

第 3 篇

电力电子技术

第 3 篇

电力电子技术

主编单位 机械工业部西安电力电子技术研究所

编写单位 机械工业部西安电力电子技术研究所
西安理工大学

主 编 周胜宗

副主编 陈守良

编写人 张志刚 俞 革 黄家俊 李学敏
张景玺 朱典旭 张永生 盛祖权
侯晓峰 陆 地 孙 明 李 明

主 审 张明勋

副主审 孙流芳

常用符号表

电力电子器件参数符号表[⊙]

di/dt ——通态电流临界上升率 (A/ μ s)
 du/dt ——断态电压临界上升率 (V/ μ s)
 $I_{DR(AV)}$ ——断态重复平均电流 (A)
 $I_{DS(AV)}$ ——断态不重复平均电流 (A)
 $I_{F(AV)}$ ——正向平均电流[⊙] (A)
 I_{FSM} ——正向浪涌电流：正向不重复电流 (A)
 I_{GFM} ——门极正向峰值电流 (mA)
 I_{GD} ——门极不触发电流 (mA)
 I_{GT} ——门极触发电流 (mA)
 I_H ——维持电流 (mA)
 I_L ——擎住电流 (mA)
 $I_{RR(AV)}$ ——反向重复平均电流 (mA)
 I_{RRM} ——反向重复峰值电流 (mA)
 $I_{RS(AV)}$ ——反向不重复平均电流 (mA)
 $I_{T(AV)}$ ——通态平均电流 (A)
 $I_{T(RMS)}$ ——通态方均根电流 (A)
 I_{TSM} ——通态浪涌电流，通态不重复电流 (A)
 $P_{G(AV)}$ ——门极平均功率 (W)
 P_{GFM} ——门极正向峰值电压 (V)
 P_{GM} ——门极峰值功率 (W)
 R_{th}, R ——热阻 (C/W)
 R_{thj}, R_{jc} ——结-(外)壳热阻 (C/W)
 T ——管壳温度 (C)
 T_j ——(PN)结(等效)温(度) (C)
 T_{jN} ——额定结温 (C)
 t_d ——门极控制延迟时间 (μ s)
 t_r ——门极控制上升时间 (μ s)
 t_{rr} ——门极控制反向恢复时间 (μ s)
 t_f ——门极控制下降时间 (μ s)
 t_{gt} ——门极控制开通时间 (μ s)
 t_q ——电路换向关断时间；电路换向恢复时间 (μ s)
 U_{DRM} ——断态重复峰值电压 (V)
 U_{DSM} ——断态不重复峰值电压 (V)

U_{DWM} ——断态工作峰值电压 (V)
 U_{RRM} ——反向重复峰值电压 (V)
 U_{RSM} ——反向不重复峰值电压 (V)
 U_{RWM} ——反向工作峰值电压 (V)
 $U_{F(AV)}$ ——正向平均电压 (V)
 $U_{T(AV)}$ ——通态平均电压 (V)
 U_{FM} ——正向峰值电压 (V)
 U_{TM} ——通态峰值电压 (V)
 U_{GD} ——门极不触发电压 (V)
 U_{GFM} ——门极正向峰值电压 (V)
 U_{GRM} ——门极反向峰值电压 (V)
 U_{GT} ——门极触发电压 (V)
 U_{T0} ——门槛电压 (V)
 Z_{th}, Z ——瞬态热阻抗 (C/W)
 Z_{thj}, Z_{jc} ——结-(管)壳瞬态热阻抗 (C/W)

电力电子设备特性符号表

b ——电压波动因数
 $\cos\varphi$ ——位移因数
 $\cos\phi$ ——变压器磁化电流 $\xi=0, \alpha=0$ 时的位移因数，即无相控阀侧位移因数
 $\cos\varphi_N, \cos\phi_N$ ——在额定直流电流下的 $\cos\varphi$ 和 $\cos\phi$ 值
 $\cos\varphi'_a$ ——变压器磁化电流 $\xi=0, \alpha \neq 0$ 时的位移因数
 $\cos\varphi'_N$ ——在额定直流电流下的 $\cos\varphi'_a$ 值
 $\cos\varphi_a$ ——变压器磁化电流 $\xi \neq 0, \alpha \neq 0$ 时的位移因数，即网侧位移因数
 $\cos\varphi_{aN}$ ——在额定直流电流下的 $\cos\varphi_a$ 值
 d ——直流电压调整率
 d_b ——变流电抗器(引起的)直流电压调整率

⊙ 在变流器专业的国标 (GB3859—83) 和国际电工标准 (IEC—146—73) 中，电压符号为 U ，但在电力电子器件的国标和国际电工标准中，电压符号为 V 。其余符号在两种标准中的规定相同。本手册为了统一，电压符号一律用 U 。

