

# 전동기 가변속 운전 기술의 변천

김남정, 유지윤\*

(\*특허청 심사4국 심사관, \*\*고려대 공대 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

약 100년의 역사를 지닌 전동기는 전기적 에너지를 기계적 동력으로 변환시켜 주는 장치로서 산업 분야 전반에서 널리 활용되고 있어 기존의 유압 및 공압 시스템에 의해서는 적용이 어려웠던 많은 응용 분야에도 점차 그 사용이 확산되고 있다. 이러한 전동기의 발달은 1821년 Arago의 실험과 Faraday의 전자 유도 법칙을 근간으로 1870년에 직류전동기(W.V. Siemens, Z. T. Gramme)가 발명되었고, 1880년대에는 동기 전동기와 유도 전동기가 발명되기에 이르렀다. 발명 당시에는 단순히 물리적인 관점에서 자연계 에너지에 대한 대체 가능성을 보여 주었으나, 점차 농업 중심 환경에서 공업 중심으로 사회가 변천함에 따라 전동기에 대한 설계 및 제작 기술의 성숙을 초래하였다. 1950년대에 이르러 전동기의 효율적 설계 및 특성 계산 등에 관해 체계적인 이론 확립의 시대를 맞게되고, 이로 인해 오늘날의 직류전동기, 동기 전동기 및 유도 전동기의 형태를 갖추게 되었다. 최근에는 사용 鋼板의 저손실화, 고무자유회화 및 컴퓨터에 의한 요소 설계 등을 통해 동풍, 냉각 방식 등을 고려한 새로운 구조의 회전기도 개발되어 각 분야에 응용되고 있다. 그림 1에서는 전동기의 응용 분야에 따른 종류 및 용량을 보여 주고 있다.[1-2]

직류전동기는 전기자 전압과 전류를 변화시켜 회전 속도와 토크를 자유자재로 조절할 수 있는 우수한 운전 특성을 지니고 있어 종래 가변속 운전이 필요한 전차, 철강 압연기 등의 분야에서는 주로 직류전동기가 사용되어 왔다. 그러나 정류자와 브러시가 정교한 기계적 접촉을 구성하고 있어 구조가 복잡하고 정류자 편간의 전압 제약으로 인하여 회전속도나 출력의 한계를 갖는 등의 문제점을 갖는다.[3-4]

한편, 직류전동기에 비하면 회전자 구조가 간단하고 관성을 작게 할 수 있는 장점을 지니고 있어 산업계로의 응용이 확대되고 있는 교류전동기는 초기에는 주로 상용 주파수에 의한 정속도 운전 분야(팬, 펌프 등)에 사용되어

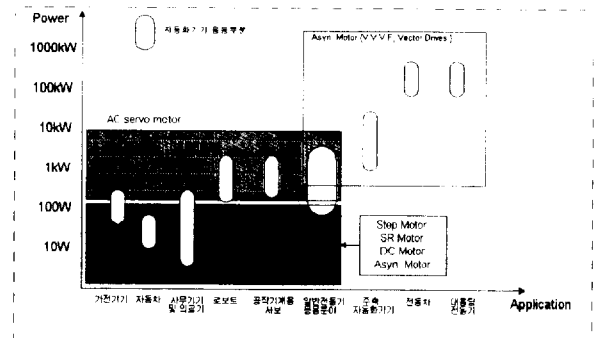


그림 1. 전동기의 응용 분야에 따른 종류와 용량

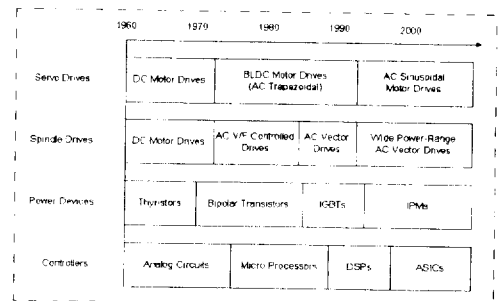


그림 2. 가변속 드라이브를 구성하는 전력용 반도체소자와 프로세서의 변천 추이

왔으나 1958년에 G.E사의 A. York에 의한 사이리스터 (Thyristor)의 발명을 시작으로 전력용 트랜지스터 (Power Transistor) 등의 반도체 소자의 발달과 마이크로 프로세서를 이용한 전력 변환 기술의 눈부신 발전에 힘입어 종래 직류전동기에 의해서는 구현이 어려웠던 대용량, 고속의 가변속 운전을 실현할 수 있게 하고 있다. 그림 2는 가변속 드라이브를 구성하는 전력용 반도체 소자와 프로세서의 변천 추이를 보여준다.

