

OHM

大学参考教材系列

电机学

(下)

(日) 冈田隆夫 大西和夫 著
仁田旦三 白井康之
洪纯一 译
吕砚山 校



科学出版社
www.sciencep.com

OHM 大学参考教材系列

电机学

(下)

[日] 冈田隆夫 大西和夫 著
仁田旦三 白井康之
洪纯一 译
吕砚山 校

科学出版社
北京

图字:01-2003-4414 号

Original Japanese language edition

Dai gaku katei Denki kiki(2)(kaitei 2 han)

By Takao Okada, Kazuo Onishi, Tanzou Nitta and Yasuyuki Shirai

Copyright © 1995 by Takao Okada, Kazuo Onishi, Tanzou Nitta and Yasuyuki Shirai

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

大学課程

電気機器 (2) (改訂2版)

岡田 隆夫・大西 和夫
仁田 旦三・白井 康之

オーム社 1995

图书在版编目(CIP)数据

电机学(下)/(日)冈田隆夫等著;洪纯一译. —北京:科学出版社,2003

(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-011592-9

I. 电… II. ①冈… ②洪… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 049743 号

责任编辑 崔炳哲 **责任制作** 魏 谨

责任印制 刘士平 **封面设计** 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年9月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2003年9月第一次印刷 印张:6 3/8

印数:1—5 000

字数:163 000

定 价: 15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

“对于初学电机学的学生,从电机的基本知识到在最新尖端技术方面的应用,总该有一本通俗易懂的理想教科书吧。”遵照这一目标,执笔编写并出版了《大学课程 电机学(上)(修订2版)》以及作为她的姊妹篇的本书——《大学课程 电机学(下)(修订2版)》。

初版的上、下卷都是由林千博博士和仁田工吉博士合编的。编写重点放在电机的硬件方面,说起来是面向设计者的;两卷修订2版都是在保留初版特征的同时,采取了以用户为主的编写方针。也就是说,在上卷中,从变压器开始,在讲述各种电机的基本事项的同时,更多地注重记述它们的应用领域。下卷更是把重点放在面向用户的说明上面,讲述了以电力电子技术为支柱的各种电机的应用,最近的控制用电机以及超导电机等有关内容。

第1、2章,对电力电子技术范畴内的基础知识作了通俗的介绍,并尽可能地用计算式来说明,以便可以推导出动态特性。另外,在可能的范围内也包括了最近的应用。第3章,对旋转电机的动态特性所需要的坐标变换和计算方法作了阐述;第4章,根据近年来小型电动机比大型电动机使用上更流行的现状,作了有关的评述;第5章介绍超导电机,因为正处于开发之中有待于实用化,所以只涉及有关的超导基础部分,并对应用超导的电机电器作了概述。

以上是遵循开头的宗旨汇总的一些想法,但受篇幅所

限,想必存在未能充分说明白的地方,或许还有欠缺之处。与(上)卷一样,如果能对学习电机的读者有所帮助,甚感荣幸。

最后,从策划到编写的过程中,得到欧姆社出版部诸位同仁的很多关照,在此深表谢意。

作者谨记

著者简介

冈田隆夫 (第5章)

1955年 京都大学工学部毕业

1962年 获工学博士学位

现在 关西大学教授

京都大学名誉教授

大西和夫 (2.2节, 第4章)

1955年 京都大学工学部毕业

现在 日本伺服株式会社 常务董事

仁田旦三 (第1章, 第3章, 2.3节)

1967年 京都大学工学部毕业

1978年 获工学博士学位

现在 京都大学副教授

白井康之 (2.1节)

1980年 京都大学工学部毕业

1988年 获工学博士学位

现在 京都大学助教

目 录

第 1 章 电力电子技术基础	1
1.1 开关元件	2
1.1.1 二极管	3
1.1.2 晶体管	3
1.1.3 晶闸管	6
1.1.4 保护电路	9
1.1.5 各种开关元件的比较	10
1.2 整流器	12
1.2.1 单相半波整流电路	12
1.2.2 单相全波整流电路	13
1.2.3 P 相半波整流电路	15
1.2.4 变压器漏抗与换相重叠	16
1.2.5 实用整流电路	19
1.2.6 直流电压的脉动分量、交流电流的高次谐波、无功功率	23
1.3 他励式逆变器	27
1.4 交流开关	28
1.5 交-交变频器	30
1.6 直流斩波电路	32
1.7 逆变器	36
1.7.1 谐振型逆变器	36
1.7.2 方波型逆变器	39
1.8 零电压、零电流开关	44

