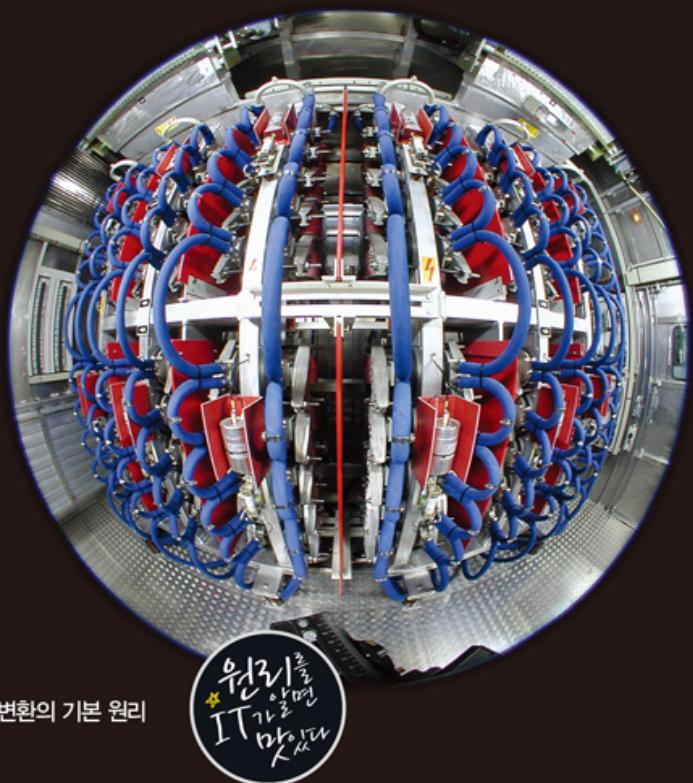


IT COOKBOOK

한빛 교재 시리즈 321



PSpice와 PSIM으로 쉽게 배우는 전력 변환의 기본 원리



현대 전력전자공학

Introduction to
Modern Power Electronics 2nd Ed.

안제이 트지나로브스키(Andrzej M. Trzynadlowski) 저
원충연, 김영렬, 이택기, 정용채 역

WILEY

한빛미디어
Hanbit Media, Inc.

연습문제 해답은
제공하지 않습니다

* 현대 전력전자공학

Introduction to Modern Power Electronics

2nd Ed.

안제이 트지나로브스키(Andrzej M. Trzynadlowski) 저
원충연, 김영렬, 이택기, 정용채 역

WILEY

한빛미디어
Hanbit Media, Inc.

현대 전력전자공학 : Introduction to Modern Power Electronics [2nd Ed.]

지은이 | 안제이 트지나로브스키(Andrzej M. Trzynadlowski)

옮긴이 | 원종연, 김영렬, 이택기, 정용재

펴낸이 | 김태현

펴낸곳 | 한빛미디어(주)

주 소 | 서울시 마포구 서교동 480-26 한빛빌딩 3층 기획편집부

전 화 | 교재개발2팀 02)336-7197, 영업2팀 02)336-7112

팩 스 | 02)336-7199

등 록 | 1996년 6월 24일 제10-1779호

초판발행 | 2011년 3월 21일

정 가 | 25,000원

I S B N | 978-89-7914-815-2 98560

Published by HANBIT Media, Inc. Printed in Korea

Copyright © 2010 by HANBIT Media, Inc.

Authorized translation of the English edition of *Introduction to Modern Power Electronics*

© 2010 by John Wiley & Sons, Inc.

This translation is published and sold by permission of John Wiley & Sons International Rights, Inc.,
the owner of all rights to publish and sell the same.

이 책의 한국어판 저작권은 John Wiley & Sons International Rights, Inc.과 독점 계약에 의해 한빛미디어(주)
에 있습니다.

저작권법에 의해 보호를 받는 저작물이므로 무단 복제 및 무단 전재를 금합니다.

이 책에 대한 의견을 주시거나 오탈자 및 잘못된 내용의 수정 정보는 한빛미디어(주)의 홈페이지나 아래 이메일로
연락주십시오. 잘못된 책은 구입하신 서점에서 교환해 드립니다.

<http://www.hanb.co.kr>
question@hanb.co.kr

1시간 강의를 위해 3시간을 준비하는 마음!

:: 군더더기 없는 핵심 원리 + 말랑말랑 쉬운 컨텐츠

핵심 원리 하나만 제대로 알면 열 가지 상황도 해결할 수 있습니다.
친절한 설명과 명확한 기승전결식 내용 전개로 학습 의욕을 배가시켜줍니다.

:: 핵심 원리 → 풍부한 예제와 연습문제 → 프로젝트로 이어지는 계단 학습법

기본 원리를 다져주는 예제, 본문에서 배운 내용을 촘촘하게 점검해 볼 수 있는 연습문제,
현장에서 바로 응용할 수 있는 프로젝트를 단계별로 구성해 학습의 완성도를 높였습니다.

:: 학습욕구를 높여주는 현장 이야기가 담긴 IT 교과서

필드 어드바이저의 인터뷰와 주옥 같은 현업 이야기를 담았습니다.
강의실 밖 현장의 요구를 접하는 기회를 제공하고,
학생들 스스로 필요한 공부를 할 수 있도록 방향을 제시합니다.



>>

저자 및 역사 소개

About the Authors

저자 소개

안제이 트지나로브스키(Andrzej M. Trzynadlowski)

리노(Reno)에 있는 네바다 대학교(University of Nevada)의 전기공학 및 생의학공학과 교수이다. 그는 전 세계 수많은 대학들과의 공동 연구에서 높은 성과를 거두었으며, 전력전자 및 전동기 구동 분야에서 활발한 저술 활동을 하고 있다. IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineering)의 회원이고, IEEE Industry Applications Society의 Industrial Power Converters Committee와 Industrial Drives Committee의 구성원이며, IEEE Transactions on Industrial Electronics와 IEEE Transactions on Power Electronics의 부편집장이다.

역자 소개

원충연

현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수로, 성균관대학교에서 전기공학과 학사, 서울대학교에서 전기공학과 석사 및 박사 학위를 취득하였다. 한국전력공사 기술연구소 연구원으로 근무하였으며, 테네시 주 테네시 주립대학교 객원 교수를 역임하였다. 2010년 전력전자학회장 임기를 마쳤으며, 현재 삼성전기에서 지원받는 에너지 파워 연구 센터장으로 태양광 발전용 PCS 연구를 하고 있다. 저서(공저)로는 『전기 기계』(동일 출판사, 1999), 역서(공역)로는 『전력전자공학의 입문』(인터비전, 1999)이 있다.

김영렬

현재 인양대학교 전기전자공학과 교수로, 서울대학교 전기공학과에서 학사, 석사 및 박사 학위를 취득하였다. 한국기계연구소 부설 기업기술지원센터의 연구원, 한국항공우주연구원의 선임연구원으로 근무하였으며, 미국 테네시 주 테네시 주립대학교에서 객원 교수를 역임하였다. 주요 연구 분야는 전동기 제어로, 특히 현대제어이론을 이용한 전동기제어에 관하여 연구를 하고 있다.

이택기

현재 한경대학교 전기공학과 교수로, 한양대학교에서 전기공학과 학사, 석사, 박사 학위를 취득하였으며, 1994년부터 1996년까지 서남대학교 전기공학과 교수로 재직하였다. 현재 전력전자학회 학술이사로 활동하고 있다. 주요 연구 분야는 현대제어이론을 이용한 전력변환기 제어이다.