⊙ 指额定正向平均电流，在此额定两字省略，下同。

- d_N, d_{bN} ——额定直流电流下的 d 和 d_b 值。
 d_L ——直流电阻抗引起的直流电压调整率
 d_{LN} ——在额定直流电流下的 d_L 值
 d_p ——固有电压调整率
 d_r ——电阻性直流电压调整率
 d_{rb} ——变流电抗器引起的阻性直流电压调整率
 d_{rt} ——变流变压器引起的阻性直流电压调整率
 d_t ——变流变压器和平衡电抗器引起的直流电压调整率
 d_{tN} ——额定直流电流下的 d_t 值
 d_x ——电感性直流电压调整率 ($d_x = d_{xt} + d_{xb}$)
 d_{xb} ——变流电抗器引起的感性直流电压调整率
 d_{xbl} ——网侧电抗器引起的感性直流电压调整率
 d_{xbv} ——阀侧电抗器引起的感性直流电压调整率
 d_{xt} ——变流变压器引起的感性直流电压调整率
 d_{xN}, d_{xbN}, d_{xN} ——在额定直流电流下的 d_x, d_{xb}, d_{xt} 值
 e ——变压器短路电压, 即变压器短路电压对额定值的百分值
 e_x ——变压器短路电压中的感抗分量
 e_{tN}, e_{xN} ——在额定电流 I_{LN} 下的 e_t 和 e_x 值
 f_N ——额定频率 (Hz)
 g ——均分 I_{dN} 的换相组数
 $h, (n)$ ——谐波序次[⊖]
 $I_{A(RMS)}$ ——臂电流的方均根值 (A)
 $I_{A(AV)}$ ——臂电流的平均值 (A)
 I_b ——电抗器方均根电流 (A)
 I_d ——直流电流 (A)
 I_{bN}, I_{dN} —— I_b 和 I_d 的额定值 (A)
 I_{dmN} ——额定连续直流电流 (A)
 I_f ——励磁电流[⊙] (A)
 I_L ——(变压器) 网侧电流 (A)
 I_{LN} ——额定网侧电流 (A)
 I_{IL} ——网侧基波电流 (A)
 I_{ILN} —— I_{IL} 的额定值 (A)
- $(I_{nL}) I_{hL}$ ——(交流) 网侧 h 次谐波的方均根电流[⊙] (A)
 I_{hLi} ——网侧理想 h 次谐波的方均根电流[⊙] (A)
 I_{hLN}, I_{hLIN} —— I_{dN} 下的 I_{hL} 值和 I_{hLi} 值[⊙] (A)
 I_V ——(变流变压器的) 阀侧电流 (A)
 I_{VN} ——额定阀侧电流额定值 (A)
 K' ——国际电话电报协商委员会 (CCITT) 规定的电话波形因数
 K ——正整数, $K=1, 2, 3, \dots$
 K_f ——CCITT 规定的因数
 K_I ——电流折算因数, 电流均衡因数 (均流系数)[⊙]
 K_U ——电压折算因数, 电压均衡因数 (均压系数)[⊙]
 $K_{Iv}, K_{Uv}, K_{IL}, K_{UL}$ ——阀侧电流、电压的折算因数, 网侧电流、电压的折算因数
 K_x ——变压器感抗电压降折算因数[⊙]
 L_s ——换相电感 (H)
 L_A ——臂电感 (H)
 L_d ——平波电感 (H)
 L_S ——支路的串联电感 (H)
 P ——功率 (W)
 P_L ——网侧 (有功) 功率 (W)
 P_{LN} —— P_L 的额定值 (W)
 p ——脉波数
 p_i, p_i' ——CCITT 规定的负载因数
 Q ——无功功率
 电荷量 (C)
 Q_L ——网侧无功功率 (var)
 Q_{LN} ——额定负载下的 Q_L 值 (var)
 Q_r ——反向恢复电荷 (C)
 q ——换相数, 换相次数
 R, R_{th} ——热阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) (K/W)
 R_{sc} ——电网短路功率对变流器表现功率之比

⊖ 在 GB3859—83 和 IEC—146—73 中, 谐波序次用 n 表示, 在 IEC—146 修正稿中改用 h 。

⊙ 取自 GB3859—83, 在 IEC—146—73 及其修正稿中没有对应符号。

⊙ 交流电网短路容量在 GB3859—83 和 IEC—146—73 中用 S_m 表示, 在 IEC—146 修正稿中改用 S_c 。

S ——表观功率 (W)	U_{dxblN}, U_{dxbvN} ——额定电流 I_{dN} 下的 U_{dxbl} 和 U_{dxbv} 值 (V)
S_c (S_m)——变流网的短路容量 [⊖] (MVA)	U_L ——变压器网侧(线)电压 (V)
S_L ——网侧表观功率 (W)	$U_{L,N}$ ——变压器网侧额定电压 (V)
S_{1L} ——对应于基波分量的网侧表观功率 (W)	$U_{L,RRM}$ ——电路反向重复峰值电压 [⊖] (V)
$S_{L,N}, S_{1L,N}$ —— S_L 和 S_{1L} 的额定值	$U_{L,RSM}$ ——电路反向不重复峰值电压 [⊖] (V)
S_{com} ——换相臂交流端子处算得的电网短路功率 (W)	$U_{L,RWM}$ ——电路反向工作峰值电压 [⊖] (V)
s ——串联换相组数	$U_{L,DRM}$ ——电路断态重复峰值电压 [⊖] (V)
T ——热力学温度 (K)	$U_{L,DSM}$ ——电路断态不重复峰值电压 [⊖] (V)
TIF ——电话干扰因数	$U_{L,DWM}$ ——电路断态工作峰值电压 [⊖] (V)
U_{ARM} ——臂的反向工作峰值电压 (V)	$U_{L,RM}$ ——电路重复峰值电压 (V)
U_{AFM} ——臂的正向工作电压 (V)	$U_{L,SM}$ ——电路不重复峰值电压 (V)
U_d ——直流电压 (V)	$U_{L,WM}$ ——电路工作峰值电压 (V)
U_{d0} ——约定空载直流电压 (V)	U_{hL} ——网侧电压第 h 次谐波方均根值 (V)
U_{d0a} ——相控条件下的约定空载直流电压 (V)	U_{V0} ——变压器(空载)阀侧(线)电压 (V)
U_{dN} ——额定直流电压 (V)	$U_{V\phi}$ ——变压器阀侧相电压 (V)
$U_{di}, (U_{di0})$ ——理想空载直流电压 [⊖] (V)	U_o ——(直流侧)纹波电压方均根值 (V)
U_{dio} ——相控理想空载直流电压 (V)	u ——重叠角 (°) (rad)
U_{db} ——电抗器引起的直流电压调整值 (V)	v ——基波因数(原称畸变因数) [⊖] (H)
U_{dL} ——交流电网引起的直流电压调整值 (V)	X_a ——换相电抗 (H)
U_{dp} ——固有直流电压调整值 (V)	X_{bl} ——网侧每相电抗 (H)
$U_{dbN}, U_{dLN}, U_{dpN}$ ——额定电流 I_{dN} 下的 U_{db} 、 U_{dL} 和 U_{dp} 值 (V)	X_{bv} ——阀侧每相电抗 (H)
U_{dr} ——电阻性直流电压调整值 (V)	X_t ——变压器换相电抗, 每一换相组中的变压器相间感抗(线感抗) (H)
U_{drb} ——电抗器引起的电阻性直流电压调整值 (V)	α ——延迟角 (°)
U_{drt} ——变流器引起的电阻性直流电压调整值 (V)	α_p ——固有延迟角 (°)
$U_{drN}, U_{drbN}, U_{drtN}$ ——额定电流 I_{dN} 下的 U_{dr} 、 U_{drb} 、 U_{drt} 值 (V)	β ——超前角 (°)
U_{dx} ——感性直流电压调整值 (V)	γ ——熄灭角 (°)
U_{dxb} ——电抗器引起的直流电压调整值 (V)	γ_{min} ——临界熄灭角
U_{dxt} ——变压器引起的直流电压调整值 (V)	δ ——每个一次绕组或每个电抗器同时换相的换相组数
$U_{dxN}, U_{dxbN}, U_{dxtN}$ ——额定电流 I_{dN} 下的 U_{dx} 、 U_{dxb} 、 U_{dxt} 值 (V)	λ ——总功率因数
U_{dxbl} ——网侧电抗器引起的直流电压调整值 (V)	Θ ——温度(特定值) (°C)
U_{dxbv} ——阀侧电抗器引起的直流电压调整值 (V)	θ ——温度(瞬时值) (°C)
	ϕ_1 ——位移角(基波的)
	σ ——纹波因数 [⊖]

