

中华人民共和国国家标准

GB/T 3859.2—2013
代替 GB/T 3859.2—1993

半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-2 部分：应用导则

Semiconductor converters—
General requirements and line commutated converters—
Part 1-2: Application guide

(IEC/TR 60146-1-2:2011, MOD)

杭州高电
专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2013-07-19 发布

2013-12-02 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	Ⅶ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 有关变流器故障的术语	1
3.2 有关变流器产生的瞬态现象的术语	3
3.3 有关温度的术语	3
3.4 有关谐波的术语	4
4 变流器及其系统的性能	5
4.1 应用领域	5
4.1.1 概述	5
4.1.2 变流系统和设备	5
4.1.3 供电电源调节(有源功率和无源功率)	6
4.2 主要技术参数	6
4.2.1 应给出的主要项目	6
4.2.2 其他信息	6
4.2.3 非正常运行条件	7
4.3 变流变压器和电抗器	7
4.4 计算因子	7
4.4.1 概述	7
4.4.2 电压比	12
4.4.3 变流器网侧电流因数	12
4.4.4 变流器阀侧电流因数	12
4.4.5 电压调整值	12
4.4.6 磁路	13
4.4.7 功率损耗因数	13
4.5 并联联结和串联联结	13
4.5.1 阀器件的并联联结或串联联结	13
4.5.2 组件和设备单元的并联或串联	13
4.6 功率因数	14
4.6.1 概述	14
4.6.2 确定基波功率因数使用的文字符号	14
4.6.3 整流运行和逆变运行时,用于基波功率因数 $\cos\varphi_{\text{IN}}$ 和无功功率 Q_{IN} 近似的圆图	15
4.6.4 基波功率因数 $\cos\varphi_{\text{I}}$ 的计算	16
4.6.5 变流因数	17
4.7 直流电压调整值	18
4.7.1 概述	18

GB/T 3859.2—2013

4.7.2	固有直流电压调整值	18
4.7.3	交流系统阻抗引起的直流电压调整值	20
4.7.4	供需双方应就变流器直流电压调整值交换的信息	22
4.8	逆变状态下的可靠运行	22
4.9	交流电压波形	22
4.10	影响施加在变流器阀器件上的电压的电路运行条件	23
4.11	过电压保护	24
4.12	环境条件对变流器运行的影响	25
5	主要参数计算	25
5.1	运行参数的实际计算	25
5.1.1	概述	25
5.1.2	假设条件	25
5.1.3	初步计算	26
5.1.4	运行条件计算	26
5.2	变流器负载引起的供电系统电压变化	28
5.2.1	基波电压变化	28
5.2.2	电压变化要求的最小 R_{isc} 值	28
5.2.3	变流变压器的变比	29
5.2.4	变压器额定值	30
5.3	变流器无功功率消耗的补偿	30
5.3.1	平均无功功率消耗	30
5.3.2	需要补偿的平均无功功率	30
5.3.3	固定无功功率补偿的电压波动	31
5.4	供电电压畸变	31
5.4.1	换相缺口	31
5.4.2	同一供电网中的多个变流器运行	33
5.5	变流器运行在网侧产生的谐波	34
5.5.1	网侧电流的方均根值	34
5.5.2	网侧的谐波(适用6脉波变流器的近似方法)	34
5.5.3	谐波畸变和最小 R_{isc} 要求	36
5.5.4	谐波电流相位移的估计	37
5.5.5	谐波电流的叠加	37
5.5.6	峰值和平均值谐波频谱	37
5.5.7	变压器的相位移	38
5.5.8	两个6脉波变流器的顺序触发	38
5.6	功率因数补偿和谐波畸变	38
5.6.1	总则	38
5.6.2	谐振频率	38
5.6.3	直接并联的电容器补偿装置	39
5.6.4	谐振频率的估算	39
5.6.5	去谐电抗器	40
5.6.6	纹波控制频率(载波频率)	41
5.7	直流电压的谐波含量	41