정용채

현재 남서울대학교 전자공학과 교수로, 한양대학교에서 전자공학과 학사, KAIST에서 전기 및 전자공학과 석사와 박사 학위를 취득하였다. LG 전자 흠어플라이언스 연구소 선임연구원으로 근무하였다. 저서(공저)로는 『실무자를 위한 전원 EMC 대책기술』(방형식디자인, 2010) 이 있다.

번역 담당 부분

1, 4장 : 이택기, 2, 3, 6, 8장 : 정용채, 5, 7장 : 김영렬, 9장, 부록, 찾아보기, PSIM 파일 : 원충연

전력전자공학의 핵심 이론을 한 학기동안 습득하려는 독자에게

최근 고속 대용량 전력용 반도체 소자의 개발과 마이크로프로세서/마이크로컴퓨터 기술의 발달과 더불어 하이브리드 자동차, 전기 자동차 추진용 인버터, 충전기 기술, 직류송전, 백색가전, 공조, 조명 및 분산발전 등과 같은 전력 변환 분야에 있어서 전력전자공학은 큰 비중을 차지하고 있다.

이 책은 전력전자공학에 대한 입문서로, 학부에서 전기전자공학을 공부하는 학생들을 위한 책이다. 주로 3, 4학년 과정의 1학기용으로 저술되었지만, 모든 주제를 심도 있게 다루는 것은 사실상 무리가 있다. 학부 과정에서는 전력전자공학에 대한 기초지식을 확실히 쌓아야 하므로 학생들의 수준에 따라 내용을 선택하여 강의를 하거나 각 장의 비중을 달리 하여 수업을 진행하는 것이 바람직하다. 이 책을 학습하는 데에는 1, 2학년 과정에서 배우는 미분적분학, 공업수학, 회로이론과 전기전자공학에 대한 지식이 뒷받침되어야 한다. 이 책은 대학원 과정의 교재로도 사용할 수 있으며, 아울러 전력전자공학의 설계 및 응용을 다루는 현장 기술자들을 위한 참고서적으로도 활용할 수 있다.

이 책에 제시된 학습 로드맵 전공 기반 과목인 공학수학, 기초회로실험, 회로이론, 전자회로, 그리고 전공심화 과목인 전력전자공학 및 설계, 전기기기, 전력시스템공학, 배전자동화설계, 전동기제어실험 등을 수강하면 전력전자공학을 폭넓게 익힐 수 있으며, 졸업 후 산업체의 중견 기술자로 활동하는 데 부족함이 없을 것이다.

이 책에는 특히, 전력 컨버터 회로를 해석하는 한 방법으로 PSpice를 사용하여 시뮬레이션한 결과가 수록되어 있다. 현장 엔지니어의 경우에는 이 도구가 매우 유용할 것이다. 또한 역자들은 국내외의 학생들과 현장 엔지니어들이 많이 사용하는 PSIM 소프트웨어를 이용하여 파일 리스트를 만든 후 이를 수업 시간에 활용하도록 함으로써 그 결과를 전력전자회로의 해석과 설계에 적용할 수 있도록 하였다.

이 책에서는 전력전자 분야에서 반드시 알아야 하는 내용들을 전반적으로 다루고 있으며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 전력 변환의 원리와 방법
2. 전력전자에서 기초적으로 알아야 할 전력용 반도체 소자의 특성과 사용 방법
3. 전력용 반도체 소자의 구동, 보호, 필터, 냉각 및 제어
4. 다이오드 정류기, 위상제어 정류기, PWM 정류기에 대한 소자 선정과 응용
5. 교류전압 제어기, 사이클로컨버터, 매트릭스 컨버터에 대한 소자 선정과 응용
6. 강압 초퍼와 승압 초퍼 원리, 전류제어, 소자 선정과 응용

7. 전압형 인버터와 전류형 인버터의 원리 및 소자 선정과 응용
8. 스위치 파워 서플라이 형태, 비절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터, 절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터 및 공진형 DC-DC 컨버터
9. 청정에너지에서 전력전자의 중요성, 태양광, 풍력, 연료전지 전기 자동차와 하이브리드 자동차, 전력전자와 에너지 절약

다른 교재와 달리 9장에서는 신재생에너지원을 이용한 분산형 발전시스템이 도입됨에 따라 전력 변환 기술을 다루었다. 즉, 신재생에너지는 태양광, 연료전지와 같이 직류를 출력하거나 풍력과 같이 가변 교류전압, 가변 주파수 출력을 한다는 점에 기초하여 그리드 규격에 적합한 전압과 주파수로 변환하는 전력 변환 기술에 대하여 기술하였다.

또한 전기 자동차, 하이브리드 자동차 및 연료전지 자동차의 동작 그리고 친환경 자동차에 속하는 구조에 대하여 설명하고, 배터리, 내연기관, 연료전지와 전력 변환장치와의 연결에 대해서도 다루었다.

역자들은 전력전자 분야를 20여 년 가까이 강의한 경험을 바탕으로 하여 관련 용어를 통일하였으며, 이 분야를 공부하는 독자들에게 소중한 참고도서가 되도록 번역을 하였지만 아직 미흡한 점이 있을 것으로 판단된다. 역자가 번역하여 서술한 내용들이 원문과 다르게 표현된 경우, 이를 지속적으로 보완하여 향후 좀 더 완벽한 역서가 될 수 있도록 노력할 것이다.

마지막으로, 이 책을 번역하는 데 도움을 주신 모든 분들과 한빛미디어 관계자 여러분께 감사의 마음을 전한다.

2011년 3월

역자 일동

현대 전력전자공학의 툴과 기술에 대한 완벽한 마스터

이 책은 한 학기 동안 학부과정에서 전력전자를 학습할 수 있도록 쓰여진 것이다. 그러나 전력전자의 최신 툴과 기술의 개관을 포함하고 있기 때문에, 보다 상위 과정을 보충할 수 있는 참고도서로도 활용될 수 있다. 전력전자 지식을 다시 상기하고자 하는 실무 기술자들 또는 전력전자와 관련된 분야에 관심이 있는 사람에게도 이 책이 유용할 것이라 생각된다.

이 책의 초판이 출간된 11년 전 아래로, 전력전자공학은 많은 진보를 하였다. 비록 대부분의 전력 컨버터 토플로지가 알려져 있는 상태이지만, 새로운 응용이나 제어 기술들은 아직 많이 존재한다. 좀 더 발전되고 강력한 반도체 스위치를 사용함으로써 전력 컨버터는 수 kV, 수 kA는 물론 수십 MVA의 정격에 도달할 수 있다. 최근 기후 변화의 위협과 지정학적 환경적 문제, 그리고 화석연료의 고갈과 비용 증가에 관련된 에너지 위기는 새로운 청정에너지원에 대한 관심을 유발시켰다. 그 결과 전력전자 시스템은 그 중요성이 점차 높아지고 있으며 어디서든 쉽게 찾아볼 수 있게 되었다. 변경된 두 번째 개정판에는 실제적인 중요성이 증가되는 PWM(pulse width modulation) 정류기, 매트릭스 컨버터, 멀티레벨 인버터, 그리고 신재생에너지와 전기 자동차 및 하이브리드 자동차에 사용되는 전력 컨버터와 같이 최근 전력전자공학에서 중요하게 여겨지는 분야를 반영하였다.

구체적인 정보가 결여된 채 일반적인 개요로 시작하는 대부분의 전력전자공학 서적과는 달리, 이 책의 1장에서는 강의 과정의 중요한 부분을 다루었다. 가상의 만능 전력 컨버터를 사용하여, 전력전자공학의 기본적인 원리와 방법을 완벽하게 설명하였다. 따라서 교수가 채택하고자 하는 목차의 순서와 상관없이 1장은 제일 먼저 학습되어야 한다.