또한 1970년 초반에 제안된 벡터 제어 이론과 마이크로 프로세서의 급속한 진보로 교류전동기의 가변속 운전

로 프로세서의 급속한 진보로 교류전동기의 가변속 운전에 관한 기술 개발은 커다란 진보를 보이게 되었으며, 각종 산업 분야로 그 사용이 확산되어 현재 메카트로닉스 관련 전동기 가변속 시스템 시장의 90% 이상을 교류전동기가 점유하고 있는 실정이다. 이러한 교류전동기 가변속 운전 시스템은 전동기, 변환 장치, 제어장치, 센서 등의 구성 요소와 제어 기법의 기술적 조합에 의해 그 운전 성능이 결정되므로 응용 분야의 요구 조건과 경제성을 고려하여 최적한 시스템 설계가 이루어지도록 해야 한다.[5-6]

본 원고에서는 이들 전동기 가변속 운전 기술을 구성하고 있는 전력 변환 기술, 속도 제어 방식 및 제어 알고리즘에 대한 각각의 변천 과정과 기술 전망을 직류전동기와 교류전동기에서는 유도 전동기를 중심으로 속도 제어기술의 변천 및 기본개념을 살펴보고자 한다.

## 2. 가변속 구동을 위한 전력 변환 장치와 기술

1950년대까지 가변속 구동 시스템은 직류 발전기를 가변 직류 전원으로 한 워드 레오너드 방식이 주류를 이루었다. 1958년 사이리스터가 개발되면서부터 이를 이용한 정지 레오너드 방식이 개발되어 직류전동기를 대상으로 한 가변속 구동 시스템이 정착되었다. 이에 비해 교류전동기를 이용한 속도 제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어해야 하는 어려운 문제를 수반하고 있어 오랫동안 일정 속도 운전 분야에만 부분적으로 응용되는 실정이었다.

그 이후 ON, OFF가 자유로운 자기 소호형 소자, 프로세서 응용 기술, 제어 이론의 정립 등을 기반으로 “인버터”라는 전력 변환 장치의 개발로 전동기의 가변속 운전에 대한 관심은 새로운 국면을 맞게 되었다.

### 2.1 인버터[7-9]

인버터는 직류에서 교류로 전력을 변환시키는 장치를 말하며 수은 정류기 시대부터 주로 주파수 변환이나 직류 송전 등에 응용되었으나 사이리스터의 개발 이후에 그 실용화가 급속히 진전되었다. 아날로그 제어 시대를 거쳐 마이컴, LSI 등을 이용한 디지털 제어 기술의 진전과 자기 소호형 소자의 모듈화, 저가격화, 등에 힘입어 점점 소형화, 저가격화가 추진되어 현재에는 가정용 에어컨 등의 가전제품에도 인버터가 적용되고 있다. 이러한 인버터는 입력되는 등가 직류 전원에 따라 전압형과 전류형으로 분류되고 그림 3은 이들에 대한 기본 회로 구성을 나타낸다. 전압형 인버터는 입력 직류 전원이 전압원이고 출력 전압은 일정한 직류 전압을 소정의 PWM 패턴에 의해 잘라 낸 펄스열이 되며 이에 따른 전동기 전류는 그 전동기의 부하와 속도에 따라 결정된다.

한편, 전류형 인버터는 입력의 직류 전원이 전류원이

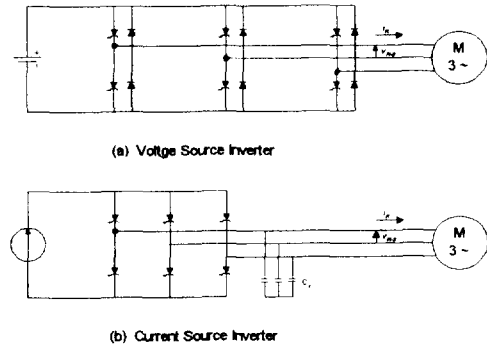


그림 3. 전압형, 전류형 인버터의 회로 구성

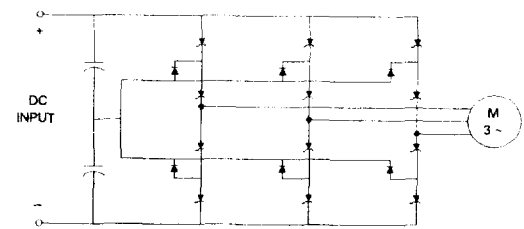


그림 4. 3-level 인버터

되고, 인버터 출력단의 전류는 일정한 직류 전류를 소정의 PWM 패턴에 따라 펄스열을 만들어 필터 콘덴서(C<sub>f</sub>)와 전동기의 누설 인덕턴스로 구성되는 필터에 의해 전동기에 입력되는 전류를 거의 정현파가 되도록 한다.

최근에는 인버터의 대용량화를 위하여 파워 소자의 직·병렬 접속 이외에도 그림 4와 같은 각종 다중 레벨 인버터가 연구 및 채택되고 있다.

