□ 特輯 : 電氣機器의 技術動向 □

精密制御用電動機의 最近技術

元 鍾 洙
(서울大 工大 敎授)

■ 차 례 ■

1. 서 론
2. 제어용 전동기의 종류와 응용의 동향
3. 서보 모터
4. 직류 서보 모터
4.1 종류
4.2 성능
4.3 직류 서보모터의 제어
5. 교류 서보 모터
5.1 교류 서보 모터의 동작 원리개요
5.2 교류 서보 모터의 종류와 특징
5.3 교류 서보 제어장치
6. 결 론
참 고 문 헌

1 서 론

1970년대 초부터 소형 제어용 모터의 제조 및 응용기술은 급속한 성장을 보이고 있다. 제어용 모터는 메카트로닉스-산업 로보트나 NC공작기계, 컴퓨터 주변의 입출력기기등-에서 전자적 제어를 기계적인 동작으로 변환하는 애크튜에이터이며, 근래 많은 종류의 것이 실용화되고 있다. 즉 일일히 헤아릴수 없을 정도의 종류의 기기가 공장이나 오피스 등에서 사용되고 있으며 하나의 기계에서도 각 부분에서 기능에 따라 가장 적합한 성능의 모터가 이용되고 있다. 메카트로닉스 가기에서는 위치제어기술이 중요시 되었으며 종례에는 이 방면에 스텝핑 모터, DC서보 모터가 사용되었으나 1980년 경부터는 AC서보 모터 또는 브러시리스 모터로 불리우는 새 기종이 주목되게 되었으며 응용 분야의 확대에 따라 수요가 급격히 증가하였다. 최근 OA나 FA에서 정보기기, 메카트로닉스 기기등에 사용되고 있는 제어용 전동기는 여러 가지가 있으나 여기서는 지면 관계로 서어보 전동기를 중심으로 해서 그 기술 동향의 일단을 소개한다.

2 제어용 전동기의 종류와 응용의 동향

현재 사용되고 있는 소형 전동기의 종류는 일반 분류법에 따라 직류 전동기, 유도 전동기, 동기 전동기 및 그 이외의 전동기(step motor, universal motor등)로 대별할 수 있으나, 각 전동기는 그 동작 원리 또는 구조 등에 따라 더욱 세분할 수 있다. 전체적으로 볼때 그 종류가 대단히 많으며 또한 중·대형기에 비해서 특수한 것이 많은 것이 특징이다. 전동기의 사용 형태도 단순한 동력원으로 사용되는 것에서 제어 지령에 정확·신속하게 추종하는 것을 요구하는 고도의 제어 용도의 것까지 각양각색이다. 근래는 특히 후자인 제어용 소형 전동기의 중요성이 특히 높아지고 있다.

표 1은 주된 제어용 소형 전동기와 대표적인 용도의 예를 보인 것이다. 이표의 모터는 어느 것이나 통상적인 회전형 모터이지만 이 외에도

표 1. 주요 제어용 소형 전동기

종 류		특 징	주 용 도
직류 서보 모터		• 고 응답성 • 소형 경량이고 대출력이 얻어짐 • 정류자, 브러시의 보수 필요	NC공작기계, 산업용 로보트, 컴퓨터 주변 장치, 사무기기, 음향기기, 영상기기
스텝 모터		• 회전각이 입력 펄스수에 비례 • 오픈 루프 제어	NC공작기계, 컴퓨터 주변 장치 사무기기
브러시리즈 DC모터 (트랜지스터 모터)		• 정류자, 브러시가 없는 속도 제어용 모터 • 자극 위치 검출기 필요	음향·영상기기 컴퓨터 주변장치
교류 서보 모터	영구 자석 동기기방식 (브러시리스 DC서보)	• 정류자 및 브러시가 없는 위치 제어용 모터 • 자극 위치 검출기 필요 • 직류 서보 모터 정도의 성능	NC공작기기 산업용 로보트
	2상서보모터	• 견고함 • 취급이 간편함	전기계기
	벡터 제어 유도기 방식	• 일차 전류를 여자 전류 성분과 토오크 제어 성분으로 나누어 제어 • 직류기 정도의 성능	NC공작기기 (주축 구동형)

리니어 DC모터, 리니어 스텝 모터, 기타 직선 운동형의 제어용 전동기도 실용화되고 있다.

