

체터링 저감 슬라이딩 모드 제어기에 의한 유도전동기 위치제어

◦김 덕 현* 김 세 찬* 유 동 욱** 원 중 연*
* 성균관 대학교 전기공학과
** 한국전기연구소

Position Control of An Induction Motor With Chattering Alleviation Sliding Mode Controller

Kim, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Won, Chung-Yeon Yoo, Dong-Wook
Dept. of Electrical Eng. Sung Kyun Kwan Univ.
Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

To obtain a robustness which is one of important characteristics needed in servo drive, the sliding mode control method is used as a control strategy. However, the undesired phenomenon of chattering is a serious problem.

In this paper, an adaptive chattering alleviation algorithm for variable structure system control is proposed to solve this serious problem. Digital controller using the theory of chattering alleviation control is applied to the position control problem of an induction motor system. Comparisons of this algorithm with other variable structure system control algorithms indicate that the chattering can be alleviated. This controller is implemented using IBM-PC(8088 CPU) which controls current controlled PWM inverter consisted of IGBT as a switching device to drive motor.

1. 서론

최근 산업계에서는 로봇 팔이나 공작기계등과 같은 복잡하고 정밀한 응용분야에 적당한 전동기 서어보 운전이 필요로 하고 있다. 특히, 위치제어 시스템에 있어서는 시스템의 파라미터 변동이나 외란에 둔감한 특성을 가져야 한다. 이러한 전동기 서어보 운전을 위한 제어방법으로써 슬라이딩 모드 제어가 최근에 많이 사용되고 있다. 슬라이딩 모드 제어는 가변구조시스템(VSS: variable structure system) 이론에 기초로 한다. (1-2) 가변구조제어의 기본 개념은 위상 공간상에서 시스템의 상태가 미리 정의된 임의의 불연속면을 교차할 때 궤환제어기의 구조를 전환하여 원하는 특성을 얻을 수 있으며 이 새로운 시스템을 슬라이딩 모드라 표현된다. 슬라이딩 모드에서 동작되는 제어 시스템은 원래의 시스템과는 달리 시스템 파라미터의 변화에 둔감하게 되어 전동기 서어보 운전이나 로봇트 제어등에서 요구되는 강인성(robustness)을 갖게 된다.

슬라이딩 모드에 의한 전동기 제어 시스템에서 문제가 되는 것은 체터링 현상이다. 이것은 가변구조제어가 시스템의 구조를 전환하는 방식이기 때문에 일어나는 현상이며 궤환시스템의 전환동작에 의하여 기준 토오크 값에는 맥동분이 포함되게 되어 유도전동기 제어의 경우 전류고조파, 토오크 맥동, 소음 등을 야기하게 된다. 또한 시스템 상태가 기준궤적을 중심으로 진동하므로 특히, 디지털 제어의 경우는 샘플링 시간에 의해 이러한 현상이 더욱 심해지며, 정상상태에 이르러서도 이 현상은 계속된다. 체터링 현상을 줄이기 위한 다수의 연구결과들이 발표되었다. 예를 들어 PI제어기와의 병행(3), 스위칭 함수를 선형함수도 바꾼 방법(4), 필터의 사용(5)등이다. 본 논문에서는 앞에서 언급

한 방법들과 같이 추가적인 것이 없고 응답특성도 좋은 방법으로 체터링 저감 알고리즘을 이용하여 체터링 현상을 저감하고자 한다. 체터링 저감 알고리즘을 이용한 방법의 특징은 예전의 가변구조시스템 제어 부분에 선형상태 궤환 부분이 추가되는 것이다.

본 논문에서는 유도전동기의 위치제어를 위하여 벡터 제어 방법을 사용하였다. 벡터제어 방법중 저속 및 고속 영역에 관계없이 특성이 좋고 실현이 간단한 feedforward 방식의 간접벡터제어를 유도전동기 구동부로 하고, 전동기 전류제어는 히스테리시스 방식의 전류제어형 PWM 인버터를 사용하였다. 그리고 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비교 검토하였으며 IBM-PC (8088 CPU)를 이용한 디지털제어 방식으로 구현하였다.