2장과 3장에서는 반도체 스위치와 전력전자 컨버터의 보조 구성 요소와 시스템을 다루었다. 비록 이 책이 컨버터의 전력 회로, 동작 특성, 제어, 응용에 좀 더 초점을 두고 있지만, 독자들은 이러한 중요한 부분이 존재한다는 것을 인식하고, 이 기능들을 반드시 익히도록 해야 한다.

AC-DC, AC-AC, DC-DC, DC-AC와 같은 기본적인 네 가지 전력 변환 형태들은 4장과 7장에서 각각 다루었다. 4장과 7장에서는 정류기와 인버터에 대해 주로 설명하는데, 최근 전력전자공학에서 컨버터의 중요성을 반영하듯이 전체 구성 중에서 가장 분량이 많다. 8장에서는 스위칭 DC 전원공급기에 대한 내용을 다루었다. 개정판에 새롭게 추가된 9장에서는 청정에너지 시스템에서 응용되고 있는 전력전자공학에 대해 다루었다.

각 장의 첫 부분에서는 본문에 대한 간략한 요약과 개요를 제시하였다. 이와 아울러 많은 수의 예제 및 과제, 그리고 컴퓨터를 이용한 과제들을 수록하였다. 이 책의 내용과 관련하여 쉽게 접할 수 있는 참고 문헌들은 각 장의 말미에 제시하였다. 또한 세 개의 부록도 이 책에 추가하였다.

이 책에는 가상의 전력전자 연구실을 구성하는 48개의 PSpice 파일이 첨부되어 있다. 이 파일들은 이 책에 실린 대부분의 전력전자 컨버터의 모델을 포함하고 있다. 이 모델들은 상당히 값어치 있는 자료로서, 독자들로 하여금 컨버터의 동작을 이해하고 각 컨버터의 동작을 구체화할 수 있는 기회를 제공한다.

지금까지 출판되었던 공학 서적들과는 달리, 이 책은 매우 간결하다. 그럼에도 불구하고 모든 내용을 한 학기 동안 다룬다는 것은 학생들로 하여금 더 많은 과제를 수행해야 한다는 것을 의미한다. 제안하는 강의법은 수업 중에 기본적인 내용을 제공하고, 학생 스스로 정해진 범위의 내용을 읽으면 문제를 풀고, PSpice 시뮬레이션을 수행함으로써 지식을 넓히는 것이다.

개인적으로 이 책을 출판할 수 있도록 소중한 비평과 조언을 해 주신 분들께 감사드리고 싶다. 다년간 이 책의 초판을 사용한 리노(Reno) 네바다 대학교(University of Nevada)의 학부생들도 이 책을 출판하는 데 있어서 많은 조언을 해주었다. 마지막으로 내 아내 Dorota와 두 아이들 Bart와 Nicole에게 긴 시간 동안 집필에만 마음을 쓴 것에 대해 사과하고 싶고, 가족들의 한결같은 지지에 깊은 감사의 마음을 전한다.

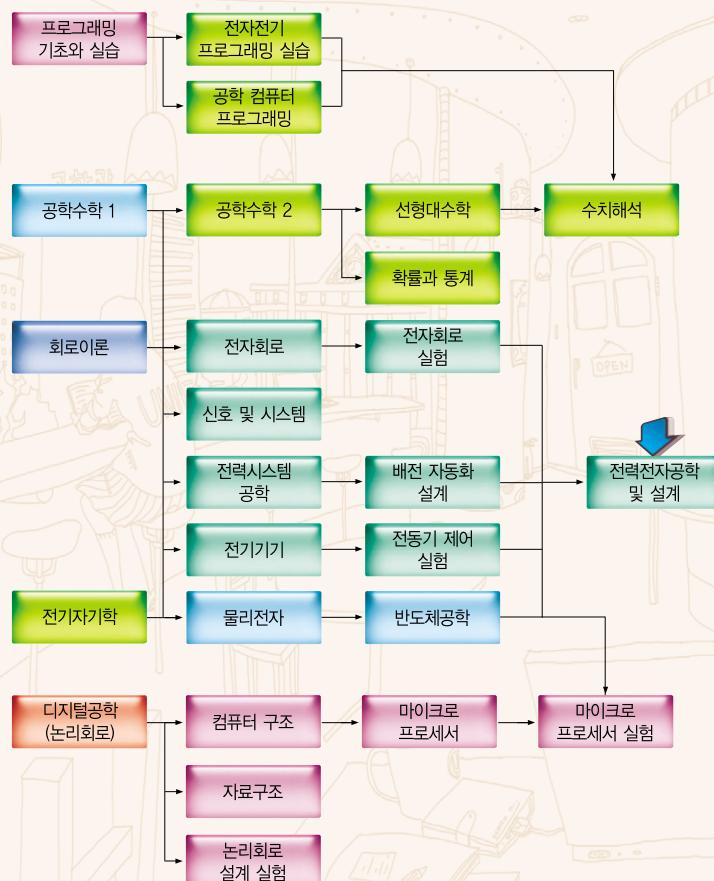
저자 A. M. Trzynadlowski

교과목 학습내용 살펴보기

목표를 세우지 않고 학습할 경우 끈기 있게 학업을 지속하지 못하고 중간에 포기하기 쉽다.

목표를 세우고 그 목표를 향해 전진할 때 현재 학업에 더욱 몰입할 수 있고, 꿈을 이루려는 열정이 강해진다.

전력전자공학에 관련된 과목을 살펴보고 학습 계획을 세워보자.



>>

강의 계획

▶ 무엇을 배우나?

이 책에서는 전력 변환과 제어의 기본적인 형태를 정의하고, 다양한 응용을 위한 전력을 처리하는 전력 컨버터를 제시하고 있다. 또한 다양한 전력용 반도체 스위치와 컨버터의 추가 부품 및 시스템에 대해서 기술한다. 한편 이 책에서는 전력 변환의 기본적인 원리와 방법에서부터 이 분야에서 최근의 개발품에 이르기까지 폭넓은 내용을 제공한다.

❶ 1장 ~ 3장 _전력 변환의 기본원리 및 구성

전력 변환의 기본원리를 이해하기 위한 만능 컨버터의 동작 특성을 학습하고 전력 변환 장치를 구성하는 전력용 반도체 소자의 종류와 특성, 구동회로와 주변 회로 등에 대해 알아본다.

❷ 4장 ~ 5장 _AC-AC 및 AC-AC 컨버터

AC-AC 변환기인 다이오드 정류기, 위상제어 정류기, PWM 정류기의 구조와 동작 특성 및 AC-AC 컨버터의 종류와 특성을 학습한다.

❸ 6장 ~ 7장 _DC-DC 및 DC-AC 컨버터

DC-DC 컨버터의 기본적인 특성을 강압형 초퍼를 중심으로 학습하고, 전압원, 전류원 인버터 및 멀티레벨 인버터의 구조와 동작 특성에 대해 살펴본다.

❹ 8장 ~ 9장 _SMPS 및 신재생에너지

스위칭 파워 서플라이의 기본적인 구성으로 절연형, 비절연형, 공진형 컨버터를 학습하고, 신재생에너지 분야에서 전력전자의 역할에 대해 알아본다.

