

서어보 電動機의 최근 動向

朴貴泰*·任永徹**
(*高麗大 教授 · **全南大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 서 론
 - 2. 서어보 전동기의 종류와 특성
 - 2.1 영구자석형 직류전동기
 - 2.2 무철심형 직류전동기와 PC 전동기
 - 2.3 브러시리스 직류전동기
 - 2.4 스텝 모우터
 - 2.5 2 상 교류 서어보 전동기
 - 2.6 교류 동기전동기
 - 2.7 리니어 모우터
 - 3. 서어보 전동기의 개발현황과 전망
 - 4. 서어보 전동기의 제어방식
 - 4.1 선형 서어보 제어기
 - 4.2 비선형 서어보 제어기
 - 5. 결 론
- 참고문헌

1 서 론

최근 마이크로전자공학의 급속한 발전과 강력한 마이크로프로세서의 출현으로 말미암아 NC 공작기계, 산업용로봇, 사무자동화 기기등의 기능과 지능이 보다 다양화 되고, 보다 고급화 되어가는 추세에 있다. 따라서 이들 산업용 및 사무용 자동화기기에 필수적인 서어보 전동기는 보다 높은 정밀성을 갖도록 요구된다.¹⁾ 즉 서어보기구의 高速化, 高精度, 小型化, 無保守化는 물론 보다 높은 시스템적인 유연성을 갖게 하는 것이 필요하게 되었다. 요컨대 서어보 전동기, 위치와 속도 센서, 고성능 감속치차, 구동회로 등 서어보기구 구성요소 각각의 특성향상 뿐만 아니라 고도로 발달된 제어이론을 적용하고 마이크로프로세서나 고속신호처리장치등을 사용하여 목적에 부합된 동작을 하도록하는 계통구성 방법이 필요하게 된다. 그동안 개발된 전력전자공학은 서어보 구성요소의 精密化에 적용되고

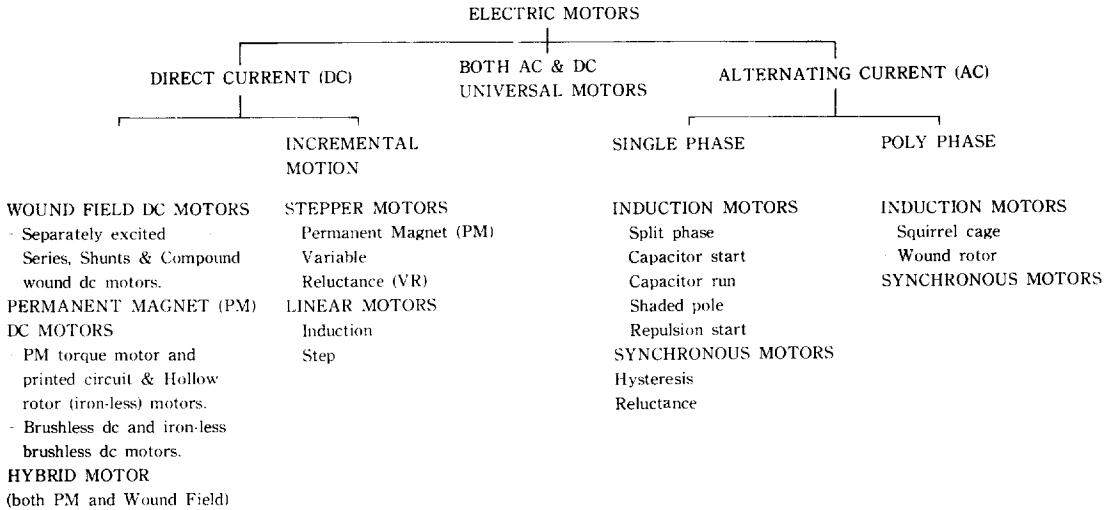
있으며 또한 디지털신호처리를 실현시키는 마이크로전자공학의 발전으로 말미암아 고급 제어이론의 적용이 가능하게 되었다. 최근의 이와 같은 배경에서 디지털서어보, 소프트웨어서어보, 인텔리전트 서어보등의 진보된 서어보 기술이 실현되어지고 있다.

본문에서는 현재 많이 사용되는 서어보 전동기의 종류와 특성을 알아보고 현재의 상황과 전망에 대하여 기술한 뒤 그동안 개발된 여러가지의 제어방식에 대하여 실제로 적용된 실례를 들어 서어보 전동기 제어에 관한 최근 동향을 알아보고자 한다.

