

제어용 교류 전동기의 기술동향

李 光 遠
(亞洲大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 서
 - 2. 제어용 전동기의 종류와 특징
 - 3. 교류 서어보의 제어
 - 3.1 제어기술 동향
 - 3.2 제어 원리
 - 4. 맺 음
- 참고문헌

① 서 론

제어용 전동기(servo motor)는 위치제어 또는 속도제어에 사용하는 전동기로서, 단순한 가변속도 운전을 벗어나 정밀한 제어를 하여야 하기 때문에 대개 폐루우프 제어(closed loop control) 방식으로 구동하는 전동기를 말한다. 이러한 제어용 전동기는 정밀한 제어를 필요로 하는 장치에는 어디에나 사용되므로, 최근 산업용이나 컴퓨터 주변기기용 등으로 수요가 증가하고 있어 우리나라 산업계에서도 이에 대한 관심이 높아지고 있으며^{1),2)} 학계에서도 이와 관련된 연구가 점점 활발해지고 있다.^{3)~7)}

제어용 전동기가 발전하게 된 배경으로는 첫째, 정밀기계공업과 자석재료의 개발 및 전동기 설계기술의 발전에 힘입어 전동기의 소형화가 가능하게 된 것과, 둘째, 전력전자공학 및 제어공학의 발전으로 까다로운 요구성능을 만족시킬 수 있는 제어방법이 개발된 것, 그리고 세째로 반도체 집적회로기술과 소형컴퓨터기술이 복잡한 제어 알고리즘들을 프로그램으로 쉽게 실현시킬 수 있게 하여 준 것 등을 손꼽을 수 있겠다.

대개 출력 100 W 이하의 전동기를 소형전동기라고 하는데, 제어용 전동기는 이와 같은 소용량의 것이 많다. 소형전동기는 제어용 이외에 소전

력용으로도 제작되어 소전력용은 가전제품과 자동차에 주로 사용된다. 가전제품에는 캐패시터 전동기, shaded pole 전동기와 같은 단상유도전동기나 정류자전동기를, 자동차에는 페라이트 영구자석 제자의 직류전동기를 많이 사용한다.

제어용 전동기 구동방식의 변천추이를 보면, 초기에는 전동기는 교류기를 사용하고 여기에 인가되는 전압만을 조절하는 효율이 상당히 나쁜 방식을 사용하였으나, 그 뒤 제어성능이 우수한 직류기의 전압제어로 발전하였다. 그러나, 직류기는 브러시와 정류자 때문에 신뢰성이 교류기보다 훨씬 떨어져 최근에는 신뢰성이 좋은 교류기를 다시 채택하고 있다. 종래에 교류기제어에서 문제가 되었던 효율의 저하는 전원의 주파수와 전동기 내의 자속을 제어하는 기술의 개발로 해결되었고, 또 복잡한 제어방법도 마이크로 컴퓨터 기술의 발달로 간단한 처리가 가능하게 되었다. 이와 같은 교류전동기의 제어 문제가 해결되면서 제어용 전동기에서 교류전동기의 비중이 점점 커지고 있는 추세이다.^{8)~10)}

② 제어용 전동기의 종류와 특징

제어용 전동기를 분류하면 크게 스텝(step)전동기, 직류전동기, 브러시리스(brushless)전동기, 유도전동기로 나눌 수 있는데, 전동기 권선단자에

인가되는 전압의 파형에 따라 직류기와 교류기로 구분하면 스텝전동기, 브러시리스전동기, 유도전동기는 모두 교류기에 해당된다.

스텝전동기는 이(齒) 사이의 자기저항변화를 이용한 것으로서, 개(開)루우프 제어만으로 미소각의 위치제어가 가능하며, 10 W이하 미소용량에 적합하다. 직류전동기는 제자를 영구자석으로 만들고, 5~300 W급의 비교적 넓은 용량범위에 적합하는데, 제어방법이 간단하고 제어성능이 우수하기 때문에 제어용 전동기로 가장 널리 사용된다. 직류기의 전기자를 컵(cup) 또는 원판(disc) 모양으로 철심없이(coreless) 제작하면 관성이 아주 작게 된다.^{14),15)}

브러시리스전동기는 원리상으로는 동기전동기지만 출력특성이 직류전동기와 같고 소용량은 직류전원과 인버터(inverter)로써 구동하기 때문에 직류 브러시리스전동기라고 많이 부른다. 브러시리스전동기는 직류기의 가장 큰 단점인 브러시와 정류자가 없기 때문에 유지보수가 간단하고 사용 환경에 대한 제약이 완화되어 점차 직류전동기를 대체하고 있다. 유도전동기는 구조상 가장 신뢰성이 높은 반면 제어방법은 가장 복잡한데, 소용량은 효율이 나빠서 kW급 이상의 대용량 고속용으로 적합하다. 다음 표는 제어용 전동기를 종류별로 비교한 것이다.