⊖ 理想空载直流电压, 在 GB3859—83 和 IEC—146—73 中用 U_{di0} 表示, 在 IEC—146 修正稿中改用 U_{di} 表示。

⊖ $U_{L,RRM}$ 与第 3-3 页中的 U_{RRM} 相对应。前者表示由电路施加于阀(臂)的实际反向重复峰值电压, 后者表示阀器件的额定反向重复峰值电压。其余五个符号依此类推。

⊖ 在 GB3859—83 和 IEC146—73 中, v 代表畸变因数。在 IEC—146 修正稿中 v 代表基波因数, 名称改变, 定义照旧。

下角标

符号	涵意	符号	涵意
1	基波的	M	最大的,峰值的
0	空载的	min	最小的
A,a	臂的、阳极的	N	额定的
a	环境的,轴向的*	D	开路的
AV	平均值	P	固有的
BO	转折的	p	并联的,脉动的*
BR	击穿的	g	关断的,正交的+
b	交流电抗器(引起的)	R	反向的,重复的(用于第二位下角标)
C,c	换相,临界的,短路的	r	上升的,电阻的
c	外壳的	rr	反向恢复的
d	直流的,连续的,延迟的	S	不重复的,浪涌的,瞬态的
D	断态的,不触发的	s	串联的,同步的*,饱和的*
F	正向的	RMS	方均根的
f	频率的,下降的	T	通态的
g,G	门极的	t	变压器(引起的),切向的*
H	维持的	th	热的
$h(n)$	对应于 h 次谐波的+	v	阀侧的
i	理想的	W	工作状态下的
j	半导体 PN 结的	x	感(抗)性的
K	阴极的	α	延迟角的,控制状态下的
L	电网侧的,电路的,负载的,擎住的,线间的(例如线间电压)	σ	纹波的,漏磁的*
		ϕ	相的(例如相电压)

注: 1. 带“★”者非取自本专业标准。

2. 带“+”者,只符合 IEC—146 1986 年修正稿,但不符合 IEC—146 1973 和 GB3859—83。其中谐波序次 h 原用 n 表示,后改用 h 。

第 1 章 概 论^{[1][2]}

1 电力电子技术及其在国民经济中的作用

电力电子技术是一种利用电力半导体器件对电能的某些参量或特性(如电压、电流、频率、相位、相数、波形等)进行变换和控制的技术。国际电工委员会(IEC)对电力电子学的定义是:“电子学中涉及电力技术的部分。”电力电子技术一般由电力半导体器件、电力变换电路和控制技术组成。

据预测,为了满足节能及机电一体化技术进一步发展的需要,到下个世纪初,相当大一部分的电能将经过电力电子技术变换后再使用。因此,国家对电力电子技术极为重视。其主要原因将在本章 1.1~1.3 节阐明。

1.1 电力电子技术的节能作用

利用电力电子技术可将电能变换成为适合于用电设备最佳运用状态所需要的形式,实现用电最佳化,从而达到节能目的。例如采用电力电子技术实现电动机调速后,对需要调节的风机、水泵等用电量很大的设备,一般可节电 20%~40%。因此,电力电子技术是一种很有潜力的节能技术。

1.2 电力电子技术的节材作用

依据电磁感应原理设计的大部分电气设备的体积和重量随其供电频率的提高而显著减小。电力电子变频技术可以使用用电设备的供电频率在几赫到几兆赫范

围内自由控制,从而使电气设备体积缩小到几分之一到几十分之一。例如 50Hz 的电焊机质量为 300kg,而在保持性能不变情况下,20kHz 时仅为 24kg。因此,电力电子技术在节约原材料方面将发挥很大作用。

1.3 电力电子技术对提高供电质量的作用

随着技术的进步,种类繁多的用电设备对供电电源的质量,如供电的连续性、电压的稳定性以及电源波形的正弦度等提出了不同的要求。利用电力电子技术制造的不间断供电系统(UPS)、高稳定电源及净化电源等能满足用电设备所需的各种要求。

1.4 电力电子技术对机电一体化工作的作用

电力电子技术是强电和弱电的桥梁。“传感器→信息处理电子设备→电力电子设备→机电设备”闭环控制是实现机电一体化的基本手段。在很多情况下电力电子设备是机电一体化设备中不可缺少的一环,是改造传统产业的重要手段。

2 电力电子设备

2.1 电力电子设备的变换方式和主要类型

电力电子设备按其变换方式的分类情况见表 3-1-1。表中项 1~4 和项 5 中的借助相位控制的交流电力控制器统称为变流器。一般实用的变流器是实现上述基本变换的单一或综合功能的设备。