▶ 표준 스케줄 표

주	해당 장	주제
1	1장	전력 변환의 원리와 방법
2	1장	전력 변환의 원리와 방법
3	2장	전력용 반도체 스위치
4	3장	추가 부품과 시스템
5	4장	AC-DC 컨버터
6	4장	AC-DC 컨버터
7	4장	AC-DC 컨버터
8		중간고사
9	5장	AC-AC 컨버터
10	6장	DC-DC 컨버터
11	7장	DC-AC 컨버터
12	7장	DC-AC 컨버터
13	8장	스위칭 전원공급기
14	8장	스위칭 전원공급기
15	9장	전력전자와 청정에너지
16		기말고사

>>

강의 보조 자료 및 참고 자료

❶ 강의 보조 자료 안내

PPT 자료와 연습문제 해답

- 한빛미디어에서는 교수/강사님들의 효율적인 강의 준비를 위해 온라인과 오프라인으로 강의 보조 자료를 제공합니다.
- 다음 사이트에서 회원으로 가입하신 교수/강사님에게는 교수용 PPT 자료와 연습문제 해답을 제공합니다.
<http://www.hanb.co.kr>
- 온라인에서 자료를 다운받으시려면 교수/강사 회원으로 가입한 후 인증을 거쳐야 합니다.



❷ 부록 CD 구성

- 컴퓨터 과제에서 필요한 PSpice 회로 텍스트 파일과 같은 주제로, 48개의 PSIM 시뮬레이션 파일을 따로 제작하여 CD에 함께 수록하였습니다. 자세한 내용은 CD에 담긴 시뮬레이션 파일 목록을 참고하세요.

❸ 전력전자공학 참고문헌

- Muhammad H. Rashid(백수현 · 홍순찬 · 김희준 공역). 『전력전자공학』. 교보문고, 2005.
- Daniel W. HART(홍순찬 · 전희종 · 백형래 · 원충연 공역). 『PSpice를 활용한 전력전자공학』. 교보문고, 2010.
- 김희준. 『스위치 모드 파워 서플라이』. 성안당, 1993.
- Stephen J. Chapman(안진우 · 신판석 공역). 『전기기기(3판)』. McGraw-Hill Korea, 2001.
- 김상훈. 『DC 및 AC 모터제어』. 복두출판사, 2008.
- 설승기. 『전기기기 제어론』. 흥릉과학출판사, 2007.
- Erwin Kreyszig(김순자 외 12명 공역). 『KREYSZIG 공업수학』. 범한서적, 2009.
- James W. Nilsson(국태용 외 5명 공역). 『회로이론』. 한티미디어, 2005.
- 노의철 · 정규범. 『전력전자공학』. 문운당, 2000.
- Abraham I. Pressmann. Keith Billings. Taylor Morey. 『Switching Power Supply Design』. Third Edition. McGraw Hill, 2009.
- Mohan. Underland. Robbins. 『Power Electronics Converter Applications and Design』. Second Edition. Wiley, 1995.

>>

목차 Contents

저자 및 역자 소개	• 04
역자 머리말	• 05
저자 머리말	• 07

학습 로드맵	• 09
강의 계획	• 10
강의 보조 자료 및 참고 자료	• 11

Chapter 01

전력 변환의 원리와 방법

1.1 | 전력전자란 무엇인가? • 19

1.2 | 만능 전력 컨버터 • 22

1.3 | 파형 성분과 성능지수 • 27

1.4 | 위상제어 • 37

1.5 | 펄스 폭 변조 • 44

1.6 | 전류 파형 계산 • 51

1.6.1 해석 해법 • 51

1.6.2 수치 해법 • 57

1.6.3 실제 예 : 단상 다이오드 정류기 • 60

1.7 | 요약 • 65

:: 예제 • 66

:: 연습문제 • 74

:: 컴퓨터 과제 • 78

:: 참고문헌 • 82

Chapter 02

전력용 반도체 스위치

2.1 | 전력 반도체 스위치의 일반적인 특성 • 85

2.2 | 전력용 다이오드 • 88

2.3 | 반제어 스위치 • 94

2.3.1 SCR • 94

2.3.2 트라이악 • 98

2.4 | 완전제어 스위치 • 100

2.4.1 GTO • 100

2.4.2 IGCT • 101

2.4.3 전력용 BJT • 102

2.4.4 전력용 MOSFET • 106

2.4.5 IGBT • 108

2.5 | 전력용 반도체 스위치의 비교 • 111

2.6 | 전력 모듈 • 114

2.7 | 요약 • 118

:: 참고문헌 • 120

Chapter
03

추가 부품과 시스템

3.1 | 추가 부품과 시스템이란 무엇인가? • 123

3.2 | 구동회로 • 124

 3.2.1 SCR, 트라이악, BCT용 구동회로 • 124

 3.2.2 GTO 및 IGCT용 구동회로 • 127

 3.2.3 BJT용 구동회로 • 128

 3.2.4 전력용 MOSFET과 IGBT용 구동회로 • 131

3.3 | 과전류 보호 방안 • 134

3.4 | 스너버 • 136

 3.4.1 전력용 다이오드, SCR, 트라이악을 위한 스너버 • 140

 3.4.2 GTO 및 IGCT를 위한 스너버 • 141

 3.4.3 트랜지스터를 위한 스너버 • 142

 3.4.4 스너버로부터 에너지 회복 • 144

3.5 | 필터 • 147

3.6 | 냉각 • 150

3.7 | 제어 • 152

3.8 | 요약 • 155

:: 참고문헌 • 156

Chapter
04

AC-DC 컨버터

4.1 | 다이오드 정류기 • 159

 4.1.1 3-펄스 다이오드 정류기 • 159

 4.1.2 6-펄스 다이오드 정류기 • 162

4.2 | 위상제어 정류기 • 176

 4.2.1 6-펄스 위상제어 정류기 • 176

 4.2.2 듀얼 컨버터 • 189

>>

목차 C o n t e n t s

4.3 PWM 정류기 • 196	
4.3.1 입력 필터의 영향 • 196	4.3.2 펄스 폭 변조의 원리 • 197
4.3.3 전류형 PWM 정류기 • 206	4.3.4 전압형 PWM 정류기 • 214
4.4 정류기에 대한 소자 선정 • 224	
4.5 정류기의 일반적인 응용 • 225	
4.6 요약 • 230	
:: 예제 • 232	:: 연습문제 • 239
:: 컴퓨터 과제 • 242	:: 참고문헌 • 246

Chapter
05

AC-AC 컨버터

5.1 AC 전압 제어 • 249	
5.1.1 위상제어 단상 ac 전압 제어기 • 249	
5.1.2 위상제어 3상 ac 전압 제어기 • 257	
5.1.3 PWM ac 전압 제어기 • 267	
5.2 사이클로컨버터 • 272	
5.3 매트릭스 컨버터 • 277	
5.4 AC-AC 컨버터를 위한 소자 선택 • 287	
5.5 AC-AC 컨버터의 일반적인 응용 • 289	
5.6 요약 • 291	
:: 예제 • 292	:: 연습문제 • 298
:: 컴퓨터 과제 • 300	:: 참고문헌 • 302

Chapter
06

DC-DC 컨버터

6.1 정지형 dc 스위치 • 305	
6.2 강압형 초퍼 • 309	
6.2.1 1상한 초퍼 • 311	6.2.2 2상한 초퍼 • 316
6.2.3 1, 2상한 초퍼 • 318	6.2.4 1, 4상한 초퍼 • 321
6.2.5 4상한 초퍼 • 323	
6.3 승압형 초퍼 • 326	

6.4 초퍼에서의 전류제어 • 329	
6.5 초퍼를 위한 소자 선택 • 330	
6.6 초퍼의 일반적인 응용 • 333	
6.7 요약 • 335	
:: 예제 • 336	:: 연습문제 • 339
:: 컴퓨터 과제 • 342	:: 참고문헌 • 344

