

산업 자동화와 전력전자

현재 거의 모든 산업 분야에서 인건비 절감 및 생산성 향상을 목적으로 자동화가 폭 넓게 이루어지고 있다. 자동화 시스템이란 인간의 노동력을 대신 하는 기계라는 간단한 개념으로 시작되었다고 볼 수 있으나 근래에 와서는 여러 분야의 공학 기술들이 접목되어 보다 정밀하고 지능적인 일을 할 수 있는 복합적인 시스템이라는 개념으로 점점 발전해 나가고 있다. 특히, 최근 들어 반도체, 컴퓨터와 같은 전자공학 분야의 기술 발전은 산업 자동화 분야에도 큰 영향을 미치게 되었으며 기계와 전자공학 기술이 합쳐진 기전(機電, Mechatronics)란 새로운 공학 분야를 만들어 내기도 하였다. 이와 같이 오늘날 산업 자동화 분야에 있어서 전자공학 기술은 가장 핵심적인 위치를 차지하고 있으며 자동화 기술의 발전 역시 전자공학 분야의 기술 발전에 의해 주도된다고 볼 수 있다. 일반적으로 산업 자동화와 관련된 전자공학 분야의 기술을 민수용 전자기술과 구분하여 산업전자 기술이라 부르며 신호처리, 반도체, 컴퓨터, 제어계측 시스템 기술 등 그 영역을 구분할 수 없을 정도로 매우 광범위하다. 그 중에서도 전력전자(Power Electronics) 기술은 산업전자 기술을 대표하는 중요한 기술로 인식되고 있으며 근래에 와서 산업 자동화의 급속한 확산과 더불어 큰 관심을 끌고 있다.

1950년대 후반 사이리스터(Thyristor)의 개발로부터 시작된 전력전자 기술은 1970년대 이후 반도체 기술의 눈부신 발전과 더불어 성장을 거듭해 왔으며 현재 전기 및 전자 공학의 한 분야로 큰 자리를 차지하고 있다. 전력전자는 고체 전자 소자(Solid state electronic device)를 이용한 에너지 변환 및 이와 관련된 공학 기술로 정의 될 수 있으며 전력 변환(Electric power conversion)과 전동기 구동 및 제어(Electric drives and control) 등의 응용 분야가 있다. 따라서, 로봇, 공작기계 등의 소형 자동화 시스템에서부터 압연 시스템, 물류 자동화 시스템, 전력 제어 시스템 등의 대형 시스템

鄭世教, 尹明重
韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

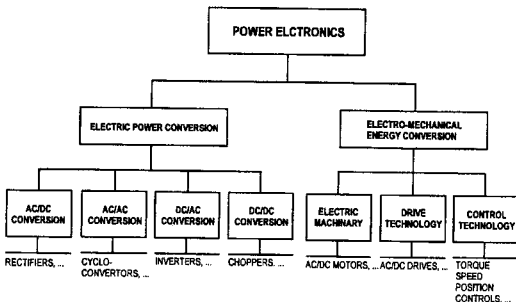
에 이르기까지 대부분의 자동화 시스템에 폭넓게 적용되고 있다. 전력전자 기술은 전기 기기, 반도체, 전기 회로 및 시스템 제어 등 여러 분야의 기술들이 합쳐진 복합적인 시스템 공학이라 할 수 있으며 각 분야의 기술 발전과 더불어 급속히 발전해 나가고 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 배경을 가진 전력전자 기술의 기본 개념 및 구성 요소, 산업 자동화 시스템에의 응용, 그리고 향후 발전 방향에 대해 이야기 하고자 한다.

II. 전력전자 기술과 산업 자동화 시스템

앞서 이야기 한 바와 같이 전력전자 기술은 전력용 반도체를 이용한 전기 에너지의 변환 및 제어 기술이라고 정의 할 수 있다. 여기서, 에너지의 변환이란 전압 및 주파수 변환과 같이 전기 에너지의 상태 변환과 전동기 구동 시스템과 같이 전기 에너지를 기계적인 에너지와 같이 다른 형태의 에너지로 변환하는 것을 포함하여 생각 할 수 있다. 일반적으로 전자를 전력변환(Electric power conversion)이라고 하며 후자를 전기/기계 에너지 변환(Electro-mechanical energy conversion)이라 부른다. 이러한 관점에서 전력전자 기술을 크게 두 그룹으로 분류 할 수 있으며 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

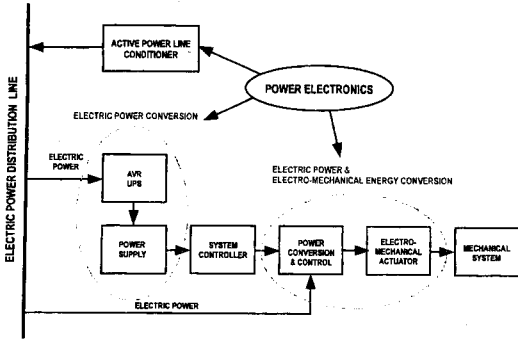
시스템과 같이 고 신뢰성이 요구되는 시스템에 있어서 안정된 전원의 공급은 필수적이며 전력변환 기술은 이를 위하여 자동화 시스템에 있어서 반드시 필요한 기술이라고 할 수 있다. 시스템의 안정된 전원 공급을 위한 자동 전압 조정기(Automatic voltage regulator; AVR), 무 정전 전원 장치(Uninterruptible power supply; UPS), 직류 전원 장치 등의 직접적인 전원 시스템을 비롯하여 전력 공급 시스템의 효율적인 제어를 위한 Flexible AC transmission system(FACTS), 무효 전력 보상기(Static VAR compensator), 능동 전력 필터(Active power filter)등이 산업 자동화 분야에서 전력변환 기술의 응용 분야라고 할 수 있다. 근래에 와서 자동화 분야 뿐만 아니라 여러 산업 분야에서 청정 에너지로서 전기 에너지의 수요가 급증하고 있으며 이에 따라 전원의 안정화 및 전력 공급 효율의 극대화가 절실히 요구되고 있어 전력변환 기술은 산업전자 분야를 대표하는 기술로 각광받고 있다.

한편, 전기/기계 에너지 변환 시스템은 산업 자동화 시스템의 구동 및 제어를 위해 필수적인 요소이다. 산업 자동화 시스템에 사용되는 전기-기계 에너지 변환 시스템은 전동기를 비롯하여 유압 시스템 제어를 위해 사용되는 전자기 액츄에이터 등 여러 가지 형태가 있으나 대부분 전동기에 의해 주도되고 있으므로 일반적으로 이 분야의 기술을 산업용 전동기 구동 및 제어(Industrial drives and control) 기술이라고 이야기한다. 이 분야에 관련된 기술은 전동기 설계 기술 및 위상 제어 정류기(Phase controlled rectifier), 인버터(Inverter), 사이클로 컨버터(Cycloconverter) 등의 전동기 구동을 위한 전력변환 시스템, 그리고 로봇, 수치 제어 공작기계와 같은 고 정밀 자동화 시스템의 구동 및 제어를 위한 전기 서보 시스템(Electric servo system)기술 등을 들 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 전동기 구동 및 제어 기술은 전기 기기, 전동기 구동용 전력변환 시스템, 제어 시스템 등이 복합된 종합적인 시스템 기술이며 최근 들어 고성능 전동기 및 구동 시스템 개발, 고속 디지털 프로세서의 적용에 의한 제어 기술의 향상 등 다 방면



(그림 1) 전력전자 기술의 분류

전력변환 기술은 전원 기술로 대표될 수 있으며 이를 위한 교류/직류, 교류/교류, 직류/교류, 직류/직류 변환 기술 등을 들 수 있다. 산업 자동화 시



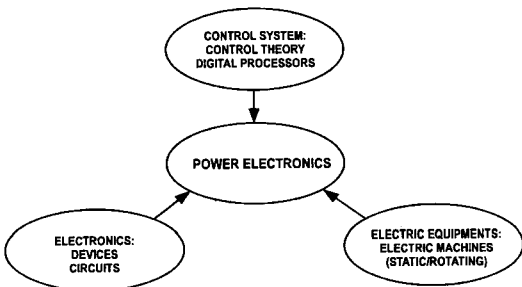
(그림 2) 산업 자동화 시스템에서 전력전자 기술이 응용 예

으로 발전해 나가고 있다.