### 2.2 PWM 제어 방식

교류전동기의 가변속 운전에 따른 만족스런 속도 및 토크 응답을 얻어내기 위해서는 전동기에 유입되는 전류가 정현파를 유지할 수 있도록 정밀한 전류 제어가 선행되어야 한다. 이를 위해 일반적으로 PWM 제어 방식을 적용하나 이에 따른 반도체 스위칭 소자의 스위칭 손실, 전압 이용률의 감소, 고조파 하모닉에 의한 EMI 발생 등 많은 문제점들이 초래된다. 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위해 약30년 전부터 다양한 PWM 방식들이 제시되어 왔으나 지금까지 상용화된 대부분의 범용 인버터에 적용해 온 SPWM 방식과 최근 각광을 받고 있는 공간 벡터 변조(SVM)방식에 대해서 소개한다.

#### 2.2.1 SPWM 방식[9]

그림5와 같이 인버터의 게이트 신호가 삼각 반송파와 변조 신호의 크기를 비교하여 얻어지는 SPWM은 구현이 비교적 간단하고 전압과 주파수가 가변되는 임의의 전압 파형을 얻을 수 있는 장점이 있어 널리 사용되고

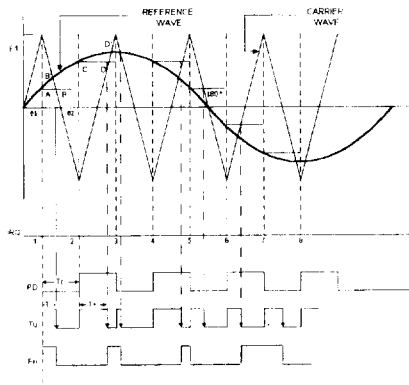


그림 5. PWM 발생 원리도

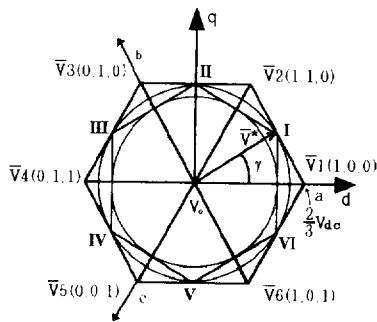


그림 6. 상태 공간 전압 벡터

있다. 그러나 반송파와 변조파의 주파수 비율이 15 이상일 경우에 고조파가 잘 억제되므로, 이를 위해서 상대적으로 많은 스위칭이 요구되고, 주파수 비율 P가 정수배가 아닐 경우, 출력 전압에 부하모노이 나타날 수 있는 단점을 지닌다. 따라서 정밀한 제어, 즉 주파수의 분해능을 높이기 위해서는 두 신호의 비동기 처리가 요구되나, 비동기 방식의 경우, 동기 방식에서는 나타나지 않는 반송파와 변조파간의 비트 현상이 발생하여 전동기 속도 제어시 전류 진동 및 소음 등을 발생시킨다.

그러므로 변조파가 변화하더라도 그 영향을 최소화 줄이기 위해 Optimized PWM 기법이 소개되었지만 스위칭 각을 찾기 위한 수치 해석 기법을 적용해야만 하고 과도 상태의 특성이 좋지 않아 그 사용이 대용량 GTO 인버터에 국한되어 사용되고 있다. SPWM 방식의 또 다른 단점으로는 인버터 출력 전압의 이용률이 구형파 인버터보다 상대적으로 14%정도 작다는 것이다. 이를 극복하기 위하여 고조파 주입에 의한 PWM 방식이 소개되었으나 이는 정현파에 3고조파를 부가하여 만들어진 새로운 변조파를 사용하여 기본파의 출력 전압을 증대시키는 방식으로 이 방식 역시 과변조시 동특성이 좋지 않게 된다.

### 2.2.2 공간 벡터 변조(SVM) 방식<sup>[10]</sup>

SVM 기법은 타기법에 비해 고조파 왜형률을 줄일 수 있고, 디지털 구현의 용이성과 선형 제어 영역을 증가시킬 수 있는 장점으로 인하여 점차 적용 범위가 확대되고 있는 추세이다. 하지만 기준치에 상응하는 PWM 패턴의 유지 시간을 산출하기 위하여 초월 함수 등의 복잡한 계산을 수행해야 하고, 추가적인 외부 회로를 필요로 하는 문제점도 가지고 있다. 고속 프로세서 및 스위칭 소자의 발달과 더불어 SVM 방식의 이러한 문제점들의 극복과 출력 전류 및 전압 특성을 더욱 향상시키기 위한 연구가 계속되고 있다. 3상 PWM 인버터에 있어서 공간 벡터 개념은 8개의 선택 가능한 스위칭 전압을 그림 6과 같이 두 개의 인접한 스위칭 상태 벡터와 그 스위칭 상태를 유지하는 시간을 나타내는 가중치와의 곱으로 표현한다. 전압 벡터의 합성은 시간에 대한 평균에 의해 실현할 수 있으므로 원하는 전압과 샘플링 시간( $T_s$ ), 인접한 두 개의 스위칭 벡터의 인가 시간( $T_1, T_2$ )과의 유기적인 결합으로 실현한다. 그림 6은 PWM 전압원 인버터의 스위칭 상태에 따른 상태 공간 전압 벡터를 나타낸다.