2. 체터링 저감 알고리즘

가변구조제어 시스템에 있어서 단점은 체터링 현상이라 할 수 있다. 체터링 현상은 스위칭 평면을 따라서 진동하는 현상을 말하며 유한정의 스위칭 지연과 무시할 정도의 시정수에 의하여 발생하게 되는 것이다. 이러한 체터링 현상으로 인하여 시스템 모델링에서 제어 입력측에 전하 예기치 않은 고조파 성분이 포함되기 때문에 실제로 시스템을 구현하는데 있어서 많은 문제점이 따른다.

먼저 체터링 저감 알고리즘을 알아 보기 위하여 아래의 식과 같은 일반적인 2차 시스템을 고려 하여보자. 2차 시스템의 일반적 형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= h_1 x_1 + h_2 x_2 + u \end{aligned} \quad (1)$$

체터링 저감 제어 알고리즘은 선형상태궤환 부분과 가변구조 시스템 제어 부분으로 나누어진다. 즉 제어입력 u 는

$$u = -a_{11}x_1 - a_{21}x_2 - \psi x_1 \quad (2)$$

$c > 0$ 일때, 스위칭 평면 $\sigma = x_2 + c x_1$ 이 되고 가변구조 시스템 제어부분의 이득 ψ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \begin{cases} \alpha & , x_1 \sigma > 0 \\ \beta & , x_1 \sigma < 0 \end{cases} \quad (3)$$

이러한 시스템에서 슬라이딩 영역의 존재조건을 만족함과 동시에 스위칭 평면을 기준으로 최소의 진동이 일어나도

특 시스템을 설계한다면 제어입력에서의 선형궤환이득 a_{11} , a_{21} 은

$$\begin{cases} a_{11} = c^2 + h_1 \\ a_{21} = 2c + h_2 \end{cases} \quad (4)$$

이 되고 선형궤환이득을 이용하여 슬라이딩 영역의 존재조건에 맞추어 가변구조시스템 제어부분의 이득을 다시 구하게 되면

$$\begin{aligned} \alpha &\geq (a_{21} - h_2)c - c^2 - (a_{11} - h_1) \\ \beta &\leq (a_{21} - h_2)c - c^2 - (a_{11} - h_1) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에 의하면 $\alpha > 0$ 이고 $\beta < 0$ 일때는 언제나 슬라이딩 모우드가 존재한다. 위의 방식으로 선택된 α 와 β 는 체터링 현상을 저감시키는데 중요한 역할을 하게되며, c 역시 제어역할을 최소화하기 위한 설계 파라메터 이다.

t시점에서 시스템의 표시점을 $RP(t)=[x_1(t), x_2(t)]$ 이라고 나타내고 T_s 를 스위칭 시간이라고 한다면, 그림.1에서는 $RP(T_s)$ 와 $RP(0)$ 의 관계를 설명하고 있다. 먼저 그림.1과 같이 $RP(0)$ 가 정확하게 스위칭 평면위에 있다고 가정하여 보자. T_s 시간 후에는 시스템의 유한한 스위칭 시간으로 인하여 $RP(0)$ 는 $RP(T_s)$ 에 위치하게 되며, $RP(T_s)$ 와 $RP(0)$ 의 차는 곧 체터링 현상의 정도를 나타내게 된다. 다음에 언급할 정리에서는 계속되어지는 스위칭 시간후의 표시점 집합 $\{RP(T_s)\}$ 를 하나의 직선으로 나타내고 있다.



