산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제20권, 2000.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 20, 2000.

산업용 재봉기를 위한 BLDC 모터의 제어

BLDC Motor Control for Industrial Sewing Machine

이 동 훈* 김 일 환**
Lee, Dong-Hoon Kim, Il-Hwan

Abstract

In this paper, we present a BLDC Motor control for needle positioning and velocity control in the industrial sewing machine. In the industrial sewing machine, the fast acceleration control is needed, especially for a person who has a skill in operation of sewing machine for more products. And it is also needed to have a less noise and vibration. But the system which is made in a low price has no feedback system for a current control. Therefore we propose the method of velocity pattern that has an acceleration of velocity and Anti-windup algorithm. By the experiment, we confirmed that these manner have a good performance for low noise, low vibration and fast acceleration in the industrial sewing machine.

키워드 : *브러시리스모터, 가감속제어, 누적방지기법*
Keywords : *BLDC Motor, , acceleration control, Anti-windup*

1. 서론

본 논문에서는 산업용 재봉기에서의 바늘의 위치와 속도제어를 위하여 BLDC 모터의 제어에 관하여 연구하였다. 산업용 재봉기에 숙달된 사용자가 단시간내에 많은 작업을 할 수 있도록 고속 가감속제어가 요구되며, 진동이나 소음이 적을 것이 요구된다. 현재 구성된 제어기는 전류센싱을 하지 않고 엔코더를 이용한 속도제어기만을 가지고 있기 때문에 역기전력 보상이나 기본적인 다른 제어면에서 매우 불리한 조건을 가지고 있다.[1][2][3][4] 이러한 하드웨어적인 조건에서 산업용 재봉기에서 요구되는 고속가감속이나 진동, 소음에 대한 조건을 만족시키기 위하여 본 논문에서는 가가속률과 감가속률을 가지는 속도패턴과 리플의 발생을 제거하기 위한 누적방지기법을 사용했다.

LookUp Table로 구성된 가감속패턴은 속도제어와 정지제어에서 사용된다. 여기서 소개되는 가감속패턴은 가가속도와 감가속도를 갖으며 제어성능의 향상과 미싱의 기계적인 유격으로 인하여 발생할 수 있는 소음을 최소화할 수 있도록 구성되어 있다.[7] 특히 LookUp Table에 의한 일정한 정지제어는 사용자의 관점에 있어서 작업의 효율성을 가질 수 있도록 한다. 그러나 LookUp Table 방식은 여러 가지 다른 기구조건에서는 테이블을 다시 구성해야 한다거나, 부가적인 테이블을 작성해야 하는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 불합리한 점을 없애기 위해 재봉기의 특성과 조건이 고려된 가감속패턴 생성 알고리즘을 구현하였다.[2] 속도제어에 있어서는 일반적인 PID제어를 사용하였으며, 재봉기에서 요구되는 고속가감속에서 리플의 발생을 제거하기 위해 누적방지기법 TAW-LI를 도입했다. 특히 이 누적방지기법은 다른 누적방지기법에 비하여 구동기 특성의 변화시 PID제어기에 영향을 끼치지 않는다는 장점과 부가적인 하드웨어가 불필요하며, 간단히 프로그램할 수 있다는 장점을 가지고 있다.[5][6]

마지막으로 가감속테이블의 효과는 스텝속도지령, 스텝가속지령, 스텝가가속지령에 따른 속도추

* 강원대학교 산업대학원 제어계측과 석사과정
** 강원대학교 제어계측공학과 조교수, 공학박사

종 실험을 통해 확인하였으며, 누적방지기법의 효과는 사용을 했을때와 안했을때의 속도출력곡선을 비교함으로써 확인하였다.

2. 제어기 구성

여기서는 현재 구성된 BLDC Motor 제어 시스템의 구조를 보인다. 아래에 현재 구성된 시스템의 기본 구조에 대하여 간단히 설명한다.