표 1. 제어용 전동기의 비교

	직 류 전 동 기	스 테 프 전 동 기	브 러 시 리 스 전 동 기	유 도 전 동 기
토 오 크 발 생	자속과 전류	자기저항 변화	자속과 전류	자속과 유도전류
전 류 (Commutation)	기 계 적	전원에서	전원에서	전원과 회전자
적 합 한 용 량 범 위	5~300 W	10 W 이하	100 W~3kW	2kW이상
특 징	간단한 제어 제어성능 우수	디지를 제어에 적합	직류기와 같은 성능으로 브러시 없음	고 신뢰성 복잡한 제어
주 용 도	로보트 전산기 주변기기 사무자동화 기기	사무자동화 기기 프린터 팩시밀	산업용로보트, VTR floppy disc drive 공작기계 이송용	공작기계 주축용

전동기의 성능을 평가하는 지수로서 전력용에서는 출력밀도와 효율이 중요하지만, 제어용에서는 이밖에도 응답속도를 고려하여야 하기 때문에 변속범위, 출력률밀도(power rate density), 기계적 시상수 등을 생각하여야 한다. 최근 제조되는 제어용 전동기의 변속범위는 1 : 1000 정도이며 기계적 시상수는 5~50 ms 정도, 출력밀도는 10~100 W/kg, 출력률밀도는 0.5~10 kW/s·kg 정도의 범위인데, 회로류 자석과 같이 강력한 영구자석을 사용하면 출력밀도와 출력률밀도를 몇 배 더 높일 수 있을 것이다.

그림 1은 영구자석을 사용한 전동기의 자석 위치를 비교한 것으로서, 직류기에서는 영구자석이 외부 고정자가 되고 브러시리스전동기에서는 대부분 영구자석이 내부 회전자가 되는 것을 그린 것이다. 직류기와 같은 구조에서는 영구자석의 자속을 계철(yoke)로 집중할 수 있기 때문에 저급 자석을 사용할 수 있는 장점이 있는 반면 자석의 체

적이 커져 중량이 증가한다. 한편 브러시리스구조의 회전계자형에서는 자속의 집중은 불가능하지만 자석의 체적이 감소하여 중량이 작아지고 전기자 slot면적이 넓어져 전기장하를 크게 할 수 있다.¹⁰⁾ 또 전기자가 외부 고정자이므로 냉각면에서 유리하다.

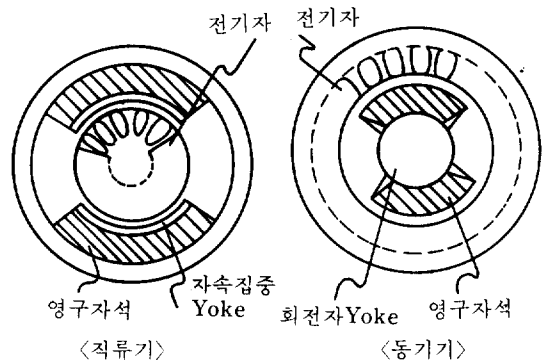


그림 1. 자석의 위치와 자속의 집중

3] 교류 서어보(servo)의 제어

3.1 제어기술 동향^{13),16),17)}

제어용 전동기 제어기술의 발전에서 두드러진 것은 마이크로프로세서의 고성능화와 응용기술의 발전으로 제어방법이 급속히 디지털(digital)화하고 있는 것과 전력전자공학의 발달로 교류전동기의 제어가 점점 넓게 실용화되면서 동시에 고성능화하고 있는 점이다.

디지털제어의 초기에는 전동기 제어회로에 digital hardware가 이용되었으나, 마이크로프로세서가 출현하면서부터는 우선 제어루우프 외부에서 전체적인 감시의 역할이 가능하게 되었고, 최근에는 마이크로프로세서의 연산범위가 제어루우프 내부로 점점 확대되면서 제어시스템 전체가 software화 되고 있다. 또 마이크로프로세서의 사용으로 현대제어이론의 적용도 손쉬워져서 최적제어, 비선형제어, 적응제어 등을 software로 시도할 수 있게 되었다.

