

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一,结合工程案例介绍了电力电子技术为实现高比例可再生能源发电与并网,实现储能的功率高效转换,实现交直流电网的柔性互联等方面的应用。本书主要内容包括电力电子技术基础知识、智能配电网中的分布式光伏发电技术、智能配电网中储能技术的应用、智能配电网中的电动汽车直流充电技术、智能配电网中的电能质量控制与补偿技术、智能配电网中的直流配电技术等。

本书对从事智能配电网研究等方面工作的技术人员具有一定的参考价值,也可以作为电气工程或新能源专业本科生、研究生案例化教学的教材,以及从事电力相关行业人员的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术在智能配电网中的应用 / 张亮等
编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2018. 12
(新能源发电并网技术丛书)
ISBN 978-7-5170-7271-3

I. ①现… II. ①张… III. ①电力电子技术—应用—
智能控制—配电系统 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第298008号

书 名	新能源发电并网技术丛书 现代电力电子技术在智能配电网中的应用 XIANDAI DIANLI DIANZI JISHU ZAI ZHINENG PEIDIANWANG ZHONG DE YINGYONG
作 者	张亮 陶以彬 霍群海 李建林 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.5印张 301千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
定 价	52.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛 书 编 委 会

主 任 丁 杰

副主任 朱凌志 吴福保

委 员 (按姓氏拼音排序)

陈 宁 崔 方 赫卫国 秦筱迪

陶以彬 许晓慧 杨 波 叶季蕾

张军军 周 海 周邺飞

本书编委会

主 编 张 亮

副 主 编 陶以彬 霍群海 李建林

参编人员 杨 婷 水恒华 杨 波 袁宇波

李官军 周 晨 韦统振 王金浩

陈国栋 陈 刚 沈培锋 张子阳

路小俊 袁晓冬 陈 兵 雷 达

王 鹏 张建平 景巍巍 吴永杰

徐晓春 吴晓飞 孙 军 周永荣

王 忠 顾 阳 李大兴 余豪杰

姜风雷



随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始在能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机容量2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为主。光伏发电装机容量预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

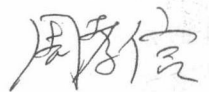
新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会的广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多

个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源并网技术方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业的发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风电、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研发应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、新能源发电建模与仿真技术、数值天气预报产品在新能源功率预测中的应用、光伏发电认证及实证技术、新能源调度技术与并网管理、分布式电源并网运行控制技术、电力电子技术在智能配电网中的应用等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院等单位在新能源发电并网领域的探索、实践以及在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长：





能源是工业生产和社会发展的基础，电能作为一种可灵活方便使用的二次能源形式，一直被世界各国重点关注和研究，大规模开发和利用新能源、建设安全高效的智能电网已成为包括中国在内的诸多国家能源发展和电力变革的战略部署。配电网是智能电网的主体，是广大用户安全、可靠、经济用电的保障。以分布式光伏为代表的可再生能源高比例接入、以电动汽车为代表的新一代负荷出现、以电化学储能为代表的用户侧电力储能投产、以有源电力滤波器为代表的定制电力技术，以及直流配电系统的示范，使得配电网的电力电子化趋势也越来越显著，也对配电网智能运行和控制提出了更高的要求。

电力电子技术是利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科，是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科，是一门多学科相互渗透的综合性学科。近二十多年来，伴随着半导体材料和信息技术的巨大进步，电力电子技术得到空前发展和推广应用。利用先进的电力电子技术可以实现高比例可再生能源发电与并网，可以实现储能的功率高效转换，可以实现交直流电网的柔性互联，还可以提升配电网的电能质量、可靠性与运行效率等。因此，本书旨在简要概述电力电子基础知识的基础上，分别给出其在上述几个方面的典型应用介绍和案例分析。

全书共分6章，具体内容如下：

第1章，介绍了电力电子技术基础知识，包括电力电子器件概述和分类、两电平变换器及器件串并联技术、大容量多电平变换器和电力电子变换器的脉冲调制技术。其中：电力电子器件的介绍以目前应用最为广泛的MOSFET和IGBT为主，同时简单描述了以GaN器件为代表的新一代宽禁带器件的工作原理和特征；多电平变换器技术主要介绍了几个主流拓扑和工作原理，如二极管钳位型多电平变换器、H桥级联型多电平变换器以及模块化多电平变换器；PWM调制技术部分则重点介绍了正弦脉宽调制技术

