

## 반과정류브러쉬없는 동기전동기의 디지털 위치제어

吳 性 寶

### On the Digital Position Control of Half-wave Rectified Brushless Synchronous Motor

Sung Bo Oh

#### ABSTRACT

Digital position control of brushless synchronous motor is one of the attractive and interesting research subjects in the field of industrial robot. A direct-drive(D-D) system is being developed to control the forces and position of high speed and high accuracy. The PI control without any additional control process has very poor response and inaccuracy of position.

In order to improve those problem, We proposed a repetitive control with the position memory type, learning process. It provides us the good response of system and the improvement of position accuracy.

#### I. 서 론

산업용로봇의 motion control 분야에서 direct-drive(D-D) 방식을 이용한 브러쉬없는 동기전동기의 위치제어는 흥미있는 연구대상의 하나이며, 로버트에 대한 고속, 고정도의 위치결정 및 힘의 제어를 실현하기 위하여 D-D방식의 개발이 진행 되어지고 있다.

종래의 로버트아암에서는 감속전달기구가 채용되므로 (a) 기어에 의한 마찰토크가 크고 (b) 아암의 강성이 낮아 진동의 원인이 된다. (c) 회전자가 고속회전하므로 관성이 커져 응답성이 낮아지는 등의 결점을 지니고 있다. 이 결점을 극복하기 위하여 개발되고 있는 D-D아암은 고속, 고정도동작을 가능하게 되어, 아암중량으로 인한 비선형력의 영향이 현저하게 되는 문제가 생긴다. 따라

서 이와같은 변동부하시의 위치제어에 종래부터 사용되어 지고있는 PI 제어를 적용해도 위치정도가 불안정하게 된다.

본 논문에서는 회전자에 영구자석을 매입한 영구자석병용형 반파정류 브러쉬없는 동기전동기와 PWM인버터및 제어회로로 시스템을 구성하고, 회전자에 직접 아-암을 부착하여 D-D방식으로 주기 변동부하시에 있어 전동기의 디지털위치제어를 실현하기 위한 학습제어법을 도입하고, 실험을 통하여 이를 검증하였다.

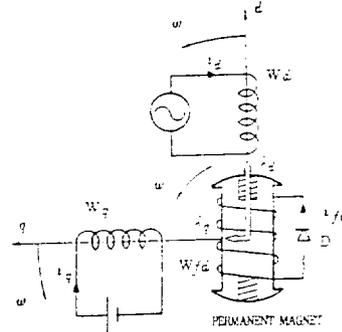


Fig. 2 Principle diagram.

## II. 영구자석을 병용한 반파정류 브러쉬없는 동기전동기의 원리

### II-1. 전동기의 구성

Fig. 1에 브러쉬없는 동기전동기의 구성도를 나타내었다. 그림에서와 같이, 본 전동기는 다음과 같이 구성된다.

(1) 다이오드로 단상단락된 계자권선을 지녔으며, 영구자석이 매입되어 있고, 회전자와 평형다상 고정자권선으로 구성된 전동기.

(2) 회전자 위치에 동기하여, 필요한 다상교류 파형지령을 발생하는 전류파형연산지령회로,

(3) 지령되어진 파형의 다상교류전류를 발생하는 PWM인버터.

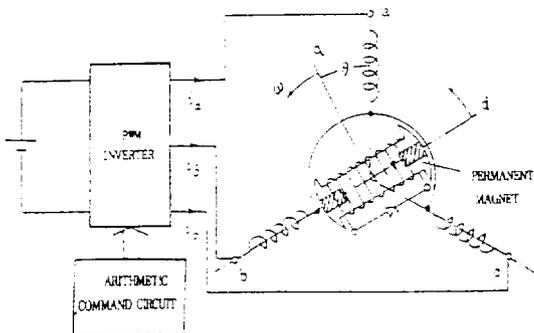


Fig. 1 Composition diagram.

### II-2. d, q축 전압방정식

Fig. 2에 영구자석을 병용한 반파정류 브러쉬없는 동기전동기의 원리도를 나타내었다. 본 브러쉬없는 동기전동기의 d, q축에 대한 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_d &= (d/dt)\lambda_d - \omega\lambda_q + r_a i_d \\ e_q &= (d/dt)\lambda_q + \omega\lambda_d + r_a i_q \\ e_{fd} &= (d/dt)\lambda_{fd} + r_{fd} i_{fd} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d i_d + M_{fd} i_{fd} + (M_{fd}/L_{fd}) \lambda_{PM} \\ \lambda_q &= L_q i_q \\ i_{fd} &= M_{fd} i_d + L_{fd} i_{fd} + \lambda_{PM} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$e_d, e_q$  : d, q 축전압,  $i_d, i_q$  : d, q 축전류,  
 $\lambda_d, \lambda_q$  : d, q. 축쇄교자속,  $e_{fd}$  : 계자권선전압,  
 $i_{fd}$  : 계자권선전류,  $\lambda_{fd}$  : 계자권선쇄교자속,  
 $\lambda_{PM}$  : 영구자석에 의한 쇄교자속,  
 $L_d, L_q$  : d, q 축 자기인덕턴스,  $L_{fd}$  : 계자권선 자기인덕턴스,  $M_{fd}$  : 상호인덕턴스,  $r_a, r_{fd}$  : 권선저항

a축과 q축이 이루어지는 각도를  $\theta$ , a축과 q축이 일치되는 순간은  $t=0$ , 동기각속도를  $\omega$  라면  $\theta = \omega t$  이다.

