



电力新技术丛书

ELECTRIC POWER NEW TECHNOLOGY SERIES

电力电子学 在电力系统中的应用 ——灵活交流输电系统

赵 贺 编著



中国电力出版社

196531

丛 书

TM7

Z301

电力电子学 在电力系统中的应用 ——灵活交流输电系统

赵 冀 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书说明了电力电子技术在电力系统发电、送电和配电、用电方面的应用,着重说明了构成电力电子装置的原理、结构及其使用情况。所介绍的装置包括静止调相机—无功功率发生器、可控串补、电力有源滤波器、静止移相器和统一潮流控制器以及电力系统能量存储装置等。

本书可供电力部门及电器生产部门的研究开发人员及教学、管理人员参考,亦可供运行部门人员了解灵活交流输电系统概况之用。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学在电力系统中的应用:灵活交流输电系统/赵贺编著.-北京:中国电力出版社,2000.8

(电力新技术丛书)

ISBN 7-5083-0408-X

I. 电… II. 赵… III. 电力电子学-应用-电力系统 IV. TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第42474号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001年1月第一版 2001年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 8.5印张 184千字

印数0001—3000册 定价16.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电力新技术丛书》出版说明

我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就,从1978年到1997年的19年中装机容量及发电容量连续上两个台阶(1987年装机容量达1亿kW及1995年装机容量达2亿kW),到1996年底已居于世界第2位。电力工业的领导者向我们提出了建“一流电网”的号召,针对当前两个根本性转变的关键时刻,提出要进行由计划经济体制向具有中国特色的社会主义市场经济体制转变的第二次创业。其目标就是要保持电力工业持续、快速、健康地发展和电力供给与需求的平衡,从而保证国民经济的发展和社会的进步以及人民生活水平的日益提高。为达到建成“一流电网”的目的,必须有一流的人才,用一流的技术,并且得到各行业的关心、支持和理解。本套《电力新技术丛书》即是用深入浅出的叙述方法介绍有关一流电网的新技术。希望关心这些问题的有关人员可以用较短的时间理解这些问题的概要,加深对这些问题的关注和支持。

本丛书的作者们都是从事所写专题多年的工作者,并在该专题领域有开拓性的贡献。他们出于“甘为人梯”的想法,把自己的体会及资料尽可能深入浅出地写出,希望读者能用最少的投入,掌握作者的所知所得。

本丛书包括一些具有现实意义和广阔应用前景,并在国际上或国内处于前沿地位的高新技术。例如微机继电保护、电力网中的谐波、电网调度员培训模拟(DTS)、人工神经网络原理及其应用、配电系统自动化及其发展、面向对象设计的

开放式能量管理系统、模糊数学在电力系统中的应用、电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统、直接法稳定分析、无功补偿的矢量控制等，读者可以根据需要与可能选用。

本丛书的宗旨是用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地就各专题题目的引出，专题的基本原理和理论及对电力系统的影响进行简要论述，并对专题的应用领域和前景及可能产生的效益作出评述。

本丛书的读者对象为：科研、教学、生产第一线的电力工程技术人员，特别是工作五年左右的年轻工程师及大、中专院校有关专业的学生。由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限，丛书肯定会存在许多不足，丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

王平洋 周孝信

前 言

电力电子技术在电力系统中的应用在 10 年前仅限于高压直流输电、发电机励磁系统和静止无功补偿器。而在电力用户系统，电力电子的应用呈现丰富多采的局面。这些电力电子的应用启发人们向电力系统可控化的方向进行研究。中国电力科学研究院和电力高等学校等许多科研、教学部门都做了不同的电力电子应用于电网方面的研究工作，开发了一些专用的设备，取得了很大成绩。但和国外相比，我国所进行的工作还是规模小，而且实用性较差，还存在很大的差距。

我们希望通过这本书把收集到的材料和国内所做的研究工作的进展情况介绍给广大电业工作者。由于作者水平所限，会存在许多错误和不准确的地方。书中大部分内容来自国内外已发表的论文和报告，有些是作者与同行交流中所了解到的情况，例如无功发生器变压器结构的启动要求，同步正弦电压源的细节及有源滤波的一些情况。限于作者了解水平有限，不见得传达准确，供读者参考。有一部分内容是国外对新技术的可行性研究。其中有些内容后来在工程中实施，也有一些一直处于开发过程中。读者可能在国外的最新报告中看到本书所说的一些工程设想，现在已成为试验或运行的项目。

本书虽然是介绍电力电子应用的普及读物，但读者是电业电力部门的技术人员，因而在内容上涉及许多构造和使用的细节。考虑到本书内容涉及面相当广，故对某些电力电子和电网的基本知识作了概略说明，以便于读者阅读。