① 2상 전류 구동 방식
② 전류제어기를 포함하지 않는 속도제어기
③ 홀센서에 의한 로터의 위치 판별
④ 자기식 엔코더를 이용하여 속도측정

1) BLDC Motor의 방정식

BLDC 모터의 기본 방정식은 다음과 같다.[1][4]

$$E = 2NlrBw \tag{1}$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\theta} + 4NBrli$$

E : Back EMF 전압
N : 상당 권선수
l : 로터의 길이
r : 로터의 반지름
B : 로터의 자석의 자속강도
w : 로터의 각속도
T : 발생토크
i : 스테이터의 상전류
L : 스테이터의 상당 인덕턴스
R : 스테이터의 상당 저항
θ : 로터의 위치

2) 제어기의 구성

위의 BLDC 모터 방정식을 보면, Back.EMF 전압은 모터 속도에 비례하며, 토크는 전류에 거의 비례한다는 것을 알 수 있다. 이러한 조건은 기본적으로 속도제어기와 전류제어기가 포함된 시스템 구성을 유도한다.[4]

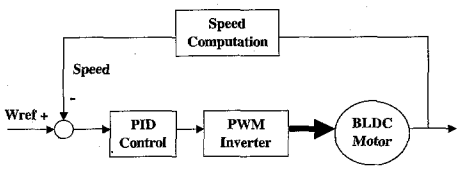

그림 1. 현재 구성된 속도제어기

그러나 현재 구성된 제어기는 전류 피드백을 하지 않으므로 그림 1와 같은 구조를 갖게 되며, 이러한 제어기의 구성은 전류제어에 의한 토크제어가 힘들게 되므로 제어기의 성능저하를 초래하게 된다. 특히 BLDC모터의 2상 전류구동방식은 시퀀스가 변하는 시점에서 토크의 리플이 발생되며, 이러한 토크리플은 저속제어에서 더욱 성능이 나빠진다.

3) PWM Inverter

현재 사용되는 PWM Inverter는 홀소자에 의하여 검출된 로터의 위치정보를 이용하여 2상 전류구동방식에 의하여 순서적으로 전류의 흐름을 제어한다. 그림 2에 각상에 인가되는 전압파형을 보인다.

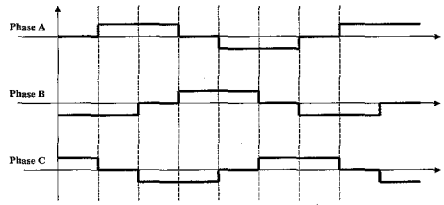

그림 2. 2상 전류구동 방식에 의한 전압 파형

그림 4는 모터와 연결된 파워소자를 나타낸다. 여기서는 IGBT를 이용하였다.

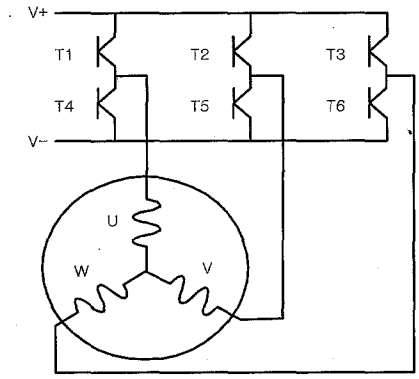

그림 3. 파워소자와 모터의 연결

순서	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	1	0	1	0
3	1	0	0	0	1	0
4	1	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	1
6	0	1	0	1	0	0

표1. 파워소자의 On-Off Sequence

표 1에 파워소자 스위칭 시퀀스를 보인다. CW가 2,3,4,5,6,1 순서의 시퀀스일 때, CCW의 방향은 3,2,1,6,5,4의 시퀀스가 된다. 이러한 시퀀스에 의해

서는 위아래 소자의 교번스위칭이 필요하지 않으므로 문제가 발생하지 않는다. 그러나 역방향의 토크를 주기 위해서는 전류를 반대방향으로 흘려야 하며 이러한 경우 위아래 소자의 교번 스위칭이 필요하므로, Dead-Time 설정에 의한 파워소자의 스위칭이 필수적이다. 이러한 모든스위칭 제어는 CPLD에 구성되어 있다.

3. 누적방지기법의 적용

PID제어계에서 누적방지기법은 적분동작과 구동장치의 제한으로 인해 발생하는 성능감퇴를 최소화하기 위해서 사용된다. 여기에서는 본 시스템에서 사용된 누적방지기법의 소개와 특성을 기술하였고 비교실험을 통하여 누적방지기법의 효과를 보였다.[5][6]

1) 시스템에 이용된 누적방지기법 소개

본 논문에서 사용된 누적방지기법은 추적형 누적방지기법(TAW)의 변화된 형태인 제한적분이 이용된 추적형 누적방지기법(TAW-LI)이다. 보통 많이 사용되고 있는 누적방지기법인 TAW는 실현 또는 설계시에 구동기 출력의 측정치 또는 정확한 구동기 모델이 요구되며 이로 인해 실험경비의 증가 또는 구동기 응답시간의 지연 등의 실질적 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 아래와 같은 제한적 적분기를 도입하는 것이다. 이 기법은 제어기출력이 구동기의 포화영역에 존재할 때 AW 기구가 필요한 반면 선형동작영역에 존재하는 경우 누적방지기법이 불필요하다는 점에 착안하여 구동기모델 대신 DZ(deadzone)을 도입한 결과이다.

