어 왔다. 이 방법은 비교적 나쁘지 않은 성능을 얻을수 있지만 고도로 정밀한 제어를 요하는 경우에는 많은 문제점과 한계를 드러내고 있다.

본 논문에서는 PID 제어기의 장점과 퍼지 제어기의 장점을 융합한 하이브리드(Hybrid)형 퍼지 제어기를 설계하고, 유전자 알고리즘에 의해 파라미터를 최적화함으로써 비선형성이 강하고 잦은 부하 변동을 갖는 전기자동차용 유도전동기에 적용하여 성능을 개선했으며, Lookup Table에 의해 실시간 제어가 가능하도록 했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 3상 유도전동기의 동특성을 모델링하고, 3장에서는 이에 알맞은

하이브리드 퍼지-PID 제어기를 설계했다. 3.2절에서는 이 제어기의 파라미터를 최적화하고, 4장에서는 제안된 제어기를 이용해서 시뮬레이션하고 PID 제어기와 퍼지 제어기 그리고 유전자 알고리즘을 이용해 파라미터를 설정(6)한 하이브리드 퍼지-PID제어기의 성능을 비교하여 보았다. 5장에서는 결론과 추론 후 과제를 논한다.

2. 3상 유도전동기의 동특성 모델링

고정자 권선이 대칭이며 분포권인 3상 유도 전동기의 공극에서의 기자력이 정현파로 분포되어있다면 전압식은 다음과 같다.

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{R}_{abc} * \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\Phi_{abc}}{dt} \tag{1}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{abc} &= [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \\ \mathbf{i}_{abc} &= [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ \Phi_{abc} &= [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \\ \mathbf{R}_{abc} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

유도 전동기의 모델(7)은 3상 고정자 좌표에서 표현된 유도전동기의 방정식으로 토크나 속도를 고정능으로 제어하기가 어렵기 때문에 d-q 변환에 의해 시간따라 변하는 매개변수를 제거해줌으로써 전압방정식과 토크방정식을 간단한 형태로 만들어 벡터제어를 한다.

고정자와 회전자의 d-q축 전압식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + p\Phi_{qs} + \omega \cdot \Phi_{ds} \\ V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + p\Phi_{ds} - \omega \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + p\Phi_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \\ V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} + p\Phi_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, p는 미분연산자 ( $\frac{d}{dt}$ ),  $(\omega - \omega_r)$ 는 고정자속과 회전자속의 상대 각속도 즉, 슬립 각속도 ( $\omega_{sl}$ )이다.

고정자와 회전자의 쇠교자속은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{qs} &= L_{ls}i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{ds} &= L_{ls}i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m(i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $L_{ls}$ ,  $L_r$ 은 고정자와 회전자 누설 인덕턴스,  $L_m$ 은 상호 인덕턴스,  $L_s = L_{ls} + L_m$ ,  $L_r = L_r + L_m$ 이다.

동기속도  $\omega$ 로 회전하는 유도전동기의 d-q축 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pL_m & \omega L_m \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega L_m & pL_m \\ pR_L & \omega L_m & R_r + pL_r & \omega L_r \\ \omega L_m & pL_m & \omega L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \tag{4}$$

발생 토오크를 d-q축 전류 및 자속으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{qi} i_{dr} - \phi_{di} i_{qr}) \quad (5)$$

단, P는 극수이다.

간접 벡터제어[8]는 저속영역부터 고속영역까지 제어가 가능하며, 시스템 구성이 간단한 장점이 있다. 그러나 전동기의 회전자 시정수의 변화에 따라 영향을 받기 쉬우므로 회전자 시정수의 변화를 추정하여 보상하기 위한 방법이 도입되어야 한다.

시스템의 전체 블록선도는 그림 1과 같다.