이와 같이 전력전자 기술은 에너지 변환 기술로서 자동화의 근본 개념과 맥을 같이 하며 전원 및 구동 부분에 있어서 핵심적인 요소 기술이라고 할 수 있다. 그림 2는 산업 자동화 시스템의 구성에 있어서 전력전자 기술이 응용되는 한 예를 나타내고 있다.

III. 전력전자 기술의 구성요소

그림 3과 같이 전력전자 기술은 전자 소자 및 회로, 전기 기기, 제어 시스템 기술이 서로 유기적인 관계를 이루어 구성되어 있다고 할 수 있다. 여기서, 전자 소자 기술은 전력용 반도체 기술을 말하며 회로 기술은 효과적인 전력변환을 위한 전력 변환 시스템 기술을 말한다. 전기 기기 기술은 변



(그림 3) 전력전자 시스템의 구성 요소

압기, 전동기의 설계 기술 및 이와 관련된 금속, 재료 기술 등을 말하며 제어 시스템 기술은 전동기 및 전력회로를 제어하기 위한 제어 이론 및 응용기술을 말한다. 이제까지의 전력전자 기술의 발전 동향을 살펴보면 각 구성 요소의 발전에 따라 기술 변혁이 크게 이루어져 왔음을 알 수 있다. 따라서, 본 장에서는 전력용 반도체, 전동기, 디지털 프로세서 등 현재 전력전자 분야의 기술 발전을 주도하고 있는 구성 요소들의 기술 동향에 대해서 이야기한다.

1. 전력용 반도체

전력용 반도체는 1956년 미국의 Bell Telephone Lab. 에서 발명된 pnpn 트리거링 다이오드(pnpn triggering diode)가 시초라고 할 수 있으나 1958년 미국의 제너럴 일렉트릭사(General Electric Co.)에서 사이리스터(Thyristor)를 실용화하면서 본격적으로 사용되었다고 할 수 있다. 1960년대의 전력전자 기술은 사이리스터의 응용을 중심으로 전개되었으나 스위칭 주파수의 제한으로 많은 한계를 가지고 있었다. 그러나, 1970년대 이후 전력용 바이폴라 접합 트랜지스터(Bipolar junction transistor;BJT), 전력용 MOSFET, Gate turn-off thyristor(GTO)등 자기 소호 소자(Self commutating devices)의 실용화로 인해 전력전자의 개념 변화 및 기술 발전이 급격히 이루어 졌다. 이와 같이 전력전자 기술은 전력용 반도체의 성능에 의해 크게 좌우되어 왔으며 반도체 기술의 발전과 함께 성장해 왔다고 볼 수 있다. 근래에 와서 전력용 반도체 기술은 용량 및 스위칭 속도 면에서 발전을 거듭해 왔으며 1980년대 이후에는 Insulated gate bipolar transistor(IGBT), Static induction transistor(SIT), MOS-controlled thyristor(MCT) 등 기존의 전력용 반도체의 장점을 취합한 새로운 개념의 소자들이 개발되고 있다. 이와 더불어 최근에는 고전압 집적회로(High voltage integrated circuit;HVIC)기술의 개발과 함께 구동 및 보호회로 등을 집적한 스마트(Smart) 혹은 지능형 전력 소자(Intelligent power device)도 실용화되고 있다. 표 1에서는 최

〈표 1〉 전력용 반도체의 종류 및 특성 비교

Devices Items	GTO	MOSFET	IGBT	SIT	MCT
Prower capability	4500V/3000A	500V/50A	1200V/400A	1200V/300A	1200V/75A
Gating	Current	Voltage	Voltage	Voltage	Voltage
Conduction drop at rated current	4V	3.2V	3.2V	18V	1.1V
Switching frequen	2kHz	100kHz	30kHz	70kHz	20kHz
dv/dt(V/us)	Limit for device loss	Limited by Miller effect	Limit for device loss	Very high	5000
di/dt(A/us)	300	Very high	Very high	Very high	1000
Turn-on time(us)	4	0.1	0.9	0.25	1.0
Turn-off time(us)	10	0.15	1.4	0.3	2.1
Applications	<ul style="list-style-type: none"> • High power motor drives • UPS system • Static VAR compensator 	<ul style="list-style-type: none"> • SMPS • BLDC drives • Electronic relay 	<ul style="list-style-type: none"> • AC motor heating • AM/FM generator • Ultrasonic generator 	<ul style="list-style-type: none"> • Induction heating • AM/FM generator • Ultrasonic generator 	<ul style="list-style-type: none"> • AC motor drives • UPS systems

근 널리 사용되고 있는 전력용 반도체 소자의 성능을 비교하였으며 다음에서 몇 가지 소자의 특징 및 응용 분야에 대해서 간략히 언급한다.

1) GTO

GTO는 사이리스터와 구조가 거의 동일 하나 게이트(Gate)에 역 방향 전류 펄스를 인가함으로써 별도의 전류회로(Commutation circuit)없이 턴오프(Turn off)를 시킬 수 있다. 그러나, 턴오프 전류 이득이 4-5 정도로 매우 작아 턴오프 시 요구되는 구동 전류가 매우 크며 구동 회로가 매우 복잡하다. 예를 들어, 4000V/3000A 정도의 소자일 경우 -750A 가량의 게이트 전류가 필요하다. 사이리스터와 동일한 도통 특성을 가지므로 도통 손실이 낮아 최대 용량이 4500V/3000A 정도로 매우 크며 스위칭 주파수는 1-2 kHz 정도이다. 턴오프 시 Tail current 에 의한 손실이 상당하고 대부분 수 MW 이상의 대용량 시스템에 적용되므로 효율을 높이기 위해 회생 스너버(Regenerative snubber) 등에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 압연 시스템 등 대용량의 교류 및 직류 전동기 구

동 시스템, 대용량 UPS, 무효 전력 보상기 등에 많이 적용되고 있다.