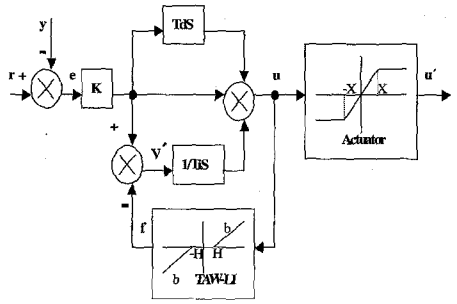

그림 4. TAW-LI를 도입한 PID 제어기

이 경우 PID제어기의 표현식은 다음과 같다.

$$\dot{v} = \frac{K}{T_i} e - \frac{1}{T_i} f$$

$$u = v + Ke - KT_d \dot{y} \qquad (2)$$

$$f = \begin{bmatrix} b(u-H), \text{if } |u| > H \\ 0 \quad , otherwise \end{bmatrix}$$

2) 누적방지기법의 비교실험

여기서는 사용된 누적방지기법의 효과를 검증하기 위해 실제 시스템에서의 속도출력파형을 소개하였다. 실험은 누적방지기법이 포함되지 않은 PID제어기와 누적방지기법이 포함된 PID제어기에 대하여 행하여졌다. 테스트한 속도패턴은 스텝 가속 지령이며 5000spm per 0.2sec의 기울기로 300spm에서 3800spm까지 지령을 변화시켰다.

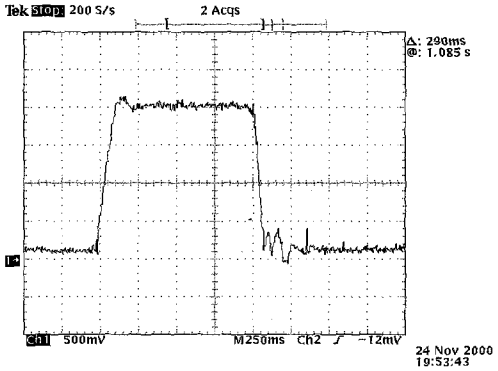

그림 5. 누적방지기구를 사용하지 않은 PID제어기의 속도응답

그림 5에서 보면 알 수 있듯이 누적방지기구를 도입하지 않은 제어기의 속도응답 곡선에서는 오버플로우가 많이 발생함을 볼 수 있다.

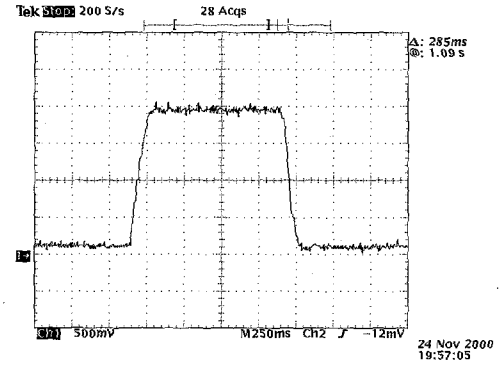

그림 6. TAW-LI를 사용한 PID제어기의 속도응답

또한 그림 6은 누적방지기구를 도입한 PID제어기의 속도응답 곡선을 나타내는데, 누적방지기구를 도입하지 않은 제어기보다 훨씬 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. 이 실험에서는 그림 5의 속도응답그래프에서 가속보다 감속에서 더욱 큰 리플이 발생하였기 때문에 제어응답성이 좋지 않은 감속부분에 누적방지기구의 역할을 크게 두었다.