1.8.1 零电压开关 45

1.8.2 零电流开关 47

练习题 48

第2章 电力电子技术的应用 50

2.1 电源装置方面的应用 50

2.1.1 电源装置和电力电子技术 50

2.1.2 直流电源 51

2.1.3 频率变换装置和不间断电源装置 56

2.1.4 电子电路用电源电路 61

2.1.5 高频电源 67

2.2 电动机控制方面的应用 71

2.2.1 电动机控制系统 71

2.2.2 直流电动机的控制 72

2.2.3 感应电动机的控制 77

2.2.4 同步电动机的控制 86

2.3 电力系统方面的应用 94

2.3.1 变电设备方面的应用 95

2.3.2 直流输电及频率变换 99

2.3.3 在发电站中的应用 100

2.3.4 其他 102

练习题 103

第3章 电机的动态特性 106

3.1 电动机、发电机的转矩和运动方程式 106

3.1.1 转矩 106

3.1.2 运动方程式 109

3.2 坐标变换 111

3.2.1 $0-\alpha-\beta$ 变换 111

3.2.2	0-d-q 变换	112
3.2.3	对称坐标变换	115
3.2.4	f-b 变换	117
3.3	感应机的基本公式	117
3.4	同步机的基本公式	123
3.5	直流机的基本公式	130
练习题		130

第 4 章 控制用电机 132

4.1	电磁力产生的原理	132
4.2	直流电动机	134
4.2.1	构造	134
4.2.2	静态特性	136
4.2.3	动态特性	138
4.2.4	性能评价指标	138
4.3	直线型直流电动机	140
4.3.1	音圈电动机(VCM)	140
4.3.2	可动磁铁型直线 DC 电动机	141
4.3.3	永久磁铁磁路	141
4.4	控制用感应电动机	143
4.4.1	普通感应电动机	143
4.4.2	二相伺服电动机	143
4.5	同步电动机	144
4.5.1	永磁式同步电动机	145
4.5.2	磁阻式同步电动机	147
4.5.3	磁滞电动机	149
4.6	步进电动机	151
4.7	无刷电动机	155
4.8	旋转传感器	158

4.8.1	旋转变压器和自整角机	159
4.8.2	旋转编码器	161
	练习题	163
第 5 章	超导电机	164
5.1	超导的基础	164
5.1.1	超导体	164
5.1.2	临界温度、临界磁场	165
5.1.3	完全反磁性	165
5.1.4	第一类超导体和第二类超导体	167
5.2	超导磁技术	170
5.2.1	超导磁体用的线材	170
5.2.2	超导磁体的不稳定性及其稳定化	171
5.2.3	实用超导导线	173
5.2.4	超导磁体系统	174
5.3	超导电机	176
5.3.1	应用超导的电机	176
5.3.2	直流电机	176
5.3.3	超导同步发电机	178
5.3.4	交流电机	181
5.3.5	磁悬浮列车方面的应用	182
5.3.6	MRI 用超导磁体	183
5.3.7	超导储能装置	185
	练习题简答	187

第 1 章 电力电子技术基础

交流变直流、直流变交流以及对应于信号的电压控制等大功率的变换技术，从历史来看，作为开关元件，以前是用真空管开关器件的水银整流器、旋转机械的交磁放大机等实现的。

本章所述的电力电子技术，讲的是用半导体开关元件进行电力变换的控制技术及其应用的领域。这个开关起着重要的作用。

在通常的线性电路中，用于功率的变换控制的放大器，其效率不超过 25%。在处理大功率的场合，效率低，不仅自身不经济，而且功耗几乎都变成热耗，从而导致处理上的问题及装置的增大等缺点。