2 서어보 전동기의 종류와 특성

동작원리에 따라 전동기를 분류하면 표 1 과 같다. 현재 많이 사용되고 있는 서어보 전동기의 종류와 그 특성을 간략히 기술하면 다음과 같다.^{2), 3)}

표1. 전동기의 분류



2.1 永久磁石型 直流電動機

직접구동 직류전동기는 부하에 직결되어 큰 토크오크를 발생시키는 서어보 구동장치이다. 이 전동기는 界磁卷線에 의하지 않고 영구자석으로 磁界를 발생시키며 매우 작은 공간을 점유하고 많은 용통성과 적응성을 갖는다.

일반적으로 큰 정지토크오크를 갖고 저속동작용으로 설계되며 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- (1) 정지 대 가속토크오크 비와 토크오크 대 관성의 비가 크다.
- (2) 치차없이 직접구동으로 사용 가능하며 위치제어시 정확도를 높이고 서어보 대역폭을 확장시키며 치차 사용시의 문제점을 해소시킨다.
- (3) 선형의 토크오크-속도 특성을 갖는다.
- (4) 稀土類磁石의 고에너지밀도로 인해 소형·경량이 가능하다.

2.2 無鐵心型 直流電動機와 PC 電動機

무철심형 전동기는 영구자석이 고정되고 非磁性回轉子에 권선을 감은 구조로 되어있다. 즉回轉部는 가운데가 비어있는 상태의 권선과 軸 및 整流子로 구성된다. 회전자의 무거운 철심을 제거하여 관성과 인덕턴스를 감소시킨 것이나.

PC전동기(pan cake motor)는 재래적인 원통형이 아닌 판 형태의 電機子로 되어있다. 고정자 자계는 영구자석에 의해 발생되며 整流는 전기자 중심에서 도체와 은·흑연 브러시의 접촉으로 이루어진다. 이것들은 10~50(μH)의 매우 적은 인덕턴스를 갖고 있으며 이들 구조는 그림 1, 그림 2와 같다. 가지고 있는 장점들을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 코깅(cogging), 히스테리시스와 渦電流손

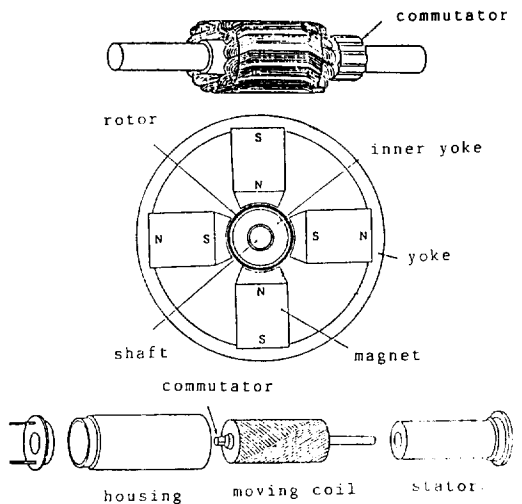


그림 1. 무철심형 직류전동기

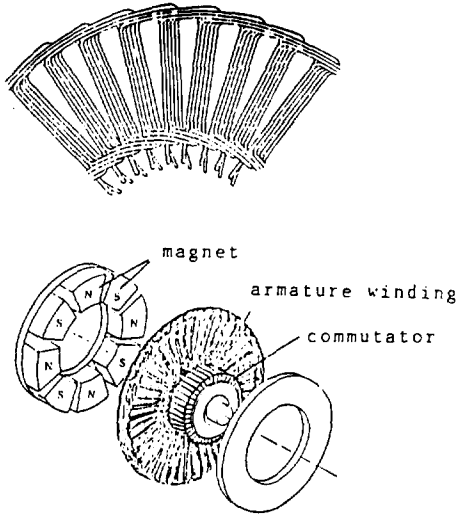


그림 2. PC전동기

실을 경감시킬 수 있다.

- (2) 토오코 대 관성비가 높다.
- (3) 速應性이 좋다.
- (4) 高速性이 좋다.

2.3 브러시리스 직류전동기

이 전동기는 상당히 최근에 NASA에 의해 개발되었다. "brushless"란 말은 回轉子 위치를 감지하여 전자적으로 整流되므로 재래의 직류 전동기에서 브러시와 整流子를 제거한 것이라는 것을 의미한다. 이 개념은 60년대에 착안되었지만 위치감지와 전력제어에 필요한 반도체의 개발에 힘입어 최근에야 개발되었으며 지상에서 뿐만 아니라 우주 공간에서 많은 공헌을 하게 되었다. 재래의 직류전동기와 같은 물리적 법칙으로 동작되나 근본적인 차이점은 회전부가 영구 자석이 되고 고정된 電機子 卷線을 갖는다는 것이다. 따라서 회전자의 위치에 따라 반도체 증폭기로 적당한 권선을 스위칭해야 한다. 회전자 위치감지에는 빛, 인덕턴스 또는 커패시턴스를 이용한 변환기나 자기저항, 홀소자와 같은 장치들이 사용되고 있다.

