

특집 : 전력전자 교육의 현황 및 방향

미국 주요대학의 전력전자공학 교육 프로그램

차 한 주

(충남대 전기정보통신공학부 전기전공 조교수)

1. 서론

오늘날 첨단산업, 경제, 스포츠 분야와 마찬가지로 전력전자 관련 산업, 기술, 학문, 연구, 저술에서도 미국, 유럽, 일본이 리드하고 있다. 이에 대한 여러 가지 요인 중에서 교육계에 있는 필자는 먼저 미국 주요 대학의 전력전자공학교육 프로그램을 중심으로 어떤 과목을 어떤 내용으로 학생들에게 개설하고 있으며, 학생들에게 오늘날 산업계에서 요구하는 지식과 엔지니어링 능력을 전달하며, 전력전자분야의 신산업 또는 신기술 분야에 어떻게 대응하고 있는지를, 주요 대학의 웹사이트에서 얻은 개설 교과목 자료를 바탕으로 알아보고자 한다. 먼저 미국에 소개하는 여러 대학의 전력전자공학교육 관련 과목을 조사해보았으나 그 개설 과목이 서로 비슷하거나 다른 대학 개설과목의 부분 집합인 경우가 많아, 정지형 전력전자 분야로 특화된 인력을 양성하는 VPEC의 버지니아 텍, 전동기 해석 및 구동 분야로 특화된 인력을 양성하는 WEMPEC의 위스콘신 대학, 미국 여타 주요 대학과 마찬가지로 두 분야에 균형 잡힌 인력을 양성하는 텍사스 A&M 대학의 3개 대학의 전력전자공학교육 관련과목을 소개, 비교한다.

2. 버지니아텍(Virginia Polytechnic Institute and State University)



1872년 버지니아 Agricultural & Mechanical 대학으로 설립되

어, 현재 버지니아 주에서 가장 큰 주립대학으로 성장하였으며, 공식 명칭은 Virginia Polytechnic Institute and State University 또는 줄여서 “버지니아텍”이라 부른다. 25,000명의 등록학생과 학생 대 교수의 비를 16:1로 유지하며, Blacksburg에 있는 주 캠퍼스는 2,600 에이커에 100여 동의 빌딩과 학교 공항을 소유하고 있다. 전기공학과는 Bradley Department of Electrical & Computer Engineering이며, 70명의 교수진으로, 300과목을 개설하고 있으며, 매년 신기술분야로 10여 개의 과목을 새로이 개발하고 있으며, CE는 매년 25명의 박사학위, 110명의 석사학위, 275명의 학사학위를 수여하고 있다. 버지니아텍의 연구실험실 중 VPEC(Virginia Power Electronics Center)의 후신인 CPES(Center for Power Electronics Systems), CRTS (Center for Rapid Transit Systems)와 FEEC (Future Energy Electronics Center)이 전력전자 관련 실험실이며, 다음은 전력전자공학 교육 관련 교과목에 대한 소개이다.

2.1 전기기기 해석 및 구동

- 4314: CONTROL & APPLICATIONS OF ELECTRIC MACHINES

전기기기, 직류 기기, 동기기, 다상 유도기와 소용량 전기기기의 제어와 다이내믹스를 다룬다.

- 4324: ELECTRONIC CONTROL OF MACHINES

전력변환기로 구동되는 전기기기의 제어와 다이내믹스를 다룬다.

- 5334: ELECTRIC MACHINES & TRANSIENTS

인덕턴스, 자속 방정식, 전압 방정식의 전개, 선형변환, 연속 시뮬레이션 기법과 전기기기 모델링, 전송선로, 변압기, 전기기기의 과도현상, 아크 현상, 뇌서지 어레스터와 절연 협조 등을 다룬다.

- 신재생 에너지(격년 개설)

2.2 정지형 전력전자

- 4224: POWER ELECTRONICS

인버터와 컨버터를 포함한 전력 소자와 스위칭 회로, 산업용 전동기 구동, 수송 시스템, 컴퓨터, 우주선 시스템 등에 응용되는 전력 변환 및 제어기법을 다룬다.

- 4284: POWER ELECTRONICS LABORATORY

상용 또는 항공/우주 응용 분야에서의 전력 제어 시스템의 설계 및 시험을 다룬다.