## 3. 전동기 가변속 제어 방식의 변천

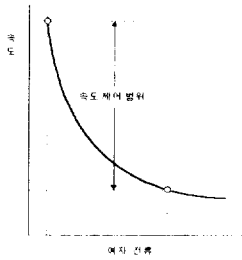
1950년대에 체계화된 고전 제어 이론을 기반으로 1970년대 초반에 트랜지스터와 IC 연산 증폭기를 사용한 아날로그식 제어기에 의해 전동기 구동 시스템이 본격적으로 상용화 되었다. 1970년대 후반에 접어들어 16 비트 마이크로 프로세서가 탑재된 디지털 제어기가 출현하면서 현대 제어 이론까지도 부분적으로 적용하여 드라이브의 고성능화와 콤팩트화에 연구의 관심이 고조되었다. 이를 토대로 초기의 직류전동기가 주류를 이루던 관련 산업 분야에서 벡터 제어 이론의 정립과 전력 변환 기술의 발달로 차츰 교류전동기를 이용한 가변속 운전기법이 널리 이용되게 되었다.

### 3.1 직류전동기

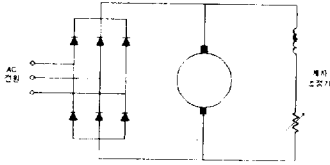
직류전동기의 속도를 제어하기 위해서는 전기자 전압을 일정하게 하고 여자 전류를 조정하는 방법과 계자를 일정하게 하고 전기자 전압을 변화시키는 방법이 있다. 이에 따른 발생 토크는 계자 자속과 전기자 전류의 곱에 비례하며 자속과 토크는 각각 독립적인 제어수행이 가능하다..

#### 3.1.1 계자 조정에 의한 제어 방법

분권 또는 복권 전동기에 있어서 계자 권선 회로에 저항기를 삽입하고 계자 전류를 조절하여 속도를 변환시키는 방법이다. 그림 7에는 계자 조정에 의한 직류전동기의 가변속 운전에 대한 제어 특성 및 제어 방식의 일례를 소개한다.



(a) 제어 특성



(b) 계자 제어 방식

그림 7. 계자 조정에 의한 직류전동기의 가변속 제어

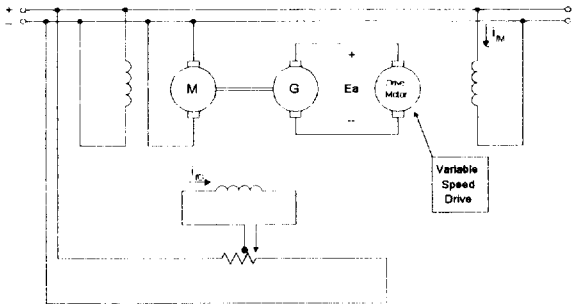


그림 8. 워드 레오나드 방식

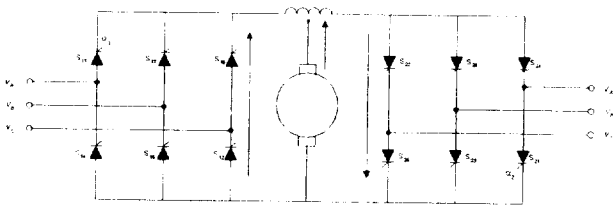


그림 9. 정지 레오나드 방식

3.1.2. 전기자 전압에 의한 제어 방법

타여자 계자를 일정하게 하고 전기자 전압을 변화시켜 영(零)에서 최고 속도까지 가변속 운전을 구현할 수 있는 방법이다. 그 중 가장 우수한 방법은 1890년에 개발된 시스템으로 그림 8과 같이 직류 발전기를 사용하여 그 계자를

제어하는 워드 레오나드 방식(Ward-Leonard System)이 있고, 그림 9와 같이 정류기를 이용하여 계자를 제어하는 정지 레오나드 방식(Static-Leonard System)이 있다.

3.2 교류전동기[11-13]

교류전동기는 직류전동기에 비해 정류에 대한 제약이 없고 회전자 구조가 간단하여 제작이 용이한 장점을 지니나, 유도전동기는 독립된 여자 권선이 없고 동기전동기는 전기자 반작용에 대한 영향이 크기 때문에 어느 것도 독립된 자속과 토크 제어는 어렵다는 단점을 갖는다. 1970년대부터 벡터 제어 기법의 등장과 전력 전자 기술 및 그림 10에 표시한 주변 기술의 발달로 교류전동기를 이용하여 직류전동기에 상응하는 운전 특성을 얻을 수 있게 되었다. 또한 최근에는 회전자의 위치 정보를 이용하지 않는 속도 센서리스 벡터 제어 기법이 활발히 연구되어 부분적으로 실용화 단계에 있다.