2) 전력용 MOSFET

최근 개발 되고 있는 대부분의 전력용 반도체는 MOS 형태의 게이트 전압 구동형 소자이며 MOSFET는 이러한 개념이 적용된 최초의 소자라고 할 수 있다. 1970년대부터 상용화되었으며 구동회로가 간단하고 매우 빠른 스위칭 특성을 가지고 있다. 그러나, 도통 손실(Conduction loss)이 커서 전력 용량이 다른 소자에 비해서 작으며 특히 최대 허용 전압이 낮다는 단점을 가지고 있다. 현재, 500V/50A 정도의 용량이 최대이며 수백 kHz의 스위칭 주파수로 동작 할 수 있다. 소 용량 전동기 구동 시스템, 스위칭 전원(Switching mode power supply; SMPS) 등에 널리 쓰인다. 최근 들어 소프트 스위칭(Soft switching)기술의 적용으로 인해 일부 응용 분야에서는 MHz 단위의 스위칭도 가능하며 병렬운전(Parallel operation)이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

3) IGBT

IGBT는 MOSFET와 BJT의 장점을 취합한 소자이며 MOS 형태의 게이트와 Bipolar 접합으로 이루어진 출력 구조를 가지고 있다. 전압 구동형으로 BJT 보다 구동이 간단하고 MOSFET 보다 낮은 도통 손실을 가지고 있다. 1983년 최초로 상용화 된 이후로 스위칭 특성 등이 크게 개선되어 1980년대 이후 가장 성공적으로 발전을 한 소자라고 할 수 있다. 근래에 와서 중급 규모의 전력전자 시스템에 가장 널리 사용되고 있으며 대부분의 시스템에서 BJT를 대체해 나가고 있다. 현재 상용화되고 있는 최대 용량은 1600V/500A 정도이며 스위칭 주파수는 20-30kHz 정도이다. 수십 마력 이하의 직류 및 교류 전동기 구동 시스템, 중, 소용량의 스위칭 전원, 무 정전 전원 시스템 등에 널리 쓰인다.

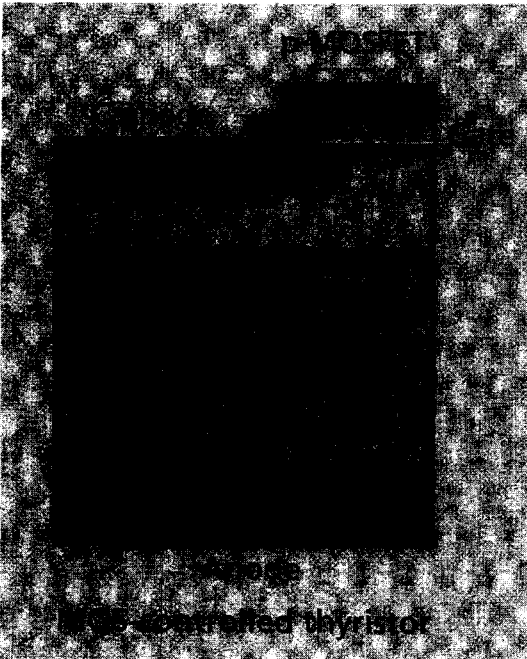
4) SIT

SIT는 1987년 일본의 Tokin사 에서 상용화되었으며 진공관의 개념을 반도체에 도입한 것으로 JFET와 구조가 유사하다. 최대 용량은 1200V/300A 정도이며 스위칭 주파수는 100kHz 정도이

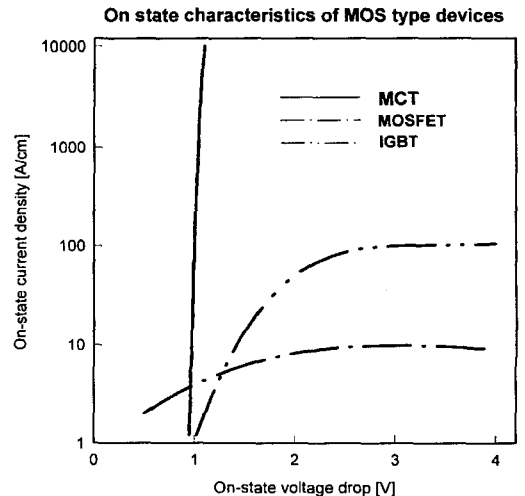
다. 소자의 신뢰성, 잡음 면역성 등이 MOSFET 보다 우수하다고 알려져 있으며 AM·FM 송신기, 유도 가열(Induction heating), 고전압 저전류 전원 장치, 초음파 발생기, 선형 전력 증폭기(Linear power amplifier) 등에 쓰이고 있다.

5) MCT

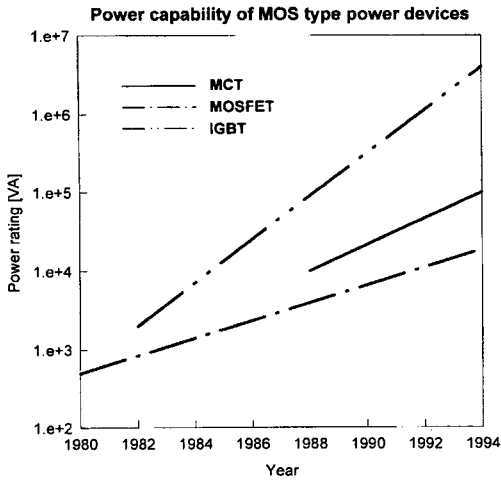
MCT는 미국의 GE, Harris 사 등에서 개발된 것으로 사이리스터의 구조에 MOS 형태의 게이트 제어 회로를 부가한 것이다. GTO와 달리 게이트 턴 오프 이득이 매우 커서 작은 게이트 전류로 소자를 턴오프 시킬 수 있다. 그림 4는 MCT의 구조를 나타내고 있으며 그림 5에서는 다른 형태의 MOS 게이트형 소자와 도통 특성 및 전력 용량을 비교하였다. 이와 같이 MCT는 게이트 전압 구동이라는 편의성과 사이리스터의 우수한 도통 특성을 이상적으로 결합한 소자이며 차세대 전력용 반도체로서 큰 관심을 끌고 있다. 최대 1200V/75A 정도의 용량을 가진 소자가 상용화되어 있으며 스위칭 주파수는 20kHz 정도이다. 그림 6에서 볼 수 있는 것과 같이 스위칭 특성 개선에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 향후 전력용량도 크게 높아질 것으로 전망된다. 중급 용량 이상의 교류 전동기 구동 시스템, UPS 시스템, 무효 전력 보상기, 능동 전력 필터(Active power filter) 등에 적용이 기대되고 있다.