5.8 其他考虑	42
5.8.1 随机控制角	42
5.8.2 次谐波的不稳定性	42
5.8.3 谐波滤波器	42
5.8.4 电缆电容量的估计	42
5.9 直流侧短路时的电流计算值	42
5.10 抗扰度等级的选用	43
5.10.1 概述	43
5.10.2 抗扰度等级的选择	43
6 试验要求	46
6.1 由短路试验估算功率损耗	46
6.1.1 单相联结	46
6.1.2 多相双拍联结	46
6.1.3 多相单拍联结	46
6.2 采用短路法估算功率损耗的步骤	46
6.3 试验方法	47
6.3.1 方法 A1	47
6.3.2 方法 B	48
6.3.3 方法 C	48
6.3.4 方法 D	48
6.3.5 方法 E	49
6.3.6 方法 A2	49
7 变流器的负载电流和结温计算	50
7.1 高峰负载额定电流值的说明	50
7.2 与有效结温有关的文字符号	51
7.3 通过有效结温计算确定承受高峰负载的能力	51
7.3.1 概述	51
7.3.2 施加在半导体器件上的功率脉冲波形的近似	52
7.3.3 温度计算的叠加法	53
7.3.4 连续负载有效结温计算	53
7.3.5 周期性负载有效结温计算	54
7.3.6 几种典型应用的有效结温计算	54
8 变流器运行	55
8.1 稳定性	55
8.2 静态特性	55
8.3 控制系统的动态特性	56
8.4 单变流器和双变流器的运行方式	56
8.4.1 单变流器联结	56
8.4.2 双变流器联结和整流和逆变运行时的限制	57
8.5 过渡电流	58
8.6 双变流器联结中直流环流的抑制	59
8.6.1 概述	59

GB/T 3859.2—2013

8.6.2	限制触发延迟角	59
8.6.3	控制环流	59
8.6.4	封锁触发脉冲	59
8.7	直流电动机控制用可逆变流器的工作原理	59
8.7.1	概述	59
8.7.2	电动机磁场反向	60
8.7.3	使用倒向开关使电动机电枢反向	60
8.7.4	电动机电枢的双变流器联结	61
9	变流器故障处理	61
9.1	概述	61
9.2	故障检测	61
9.3	故障电流保护	61
附录 A (资料性附录)	几种过电压保护措施	62
图 1	变流器故障时的电压	2
图 2	用于基波功率因数近似的圆图	16
图 3	$p=6$ 时,以 d_{on} 为变量的基波功率因数	16
图 4	$p=12$ 时,以 d_{on} 为变量的基波功率因数	17
图 5	$p=6$ 和 $p=12$ 时,以 d_{on} 为自变量的函数 d_{in}	21
图 6	交流电压波形	23
图 7	影响施加在变流器阀器件上的电压的电路运行条件	24
图 8	过电压保护措施示意图	25
图 9	交流侧谐波电流频谱($p=6$)	35
图 10	电容器额定值和交流电动机负载对谐振频率和放大倍数的影响	39
图 11	直流电压的谐波含量($p=6$)	41
图 12	配电示例	44
图 13	试验方法 A1 的简图	47
图 14	试验方法 D 的简图	48
图 15	单个高峰负载	50
图 16	重复高峰负载	50
图 17	功率脉冲波形的近似	52
图 18	连续负载下有效结温的计算	53
图 19	周期性负载的有效结温计算	54
图 20	不同延迟角时的直流电压波形	56
图 21	不同负载和延迟角下的直流电压	57
图 22	逆变运行时直流电压的限制	58
图 23	直流电流低于过渡电流值时的直流电压	59
图 24	变流器供电可逆直流电动机的运行顺序	60