Chapter
07

DC-AC 컨버터

7.1 전압원 인버터 • 347	
7.1.1 단상 전압원 인버터 • 348	
7.1.2 3상 전압원 인버터 • 357	
7.1.3 전압원 인버터에서 전압 제어 방법 • 363	
7.1.4 전압원 인버터에 대한 전류제어 기법 • 377	
7.2 전류원 인버터 • 385	
7.2.1 3상 구형파 전류원 인버터 • 385	7.2.2 3상 PWM 전류원 인버터 • 389
7.3 멀티레벨 인터버 • 393	
7.4 소프트 스위칭 인버터 • 401	
7.5 인버터에 대한 소자 선택 • 411	
7.6 인버터의 일반적인 응용 • 414	
7.7 요약 • 424	
:: 예제 • 425	:: 연습문제 • 432
:: 컴퓨터 과제 • 435	:: 참고문헌 • 438

Chapter
08

스위칭 전원공급기

8.1 스위칭 전원공급기의 기본형 • 441	
8.2 비절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터 • 443	
8.2.1 강압형 컨버터 • 444	8.2.2 승압형 컨버터 • 448
8.2.3 승강압형 컨버터 • 451	8.2.4 Ćuk 컨버터 • 454
8.2.5 SEPIC과 Zeta 컨버터 • 458	
8.2.6 비절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터의 비교 • 460	

>>

목차 C o n t e n t s

8.3 절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터 • 463	
8.3.1 단일-스위치 절연형 DC-DC 컨버터 • 464	
8.3.2 다중-스위치 절연형 DC-DC 컨버터 • 467	
8.3.3 절연형 스위치 모드 DC-DC 컨버터의 비교 • 471	
8.4 공진형 DC-DC 컨버터 • 473	
8.4.1 유사 공진형 컨버터 • 474	
8.4.2 부하-공진형 컨버터 • 479	
8.4.3 공진형 DC-DC 컨버터의 비교 • 486	
8.5 요약 • 488	
:: 예제 • 490	:: 연습문제 • 493
:: 컴퓨터 과제 • 496	:: 참고문헌 • 498

Chapter
09

전력전자와 청정에너지

9.1 청정에너지 시스템에서 왜 전력전자가 필수적인가 • 501	
9.2 태양광과 풍력의 신재생에너지 시스템 • 503	
9.2.1 태양에너지 시스템 • 503	9.2.2 풍력 에너지 시스템 • 508
9.3 연료전지 시스템 • 514	
9.4 전기 자동차와 하이브리드 자동차 • 517	
9.5 전력전자와 에너지 절약 • 523	
9.6 요약 • 525	
:: 참고문헌 • 526	

Appendix A | PSpice 시뮬레이션 • 527

Appendix B | 푸리에 급수 • 533

Appendix C | 3상 시스템 • 539

찾아보기 • 545

01

전력 변환의 원리와 방법

Principles and Methods of Electric Power Conversion

전력전자란 무엇인가? _1.1

만능 전력 컨버터 _1.2

파형 성분과 성능지수 _1.3

위상제어 _1.4

펄스 폭 변조 _1.5

전류 파형 계산 _1.6

요약 _1.7

예제

연습문제

컴퓨터 과제

참고문헌

학습목표

- 전력전자의 기본원리 및 동작을 이해할 수 있다.
- 만능 전력 컨버터를 이용한 전력 변환 장치의 기초원리를 알고, 동작 특성을 분석할 수 있다.
- 파형의 특성을 나타내는 성능지수의 종류와 정의를 이해할 수 있다.
- 위상제어의 특성과 PWM 제어의 특성을 분석할 수 있다.
- 해석적 방법과 수치해석 방법을 알고, 예제를 통해 전류 파형을 계산할 수 있다.



이 장에서는 전력전자의 범위, 해석도구와 응용에 대한 개요를 설명하였으며, 만능 전력 컨버터 (converter, 변환기)의 개념을 도입하여 전력전자 컨버터의 동작원리 및 수행되는 전력 컨버터의 형태들을 실례를 들어 설명하였다. 그리고 전압과 전류 파형의 구성요소와 이와 관련된 성능지수를 정의하고, 기본적인 두 가지 양적인 제어 방법, 즉 위상제어와 펄스 폭 변조를 제시하였다. 이와 아울러 출력전류 파형의 계산법에 대해 설명하고, 단상 다이오드 정류기를 실제적인 전력 컨버터의 간단한 예로서 설명하였다.

1.1 전력전자란 무엇인가?

편안함을 추구하는 현대 사회는 어디에서나 사용할 수 있는 전기에너지에 많은 부분을 의존하고 있다. 전기는 열과 빛을 제공하고, 전기기계의 공정을 작동시키며, 정보를 수집 및 처리하고, 저장 또는 교환하는 일과 같은 물리적인 일의 대부분을 수행한다.

전력전자(power electronics)는 전력용 반도체 소자를 바탕으로 한 전력 컨버터를 사용하여 전기에너지를 변환하거나 제어하는 전기공학의 한 분야라고 정의할 수 있다. 현재 사용하고 있는 발전 시스템은 고정된 주파수와 크기를 갖는 교류(ac : alternating current) 전압을 전송한다. 일반적으로 가정, 사무실, 상점 그리고 이들과 유사한 적은 설비에는 단상 저전압 전력이 이용되며, 산업 공장들과 그 밖의 대규모 상업 기업에는 다양한 전압레벨을 갖는 3상 공급 시스템이 이용된다.

미국에서 사용되는 60Hz로 고정된 전압의 전력(대부분의 다른 나라에서는 50Hz)은 **상용전력으로 간주되며**, 이 전력을 다른 분야에 사용할 때는 조절하여 사용해야 한다. 전력조절에는 ac에서 직류(dc : direct current) 또는 그 역의 변환과 전압과 전류의 크기 및(또는) 주파수의 제어를 포함한다.

조명을 간단한 예로 들자면, 백열등에는 상용전력이 직접 공급된다. 그러나 형광등에는 전자식 안정기가 필요하며, 이는 아크를 발생시키거나 원하는 조명을 유지시키는 전류를 제어하는 역할을 한다. 따라서 전자식 안정기는 형광등의 적당한 동작을 위해 필요한 장치인 전력조절기에 해당한다. 형광등이 영화관에서 사용될 때는 영화가 시작하기 직전 빛이 점차 희미해지도록 해야 하는데, 이 경우에는 ac 전압 조정기를 이용하여 형광등에 전력을 공급한다. 이때 사용되는 조정기는 전력 조절기 또는 전력 컨버터의 대표적인 예라고 할 수 있다.

전력전자의 탄생은 최초로 수은-아크 정류기가 개발되었던 20세기 초로 거슬러 올라간다. 당시에는 전력을 변환하거나 제어하기 위해 회전하는 전기기계 컨버터(electromachine converter)를 사용하였다. 전기기계 컨버터는 단순히 전동기로 구동되는 전기 발전기였다. 예를 들면 가변 dc 전압을 고정된 ac 전압에서 얻으려면 ac 전동기로 dc 발전기를 구동하여

출력전압을 제어하였다. 반대로 ac 전압이 필요하고, 공급에너지가 배터리 팩일 경우에는 속도가 조절되는 dc 전동기와 ac 동기 발전기를 사용하였다. 하지만 이러한 시스템의 편의성, 효율과 신뢰성은 회전기를 사용하지 않고 에너지를 직접 변환하는, 현대의 정지형 전력전자 컨버터보다 떨어진다.