4. 가감속제어

재봉기에서는 조작자의 명령에 의해 속도지령이 발생되고, 이 속도지령을 추종하기 위하여 현재 속도에서 지령속도까지 가감속제어를 하여야 한다. 이 속도지령의 추종에 있어서 산업용 재봉기에서 요구되는 가속도는 5000spm per 0.2sec이다. 그러나 여기에 소개된 제어기에서는 전류제어기의 부재로 인하여 정확한 토크제어가 불가하므로, 이러한 가속도를 만족시킬수가 없다. 그러므로 소개된 제어기가 이러한 가속도를 만족할 수 있도록 가가속 구간과 감가속 구간을 설정하여 가감속 제어를 하였다. 또한 재봉기의 특성상 가감속제어의 방법이나 패턴에 의해 기계의 진동이나 소음이 발생될 수 있으며, 능숙한 사용자에게 있어서는 침의 정지시 일정한 패턴의 가감속 제어가 일의 능률을 향상시키는데에 있어서 매우 중요하므로 가가속구간과 감가속구간의 설정은 매우 중요하다 하겠다. 그러므로 여기서는 이러한 조건을 만족하도록 실험에 의해 만들어진 LookUp Table에 의한 가감속패턴에 대한 설명과 재봉기 특성을 고려하여 만들어진 조건에 의하여 가감속 테이블을 생성하는 방법에 대하여 소개한다.[2][7]

1) LookUp Table에 의한 가감속제어

가감속제어를 하기 위하여 LookUp Table로 구성된 속도패턴은 속도제어를 위한 패턴과 정지제어를 위한 패턴 2가지로 구성된다. 속도제어를 위한 패턴은 속도제어에 필요한 일정한 가감속률의 정보를 갖으며 정지제어를 위한 패턴은 정지제어시 필요한 감속패턴의 정보를 갖는다.

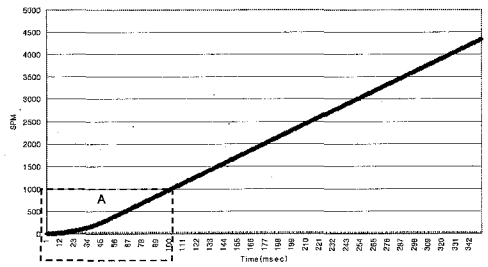

그림 7. 속도제어용 가감속패턴

그림7에서 속도제어를 하기 위한 가감속 패턴 데이터를 보인다. 이 속도제어패턴을 보면, 저속에서는 부드러운 가감속을 위한 패턴이 생성되어 있고, 고속부분은 빠른 응답을 위해 일정한 값의 최고 가속도를 그대로 유지한다. 이러한 속도패턴은 고속부분에서 제어기 및 구동기의 속도추종 능력에 따라 속도 오차가 발생할 수도 있지만, -순간적인 최고 가속도 출력을 원하므로- 재봉기 특성상 어느정도의 오차가 있어도 문제가 발생하지 않기 때문에 가능하다. 또한 정지에서의 부드러운 가속에 의한 출발은 제어기의 성능에 의한 제어오차에 따른 영향을 줄일 수도 있지만, 기계유격에 의해 발생하는 소음도 제거한다. A부분의 속도패턴은 이러한 부드러운 가속을 위해 실험에 의해 구하여진 패턴이다.

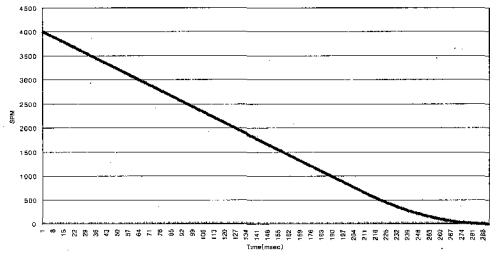

그림 10. 정지제어용 가감속패턴

정지제어시 고려되어야 할 사항은 사용자가 느끼는 일종의 가감속 형태이다. 사용자는 침이 일정한 가감속패턴에 의해 정지하기를 원하며 이것은 사용자의 작업능률과 상관이 있다. 이러한 요구조건에 의하여 정지제어패턴을 LookUp Table로 작성했다. 그리고 이 정지제어패턴에서도 속도제어패턴에서 나타날 수 있는 제어기 성능의 문제나 기계유격에 의한 소음이나 진동이 가장 작게 발생하는 패턴을 실험에 의하여 구하였다.

2) 패턴생성 알고리즘

재봉기는 특성상 서로 다른 가가속률과 감가속률을 가지는 속도테이블을 가질 것을 요구한다. 아래에 이러한 조건에 의한 속도테이블의 생성에 관하여 논한다.