이것의 구조는 그림 3 과 같으며 장점들은 다음과 같다.

- (1) 브러시와 정류자가 제거되어 마모가 없으

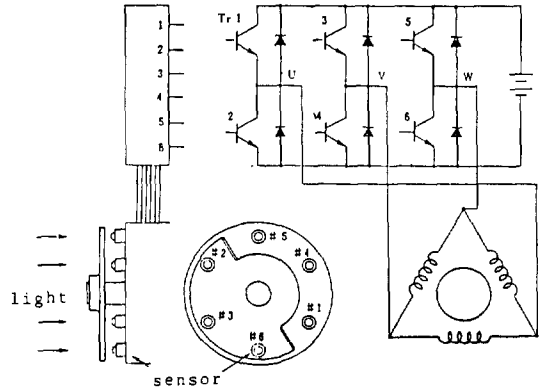


그림 3. 브러시리스 직류전동기

므로 신뢰도가 향상되고 수명이 연장된다.

- (2) 브러시 아크로 인한 고주파 간섭이 없어진다.
- (3) 폭발성이나 악조건의 환경에도 사용 가능하다.
- (4) 고진공 상태에서도 사용 가능하다.
- (5) 고속용으로 사용 가능하다.
- (6) 고효율, 응답시간, 선형성과 같은 재래의 직류전동기 특성을 갖는다.
- (7) 내장된 속도신호를 이용할 수 있다.

2.4 스텝모우터

스텝모우터는 디지털 펄스 입력에 의해 離散的인 각도로 회전하는 인크리멘탈 구동기(Incremental actuator)이다. 펄스는 회전자 축을 구동시키고 또 축은 회전된 정확한 위치에 磁氣的으로 묶여진다. 50년대로부터 사용되었으나 그동안 관심을 끌지 못하다가 영구자석, 반도체 IC와 디지털 제어기법의 발달로 이제 널리 쓰이고 있다.

스텝모우터는 永久磁石型(PM)과 可變磁氣抵抗型(VR)의 두가지로 크게 분류된다. 영구자석형은 영구자석의 회전자와 2개 이상의 위상을 갖는 권선이 감긴 突極型 固定子로 구성된다. 또 가변가자저항형은 많은 極에 권선을 감은 고정자와 원통형 톱니의 회전자로 구성되며 고정자의 극과 회전자의 톱니가 스텝각을 결정한다. 영구자석형이 가변가자저항형 보다 더 고효율이며

더 작은 스텝각을 갖는다. 또 전원이 차단되었을 때도 정지토크를 가지며 더 좋은 댐핑특성과 고속성을 갖는다. 또한 마이크로스텝핑 기법은 매우 많은 개선효과를 가져온다.

스텝모우터의 장점은 다음과 같다.

(1) 매우 간단한 개루우프 속도·위치 제어가 가능하다.

(2) 신뢰도가 높다.

(3) 수명이 길다.

(4) 디지털 제어에 직접 응용된다.

단점은 다음과 같다.

(1) 고속용으로 부적당하다.

(2) 관성부하를 처리하는 능력이 부족하다.

(3) 효율이 낮고 整定時間이 길다.

2.5 2相 交流 서어보 전동기

한 相은 일정한 전압으로 항상 여자되어 있으나 다른 한 相은 어떤 신호에 따라 변하는 전압으로 구동된다. 그러므로 스스로 시동하지 못하도록 토크 특성의 전역에 걸쳐 制動常數가 正이 되도록 比例批移에 의거하여 회전자 저항을 크게하고 있다. 토크 대 관성의 비를 크게하기 위하여 회전자 지름을 가늘고 길게하여 갭을 적게하며 자속밀도를 크게한다. 토크-속도 특성은 垂下性이 된다.

2.6 交流 同期電動機

單相 히스테리시스와 릴럭턴스 동기전동기가 많이 사용된다. 이것은 근본적으로 일정속도용이며 속도는 부하에 관계없이 전원주파수에 비례한다. 따라서 테이프레코더, 타이머와 같은 일정속도가 요구되는 응용분야에 적당하다. 비교적 효율이 낮으며 넓은 속도범위에는 부적당하다.

2.7 리니어 모우터

리니어 모우터에는 非同期型和 同期型이 있다. 비동기형을 서어보 전동기로 사용하는 것이 있는가하면 동기형을 서어보 전동기로 사용한 것도 있다. 이 동기형 리니어 서어보 전동기에 리니어 스텝모우터가 있다. 그 구조는 그림4와

같고 코일은 순차적으로 여자된다. 여자상태를 반대로 하면 반대방향으로 움직인다. 리니어 스텝모우터는 수치제어용 동작기제동에 사용되고 있다.