3.2.1 교류전동기의 정상 상태 제어

1960년대 후반 1차 주파수 제어 방식을 시작으로 개루프 방식인 전압/주파수(V/F) 일정 제어가 실현되고 그 후 폐루프 방식을 도입함으로써 슬립 주파수 제어 등을 실현하여 운전 특성을 개선하였다. 그림 11은 슬립 주파수 제어에 대한 블록도를 표시한 것이다. 그러나 이러한 방식들은 교류전동기의 정상 상태 방정식으로부터 계산되는 평균치 입력에 의해서 제어가 이루어지므로 과도 상태 특성은 고려되지 않아 안정성, 시동 및 저속 토크 응답 등의 동적 성능에 대해서는 순시치로 제어하는 직류전동기의 성능을 따라 갈 수가 없었다.

3.2.2 교류전동기의 벡터 제어

Field Oriented Control이라고도 불리는 벡터 제어는 자속 벡터의 방향을 기준 좌표로 하여 전동기 전류 벡터의 크기와 방향을 순시 제어할 수 있는 교류전동기 제어 기법으로 독일의 K. Hasse가 1968년에 발표하였고, 1971년에 F. Blasechke에 의해 더욱 구체적으로 정립되었다. 그림 12는 유도 전동기의 벡터 제어와 좌표 변환 이론을 적용시킨 일례이다.

1969년 K.Hasse의 발명 이후 20여년 동안 벡터 제어 기술의 실현을 위한 하드웨어에 관한 연구는 계속되고 있으며, 압연기, 공작 기계, 철강 및 서보 모터 등 정밀 제어가 요구되는 장소에 확대 적용되고 있다. 그러나 기술적으로 고도성을 지닌 벡터 제어 기법을 제품화하기 위해서는 직류전동기의 경우에 비해 성능과 가격의 양면에서 다음 사항들이 계속해서 고려되어야 한다.

- a) 벡터 제어 이론의 충분한 이해와 응용력 향상
- b) 기준 좌표가 되는 자속 벡터의 직접, 간접적 검출 방법
- c) 복잡한 연산을 고속 처리할 수 있는 제어 장치
- d) 정현파에 가까운 출력을 갖는 전력 변환 장치의 실현

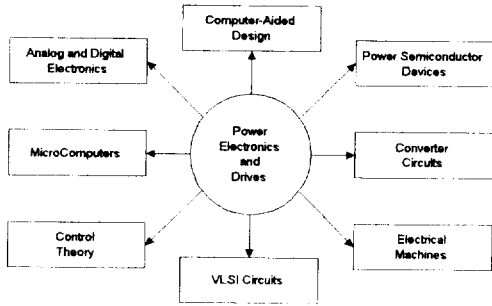


그림 10. 전력 전자와 주변 기술

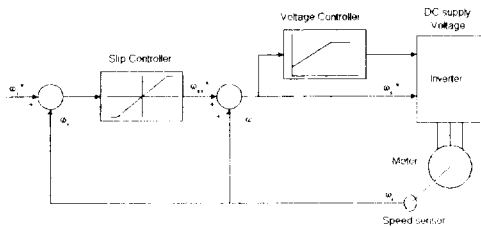


그림 11. 슬립 주파수 제어

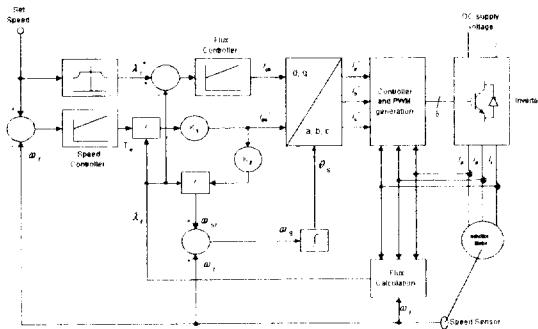


그림 12. 유도 전동기의 벡터 제어

3.2.3 센서리스 벡터 제어[14-16]

교류전동기의 가변속 운전 시스템은 양과 질이 모두 확대되고 있지만, 벡터 제어 유도전동기에서는 속도 검출기가, 브러시리스 DC 모터에 대해서는 위치 검출기가 불가결한 요소이다. 이들 센서는 가격이 비싸고 전동기 사이즈를 크게 하는 등의 문제를 가지고 있으며, 응용 영역의 확대와 함께 새로운 문제들을 발생하고 있다. 따라서 이와 같은 센서 사용상의 한계점을 극복하기 위해 속도 센서의 정보 대신 적합한 알고리즘에 의해 추정된 속도를 제어에 사용함으로써 고분해능과 속도의 가변 범위에 제한을 받지 않는 속도 정보를 얻기 위한 연구가 이루어져 왔으며 주로 1980년대 후반에 들어 본격적으로