对此，利用开关特性进行高效率的功率变换控制，这就是电力电子技术。随着开关元件性能的进一步提高，进行电力变换不仅是高效率的而且变得非常优秀，还能期待着它的更进一步的提高。

本章，简单地介绍有关电力电子技术上用到的开关元件，然后讲述基本的电力变换电路（交流-直流变换、交流-交流变换，直流-直流变换、直流-交流变换）。

1.1 | 开关元件

下面介绍利用开关作用,以电力变换为目的的半导体开关元件。首先介绍一般的开关之后,再进一步介绍实用的半导体开关。

输入信号使开关处于导通或断开状态。在理想的情况下,一有导通信号,希望立刻处于完全导通的状态。但实际上,半导体开关从开始导通到完全导通需要时间,这段时间叫做导通时间。关断同样也需要关断时间。如图 1.1 所示,在理想的情况下,在导通状态,开关电压为 0(A 点);在断开状态,开关电流为 0(B 点)。但是,实际的半导体开关,则稍微有点电压^{*}(A'点)和电流¹⁾(B'点)。

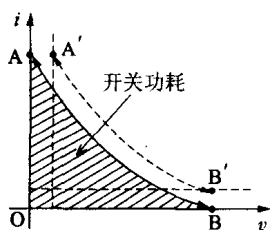


图 1.1 开关的导通和关断

在这里,如果考虑在导通的过程中开关的过渡状态,应该是断开状态(B 或 B')的开关变成导通状态(A 或 A')。所以,对于导通的过渡状态来说,应是如图 1.1 所示的电压电流的轨迹。考虑到导通状态电压为 0,断开状态电流为 0 的理想开关,那么 OAB 所包围的面积就是开关过渡时的损耗。如果开关过程按理想开关

来考虑,则它的过渡轨迹在坐标轴上。

正如下面所说,半导体开关元件有很多种。它的分类可按 PN 结的数目进行区分,也可按开关元件接到导通或断开信号后本身有无导通、关断的能力来进行分类。凡接到导通信号,能变成导通状态的元件叫做有自导通能力的元件;接到断开信号,能变成断开状态的元件,叫做有自关断能力的元件。

* 原文误为电流和电压。——译者注

1.1.1 二极管

具有一个 PN 结的二极管是开关元件中最基本的元件。电力电子技术中所用的二极管与用于一般电子线路中的二极管没有本质上的区别。二极管的符号和基本电压电流特性如图 1.2 所示。

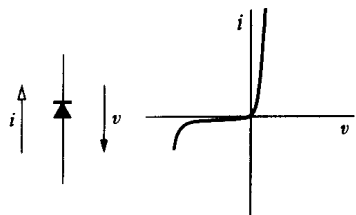


图 1.2 二极管的符号和特性

它的导通或关断状态取决于周围电路的状态。即二极管受到外电路的正向电压时，二极管为导通状态；而当外电路使二极管的电流为零时，二极管则处于关断状态。因此，二极管本身既没有自导通能力也没有自关断的能力。

规定的使用条件要在下面所述的额定值范围内。

- 关于能够保持关断状态的反向电压，分别给出的是直流反向电压、根据商用频率的重覆反向电压、峰值非重复反向电压。
- 关于电流的额定值，是按正向有效值、平均值、浪涌电流值及决定保护二极管用的熔断器规格的电流平方时间积等给出的。
- 其他，还给出了与温度有关的热阻，与电性能有关的反向电流、正向电压降等。
- 必须在额定值范围内选择使用的元件。

1.1.2 晶体管

晶体管是具有 2 个 PN 结的开关元件。在电子电路中应用它的线性放大功能，而在电力电子技术中则应用它的阻断状态和饱和导通状态。

在电力电子技术中使用的晶体管和电子线路中应用的是同样的双结晶体管和 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属-氧化物-半导体场效应晶体管)，进而还有兼备双结晶体管和 MOS 场效应管性质的 IGBT (Insulated Gate Bipolar Tran-

sistor, 绝缘栅双极型晶体管)。

1. 双结晶体管

双结晶体管的符号及电压电流特性如图 1.3 所示,是一种根据基极电流的有无来形成导通或者关断状态的开关器件,也就是说它具有自导通和自关断的特性。

在额定值方面,给出与电压有关的集电极-发射极间电压、集电极-基极间电压、发射极-基极间电压的允许值;与电流有关的集电极电流、基极电流的允许值。其他方面与二极管的情况相同,给出与温度有关的热阻、集电极功耗等。