表 3-1-1 基于变换方式的电力电子设备类型

序号	类 别	简要定义及功能
1	整流器 (Rectifier)	将交流电变为直流电。按所用器件不同,又可分为不可控(二极管)整流和可控(晶闸管)整流
2	逆变器 (Inverter)	将直流电变为交流电,按换相方式不同,又可分为电网换相、自换相和负载换相三类
3	变频器 (Electronic Frequency Converter)	将一种频率的交流电变为另一种频率(固定频率或可变频率)的交流电。按变换过程不同,可分为间接(有中间直流环节)变频器和直接变频器,后者用于降频者又称为周波变流器(Cycloconverter)
4	直流变流器 (Electronic D. C. Convertor)	将一种直流电变为另一种直流电。分为有中间交流环节和不经交流环节两种,后者又称斩波器(Chopper)

(续)

序号	类别	简要定义及功能
5	交流电力控制器 (A. C. Power Controller)	借助相位控制或通断比控制, 直接调节交流功率
6	电力电子开关 (Electronic Power Switch)	用电子方法将交流或直流电进行接通或分断的装置

2.2 电力电子设备的主要用途和典型系列

表 3·1-2 列出了对应于不同用途的电力电子设备系列及其性能特点。

表 3·1-2 电力电子设备的主要用途和特点

用途类别	主要用途	性能特点	单台设备容量范围	标准代号
电化学	铝、镁等有色金属电解, 食盐、水等化工电解, 石墨化电炉加热	容量大, 负载平稳, 有较高的效率和功率因数	36~1250V 直流 800~160000A	ZB K46 006
直流牵引	干线电力机车	大功率单相整流	直流 2000~6000kW	ZB K46 011
	矿山牵引、城市无轨电车、地下铁道等变电站	负载变化大, 一般采用整流管整流设备	275~1650V 直流 100~3150A	
直流传动	造纸、印染等轻工业传动	负载较平稳, 有一定的稳速要求	直流 0.5~500kW	GB3886
	可逆轧机、连轧机、卷扬机、龙门刨床等	负载急剧变化, 要求频繁反向或快速制动, 一般用双变流器供电	直流 5~5000kW	
交流传动	串级调速 风机、液泵、卷扬机、起重机、球磨机及传送带等调速	用电网换相逆变器将电动机转差功率反馈到电网, 能无级调速, 效率较高, 当调速比要求降低时, 装置容量随之减小	交流 100~8000kW	GB12669
	变频调速 超高速电动机转速控制、多台设备的同步调速系统、高精度调速或稳速系统	由自换相逆变器或周波变流器供电	交流 0.5~1500kW	GB12668
电机励磁	同步电动机的直流励磁	能自动投励、强励及调节功率因数	50~600V 直流 200~600A	GB12667
	大型发电机、小型水力和柴油发电机的直流励磁	强励时短时过载倍数较高, 大型发电机励磁装置的可靠性要求高	直流 1000V1800A (100~600MW 级汽轮发电机励磁)	
电镀及电解加工	电镀电源	电压低, 电流大, 有防腐蚀要求	6~48V 直流 50~16000A	JB1504 (修订稿)
	电解加工电源	有稳压稳流要求, 其余同上	12~24V 直流 500~20000A	ZB K46 009

(续)

用途类别		主要用途	性能特点	单台设备容量范围	标准代号
充 电	主充电	蓄电池充电	负载为反电动势性质, 较平稳	直流 18~360V 15~315A	ZBK46004
	浮充电		对输出直流电压的纹波限制较严	直流 36~330V 15~400A	
	快速充电	库房、码头、铲车、电瓶车、火车、潜艇的蓄电池充电	充电时间小于 1h, 能逆变放电	直流 220V 2000A	
	充放电	电厂、电站控制室直流电源的蓄电池充电	能主充、稳压浮充、稳压放电, 一机三用	直流 165~360V 30~70A	
分合闸		电动操作机构电源、电磁吊车的电磁铁吸盘供电	短时冲击性负载	直流 110、220V 100~315A	ZBK46010
中频感应加热		金属熔炼、热处理、热加工、焊接等加热电源	能自动调整频率适应负载变化的需要	交流 400~8000Hz 25~2000kW	ZBK46001
交流不间断电源		通信设备、电子计算机、电站照明等交流备用电源	响应快, 能无间断地自动投入运行	交流 1~1000kW	GB7260
稳定电源	直流	稳压电源、稳流电源、稳频电源	在任何影响量干扰下, 能保持稳定输出	直流 500kVA 稳定度 $10^{-4} \sim 10^{-6}$	
	交流				
交流电力 控制器	电子开关	交流电动机频繁操作, 功率因数补偿电容器组的自动切换及电焊机、电炉等控制开关 交流调光, 控温, 调速等	能适应每分钟数十次通断的要求, 作为开关应用时要求过载能力较高, 可用控制通断比方式自动调节负载功率 连续调节交流电压或功率	交流 380V 100~600A	JB3283
	调压器				
	调功器				
直流斩波器		矿山和地下铁道的直流电机车、蓄电池为动力的电动车辆的调速	无级调速 (调压), 加速平稳, 效率和功率因数高	直流 110~1650V 40~400kW	GB7677
高压静电除尘		静电除尘、原油脱水、静电喷涂等高压电源	电压高, 电流小, 对短路电流限制较严	直流 40, 60, 80kV 100~1000mA	ZBK46008
直流输电		远距离超高压输电、跨海峡电缆输电等变流站	阀体工作电压高, 必须多个器件串联	直流 100~1000kV 10~1000MW	
无功补偿		电弧炉、轧机、电力系统	工作电压高, 可连续调节, 响应速度快	13.8kV 以上 40Mvar	
电影放映		各种电影放映机	输出直流电流可调, 能稳流	直流 20~34.5V 25~145A	ZBK46005

2.3 电力变流器的特点

电力变流器与一般半导体电子设备不同, 其处理对象是功率而非信息。因此, 电力变流器的设计、制造和应用须特别注意效率、功率因数、电压调整率、谐波

畸变等问题。

效率是电力变流器的最重要指标之一。为提高效率, 变流设备中的电力半导体器件不管是否具有线性调节特性 (如电力晶体管), 均工作在开、关状态, 应避免产生可观的功率损耗。在低压大电流电源中采用