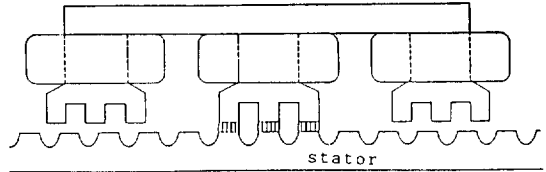


그림 4. 리니어 모우터

③ 서어보 전동기의 개발현황과 전망*

직류전동기거나 교류전동기 모두 전동기축에서 발생하는 토크는 시간지연이 없다고 생각할 수 있다. 그러나 이 결과로 생기는 속도나 위치에서는 시간지연을 피할 수 없다. 그 이유는 전동기와 부하의 가동부 관성을 무시할 수 없기 때문이다. 가감속도가 문제로 되는 서어보 전동기에서 치차의 감속비 선정보다 전동기와 부하 관성모멘트의 비가 1대1에 가깝도록 慣性整合(inertia matching)을 해야한다. 이를 위해서는 전동기 자체의 가감속 성능을 부하와 분리하여 독립적으로 정의하는 것이 필요하다.

전동기의 토크를 τ , 관성을 J , 치차 감속비를 R 로 하면 치차의 출력단에서의 토크는 τR 이 되고 관성은 JR^2 으로 된다. 따라서 치차의 입력단과 출력단에서의 토크 대 관성의 비는 각각 τ/J 및 τ/JR 가 되며 토크 제공대 관성의 비는 모두 τ^2/J 로 R 에 무관하게 된다. 또 전동기의 속도를 v 로 하면 출력 P 는 τv 가 된다. 전동기 자체를 v 까지 가속하는데 요구된 시간인 가속시정수 T 는 Jv/τ 로 나타낼 수 있다. 따라서 $P/T = \tau^2/J$ 의 관계가 성립된다. 이 양을 전동기의 出力率(power rate)라 하고 전동기의 가감속 능력을 표시하는 성능치로서 널리 이용되고 있다. 이 출력률은 동일 설계구조의 전동기에서는 거의 중량에 비례한다는 성질이 있기 때문에 설계의 좋은 점을 나타내는 지표로서 단위 중량에 대한 출력률(출력률 밀도)이 이용된다.

출력을 밀도를 높게하는 것이 서어보 전동기의 개발목표가 되므로 고에너지 자석의 채용, 권선 占積率의 향상, 설계구조의 최적화, 냉각기술 등 다방면의 노력이 시도되어 왔다. 그 결과 현재의 서어보 전동기에서는 출력을 밀도가 10~20(KW/S·kg)인 직류전동기와 교류전동기가 개발되고 있다.

미국의 서어보 전동기는 군용을 중심으로하여 고성능을 자랑하고 있다. 이것은 경제성을 고려하지 않고 소형, 경량, 고성능의 서어보를 요구하기 때문이다. 예를 들면 편평형 직류 서어보 전동기에서는 정류자편으로 자기가 전체를 관통하는 관통 정류자형으로 하거나 코일과 정류자의 접속 및 절연에도 특수한 방법을 사용하고 있다.⁷⁾ 동기형의 브러시리스 서어보 전동기에서도 고가인 희토류의 자성재료를 사용하여 초고정밀 서어보 전동기를 제작하고 있다.⁸⁾ 또 브러시에 따르는 보수의 번잡성이나 전기적 성능의 제한을 제거하기 위해 브러시가 부착된 전동기에서 브러시가 없는 전동기로 계속 바뀌어가고 있다. 최근에는 유도형에도 직류 서어보 전동기의 기본 설계구상이 이용되고 있다. 즉 무철심으로 하거나 편평한 회전자 구조라거나 슬림(slim)형 등이 생각되고 있다. 자속직교제어를 적용할 경우 슬림형은 편평형에 비해 고속응답, 고효율과 좋은 역율을 얻을 수 있다. 편평형은 소형으로 되는 장점이 있다.⁹⁾

4 서어보 전동기의 제어방법

정밀 서어보에서는 실용상 각종 파라미터 변동이나 외란에 민감하지 않고 어느정도의 최적 제어를 할 필요가 있다. 또한 설계하기 쉬운 알고리즘이 요구된다. 최근 고도로 발달된 현대 제어이론이 적용되고 그 결과가 보고되고 있다. 실용적 설계법이 확립되어 있는 고전 제어이론과 현대제어이론을 결합시키는 것도 효과적이다. 따라서 서어보기구 제어상의 비선형성이나 입력등의 각종 제약조건을 포함시켜 제어이론을 확장해서 사용하기 쉽게 하는 노력이나 저렴하게 구입할 수 있는 마이크로프로세서 및 고속디

지탈 신호처리장치에 의해 복잡한 제어 알고리즘의 실현등이 많이 이루어지고 있다.