- 5244: Advanced Power Conversion Techniques

고주파 공진, 쿼지 공진, 멀티 공진 전력변환 기법, PWM 컨버터와 인버터에서의 영전압과 영전류 스위칭 기법, 펄스 폭 변조와 주파수 변조 기법, 공진형 및 소프트 스위칭 컨버터와 인버터의 비선형 해석 기법, 역률 보정 정류기 및 분산 전력 시스템을 다룬다.

- 5254: POWER CONVERTER MODELING & CONTROL

이산 및 평균화 기법을 사용한 전력 변환 회로의 비선형 모델링, 전압 모드와 전류 모드 제어, 병렬 모듈 운전과 시스템 통합, 분산 전력 시스템, 시간 영역 시뮬레이션과 주파수 영역 측정 기법 등을 다룬다.

- ECE 5274: MODELING AND CONTROL OF THREE-PHASE PWM CONVERTERS

3상 PWM 기법의 전력변환 원리, 제어, 컨버터 구조 정지 및 회전 좌표계의 3상 정류기와 인버터의 평균 모델 전개, 회전 좌표계와 제어기 설계에서의 소신호 모델, 스위칭 상태변수 벡터와 다른 변조기법의 소개, 3상 인버터와 정류기 응용, 병렬 또는 멀티레벨 3상 컨버터

2.3 전기품질

- 4344: Electric Power Quality for the Digital Economy

컴퓨터로 제어되는 공정과 전자 계측 시스템 운용에 영향을 미치는 전력 품질 문제에 대한 원인, 결과와 해결책, 저력품질 이슈에 대한 산업 표준, 모니터링 및 측정 기술, 경제적 고려 등을 다룬다.

- ECE 4984 : Electric Power Quality

이 과목은 전력 품질의 기본 개념을 다룬다. 주요 타픽은 전력품질 문제의 원인과 해결책, 모니터링 및 측정 기술, 산업

표준을 포함한다. 새로 출현하는 여러 가지 전력 기술의 역할이 강조된다.

2.4 신재생 에너지 및 신규분야

- 4364: ALTERNATE ENERGY SYSTEMS

태양광, 풍력, 소수력, 바이오매스, 지열, 조력압 같은 대체 에너지로부터의 전력 발전, 직접변환, 전기-기계 에너지 변환, 대체에너지 시스템에 사용되는 저장장치의 특징, 소규모 에너지 시스템의 전력 계통 선로 연결에 따른 계통 이슈 등을 다룬다.

전동기 구동

- 5364: ELECTRIC ENERGY & ENVIRONMENTAL SYSTEMS

화석연료, 원자력, 신재생 에너지의 역할, 특고압 송전의 영향, 전기발전에 따른 건강 문제, 열병합발전과 수요자 관리의 평가, 미국 전력산업에서 오염 배출량 제어, 오염 배출 정량화에 있어서의 불확실성 평가를 다루며, 웹사이트 강의 자료를 제공한다.

- ECE 5984 : Power Electronics Integration Technology

통합된 전력제어기와 이에 따른 전자기 및 열구조 특성을 종합하는 재료, 인터페이스, 공정 기술의 특징을 다루며 최신 연구 사례를 중심으로 자세하게 분석된다. 구조, 기능, 전자기 통합의 관점에서 미래 기술 개발 방향을 예측한다. 다양한 기술 관점에서 강조된 통합설계에 대한 최신 전력전자 기술의 광범위한 소개, 회로 기술, 전력반도체 소자, 센싱 및 제어, 통합 패키징과 열 관리, 시스템 신뢰도와 원가에 미치는 영향 등에 대한 시스템 응용 요구조건과 기술적 도전 과제의 관계 조사, 통합된 전력전자 모듈의 개념 소개와 분산 전력 시스템과 전동기 구동에의 응용. 이 과목은 여러 대학과 산업계의 선도 연구자의 합동 강의로 구성되어 있다.

이상 버지니아텍에서 개설하고 있는 전력전자 교과목의 구성을 보면 정지형 전력전자 교과목이 학부 2, 대학원 4과목으로 구성되어 우주 /항공/ IT/ 차세대 전원 장치에서 요구되는 다양한 전력변환기 구조, 제어, 모델링 기법 등 다양한 기술 분야를 다루며, 산업 현장을 리드할 수 있는 실질적인 기술인력을 양성할 수 있도록 구성되어 있음을 알 수 있다. 아울러 기존의 전력전자교과목 이외에도 신규분야로 디지털 경제화의 전기 품질, 신재생 에너지, 환경분야의 교과목을 학부과목으로 개발하여 이미 개설하고 있는 점이 주목된다.