3 서보 모터

그림 1 은 자동 제어계의 불록도를 보인 것이다. 서보 기구란 물체의 위치각도등을 제어량으로 해서 목표치의 임의의 변화에 추종하게 되는 자동 제어계를 말하며, 보통은 속도, 토오크등을 제어량으로 하는 것도 속도 서보, 토오크서보 등으로 부른다. 그리고 서보 기구의 제어 대상에 사용되는 모터를 서보 모터라고 한다.

서보 기구에는 기계식, 유압식, 전기식등이 있다. 기계식은 신뢰성, 보수성에 난점이 있고,

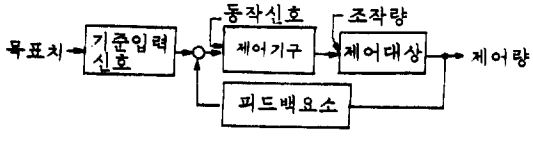

그림 1. 자동제어계의 구성

고성능화가 어려운 점이 있다. 유압식은 우수한 성능을 가지고 있으나 부속 장치가 복잡하고 보수면에서도 난점이 있어 현재는 대형의 것을 제외하면 전기식으로 대치되고 있다. 전기식은 직류 모터를 사용하는 것과 교류 모터를 사용하는 것으로 나누어 진다.

서보 모터는 빈번한 기동, 정지를 반복하는 곳에 사용되기 때문에 일반 모터에서의 요구 조건 외에도 다음과 같은 성능을 요구한다.

(1) 가혹한 동작에 견딜 수 있는 견고성이 있을것.
(2) 제어 범위가 넓을 것
(3) 토오크 / 이너셔 비는 크고, 기계적 시정수는 작을 것, 즉 응답성이 좋을 것.
(4) 부하에 적합한 속도·과속도 특성이 있고 과도시의 피크 부하에 견딜 수 있을 것.
(5) 토오크 / 중량, 토오크 / 입력이 클 것.

4 직류 서보 모터

직류 서보 모터는 오늘 날까지 서보 모터로서의 주역위치를 점유하고 있는 모터이며 그 출력

은 10w 전후에서 수 kw정도 까지를 카바하고 있다. 구조적으로는 생각될 수 있는 모든 구조가 실용화 되었을 정도로 완성의 위치에 와있다고 볼 수 있으며 또한 성능적으로는 광범위한 요구에 대응할 수 있을 정도이다. 직류 서보 모터는 고성능화에대한 적합성이 아주 우수하며 성능이 좋은영구자석을 개발하여 수 kw미만의 것은 대부분이 영구자석을 써서 여자하고 있다. 따라서 계자 권선의 전력 손실 문제가 없어져 효율과 성능의 향상을 가져왔다. 그러나 정류자, 브러시를 가지고 있기 때문에 브러시 마모의 문제가 있어 정기 점검·보수를 필요로 하는 결점은 있다.

4.1 종류

서보 성능을 결정하는 요인 중의 하나는 전기자의 구조에 있다고도 할 수 있으나 현재 많이 사용되고 있는 모터(일부 장래형도 포함)를 전기자 면에서 분류해 보면 그림 2 와 같다. 그림 2 에서 (3), (4), (5), (6), (8)은 비교적 공극이 크다.

4.2 성능

서보 모터의 성능은 다음과 같은 지표를 사용해서 표현할 수 있다.