作为电特性,给出了集电极截止电流、发射极截止电流、电流放大倍数、集电极-发射极饱和压降、基极-发射极饱和压降、导通时间、关断时间等。

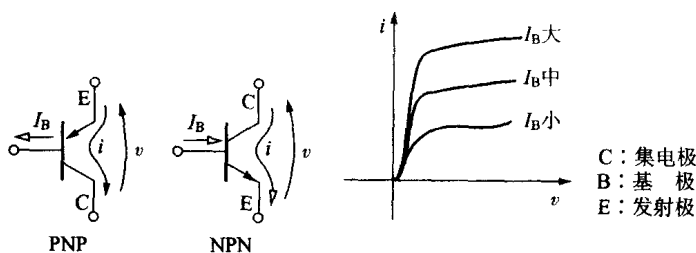


图 1.3 双结晶体管的符号和特性

2. MOSFET

MOSFET 的符号及漏极-栅极间电压与漏极电流特性如图 1.4 所示。通过施加或者除去栅极电压,使漏极-源极间导通或者关断,因而具有自导通和自关断特性。与电流控制型的双结晶体管相比,具有工作频率高的特点;另外,由于是电压控制型,故有控制回路功耗低的特点。但目前存在的缺点是容量小和正向压降较大。

额定值有,漏极-源极间电压、栅极-源极间电压、漏极电流、漏极脉冲电流、漏极功耗、沟道温度、保存温度等;电特性方面有:漏极-源极间

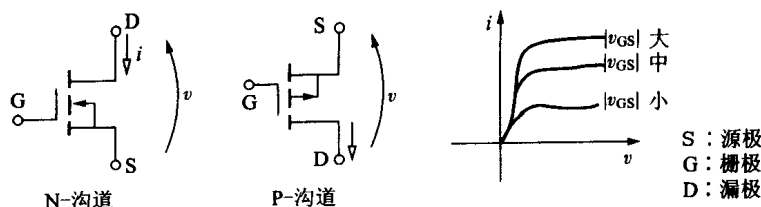


图 1.4 MOSFET 的符号和特性

击穿电压、栅极-源极间漏电流、漏极电流、栅极-源极间阈值电压、漏极-源极间导通电压、漏极-源极间导通电阻，以及导通迟滞时间等。

3. IGBT

IGBT 是兼备着 MOSFET 的高速开关特性和双结晶体管的大功率特性的器件。也就是说，从开关信号来看是与 MOSFET 同样的电压控制，如果从主电路方面看，就是双结晶体管。它作为高频大功率开关器件得到了广泛的应用。它的符号及集电极-发射极间电压与集电极电流特性如图 1.5 所示。具有自导通和自关断的特性。作为额定值，同样可以举出，如集电极-发射极间电压、栅极-发射极间电压、集电极电流、PN 结温度、保存温度；作为电特性的有集电极-发射极间电压降、集电极电流、栅极-发射极间漏电流、栅极-发射极间的阈值电压等。

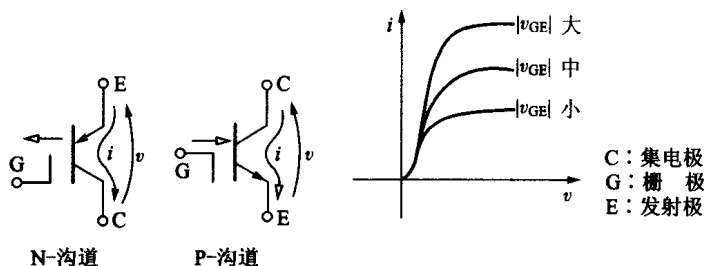


图 1.5 IGBT 的符号和特性

4. SIT

SIT(Static Induction Transistor, 静电感应晶体管)是利用在栅极上施加反向电压造成断开状态, 而除去栅极负电压, 则造成导通状态的器件。总之, 通常是处在导通状态(常闭), 近年来也制作了常开的器件。它们有着与 MOSFET 相同的特性, 但有可能比 MOSFET 的耐压高, 电流也大。