图 A.1 高压型和高能型 MOV 的伏安特性	63
图 A.2 高压型和高能型 MOV 的脉冲降额曲线	63
图 A.3 MOV 等效脉冲降额曲线示意图(双对数坐标)	64
图 A.4 MOV 连接位置示例	65
表 1 电气联结和计算因子	8
表 2 确定基波功率因数使用的文字符号	14
表 3 计算电压调整值使用的文字符号	19
表 4 整流或逆变运行条件	27
表 5 运行点	28
表 6 运行条件	29
表 7 逐步逼近的结果	29
表 8 有功功率消耗和无功功率消耗计算结果示例	30
表 9 带专用变压器的变流器缺口深度示例	32
表 10 由公用变压器供电的一个变流器运行时产生的缺口深度示例	33
表 11 10 个变流器同时运行产生的缺口深度示例	33
表 12 不同重叠角和延迟角下的 I_{d1} 、 I_d 值	34
表 13 低压系统的最小 R_{sc} 要求	37
表 14 变压器相位移和谐波次数	38
表 15 电缆电容量的近似值(kvar·km)	42
表 16 直流侧短路时的变流器电流值	43
表 17 图 12 示例的计算值	45
表 18 与有效结温有关的文字符号	51
表 19 几种典型应用的有效结温计算	55

前 言

GB/T 3859《半导体变流器》分为以下几个部分：

- 第 1-1 部分：基本要求规范；
- 第 1-2 部分：应用导则；
- 第 1-3 部分：变压器和电抗器；
- 第 2 部分：包括直接直流变流器的半导体自换相变流器。

本部分为 GB/T 3859 的第 1-2 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 3859.2—1993《半导体变流器 应用导则》。

本部分与 GB/T 3859.2—1993 相比，主要技术变化如下：

- 修改了标准名称；
- 调整了文本结构，使之尽量与 IEC/TR 60146-1-2:2011 一致；
- 删除了“主题内容”，修改了“适用范围”（见第 1 章，1993 年版第 1 章）；
- 调整了“引用文件”（见第 2 章，1993 年版第 2 章）；
- 调整并修改了“术语和定义”（见第 3 章，1993 年版第 3 章）；
- 删除了 1993 年版的第 4 章“变流器的标志”，相关内容在 GB/T 3859.1—2013 中规定；
- 修改了“变流器的应用领域”“变流器主要技术参数”“并联和串联联结”和“环境条件与变流器安全运行”（见 4.1、4.2、4.5 和 4.12，1993 年版的 5.1、5.2、5.4 和 5.11）；
- 增加了“变流变压器和电抗器”和“过电压保护”（见 4.3 和 4.11）；
- 修改了“换相缺口”和“直流电压的谐波含量”（见 5.4.1 和 5.7，1993 年版的 6.5.1 和 6.4）；
- 增加了“故障电流保护”（见 9.3）；
- 增加了“几种过电压保护措施”（见附录 A）；
- 删除了“触发装置的抗扰性能”和变流器理想网侧谐波电流的计算公式（1993 年版的 5.12 和 6.6.2.1）；
- 删除了“环境温度和冷却媒质温度高于规定值时变流器的运行”“变流器在高海拔地区使用时电流容量的修正”和“变流器无露运行的温度”（1993 年版附录 A、附录 B 和附录 C）。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC/TR 60146-1-2:2011《半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-2 部分：应用导则》。

本部分与 IEC/TR 60146-1-2:2011 相比，在结构上增加了 4 条（3.4、4.11~4.12）和一个附录（附录 A），并将 IEC/TR 60146-1-2:2011 中的 4.2.1 和 4.2.3.1 调整为 4.2.1，4.2.3.2 调整为 4.2.2.1，4.2.3.3 调整为 4.2.2.2，4.2.3.4 调整为 4.2.2.3，4.2.3.5 调整为 4.2.2.4，4.2.4 调整为 4.2.3，5.10.1 和 5.10.2 调整为 5.10.1，5.10.3 调整为 5.10.2，7.4 调整为 4.10。