3. 위스콘신 대학



1849년 개교한 위스콘신 대학교-메디슨 캠퍼스는 메디슨

시내 멘도타 호수변을 따라 933 에이커의 면적에 세워져 있으며, 매년 40,000명의 학생들이 등록을 한다. 특히, 위스콘신 대학의 전기공학과 교수들이 주축이 되어 전기기기와 전력전자분야의 연구개발을 위한 산학 컨소시엄인 WEMPEC (Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium)을 1981년에 설립하여, 전세계 전기기기 설계 및 구동 분야의 관련 기업, 연구소, 엔지니어의 허브 역할을 하고 있다. 다음은 위스콘신 대학의 전력전자 관련 교과목들을 소개한다.

3.1 전동기 해석 및 설계

- ECE 304: Electric Machines Laboratory

전기기기의 출력단 특성, 속도 제어의 요소, 전압 조절과 시스템 응용, 복잡한 실제 문제에 대한 해결방법의 실험적 접근을 다룬다.

- ECE 355: Electromechanical Energy Conversion

에너지 저장과 변환, 힘과 기전력 생성, 전기-기계 입력을 가진 시스템의 결합 회로 해석, 전동기, 발전기, 다른 전기-기계 변환기 응용을 다룬다.

- ECE 377: Fundamentals of Electrical and Electromechanical Power Conversion

전자기 유도 원리와 변압기, 유도 가열에의 응용, DC 전동기, AC 전동기, 선형 액추에이터의 운전과 제어 관점에서의 로렌츠 힘, 전동기 구동이 직접 전력 변환기용 전력전자기법을 사용한 전력 변환, 5개의 실험을 포함한다.

- ECE 713: Electromagnetic Design of AC Machines

전자기 설계 개념과 AC 기기 응용, 자기회로 개념, 기하학적 구조로부터 유도기, 동기기, 영구자석기기의 등가회로 매개변수 계산, 동손 및 철손 계산, 전자기 소자의 유한요소 이론과 응용을 다루며, 매 3학기마다 개설된다.

3.2 전동기 구동

- ECE 411: Introduction to Electric Drive Systems

전동기 구동의 기본 개념, 시스템 해석과 응용을 강조함, 다루는 타점은 DC 기기 제어, 유도기와 동기기의 가변속 운전, 불평형 운전, 스케일링 법칙, 가변속 구동기, 가변 토크 구동기, AC 기기의 결합회로 모델링

- CE 504: Electric Machine & Drive System Laboratory

전력전자 컨버터로 제어되는 전기기기의 정상상태와 다이내믹 성능, 패러미터 측정, 성능 평가, 문제해결을 위한 실험 절차 설계, 시스템 평가를 위한 디지털 데이터 취득 시스템과 신호 처리 장치의 사용을 다룬다.

- ECE 511: Theory and Control of Synchronous Machines

동기기의 이론 및 제어, 세일런시를 포함한 이상적인 3상 동기기의 시간영역 모델, Park 변환을 사용한 시불변 모델, 단락회로와 과도조건, 축소 차수 모델, 여자 시스템과 터빈/거버너 제어, 다중 기기 시스템의 다이내믹스, 과도 안정도와 서브싱크로너스 공진을 다룬다.

- ECE 711: Dynamics and Control of AC Drives

전력변환의 원리, AC 기기와 AC 구동기의 2 축 모델, 구동 시스템의 시뮬레이션, 구동기의 해석 모델, 유도기, 동기기, 구동 시스템의 다이내믹 특성들다룬다.

3.3 정지형 전력전자

- ECE 412: Power Electronic Circuits

BJT, IGBT, MOSFET, 싸이리스터 등과 같은 전력용 반도체의 운전 특성, DC-DC 컨버터, 위상제어 AC-DC 정류기, DC-AC 인버터를 포함한 전력변환 회로의 기본원리, 컨버터 설계 및 운전에서 실제적 이슈들을 다룬다. VCR 녹화됨

- ECE 512: Power Electronics Laboratory

전력전자회로와 전력용 반도체 소자의 중요한 운전 특성을 측정하고 시뮬레이션하는 실험 과목, 소자, 회로, 게이팅 방법, 전력 품질부분이 강조된다.