현대의 전력전자는 1958년에 사이리스터라고도 불리는 제너럴 일렉트릭 사(General Electric Company)의 SCR(silicon-controlled rectifier)의 발전과 더불어 시작되었다. SCR은 단방향 전력용 반도체 소자로, 제어전극인 게이트에 저전력의 전기적 신호를 가함으로써 턠-온(닫힘)된다.

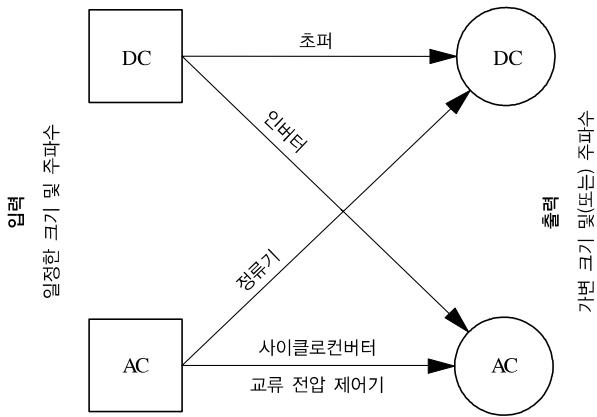
SCR의 전압 및 전류 정격은 모든 전력용 반도체 스위치 중에서 가장 높다. 그러나 SCR은 dc-입력의 전력전자 컨버터에서 사용하기에는 불편하다. 왜냐하면 전류가 흐르고 있을 때 게이트를 제어하여 턠-오프(개방)될 수 없기 때문이다. 따라서 SCR은 반제어(semicontrolled) 스위치이다. 지난 30년 동안 전기적 신호에 의해 켜지거나 꺼지는, 즉 완전제어 전력용 반도체 스위치의 여러 소자들이 시장에 출시되었다. SCR을 비롯한 이 스위치들은 2장에서 자세하게 설명할 것이다.

전기에너지를 배전하거나 사용하는 대부분의 분야에서 전력전자 컨버터를 광범위하게 도입하는 것은 모든 선진국에서 발생하는 매우 혼란 일에 속한다. 컨버터는 전동기 구동, UPS(uninterruptible power supply), 난방장치 및 조명, 전기기계 및 전열 공정, 전기 용접, 고전압 dc 전송, 전력계통에서의 능동전력필터와 무효전력보상기, 컴퓨터 및 다른 전자 장비를 위한 고품질의 전원공급장치 등과 같은 다양한 적용을 위해 전력을 조절한다.

적어도 미국에서 발전되는 전력의 반은 전력 컨버터를 거쳐 전달된다고 추정하고 있다. 그리고 향후 몇십 년 안에 거의 100%까지 증가할 것으로 추정된다. 특히 기존 미국 전력시스템의 완전한 개편이 EPRI(Electric Power Research Institute, 미국 전력연구센터)에서 주도하고 있는 FACTS 프로그램 내에서 계획되고 있다는 사실은 이와 같은 예측을 뒷받침해 준다. 전력생산, 송전 및 배전의 모든 단계에서 전력전자 컨버터의 도입은 발전소와 송전선의 새로운 투자 없이 시스템의 성능을 증가시키는 데 기여한다.

또한 신재생에너지 시스템과 전기 자동차 및 하이브리드 자동차에서 전력전자의 중요성과 역할은 강조할 만하다. 따라서 향후 모든 전기공학자는 어떠한 분야에서든 전력전자 컨버터를 어렵지 않게 접하게 될 것이다.

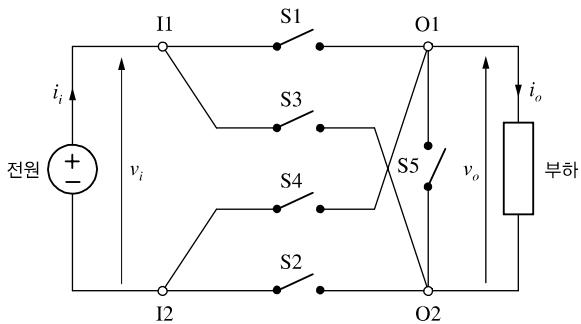
[그림 1-1]은 전력 변환의 종류와 현대의 전력전자에서 채용하고 있는 컨버터를 나타낸다. 예를 들면, AC-DC 변환에는 정류기가 사용되며, 정류기는 ac 전원으로부터 공급되고, 출력 전압은 뚜렷하게 고정 또는 가변될 수 있는 dc 성분을 포함한다. 전력전자 컨버터의 각 개별적인 형태는 4~8장에 걸쳐 설명할 것이다. 전력 변환과 제어의 기본적인 원리는 이 장의 다음 절에서 설명한다.



[그림 1-1] 전력 변환의 종류와 상응하는 전력전자 컨버터

1.2 만능 전력 컨버터

비록 실질적인 장치는 아니지만 [그림 1-2]와 같은 가상의 만능 전력 컨버터(generic power converter)는 전력 변환과 제어의 원리를 설명해 주는 유용한 교육 도구이다. 이는 5개의 스위치로 구성된 2단자 망이다. 스위치 S1과 S2는 입력(공급, supply) 단자인 I1, I2와 출력(부하, load) 단자인 O1, O2 사이를 각각 직접 연결해 준다. 반면 스위치 S3과 S4는 이들 단자쌍을 교차연결해 준다. dc 또는 ac인 전압원은 컨버터를 통해 전력을 부하에 공급한다. 대개 실제적인 부하는 상당한 유도성 성분을 갖는다. 따라서 이후의 논의에서는 저항-유도 부하(resistive-inductive, R-L 부하)로 가정한다. 어떠한 동작 상황에서도 부하전류가 흐를 수 있는 폐회로를 확보하기 위해 다섯 번째 스위치인 S5가 컨버터의 출력단자 사이에 연결되고 스위치 S1부터 S4가 열려 있을 때 닫히게 된다. 그 스위치들은 동시에 열리거나 닫힌다고 가정한다.



[그림 1-2] 만능 전력 컨버터

공급전원은 이상적인 전압원이므로 단락은 없다. 또한 부하전류는 불연속하지 않다. 불연속 부하전류는 부하 인덕턴스에 축적된 전자기적 에너지의 급작스러운 방출을 초래할 수 있으며, 잠재적으로 위험한 높은 과전압이 발생할 수도 있다. 그러므로 만능 전력 컨버터는 다음과 같은 세 가지 상태를 고려해야 한다.

상태 0. 스위치 S1부터 S4는 열려 있고 S5는 닫혀 있다. 출력단자는 단락이며, 만일 부하 전류가 있다면 흐를 수 있는 폐회로를 구성한다. 출력전압은 0이다. 입력단자는 출력단자와 함께 차단되어 입력전류 또한 0이다.

상태 1. 스위치 S1과 S2는 닫혀 있고, 나머지 스위치들은 열려 있다. 출력전압은 입력전압과 같으며, 출력전류는 입력전류와 같다.

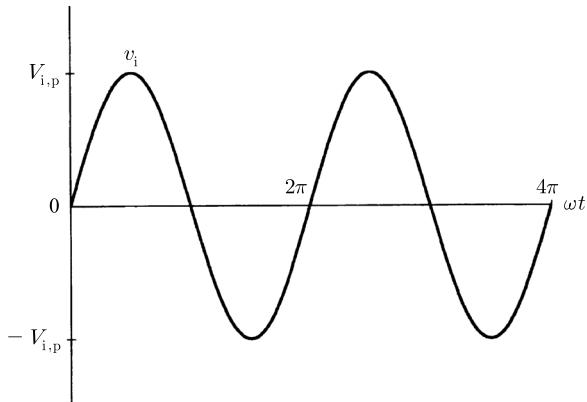
상태 2. 스위치 S3와 S4는 닫혀 있고, 나머지 스위치들은 열려 있다. 출력전압 및 전류는 대응되는 입력과 반대이다.