(1) 파워 레이트 Q〔kw/s〕
(2) 파워 레이트 중량비. Q/W〔kw/s/kg〕
(3) 정격 토크 중량비. T_R/W〔kg—cm/kg〕
(4) 기계적 시정수. t_m〔ms〕
(5) 피크 토크비. T_{PS}/T_R

파워 레이트는 T^2/J_m을 말하며 응답의 정도(精度)를 말한다. 부하의 이너셔 J_L과 필요한 가속도 α가 결정되면 캐다로그의 파워레이트로부터 모터를 선정하는 과정에서 이를 참고 자료로 한다. 파워 레이트 중량비는 파워 레이트를 중량으로 나눈 것이고, 정격 토오크 중량비는 정격 토오크를 모터의 중량으로 나눈 것으로서 전동기의 성능, 가격등과 관계가 있다. 기계적 시정수는 J_mR_a/K_eK_t로 표시되며 회전자 이너셔 J_m이나 전기자 권선 저항 R_a가 모두 작고 또한 토오크 정수 K_t가 클수록 제어에 적합한 모터라고 할 수 있다. 피크 토오크 비는 모터가 발생할 수 있는 최대 피이크 토오크를 정격 토오크로 나눈 것으로서 이 값이 클수록 과부하 내량이 큰 것을 의미한다. (1), (2), (3), (5) 각각의 값이 크고 (4)의 값이 작은 것이 서보 성능이 우수하다.

4.3 직류 서보 모터의 제어

일반적으로 제어용 전동기는 단순히 전원을 접속해서 회전시키는 모터와는 달리 구동하려면 모터에 필요한 전력을 공급하는 전력 변환기, 입력 및 피이드 백 신호를 처리해서 전력 변환기에 제어 신호를 보내는 제어 장치, 모터의 위치나 속도를 검출해서 피이드 백 신호를 만들어 내는 검출 장치등을 필요로 한다. 또한 모터와 부

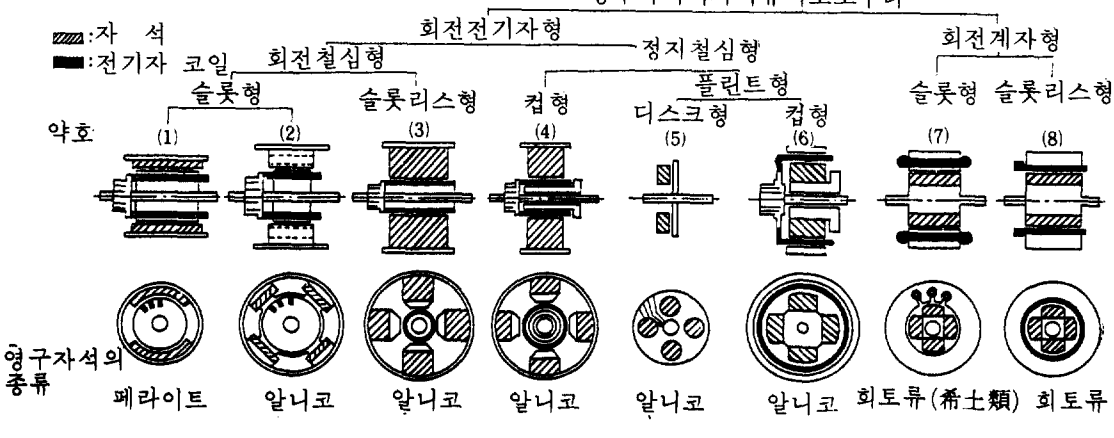

그림 2. 직류서보모우터의 분류

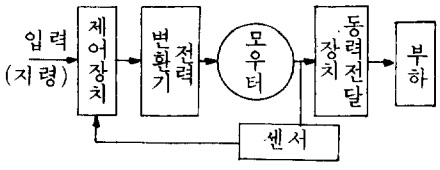

그림 3. 제어계의 구성

하 사이에는 동력 전달 장치가 사용된다. 이러한 요소를 조합한 제어계는 그림 3 의 구성도와 같다.

4.3.1 전력 변환기

모터 구동용의 전력변환기는 소자로서 다이리스터를 사용하는 것, 파워 트랜지스터를 사용하는것, 파워 MOSEFT을 사용하는것 등이 있으나 근래는 파워 트랜지스터를 이용한 것이 주류를 이루고 있다. 1 kw정도 이하의 중소용량기의 구동에서는 스위칭 주파수를 높게 할수 있는 파워 MOSFET을 사용한 변환기의 적용도 이루어지고 있다.