(SPWM)、载波移相 SPWM 调制技术和空间矢量 PWM 调制技术。

第 2 章,介绍了智能配电网中的分布式光伏发电技术,主要包括太阳能电池技术、光伏发电并网系统的体系结构、分布式光伏发电的并网控制技术和三相光伏逆变器典型样机设计案例等。重点介绍了太阳能电池技术的分类与发展、光伏逆变器的拓扑结构,以及几种典型的光伏并网控制策略,如并网电流控制技术、最大功率跟踪技术、孤岛检测方法和低电压穿越技术等。

第 3 章,介绍了智能配电网中储能技术的应用,主要包括电池本体及管理技术、储能变流器拓扑及运行控制技术,以及储能技术在配电网中的应用和典型案例分析。重点介绍包括液流电池、飞轮电池在内的几种常见储能电池种类和管理系统组成,低压及高压储能 PCS 拓扑结构,典型运行控制策略,如并离网切换控制、多机协调控制、下垂控制等。介绍了储能参与削峰填谷、提高新能源消纳等一些常见应用。最后,给出了一些具有代表性的工程案例。

第 4 章,介绍了智能配电网中的电动汽车直流充电技术,主要包括电动汽车直流充电桩系统构成、VIENNA 整流器的工作原理与控制策略、LLC 谐振变换器的运行机理和稳态特性、智能配电网中的 V2G 技术,以及电动汽车直流充电桩设计案例等。重点介绍了 VIENNA 整流器工作原理和控制系统设计、LLC 谐振变换器的典型工作模式和稳态特性分析,最后结合具体案例,针对某直流充电桩样机设计需求,介绍了样机电路拓扑选型、控制策略设计和实验等环节。

第 5 章,介绍了智能配电网中的电能质量控制与补偿技术,主要包括智能配电网中的典型电能质量问题、智能配电网中的电能质量补偿技术、智能配电网中的电能质量补偿新设备,以及多台 D-FACTS 在智能配电网中的综合应用等。重点介绍了电能质量定义、种类及危害,电能质量的检测方法和补偿控制,电能质量补偿新设备,如柔性多状态开关、电力电子变压器、统一电能质量控制器等。

第 6 章,介绍了智能配电网中的直流配电技术,主要包括直流配电技术概述、直流配电网的拓扑结构与运行控制、直流配电技术的控制与保护设计,以及柔性直流智能配电网的应用等。重点介绍了直流配电技术的国内外研究现状和主要问题,直流配电网的网架类型、接线方式、接地方式、电压等级,直流配电网潮流计算、系统控制及保护等。最后,在案例分析环节,简要描述了某知名直流配电示范工程的相关设计。

本书在编写过程中，参阅了本领域诸多前辈和一线专家的工作成果，借鉴和引用了大量已有文献及部分最新工程项目数据，在此对中国科学院电工研究所、中国电力科学研究院有限公司、国网江苏省电力有限公司、国网山西省电力公司、南瑞集团有限公司、上海电气集团股份有限公司、国网河南省电力公司、盾石磁能科技有限责任公司、国网冀北电力有限公司、国网福建省电力有限公司等单位及专家所给予的资料支持、框架结构建议、案例选材、内容修改以及校核等，表示衷心的感谢！另外，对曾在本人或编写团队所在课题组从事相关研究以及参加本书编写过程中资料整理、文字撰写、图表绘编以及内容提供的一些研究人员及学生，也表示最诚挚的谢意，他们分别是姜风雷、陆永灿、张丹、周阿毛、裴谦、余豪杰、勒涛、殷实、胡安平、郭心铭、粟梦涵、孙海洋、周彬、徐靖楠、沈兴来、安薇薇、花婷等。

本书的基本结构和主要内容是经编委会分章节多次研讨后确定，第1章由张亮主编，杨婷和水恒华参编完成；第2章由张亮主编，杨婷、水恒华、李官军、杨波、吴永杰、吴晓飞、李大兴、余豪杰等参编完成；第3章由陶以彬主编，李建林、周晨、张亮、张子阳、沈培锋、张建平等人参编完成；第4章由张亮主编，杨婷、水恒华、姜风雷、路小俊、袁晓冬、孙军、周永荣、顾阳等参编完成；第5章由霍群海主编，杨婷、张亮、陈兵、韦统振、王金浩、陈刚、陈国栋、王鹏、雷达、水恒华等人参编完成；第6章由霍群海主编，杨婷、张亮、袁宇波、景巍巍、徐晓春、王忠等人参编完成。全书由张亮统稿。