本部分与 IEC/TR 60146-1-2:2011 的技术性差异及其原因如下：

- 根据标准条文中的实际引用情况，增加了部分规范性引用文件（见第 2 章）；
- 增加了“有关谐波的术语”（见 3.4）；
- 修改了“应用领域”和“与输出有关的参数”（见 4.1 和 4.2.2.2）；
- 增加了非均一联结和不对称控制适用的公式（见 4.6.4.2）；
- 增加了“过电压保护”和“环境条件对变流器运行的影响”（见 4.11 和 4.12）；
- 表 10 中，变压器缺口深度计算值更正为“0.033 1”，网侧缺口深度计算值更正为“0.033 2”。

GB/T 3859.2—2013

本部分做了下列编辑性修改:增加了资料性附录 A“几种过电压保护措施”。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国电力电子学标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本部分起草单位:西安电力电子技术研究所、厦门科华恒盛股份有限公司、广东志成冠军集团有限公司、保定莱特整流器股份有限公司、苏州电通电力电子有限公司、青岛经济技术开发区创统科技发展有限公司、卧龙电气集团北京华泰变压器有限公司、北京金自天正智能控制股份有限公司。

本部分主要起草人:陆剑秋、周观允、蔚红旗、苏先进、李民英、马永斌、孙丹峰、隋学礼、何宝振、杨艳秋、韩宇。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

——GB 3859—1983、GB/T 3859.2—1993。

半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-2 部分：应用导则

1 范围

本部分给出 GB/T 3859.1 涵盖的基本要求规范在不同情况下的应用导则,以使 GB/T 3859.1 中的规定以可控的形态适应于特殊应用。为便于使用 GB/T 3859.1,在技术关键点处给出了背景信息。

本部分主要涵盖电网换相变流器。就现行标准不可能提供必要的资料而言,本部分本身不是规范(除非涉及某些辅助部件)。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2900.33—2004 电工术语 电力电子技术(IEC 60050-551:1998,IDT)

GB/T 3859.1—2013 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-1 部分:基本要求规范(IEC 60146-1-1:2009,MOD)

GB/T 3859.3—2013 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-3 部分:变压器和电抗器(IEC 60146-1-3:1991,MOD)

GB 4208 外壳防护等级(IP 代码)(GB 4208—2008,IEC 60529:2001,IDT)

GB/T 10236 半导体变流器与供电系统的兼容及干扰防护导则

GB/T 16935.1—2008 低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分:原理、要求和试验(GB/T 16935.1:2008,IEC 60664-1:2007,IDT)

GB/T 17950 半导体变流器 第 6 部分:使用熔断器保护半导体变流器防止过电流的应用导则(GB/T 17950—2000,idt IEC 60146-6:1992)

GB/T 18494.1 变流变压器 第 1 部分:工业用变流变压器(GB/T 18494.1—2001,idt IEC 61378-1:1997)

3 术语和定义

GB/T 2900.33 和 GB/T 3859.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 2900.33 和 GB/T 3859.1 中的一些术语和定义。

3.1 有关变流器故障的术语

3.1.1

穿透 breakthrough

可控阀器件或由其构成的臂在正向阻断期丧失阻断电压的能力的故障。

GB/T 3859.2—2013

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-60]

注：穿通既可发生在整流运行，也可发生在逆变运行，能由各种原因引起，例如结温过高、超过额定断态峰值电压的电压浪涌以及过高的断态电压上升率或不应有的门极电流等。见图 1a)。