(그림 4) MOS controlled thyristor(MCT)의 구조

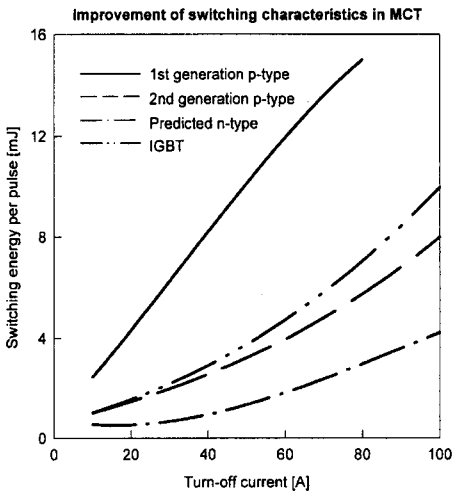


(a) 도통 특성



(b) 전력 용량

<그림 5> MOS 형태의 게이트를 가진 전력용 소자의 비교



<그림 6> MCT의 스위칭 특성 개선 추세 및 IGBT와의 비교

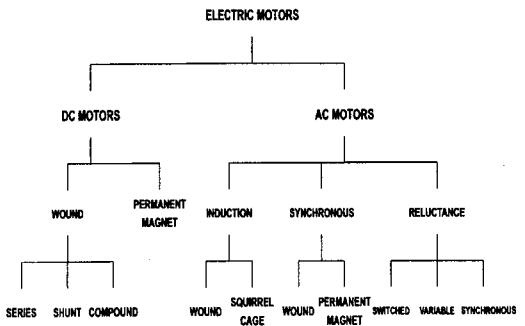
6) HVIC 및 Smart Power Devices

전력용 반도체를 구동하기 위해서는 게이트 구동 회로, 보호 회로 등 많은 부가적인 회로가 필요하다. 최근 HVIC 기술의 개발로 인해 이러한 회로들을 하나의 반도체 칩 위에 집적할 수 있게 되었으며 더 나아가서 이러한 회로들을 전력용 반도체

에 내장하게 되었다. 따라서, 3상 인버터의 경우 마이크로프로세서 등 제어 회로에서 부가적인 구동 및 보호 회로 없이 직접 인터페이스(Interface)가 가능하게 되었다. 이러한 기능을 가진 전력용 반도체를 Smart power device 혹은 Intelligent power device 라하며 구동회로가 간단한 전력용 MOSFET, IGBT 등을 중심으로 급속히 확산되고 있다. 직류 전동기 구동을 위한 H-브리지, 교류 전동기를 위한 3상 브리지 등이 상용화되어 있으며 최대 1200V/200A의 용량과 20kHz 정도의 스위칭 주파수를 가진다. 부가적인 구동 및 보호 회로 없이 사용할 수 있어 간단하고 신뢰성 있는 시스템을 구성할 수 있다는 큰 장점이 있으므로 현재 교류 및 직류 전동기 구동 시스템 등에 많이 적용되고 있다.

2. 전동기

산업 자동화 시스템에서 동력을 얻기 위하여 사용되는 구동기(Actuator)는 필수적인 요소이다. 자동화 시스템에 적용되는 구동기는 유압(Hydraulic), 공압(Pneumatic), 전기식(Electric) 등이 있으며 근래에 와서는 효율, 제어성, 작업환경, 유지 보수성 등 여러 가지 면에서 우수한 전기식 구동기, 즉, 전동기가 주종을 이루고 있다. 자동



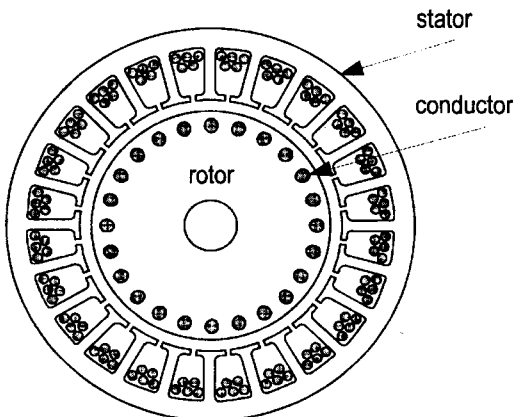
<그림 7> 자동화 시스템에 사용되는 전동기의 종류

화 시스템에 사용되는 전동기의 종류는 매우 다양하며 구조 및 전원 방식에 따라서 그림 7과 같이 나눌 수 있다. 각각의 전동기는 나름대로의 장, 단점을 가지고 있으며 시스템의 용도에 맞게 적절히 선정되어야 한다. 근래에 와서 대부분의 자동화 시

시스템에서는 전력 밀도, 유지 보수 면에서 큰 장점을 갖고 있는 교류 전동기를 구동기로 사용하고 있다. 다음에서는 현재 자동화 분야에 있어서 관심의 대상이 되고 있는 몇 가지 교류 전동기의 특징에 대해서 간략히 설명한다.

1) 유도 전동기(Induction motor)

유도 전동기는 구조가 간단하고 견고하며 내 환경성이 우수하여 컨베이어 (Conveyor), 자동창고, 엘리베이터(Elevator), 펌프(Pump), 송풍기(Blower) 등 여러 산업 분야에 광범위하게 사용되어 왔다. 유도 전동기는 회전자의 구성 방식에 따라 농형(Squirrel cage type)과 권선형(Wound type)으로 구분할 수 있다. 그림 8은 농형 유도 전동기의 구조를 나타내고 있다. 대 용량의 구동 시스템의 경우를 제외하고는 제작이 간단한 농형이 주류를 이루고 있으며 효율은 약 80-85% 정도이다. 근래에 와서는 대부분 인버터와 결합되어 가변속 구동(Adjustable speed drive)을 하고 있으며 전력전자의 발전과 더불어 구동 및 제어 기술이 크게 진보하고 있다. 유도 전동기를 벡터제어(Vector control), 센서리스 벡터제어(Sensorless vector control) 등의 기술 개발은 현재 전력전자 분야의 연구에 있어서 큰 비중을 차지하고 있다. 또한, 유도 전동기의 구동에 사용되는 전력이 국내 전력 소모량의 상당 부분을 차지 할 만큼 크므로 고 효율 유도 전동기(High efficiency induction

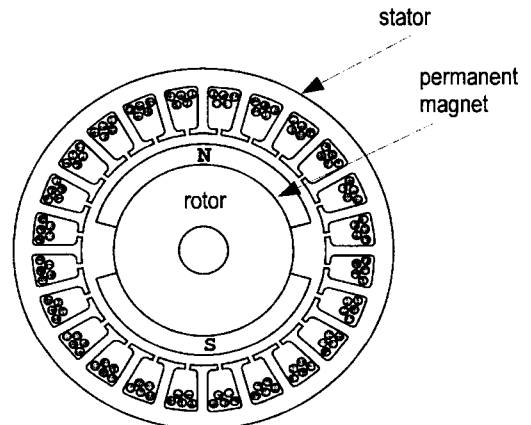


(그림 8) 농형 유도 전동기의 구조

motor), 고 효율 구동 방식(High efficiency drive)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 현재 컨베이어등 물류 자동화 시스템, 엘리베이터, 공작 기계의 스피들(Spindle), 밀링머신(Milling machine)등 정속 운전(Constant speed operation)이 필요한 시스템에 많이 적용되고 있으며 위치 제어 서보용으로 적용하기 위한 연구도 상당히 진행되고 있다.