另外，本书的成稿，还要特别感谢一些科研项目所提供的各种支持：

(1) 江苏省重点研发计划课题——交直流混合微电网分布式电源柔性互联设备研发 (BE2017169)。

(2) 国家电网江苏省电力有限公司科技项目 (J2018076)、南瑞集团有限公司—智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放课题资助。

(3) 国家重点研发计划课题——10MW/40MWH 液流电池系统的成组设计集成与智能控制 (2017YFB0903504)。

(4) 中国科学院青年创新促进会 (2017180)、江苏省第十二批六大人才高峰计划 (2015-ZNDW-008)、江苏省第五批 333 高层次人才工程，以及南京工程学院校级教材建设项目。

作者从事本科和研究生教学多年来，一直希望组织编写一本内容深入浅出、工程案例丰富、能够满足电气工程领域工程技术人员或高年级学生

不同专业方向需求的专业参考书籍或教材，以起到抛砖引玉作用。但是，因为学识和水平所限，本人在组织编写书稿期间常感到力不从心，故从2017年开始，经多次征询意见、研讨、修稿和变更调整，亦不敢轻易付梓，特别感谢煎熬过程中出版社的鼓励和耐心帮助，以及多个单位专家的建议和意见。恳请读者在阅读时，针对因作者学识、教龄和专业水平所限，以及时间上的紧迫，所造成的一些相关内容并未能在本书中得到深入阐述和全方位反映，给予谅解。此外，书中内容也难免有不当或者错误之处，也敬请有关专家和各位读者给予批评和指正。

作者

2018年9月



序
前言

第1章 电力电子技术基础知识	1
1.1 电力电子器件概述和分类	1
1.2 两电平变换器及器件串并联技术	29
1.3 大容量多电平变换器	33
1.4 电力电子变换器的脉冲调制技术	36
参考文献	44
第2章 智能配电网中的分布式光伏发电技术	48
2.1 太阳能电池技术	49
2.2 光伏发电并网系统的体系结构	53
2.3 分布式光伏发电的并网控制技术	59
2.4 案例分析——某三相光伏逆变器样机设计	68
参考文献	72
第3章 智能配电网中储能技术的应用	75
3.1 电池储能技术	76
3.2 储能变流器拓扑及运行控制技术	84
3.3 储能技术在配电网中的应用	94
3.4 典型案例分析	100
参考文献	109
第4章 智能配电网中的电动汽车直流充电技术	112
4.1 电动汽车直流充电桩系统构成	113
4.2 VIENNA 整流器的工作原理与控制策略	116
4.3 LLC 谐振变换器的运行机理与稳态特性	123
4.4 智能配电网中的 V2G 技术	133

4.5 案例分析——电动汽车直流充电桩设计	135
参考文献	138
第5章 智能配电网中的电能质量控制与补偿技术	141
5.1 智能配电网中的典型电能质量问题	141
5.2 智能配电网中的电能质量补偿技术	146
5.3 智能配电网中的电能质量补偿新设备	164
5.4 多台 D-FACTS 在智能配电网中的综合应用	169
参考文献	176
第6章 智能配电网中的直流配电技术	179
6.1 直流配电技术概述	179
6.2 直流配电网的拓扑结构及运行控制	182
6.3 直流配电技术的控制与保护设计	186
6.4 柔性直流智能配电网的应用	195
参考文献	198

第 1 章 电力电子技术基础知识

电力电子器件的革新对电力电子技术的发展起着决定性作用，随着新材料和新器件的涌现，以及现代数字控制技术的广泛运用，电力电子技术得到空前的推广和应用。本章首先简述电力电子器件的发展历程和分类情况，并选取了几种典型电力电子器件，针对器件结构、基本原理、运行特性以及关键参数等进行介绍。与此同时，基于当前配电网中光伏发电、电力储能、电动汽车充电桩、D-FACTS 以及直流配电网等典型电力电子技术应用，从基础两电平变换器出发，进一步对器件串并联技术和常见多电平变换器等进行简要概述。最后，对实际应用中最为广泛的几种脉冲调制技术进行了简介。