4.1 선형 서어보 제어기

외란이나 파라미터의 변동에도 둔감하고定常狀態에서 제어량을 목표치에 일치시키는 설계법이 연구되어 왔다. M. Athans와 P. L. Falgout¹⁰⁾ 제어대상이 목표치 발생기나 외란신호의 고유치를 모두 갖을 때 서어보 문제는 레귤레이터 문제로 규착되어 해결이 가능하다는 것을 제안했다.

그후 이 원리를 이용하여 서어보 제어기의 설계법이 연구되었다. 외란신호의 고유치를 만드는 動的補償器(내부 모델)와 그것에 의해 레귤레이터 문제로 된 것을 안정화시키는 동적보상기로서 서어보 제어기를 구성하는 설계법이다. 이 제어계통의 구성은 그림5와 같다. 이 계통은 파라미터의 변동이나 외란이 존재해도 정상오차가 0 이되고 동적특성도 양호한 것을 얻을 수 있다. 이와 같은 레귤레이터 문제에 최적 제어이론을 적용하므로써 安定餘裕가 크고 감도가 개선된 보다 견실한(robust) 제어기를 설계할 수 있다.

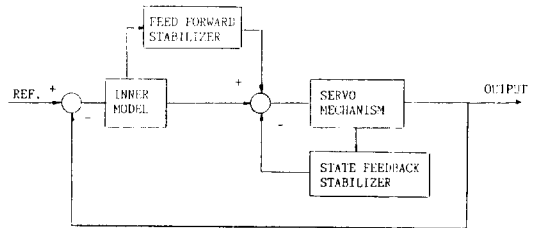


그림 5. Robust 서어보 제어기의 구성

서어보기구의 제어에는 종래부터 PID 제어방식이 사용되어 오고 있으며 현재에도 현장에서 널리 사용되고 있다. 한편 현대제어이론은 현장에서는 좀처럼 사용되지 않고 있으나 이제 마이크로 전자공학의 기술진보로 마이크로프로세서가 제어기로 사용됨에 따라 그 사용이 크게 기대되고 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 그중 I-PD 제어기는 제어기의 파라미터 설정이 용이하고 적응제어계를 구성하기 쉬우며

비선형의 보상도 쉬운 특성을 가지고 있다.” I-PD방식의 설계개념은 定常狀態偏差를 제거하기 위해 적분기의 도입과 현대제어 이론에 근거한 새로운 DDC 알고리즘으로 볼 수 있다. 그림 6은 I-PD 제어계의 블럭선도를 나타낸다.

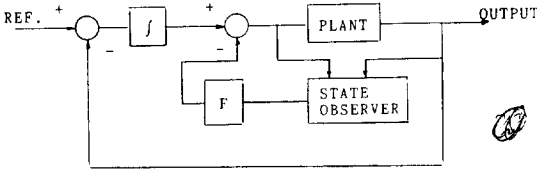


그림 6. I-PD 제어기의 구성

4.2 비선형 서어보 제어기

서어보기구의 정확한 모델을 구할 수 없는 경우와 또는 모델의 파라미터가 시간이나 부하에 따라 변하는 경우에 서어보기구의 견실한 제어를 위해 適應制御, 可變構造制御 및 學習制御 등의 비선형 제어 알고리즘등이 개발되고 있다. 이러한 고급의 제어 알고리즘들을 실현하기 위해서는 고성능의 마이크로프로세서가 필요하다. 서어보기구의 제어에 이러한 알고리즘들의 적용 예를 간단히 소개하면 다음과 같다.

(1) 슬라이딩 모드에 의한 서어보 계통의 위치제어¹²⁾

슬라이딩 모드는 가변구조제어에서 사용되는 개념으로 이 제어법을 사용하면 서어보기구의 파라미터 정보가 없을 때 또는 비선형이나 파라미터 변동과 외란이 있는 경우에 유효하다. 이 설계법은 설계자가 임의로 결정할 수 있는 스위칭 곡선을 따라 시스템의 궤적을 원점까지

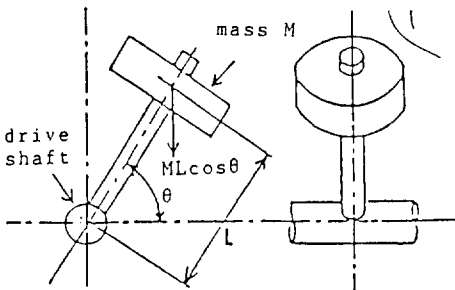


그림 7. 부하외란이 클때의 위치서어보계

도달하도록 피이드백 이득을 불연속적으로 변화시키는 것이다. 따라서 견실한 제어가 실현 가능하다. PID제어기에서는 제어기의 파라미터 선정이 다소 어려운 점이 있으나 이 방식에서는 설계가 그리 어렵지 않다. 또한 모델 추종제어의 모델은 일반적으로 선형이지만 비선형 모델도 용이하게 설정할 수 있고 제어성능을 향상시킬 수 있다. 계통의 파라미터가 時變의 경우라도 오차는 영으로 수렴하는 것이 보장된다.