위치와 속도의 정밀한 제어에는 전동기의 토오크를 증가시켜 감속기를 사용하지 없이 직결구동(direct drive)하는 방식을 택함으로써 감속기의 backlash를 없게 하며, 제어루우프도 그림 2와 같이 위상검출에 의한 동기화제어(phase locked loop)방식을 이용하여 안정성을 높인다. 회전위상의 검출에는 광학식 pulse encoder 또는 변조방식의 브러시리스 resolver를 사용하는데, 브러시리스 resolver가 분해능과 샘플링 시간 사이의 절충이 가능한 장점을 가지고 있다.¹⁸⁾

전동기에 전력을 직접 공급하는 전력변환기는 서어보 증폭기의 최후단에 연결된다. 전동기로의

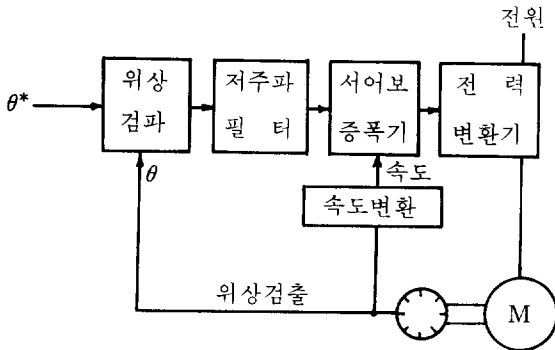


그림 2. 동기화 제어 루우프

입력이 작은 경우는 트랜지스터 linear amp.를 사용한 연속조절이 가장 간단하며 제어성능도 좋다. 그러나, 이 방법은 효율이 나쁘고 100 W 이상이면 방열도 어렵기 때문에, 용량이 큰 경우에는 switching amp.를 사용하여 펄스폭변조(PWM)를 한다.¹⁹⁾ PWM의 변조주파수는 높게 할 수록 제어시스템의 주파수 응답범위를 넓게 할 수 있어 좋으나, 스위칭 손실이 증가하는 문제점이 있어 보통 수 kHz 정도를 사용하는데, 최근에는 MOS FET의 개발로 초음파 범위에서의 스위칭도 가능하게 되었다. 교류전동기를 구동하려면 전동기의 회전속도에 맞추어 교류를 공급하여야 하므로 전력변환기가 인버터이어야 한다. 브러시리스전동기는 용량이 작은 편이기 때문에 트랜지스터인버터를 사용하며 유도전동기 구동에는 GTO 또는 thyristor인버터를 사용한다. 인버터의 제어방법으로서는 인버터의 앞단에 전류와 전압의 크기를 조절하기 위한 전력조절부를 별도로 두고 인버터로는 주파수에 맞추어 전동기 권선전류의 전류(轉流: commutation)만을 맡게 하는 방법과 인버터가 전력조절과 전류의 두 기능을 모두 갖게 하는 방법이 있다.

3.2 제어 원리

제어용 교류전동기는 미소용량의 스텝전동기를 제외하면 브러시리스전동기와 유도전동기이다. 브러시리스전동기와 유도전동기 모두 고정자 권선의 전류를 전류(轉流)하여 회전자장을 만들어 주어야 하는 것은 똑 같다. 그러나, 브러시리스전동기의 전류주파수는 회전속도와 완전히 동기되고 유도전동기에서는 슬립(slip)이 있는 차이점이 있다. 또, 용량의 차이 때문에 브러시리스전동기에서는 트랜지스터를 사용하므로 전류가 쉽고 유도기에서는 thyristor를 주로 사용하므로 전류가 어렵다.

토오크의 제어는 브러시리스전동기에서는 직류기에서와 똑같이 전기자전류의 기자력 축을 계자의 자축(직축)과 항상 전기적으로 90°가 되게 함으로써 기자력의 횡축분만을 만들어, 전기자전류가 자속에는 영향을 주지 않고 토오크만 변화하게 하는 방법을 사용한다.^{20),21)} 이때 회전계자의 자축을 알기 위하여 회전자의 위치 검출이 필요하다. 한편, 유도기에서는 1차전류의 직축분과 횡축분을 알기 위하여 벡터변환하는 방법²²⁾을 이용한다. 이러한 벡터변환에는 마이크로프로세서를 이용하며, 그림 3은 벡터변환의 원리를 나타낸 것이다. 전류

를 직축분과 횡축분으로 분해했을 때 직축분을 변화시키지 않고 횡축분만을 조절하면 직류기와 같은 원리로 토오크가 조절된다.