使用电力电子技术于低压系统，保证用户得到高度可靠和优质的电能供应，在国外称为“用户功率”（custom power）。它和配电自动化、补偿技术、恢复技术等应有专书谈论，本书把这部分内容全部略去。希望能有用户功率方面的专著书早日出版。

书中对于自动调节和调制技术作了一些形象的描述，以代替数学表达方式。书中给出的波形有些是试验结果，有些是仿真结果。限于本书性质，仿真技术没有写进书内。

第2章是全书的概括性介绍，对于许多不想了解电力电子设备细节的读者，只看第2章就能知道灵活交流输电系统的概貌。

从现在已实现的电力电子工程观察，在最近的10年，灵活交流输电和高压直流输电将提高电力系统的经济性、解决系统控制问题，同时在电力系统的安全可靠上发挥更大的作用。直接的表现将是用电力电子技术提高系统输电容量，增加系统稳定和改善电能质量。因此国家电力公司认为这不仅不是电业工作者的事业，更多的是给电器设备制造行业开辟了一个很宽阔的市场，是向高电压、大容量电子设备发展的一条途径。例如在冶金等行业使用的循环换流器即交交变频设备，容量多为几千千瓦，很少到一两万千瓦水平，而本书所介绍的同步电机交流变频励磁所用的循环换流器容量达到7万kW以上。目前国外电器公司在电力电子大容量化方面投入巨大的资金和人力，也应该对我国制造行业有借鉴作用。希望我国电力电子制造业高速地掌握新技术并且形成新的产业体系。

在本书编写过程中，电工界前辈王平洋教授在本书内容的安排上给予了详细的指导；电力科学研究院总工周孝信院

士对全书提出了很多极宝贵的意见；王少宁高级工程师和武守远博士曾给本书内容以重要的影响，汤广福博士、金钊和戴小亮工程师对本书的写作和出版做了许多工作，在此谨向他们表示深切的谢意。

作者

于蓟门

2000 年 5 月

目 录

《电力新技术丛书》出版说明

前言

1	电力电子技术的发展和应用简介	1
1.1	电力系统与电力电子技术概况	1
1.2	门极可关断晶闸管 (GTO)	2
1.3	绝缘门极双极晶体管 (IGBT)	15
1.4	换流器	20
2	电力电子技术在发电、输电和配电、 用电中的应用简介 (FACTS)	29
2.1	发电厂应用的电力电子技术	30
2.2	灵活交流输电系统	38
2.3	静止无功补偿系统 (SVC)	44
2.4	无功发生器	52
2.5	晶闸管控制制动电阻	55
2.6	快速有载调压	55
2.7	超导磁能存储系统 (SMES)	57
2.8	蓄电池储能系统 (BESS)	58
2.9	晶闸管移相器	59
2.10	晶闸管串补 ——可控串补 (TCSC)	60
2.11	NGH 次同步谐振阻尼器	62
2.12	高压直流输电简介 (HVDC)	64
2.13	相间控制器	68

2.14	变频调整技术在电力系统中的应用	70
3	静止调相机—无功功率发生器	72
3.1	概况	72
3.2	无功发生的原理	74
3.3	无功发生器的多重结构	81
3.4	控制器的构成	86
3.5	工程实例 1——80MVA 的无功发生器	91
3.6	工程实例 2——50MVA 的无功发生器	106
3.7	无功发生器进展情况	113
4	晶闸管控串联电容器——可控串补	115
4.1	可控串补的用途	115
4.2	可控串补的稳态特性	116
4.3	可控串补的调节性能	121
4.4	暂态稳定和阻尼低频振荡的控制	123
4.5	阻尼次同步谐振和扭相互作用	124
4.6	可控串补的工程状况	127
5	电力有源滤波器 (主动滤波器)	151
5.1	概述	151
5.2	电力有源滤波器的现状和技术要求	153
5.3	电力有源滤波器的原理	156
5.4	电力有源滤波器的控制系统	161
5.5	电力有源滤波器的应用	168
6	静止移相器和统一潮流控制器	173
6.1	电子式静止移相器	173
6.2	统一潮流控制器	181
6.3	统一潮流控制器与移相器的比较	186

6.4	固态同步正弦电压源	188
6.5	4象限换流器和它对电力系统的稳定化控制 ——固态正弦同步电压源的应用	192
7	电力系统能量存储	201
7.1	超导储能 (SMES) 技术	201
7.2	蓄电池储能 (BESS)	225
7.3	变频抽水蓄能发电机—交流 变频励磁双馈电机	242
	参考文献	254