시작된 것들로서, 그 내용을 보면 크게 두 가지 연구 방향으로 나눌 수 있다. 그 중 하나는 자속의 미분과 슬립식을 이용한 연산법이고 다른 하나는 적응 제어를 통한 추정법이다. 전자의 방법으로는 1989년 Ohtany가 속도 연산법을 사용하고 전압 모델과 기준 자속값으로부터 파라미터의 변화에 둔감한 자속 추정기를 설계하여 속도를 추정하였으나, 저속에서 기준 자속값을 사용함으로써 과도 응답 특성을 보장할 수 없고, 후자의 대표적인 방법으로는 1989년 Schauder가 MRAC를 이용한 속도 추정 방법을 발표했으나 이 방법 역시 저속 운전에 대한 신뢰성을 보장할 수 없는 단점을 갖는다. 이들 센서리스 시스템의 일반적인 보급을 실현하기 위해서는 가변속비의 확대, 저속도에서의 속도 안정성, 백터 제어에서 문제가 되는 파라미터 변동에 대한 대응책에 문제가 남아 있다.

4. 최신 제어 알고리즘의 응용

최근 전동기 상수 변동이나 부하 토크 외란에 대하여 강한 응답 특성을 얻기 위하여 고전적인 제어 이론을 대신하여 현대 제어 이론인 가변 구조, 적응 제어, 퍼지 및 뉴럴 네트워크, 비선형 제어 이론 등을 응용하여 시스템 제어 입력을 결정하거나 파라미터를 추정하는 방식에 관한 연구가 진행되고 있다.

4.1 가변 구조 제어 기법[17-18]

강인성을 고려한 비선형 제어 방식으로서 가변 구조계의 이론을 이용한 슬라이딩 모드 제어 방식이 최근 주목을 받고 있으며 실제 전동기 속도 및 위치 제어 시스템에 적용한 논문이 다수 발표되고 있다. 이 이론은 제어 대상의 상태에 따라서 제어기 이득을 스위칭시켜 상태 공간상에 설정한 스위칭 평면 근방에 상태를 구속하면서 목표값에 도달시키는 제어 방식인데 상태 궤적이 이 평면상으로 향하도록 제어 입력이 주어진다면 이때의 시스템 동작은 설정된 스위칭 평면에 전적으로 지배되므로 원래의 시스템과는 무관하게 되며 파라미터 변동이나 시스템의 비선형성 그리고 제어 입력의 영역내로 한정된 외란에 거의 둔감한 특성을 갖는다. 그러나 이러한 가변 구조 제어 시스템의 문제점은 도달 시간(Reaching Phase)동안의 강인성이 상실되어 가변 구조계의 장점을 얻을 수 없게 되므로 이 기간을 가능한 한 감소시키거나 제거할 필요가 있다. 이를 위한 연구로서 최근 비선형 슬라이딩 커브 등과 같은 새로운 스위칭 평면이 제시되어 실제 시스템에의 적용이 확대되고 있다.

4.2 적응 제어 기법[19]

고성능 가변속 운전에는 적용되는 PWM 방식은 불연속 전류로 인한 모델화되지 않기 때문에 제어 시스템 구성

시 상당히 큰 문제를 발생시킬 수 있으므로 이러한 불확실성을 고려하여 전체 제어 시스템의 안정성을 유지할 수 있도록 하는 견실한 적응 제어 기법에 대한 연구가 오랜 기간 동안 매우 다양한 구조와 형식으로 전개되어 왔다. 적응 제어 알고리즘은 크게 매개 변수 추정 부분과 제어 구조에 따른 제어 입력을 결정하는 부분으로 나눌 수 있다. 그리고 적응 제어 시스템의 분석에는 이론의 비선형 성질 때문에 어떤 일관된 해석 방법이 존재하지 않으며 적용하려는 시스템의 상황에 따라 적절한 방법을 사용하여 해석해야 한다. 지금까지의 대부분의 적응 제어 알고리즘은 모델화되지 않은 동특성이 존재할 때 전체 적응 제어 시스템의 안정성 향상에는 많은 관심이 집중되었으나 실제적으로 매우 중요한 적응 제어 시스템의 성능 향상이라는 측면은 등한시하여 왔다. 따라서 향후 전동기를 근간으로 하는 자동화 시스템의 불확실성에 대한 견실성을 향상시키고 동시에 제어 시스템의 성능도 동시에 개선할 수 있는 견실한 적응 제어 알고리즘을 개발하여야 할 것이다.

#### 4.3 퍼지 및 뉴럴 네트워크 제어 기법[20-21]

드라이브 제어 장치에 요구되는 제어 성능은 보다 더 다양화되고 있으며 이에 따라 제어 대상의 파라미터 변동이나 외란 등의 변동에 견실한 제어 성능을 갖는 가변속 드라이브가 요구되고 있다. 따라서 이러한 요구를 수용하기 위해 퍼지나 뉴럴 네트워크 제어 방식을 응용하여 제어 특성을 자동으로 조정하는 방식이 많이 연구되고 있다.

