

# 퍼지제어기를 사용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

김 종 수\* · 조 시 열\* · 김 성 환\*\*

Sensorless Speed Control of A Permanent Magnet Synchronous Motor  
Using the Fuzzy Logic Controller

J. S. Kim \* · S. Y. Zoo \* · S. H. Kim \*\*

## 〈목 차〉

### Abstract

- |                                  |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. 서론                            | 5. 퍼지제어기에 의한 위치오차 보상<br>및 전류제어 |
| 2. 영구자석 동기전동기의 등 동가모델<br>및 전압방정식 | 6. 시뮬레이션 및 검토                  |
| 3. 영구자석 동기전동기의 토크 방정식            | 7. 결론                          |
| 4. 영구자석 동기전동기의 센서리스<br>속도제어 방식   | ※참고문헌                          |

Key words : PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) : 영구자석 동기전동기,  
Hypothetical rotor position : 가상 회전자 위치, Hypothetical voltage :  
가상전압

## Abstract

In recent years there has been a significant development of permanent magnet synchronous motors. Generally, a PMSM requires rotor position sensors for commutation and current control, but they increase cost and size of the motor. So in these day, sensorless speed control methods of PMSM have been studied for several environmental conditions. Many sensorless control algorithms use voltage equation and dynamic equation of mathematically modeled PMSM .

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

Because the controller has no information about rotor position without position sensor, the controller determines the applied voltage according to the hypothetical rotor position. And the analysis shows that the difference between actual and hypothetical voltage is proportional to the angular difference between hypothetical and actual rotor position. Therefore, self-synchronization is possible by reducing the voltage difference to zero. Furthermore, this paper uses the Fuzzy Logic Controller for robust speed control of PMSM. Simulation results confirm the validity of this control algorithm.

## 1. 서 론

영구자석 동기전동기는 사이리스터, IGBT등 고속 스위칭소자의 응용기술 진보와 함께 다양한 분야에서 발전해왔다. 파워트랜지스터의 가격이 절감되고 전류제어의 PWM인버터 기술이 확립되었으며 영구자석 재료가 발달되고 고정도의 각종 검출기가 개발되면서 브러쉬리스 서보 모터의 응용이 활발해졌다. 또한, 섬세한 직류기 출력특성과 강인한 교류모터의 구조를 갖추고 있어서 제어용 모터 발달의 새로운 국면을 맞이하게 되었다.

그러나 영구자석 동기전동기를 제어하기 위해서는 회전자의 위치에 대한 정확한 정보가 필요하며 회전자의 위치 및 속도를 알기 위한 검출기로서는 TG, 엔코더 및 레졸버등을 사용하는데 이들은 구동장치의 가격상승과 부피증가 및 외란에 대한 강인성을 감소시킨다.

이런 문제점을 해소하기 위해서 속도센서없는 센서리스 구동방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방법[1-5]은 회전자의 위치 및 속도정보를 얻기 위하여 전압 방정식을 사용하는 방식[4]과 기계방정식을 사용하는 방식이 있는데, 전자는 역기전력을 추정하여 자속 및 회전자 각을 검출하는 방식이고, 후자는 부하토크 및 관성등의 정보로부터 속도 및 위치 정보를 얻는 방식이다.

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 순시 전압방정식으로부터 속도와 위치를 추정하고, 실제전압과 추정전압의 오차는 위치오차와 비례함을 이용하여 위치오차를 보상하는 센서리스 속도제어를 행하였다. 또한, 검출된 오차를 기존의 고전적인 제어방법으로서 가변적인 제어환경이나 시스템의 비선형성에 대응하기에 문제점이 있는 PI제어기를 사용하지 않고 퍼지제어기[6]를 사용하여 보다 강인한 속도제어를 구현하였다. 이를 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 확인하였다.

## 2. 영구자석 동기전동기의 등가모델 및 전압방정식

영구자석 동기전동기의 구동시스템 설계시 영구자석 동기전동기를 정확하게 표현할 수 있는 모델이 필수적이다.

영구자석 동기전동기의 고정자 권선은 전기적으로  $120^\circ$  간격으로 배치되어 있고, 각각  $u, v, w$ 로 표시하며 3상 Y결선으로 이루어져 있고, 회전자는 영구자석이다.