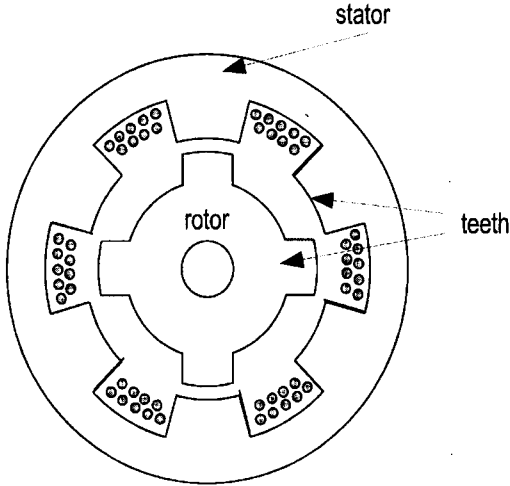
2) 영구자석 동기 전동기(PM synchronous motor)

영구자석 동기 전동기의 구조는 그림 9와 같으

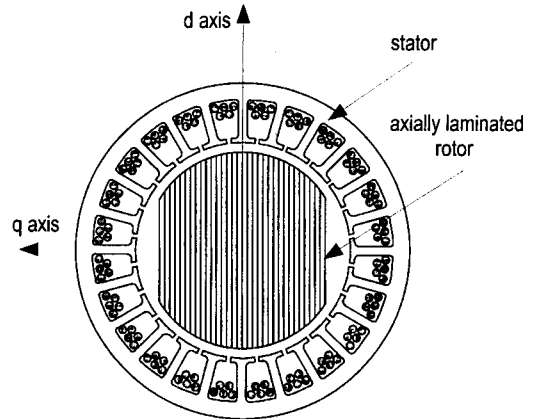


(그림 9) 영구자석 동기 전동기의 구조

며 브러쉬와 정류자 없이 전자회로와 위치센서에 의해서 정류(Commutation)를 하고 토크-속도 특성이 직류 전동기와 거의 유사해 브러쉬없는 직류전동기(Brushless DC motor)라고 불리기도 한다. 따라서, 직류 전동기의 가장 큰 문제인 유지 보수 문제가 없어 현재 많은 자동화 시스템에서 직류 전동기를 대체해 나가고 있다. 구조상 회전자의 상당 부분이 자성 재료는 되어 있으므로 관성이 작아 높은 토크·관성 비를 가지며 Sm2Co5, Nd-Fe-Br 등 고 에너지 및 고 항자력(High efficiency and high coercive) 자성재료의 사용으로 큰 전력 밀도(Power density)를 가지고 있다. 따라서, 로봇, 수치제어 공작기계 등의 고정밀 제어 시스템과 항공기 제어용 고성능 구동기로 많이 적용되고 있다. 효율은 95% 이상으로 상당히 높



〈그림 10〉 동기 릴럭턴스 전동기의 구조



〈그림 11〉 동기 릴럭턴스 전동기의 구조

으나 다른 전동기에 비해 가격이 비싸다는 단점을 가지고 있다. 그러나, 현재 Nd-Fe-B 계열의 저가의 자성재료에 대한 연구가 집중적으로 연구되고 있으며 향후 자동화 시스템의 구동기로서 주종을 이루리라 전망된다.

3) 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor)

다른 대부분의 전동기의 구동 개념과는 다르게 자기회로의 릴럭턴스(Reluctance)의 차이에 의해 발생하는 토크로 동작을 하는 전동기이다. 그림 10은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구조를 나타내고 있다. 회전자와 고정자에 돌극(Saliency)에 의해 자기 회로에 릴럭턴스 차가 생기며 이로 인해 릴럭턴스 토크가 발생한다. 회전자가 고정자와 동일하게 적층 실리콘 강(Laminated silicon steel)으로 되어 있어 제작이 용이하고 견고하며 고속 구동이 가능하다. 그러나, 돌극에 의해 토크 맥동이 발생하며 고정자와 회전자 사이의 실효공극(Effective airgap)이 커서 다른 전동기에 비해 효율이 매우 낮다. 또한, 고속 구동시 큰 소음이 발생한다는 문제가 있다. 제작 및 구동이 간단하다는 점에서 진공 청소기, 세탁기 등 가전 기기의 고속 구동 장치로 많은 관심을 끌고 있다. 또한, 이를 위하여 전동기 구조의 개선, 센서리스 구동(Sensorless drive), 구동용 전력변환 회로에 대

한 연구가 최근에도 활발히 진행되고 있다.

5) 동기 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor)

그림 11은 동기 릴럭턴스 전동기의 구조를 나타내고 있다. 이 전동기는 일반 릴럭턴스 전동기와 토크 발생 원리는 유사하나 구조가 상당히 다르다. 일반적인 전동기와 다른 가장 큰 특징은 회전자가 축 방향으로 적층(Axially laminated) 되어 있어 릴럭턴스 차를 발생시킨다는 점이다. 따라서, 회전자를 원통형으로 제작이 가능하며 구조가 견고하여 수 만rpm 이상의 고속 운전이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 회전자의 손실이 매우 작아 유도 전동기에 비해 효율이 상당히 높다고 알려져 있다. 이러한 전동기 구조는 상당히 오래 전부터 연구되어 왔으나 최근 전력전자 기술의 발전과 함께 실용화되어 1980년대 후반부터 공작기계의 고속 스피들(Spindle) 및 군사용 고속 구동기에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 회전자를 축방향으로 적층 시켜야 한다는 점에서 제작상 난점이 있어 유도 전동기와 같이 광범위하게 사용되기는 어렵다고 볼 수 있다.

3. 디지털 집적회로

전력용 반도체와 더불어 전력전자 기술의 발전을 주도 해온 또 하나의 중요한 전자공학 기술은 디지털 집적회로(Digital integrated circuit) 기술

이라고 할 수 있다. 전력전자 분야에 응용되는 디지털 집적회로 기술은 마이크로프로세서(Microprocessor) 및 마이크로 컨트롤러(Microcontroller), 디지털 신호처리 소자(Digital signal processor; DSP) 등의 프로세서(Processor) 기술과 디지털 제어회로 구성에 필요한 로직을 한 칩에 구현하는 ASIC(Application specific integrated circuit) 기술 등이 있다. 1980년대 후반 부터 하바드 아키텍처(Harvard architecture) 등의 새로운 프로세서 구조의 개발과 반도체 집적기술의 향상 등으로 인해 고급의 제어 기법을 실시간으로 처리할 수 있는 고속의 프로세서가 실용화되고 있다. 특히, 교류 전동기 제어 분야에서는 근래에 와서 모든 제어 함수를 소프트웨어로 처리하는 전 디지털(Full digital) 방식의 구동 시스템이 일반화되고 있으며 UPS 등의 전력변환 시스템에도 이러한 프로세서들이 적용되고 있다. 따라서, 본 장에서는 전력전자 시스템의 디지털 제어를 위해 사용되는 디지털 프로세서 및 ASIC 기술 동향에 대해 소개한다.

1) 마이크로 컨트롤러 및 DSP

산업용 제어 시스템에 많이 사용되는 프로세서는 인텔의 MCS-51, MCS-96, i960 계열과 모토롤라의 68HC11, 68HC16, 68830 계열 등이 있으며 이들 프로세서는 범용의 마이크로프로세서의 기능과 함께 타이머, A/D 변환기, PWM 기능들을 가지고 있어 일반적으로 싱글 칩 마이크로 컨트롤러(Single chip microcontroller)라고 불려진다. 이들 프로세서는 범용 인버터, 산업용 제어 기기 등에 널리 사용되며 부가적인 하드웨어 없이 사용할 수 있다는 점에서 큰 매력이 있다. 근래에 와서는 Reduced instruction set computing(RISC) 구조의 채용으로 연산속도 및 효율이 크게 향상되고 있다.