1.1 电力电子器件概述和分类

在电气设备中，实现电能的变换或控制任务的功率电路被称为主电路，电力电子器件则是在功率主电路中，直接承担电能变换或控制的开关器件。

1.1.1 电力电子器件发展概述

电力电子器件正沿着大功率化、高频化、集成化的方向发展，一些主要电力电子器件的发展历程大致如下：

(1) 1958 年，美国通用电气公司研制出第一个晶闸管并投产，标志着第一代电力电子器件开始稳步应用。

(2) 20 世纪 70 年代后期，以门极可关断晶闸管 (gate - turn - off thyristor, GTO)、电力晶体管 (giant transistor, GTR)、电力场效应管 (metallic oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 为代表的全控型电力电子器件得到发展和应用。

(3) 20 世纪 80 年代后期，开始出现复合型器件：以绝缘栅极双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 为典型代表，IGBT 是电力场效应管 (MOSFET) 和双极结型晶体管 (bipolar junction transistor, BJT) 的复合。它集



1.1.2 电力电子器件的分类

1.1.2.1 按照是否可控分类

电力电子器件按照是否可控可分为不可控型、半控型以及全控型三种类型。

1. 不可控型器件

不可控型器件一般指两端器件，一端是阳极，另一端是阴极，类似电子电路中的二极管，具有单向导电性。其开关操作仅取决于其主电路中施加在阳、阴极间的电压和流过它的电流，正向电压使其导通，负向电压使其关断，流过它的电流是单方向的。不可控器件不能用控制信号来控制电流的通断，因此不需要驱动电路，典型器件如功率二极管。

2. 半控型器件

半控型器件属于三端器件，除阳极和阴极外，还增加了一个控制门极。半控型器件也具有单向导电性，但开通不仅需要在其阳极、阴极之间施加正向电压，而且还必须在门极和阴极之间施加正向控制电压。其特征在于门极和阴极间的控制电压仅能控制其开通而不能控制其关断，器件的关断则是由其在主电路中承受的电压和电流决定的，此类器件主要是指晶闸管及其派生器件。

3. 全控型器件

全控型器件是带有控制端的三端器件，其控制端不仅可以控制其开通，还能控制其关断。此类器件很多，包括门极可关断晶闸管、功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管、新型宽禁带半导体电力电子器件等。

1.1.2.2 按照控制信号的性质分类

电力电子器件按照控制信号的性质可分为电流驱动型和电压驱动型两种类型。

1. 电流驱动型器件

驱动信号施加在器件控制端和公共端之间，通过从控制端注入或抽出电流来实现器件的导通或者关断的控制，此类电力电子器件统称为电流驱动型器件或电流控制型器件。

2. 电压驱动型器件

通过施加在控制端和公共端之间的电压信号来实现器件的导通或者关断的控制，此类电力电子器件统称为电压驱动型器件或电压控制型器件。

表 1-1 简要归纳了典型电力电子器件的分类及用途。

表 1-1 电力电子器件分类及用途

器件名称	控制程度	控制信号	主要应用场合
二极管	不可控器件		整流、续流
功率晶体管	半控型器件	电流驱动	整流、逆变
晶闸管			大容量逆变
门极可关断晶闸管	全控型器件	电压驱动	DC/DC 变换
功率场效应晶体管			DC/AC 逆变、DC/DC 变换、 AC/DC 整流
绝缘栅双极型晶体管			大容量逆变
集成门极换向晶闸管			开关电源
宽禁带半导体电力电子器件 (SiC MOSFET、GaN HEMT)			

1.1.3 典型电力电子器件介绍

1.1.3.1 功率 MOSFET

1. 功率 MOSFET 的基本结构

功率 MOSFET 按导电沟道可分为 p 沟道和 n 沟道两种类型。按照栅极电压的幅值又可分为耗尽型和增强型。其中,耗尽型 MOSFET 的特点是当栅极电压为零时漏源极之间就存在导电沟道。增强型 MOSFET 的特点是对于 n (p) 沟道器件,栅极电压大于 (小于) 零时才存在导电沟道。最常见的功率 MOSFET 以 n 沟道增强型为主。