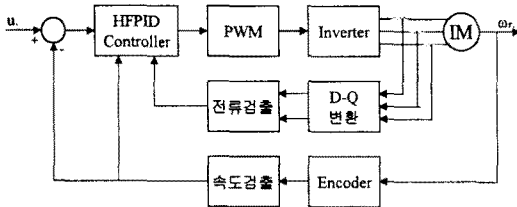


그림 1. 하이브리드 퍼지-PID제어를 가지는 전체 시스템의 구성도

### 3. 유전자 알고리즘에 의한 하이브리드 Fuzzy-PID 제어기의 자동동조

#### 3.1 하이브리드 퍼지-PID 제어기

하이브리드 퍼지-PID 제어기는 퍼지 제어기와 PID 제어기로 구성된다. 다시 말하면 시스템의 제어입력은 퍼지 제어기와 PID 제어기의 캔버스 조합이다. 주요한 요소들은 scaling factors, 언어적인 제어규칙, 하중계수 그리고 PID 계수들이다. 하이브리드 퍼지-PID 제어기의 블록선도는 그림 2와 같다.

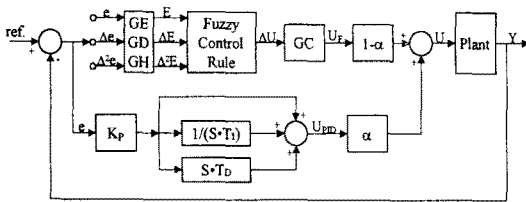


그림 2. 하이브리드 퍼지-PID 제어기의 구조

언어적인 제어 변수들은 가지는 퍼지 제어기의 N개의 규칙은 다음과 같은 형태로 이루어져 있다.[3]

$$R^i: \text{If } E_k \text{ is } A_i, \Delta E_k \text{ is } B_i, \text{ and } \Delta^2 E_k \text{ is } C_i \text{ Then } \Delta U_k \text{ is } D_i \quad (6)$$

여기서,

$R^i$ : i 번째 제어규칙 ( $i=1, 2, \dots, N$ )

N: 제어규칙의 수

$E_k$ : 오차

$\Delta E_k$ : 오차의 변화

$\Delta^2 E_k$ : 변동오차의 변화

$\Delta U_k$ : 플랜트제어입력의 변화

$A_i, B_i, C_i, D_i$ : 언어적 변수

$E_k, \Delta E_k, \Delta^2 E_k$ 가 퍼지값이 아닌 경우 퍼지 규칙에 적용하기 위해서 멤버십 함수들에 의해서 퍼지화 된다. 각각의 규칙들의 전반부 추론 값들은 다음과 같이 계산된다.

$$W_i = \min\{\mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_i}(\Delta E_k), \mu_{C_i}(\Delta^2 E_k)\} \quad (7)$$

후반부의 언어적 변수  $D_i$ 가 퍼지집합이 아닌 singleton 이라면 퍼지 제어기의 비퍼지화 값은 간략추론법을 이용한 추론결과인 다음과 같은 식에 의해서 얻어진다.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=0}^N W_i D_i}{\sum_{i=0}^N W_i} \quad (8)$$

PID 제어기는  $K_p, K_i$  and  $K_d$ 를 가지는 일반적인 제어기로 구성된다. 하이브리드 퍼지-PID 제어기의 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1-\alpha) \cdot U_F \quad (9)$$

PID 제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위해 이들 하중계수를 이용하게 되는데 이 하중계수를 멤버십 함수로 다음 그림과 같이  $\alpha = \mu_{ZR}(E)$ 로 구성한다.

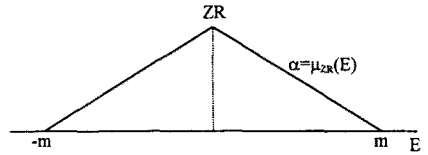


그림 3. 하중계수의 멤버십 함수

$\alpha$ 는 퍼지 제어기의 파라미터와 동시에 동정되며, 설정치와 출력의 절대오차가 크면  $\alpha$ 는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크다.

#### 3.2 유전자 알고리즘에 의한 파라미터의 자동동조

유전자 알고리즘(GAs)[6]은 생물학적 유전자인 염색체에 해당하는 문자열을 가지고 생물과 같은 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐 다음세대의 자손을 만들어내며, 지급까지의 최적화 이론 중에서 가장 우수한 이론으로 꼽힌다.