4.3.2 제어 장치

검출 장치와 입력 지령 신호가 아나로그 신호인 경우는 모터·전력 증폭기는 모두 아나로그 기기인 관계로 아나로그 제어 회로를 사용한다. 그러나 최근에 와서는 입력 지령 신호는 디지탈인 경우가 많으며 위치 검출 신호도 디지탈량인 경우가 많다. 이 경우는 D/A 변환기를 사용해서 아나로그 제어회로를 사용한다. 근래는 지령 신호가 전산기 출력을 이용한다던지 제어회로 자체도 IC를 사용해서 손쉽게 그리고 경제적으로 구성할 수 있어 디지탈 제어회로화하는 추세에 있다. 디지탈 제어회로는 본질적으로 정도(精度), 분해능(分解能)이 좋고 제어 범위가 넓은 관계로 고정도를 필요로 할 때, 동기 속도 제어나 회로 중에서 연산 처리를 필요로 하는 경우등에 쓰인다.

4.3.3 검출 장치

회전 검출 장치를 동작 면에서 대별하여 속도 발전기, 레졸버, 엔코더에 대해 간단히 살펴보기로 한다.

(1) 속도 발전기 : 속도 발전기에는 교류 속도 발전기와 직류 속도 발전기가 있다. 전자에는 2 상 유도 발전기와 영구 자석형 교류 발전기가 있으며 교류서보계에 많이 이용된다. 직류 속도 발전기는 구조가 간단하고 부착하기가 용이한 관계로 서보 모터의 속도 검출에 널리 이용하고 있다. 직류 속도 발전기는 속도에 비례한 아나로그 전압을 10,000 rpm에 이르는 넓은 속도 범위까지 얻을 수 있고 또한 그 직선성도 0.3% 이하이며 온도 계수도 0.3% 이하/℃로 아주 작은 장점을 가지고 있다. 그러나 브러시의 마모, 스파아크 발생등의 문제가 있다. 이 문제를 해결할 수 있는 것으로는 브러시리스속도 발전기가 있으나 앰프의 오프세트나 온도 드리프트에 의한 잔류 전압의 발생과 리플 전압이 1～2%정도로 비교적 크다는 점에 유의 할 필요가 있다.

(2) 레졸버 : 레졸버는 기본적인 구조면에서 싱크로와 비슷하지만 싱크로의 경우는 고정자에 3 상 권선, 회전자에는 단상 권선이 되어 있는데 대해 레졸버는 고정자, 회전자 모두 2 상 권선으로되어 있다는 점이 다르다. 구조가 견고하고 충격이나 진동에 강하며 반도체를 내장하고 있지 않은 관계로 고온하에서의 동작이 가능하다는 점등의 특징이 있다.

레졸버의 정도는 보통 위상 오차로써 표시되며 5～10分 정도이다. 보다 높은 정도를 필요로 하는 경우에는 다극(多極)으로 하는 방법이 사용되고 있다. 다극방식의 위상 오차는 12극 제품에서 ±2 分 정도이다.

레졸버의 사용 방식에는 종래의 위상변조 방식과 진폭 변조 방식외에 전자의 개량 방법으로 PLL검출 방식이 있다. PLL검출 방식에 의하면 검출기와 드라이버 사이의 전송 신호가 저주파로 될 수 있어 전송면에서 유리하다.

레졸버는 본래 위치 검출기이다. 위치검출기에서 속도 검출기로 변환할 수 있기 때문에 위치 및 속도 센서로 공용하는 예가 많다.

레졸버는 상술한 바와 같이 많은 특징이 있기 때문에 로보트나 NC공작기계의 회전 센서로서 많이 사용하고 있다. 그러나 다음과 같은 단점

도 있다.