전동기 제어 시스템 등 대부분의 전력전자 시스템의 제어에는 행렬 연산 등 다수의 곱셈 연산이 필요하며 기존의 마이크로 프로세서 및 컨트롤러에서는 소프트웨어 방식의 승산을 사용하므로 수행 속도에 큰 제한을 받게 된다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 들어 전력전자 시스

템의 제어에 DSP를 많이 채용하고 있다. 원래 DSP는 FFT 등의 신호처리를 위해 개발된 것으로 고속의 하드웨어 승산기를 내장하고 있어 곱셈 연산을 한 인스트럭션 사이클에 수행할 수 있다. 또한, 기존의 폰 노이만(Von Neuman)구조의 프로세서와 달리 병렬 버스 구조를 가진 하바드 아키텍처를 채용하여 파이프 라인(Pipe-line) 동작이 가능하므로 프로그램 수행 속도를 극대화할 수 있다. 실제로 이와 같은 프로세서를 이용하면 PI 제어와 같이 간단한 제어 알고리즘은 수 μsec 내에 연산이 가능하다. 제어, 음성 및 영상처리 등 응용 분야에 따라 많은 종류의 DSP가 있지만, 전력전자 시스템에 널리 사용되는 DSP는 텍사스 인스트루먼트(Texas Instruments)의 TMS320xx 계열, 모토롤라의 DSP56xxx, DSP96xxx 계열, 아날로그 디바이스(Analog Devices)의 ADSP 계열, NEC의 $\mu\text{PD}77\text{xxx}$ 계열 등이 있다. 표 2는 전력전자 시스템의 제어에 주로 사용되는 DSP의 종류 및 특성을 나타내었다. DSP의 종류는 크게 고정 소수점 방식과 부동 소수점 방식이 있으며 고성능 DSP의 경우 32bits 부동 소수점(Floating point) 연산이 가능하여 고급의 제어 알고리즘을 쉽게 구현할 수 있다. 그러나, 현재 DSP를 이용한 시스템 설계에 있어서 가장 큰 문제점은 아직 DSP의 성능에 근접한 고속의 Memory, A/D 변환기 등의 주변 장치들이 많지 않다는 점이다. 특히, 전력전자 시스템의 경우 전류, 전압 등 아날로그 신호의 처리가 필수적이므로 DSP에 직접 적용할 수 고속의 A/D 변환기 등의 개발이 필요하다고 볼 수 있다.

2) ASIC 기술

마이크로프로세서나 DSP 시스템을 구성하기 위해서는 많은 디지털 회로가 필요하다. 또한, 전력전자 시스템에는 PWM 회로, 위치검출 및 처리 회로 등 특수한 용도의 디지털 회로들이 자주 사용된다. 이러한 회로들은 예전에는 범용 디지털 로직으로 구성하였으나 현재는 ASIC 기술을 주로 사용하며 크기 및 속도 면에서 큰 이점을 가지고 있다. 최근에 와서는 CAD 기술의 발전으로 인해 시스템 설계자가 Hardware description language(HDL)

〈표 2〉 전력전자 시스템에 많이 적용되는 DSP의 종류 및 특징

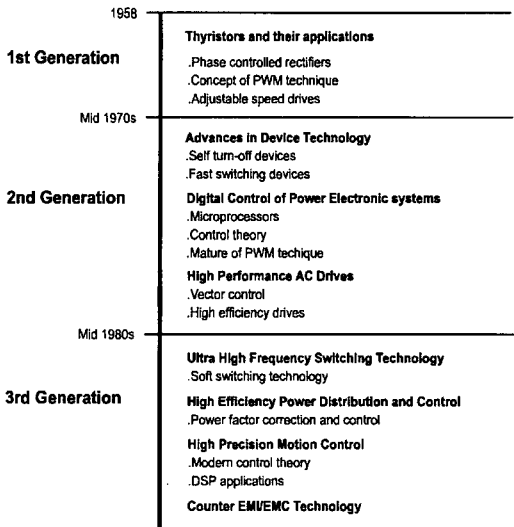
Manufacturer	Model	Date	Description	Instrufction cycle
Texas Instrument	TMS320C1x	1986	16 bit fixed point	160-200ns
	TMS320C2x	1987	16 bit fixed point	80-100ns
	TMS320C3x	1988	32 bit floating point	50- 74ns
	TMS320C4x	1990	32 bit floating point	40- 50ns
	TMS320C5x	1990	16 bit fixed point	35- 50ns
Motorola	DSP56000	1987	24 bit fixed point	75-97.5ns
	DSP56001	1987	24 bit fixed point	75-97.5ns
	DSP56116	1990	16 bit fixed point	50ns
	DSP96001	1990	32 bit IEEE floating point	50ns
	DSP96002	1990	32 bit IEEE floating point	50ns
Analog Devices	ADSP-2100	1986	16/40 bit fixed point	125ns
	ADSP-2100A	1988	16/40 bit fixed point	80ns
	ADSP-2101/2	1988	2100 with RAM, ROM	60ns
	ADSP-2015	1990	A low cost 2101	100ns
	ADSP-2111	1990	2101 with host interface	60ns
	ADSP-21020	1991	32/40 bit floating point	40ns
	ADSP-21060	1994	32 bit floating point	25ns
NEC	μ PD77220	1985	32 bit floating point	150ns
	μ PD77230	1986	24/48 bit fixed point	100ns
	μ PD77C25	1988	Updated version of 7720	122ns
	μ PD6380/6381	1990	Updated version of 77C25	122ns
	μ PD77810	1990	77C25+8 bit microprocessor	122ns
	μ PD77240	1990	Updated version of 77230	90ns

를 이용하여 ASIC을 직접 설계하고 기능을 시뮬레이션 하는 것이 가능하게 되어 제어 시스템의 개발이 보다 용이하게 되었다. 또한, ASIC을 제작하기 전 단계로 프로그래머블 로직 디바이스(Programmable logic device; PLD) 등을 이용하여 개발 단계에서 쉽게 설계된 하드웨어의 기능을 시험 할 수 있다. 현재, FPGA, EPLD 등의 PLD가 전력전자 시스템의 개발용으로 널리 쓰이고 있다. 전력전자 시스템에서 ASIC 기술의 적용은 프로세서의 처리 시간에 대한 부담을 크게 덜어 주므로 시스템의 처리 속도 및 성능을 크게 향상시킬 수 있어, 현재 교류 전동기 제어 시스템에 있어서의 위치 또는 속도 신호의 검출 및 처리는 물론

좌표 변환(Coordinate transformation)과 같이 복잡한 연산 과정을 ASIC으로 처리하려는 시도가 많이 이루어지고 있다.