유전자 알고리즘의 성능을 개선하고 수행속도를 빠르게 하기 위해서 Off-line으로 알고리즘을 수행하여 각각의 입력변수에 따라 레벨을 분류하고, 그 레벨에 따른 룩업 표 얻어내게 된다. 얻은 결과를 실제 On-line 상에서 참조할 수 있도록 하였다. 하이브리드 퍼지 제어기에 유전자 알고리즘을 적용해 룩업 표를 참조한 블록선도는 그림 4와 같다.

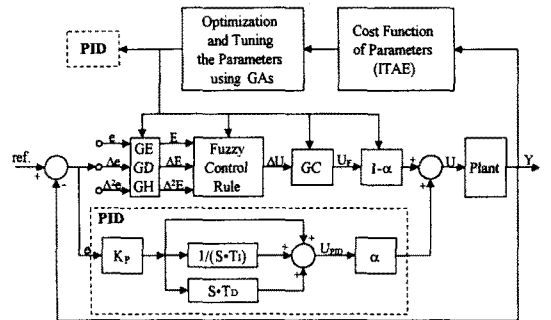


그림 4. 하이브리드 퍼지-PID 제어기의 구조

그림 4에서 보여진 제어기는 모든 파라미터들을 동시에 동정하게 된다. 평가를 위한 성능지수로는 ITAE (Integral of the Time Multiplied by the Absolute Value of the Error)를 사용한다. ITAE에 의해 시스템의 성능을 평가한 후 유전자 알고리즘에 의해 최적의 파라미터를 동정한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과

앞에서 제시한 Algorithm의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 행하였다. 유도전동기 시스템은 5차 비선형 연립방정식의 형태로 표현되며, 이의 해를 구하기 위하여 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

계산을 위하여 식들을 정리하면 다음 식(4.1)과 같다

$$\frac{d}{dt} i_{\omega} = \frac{-1}{L_s L_r - L_m^2} (-\omega_r L_m^2 i_{\omega} + R_s L_r i_{\omega} - \omega_r L_s i_{\omega} + R_r L_m i_{\omega} - L_r V_{\omega})$$

$$\frac{d}{dt} i_{\sigma} = \frac{-1}{L_s L_r - L_m^2} (R_s L_m i_{\sigma} - \omega_r L_s i_{\sigma} + R_r L_r i_{\sigma} - \omega_r L_r i_{\sigma} - L_r V_{\sigma})$$

$$\frac{d}{dt} i_{\alpha} = \frac{-1}{L_s L_r - L_m^2} (-\omega_r L_s L_m i_{\alpha} - R_s L_m i_{\alpha} + \omega_r L_r i_{\alpha} + R_r L_r i_{\alpha} - L_r V_{\alpha})$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{3L_m}{2J} (i_{\alpha} i_{\sigma} - i_{\beta} i_{\gamma}) - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} T_L \quad (10)$$

시뮬레이션에 사용된 전동기의 제정수는 표 1과 같다.

정격 출력	1/2 [Hp]
정격 속도	1750 [rpm]
Rs	20.72 [ $\Omega$ ]
Rr	9.579 [ $\Omega$ ]
Ls	17.755 [ $\Omega$ ]
Lr	17.755 [ $\Omega$ ]
정격 전부하 전류	2.4 [A]
정격 Id	1.5 [A]
정격 전압	220 [V]
Lm	13.280 [ $\Omega$ ]
P	4
관성능률 J	0.018 [kgm <sup>2</sup> ]
효율	66 [%]
역률	66[%]
기동전류	14.5[A]
마찰계수 Bm	1.464 [kgm <sup>2</sup> ]
Te	0.23 [kgm]
온도상승	57 [°C]
기동 토크	210 [%]
최대 토크	270 [%]

표 1. 유도전동기의 제정수

종래의 PID 제어기와 퍼지 제어기 그리고 제안한 하이브리드 퍼지-PID 제어기에 대한 계단 응답의 결과를 얻어 그림 5에 비교할 수 있도록 하였다. PID 제어기는 Ziegler-Nichols 방법을 이용하였으며, HFPID 제어기는 유전자 알고리즘에 의해, 700회의 Iteration을 수행하여 동조된 결과이다.