功率 MOSFET 导通时只有一种极性的载流子 (多子) 参与导电,属于单极型晶体管,工作原理与小功率 MOS 管类似,但结构上有较大区别。小功率 MOS 管是横向导电器件,而功率 MOSFET 大都采用垂直导电结构,又称为 VMOSFET (vertical MOSFET),具有更高的耐压和耐电流能力。按垂直导电结构的差异,又分为利用 V 型槽实现垂直导电的 VVMOSFET 和具有垂直导电双扩散结构的 VD-MOSFET (vertical double-diffused MOSFET),以 VDMOS 器件为例进行讨论,其结构和电气图形符号如图 1-2 所示。功率 MOSFET 有三个电极,分别为栅极 (G)、漏极 (D) 以及源极 (S)。功率 MOSFET 属于电压控制型器件,它的开通和关断由栅极电压来控制。

2. 功率 MOSFET 的工作原理

功率 MOSFET 的工作原理如下:

(1) 截止。当漏源极间加正电源,栅源极间电压为零时,p 基区与 n 漂移区之间形成的 pn 结 J_1 反偏,漏源极之间无电流流过,此时 MOSFET 处于截止状态。

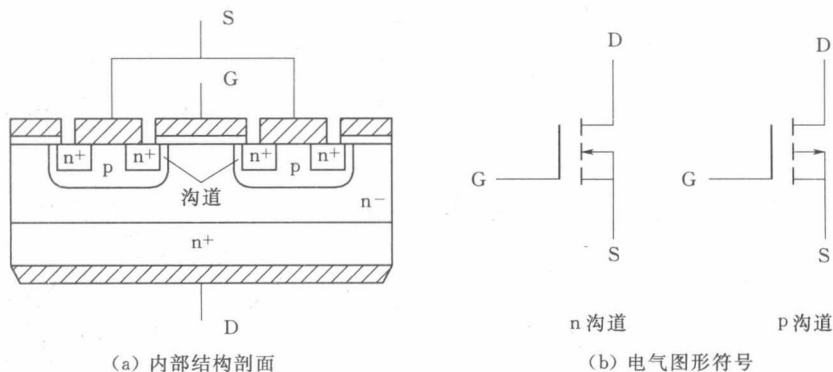


图 1-2 功率 MOSFET 的结构和电气图形符号

(2) 导通。在栅源极间加正电压 U_{GS} ，由于栅极是绝缘的，因此不会有栅极电流流过。但栅极的正电压会将其下面 p 区中的空穴推开，并将 p 区中的少数—电子吸引到栅极下面的 p 区表面；当 $U_{GS} > U_{TH}$ （开启电压或阈值电压）时，栅极下 p 区表面的电子浓度将超过空穴浓度，使 p 型半导体反型成 n 型，成为反型层，该反型层形成 n 沟道从而使 pn 结 J_1 消失，漏极和源极导电，漏源电流 I_{DS} 出现，此时 MOSFET 导通。

3. 功率 MOSFET 的基本特性

(1) 静态特性。MOSFET 的静态特性主要包括输出特性和转移特性。其中，当漏源电压 U_{DS} 的大小不变时，将漏极电流 I_{DS} 和栅源间电压 U_{GS} 的关系称为 MOSFET 的转移特性。当 $U_{GS} < U_{TH}$ 时，栅极电压不足以在半导体表面形成沟道；当 $U_{GS} > U_{TH}$ 时，栅极电压就能够在下面半导体的表面形成导电沟道，从而 I_{DS} 从零开始慢慢增大。当 I_{DS} 较大时， I_{DS} 与 U_{GS} 的关系近似线性，将曲线的斜率定义为跨导 G_{fs} ，其计算公式为

$$G_{fs} = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta U_{GS}} \quad (1-1)$$