压降很低的肖特基势垒二极管整流，在高频设备中采用谐振变频器以减少开关损耗等均是提高效率的有效方法。


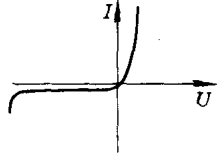



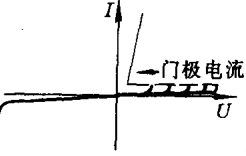

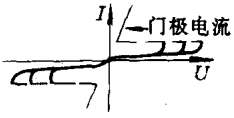
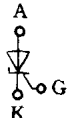
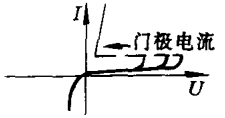

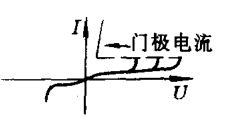
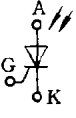
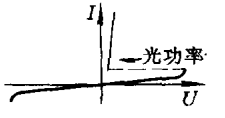
电力电子设备的大量使用也带来了对电网的谐波干扰及功率因数过低的问题。除使用补偿装置和滤波器外，还可以改进电力电子设备本身的控制方式，如采用脉宽调制技术、超前换相技术等来改善功率因数和

降低谐波危害。

3 电力半导体器件

电力半导体器件以电流容量大、耐压高为基本特征。常用和正在发展的主要电力半导体器件如表3-1-3所示。该表将电力半导体器件分为三大类：整流管和晶闸管类；晶体管类；电力集成电路类。

表 3·1-3 电力半导体器件分类表

类别	名称	IEC 名称	符号	型号	伏安特性	主要用途
整流管和晶闸管类	整流管 (SR)	Semiconductor rectifier diode		ZP		各种直流电源、整流器
	快速整流管 (FRD)	Fast recovery rectifier diode		ZK		高频电源、斩波器、逆变器
	肖特基势垒二极管 (SBD)	Schottky barrier diode				计算机电源、仪表电源、高频开关电源
	普通晶闸管 (Th) (SCR) ①	Reverse blocking triode thyristor		KP		整流器、逆变器、变频器、斩波器
	快速晶闸管 (FST)	Fast switching thyristor		KK		中频电源、超声波电源
	可关断晶闸管 (GTO)	Turn-off (triode) thyristor		KG		逆变器、斩波器、直流开关、汽车点火系统
	双向晶闸管 (TRIAC)	Bidirectional triode thyristor		KS		电子开关、调光器、调温器
	逆导晶闸管 (RCT)	Reverse conducting triode thyristor		KN		逆变器、斩波器
	非对称晶闸管 (ASCR)	Asymmetry thyristor				逆变器、斩波器
光控晶闸管 (LATT)	Light activated triode thyristor		KL		高压直流输电、无功补偿、高压开关	

(续)

类别	名称	IEC 名称	符号	型号	伏安特性	主要用途
整流管和晶闸管类	静电感应晶闸管 (SITH)	Field controlled thyristor		KY		高频谐振器、高频逆变器、高频脉冲开关
	MOS控制晶闸管 (MCT)	MOS controlled thyristor		KV		高频、大功率电力变换
晶体管类	电力晶体管 (GTR)	Power transistor		JA JB JC		中小功率逆变器、600kW 以下、40kHz 以下各种电源
	电力 MOS 场效应晶体管 (P-MOSFET)	Power MOSFET				汽车电器、小功率逆变器, 高频 (1GHz 以下)、低电压、中电流电源
	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	Insulation gate bipolar transistor		JI		高频开关, 高频逆变器大功率开关电源, 高频 (100kHz 以下)、高压、中电流电源
	静电感应晶体管 (SIT)	Field transistor; State induction transistor		JE		高频感应加热、高频逆变器、高频开关 (10MHz 以下)
电力集成电路类	高压集成电路 (HVIC) 智能电力集成电路 (SPIC)	High voltage IC Smart power IC				汽车电器、家用电器、办公自动化设备及各种电源和变换设备

注：普通整流管的国家标准号为 GB4939—85，IEC 标准号为 747-2；

普通晶闸管的国家标准号为 GB4940—85，IEC 标准号为 747-6；

快速晶闸管的标准号为 JB4193—86；

双向晶闸管的标准号为 JB4192—86；

电力晶体管的标准号为 JB5840—91。

① 普通晶闸管曾称为硅可控整流器 (SCR)，为表达方便，往往仍沿用 SCR 代表普通晶闸管。

4 电力电子技术发展趋势

高频化和智能化。

近 10 年电力电子技术发展十分迅猛，预计今后的发展方向与电力半导体器件直接有关的是：自关断化、

就经济目标而言，将围绕节能、节材等经济指导方针向高效、小型、轻量、低噪声、高性能、多功能方向发展。达到这一目的的有效手段之一是在适用领域内

采用高频或PWM环节。这种环节在计算机分散电源、通信电源和各种开关电源上取得的降耗、小型化效果就是很好的例证。此外，感应加热电源的高频化也是一个方向。所以，“90年代将是高频电力电子时代”的说法有一定的道理。

就电力半导体器件本身的发展而言，IGBT、电力

MOSFET等器件有可能分别成为中、小功率低压应用领域的主导器件。MCT、高压集成器件和智能模块的发展动向更值得重视，有人预言，一旦MCT进入规模生产阶段，它对电力电子技术发展的影响，可与50年代晶闸管的出现所造成的影响相比。

第2章 普通整流管和普通晶闸管

本章主要介绍普通整流管和普通晶闸管的额定值和特性参数，以及它们的外形结构。

1 普通整流管的基本特性和参数

1.1 普通整流管的额定值和特性参数的定义

普通整流管的电路图形符号和伏安特性见图3-2-1，其额定值和特性参数的定义见表3-2-1。

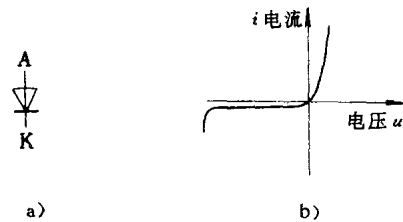


图3-2-1 普通整流管的电路图形符号和伏安特性
a) 图形符号 b) 伏安特性

表3-2-1 普通整流管额定值和特性参数的定义 (GB2900.32)