가. 정도가 높은 레졸버를 얻으려면 고도의 제작 기술이 필요하며 양산이 어렵고 고가이다.

나. 형상 및 이너셔가 크다.

(3) 엔코더 : 엔코더는 레졸버와 같은 회전 위치 검출기이지만 구조가 간단하면서도 레졸버처럼 여자 회로를 필요로하지 않는 특징때문에 그 수요가 급격히 증가하고 있다. 그 구성은 대별해서 자기식과 광학식으로 구분된다.

(가) 자기 엔코더 : 자기 엔코더는 자기 저항 소자 및 자성체의 발달에 따라 최근 급속히 사용되기 시작한 회전 센서이다. 그 구성 상으로 볼 때 그림 4 와 같은 두 종류가 있다.

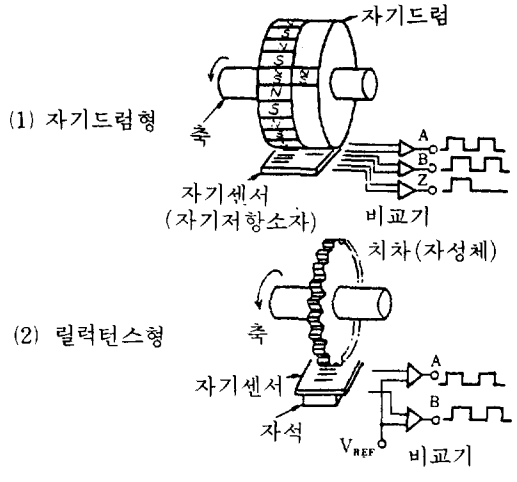

그림 4. 자기엔코더의 구성

회전 드럼에 치차를 만들고, 이것을 향하여 설치한 고정자측 자석의 자속 변화를 검출하는 경우의 릴럭턴스 방식과 자극을 회전 드럼에 착자해서 자기센서로 자속의 크기를 검출하는 자기 드럼식이 있다. 전자는 100~200pulse / 회전 정도의 저분해능의 것에 많이 사용되고 있다. 후자는 400~2500 pulse /회전의 것이 실용화되고 있으며, 고분해능화에 적합하다. 자기 엔코더는 다음에 다룰 광(光) 엔코더에 비교할 때 부품 수가 적어 소형화에 적합하고 주파수 특성이 양호한 특성이 있다. 그러나 강력한 외부 자계에 노출되면 오차를 일으키는 결점이 있기 때문에 보통은 자기 쉬일드(shield) 해서 사용된다. 자기 엔코더는 실용화된지 수 년 밖에 되지 않았으나 소형 DC서보 모터 및 VTR을 위시해서 응용되는 예가 급격히 증가하고 있다.

(나) 광 엔코더 : 광 엔코더는 최근의 광 전자 공학 기술의 발달에 의해 그 수요가 급격히 확대하고 있는 위치 및 속도 검출기이다. 이것은 램프 또는 발광 다이오드와 광전 소자, 그리고 빛을 투과하는 부분이 어떤 규칙성을 가지고 방사성으로 배열된 회전 원판과 고정판으로 구성된다. 축이 회전할 때 양자의 상대적인 관계 위치에 따라 빛의 명멸이 만들어지면 광전 소자가 빛을 받아 디지탈 신호로 변환하도록 되어있다. 이방법은 고정도이고 분해능, 속응성면에서 우수하다. 그러나 검출기에서의 신호가 미약하기 때문에 증폭, 파형정형을 필요로하는 점, 습도, 충격등과 같은 내환경성에서의 문제점등이 있지만 금후의 로타리 엔코더의 주류를 이룰 것으로 기대된다.