1.1.3 晶闸管

具有 3 个以上的 PN 结的开关器件的总称叫做晶闸管。晶闸管的种类很多, 但一般所说的晶闸管是指反向阻断型三端晶闸管。

1. 逆阻型三端晶闸管

PN 结的组合模式和符号及伏安特性如图 1.6 所示。正向电压和反向电压下都处于阻断状态, 但当正向电压高出一定值(转折电压)以上时, 就变成导通状态。在转折电压值以下的正向电压下, 处于阻断状态的晶闸管的门极上施加时间宽度为数微秒至数百微秒的脉冲电流时, 晶闸管也会变成导通。要想变成阻断状态, 要由外电路施加反向电压使电流为零才行。总之, 逆阻型三端晶闸管没有自关断能力。没有自关断能力的晶闸管能够得到广泛应用的一个理由是因为它具有只需很少的一点电流在很短的时间内流过门极, 晶闸管就能导通的这一特征。

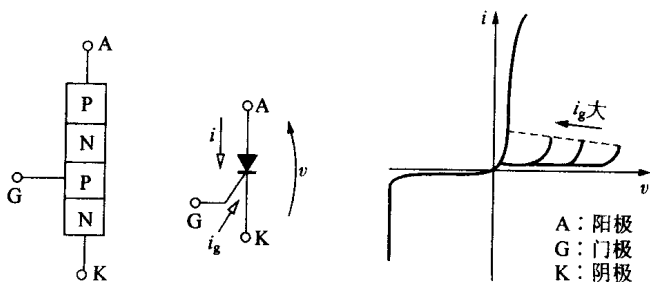


图 1.6 晶闸管的符号和特性

作为额定值,在反向电压方面有与二极管相同的一些参数;对于正向电压,作为能够保持住阻断状态的电压,给出了峰值重覆电压、峰值非重覆电压、直流阻断电压等。有关电流的有,导通电流有效值、平均值、浪涌电流值、电流平方时间积、导通电流临界上升率(di/dt)等。关于门极参数有,门极峰值功耗、平均功耗、门极正向峰值电压、门极反向峰值电压以及门极正向峰值电流等。其他还有 PN 结温度、保存温度等。此外,作为电性能,有反向电流、导通电流、导通电压、阻断电压、阻断电压临界上升率(dv/dt)、门极触发电压、门极不触发电压、门极触发电流、热阻等。

就以上各项名称而言,需要了解的内容很多,在此仅对导通电流的临界上升率(di/dt)和阻断电压临界上升率(dv/dt)作以下的介绍。

导通电流临界上升率(di/dt)之所以要规定额定值,是因为在门极施加触发信号使晶体管变成导通的情况下,如果 di/dt 过大,由于电流汇集在器件的门极周围,因而器件有遭破坏的可能,这一点,可用导通过程的模型图来说明。图 1.7 是电流通过横截面的模型图,它表示电流是随时间的推移向整个截面逐步扩展的,要想不损坏元件,必须在 di/dt 的允许值以下使用。

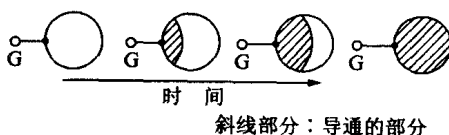


图 1.7 di/dt 的说明: 随着时间的推移, 门极附近的电流向整个截面扩展

阻断电压临界上升率要有限制的理由是, 因为结合部有电容量 C , 则 $C(dv/dt)$ 可被看成在接合部流动的电流, 它有可能正好起门极电流的作用, 使得在正向电压关断状态下的晶闸管, 即使没有外加门极信号, 也可能导通。为了防止误触发, 电压上升率必须在允许值以下使用。