퍼지 논리 제어 기법은 1965년 Zadeh에 의해 개발된 퍼지 이론의 중요한 응용 분야로서 시스템 오퍼레이터의 언어적으로 표현될 수 있는 경험적 제어 규칙을 정량적으로 변환하여 직접적으로 제어에 적용하는 방식이다. 이 기법의 기본 구성 요소는 언어적 제어 규칙과 추론 엔진(Inference Engine) 및 이를 실현하기 위한 퍼지 알고리즘이다. 이 중 제어 규칙과 퍼지 알고리즘에 사용되는 귀속 함수(Membership Function)는 제어기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소이지만, 현재까지의 연구 결과에 의하면 가장 적합한 제어 규칙 및 귀속 함수는 전문가의 지식으로부터 시행 착오를 거쳐서 결정하게 된다. 이러한 퍼지 제어 방식은 제어계의 파라미터에 관계없이 입력을 결정하기 때문에 그와 외란의 변동과 비선형성에 영향을 받지 않으며 미지의 플랜트에 대해 제어가 가능하다는 장점이 있다.

뉴럴 네트워크의 경우 제어 응답을 뉴럴 네트워크에 가하였을 때 그로부터의 출력으로부터 얻어지는 제어 이득의 관계에서 전체 제어기를 학습시킬 수 있으며 또한 학습은 제어 응답과 제어 이득의 대응 관계만으로 이루어지기 때문에 퍼지 논리 제어 기법에서와 같이 제어 규칙과 귀속 함수 등의 과정이 불필요하다는 장점이 있다. 근래에 들어서는 뉴럴 네트워크를 통하여 제어기를 설계할

뿐만 아니라 파라미터와 회전자 속도에 대한 정보를 뉴럴 네트워크를 이용한 추정기나 관측기를 설계하여 획득하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

#### 4.4 비선형 제어 기법[22-23]

지난 수년간 복잡한 비선형 시스템을 제어하기 위한 방법으로 미분 기하학적인 제어 이론을 이용한 궤환 선형화 기법이 주목을 받아 왔다. 궤환 선형화 기법은 비선형 좌표 변환과 비선형 궤환을 이용하여 시스템의 비선형성을 제거함으로써 비선형 시스템을 선형 시스템으로 변환하여 이에 선형 제어 이론을 적용하는 것을 뜻하여, 이에 는 출력 함수를 고려하지 않고 전 상태 방정식을 선형화 하는 상태 공간 선형화(State-space Linearization)와 입출력 관계를 선형적으로 만드는 입출력 선형화(Input-output Linearization)가 있다. 이러한 궤환 선형화 기법은 동작점에서 Taylor 급수로 전개하여 고차항을 무시하는 기존의 선형 근사화(Linearization Approximation)기법과는 달리 비선형 시스템을 동작점에 관계없이 균일하게, 원하는 선형 과도 응답을 갖도록 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. 유도전동기의 경우도 비선형 동특성을 가지고 있어 고성능 제어를 실현하기 위해서는 자기 포화나 자기저항 변화와 같은 비선형 요소의 영향을 고려하여 전동기의 자속과 인버터로 공급되는 전류를 제한된 값으로 유지하면서 주어진 궤적을 따라 전동기의 출력 토크를 전달하도록 제어 시스템을 구성하여야 한다. 더불어 선형적으로 모델을 변환함으로써 선형 제어 이론의 적용과 안정도에 대한 해석이 용이한 장점을 지니고 있다. 그러나 유도전동기 속도 제어 시스템에 비선형 제어 이론을 적용하기 위해서는 기본적으로 모델의 동특성을 정확히 알고 있다고 가정해야 한다. 즉 모델에 대한 파라미터의 비선형적인 변동을 모두 고려하여 선형화를 시켜야 고성능의 가변속 제어를 실현할 수 있다는 단점이 있다. 이는 현실적으로 상당히 어려운 일이나 근래에 많은 파라미터 추정 방법과 모델의 정확성으로 그 한계를 극복할 수 있다.

#### 4.5 상태(State) 및 파라미터의 관측을 통한 진동 억제

가변속 제어를 위한 여러 가지 제어 방식에서 그 성능 및 실현과 직접적으로 연관되는 것이 바로 원하는 상태의 실제 측정과 실제 측정시 노이즈의 제거이다. 이러한 두 가지 문제점을 해결할 수 있는 것이 관측기이다. 관측기를 통하여 실제 측정할 수 없는 상태(State)를 관측하여 제어에 직접 사용할 수도 있으며 측정할 수 있는 상태(State)를 실제 측정하는 것보다 훨씬 노이즈가 작다는 장점이 있다. 따라서 실제 측정할 수 있는 상태(State) 역시 관측기를 통하여 그 값을 얻어 제어에 사용하기도 한다. 더불어 부하 토

크를 관측하거나 기계 구동계에 기계 상수 등을 추정하고 보상함으로써 가변속 제어의 성능을 한층 높일 수 있다.