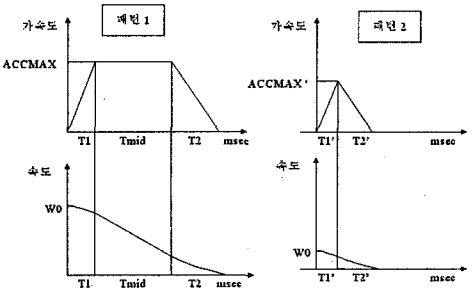

그림 9. 가속도와 속도패턴

현재속가 w_0이고 지령속도가 w_{ref}일때,

$$w_{var} = w_{ref} - w_0$$

패턴 1의 조건은

$w_{var} \geq \frac{(T1 + T2) \cdot ACCMAX}{2}$ 이며,

이 경우 구하는 변수값은

$t_1 = T1,\ t_2 = T2,\ acc_{\max} = ACCMAX$

$t_{mid} = \frac{w_{var}}{ACCMAX} - \frac{(T1 + T2)}{2}$ 이다.

패턴 2의 조건은

$w_{var} < \frac{(T1 + T2) \cdot ACCMAX}{2}$ 이며,

아래의 3가지 조건에 의하여

$$w_{var} = \frac{(T1' + T2') \cdot ACCMAX}{2}$$

$$\frac{ACCMAX'}{T1'} = \frac{ACCMAX}{T1}$$

$$\frac{ACCMAX'}{T2'} = \frac{ACCMAX}{T2}$$

구하는 변수값은

$$T1' = T1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot w_{var}}{(T1 + T2) \cdot ACCMAX}}$$

$$T2' = T2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot w_{var}}{(T1 + T2) \cdot ACCMAX}}$$

$$ACCMAX' = ACCMAX \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot w_{var}}{(T1 + T2) \cdot ACCMAX}}$$

이다.

또한, 시간에 따른 속도값은 아래의 식에 의하여 구하여진다.

① $t \leq t_1$일 때,

$$w = w_0 + \frac{acc_{\max} \cdot t^2}{2 \cdot t_1}$$

② $t > t_1$ and $t \leq (t_1 + t_{mid})$일 때,

$$w = w_0 + \frac{acc_{\max} \cdot t_1}{2} + (t - t_1) \cdot acc_{\max}$$

③ $t > (t_1 + t_{mid})$ and $t \leq (t_1 + t_2 + t_{mid})$일 때,

$$w = w_0 + \frac{acc_{\max} \cdot t_1}{2} + t_{mid} \cdot acc_{\max} - \left(1 - \frac{t - (t_1 + t_{mid})}{2 \cdot t_2}\right) \cdot acc_{\max} \cdot (t - (t_1 + t_{mid}))$$

재봉기에서의 위치제어를 위해서 전체이동거리를 알아야 하므로 전체이동거리 θ_Σ를 구하면,

$$\theta_\Sigma = (w_0 + \frac{acc_{\max} \cdot t_1}{6}) \cdot t_1 + (w_0 + \frac{t_1 \cdot acc_{\max}}{2}) \cdot (t_{mid} + t_2) + acc_{\max} \cdot t_{mid} \cdot t_2 + \frac{acc_{\max} \cdot t_2^2}{3}$$

3) 속도테이블의 성능 비교

위에서 제시한 가가속률과 감가속률을 가지는 패턴에 대하여 현재 시스템에 테스트한 결과를 보인다. 테스트한 속도패턴은 스텝 속도 지령, 스텝 가속 지령, 스텝 가가속 지령으로 나뉜다. 스텝 속도 지령은 속도 지령이 300spm에서 스텝으로 3800spm까지 변하며, 스텝가속지령은 5000spm per 0.2sec의 기울기로 300spm에서 3800spm까지 지령을 변화시킨다. 스텝가가속지령은 최고 가속도가 위의 스텝가속지령과 같은 5000spm per 0.2sec이며 가가속시간과 감가속시간은 50msec로 설정하여 300spm에서 3800spm까지의 변화를 관찰하였다.