그림.1 $RP(T_s)$ 와 $RP(0)$ 의 표현

[4]정리: $RP(t)=[x_1(t), x_2(t)]$ 를 식(1)과 같은 시스템의 표시점 이라하면, 집합 $\Gamma\alpha(T_s)$ 와 $\Gamma\beta(T_s)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Gamma\alpha(T_s) = \{RP(T_s) | cx_1(0) + x_2(0) = 0, \psi = \alpha = p^2, p > 0\} \quad (6)$$

$$\Gamma\beta(T_s) = \{RP(T_s) | cx_1(0) + x_2(0) = 0, \psi = \beta = -q^2, q > 0\} \quad (7)$$

그러면,

$$\Gamma\alpha(T_s) = \{(y_1, y_2) | \gamma\alpha(y_1, y_2) = y_1 \tan(\theta\sigma + \theta\alpha) + y_2 = 0\} \quad (8)$$

$$\Gamma\beta(T_s) = \{(y_1, y_2) | \gamma\beta(y_1, y_2) = y_1 \tan(\theta\sigma - \theta\beta) + y_2 = 0\} \quad (9)$$

가 되며, 여기에서 $\theta\sigma$, $\theta\alpha$, $\theta\beta$ 는 아래의 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta\sigma = \tan^{-1}(c) \quad (10)$$

$$\theta\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{p \sin(pT_s)}{(1+c^2) \cos(pT_s) + c p \sin(pT_s)} \right) \quad (11)$$

$$\theta\beta = \tan^{-1} \left(\frac{q \sinh(qT_s)}{(1+c^2) \cosh(qT_s) - c q \sinh(qT_s)} \right) \quad (12)$$

집합 $\Gamma\alpha(T_s)$ 와 $\Gamma\beta(T_s)$ 는 상태궤적을 유지하는 범위 내에서 체터링 영역의 경계를 나타내는 것이며, $\Gamma\alpha(T_s)$ 와 $\Gamma\beta(T_s)$ 는 그림.2에서와 같이 직선 $\gamma\alpha(x_1, x_2) = 0$ 와



그림.2 직선 $\gamma\alpha=0$ 와 $\gamma\beta=0$ 의 기하학적 관계

$\gamma\beta(x_1, x_2) = 0$ 로 각각 특정지워진다. 체터링 현상의 범위는 $\theta\alpha$ 와 $\theta\beta$ 값 또는 $\tan(\theta\alpha)$ 와 $\tan(\theta\beta)$ 에 의하여 결정되어진다. 시스템의 제어입력에 대하여 시스템에서의 체터링 정도를 나타낸 것을 MC라고 하면 $MC = [(\tan(\theta\alpha), \tan(\theta\beta))]$ 로 나타내어진다. 디지털 제어의 경우에는 표시점이 슬라이딩 평면 위에 정확하게 존재할 때 최대의 체터링 현상이 일어난다. 이러한 경우에는 스위칭 시간 T_s 를 컴퓨터 샘플링 시간과 동일하게 선정하므로써 체터링 저감 제어를 적용할 수 있다.

3. 유도전동기의 등가 상태방정식

서보 전동기로 주로 사용되어온 타여자 직류전동기는 계자와 전기자를 독립적으로 제어할 수 있어 정밀한 토크 운전이 가능하며, 과도 응답 특성이 우수하여 널리 사용되고 있다. 유도전동기는 비선형 다변수 시스템으로 제어가 어려워 서보 운전용으로는 거의 쓰이지 않았으나 벡터제어 방식이 도입됨으로써 타여자 직류전동기와 비슷한 직류기와 운전이 가능해졌다. 벡터제어에 의해 유도전동기를 구동할 경우의 동특성식을 상태변수식으로 표현하면

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{\theta} = \omega = x_2 \\ \dot{x}_2 &= \dot{\omega} = [T_s - T_l - B\omega] / J \end{aligned} \quad (13)$$

이며 다시 행렬 형태로 바꾸면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K'/J \end{bmatrix} i_{qs} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \end{bmatrix} T_l \quad (14)$$

이 얻어진다.

4. 슬라이딩 모우드에 의한 위치제어기 설계

식(14)과 같이 벡터제어에 의하여 2계 시스템으로 유도전동기 제어 시스템이 구성될 경우, 속도와 위치를 궤환값으로 하여 슬라이딩 모우드 제어기를 구성하게 된다. 슬라이딩 모우드 제어기의 출력은 기준토크가 되며, 이것이 벡터제어기-유도전동기 시스템의 제어입력이 된다. 전체 시스템의 등가 블록도는 그림.3과 같다. 시스템에서 상태는 속도 $\omega (=x_2)$ 와 위치오차 $\theta_{ref} - \theta (=x_1)$ 이다.