- ECE 712: Solid State Power Conversion

스위칭 전력 변환기를 이해하는 전력전자의 상급과목, DC-DC, AC-DC, DC-AC, AC-AC 변환기기, 소호 방법, 컨버터 제어, 실전원과 부하를 연결하는 컨버터를 다루며, 3학기에 한번씩 개설된다.

3.4 계통 관련 교과목

- 714: Utility Application of Power Electronics.

전력전자의 계통 시스템에의 적용은 급속히 확대되며, 관련 산업계의 파급도가 크다. 이 과목은 HVDC 전송, 에너지 저장 시스템, 재생 에너지, 정적 보상기, 유연송전 시스템등을 다룬다.

위스콘신 대학은 익히 알려진 바와 같이 전동기 해석, 설계 및 구동에 관련된 교과목을 학부 4과목, 대학원 4과목을 집중적으로 개설하여, 전기-기계 변환 원리, 회전형 및 정지형 전기기기 해석 및 설계, 유한요소법 및 손실 해석, AC 구동 제어기 및 모델링, 전기기기 설계/ 구동/ 제어의 통합 등의 매우 실제적이며, 산업체 밀착형의 공학교육을 제공하고 있다. 대학원 과목으로 FACTS와 같은 계통에의 전력전자응용 과목도 개설하고 있다.

4. 텍사스 A&M

1876년 개교한 텍사스 A&M 대학은 주캠퍼스가 칼리지

Texas A&M University

A Unique American Institution

스테이션에 위치하며, 46,000여명의 학생이 등록하여, 등록면에서는 미국 6번째의 순위를 가진다. 434 에이커의 리서치 파크를 포함하여 총 5,200 에이커의 면적을 가져 미국 내 가장 큰 캠퍼스 중의 하나이다. 텍사스 A&M의 전기공학과는 Department of electrical and computer engineering으로써, 1000여명의 학부생, 140여명의 석사과정 학생, 220여명의 박사과정 학생이 수학하고 있다. 17명의 IEEE 펠로우를 포함한 70여명의 교수진을 갖추고 있다. 전력전자 관련하여 electric power and power electronics 전공이PECP Lab (Power Electronic & Clean Power Research Lab), PEMD Lab (Power Electronics and Motor Drive Lab), EMPE Lab (Electric Machines & Power Electronics Lab)의 세 개의 실험실로 구성되어 있으며, 다음은 개설되는 전력전자 관련 교과목이다.

4.1 전동기 해석 및 구동

- 338. Electromechanical Energy Conversion.

자기회로, 변압기, DC, 유도기, 동기 전동기와 같은 전기-기계 에너지 변환 장치, 등가회로, 성능특성과 전력전자 제어를 다룬다.

- 405. Electrical Design Laboratory.

산업계에서 적용되는 설계 절차 및 프로젝트 엔지니어링 소개, 실험조는 제안서, 시험, 평가의 순서로 프로젝트를 진행하며, 설계 절차를 적용한다.

- 441. Electronic Motor Drives

가변속 DC 및 AC 구동기에 스위칭 전력 컨버터 적용, 산업계, 로봇, 수송 시스템에서의 모션제어 해석과 전상상태 해석, 전력전자 전동기 구동과 제어 실험을 다룬다.

- 442. DSP Based Electromechanical Motion

Control

에너지 변환, 전기-기계 변환의 기본 개념, 전력용 반도체 소자를 이용한 구동기 토폴로지를 포함한 다양한 제어 기법, DSP 제어기 설계 및 실험

- 611 General Theory of Electromechanical Motion

Devices 신재생 에너지

Winding function 이론, 이상적인 이중 실린더 기기의 인덕턴스, 세일런트 극 기기의 인덕턴스, 좌표축 변환 이론, 전기기기의 다이내믹 방정식, 전기기기의 정상상태 특성을 다룬다.

- 632 Motor Drive Dynamics

전동기 가변속 구동 다이내믹스의 수학적 해석, DC 기기와 AC 기기의 직접 토크 제어, 고성능 AC 전동기 벡터제어, 모션 제어 기법, 마이크로 컴퓨터, 신호 및 전력 회로 구현을 다룬다.