### III. 학습제어법

Fig. 3에 학습제어의 블록선도를 나타내었다. 로봇아암의 D-D구동을 행하는 경우, 종래부터 사용되는 PI 제어에서는 정도가 낮아 본 연구에서 사용한 제어법에서는 전주기의 PI 제어량을 기억하여 다음 주기의 토크보상의 보정치로 사용하기 위하여 주기를 반복 할 때마다 제어정도가 향상된다. 이 제어법을 학습제어법이라 한다.

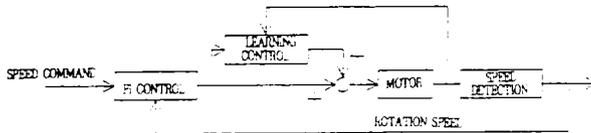


Fig. 3 Block diagram of learning control.

### IV. 위치제어

Fig. 4에 위치제어의 블록선도를 나타내었다. 위치제어를 행하는 경우, 토크지령을 조작량, 아-암의 위치를 실측치로 하여 PI 제어를 행하면, 여기에서 목표로 하는 위치까지의 속도는 불안정하게 되어 아-암의 위치제어에 폭주의 위험이 발생한다. 그림에 나타난 바와같이 위치제어를 행하면, 속도제어루우프의 외측에 다시 위치제어루우프를 설치하므로 그 위험성은 해소된다. 이 때에 위치편차로부터 속도지령을 만들기 위하여 함수가 필요하게 되는데, 그 함수를 Fig. 5에 나타내었다. 이 함수에서 최대속도와 기울기를 변화시켜, 위치결정 시간, 위치결정정도, 오우버슈트등이 최대로 양호하도록 결정해야 한다.

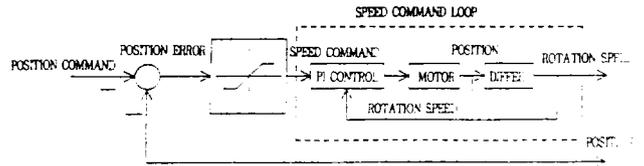


Fig. 4 Block diagram of position control.

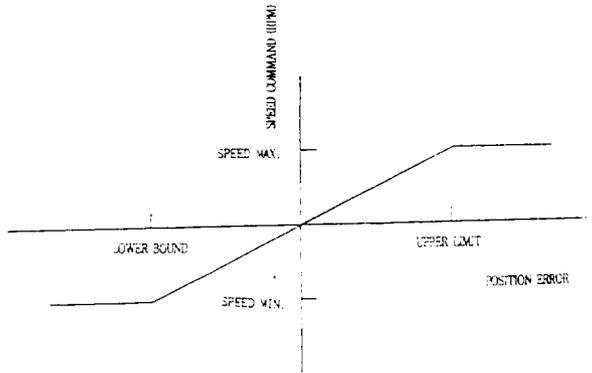


Fig. 5 Function of position control.

### V. 시스템구성

전동기를 구성하는 PWM 트랜지스터인버터 및 16비트 마이크로프로세서 V20를 이용한 게이트 제어회로에 의하여 Fig. 6과 같이 구성되어 진다. 회전자 위치검출에는 12비트 absolute형 로타리엔코더를 사용하고 있다. CPU는 500 $\mu$ S마다 회전자 위치를 검출하여 그것에 동기된 여자전류와 토크전류의 위상을 나타내어 3상파형을 출력한다. 동시에 회전자속도를 연산하고 지령속도와 비교하여 디지털 PI 제어 또는 PI 제어와 학습제어를 함께 행하여, 토크전류의 진폭지령을 출력한다.

여자전류의 위상을 나타내는 삼상파형을, 승산기를 이용하여 바이어스주파수 125Hz의 삼각파에 의해 진폭변조하여 여자전류지령 a가 얻어지고,

다시금 토크전류지령  $b$ 를 가산하여 삼상전류지령  $c$ 가 만들어진다. 이 지령치는 아이소레이션암프로부터 얻어진 실제의 전류파형  $d$ 와 비교하여 인버터의 PWM제어지령이 만들어진다.