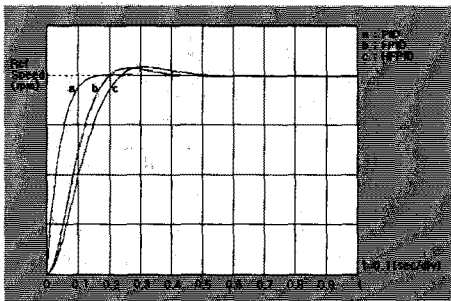


그림 5. 각 제어기의 계단응답

그림 5에서 보면 제안된 HFPID 제어기의 성능이 상승 시간이 빠르고, 오버슈트가 감소하며, 정상상태에서의 오차도 거의 없음을 보여주고 있다.

그림 6은 HFPID 제어기의 파라미터의 동조에 사용된 유전자 알고리즘의 Iteration의 수에 따른 계단응답

의 결과를 나타낸 것이다. 응답곡선을 보면 Iteration이 많이 행해질수록 좋은 성능을 가짐을 보여준다.

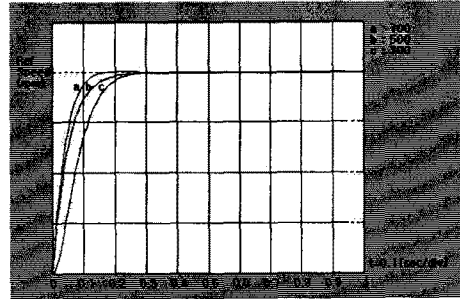


그림 6. HFPID 제어기의 Iteration에 따른 계단응답

#### 5. 결 론

PID 제어기의 장점인 과도기의 우수성과 퍼지 제어기의 장점인 정상기의 우수성을 퍼지 변수로 결합시켜 설계한 하이브리드 퍼지-PID 제어기의 동조 방법으로 룩업 표를 참조한 유전자 알고리즘을 사용하는 방법을 사용하였으며, 이를 3상 유도 전동기에 적용하여 종래의 PID 제어기 및 퍼지-PID 제어기보다 더 좋은 특성을 가지고 있음을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

본 논문에 제안된 유전자 알고리즘에 의한 파라미터 자동동조 기능을 갖는 하이브리드 퍼지-PID 제어기를 이용한 유도전동기의 구동시스템은 전기 자동차의 속도 제어에 이용 가능하며, 비선형성이 강한 시스템의 제어를 위한 범용의 제어기가 설계·활용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Ziegler, J.G and Nichols, N.B, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, 1942, 65, pp. 433-444.
- [2] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control System : Fuzzy Logic Controller - Part 1", IEEE Trans. on SMC., Vol. 20, NO. 2, Mar/Apr., pp.404 - 418, 1990.
- [3] J.Malers and Y.S.Sherif, "Application of fuzzy set theory", IEEE Trans.Syst. Man and Cybern, vol.SMC-15, no.1, 1985.
- [4] Jhon Cleland and Wayen Turner, "Fuzzy Logic Control of AC Induction Motor", IEEE Reserch Tringle Institute, pp. 843 - 850, 1992.
- [5] Tomohiro Takagi and Michio Sugeno, "Fuzzy Identification of System and Its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans.on SMC-15, NI.1 Jan./Feb., pp116-132, 1985
- [6] Jinn-Moon Yang, Jorng-Tzong Horng and Cheng-Yan Kao, "Continuous Genetic Algorithm for Global Optimizatopn", ICGA Genetic Algorithms, Vol. 7, pp. 230 -237, 1997.
- [7] Paul C.Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book, 1987.
- [8] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", Clarendon Press, Oxford, 1990.