4.2 정지형 전력전자

- 438. Power Electronics

전력 조정 및 제어, 전력용 반도체 소자의 특성, AC 전력 제어기의 해석과 실험, 위상제어 정류기, DC 초퍼와 DC-AC 변환기, 파워서플라이 응용, 우주/ 항공 전력 시스템을 다룬다.

- 613 Rectifier and Inverter Circuits

단상/ 3상 정류기의 해석과 설계, 위상 제어 정류기와 PWM 정류기, 고조파, 역률, 고조파 규격, 수동 또는 능동 보상방식, 인버터, PWM 방법, blanking time 효과, 영전압 스위칭 인버터, 멀티레벨 인버터, UPS와 AC 전동기 구동 시스템 응용을 다룬다.

- 630 Analysis of Power electronic Systems

푸리에 시리즈, 상태공간 평균화법, 시간 영역 전달함수, 슬라이딩 모드, 불연속 orthogonal 함수를 사용한 스위칭 전력 변환기의 해석 및 제어, 상기 기술의 실제 응용 등을 다룬다.

4.3 계통 관련

- 668 High Voltage Direct Current (HVDC)

Transmission

HVDC 시스템 개론, AC 와 DC 전력전송 비교, 6-펄스와 12-펄스 전력 변환기, HVDC 시스템의 해석과 제어, 고조파와 역률 효과, 시스템 고장과 오동작, HVDC 기술의 현재 기술과 미래 기술을 다룬다.

텍사스 A&M의 전력전자공학 관련 교과목은 전동기 구동과 정지형 전력전자 분야가 균등하게 분포되어 있다. 특히 학부와 대학원 과목으로 DSP를 이용한 전동기 구동 및 실험 과목이 있으며, 계통관련 전력전자 과목으로 HVDC 송전을 다루고 있음이 특이 점이다.

5. 결론

미국 주요대학의 전력전자공학 프로그램이라는 주제로 버지니아텍, 위스콘신, 텍사스 A&M 대학의 전력전자공학 프로그램을 현재 개설되고 있는 교과목을 중심으로 소개, 비교하며, 그 특성을 살펴보았다 VPEC의 버지니아텍과 WEMPEC의 위스콘신에서 보듯이 두 대학의 과목은 정지형 전력전자분야와 전동기 해석 및 구동 분야로 각각 특화되어 있으며, 텍사스 A&M의 경우 여타 미국 대학이 그러하듯 두 분야가 균등하게 개설되어 있다. 개설된 전력전자공학 교과목 비교를 통하여, 각각의 대학이 기존의 강점을 유지시키고 시대 및 환경의 변화에 맞추어 어떤 방향의 교과목을 개설하면서 나아가고 있는 지, 공학인력 양성의 목표 및 전략을 엿볼 수 있었다. 특히 미국 대학은 스페셜 타픽이라는 과목을 통하여 그 당시 신기술 또는 첨단연구 분야에 대해 교수진의

이에 대한 선행 강의준비 및 케이스 연구를 통해서 관련산업의 변화에 맞추거나 리드해가면서, 아울러 학생들의 신학문, 신지식에 대한 요구를 충족시키며, 산업 현장에서 요구하는 경쟁력 있는 엔지니어링 인력을 양성하고 있다. 특히 버지니아텍의 경우 우주 /항공/ IT/ 전원 장치분야 등의 정지형. 전력전자 분야의 강점을 가지고 신재생 에너지, 분산전원, 환경 분야로 영역을 넓히며, 적극적으로 관련 과목을 개설 또는 개발하고 있음을 보여주고 있다. 이상으로 미국의 3개 대학의 전력전자공학 관련 교과목을 소개하였으며, 후일 기회가 있으면 유럽과 일본의 주요 대학의 전력전자공학교육 프로그램을 소개, 비교하면 새로운 강의 분야를 계획하고 개발하는 교수님에게 도움이 되리라 생각한다. ■

〈 저 자 소 개 〉



교수.

차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M 전기공학과 졸업(공박). 1990년 ~2001년 LG 산전연구소 책임연구원. 2005년 ~현재 충남대 전기정보통신공학부 전기전공 조