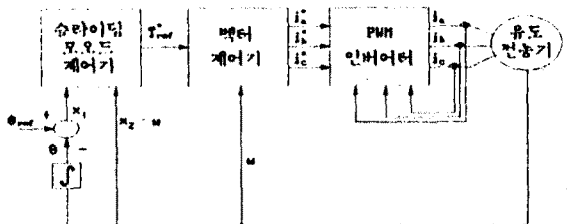


그림.3 슬라이딩 모우드에 의한 유도기 위치제어 시스템

위상평면상에서 슬라이딩 모드 궤적은 그림.4와 같다. 기준궤적을 선형으로 하면 원점을 통과하는 직선형태로 된다. 전동기 제어의 경우 최대속도의 상한치가 있으므로 속도제한을 위하여 정속구간을 두었다. 전체 궤적은 정속구간과 감속구간의 두 부분으로 이루어져 있다.

초기위치에서 슬라이딩 궤적까지 전동기는 최대속도로 가속되며, 슬라이딩 궤적에 도달하면 제어가 동작하여 슬라이딩 모드가 시작된다. 상태변수는 그림.4와 같이 슬라이딩 궤적을 따라 미끄러지기 시작하며, 이때 속도 ω 는 최대속도를 유지한다. 감속구간에 다다르면 원점을 향하여 궤적을 따라 수렴해 간다.

각각의 제어이득은 체터링 현상을 저감하는데 있어서 매우 중요하며, 앞에서 언급한 방법에 의하여 적절하게 선택되어야 한다. 그림.5에서는 체터링 저감 알고리즘을 이용한 슬라이딩 모드 제어기의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

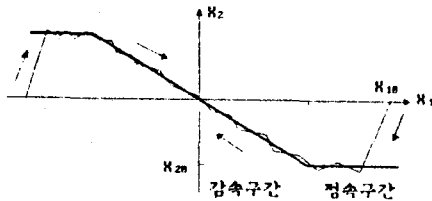


그림.4 위상평면 상에서의 슬라이딩 모드 궤적

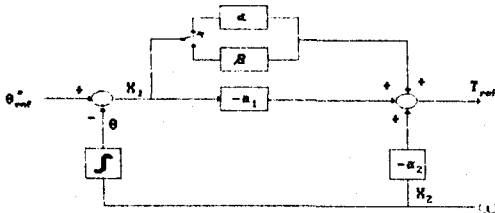


그림.5 체터링 저감 알고리즘을 이용한 슬라이딩 모드 제어기

5. 시뮬레이션

체터링 저감 알고리즘을 이용한 슬라이딩 모드 제어기에 의한 시뮬레이션을 행하였으며, 벡터 제어기 부분의 샘플링 시간은 $50\mu\text{sec}$ 이며 전체 두우프의 샘플링 시간은 2msec 이다. 전류 제어기의 히스테리시스 밴드폭은 $0.2[\text{A}]$ 이다. 전동기의 초기위치오차는 $10[\text{rad}]$ 으로 하였고 최대속도는 $100[\text{rad/s}]$ 이다. 그림.6은 체터링 저감 알고리즘을 사용한 슬라이딩 모드 제어 방법에 대하여 위상평면 상에서의 슬라이딩 궤적, 속도, 위치오차, 토크의 변화 및 전동기의 고정자 전류파형을 각각 보이고 있다. 고정자 전류파형은 슬라이딩 궤적에서 감속구간에 대한 것이다.

6. 실험결과

전체적인 실험장치의 구성은 그림.7과 같다. 인버터는 직류속 전류, 전압과 전동기에 공급되는 전류를 측정하기 위한 계측기, 정류용 3상 브리지 다이오드 및 평활 콘덴서, 전류제어를 위한 히스테리시스 제어기 및 홀CT, 전동기 구동용 IGBT 모듈 및 스너버 회로, 게이트 구동장치 등으로 구성되어있다. 유도전동기는 $3[\text{HP}]$ 으로 구동축에 속도검출을 위하여 펄스 엔코더(1000P/R)를 연결시켰다. 펄스 엔코더의 정밀도를 높이기 위하여 4배 펄스 채배 회로를 사용하였다. 컴퓨터 주변회로는 기준전류값을 내보내기 위하여 D/A변환기 그리고 속도정보를 받아들이기 위한 타이머/카운터 회로등의 인터페이스 카드로 구성된다. 속도, 위치오차,

토크값은 컴퓨터에서 순간순간 계산되어진 값을 D/A변환기를 통하여 디지털 메모리 스킵프로 측정하였다.