名称	符号	定义	
额定值	正向平均电流	$I_{F(AV)}$	正向电流在一个周期内的平均值
	正向方均根电流	$I_{F(RMS)}$	正向电流在一个周期内的方均根值
	正向浪涌电流	I_{FSM}	一种由于电路异常情况(如故障)引起的、使结温超过额定值的不重复性最大正向过载电流
	反向重复峰值电压	U_{RRM}	整流管两端间出现的重复反向电压的最大瞬时值，包括所有的重复瞬态电压，但不包括所有的不重复瞬态电压
	反向不重复峰值电压	U_{RSM}	整流管两端间出现的任何不重复反向电压的最大瞬时值
特性参数	正向(峰值)电压	U_{FM}	整流管通以 π 倍或规定倍数额定正向平均电流值时的瞬态峰值电压
	反向重复峰值电流	I_{RRM}	整流管加上反向重复峰值电压时的峰值电流
	恢复电荷	Q_r	整流管从规定的正向电流条件向规定的反向条件转换期间所存在的全部恢复电荷
	反向恢复电流	I_{rr}	在反向恢复期间产生的反向电流部分

1.2 普通整流管的额定值和特性参数

普通整流管额定值和特性参数见表3-2-2。

对普通整流管，标准规定制造厂应给出的特性曲线有：

(1) 管壳温度与正向平均电流的降额关系曲线；

(2) 正向伏安特性；

(3) 瞬态热阻与时间的关系曲线；

(4) 浪涌电流与周波数的关系曲线和 I^2t 特性曲线；

(5) 最大正向功率损耗与正向平均电流的关系曲线。

表 3-2-2 普通整流管的额定值和特性参数

额 定 值①						特性参数② (上限值)			
正向平均 电 流	正向方均 根电流	正向浪涌电流		I^2t		反向重复 峰值电压	正向峰 值电压	反向重复 峰值电流	结壳 热阻
$I_{F(AV)}$ (A)	$I_{F(RMS)}$ (A)	I_{FSM} (A)		I^2t (A ² ·s)		U_{RRM} (V)	U_{FM} (V)	I_{RRM} (mA)	R_{Σ} (K/W)
		L	H	L	H				
1	1.6	19	40	1.8	8	25~1600	≤1.6	≤1	≤12
3	4.7	56	100	15	50	50~2000	≤1.6	≤2	≤6.0
5	7.9	90	180	40	160		≤1.6	≤2	≤4.0
10	16	190	310	180	480		≤1.6	≤5	≤2.0
20	31	380	570	720	1600		≤1.6	≤10	≤1.4
30	47	560	750	1600	2800	50~2400	≤1.8	≤20	≤1.0
50	79	940	1200	5000	7200		≤1.8	≤20	≤0.6
100	160	1.4×10^3	2.2×10^3	0.1×10^5	0.24×10^5	50~3000	≤2.0	≤30	≤0.30
200	310	2.8×10^3	4.0×10^3	0.4×10^5	0.8×10^5		≤2.0	≤40	≤0.20
300	470	4.2×10^3	5.6×10^3	0.9×10^5	1.6×10^5		≤2.0	≤40	≤0.11
400	630	5.6×10^3	7.5×10^3	1.6×10^5	2.8×10^5		≤2.0	≤50	≤0.095
500	790	7.0×10^3	9.4×10^3	2.5×10^5	4.4×10^5		≤2.0	≤50	≤0.068
600	940	8.4×10^3	11×10^3	3.5×10^5	6.0×10^5		≤2.0	≤50	≤0.057
800	1300	11×10^3	15×10^3	6.0×10^5	11×10^5		≤2.0	≤60	≤0.042
1000	1600	14×10^3	19×10^3	9.8×10^5	18×10^5		≤2.0	≤60	≤0.034
1200	1900	17×10^3	23×10^3	15×10^5	26×10^5		≤2.0	≤65	≤0.028
1600	2500	23×10^3	30×10^3	26×10^5	36×10^5		≤2.0	≤80	≤0.021

① 额定值中, $I_{F(AV)}$ 对应的壳温 T_c 、紧固力矩 $F-L$ 和紧固压力 F 和重量 W 由制造厂给出; 工作结温 T_j 为 $-40 \sim +150^\circ\text{C}$, 其上限 T_{jM} 称为额定结温或最高工作结温; 贮存温度 T_{stg} 为 $-40 \sim +160^\circ\text{C}$; 反向不重复峰值电压 U_{RSM} 可按下列关系得到: $U_{RRM} = 90\% U_{RSM}$; I^2t 为 I_{FSM} 正弦波底宽 10ms 的积分值; L 对应于下限值, H 对应于上限值。