跨导是体现功率 MOSFET 放大能力的参数，单位一般取 mS 或 μ S。

MOSFET 的漏极伏安特性即为输出特性，以栅源电压 U_{GS} 为参变量，反映的是漏源电压 U_{DS} 和漏源电流 I_{DS} 之间的关系。如图 1-3 (b) 所示，输出特性可分为截止区、饱和区以及非饱和区。其中，在截止区，由于 $U_{GS} < U_{TH}$ ，导电沟道还没有形成，此时 I_{DS} 近似为零，MOSFET 处于截止状态。在非饱和区，栅源电压 U_{GS} 不变的情况下，漏源电流 I_{DS} 与漏源电压 U_{DS} 几乎呈线性关系。在这个区域内，由于 $U_{GS} > U_{TH}$ ，栅极下面形成了导电沟道。当满足 $U_{DS} > 0$ 时，就会出现漏极电流 I_{DS} 。在饱和区内，漏源电流 I_{DS} 不会随着漏源电压 U_{DS} 的增大而增大，亦即漏源电流 I_{DS}

会出现饱和现象。当功率 MOSFET 工作在开关状态时,即在截止区和非饱和区之间来回转换。

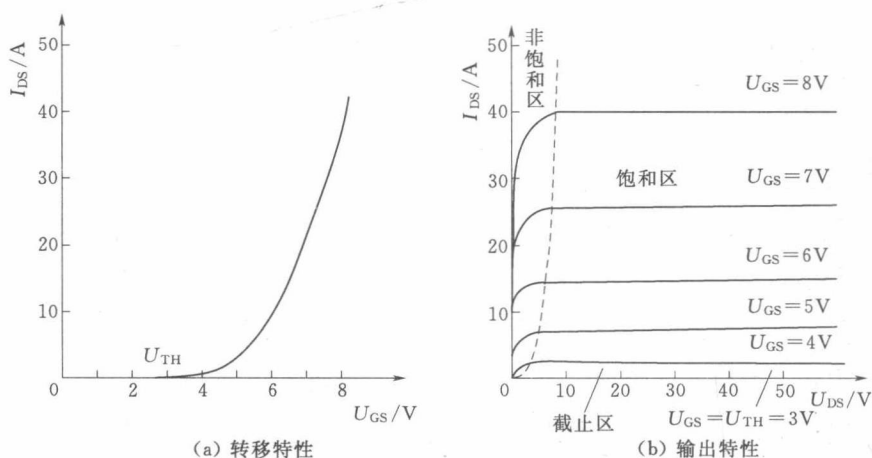


图 1-3 功率 MOSFET 的转移特性和输出特性

(2) 动态特性。MOSFET 的开关过程反映了其动态特性,图 1-4 给出了 MOSFET 的开关等效模型。MOSFET 开关特性取决于三个极间电容的电压变化速度,通常漏源极电容 C_{DS} 、栅漏极电容 C_{GD} 与栅源极电容 C_{GS} 都能从器件的数据手册中查阅到。许多器件手册更多时候会给出下面三种电容参数:漏源极短路时的输入电容 C_{iss} 、共源极输出电容 C_{oss} 以及反向转移电容 C_{rss} , 其计算公式为

$$\begin{cases} C_{iss} = C_{GS} + C_{GD} \\ C_{rss} = C_{GD} \\ C_{oss} = C_{DS} + C_{GD} \end{cases} \quad (1-2)$$

漏源极电容 C_{DS} 与栅漏极电容 C_{GD} 均是非线性压敏电容,电容值随着施加在漏源极和器件栅源极的电压变化而变化。另外,分别定义源极引线电感 L_S 和漏极引线电感 L_D 。图 1-4 为考虑到极间电容、寄生电感以及反并联二极管后的功率 MOSFET 开关等效模型,在分析 MOSFET 的开关特性时,将主要参照该模型。

MOSFET 的导通与关断(截止)过程主要受栅极驱动电压 U_{GS} 的控制,根据栅极驱动电压 U_{GS} 、栅极电流 I_{GS} 、漏源电压 U_{DS} 以及漏极电流 I_{DS} 的变化趋势,可以分析出功率 MOSFET 的导通与关断过程。

(1) 开通过程。功率 MOSFET 的开通过程电流路径如图 1-5 所示,图中虚线为驱动电流 I_G 与漏极电流 I_D 的路径, R_G 为驱动电阻, R_S 为驱动芯片内阻。

阶段 I: 功率 MOSFET 的开通过程示意如图 1-6 所示。阶段 I 对应图 1-6 所示的 $t_0 \sim t_1$ 区间。在功率 MOSFET 的栅极施加驱动电压 U_{DRV} , 驱动电压从 0V 开