IV. 전력전자 시스템 기술 동향

앞에서 언급한 바와 같이 전력전자 시스템은 전력변환 시스템 기술과 전동기 제어 기술의 두 그룹으로 크게 나눌 수 있으며 전력용 반도체, 전기기기, 그리고 이들을 제어하기 위한 회로 및 제어 시스템으로 이루어져 있다. 따라서, 기술 발전 역



(그림 12) 전력전자 기술의 발전 단계

시 이들 구성 요소들의 발전과 맥을 같이 해오고 있다. 전력전자 기술의 기본 개념은 전력용 반도체를 이용한 스위칭 기술이며 이러한 개념은 사이리스터를 사용하던 1960년대부터 오늘날까지 변함이 없다. 그러나, 보다 빠른 스위칭 소자 및 프로세서의 개발로 인해 성능 면에서 많은 발전을 이루어 왔다고 할 수 있다. 그림 12는 현재까지의 전력전자 기술의 발전 상황 및 앞으로의 발전 방향을 나타내고 있다. 1958년 사이리스터의 실용화 이후 1960년대의 전력전자 기술은 사이리스터의 응용 기술이라고 할 수 있었다. 사이리스터를 이용한 위상 제어(Phase control), PWM 기술 등이 이때 실용화되었다. 그러나, 이 때의 기술은 사이리스터의 낮은 스위칭 주파수로 인해 크게 제한되어 있었다고 할 수 있다. 전력전자 기술이 오늘날과 같이 복합적인 시스템 기술로 성장하게 된 것은 1970년대 이후이며 이 때부터 자기 보호 소자, 디지털 프로세서 등의 개발로 인해 여러 가지 요소 기술이 접목되었다고 볼 수 있다. 오늘날에 있어서 전력전자 기술 핵심은 소형, 고 전력 시스템의 실현하기 위한 고주파 스위칭 기술이라고 할 수 있으며 이를 위해 소프트 스위칭 기술 등 다양한 개념 도입 및 기술 개발이 이루어지고 있다. 따라서, 이러한 개념을 바탕으로 이 장에서는 전력전자 시스템 기술

의 최근 연구 동향에 대해서 살펴본다.

1. 전력 변환 기술

자동화 시스템의 안정된 운전을 위해서는 안정한 전원의 공급이 필수적인 요소이다. 따라서, 전력변환 시스템 기술은 자동화 시스템의 구성을 위해 매우 큰 역할을 하고 있다. 이 분야의 기술은 원래 항공기용 고 전력밀도(High power density) 전원 시스템의 개발과 더불어 발전 해 왔으며 현재는 자동화 시스템을 비롯하여, 소형 컴퓨터, 통신 장비 등의 전원 시스템을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 고 효율(High efficiency), 고전력 밀도(High power density) 전원 시스템의 개발을 위해 이 분야의 최근 연구 동향은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 전력변환 시스템의 스위칭 주파수를 높이기 위한 소프트 스위칭(Soft switching) 기술이며 또다른 하나는 전원 시스템의 역률 향상을 위한 역률 보정(Power factor correction; PFC) 기술이다.

1) 소프트 스위칭

전력 변환 시스템을 고 밀도로 집적하기 위해서는 회로를 구성하는 개별 소자의 크기를 줄이는 것이 필수적이다. 반도체 기술의 발전으로 인해 능동 소자(Active device)의 전력밀도는 크게 향상이 되었으나 변압기, 커패시터 등의 수동 소자(Passive device)는 상용 주파수에서 크기를 줄이는데 한계가 있으므로 전력회로의 스위칭 주파수를 높여 이러한 문제를 해결하고자 하였다. 그러나, 스위칭 주파수는 전력용 스위칭 소자의 스위칭 손실에 의해 제한을 받게 되므로 영 전압 스위칭(Zero voltage switching; ZVS) 또는 영 전류 스위칭(Zero current switching; ZCS) 기술이 1980년대 이후 큰 연구 과제의 하나로 대두되었다. 이러한 목적을 위해 가장 기본적으로 시도되었던 기술은 LC 회로의 공진을 이용한 공진형 전력 변환(Resonant power conversion) 기술이며 직렬 공진형 변환기(Series resonant converter), 병렬 공진형 변환기(Parallel resonant converter), 준 공진형 변환기(Quasi resonant converter), 양자화 공진형 변환기(Quantum resonant converter) 등

이 연구 개발되었다. 그러나, 이러한 공진형 변환기들은 높은 전압 맥동, 부하 변동에 의한 민감성, 높은 소자 스트레스(Device stress) 및 이로 인한 소자 용량의 증가 등에 의해 현재까지도 실용화에는 거의 이르지 못하였다. 하지만, LC 회로의 공진 기술의 소프트 스위칭의 기본 기술로 다른 전력 변환 기법에 많이 적용되고 있다. 현재 가장 널리 연구되고 있는 소프트 스위칭 기법은 PWM 변환기를 기본 회로 구성으로 사용하는 ZVS-PWM, ZCS-PWM 등이 있으며 부분적인 공진회로, 능동 클램프(Active clamp) 기법 등을 이용하여 상당 부분 실용화에 성공하고 있다.

2) 무효 전력 보상 및 역률 개선

최근 환경에 대한 관심이 세계적으로 커지면서 전기 에너지가 청정 에너지로서 크게 각광을 받게 되었으며 이로 인해 전력 수요 크게 증가하고 있다. 따라서, 전력 공급 효율을 높이기 위한 연구가 다 방면으로 시도되고 있으며 무효 전력 보상(Reactive power compensation), 역률 보정(Power factor correction) 기법이 전력전자 분야의 큰 연구 과제로 관심을 끌고 있다. 대부분의 산업용 부하는 유도성 부하(Inductive load)이므로 전력 송배전 시스템(Power transmission system)의 역률은 전력 공급 효율에 큰 영향을 미치며 이를 위해 무효 전력 보상기(Static VAR compensator), 능동 전력 필터(Active power filter 혹은 Active power line conditioner; APLC) 등의 기술이 연구 개발되고 있다. 또한, 제어 및 계측시스템, 통신 시스템의 전원으로 사용되는 소형 AC/DC 변환기 분야에서도 역률을 IEC-555와 같은 규제 조건을 만들어 전원 시스템의 등급을 관리하고 있으므로 이 분야에서도 역률 보정(PFC)이 큰 연구 과제가 되고 있다.

2. 전동기 구동 및 제어 기술

1) 고효율 전동기 구동 시스템

산업용 전력 수요의 대부분을 전동기가 차지할 만큼 여러 산업 분야에서 전동기의 역할은 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서, 전동기를 고효율로 동작하기 위한 연구가 오랫동안 진행되어 왔다. 산

업용 전동기 구동 시스템의 대부분은 유도 전동기 차지하고 있으며 다른 전동기에 비해 효율이 상대적으로 낮으므로 유도 전동기의 고효율 구동은 매우 중요한 연구 과제의 하나로 지목되어 꾸준한 연구가 계속되고 있다.

2) 센서리스 전동기 구동 시스템

현재 교류 전동기 구동 시스템에 있어서 정토크 운전을 위해 벡터제어 기법이 널리 적용되고 있다. 교류 전동기의 벡터제어 기법을 구현하기 위해서는 전동기의 위치나 속도 정보를 필요로 하며 이를 위한 센서가 전동기에 부착되어야 한다. 그러나, 이러한 센서들은 시스템의 가격 상승의 요인이 되며 특수한 환경에서는 센서의 부착 자체가 불가능하기도 하다, 따라서, 최근의 발전된 제어 기술을 원용하여 교류 전동기의 벡터 제어 시스템을 센서 없이 구동하는 기술이 꾸준히 연구되고 있으며 이를 센서리스 벡터 제어라고 부른다. 유도 전동기의 경우 속도 센서 없이 전압 및 전류의 측정만으로 벡터 제어를 구현하고 있으며 영구자석 동기 전동기, 스위치드 릴럭턴스 전동기의 경우 위치 센서 없이 토크 제어를 실현하는 방법이 많이 구현되고 있다. 이러한, 센서리스 제어 시스템은 제어 정밀도에 한계가 있으므로 주로 저가의 시스템에 사용되며 세탁기, VTR, 캠코더(Camcorder)등 가전 기기에는 이미 실용화되고 있다.