전압과 전류 파형을 설명하기 위해 만능 전력 컨버터의 입력전압과 RL 부하의 특정한 값을 사용한다. 입력전압의 크기는 ac와 dc 전압 모두 100V로 한다. 부하저항과 인덕턴스는 각각 1.3Ω 과 2.4mH 로 한다. 이들 데이터는 뒤의 그림을 그릴 때와 다음 절의 예제 계산에서 필요하다. 그러나 일반적으로 파형은 크기, 척도 없이 표시한다.

만능 전력 컨버터가 AC-DC 변환을 수행한다고 가정해 보자. [그림 1-3]의 파형인 정현파 입력전압 v_i 는 다음과 같다.

$$v_i = V_{i,p} \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

여기서 $V_{i,p}$ 는 전압의 피크값이고, ω 는 입력 각 주파수이다.



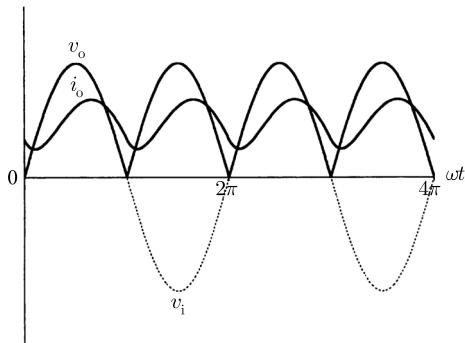
[그림 1-3] 입력 ac 전압 파형

컨버터의 출력전압 v_o 는 가능한 한 큰 dc 성분을 포함해야 한다. 출력전압은 이상적인 dc 특성을 기대할 수 없다. 왜냐하면 이상적인 전압과 전류는 실제적인 전력전자 컨버터뿐만

아니라 만능 전력 컨버터에서도 얻을 수 없기 때문이다. ac-출력 컨버터에서도 이상적인 정현파 출력전압 및 전류에 적용된다. 입력전압의 첫 번째 반주기에서 컨버터가 상태 1이고, 두 번째 반주기에서 상태 2이면 출력전압 파형은 [그림 1-4]와 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$v_o = |v_i| = V_{i,p} |\sin(\omega t)| \quad (1.2)$$

dc 성분은 그 전압의 평균값이다. AC-DC 변환을 수행하는 전력전자 컨버터를 정류기(rectifier)라 한다.



[그림 1-4] 만능 정류기에서 출력전압 및 전류 파형

출력전류 파형 i_o 는 부하 방정식의 수치해로 얻을 수 있다.

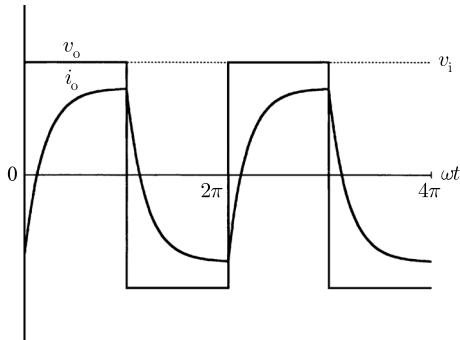
$$L \frac{di_o}{dt} + Ri_o = v_o \quad (1.3)$$

전력전자 회로에서의 전압과 전류 파형에 대한 해석적 계산과 수치적 계산의 기법들은 이 장의 마지막 부분에 설명되어 있다. 여기서는 단지 그 파형들의 일반적인 특성을 개괄적으로 설명한다. [그림 1-4]는 만능 정류기의 출력전류 파형을 나타낸다. 컨버터의 연속적인 논의는 이 그림에 표시되어 있다. 이 전류 파형을 살펴보면 주파수에 종속하는 부하 임피던스로 인해 출력전압 파형보다도 이상적인 dc 파형에 더 근접해 있다는 것을 알 수 있다. 출력전압의 k 번째 고조파(harmonic) $v_{o,k}$ 는 출력전류에 대응되는 고조파 전류 $i_{o,k}$ 를 발생시키며 이는 다음과 같다.

$$I_{o,k} = \frac{V_{o,k}}{\sqrt{R^2 + (k\omega_o L)^2}} \quad (1.4)$$

여기서 $I_{o,k}$ 와 $V_{o,k}$ 는 해당하는 전류와 전압 각 고조파의 실효값(rms : root-mean-square)을 나타낸다. 고려하고 있는 정류기에서 출력전압의 기본파 각 주파수 ω_o 는 입력주파수 ω 보다 2배 높다. 개별적인 전류 고조파에 대한 부하 임피던스[식 (1.4) 우변항의 분모로 표현됨]는 고조파 차수 k 에 따라 증가한다. 출력전류의 dc 성분($k = 0$)은 단지 부하저항값과 같은 가장 낮은 임피던스를 만난다. 반면 부하 인덕턴스는 ac 성분만을 감쇄시킨다. 다시 말해서 RL 부하는 저역통과 필터 역할을 한다. 다음 절에서는 파형의 성분과 고조파 주파수 대역에 관련한 항들에 대해 자세히 설명한다.

흥미롭게도 ac 출력전압이 발생되어야 하고 만능 전력 컨버터가 입력전압이 ‘ $v_i = V_i =$ 일정’인 dc 전원에서 공급된다면 스위치들은 이전 절의 경우와 똑같은 형태로 동작된다. 특히 원하는 출력 주파수의 매 반주기마다 상태 1과 2가 변갈아 가면서 변하게 된다. 이렇게 하여 입력 단자는 출력단자와 교대로 연결과 교차-연결되고 출력전압은 [그림 1-5]에 나타난 것과 같이 ac(비록 정현파는 아니지만) 파형이 얻어진다. 출력전류는 증가와 감소 함수 부분으로 구성되는데, 이는 dc로 구동되는 RL 회로에서의 전형적인 과도 상태 부분을 가리키는 것이다. 다시 부하 인덕턴스의 감소 효과 덕분에 전류 파형은 전압 파형보다 원하는 정현파에 좀 더 근접한다. 실제적으로 DC-AC 전력 변환은 전력전자 인버터에 의해 수행된다. 설명된 경우에서의 만능 인버터는 구형파(square-wave) 모드에서 동작한다고 말한다.



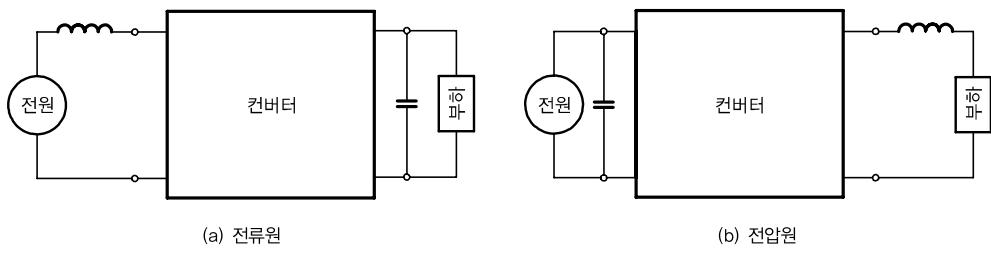
[그림 1-5] 만능 인버터에서 출력전압 및 전류 파형

입력 또는 출력전압이 3상 ac 전압이면 여기에 그려진 만능 전력 컨버터의 형태는 확장될 수 있지만 그것 역시 스위치 망이 된다. 실제 전력전자 컨버터들 또한 전력용 반도체 소자들의 망이다. 인덕터, 커패시터, 퓨즈, 부가회로와 같은 다른 소자들은 다양한 목적을 위해 실제적인 전력전자 컨버터의 전력회로의 스위치 주변에 사용된다. 이 컨버터들의 기본적인 동작원리는 만능 전력 컨버터와 같다. 즉, 입력단자와 출력단자들은 주어진 전력 변환의 형태

에서 요구하는 특정한 형식과 순차에 따라 연결, 교차연결, 그리고 분리된다. 보통, 소개된 만능 정류기와 인버터처럼 부하 인덕턴스는 출력전류 중 스위칭과 관련된 바람직하지 않은 고주파 성분을 억제한다.