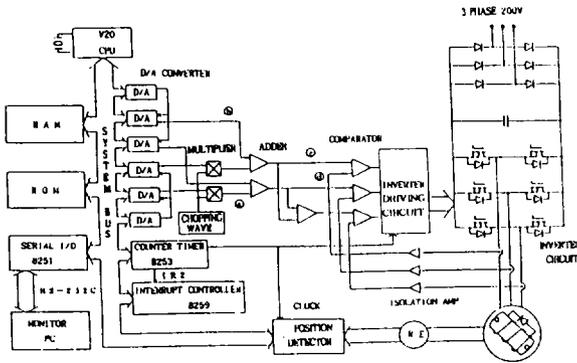


Fig. 6 System configuration.

## VI. 실험 결과

Fig. 7에 실험장치도를 나타냈으며, 3상 돌극형 반파정류브러쉬없는 동기전동기에 길이 20cm 아암을 연결하고, 아암의 선단에는 중량 1kg 추가 접속되어 있다.

아암의 중심은 모우터 회전축과 일치하지 않으므로, 아암이 회전시 위치 변화에 의한 출력 토크는 불균일하게 된다.

실험에 사용한 전동기의 내부 구성은 Fig. 8에 나타냈고, 규격은 다음과 같다.

- 용 량 : 2.0 KW      정격회전수 : 1800rpm
- 전 압 : 200 V      정격주파수 : 60Hz
- 극 수 : 4

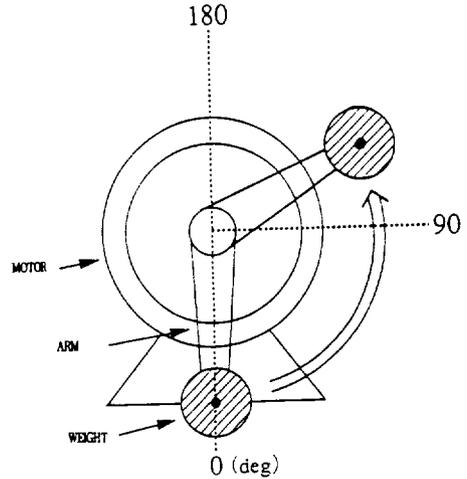


Fig. 7 Diagram of experimental apparatus.

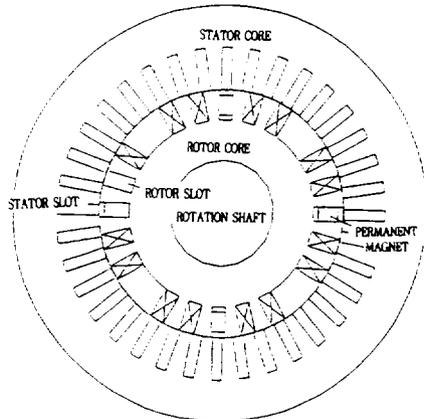


Fig. 8 Cross sectional view of motor.

### VI-1. 위치제어

Fig. 9~Fig. 12에 아암을 연결한 경우의 위치 제어 결과를 나타내었다.

Fig. 9는 아암 선단의 추 중량  $W=1.0\text{kg}$ , 위치제어함수 기율기 (PG)=4, 아암의 최고이동속도  $n_{\max}=30$  (rpm)에서의 아암의 위치를  $\pi/8-3\pi/4$  (rad) 사이를 왕복시킨 경우의 응답이며, Fig. 11.은 앞서 말한 위치제어의 경우와 같은 파레메타

에 있어 아-암의 위치변화를 0-90 (도), 90-180 (도), 180-270 (도)로 변화한 것이다.

또한 Fig. 10, Fig. 12는 각 위치에서 학습제어를 적용한 것이다. 학습제어를 적용시키지 않은 PI 제어 만의 위치제어에 있어서는 아-암의 위치에 따라 이동속도가 변동하기 때문에 응답시간이 불안정하게 된다. 그러나 학습제어를 병용한 경우는 아-암의 위치에 관계없이 응답시간은 일정하고, 제어성이 개선되어 짐을 알 수 있다.

위치정도에 있어서도, PI 제어 만의 경우 중력의 영향을 최대로 받아 90, 270도 위치에서 평균  $\pm 20$ (mm)까지 나빠지고 동시에 아-암에 약간의 진동을 발생하였다. 그것은 제어계의 잡음문제로서 입력치에 따른 출력토크의 부족, 토크의 미세한 진동등이 원인이 되고 있다.

그런데, 그 위치에서 학습제어를 적용하면, 90, 270도 위치에서 평균  $\pm 3.0$ (mm)로 꽤 양호한 결과를 얻을 수 있고, 학습제어가 응답시간의 안정화뿐만 아니라 위치정도의 향상에도 관계되어 짐을 알 수 있다.