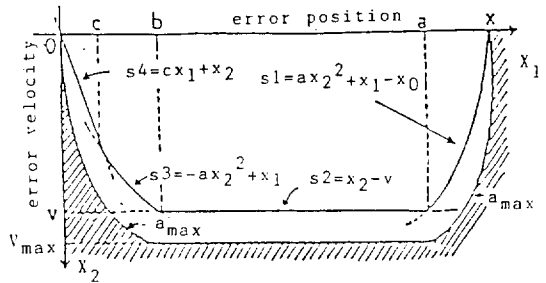


그림 8. 준시간 최적 위치서어보계의 슬라이딩 곡선구성

여기서는 부하외란이 크게 변화하고 마찰이나 치차의 뒷틈이 있는 위치 서어보계에 본 방법을 적용한 예를 보인다. 그림 8은 슬라이딩 곡선을 나타내며 제어신호, 서어보특성, 최대가속도오크에 의해 슬라이딩 모드 경계곡선이 그림 8의 사선으로 된 부분의 경계선으로 될 수 있다. 여기서는 고속성을 약간 희생하여 슬라이딩 존재 경계선의 내측에 스위칭 곡선을 설정했다. 곡선은 최대 일정가속, 최고속도 및 원점 부근의 직선에 의해 결정된다. 그림 9는 제어결과를 나타내며 매우 견실함을 보여주고 있다.

(2) 서어보 전동기 위치의 적응제어¹³⁾

정상동작시 환경의 변화, 부품마모, 부하변동 등으로 플랜트의 파라미터나 부하특성이 변화하는 경우에는 종래의 설계법으로는 정확한 제어를 할 수 없다. 이런 경우 적응제어기법중의 하나인 모델기준 적응제어(model reference adaptive control : MRAC)를 이용하여 적응제어기를 구성하면 희망하는 동적응답을 얻을 수 있다. 기본적인 MRAC 개념을 직류전동기의 위치제어

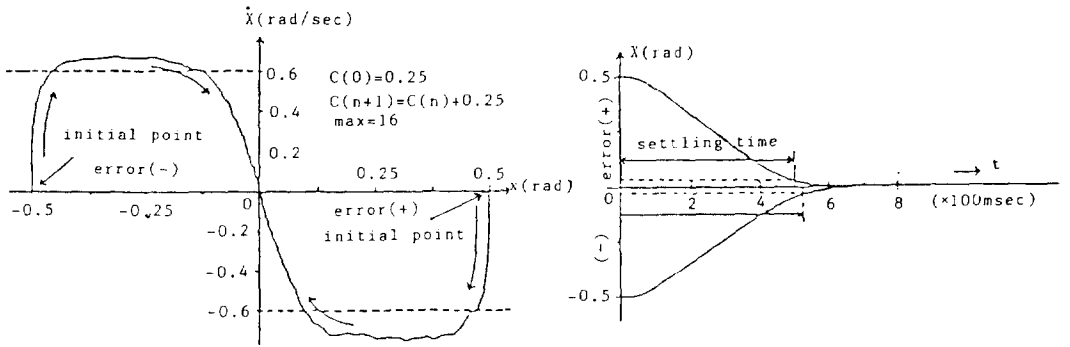


그림 9. 슬라이딩 모드에 의한 위치서어보계의 스텝응답

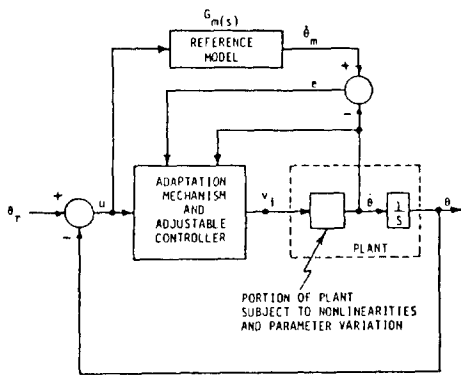


그림10. MRAC에 의한 직류전동기 위치제어 블럭선도

문제에 적용하면 그림10과 같다. 프랜트가 기준 모델의 동특성을 따르도록 제어기의 이득을 수정해 주는 적응장치가 있다. 이 적응제어 알고리즘은 마이크로프로세서에 의해서 실현되며 완성된 이산치 적응 위치제어계는 그림11과 같다. 쿨롬 마찰의 적응보상은 이득 g_2 에 의해 이루어지고 부하관성의 변화에 대한 적응보상은 이득 g_1 에 의해 이루어진다. 적응제어기의 이득 d_1, d_2 는 계통의 적응응답시간을 결정한다. 구성 결과 적응제어기의 응답 및 제어기 이득의 변화는 그림12와 같다.