비록 만능 전력 컨버터에서 전압원을 고려하였지만 어떤 전력전자 컨버터는 전류원으로부터 공급된다. 이 컨버터에서는 큰 인덕터가 입력전류의 급작스러운 변화를 막기 위해 입력단자와 직렬로 연결된다. 이와 마찬가지로 전압원 컨버터에서는 입력전압을 안정화하기 위해 입력단자와 병렬로 연결된 큰 커패시터를 갖는다. 인덕터와 커패시터는 출력전류 또는 전압을 각각 평활화하기 위해 어떤 컨버터에서는 출력 측에 사용되기도 한다.

회로이론의 원리에 따라 두 개의 이상적인 전류원은 직렬로 연결되어서는 안 되며, 두 개의 이상적인 전압원은 병렬로 연결되어서는 안 된다. 결론적으로 전류원 컨버터의 부하는 전류원으로서 나타날 수 없고, 전압원 컨버터의 부하는 전압원으로서 나타날 수 없다. [그림 1-6]에 나타낸 것처럼, 이는 전류원 전력전자 컨버터에서 커패시터는 부하에 병렬로 연결되어야 한다는 것을 의미한다. 출력전압을 평활화하는 것 외에 커패시터는 어떤 전류가 흐르는 입력인덕턴스가 다른 전류가 도통하고 있는 부하 인덕턴스와 연결되는 잠재적인 위험을 방지하는 역할을 한다. 반대로 전압원 컨버터에서는 어떠한 커패시터도 출력단자에 병렬로 연결되지 않으며, 출력전류를 평활화하는 것은 바로 부하 인덕턴스(또는 컨버터와 부하 사이에 여분의 다른 인덕터)이다.



[그림 1-6] 전력전자 컨버터의 기본적인 구성

1.3 파형 성분과 성능지수

이전 절에서 사용된 dc 성분, ac 성분, 고조파와 같은 용어들은 더 상세하게 탐구할 가치가 있다. 전압과 전류 파형의 기본적인 성분의 고찰은 컴퓨터 성능 평가를 가능하게 한다. 이들 성분들 간의 정해진 관계들은 주로 성능지수(Figures of merit)로서 사용된다.

여기서 전압과 전류의 파형인 시간 함수 $\psi(t)$ 는 주기 T 를 갖는 주기함수로 일컬어지고, 만약 다음과 같으면,

$$\psi(t) = \psi(t + T) \quad (1.5)$$

즉, 그 파형의 형태(모양)는 매 T 초마다 반복된다. 전력전자 영역에서는 시간 영역 대신 각 영역에서 전압과 전류를 해석하는 것이 종종 편리하다. 기본 주파수 f_1 [Hz]은 다음과 같이 정의되고,

$$f_1 = \frac{1}{T} \quad (1.6)$$

대응되는 기본 각 주파수 ω_1 [rad/s]은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (1.7)$$

이제 주기 함수 $\Psi(\omega_1 t)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\psi(\omega_1 t) = \psi(\omega_1 t + 2\pi) \quad (1.8)$$

파형 $\Psi(\omega_1 t)$ 의 실효값 Ψ 는 다음과 같이 정의되고,

$$\Psi \equiv \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi^2(\omega_1 t) d\omega_1 t} \quad (1.9)$$

평균값 또는 dc 성분인 Ψ_{dc} 는 다음과 같은 식으로 된다.

$$\Psi_{dc} \equiv \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\omega_1 t) d\omega_1 t \quad (1.10)$$

dc 성분을 그 파형에서 제거할 때 남는 파형 $\Psi_{ac}(\omega_1 t)$ 는 ac 성분 또는 리플(ripple)이라 한다. 즉, 다음과 같다.

$$\psi_{ac}(\omega_1 t) = \psi_{ac}(\omega_1 t) - \psi_{dc} \quad (1.11)$$

ac 성분은 0의 평균값과 f_1 의 기본 주파수를 갖는다.

$\Psi(\omega_1 t)$ 의 실효값 Ψ_{ac} 는 다음으로 정의되고,

$$\Psi_{ac} \equiv \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi_{ac}^2(\omega_1 t) d\omega_1 t} \quad (1.12)$$

다음 관계를 쉽게 보일 수 있다.

$$\Psi^2 = \Psi_{dc}^2 + \Psi_{ac}^2 \quad (1.13)$$

정류기의 부하 전류와 같이 이상적으로 바람직한 품질의 dc 파형에서 리플률(RF : ripple factor)이라고 하는 성능지수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$RF = \frac{\Psi_{ac}}{\Psi_{dc}} \quad (1.14)$$

작은 값의 리플률은 높은 품질의 파형임을 나타낸다.

다른 파형과 성능지수를 논의하기에 앞서 이제까지 언급된 용어와 식들은 [그림 1-4]에 나타낸 것과 같이 만능 정류기의 출력전압 v_o 를 사용한다. 파형의 형태는 매 π 라디안마다 반복

되며, 0에서 π 구간 사이에서 $v_o = v_i$ 이다. 따라서 출력전압의 평균값 $V_{o,dc}$ 는 $\omega t = 0$ 에서 $\omega t = \pi$ 까지 그 파형의 면적을 계산하고, 길이 π 로 나눔으로써 가장 편하게 결정될 수 있다. 따라서,

$$V_{o,dc} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_{i,p} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} V_{i,p} = 0.64 V_{i,p} \quad (1.15)$$

식 (1.15)는 식 (1.10)과 다르다는 것에 주목하라. $\omega_1 = \omega_0 = 2\omega$ 이므로, 적분은 $\omega_1 t$ 의 구간 0~ 2π 대신 ωt 의 구간 0~ π 에서 수행된다.

이와 마찬가지로 출력전압의 실효값 V_o 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$V_0 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (V_{i,p} \sin \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{i,p}}{\sqrt{2}} = 0.71 V_{i,p} \quad (1.16)$$

이 결과는 정현파에서 $v_o^2 = v_i^2$ 으로 잘 알려진 관계와 일치한다.

식 (1.13)과 (1.14)에 근거하여 해당 전압의 ac 성분의 실효값 $V_{o,ac}$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$V_{o,ac} = \sqrt{V_0^2 - V_{0,dc}^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{i,p}}{\sqrt{2}}\right)^2 - \left(\frac{2}{\pi} V_{i,p}\right)^2} = 0.31 V_{i,p} \quad (1.17)$$

그리고 전압의 리플률 RF_V는 다음과 같다.

$$\text{RF}_V = \frac{V_{0,ac}}{V_{0,dc}} = \frac{0.31 V_{i,p}}{0.64 V_{i,p}} = 0.48 \quad (1.18)$$

[그림 1-7]은 해석하고 있는 파형에서 dc와 ac 성분의 분해를 나타낸다.