속도의 제어는 상기와 같이 직축-횡축분을 알게 되면 직축분 전류(자속)를 고정한 상태에서 횡축의 전압조절로 가능하다. 정격속도 이상의 속도를 내려면 직축분 전류를 변화시켜 약제자를 하면 되는데, 영구자석 전동기에서는 자석의 영구감자가 일어나지 않게 조심하여야 한다.

그림 4는 벡터변환을 이용한 유도기의 제어

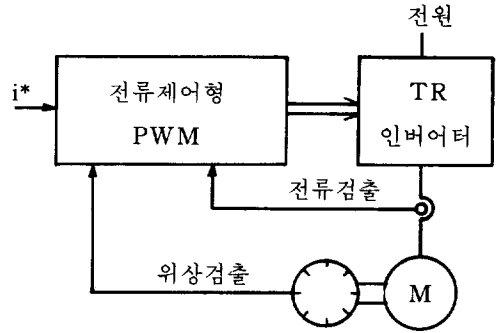


그림 5. 브러시리스 전동기의 전류제어형 PWM 구동

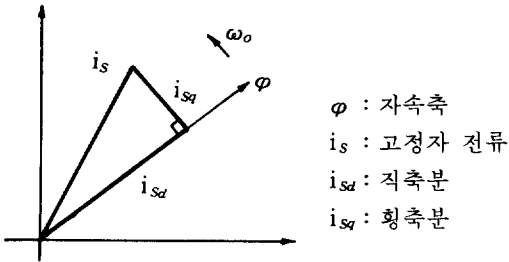


그림 3. 벡터변환

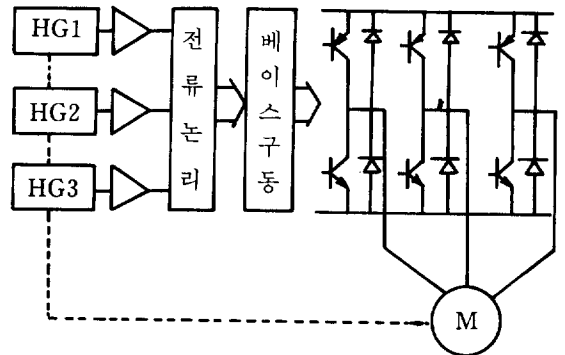


그림 6. Hall전동기 구동

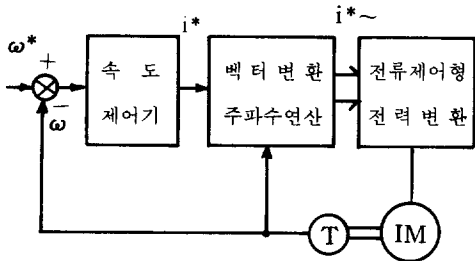


그림 4. 유도전동기의 벡터 제어

계통 개요도이며, 그림 5는 전류제어형 PWM을 이용한 브러시리스전동기의 제어계통 일부를 보이는 것이다. 그림 5에서 전류지령 i^* 는 통상의 feedback 제어로도 또 PLL제어로도 만들 수 있다. 위치제어를 하지 않는 브러시리스전동기는 전류(轉流)에 필요한 위상만을 알면되므로 회전자 위치검출에 Hall소자를 많이 사용하여 Hall전동기²⁴⁾라고도 하며, 그림 6과 같이 구성된다. 브러시리스전동기의 전기자 상수는 2상, 3상, 또는 그 이상으로도 할 수 있는데, 상수가 많아질 수록 토오크의 맥동이 적어지나 구동장치의 스위칭 소자수가 증가한다.

4 맺 음

브러시와 정류자가 없는 교류 서어보는 사용환경의 제약에서 벗어날 수 있어 공장 자동화용뿐만 아니라 사무자동화용이나 로봇 등에 점점 많이 이용될 전망이다. 앞으로의 연구방향은 내장형 (built-in type)·무보수(maintenance free)형의 개발과, 고성능영구자석 재료를 이용한 고성능화 및 이에 따른 직결구동화, 그리고 신호처리 기술과 제어이론을 이용한 센서 및 제어의 지능화일 것이다. 이 밖에도 여러가지 다른 원리를 이용한 새로운 형태의 전동기 출현도 기대된다.