1 电力电子技术的发展和 应用简介

1.1 电力系统与电力电子技术概况

电力系统包括发电、送电和用电全过程，所用的器具有一些是线性的，即在主要运行参数范围内，所加电压与流过的电流成正比，例如，变压器、输电线在其正常运行时都可看成是线性设备。而非线性的器具可能产生更为特殊、也相当有用的特性。电力系统使用的非线性元件有些不属于电力电子的领域，例如为了防止过电压所采用的空气间隙和阀型避雷器，利用磁饱和现象设计的磁电器件等。电真空技术的发现和发展，给非线性元件的应用开辟了一个新阶段。电真空器件的单向导电特点、电流可关断特点，以及它的可控性，使其增加了极丰富的处理电能的方法。汞弧整流器、闸流管、引燃管的应用，产生了可控整流器和直流拖动设备。

现代电力电子学是与固体物理学一起发展起来的。40年代中期半导体二极管和三极管的发明是电子技术的里程碑。随后，固体电子器件向高频化发展。同时还有两个趋向，一是小型化、微形化（这就是现在通信和计算机系统的技术基础），二是大容量化。这样它就开始取代电真空器件。

大容量化这个方向在于提高工作频率，首先解决的是提高工作电压和工作电流。1957年，通用公司制造出300V、16A的可控硅，其特性极像电真空器件的闸流管，后来被定名为晶

闸管(thyristor)。它的额定电压、电流都逐渐增大。由于晶闸管的高可靠性和低成本,很快就在各应用领域取代容量近似的电真空器件。容量最大的电力电子器件是电力系统中的高压直流输电,也在 70 年代被半导体器件——晶闸管所占领。

为了便于阅读,本章将简略回顾晶闸管的特性。至于晶闸管的具体知识,在直流输电的书籍或其他专著中已有详细的讨论,读者可以自行参看。另外,本章还将介绍电力系统可能使用或已在使用的几种较新的半导体(固体)电力电子器件。

1.2 门极可关断晶闸管 (GTO)

晶闸管也称可控硅,是 50 年代发展起来的开关器件,它在阳极加正电压,门极用正向电流触发而开始导通,电流流过阳极和阴极,当电流降到零时晶闸管即呈断开状态。由于晶闸管是最基本的开关器件,并已广泛应用,成为电工知识的素材,故此处不详细讨论,而只说明大容量晶闸管的情况。

80 年代晶闸管的容量发展到 5kV、3kA 的水平,硅片直径达到 100mm。如今,100mm 直径的晶闸管是直流输电的基本开关元件。较低电压的晶闸管其额定电流已达 5kA,较小电流的晶闸管耐压达 8kV。大容量晶闸管也用在无功静止补偿器和大容量电机启动和变速上。

与晶闸管几乎同时出现的门极可关断晶闸管 (gate turn-off thyristors, 以下简称 GTO) 是另一种功率大的开关元件。GTO 与普通晶闸管性能不同之处在于它可由门极注入一个反方向电流,使阳极与阴极间不为零的电流关断。目前由于 GTO 的容量达到 5MVA 左右,又有可控关断的特点,因而在很多领域广泛采用。现代电力电子技术在大量容量的应用方面,

GTO 是使用最广的开关部件，担当最重要的角色。

1.2.1 GTO 晶闸管介绍

这里只描述 GTO 晶闸管使用的有关问题，希望通过这个介绍，能使读者基本上了解与晶闸管应用有关的原理和特性。GTO 晶闸管是 PNP 四层半导体器件，有三个引出端，这与晶闸管相同。GTO 的阳极 A 加正电压，阴极 K 加负电压，负载在这个电路里与 GTO 晶闸管串联，当门极与阴极间加一个门极 G 为正的电压时，GTO 被触发导通，如果阳极和阴极电流足够大，在触发电压不存在时阳阴极之间仍然导通，电流过小则自行关断，这些特点与普通晶闸管相同。

GTO 的独特之处是门极 G 可关断阳阴极间的电流。只要在门极与阴极间加一个负偏置电压形成负电流，并有足够的幅值，则负荷电流将关断，这个行为可由电子空穴的理论说明。

图 1.1 是 GTO 关断时的电子流动断面，在关断时门极

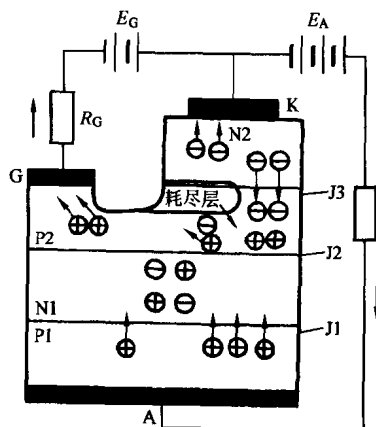


图 1.1 GTO 晶闸管关断过程

电流为 $-I_G$ ，门极电压 $-E_G$ 。

GTO 在导通状态电流从阳极 A 通过 P1、N1、P2、N2 四层中的三个结流向阴极，相当于从 A 到 K 的电流。当门极 G 加入电压 $-E_G$ ，中和了非平衡空穴载流子、阻断 N2 非平衡电子流的流入，门极电流 $-I_G$ 相当于空穴电流从门极通过，电子则从此门极为正的阴极排空，当空穴和电子在 J3 结门极附近消失，J3 结这个部件形成耗尽层，并向远离门极的部件扩展。这样 N2 层不再供应电子，P2 层将中和掉过剩载流子。J3 结这种离断的反偏使 J2 结恢复了阻断能力，从而关断了 GTO，在 J2 结上恢复耗尽层。GTO 晶闸管的三极管说明图和符号见图 1.2。