② 特性参数中, 接触热阻 R_{cs} 由制造厂给出上限值; 恢复电荷 Q_r 和反向恢复电流 I_{rr} 在特殊需要时给出。

2 普通晶闸管的基本特性和参数

2.1 普通晶闸管的额定值和特性参数的定义

普通晶闸管的电路图形符号和伏安特性见图 3-2-2, 其额定值和特性参数的定义见表 3-2-3。

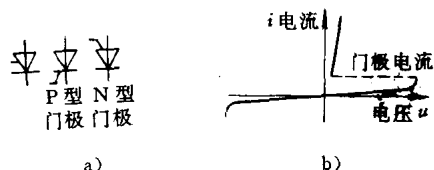


图 3-2-2 普通晶闸管的电路图形符号和伏安特性
a) 图形符号 b) 伏安特性

表 3-2-3 普通晶闸管额定值和特性参数的定义

名称	符号	定义
通态平均电流	$I_{T(AV)}$	通态电流在一个整周期内的平均值
通态方均根电流	$I_{T(RMS)}$	通态电流在一个整周期内的方均根值
通态浪涌电流	I_{TSM}	一种由于电路异常情况(如故障)引起的、并使结温超过额定结温的不重复性最大通态过载电流
断态重复峰值电压	U_{DRM}	晶闸管两端出现的重复最大瞬时值断态电压,包括所有的重复瞬态电压,但不包括所有的不重复瞬态电压
反向重复峰值电压	U_{RRM}	晶闸管两端出现的重复最大瞬时值反向电压,包括所有的重复瞬态电压,但不包括所有的不重复瞬态电压
断态不重复峰值电压	U_{DSM}	晶闸管两端出现的任何不重复最大瞬时值的瞬态断态电压
反向不重复峰值电压	U_{RSM}	晶闸管两端出现的任何不重复最大瞬时值的瞬态反向电压
通态电流临界上升率	di/dt	在规定条件下,晶闸管能承受而无有害影响的最大通态电流上升率
门极反向峰值电压	U_{RGM}	门极反向电压的最大瞬时值,包括所有的门极反向瞬态电压
门极正向峰值电压	U_{FGM}	门极正向电压的最大瞬时值,包括所有的门极正向瞬态电压
门极正向峰值电流	I_{FGM}	包括所有门极正向瞬态电流的最大瞬时值门极正向电流
门极峰值功率	P_{GM}	在规定条件下,门极正向所允许的最大门极峰值电流和门极峰值电压的乘积
门极平均功率	P_{GAV}	在规定条件下,门极正向所允许的最大平均功率
通态(峰值)电压	U_{TM}	晶闸管通以 π 倍或规定倍数额定通态平均电流值时的瞬态峰值电压
断态重复峰值电流	I_{DRM}	晶闸管加上断态重复峰值电压时的峰值电流
反向重复峰值电流	I_{RRM}	晶闸管加上反向重复峰值电压时的峰值电流
维持电流	I_H	使晶闸管维持通态所必需的最小主电流
擎住电流	I_L	晶闸管刚从断态转入通态,并移除触发信号之后,能维持通态所需的最小主电流
门极触发电流	I_{GT}	使晶闸管由断态转入通态所必需的最小门极电流
门极触发电压	U_{GT}	产生门极触发电流所必需的最小门极电压
门极不触发电压	U_{GD}	不致使晶闸管从断态转入通态的最大门极电压
断态电压临界上升率	du/dt	在规定条件下,不导致从断态到通态转换的最大主电压上升率
(电路换向)关断时间	t_q	外部使主电路转换动作后,从主电流下降至零值瞬间起,到晶闸管能承受规定的断态电压而不致过零开通止的时间间隔

注:摘自 GB2900.32-82。

2.2 普通晶闸管的额定值和特性参数

3-2-5。

普通晶闸管的额定值见表 3-2-4,特性参数见表

企业标准或产品说明书中应给出的晶闸管特性曲线参见本篇第 5 章 2-1 节。

表 3-2-4 普通晶闸管的额定值

通态平均电流 $I_{T(AV)}$ (A)	通态方均根电流 $I_{T(RMS)}$ (A)	浪涌电流 I_{TSM} (A)			I^2t ($A^2 \cdot s$)		断态重复峰值电压 U_{DRM} (V)	反向重复峰值电压 U_{RRM} (V)	工作温度 T_j ($^{\circ}C$)	贮存温度 T_{stg} ($^{\circ}C$)	通态电流临界上升率 di/dt (A/ μs)	门极反向峰值电压 U_{RGM} (V)	门极正向峰值电压 U_{FGM} (V)	门极正向峰值电流 I_{FGM} (A)	门极峰值功率 P_{GM} (W)	门极平均功率 P_{GAV} (W)
		L	H	L	H											
1	1.6	13	19	0.85	1.8	50~1600	50~1600	-40~+100	-40~+125		5	6				
3	4.7	38	56	7.2	15	100~2000	100~2000				5	10				
5	7.9	64	90	20	40	100~2000	100~2000				5	10				
10	16	130	190	85	180	100~2000	100~2000				5	10				
20	31	240	380	280	720	100~2000	100~2000				5	10				
30	47	300	560	720	1600	100~2400	100~2400				5	10				
50	79	640	940	2000	5000	100~2400	100~2400				5	10				
100	160	1.3×10^3	1.9×10^3	8.5×10^3	18×10^3	100~3000	100~3000				A,B	10	1	4	0.5	
200	310	2.5×10^3	3.8×10^3	31×10^3	72×10^3	100~3000	100~3000				A,B,C	10	2	8	2	
300	470	3.8×10^3	5.6×10^3	0.7×10^5	1.6×10^5	100~3000	100~3000				B,C	10	3	5	3	
400	630	5.0×10^3	7.5×10^3	1.3×10^5	2.8×10^5	100~3000	100~3000				D,E	16	3	15	3	
500	790	6.4×10^3	9.4×10^3	2.1×10^5	4.4×10^5	100~3000	100~3000				F	16	4	20	4	
600	940	7.6×10^3	11×10^3	2.9×10^5	6.0×10^5	100~3000	100~3000				B,C, D,E, F	16	4	20	4	
800	1300	10×10^3	15×10^3	5.0×10^5	11×10^5	100~3000	100~3000				B,C,D, E,F,G	16	4	20	4	
1000	1600	13×10^3	19×10^3	8.5×10^5	18×10^5	100~3000	100~3000					16	4	20	4	

注: 1. $I_{T(AV)}$ 对应的壳温 T_c 、紧固力矩 $F \sim L$ 和紧固压力 F (公差为 $\pm 10\%$)、重量 W 由制造厂给出。

2. I^2t 为 I_{TSM} 正弦波底宽 10ms 的积分值。

3. P_{GM} 、 I_{FGM} 、 U_{FGM} 三参数对同一晶闸管不能同时满足, 按测试方法只能满足三者之一。

4. 工作结温上限 (T_{JM}) 称为最高工作结温或额定结温。

5. 断态不重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不重复峰值电压 U_{RRM} 可分别按下列关系得到: $U_{DRM} = 90\% U_{DSM}$ 、 $U_{RRM} = 90\% U_{RRM}$ 。