3) 전동기 구동용 전력변환 기술

전동기 구동용 전력 변환 회로는 직류 전동기 구동을 위한 위상 제어 정류기(Phase controlled rectifier), 교류 전동기 구동을 위한 교류/교류 또는 직류·교류 변환기 등이 있다. 교류 전동기 구동을 위한 교류/교류 변환기는 사이클로컨버터(Cycloconverter)라고 부르며 수 백 마력 이상의 대용량 전동기 구동 시스템에 쓰인다. 중, 소용량의 교류 전동기 구동 시스템에는 교류·직류-직류·교류 변환 시스템, 즉, 정류기-인버터(Rectifier-inverter) 회로가 많이 쓰이며 현재 PWM 정류기 및 인버터가 가장 널리 쓰이고 있다. 최근 들어 공진형 DC 링크(Resonant DC link)를 이용한 고주파 인버터에 대한 연구도 활발히 전개

되고 있다.

4) 전동기 제어를 위한 제어 이론

전동기 제어 시스템에서의 최종 목적은 전동기의 토크, 속도, 위치 등을 정확히 제어하는 일이다. 대부분의 제어 시스템과 마찬가지로 전동기 제어 시스템에서도 PID 제어가 가장 널리 사용되어 왔다. 그러나, 전동기는 다양한 환경 및 부하조건에서 동작하므로 PID 제어기로는 원하는 제어 성능을 모두 만족시킬 수가 없다. 따라서, 현대 제어 이론을 전동기 제어 시스템에 적용하는 연구가 다 방면으로 진행되고 있다. 또한, 최근 들어 등장한 고성능 디지털 프로세서는 이러한 요구를 실현하는데 큰 몫을 하고 있다. 현재 학계를 중심으로 적응 제어(Adaptive control), 강인 제어(Robust control) 등의 현대 제어 이론과 Fuzzy 제어, 신경 회로망(Neural network) 등의 지능제어 기법 등을 전동기 제어에 응용하는 연구가 진행되고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 산업 자동화 분야와 관련하여 전력전자 기술의 개요, 구성 요소 및 발전 동향에 대해서 살펴보았다. 전력전자 기술의 개념은 반도체를 이용한 에너지의 변환이며 전기전자 공학 분야의 여러 가지 기술들이 유기적으로 복합되어 있다고 할 수 있다. 또한, 최근 들어 반도체 기술 등 각 부분 기술의 발전과 더불어 크게 발전해 왔다. 산업 자동화 시스템에 있어서 전력전자 기술은 전원, 구동 및 제어 시스템 분야에 있어서 핵심적인 역할을 하고 있으며 자동화 시스템의 확산과 더불어 그 영역을 크게 넓혀 가고 있다. 따라서, 향후 산업 자동화 시스템의 고성능 화를 위해서는 전력전자 기술의 개발 역시 필수적이라고 할 수 있으며 이를 위한 많은 연구 개발이 이루어지고 있다. 먼저, 전력변환 분야에 있어서는 고속 전력용 반도체, 고주파 변압기용 자기 소자, HVIC 및 이를 이용한 스마트 전력용 반도체 등의 소자기술과 이러한 소자들을 이용한 소프트 스위칭, 고 역률 제어,

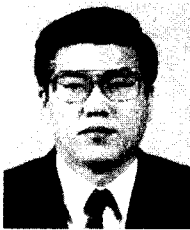
EMI·EMC 기술 등 회로 및 제어 기술에 대한 연구 개발이 활발히 전개되고 있다. 또한, 전동기 구동 및 제어 분야에 있어서는 고 효율, 고 전력 밀도의 전동기 설계 및 이와 관련된 소재 기술, 구동용 전력 회로 기술, 디지털 프로세서 응용 기술, 고성능 제어를 위한 제어 및 센서 기술 등에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.

전력전자 기술은 1970년대 그 개념이 국내에 처음 도입된 이후로 학계 및 산업체 등을 중심으로 많은 발전을 이루어 왔다. 그리고, 현재 산업 자동화 시스템을 비롯하여 엘리베이터, 전기철도 및 전기 자동차 추진 시스템, 통신용 전원 시스템 등 많은 분야에서 기술 발전이 이루어지고 있다. 전력전자 시스템 관련 산업은 대표적인 기술 집약형 산업으로 현재 중소 기업을 비롯하여 대기업에 이르기까지 이 분야에 진출하고 있으며 많은 부분에서 기술을 축적해 가고 있다. 전력전자 기술은 여러 가지 전기전자 공학 기술이 집약된 복합적인 시스템 기술이며 기술 발전을 위해서는 소자기술, 시스템 기술 등이 유기적으로 발전해 나가야 한다고 본다. 그러나, 대부분의 산업 분야에서 그러하듯이 이 분야의 국내 기술도 현재까지 시스템 기술에 편중되어 왔다고 볼 수 있다. 지금까지 전력전자 기술의 발전 경향을 보면 전력용 반도체 및 디지털 프로세서, 전동기 등의 소자 기술의 발전에 의해 큰 기술 변혁을 이루어 왔으며 앞으로의 발전 역시 이러한 기술의 발전에 의해 주도되리라 전망된다. 하지만, 이러한 소자 분야에 있어서 국내 기술 수준은 시스템 기술에 비해 상대적으로 매우 낮으며 대부분 미국, 일본 등으로 부터의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 앞으로 이러한 소자 분야의 국내 기술 개발이 크게 요구된다고 할 수 있다. 또한, 대부분의 소자 기술은 장치 산업으로서 이에 걸맞은 수요의 창출이 이루어 져야 하므로 이러한 관점에 있어서의 고려도 상당히 필요하리라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, 2e*, Prentice-Hall, 1993.
- [2] G. R. Slemon, *Electric Machines and Drives*, Addison Wesley, 1992.
- [3] B. K. Bose, "Recent Advances in Power Electronics," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 7, no. 1, pp 2-17, 1992.
- [4] G. Kaplan, "Power Electronics in Action", *IEEE Spectrum*, July, 1995, pp 32-33.
- [5] B. J. Baliga, "Power ICs in The Saddle", *IEEE spectrum*, July, 1995, pp. 34-49.
- [6] F. Harashima, "Power Electronics and Motion Control - A Further Perspective," *Proc. of IEEE*, vol. 82, no. 8, pp 1107-1111, 1994.
- [7] H. Le-Huy, "Microprocessors and Digital IC's for Motion Control," *Proc. of IEEE*, vol. 82, no. 8, pp 1140-1163, 1994.

저 자 소 개



尹 明 重

1946年 11月 26日生
 1970年 2月 서울대학교 공업교육과(전기공학 전공) 공학사
 1974年 8月 University of Missouri-Columbia 전기공학과 공학석사
 1978年 2月 University of Missouri-Columbia 전기공학과 공학박사

1978年 3月~1983年 2月 General Electric Aircraft Division 책임연구원
 1983年 3月~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
 1992年 국민훈장 동백장 수상
 1996年 6月~현재 전력전자학회 부회장

주관심 분야: 전동기 설계, 전동기 구동 및 제어, 전력변환 시스템



鄭 世 敎

1966年 11月 26日生
 1989年 2月 경북대학교 전자공학과 공학사
 1992年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1992年 3月~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

주관심 분야 : 전동기 구동 및 제어, 비선형 제어, 전력변환 시스템