(3) 위치서어보의 학습제어¹⁴⁾

반복 운전하는 위치서어보계의 制御精度을 크

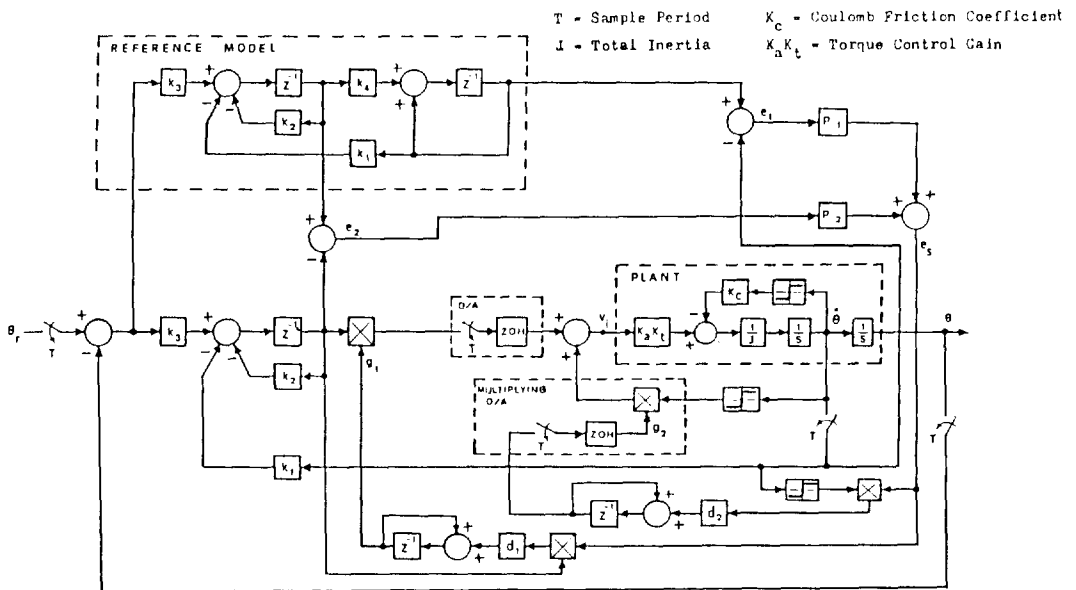


그림11. 이산치 적응위치제어계의 모델

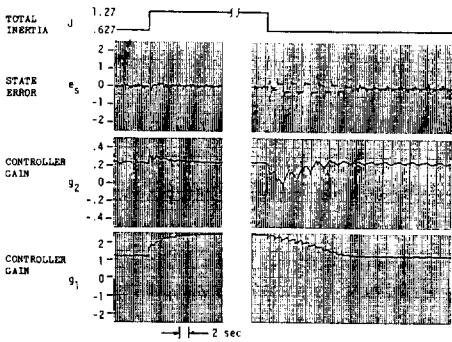


그림12. 관성변화에 대한 적응응답

계 향상시키는 制御技法이 양자가속기에 처음 시도 되었다. 운전시에 지령신호와 편차신호를 1주기분씩 기억하고 운전횟수를 늘려 보다 높은 精度의 운동지령신호를 학습하는 방법이다. 또 다변수의 비간섭제어에도 유효하다. 그림13