고정자권선에 흐르는 전류인  $i_u, i_v, i_w$  또한  $120^\circ$  위상차를 갖고 있으며 영구자석의 기자력원을 일정 전류원으로 생각한다.

그림 1은 영구자석 동기전동기의 등가모델을 나타낸 것이다.

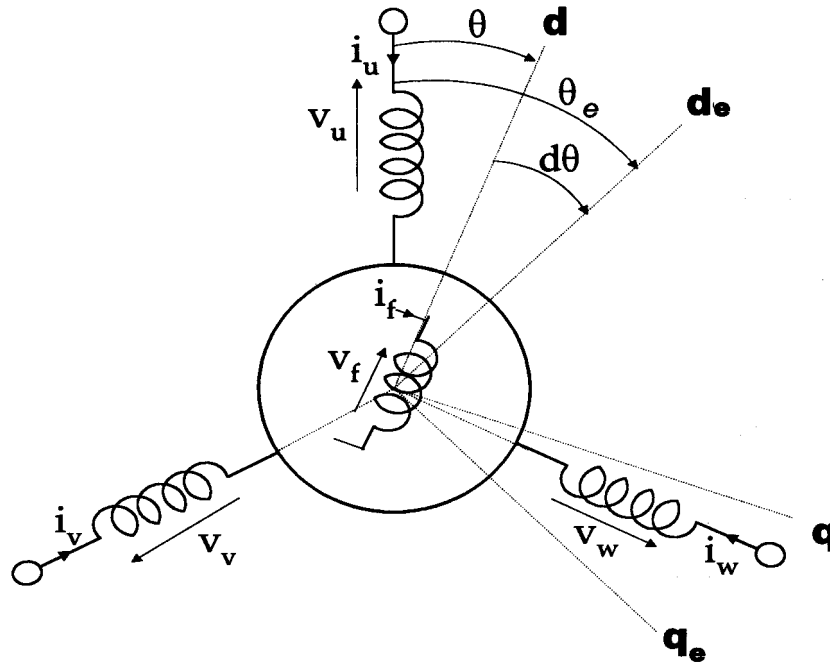


Fig. 1 Model of permanent magnet synchronous motor

단,  $v_u, v_v, v_w$  : 고정자 권선의 3상 전압

$i_u, i_v, i_w$  : 고정자 권선의 3상 전류

$R_f, L_f, v_f, i_f$  : 회전자의 영구자석을 일정 전류가 흐르는 권선으로 대체하였을 경우의 저항, 자기인덕턴스, 전압 및 전류

$d - a$ ,  $d_e - a_e$  축 : 영구자석 동기전동기의 실제 및 추정된 회전자축

$\theta$ ,  $\theta_e$  : 영구자석 동기전동기 회전자의 실제위치 및 가상위치

그림 1의 모델로부터 영구자석 동기전동기의 실측 순시 전압방정식을 세워보면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + pL_f & pM\cos\theta & pM\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & pM\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ pM\cos\theta & R_a + pL_a & pL_a\cos\frac{4\pi}{3} & pL_a\cos\frac{2\pi}{3} \\ pM\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & pL_a\cos\frac{4\pi}{3} & R_a + pL_a & pL_a\cos\frac{2\pi}{3} \\ pM\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & pM\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & pL_a\cos\frac{4\pi}{3} & R_a + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

단.  $R_a$ ,  $L_a$  : 고정자 권선의 저항, 자기 인덕턴스

$M$  : 고정자권선과 영구자석 사이의 상호 인덕턴스

$p = d/dt$  : 미분 연산자

전동기의 영구자석 회전자는 그림 1에서와 같이 기자력을 일정 전류원에 의한 것으로 간주 할 수가 있다.