제어용 전동기에 관한 외국의 활발한 연구개발 노력²⁵⁾에 비하여 우리나라 전동기 산업은 아직까지 전력용 전동기 위주였고 대학에서의 교육도 전력용 전동기의 원리에 관한 것이었다. 이것은 전력용 전동기가 산업용으로 기본적이고 필수적이기 때문이다. 그러나, 정보산업의 발전과 자동화의 추세에 따라 제어용 전동기의 이용과 보급이 격증

하고 있고 우리나라도 선진국 대열에 진입해야 할 단계에 있으므로, 첨단산업 분야인 제어용 전동기 기술에 대한 연구가 시급하다고 생각된다.

참고문헌

- 1) 박병길, "소형전동기 기술동향," 대한 전기 협회지, 86 호, 42-45, 1984.2.
- 2) 성기실, "소형모우터기술의 해외동향과 문제점," 전기학회지, 33(7), 406-411, 1984.
- 3) 고명삼 외, "교육용 로봇의 설계에 관한 연구," 전기학회논문지, 33(9), 327-339, 1984.
- 4) 고명삼, 김동일, "위상검파방식에 의한 ac servo motor 속도제어시스템의 구성에 관하여," 대한전기학회 1984년 하계학술회의 논문집, 63-65.
- 5) 윤병도, 정재륜, 김재학, "2 전원법에 의한 스텝모우터의 토오크향상에 관한 연구," 대한전기학회 전력전자연구회 1984년 추계 학술발표회 논문집, 22-23.
- 6) 윤병도, 정재륜, 안승목, "브러시리스 직류서어보전동기의 정형과 PWM인버터 제어시스템," 대한전기학회 전력전자연구회 1984년 추계 학술발표회 논문집, 24-25.
- 7) 배정열, 오창준, 박주성, "VTR서어보 위상제어용 집적회로의 설계 및 제작," 전자기술, 2(1), 17-24, 1984.9.
- 8) Murugesan, S., "An overview of electric motors for space applications," IEEE Trans., IECI-28(4), 260-265, 1981.
- 9) 原島文雄, 土手康彦, "制御用モータの技術動向," 機械設計, 27(3), 26-28, 1983.
- 10) 秋山勇治, "交流サーボモータの性能と特徴について," 日本電氣學會回轉機研究會資料, RM-82(53-65), 117-126, 1982.
- 11) 長坂長彦, "小形電動機の技術動向," 電機, 423號, 2-8, 1983.
- 12) 土手康彦, "制御用モータの種類とその特徴," 機械設計, 27(3), 29-34, 1983.
- 13) 吉男祐三, "小形モータ制御の動向," 電氣雜

- 誌OHM, 71(7), 49-55, 1984.
- 14) Mazurkiewicz, J., "Hollow-rotor low-inertia motors outrun iron-core motors but keep them cool," Electronic Design, 27(23), 66-68, Nov. 1979.
- 15) Morris, H.M., "Unusual motors for special designs," Control Engineering, vol. 26, 37-39, Apr. 1979.
- 16) 山男博, "最近のモータ制御技術の傾向," 自動化技術, 15(12), 26-30, 1983.
- 17) 原島文雄, 土手康彦, "小形精密サーボの最近の動向," システムと制御, 27(11), 679-686, 1983.
- 18) 長坂長彦, "ACサーボモータの現状と今後の展開," オートメーション, 28(3), 67-72, 1983.
- 19) Electro-Craft Corp., DC motors speed controls servo systems, 3rd ed., Pergamon Press, 1977.
- 20) Schumacher, W., "Microprocessor controlled ac servo drive." Conf. Rec. of Microelectronics and Electrical Drives, Germany 1982, 311-319.
- 21) Demerdash, N.A., Nehl, T.W., and Maslowski, E., "Dynamic modeling of brushless dc motors in electric propulsion and electromechanical actuation by digital techniques," Conf. Rec. of IEEE-IAS, USA 1980, 570-579.
- 22) Blaschke, F., "The principle of field orientation as applied to the new TRANSVEKTOR closed-loop control system for rotating-field machines," Siemens Review, vol. 34, 217-220, May 1972.
- 23) Wise, J.F.Jr. and Simons, F.O.Jr., "A brushless hall generator dc servo motor," IEEE Trans., IECI-21(2), 75-77, 1974.
- 24) 見城尚志, 永守重信, メカトロニクスのためのDCサーボモータ, 総合電子出版社, 1982.
- 25) 総合電子リサーチ, 精密小形モータ総合資料集, vol. 1, vol. 2, 1983.