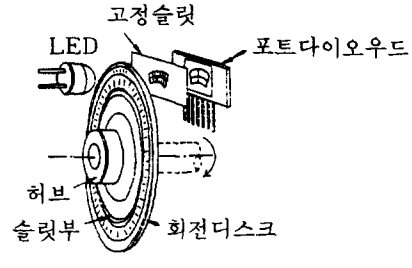

그림 5. 광 엔코더의 구성

5 교류 서보 모터

서보 모터에서 요구되는 기능으로서는 빠른 응답, 원활한 응답, 제어량의 정확성등을 요구하지만 교류 서보 모터는 이러한 요구에 대해서 제어의 곤란성, 복잡성 그리고 고가라는 이유등으로 적용이 지연되고 있었다. 그러나 파워 트랜지스터의 고성능화와 복합 모듈 및 신호 처리부의 LSI화가 가능해지고 고속 전류 벡터 제어가 행하여져서 교류 서보를 직류 서보와 동등한 성능으로 또한 가격도 같은 수준으로 하는

것이 가능해지고 있다.

직류 서보 모터는 브러시 및 정류자마모란 문제 때문에 정기적인 보수가 필요하며 보수가 어려운 위치에 장착하는 서보 모터에는 사용할 수가 없었다. 이러한 배경에서 근래에 와서는 여러 기업에서 교류 서보 모터의 개발히 활발히 이루어져서 일련의 교류 서보 모터가 개발되고 있다.

5.1 교류 서보 모터의 동작 원리 개요

교류 서보 모터는 모터의 구조와 그 제어 방식의 차이로 부터 영구 자석을 사용한 동기 전동기 방식의 서보 모터(SM형)와 유도 전동기 방식의 서보모터(IM형)등으로 분류된다. 유도 전동기 방식은 2상 서보 모터와 농형 유도 전동기의 벡터 제어 방식이 있으나 여기서는 동기 전동기 방식의 서보 모터만 다루기로 한다.

교류 서보 모터는 구조적인 면에서 볼때 고정자에 권선이 있고 회전자에는 영구 자석이 장착되어 있는 점이 직류서보 모터와 다른 점이다. 모터는 자계중에 직각으로 놓인 도체에 전류가 흐를 때 플레밍의 왼손 법칙에 따라 발생하는 힘에 의해서 회전하고 있다. 그러나 직류 서보 모터의 경우에는 회전자의 각 권선에 흐르는 전류를 항상 자계에 직교하도록 브러시는 자극 위치를 검출해서 정류자는 각 권선에 직교하는 전류를 분배하도록 동작을 하고 있다.

교류 서보 모터의 경우 브러시에 해당하는 것은 자극의 위치를 검출하는 검출기(FA용 서보 모터에서는 레졸버 또는 펄스 엔코더, OA용 서보 모터에서는 홀 소자)이고 정류자에 해당하는

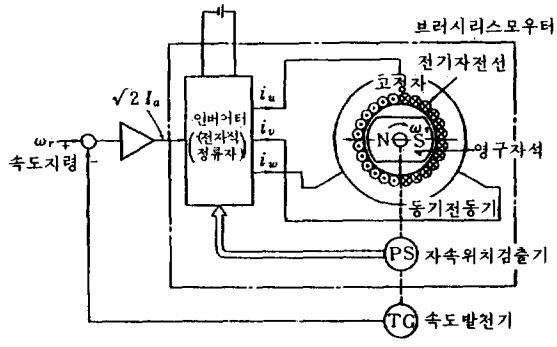

그림 6. 영구자석형 동기전동기(브러시리스) 모터의 구성도

것은 제어 장치의 트랜지스터 인버터 회로이다. 이 두 개의 장치와 동기 전동기를 조합한 것이 동기 전동기식 교류 서보 모터이고 동작은 직류 서보 모터와 같다. 영구 자석을 사용한 동기전동기식 교류 서보 모터의 원리적 구성도는 그림 6과 같다.