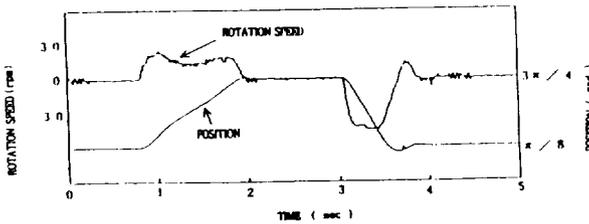


Fig. 9 Position control.

( $n_{max}30rpm$ ,  $W=1.0kg$ ,  $PG=4$ )

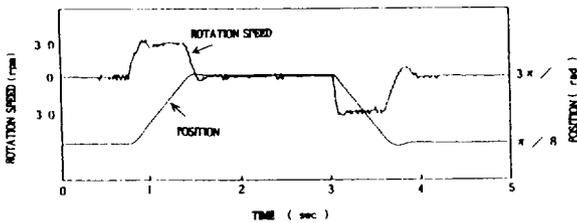


Fig. 10 Position control & learning control.

( $n_{max}30rpm$ ,  $W=1.0kg$ ,  $PG=4$ )

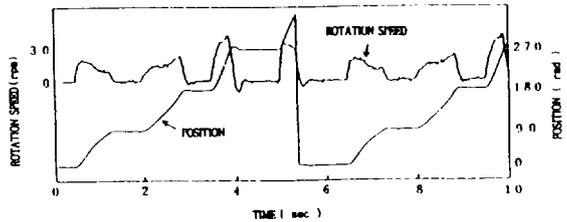


Fig. 11 Repetitive position control.

( $n_{max}30rpm$ ,  $W=1.0kg$ ,  $PG=4$ )

repetitive position; 0-90-180-270-0)

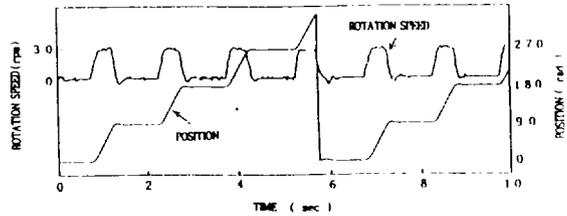


Fig. 12 Repetitive position control & learning control.

( $n_{max}30rpm$ ,  $W=1.0kg$ ,  $PG=4$ )

repetitive position; 0-90-180-270-0)

또한, 위치제어에서는 응답시간의 단축도 제어 성향상에 영향을 주는 요인 중의 하나이므로 그 대책은 위치제어 함수의 경사를 증가시키는 것이 제일 용이하고, 동시에 위치정도도 개선할 수 있다. 그러나 그에 따른 오버슈트, 정정시간의 증가 등이 문제를 야기시키므로, 추의 중량, 아-암의 이동속도에 따른 매우 적절한 파라메타를 선정함이 필요하다.

## V. 결 론

본 연구에서는 회전자에 영구자석을 매입한 반파정류 브러쉬없는 동기전동기의 회전자에 직접 아-암을 접속한 D-D방식으로 주기변동 부하시에 있어 전동기의 위치제어를 실험을 통하여 검토했다.

PI 제어만을 행한 경우는 응답시간이 불안정하게 되고 위치정도도 평균  $\pm 20$  (mm) 정도 나빠지고, 제어성에서도 지장이 보이니 학습제어와 조합하면 응답시간이 일정하게 되고 또한 위치정도도 평균  $\pm 3.0$  (mm)로 써보모타로써 충분한 결과를 얻을 수 있었다.

금후 과제로써는 본 전동기를 AC 써보모타로써 특히 위치제어에 이용할 경우 정도 향상이 요망되어 지므로 (1) 본 전동기에 적절한 위치제어용 파라메타의 선정 (2) 아-암이 정지시에 진동의 저감 등이 고려되어야 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) 須田信英, 1993, PID制御, 朝創書店, pp. 52-53.
- 2) 中野道雄 外3人, 1989, 繰返し 制御, 計測自動制御學會, pp. 16-22.
- 3) 宮入歴太, 1976, 電氣, 機械 エネルギー-變換工學, 丸善(株), pp. 151-153.
- 4) 小山正人 外2人, 1991, ACサーボシステムの理論と設計の實際, 総合電子, pp. 72-74.
- 5) 小山 外3人, 1987, 半波整流ブラツなし同期電動機の原理と基礎特性, J. IEE, 107(10).
- 6) 小山, 吳性寶 外4人, 1993, 繰返し制御おを用いたACサーボモータのオートチューニング, 九州大會, 438.
- 7) 小山 外3人, 1993, 繰返し制御おを用いたD. Dアーム制御, J. IEE, 113(8).
- 8) 小山, 山田, 吳性寶 外3人, 1994, 繰返し制御おを用いたACサーボモータのオートチューニングについて, 全國大會, 690.