## 5. 결 론

지금까지 전동기의 가변속 운전 시스템을 구성하고 있는 전력 변환 장치와 속도 제어 방법, 가변속 운전에 응용되고 있는 몇 종류의 현대 제어 이론에 대하여 기본 개념 및 변천 과정을 검토하였다. 산업이 신장하고 생활이 향상되면서 필연적으로 에너지 절약과 제품의 생산 단가를 낮추기 위한 고효율 가변속 구동 시스템과 운전을 편리하게 하고 정밀성을 향상시키기 위한 고기능의 가변속 구동 시스템에 대한 개발이 요구되고 있다. 가변속 운전 시스템은 전술한 바와 같이 그 응용 범위가 비약적으로 확대되어 종래에는 없었던 새로운 기술 분야가 부과됨에 따라 과거의 전동기 운전 기술을 토대로 하여 전동기와 그것을 제어하는 전력 변환기 성능 향상만이 아니라 센서, 제어 이론, 마이크로 프로세서의 유기적인 결합이 필요하다. 또한, 인텔리전트 파워 스위칭 소자 개발과 직접 기술의 진보는 구동 시스템간의 통신 기술과 더불어 자율 적응 능력을 가진 전동기 가변속 구동 시스템으로 발전해 나갈 수 있으리라 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] "최근 FA 서보 드라이브 기술", 자동화 기술, 1991, 12월호.
- [2] "AC 서보모터와 마이컴 기술", 동일출판사, 1994.
- [3] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, 1986.
- [4] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery, McGraw-Hill, 1991.
- [5] Bimal K. Bose, "Technology Trends in Microcomputer Control of Electrical Machines." IEEE Trans. 2nd Electron, vol. 35, no. 1, pp. 160-177.
- [6] B. K. Bose, "Adjustable speed, AC drives-A technology status review", proc IEEE, vol. 70, pp. 116-135.
- [7] L. Malesani and P. Teni, "A Novel hysteresis Control Method for Current-Controlled VSI PWM Inverters with constant Modulation Frequency", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 851-855, 1987.
- [8] A. B. Plunkett, "A Current-Controlled PWM Transistor Inverter Drive", in Conf. Rec., 1979 14th Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 785-792.
- [9] S. C. Peak and A. B. Plunkett, "Transistorized PWM Inverter Induction Motor drive System", in Conf. Rec. 1982 17th Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 892-898.
- [10] H. W. Van der Broeck and H. C. Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Trans on Ind. Appl., vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 1988.
- [11] G. Pfaff, A. Weschta and A. Wick, "Design and Experimental Results of a Brushless AC Servo-drive",

Conf. Rec. of IEEE/IAS Annu. Meet., pp. 692-697, 1983.

- [12] F. Harashima et. al., "High Performance Torque Control of Induction Motor by Speed Sensorless vector Control", KACC, pp. 1410-1414, 1990.
- [13] S. Sangwangwanich and S. Okuma, "A Unified Approach to Speed and Parameter Identification of Induction Motor", IECON, pp. 712-715, 1991.
- [14] H. Tajima and Y. Hori, "Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine", IAS, pp. 385-391, 1991.
- [15] S. Sangwangwanich, "Generalized Controllers for Induction Motor Drive System", PCC-Youkohama, pp. 450-455, 1993.
- [16] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector control of Induction Motors without rotational transducers", IEEE IAS, pp.493-499, 1989.
- [17] V. I. Utkin, Sliding Mode and Their Application in Variable Structure System, Moscow, Soviet Union, MIR Publishers, 1978.
- [18] U. Itkis, Control Systems of Variable Structure, Wiley, 1976.
- [19] Kioshi, "Robust Temperature Control of Thermostatic Oven based on Adaptive and Fuzzy Algorithm", IEEE, 1989.
- [20] P. J. King and E. H. Mamdani, "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes". Automatica, vol. 13, pp. 235-242, 1976.
- [21] Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithm for Servo Systems", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 65-72, 1989.
- [22] C. I. Byrnes and A. Isidori, "Global Feedback Stabilization of Nonlinear Systems", Proc. Conf. on DCD, pp. 1031-1037, 1985.
- [23] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, Springer-Verlag, Berlin, Hidelberg, 1989.

## 저 자 소 개



**김남정(金南正)**

1957년 4월 17일생. 1987년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1989년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 고려대 강사 및 특허청 심사4국 심사관.



**유지윤(柳志潤)**

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다대학 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1991년 창원대 공대 전기공학과 조교수, 현재 고려대 공대 전기공학과 교수.