5.2 교류 서보 모터의 종류와 특징

동기 전동기(브러시리스 모터)는 원리적으로는 전기자 권선에 가해진 전압의 주파수에 동기해서 회전하므로 주파수 제어에 의해서 가변속 제어를 할 수 있다. 한편 유도 전동기는 1차 권선에 가한 전압의 주파수와 2차 권선에 유기한 전압의 주파수(슬립 주파수)와의 차주파수로 회전한다. 따라서 유도 전동기는 주파수 제어 또는 정주파수의 1차 전압 제어에 의해서 가변속 제어를 할 수 있다. 또한 주파수 제어인 경우에

표 2. 교류 서보 모터

모　　터	제어 방식	특　　징
동기 전동기	주파수 제어 (브러시리스 모터)	• DC모터처럼 고속 응답을 얻을 수 있음 • 중·소용량 서보에 사용됨
유도 전동기	주파수 제어 (벡터 제어)	• DC모터처럼 고속 응답을 얻을 수 있음 • 브러시리스 모터에 비해 제어가 복잡함 • 대용량 서보에 사용됨
	1차 전압 제어 (2상 서보 모터)	• DC모터에 비해 응답성이 떨어짐 • 저효율임, 소용량 서보에 사용)

는 전압 제어도 동시에 행한다.

5.3 교류 서보 제어 장치

5.3.1 FA용 교류 서보 제어장치

그림 7 은 FA용 교류 서보 제어장치의 제어 구성도를 보인 것이다. 그 구성은 속도 증폭기, 전류 분배 회로, 전류 증폭기, PWM 회로, 베이스 구동 회로, 컨버터 회로및 인버터 회로로 이루어 지고 있다.

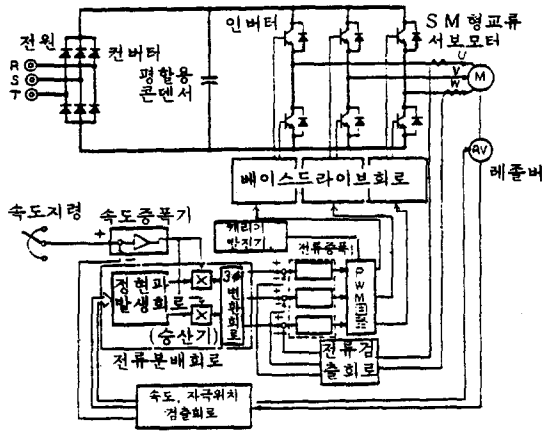

그림 7. FA용 교류 서보 제어장치의 구성도

교류 서보 모터는 회전 계자형 동기전동기이며 자계와 직교하는 위치에 있는 코일에 전류를 흘리어 전류에 비례하는 토오크를 발생시킬 필요가 있다. 그러므로 자극의 위치를 검출하기 위해서 펄스 엔코더나 레졸버등이 검출기로 사용된다.

속도 피이드 백 신호로는 펄스 엔코더인 경우 인크리멘탈 펄스를 F/V 변환하여 회전 속도에 비례하는 전압으로 변환해서 사용한다. 레졸버이면 회전자 위치에 따른 출력 파형이 나오는 관계로 이 파형을 미분해서 속도를 얻어 사용하고 있다.

전류 분배 회로는 전기자 전류를 모터의 유기 전압과 동상 또는 역상으로 흐르게 하기 위해서 자극 위치 신호를 이용하여 정현파 발생 회로에서 필요한 정현파를 내게한다. 이 정현파에 속도 증폭기의 출력을 승산(乘算)해서 그 결과를 3상 변환 회로에 넣어 각상 전류 지령으로서 $\mathrm{Sin}(p\theta)$, $\mathrm{Sin}(p\theta-2\pi/3)$, $\mathrm{Sin}(p\theta-4\pi/3)$ (p : 자극짝수)를 출력하고 있다.

전류 증폭기는 전류 지령값과 전류 피이드 백 값의 차를 증폭해서 PWM회로의 입력 신호로 하고 있다.

PWM회로는 전류 증폭기에서의 신호와 캐리어 발진기에서의 3각파를 비교해서 모터에 가해지는 전류가 정현파가 되도록 펄스 폭 변조 신호를 내고 있다. 파워 트랜지스터는 이 PWM 회로의 신호를 사용하여 베이스 구동 회로에서 스위칭되어 인버터부로서 동작하고 있다.