7. 결론

유도전동기 위치제어 시스템에 슬라이딩 모드 제어를 도입하였다. 실제의 시스템에 있어서 슬라이딩 모드를 이용하여 제어할 경우 시스템의 상태가 기준궤적을 중심으로 주위를 진동하는 체터링 현상이 발생하며, 이는 제어가 절환형태로 되어있기 때문에 기준 토크에 큰 맥동을 포함한다. 이문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 체터링 저감 알고리즘을 이용한 슬라이딩 모드 제어 방안을 도입하였고 타당성을 확인하기 위하여 디지털 시뮬레이션을 통하여 비교, 검토하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 토대로 직접 실험을 행하였다. 전체 시스템의 제어 알고리즘은 IBM-PC를 이용한 디지털 방식으로 구현하여 기능향상 및 신뢰성을 꾀하였다. 이상적인 슬라이딩 모드에 가까운 제어를 하기위하여는 샘플링 주기를 최대한으로 줄여야 한다. 현재 보편화 되고 있는 DSP(digital signal processor)등과 같은 속도면에서 빠른 프로세서를 도입한다면 좀더 나은 성능을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] V.I.Utkin, Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, Mir Publishers, Moscow, 1978.
- [2] U.Itkin, Control System of Variable Structure, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [3] A.S.I.Zinober, O.M.E.El-Ghezawi and S.A.Billings, "Multivariable variable structure adaptive model following control systems," IEE Pro., vol.129, pt. D, no.1, pp.6-12, 1982.
- [4] F.J. Chang, H.J. Liao and S. Chang, "Position Control of DC Motor via Variable Structure Systems Control: A Chattering Alleviation Approach," IEEE Trans. Indus. Ele., vol.37, no.6, 1990.
- [5] P.C.Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill, 1986.
- [6] G.Ambrosino, G.Celentano and F.Garofalo, "Variable structure model reference adaptive control systems," Int. J. Control, vol.39, no.6, pp.1339-1349, 1984.
- [7] B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives," Printce-Hall, 1986.
- [8] C.Namuduri and P.C.Sen, "A servo - control system using a self - controlled synchronous motor (SCSM) with sliding mode controller," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.1A-23, no.2, pp.283-295, 1987.
- [9] B.K. Bose, "Sliding mode control of induction motor," Conf. Rec. of IEEE/IAS Annu. Meet., pp.479-486, 1985.
- [10] F.J.Chang, S.H.Twu and S.Chang, "Adaptive chattering alleviation of variable structure systems control," Proc. Inst. Elec. Eng., vol.137, pt.D, no.1, pp.31-39, 1990
- [11] Min Ho Park and Kyung Seo Kim, "Chattering reduction in position control of induction motor using the sliding mode," IEEE Trans. on Power Electronics, vol.6, no.3, pp.317-325, July, 1991.

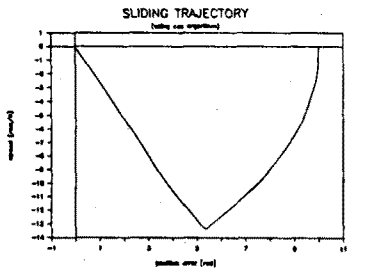
부록

전동기 상수

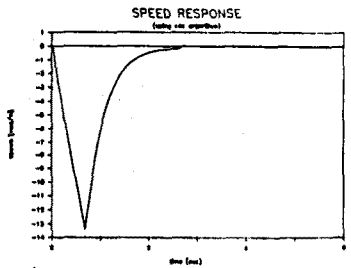
주파수 : $60[\text{Hz}]$ 전압 : $220[\text{V}]$ 전류 : $8.8[\text{A}]$
극수 : $4[\text{극}]$ 출력 : $2.2[\text{KW}]$ 회전수 : $1735[\text{rpm}]$