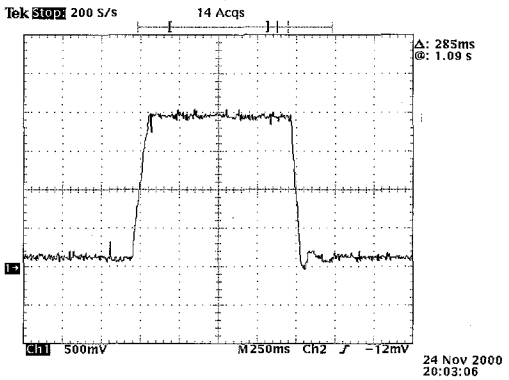

그림 10. 스텝속도지령에서의 속도파형

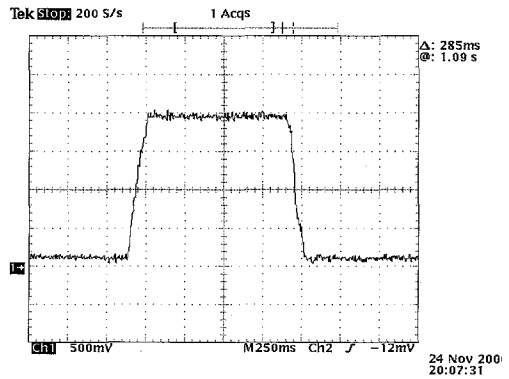

그림 11. 스텝가속지령에서의 속도파형

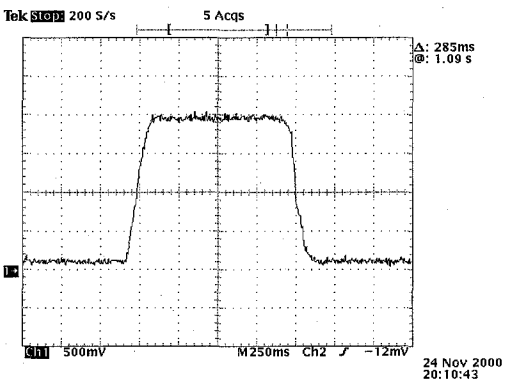

그림 12. 스텝가가속지령에서의 속도파형

5. 결론

본 논문에서는 재봉기를 위한 BLDC 모터제어에 관하여 설명하였으며, 현재 구성된 제어기의 성능분석과 재봉기에서 요구되는 제어기의 성능에 기준하여 필요로 하는 조건을 만족시키기 위한 방법이 연구되었다.

본 시스템에서 사용된 누적방지기법은 제어기의 성능을 향상시켜 재봉기에서 요구되는 가속조건을 만족시킬 수 있었으며 재봉기의 정상상태에서의 진동을 적게 하는데에도 필수적인 역할을 담당했다. 가가속과 감가속의 사용은 지령에 대한 응답에 있어 발생하는 에러를 감소시키고, 속도추종에 있어 부드러운 속도변화를 유도할 수 있음을 보였으며, 이러한 응답은 정지에서 동작하는 경우와 동작중에서 정지하는 경우에 기계유격으로 인하여 발생하는 소음을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 LookUp Table 사용에 있어서의 단점을 해결하기 위해 재봉기의 특성과 조건이 고려된 가감속패턴 생성 알고리즘을 구현하였다.

현재는 DSP의 발전으로 전에는 구현이 불가능했던 계산량이 많은 고성능 제어 알고리즘의 구현이 가능해졌다. 추후의 연구는 이러한 시스템을 이용한 모터의 고성능 제어 관점에서 이루어져야 하며, 따라서 본 논문은 저가의 제어기를 가진 시스템이 재봉기에서 요구되는 고속가감속제어와 저진동, 저소음 특성에 대하여 만족할 만한 성능을 보였다는데에 의의를 갖는다.

참 고 문 헌

[1] *브러시레스 서보모터의 기초와 응용*, 기전연구사, 1992.

[2] 강석주, 김준석, 홍석준, 설승기, "저가형 BLDCM 구동장치를 이용한 정밀위치제어"

[3] 강병철, 이충환, 김환성, 김상봉, "BLDC 모터의 구동장치 개발 및 정밀 반복 제어", *KACC*, 1996.

[4] Texas Instruments, *DSP Solutions for BLDC Motors*, BPRA055, 1997.

[5] 류지수, 허학범, 박태건, 이기상, "PID 제어계를 위한 누적방지 기법의 비교", *자동제어학술회의 논문집*, 2000.

[6] Y.Peng, D.Vrancic, R.Hanus, "Anti-Windup, Bumpless and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers", *IEEE Control Systems*, Vol.16, No.4, PP.48-57, 1996.

[7] 신동수, 정성종, "서보모터의 가감속형태에 따른 운동오차에 관한 연구", *대한기계학회논문집(A)*, 제21권, 제10호, PP.1718-1729, 1997.