6. di/dt 项中, A=25, B=50, C=100, D=150, E=200, F=300, G=500, 都为下限值。

7. L 对应于下限值, H 对应于上限值。

表 3-2-5 普通晶闸管的特性参数

通态平均电流	通态峰值电压	断态重复峰值电流	反向重复峰值电流	维持电流	门极触发电流	门极触发电压	门极不触发电压	断态电压临界上升率	结壳热阻
$I_{T(AV)}$ (A)	U_{TM} (V)	I_{DRM} (mA)	I_{RRM} (mA)	I_H (mA)	I_{GT} (mA)	U_{GT} (V)	U_{GD} (V)	du/dt (V/ μ s)	$R_{\theta c}$ (K/W)
1	≤ 2.0	≤ 3	≤ 3	≤ 10	≤ 20	≤ 2.5	≥ 0.2	A、B C、D E、F	≤ 4.0
3	≤ 2.2	≤ 8	≤ 8	≤ 30	≤ 60	≤ 3	≥ 0.2		≤ 3.0
5	≤ 2.2	≤ 8	≤ 8	≤ 60	≤ 60	≤ 3	≥ 0.2		≤ 1.6
10	≤ 2.2	≤ 10	≤ 10	≤ 100	≤ 100	≤ 3	≥ 0.2	B、C D、E F、G	≤ 1.0
20	≤ 2.2	≤ 10	≤ 10	≤ 100	≤ 100	≤ 3	≥ 0.2		≤ 0.7
30	≤ 2.4	≤ 20	≤ 20	≤ 150	≤ 150	≤ 3	≥ 0.2		≤ 0.4
50	≤ 2.4	≤ 20	≤ 20	≤ 200	≤ 200	≤ 3	≥ 0.2	C、D E、F G	≤ 0.20
100	≤ 2.6	≤ 40	≤ 40	≤ 200	≤ 250	≤ 3.5	≥ 0.2		≤ 0.11
200	≤ 2.6	≤ 40	≤ 40	≤ 200	≤ 250	≤ 3.5	≥ 0.2		≤ 0.08
300	≤ 2.6	≤ 50	≤ 50	≤ 300	≤ 350	≤ 3.5	≥ 0.2	C、D E、F G	≤ 0.05
400	≤ 2.6	≤ 50	≤ 50	≤ 300	≤ 350	≤ 4	≥ 0.2		≤ 0.04
500	≤ 2.6	≤ 60	≤ 60	≤ 400	≤ 350	≤ 4	≥ 0.2		≤ 0.035
600	≤ 2.6	≤ 60	≤ 60	≤ 400	≤ 350	≤ 4	≥ 0.2	C、D E、F G	≤ 0.026
800	≤ 2.6	≤ 80	≤ 80	≤ 500	≤ 450	≤ 4	≥ 0.2		≤ 0.020
1000	≤ 2.6	≤ 120	≤ 120	≤ 500	≤ 450	≤ 4	≥ 0.2		≤ 0.020

注：1. 擎住电流 I_L 、接触热阻 R_{CS} 由制造厂给出上限值；电路换向关断时间 t_q 由制造厂给出典型值。

2. du/dt 项中，A=25、B=50、C=100、D=200、E=500、F=800、G=1000，都为下限值。

3 普通整流管和普通晶闸管的外形结构

普通整流管和普通晶闸管的外形结构主要有两种：螺栓形和平板形。前者只有一个平面与散热器接触，所以安装、更换方便，但冷却效果差，一般适用于 200A 以下的中、小容量器件；后者由于阳极、阴极双面冷却，在相同条件下冷却效果比前者高 60% 左右，

故适用于 200A 以上大容量器件。

3-1 螺栓形结构

图 3-2-3 示出了普通整流管和普通晶闸管的螺栓形结构。螺栓形整流管的外形见图 3-2-4，其外形尺寸见表 3-2-6。螺栓形晶闸管的外形见图 3-2-5，其外形尺寸见表 3-2-7。

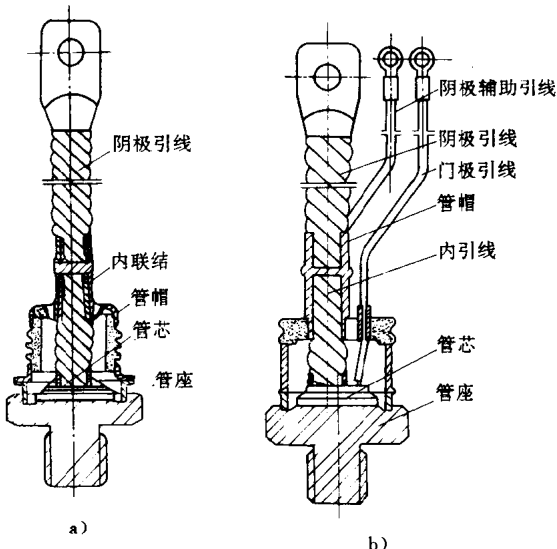


图 3-2-3 螺栓形结构

a) 整流管 b) 晶闸管

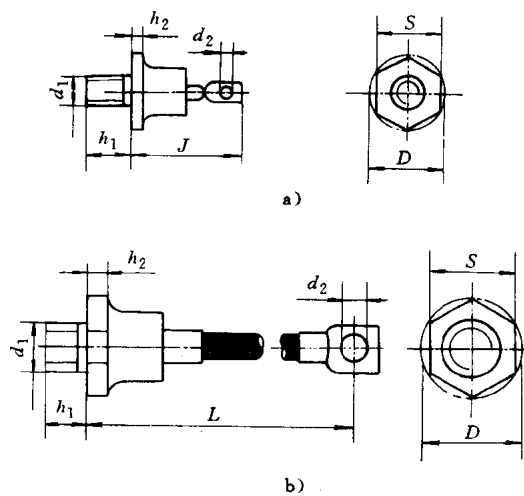


图 3-2-4 螺栓形整流管的外形

a) ZL05、ZL06、ZL08 系列 b) ZL08I、ZL10、ZL12、

ZL16A、ZL20A、ZL24A、ZL30A 系列