회전자권선의 일정전류를  $i_f = I_f$ 라고 가정하 면 영구자석의 계자자속이 각 상 권선과 채교하는 자속은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_u &= MI_f \cos \theta \\ \lambda_v &= MI_f \cos (\theta - \frac{2}{3} \pi) \\ \lambda_w &= MI_f \cos (\theta + \frac{2}{3} \pi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{단, } \theta = \int \omega_r dt + \theta_0$$

$\theta_0$  : 회전자의 초기 위치각

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} : \text{전기적 각속도}$$

그리고 영구자석 동기전동기의 전압 방정식은 3상 평형을 이루고 있다고 가정하면 식(1)

의 실측 순시 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_u &= R_a i_u + \frac{3}{2} L_a \frac{d}{dt} i_u - \omega_r K_E \sin \theta \\ v_v &= R_a i_v + \frac{3}{2} L_a \frac{d}{dt} i_v - \omega_r K_E \sin \left( \theta - \frac{3}{2} \pi \right) \\ v_w &= R_a i_w + \frac{3}{2} L_a \frac{d}{dt} i_w - \omega_r K_E \sin \left( \theta + \frac{3}{2} \pi \right) \end{aligned} \quad (3)$$

단,  $K_E = M I_f$  : 유기 기전력 상수

### 3. 영구자석 동기전동기의 토크 방정식

영구자석 동기전동기에 임의의 순간에 입력되는 순시입력을  $P_i$  라고 하면  $P_i$  는 식(4)와 같다.

$$P_i = v_u i_u + v_v i_v + i_w i_w \quad (4)$$

식(4)에 식(3)을 대입하여 정리하면  $P_i$  는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_i &= R_a (i_u^2 + i_v^2 + i_w^2) + \frac{3}{2} L_a \left( i_u \frac{di_u}{dt} + i_v \frac{di_v}{dt} \right. \\ &\quad \left. + i_w \frac{di_w}{dt} \right) - \omega_r K_E (i_u \sin \theta + i_v \sin \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ &\quad \left. + i_w \sin \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 저항에 의한 동손과 자계에너지 변환율을 소거한 영구자석 동기전동기의 출력  $P_o$  는 다음과 같다

$$\begin{aligned} P_o &= -\omega_r K_E (i_u \sin \theta + i_v \sin \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ &\quad + i_w \sin \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right)) \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 발생토크 방정식을 구하면 식(7)과 같다.

$$T = \frac{P_o}{w_m} = -PK_E(i_u \sin \theta + i_v \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) + i_w \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi)) \quad (7)$$

단,  $w_m = \frac{w_r}{P}$  : 기계적인 각속도

$P$ : 쌍극자수

영구자석 동기전동기의 운동방정식은 다음과 같이 모델링 된다.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_L \quad (8)$$

단,  $J$  : 관성계수,  $D$  : 마찰계수,  $T_L$  : 부하토크

#### 4. 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어 방식

영구자석 동기전동기의 정확한 속도 및 토크제어를 위해, 본 논문에서 실현한 제어 알고리즘은 실제 회전자좌표계와 가상 회전자좌표계의 전압차로써 전동기의 속도 및 위치를 추정하는 방식[4]이다. 그림 1에서 실제 회전자 자속방향을 기준으로 하는  $d-q$  회전좌표계와 제어기가 가상의 회전자 자속방향을 기준으로 하는  $d_e-q_e$  회전좌표계에서 실제의 회전자 위치를  $\theta$ , 가상의 회전자 위치를  $\theta_e$  라고 하면 실제축과 가상축의 오차  $\Delta\theta$  는 식 (9)와 같다.

$$\Delta\theta = \theta_e - \theta \quad (9)$$

3/2상 변환법[7-9]에 의해 가상축에 대한 좌표변환을 하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} d_e \\ q_e \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_e \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(1), 식(9) 및 식(10)에 대한 추정된 회전자 좌표축의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L\frac{d}{dt} & -L\omega_e \\ L\omega_e & R+L\frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} + K_e\omega_r \begin{bmatrix} \sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{단, } R=R_a, \quad L=\frac{3}{2}L_a$$

$$K_e = \sqrt{\frac{3}{2}}MI_f : \text{역기전력 상수}$$

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} : \text{추정된 전기적 각속도}$$

영구자석 동기전동기가 이상적으로 속도 및 위치를 추정하여 회전한다면 실제의 회전자 위치와 가상의 회전자 위치가 같아지므로  $\theta_e = \theta, \Delta\theta = 0$ 이 된다.