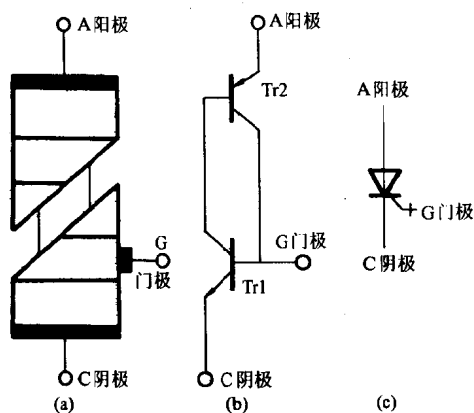


图 1.2 GTO 晶闸管的三极管说明图和符号

(a) 功能示意图；(b) 等值电路；(c) 符号

某些出版物中所用 Tr1 和 Tr2 与此处规定不同，请读者注意。被关断阳极电流与门极关断电流之比称为关断增益 G_{off} ，这一概念已被广泛采用，其值为

$$G_{off} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} = \frac{I_A}{I_{GQ}}$$

1.2.2 GTO 晶闸管的主要参数

为了便于查阅样本等资料，此处列出 GTO 晶闸管各主要参数的英文名称，有的还列出参数的指定条件（GTO 关断时的等值电路见图 1.3）。

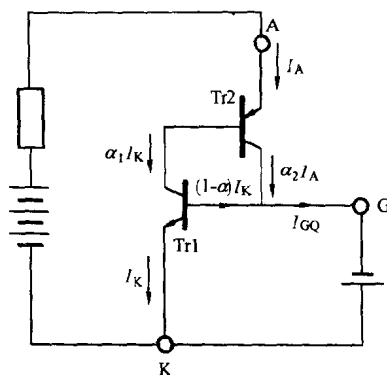


图 1.3 GTO 关断时的等值电路

(1) U_{RRM} ——反向重复峰值电压 (repetitive peak reverse voltage)。在额定结温范围，门极和阴极间无外加信号，规定的每周期的重复的反向峰值(最大)电压。GTO 的型号上、铭牌上所规定的额定电压 (另有说明除外)。

(2) $I_{T(RMS)}$ ——通态电流有效值 (RMS on-state current)。在指定的外温下，加在器件上的连续通态电流的有效值。

(3) $I_{T(av)}$ ——通态平均电流 (average on-state current)。在指定外温下，器件接电阻或电感性负荷 (正弦工频半周) 可连续通过的平均正向电流。

(4) I_{TQRM} ——重复可控通态电流 (repetitive controllible

on-state current)。门极控制可关断的允许电流值，无特别说明时为最大值。某些产品以此作为铭牌上规定的额定电流值。

(5) I_{TGM} 、 I_{TGO} ——可控通态电流 (controllable on-state current)。在器件关断前的瞬间，门控可关断的瞬时电流值。某些产品以此为额定电流。

(6) U_{RSM} ——不重复反向峰值电压 (non-repetitive peak reverse voltage)。额定结温范围，门极阴极间无信号，规定峰值非重复反向电压，其所加时间不大于工频半个正弦波。

(7) $U_{\text{R(DC)}}$ ——直流反向电压 (DC reverse voltage)。同上条件，规定的反向直流电压最大值。

(8) U_{DRM} ——重复峰值断态电压 (repetitive peak off-state voltage)。同上条件，每周加的峰值重复断态电压，包括重复的暂态电压的最大瞬时值。

(9) U_{DSM} ——非重复的断态峰值电压 (peak non-repetitive off-state voltage)。与前项相同条件，规定非重复的断态峰值电压，其所加时间小于工频半个正弦波，即非重复暂态断态电压的最大瞬时值。

(10) $\frac{dU}{dt}$ ——断态电压临界上升率 (critical rate of rise of off-state voltage)。GTO 在最大额定结温，门极阴极间没有信号的条件下，不由断态转向通态的规定的最大断态电压主上升率。

(11) U_{T} 、 U_{TM} ——通态电压 (最大值) (on-state voltage)。通态电流在阳极和阴极间的电压降，规定的通态电压最大值是规定的半个正弦工频电流在阳极和阴极间的电压降的最大值。

(12) I_{TSM} ——浪涌电流 (surge-on current)。在额定结温