동기회로 정수

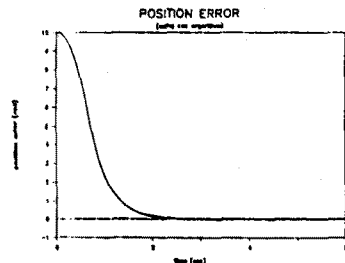
$R_s : 0.687 \Omega$ $L_s : 0.08397 \text{ H}$ $R_r : 0.842 \Omega$
 $L_r : 0.08525 \text{ H}$ $M : 0.08136 \text{ H}$ $J : 0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $B : 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}$



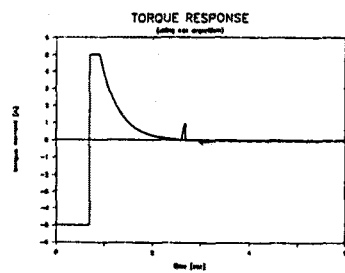
(a)



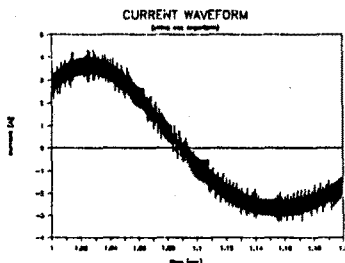
(b)



(c)



(d)



(e)

그림.6 제터링 저감 알고리즘을 이용한 슬라이딩 모드 제어기
 (a) 위상평면 상에서의 슬라이딩 궤적 (b) 속도응답
 (c) 위치오차 (d) 토크 응답 (e) 전류파형

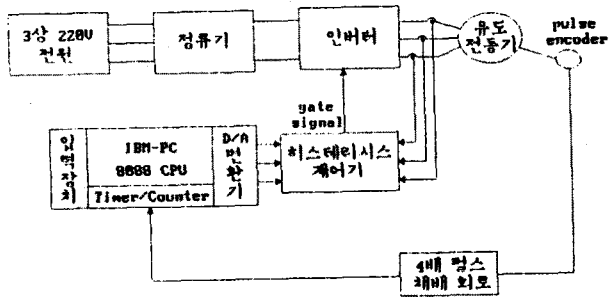


그림.7 전제시스템 구성도

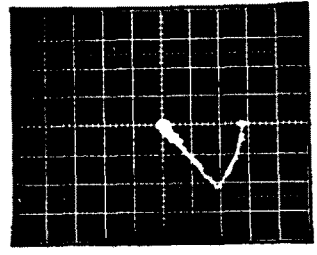


그림.8 슬라이딩 궤적 실험파형

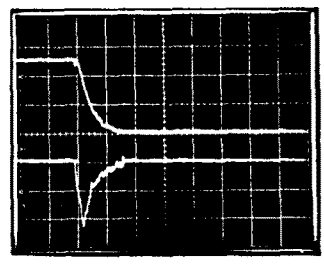


그림.9 위치오차(상) 및 속도응답(하) 실험파형
 (4 rad/div, 0.5 sec/div)
 (8 rad/sec/div, 0.5 sec/div)

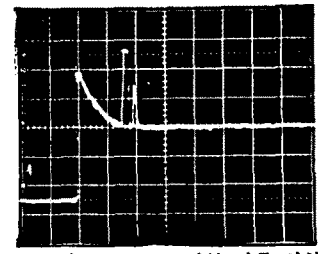


그림.10 토크 성분 전류 실험파형
 (2 A/div, 0.5 sec/div)

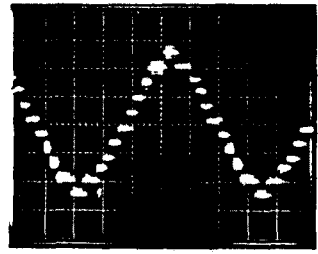


그림.11 고정자 전류 실험파형
 (2 A/div, 20ms/div)