이때의 전압방정식은 식(11)에서  $\sin \Delta\theta = 0, \cos \Delta\theta = 1$ 이 되므로 이 경우 가상전을  $v'_{de}$ 와  $v'_{qe}$ 라 하면 식(12)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v'_{de} \\ v'_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L\frac{d}{dt} & -L\omega_e \\ L\omega_e & R+L\frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} + K_e\omega_e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $v'_{de}$ 와  $v'_{qe}$ 는 가상전압이므로 측정할 수는 없다. 하지만, 가상전압은 측정가능한 선전류를 이용하여 계산할 수 있다. 실제전압  $v_{de}$ 와 가상전압  $v'_{de}$ 의 차이를  $\Delta v_{de}$ 라 하면 식(11)과 식(12)의 차이로서 식(13)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta v_{de} &= v_{de} - v'_{de} = \omega_r K_e \sin \Delta\theta \\ \Delta v_{qe} &= v_{qe} - v'_{qe} = \omega_r K_e \cos \Delta\theta - K_e\omega_e \end{aligned} \quad (13)$$

위의 식(13)으로부터 실제전압과 가상전압의 차  $\Delta v_{de}$ 는  $\Delta\theta \approx 0$ 인 경우 실제회전자 위치와 가상회전자 위치오차인  $\Delta\theta$ 와 비례함을 알 수 있다. 그러므로 이 가상전압과 실제전압과의 차를 보상함으로써 추정위치의 오차를 보상할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 추정속도

및 위치에 대한 보상은 가상전압과 실제전압의 차에 대하여 제어기를 통해 보상을 한다.

본 논문에서는 추정위치 보상기의 설계관점에서  $d_e - q_e$  축의 전압방정식을 사용하여 회전자의 속도 및 위치를 추정한다.

전동기의 전압방정식으로 계산된 회전자의 속도 및 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_r = \frac{v_{qe} - (R + L \frac{d}{dt})i_{qe}}{K_e + Li_{de}} \quad (14)$$

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega}_r dt + \theta_0$$

단,  $\hat{\omega}_r$ 은 전압방정식에 의해 계산된 회전자속도

그리고 실제속도와 추정속도의 오차로인해 가상회전자의 위치가 실제회전자의 위치보다 앞서거나 ( $\Delta\theta > 0$ ) 뒤지게 되는 경우 ( $\Delta\theta < 0$ )가 발생하는데 이에 비례하는 만큼을 보상 속도에 의해 보상한다. 즉, 추정속도는 전압방정식에서 구한 속도에 추정위치 보상속도를 더하여 구할 수 있다.

$$\omega_e = \hat{\omega}_r + \omega_c \quad (15)$$

단,  $\omega_c$  : 보상속도

그리고 영구자석 동기전동기가 회전할 때 실제의 회전자 위치와 가상의 회전자 위치가 일치 ( $\Delta\theta = 0$ ) 되게 하기 위해서는 보상속도가 식(16)을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta > 0 (\Delta v_{dh} > 0) \text{이면, } \omega_c > 0 \\ \Delta\theta < 0 (\Delta v_{dh} < 0) \text{이면, } \omega_c < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

## 5. 퍼지제어기에 의한 위치오차 보상 및 전류제어

퍼지제어기를 사용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 구동 시스템은 그림 2와 같다.