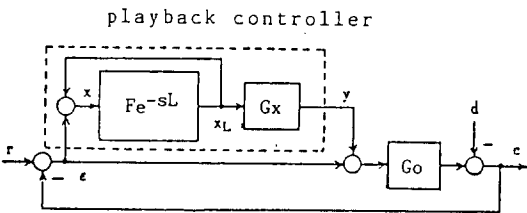


그림13. 학습제어기의 구성도

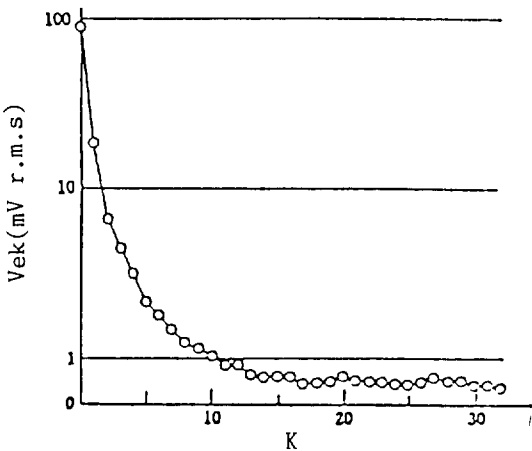


그림14. 학습에 의한 위치편차의 절감

은 이 계통의 블럭선도를 나타낸다. 여기서 나타난 playback 서어보제에는 어떤 정지상태에서 시동하고 일정 패턴 운동 후 최초의 정지상태로 복귀하는 동작을 반복하도록 목표치를 더한다. 점선부분을 제외하면 보통의 폐루우프 서어보계로 되어있으며 이 부분을 기본 서어보계라 한다. 반면에 점선으로 둘러싸인 부분이 반복제어기이다. 제어기는 주로 제어편차를 감속시키는 편차보상기, 계통을 안정화 시키는 $G_x(S)$ 로 구성된다. $F(S)$ 는 대역제어 필터이며 L 는 시동·초기상태·복귀·정정의 운전시간을 나타낸다. 그림14는 반복하면서 학습하며 오차가 적게 되어 가는 것을 보여준다.

5 결론

전력전자공학이나 마이크로전자공학의 급속한 발달에 힘입어 하드웨어에 해당하는 서어보 구성요소들의 성능을 향상시킴과 동시에 소프트웨어적인 현대제어 이론을 적용하여 이론과 실제의 차를 메꾸는 서어보계통의 구성법에 대해 실례를 중심으로 기술하였다.

이처럼 서어보 전동기에 관한 외국의 활발한 연구개발 노력에 비해 우리나라의 서어보 전동기 산업은 아직 시도도 하지 못한채 머물러 있는 현실이다. 그러나 최근 우리나라에서도 많은 산업체와 연구소, 대학이 공장자동화, 사무자동화, 로봇등에 많은 관심과 참여를 하고 있는 실정이므로¹⁾ 서어보 전동기의 이용이 급증할 것으로 예상되기 때문에 학계와 산업계에서 서어보 전동기의 제조와 응용기술에 대한 연구가 시급하다고 본다.

따라서 앞으로 재료를 중심으로하여 서어보 전동기등의 구성요소 개선, 정밀도 향상, 현대제어이론에 의한 설계기법 확립등 서어보계 전체의 성능향상을 목표로 노력할 필요가 있다고 본다.

참고문헌

- 1) 原島文雄, 土手康彦, “小形精密サーボの最近の動向,” シスラムと制御, 27(11), 679-686.

- 1983.
- 2) S. Murugesan, "An Overview of Electric Motors for Space Applications," IEEE Trans, IECE-28 (4), 260-265, 1981.
 - 3) 見城尚志, 小形モータの基礎とマイコン制御 総合電子出版社. 1982.
 - 4) 総合電子 りリサーチ, 精密小形モータ総合資料集 Vol. 1, Vol. 2. 1983.
 - 5) 金東浩역, 精密小形모우터의 基礎와 応用, 輪信文化社, 1978.
 - 6) 트리켄즈부스, サーボ技術 実用 マニュアル, 1982.
 - 7) 秋山, "高性能を誤る 米国の電動 サーボ技術" 日經 メカニカル, 4月 11日, PP-78-85, 1982.
 - 8) N. A. Pernerdash, "Dynamic Modeling of Brushless DC Motors in Electric Propulsion," Conf. Rec. of IEEE IAS Meeting, U. S. A. PP 570-577, 1980.
 - 9) W. Schmalber, "Microprocessor Controlled AC Servo Drive," Conf Rec of Microelectronics and Electrical Drives, Germany, PP. 311-319, 1982.
 - 10) M. Athans & P. L. Falb, Optimal Control, Mc Graw Hill Inc. 1966.
 - 11) 北森, "PID, I-PD制御がらの 発展の道," システムと制御, 27(5). PP. 287-294, 1982.
 - 12) F. Harashima, et al, "MOSFET Converter - Fed Position Servo System with Sliding Mode," Conf. Rec. of IPEC, U. S. A. 1983.
 - 13) S. D. Kraft, et al, "Experimental Microprocessor Based Adaptive Control System," IEEE Control Systems Magazine, 6 (1). pp. 35-39, 1986.
 - 14) 井上, 岩井, 中野, "フレイバックサーボ系の高精度制御," 電氣學會論文誌, 10 (4), pp. 9-16, 1980.
 - 15) 이광원, "제어용 교류전동기의 기술동향," 전기학회지, 34 (4), pp. 28-32, 1985.