5.3.2 OA용 교류 서보 제어 장치

그림 7 은 OA용 교류 서보 제어 장치의 제어 구성도를 보인 것이다. 그 구성은 3각파 회로, 비교기, 위치 센서회로, 구동 로직 회로, 쵸퍼 회로 및 인버터 회로로 이루어지고 있다.

OA용 교류 서보 모터의 전원은 DC 24V이다. 모터에 가해주는 전압은 회전 속도에 비례하는 값으로 할 필요가 있다. 속도 지령치에 대해서 3각파회로에서의 파형을 결합시켜 비교기로 쵸퍼 회로의 트랜지스터를 구동해서 전압을 조정한다.

자극 위치는 홀 소자로 검출해서 위치 센서 회로와 구동 로직 회로에서 자계와 직교하는 위치에 있는 코일에 전류가 흐르도록 인버터의 트랜

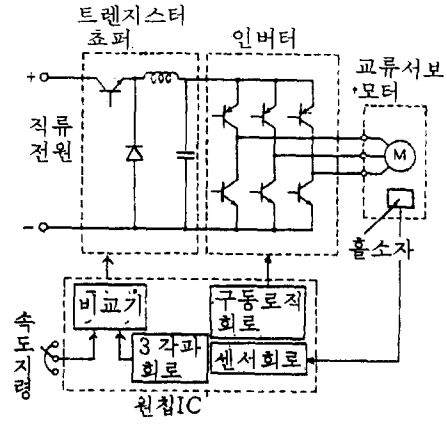

그림 8. OA용 교류 서보 제어장치의 구성도

지스터를 구동시킨다.

6 결 론

제어용 전동기중 서보 모터를 중심으로 그 현상과 기술의 일단을 다루었으나 금후 제어용 전동기와 그 제어 기술은 크게 발전할 것이며, 또한 연구 개발과 응용 분야의 확대도 더욱 활발히 전개될 것이다. 사회의 정보화라던지 산업 분야의 자동화가 계속됨에 따라 제어용 전동기의 의 수요도 점점 증가할 것이 예상된다.

본래 제어용 전동기는 장치의 외관에 그 모습을 들어내는 경우가 적으므로 생소한 독자도 많을 것으로 생각된다. 본문이 그러한 분들의 이해를 다소라도 돕는다면 다행으로 생각한다.

參 考 文 獻

1) 片岡照雄, "制御用小形電動機の 最近の動向"日本電氣學會雜誌, pp. 289－291. Vol . 106, No. 4 . 1986.

2) 長坂長彦. "新しい サーボ技術概説" サーボ技術實用マニコアル. pp. 1～13.トリケツプヌ. 1984.

3) 飯島和彦. "直流サーボ モータ"日本 電氣學會雜誌. pp. 276－279. Vol . 99, No. 4. 1979.

4) 吉田祐三. 村上尚德. "直流サーボ モータ" 日本電氣學會雜誌. pp.299－302. Vol . 106, No. 4. 1986.

5) 中野 純. "直流サーボ モータ,"高精度送リ回轉機構設計. pp. 1－19, トリケツプヌ. 1984

6) 須藤 二全. "信號檢出用回轉機"日本電氣學會雜誌. pp. 293－296. Vol . 99, No. 4, 1979.

7) 黒川 凱雄. "交流サーボ モータの 進步"日本電氣學會雜誌. pp. 292－295. Vol . 106, No. 4, 1986.

8) 見城 尚志. "AC サーボ モータとマイコン 制御" 總合電子出版社. 1985.

9) 舟久保 熙康. "制御用 アクチユエータ. 産業圖書. 1984.

10) 池田眞治. "交流サーボ モータ"日本電氣學會雜誌. pp. 280－283. Vol . 99, No. 4, 1979.

11) 宮下 邦雄. 高橋 正. "小形電動機用 センサ技術" 日本電氣學會雜誌, pp. 311－314, Vol . 106, No. 4, 1986.

12) Electro-craft Corporation, "DC Motors Speed Controls Servo Systems" Pergamon Press. 1977.