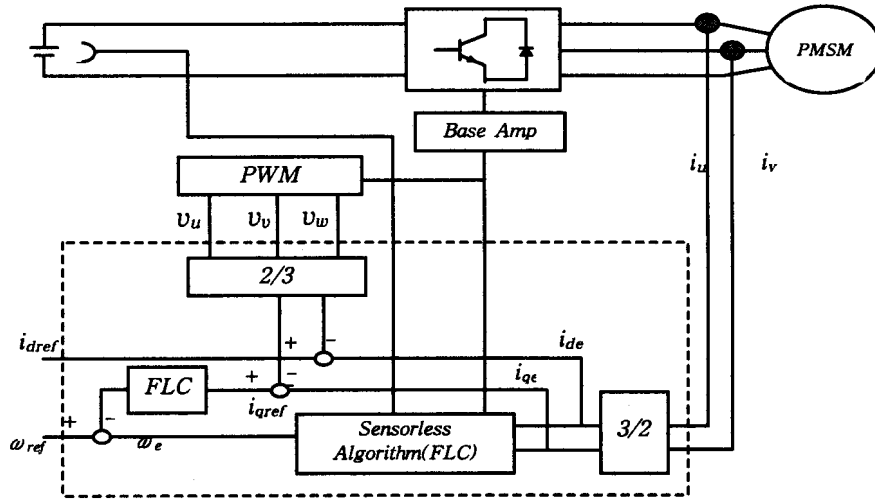


Fig. 2 Configuration of system

단, FLC(Fuzzy Logic Controller) : 퍼지 컨트롤러

영구자석 동기전동기의 속도 및 전류제어를 위해서는 퍼지제어 알고리즘을 적용한다. 다음의 표 1은 퍼지제어를 위한 변수들인 오차, 오차누적 및 제어입력을 등급화한 것이다.

Table 1 Quantized level of state variables

오차	오차누적	제어입력변화분
-9이하	-4.5이하	-5
-9 ~ -7	-4.5 ~ -3.5	-4
-7 ~ -5	-3.5 ~ -2.5	-3
-5 ~ -3	-2.5 ~ -1.5	-2
-3 ~ -1	-1.5 ~ -0.5	-1
-1 ~ 1	-0.5 ~ 0.5	0
1 ~ 3	0.5 ~ 1.5	1
3 ~ 5	1.5 ~ 2.5	2
5 ~ 7	2.5 ~ 3.5	3
7 ~ 9	3.5 ~ 4.5	4
9이상	4.5이상	5

또한, 퍼지제어규칙을 사용하여 표 2와 같이 제어입력 결정표(lookup table)를 작성하였다.

Table 2 Lookup table

오류 오류누적	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-5	-4	-4	-3	-1	0	1	1	2	3
-4	-5	-5	-5	-4	-3	-1	0	1	1	2	2
-3	-5	-5	-5	-4	-3	-1	0	1	2	2	2
-2	-5	-5	-4	-4	-3	-1	1	2	3	3	3
-1	-5	-5	-4	-3	-2	0	1	2	3	3	3
0	-5	-4	-4	-2	-2	0	1	3	4	4	4
1	-4	-4	-3	-2	-1	0	2	3	4	4	4
2	-4	-4	-3	-2	-1	1	2	3	5	4	5
3	-3	-4	-2	-1	0	1	2	3	5	4	5
4	-2	-3	-2	-1	0	1	3	3	5	5	5
5	-2	-3	-1	-1	0	1	3	3	5	5	5

### 6. 시뮬레이션 및 검토

본 논문에서 제안하는 퍼지제어기를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어 방식의 유효성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 행하였다.

시뮬레이션에 사용한 영구자석 동기전동기의 파라메타는 표 3과 같다.

Table 3 Parameters of permanent magnet synchronous motor used for computer simulation

정격출력	400[W]	고정자권선저항	1.6[Ω]
정격전압	220[V]	고정자인덕턴스	0.006[H]
극 수	8	회전자관성	0.25
역기전력상수	0.076	마찰계수	0.0056

그림 3과 그림 4는 0→100[rpm] 및 0→200[rpm]의 계단속도지령에 대한 무부하 운전의 속도응답 시뮬레이션 결과이며 속도응답의 속응성이 양호함을 보이고 있다.

그림 5는 300[rpm]으로 구동중 5[N·m]의 부하를 인가하였을 때의 속도응답으로 부하특

성이 우수함을 보여주고 있다. 그림 6은 0→500 [rpm]의 계단속도지령후, t = 10 [sec]시점에서 -500 [rpm]의 계단속도지령을 인가한 경우의 속도응답을 나타내고 있다. 속도지령의 역전에도 잘 추종함을 보여주고 있다.

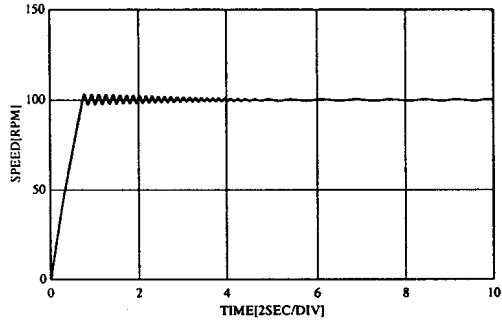


Fig. 3 Simulation response to step change of speed setting (0→100(rpm))

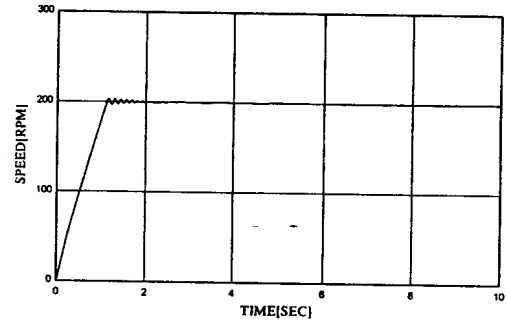


Fig. 4 Simulation response to step change of speed setting (0→200(rpm))

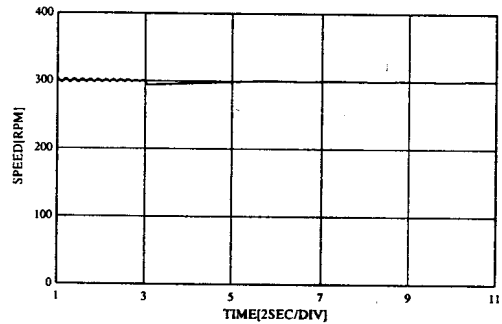


Fig. 5 Simulation response to step change of load torque (300 (rpm), 0→5(N-m))

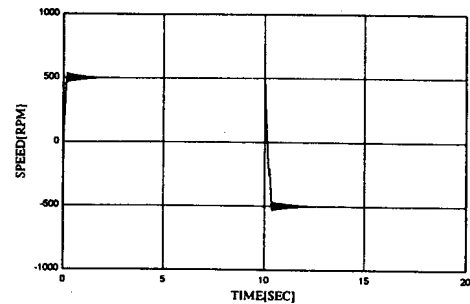


Fig. 6 Simulation response to step change of speed setting (500→-500(rpm))

## 7. 결 론

직류기의 출력특성과 강인한 교류 모터의 구조를 갖추고 있어서 다양한 제어용 모터로써 사용되고 있는 영구자석 동기전동기의 속도제어를 위해, 경제성 및 외란에 대해 우수성을 갖는 속도 및 위치검출기를 사용하지 않는 센서리스 속도제어 방식이 연구되고 있다.

본 논문에서 제안한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어법은, 가상축과 실제축의 위치오차가 가상 회전자좌표축 전압과 추정 회전자좌표축에 대한 실제전압과의 차이에 비례함을 이용하여 속도를 검출하였으며, 이 오차를 보상하기 위하여 가변적 제어환경이나 비선형성에 있어서 다소 문제가 있는 PID제어기 대신에 제어능력이 강인한 퍼지제어기를 적용함으로써 보다 신속한 속도 및 위치 오차의 보상이 가능하였으며 센서를 사용하지 않는 시스템에서도 우수한 속도응답 및 제어특성을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Nobuyuki Matsui, "Brushless dc Motor Control Without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.28, No.1 January/February, 1992
- [2] N. Ertugrul and P. Acarnley, "A New Algorithm Magnet for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., January/February, 1994
- [3] J. S. Kim and S. G. Sul, "New Approach for High Performance PMSM Drives Without Rotational Position Sensors", IEEE Trans. on Ind. Appl., 1995.
- [4] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.IA-27, No.5, pp. 928-933, 1991.
- [5] T. Miller, "Brushless Permanent magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press Oxford, 1989.
- [6] 이광형 오길록 공저, "퍼지이론 및 응용", 홍릉과학출판사, 1991.
- [7] P. C. Krause , "Analysis of Electrical Machinery", McGraw-Hill Book Company, 1987
- [8] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", Clarendon press. Oxford, 1990
- [9] 설승기 외 7인 : "전동기 구동시스템 설계 및 실습", 서울대학교 전력전자 연구실 하계교육 강좌, 1995