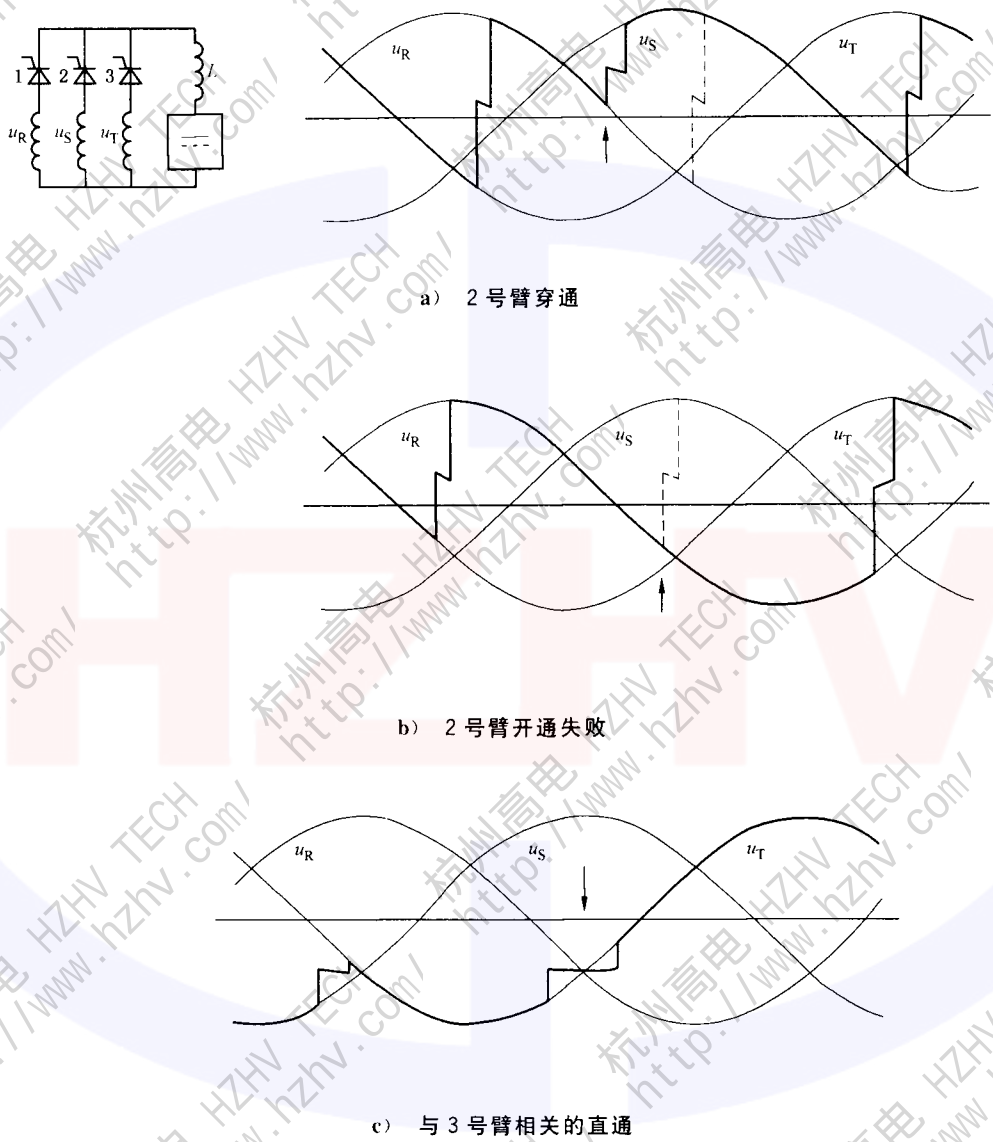


图 1 变流器故障时的电压

3.1.2

误开通 false firing

擎住阀器件或由其构成的臂在不应导通的时刻开通。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-63]

3.1.3

(电子阀器件或阀臂的)击穿 break down (of an electronic valve or of a valve arm)

电子阀器件或阀臂永久丧失阻断电压性能。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-66]

3.1.4

开通失败 firing failure

擎住阀器件或由其构成的臂在导通期未实现导通。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-65]

注：见图 1b)。

3.1.5

直通 conduction through

在逆变运行情况下，正常导通期或维持关断期结束时，阀臂继续导电的情形。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-64]

注：见图 1c)。

3.1.6

换相失败 commutation failure

电流未能由导电臂转移到接续导电臂。

[GB/T 2900.33—2004, 定义 551-16-59]

3.2 有关变流器产生的瞬态现象的术语

3.2.1

直流侧瞬变 d. c. side transient

施加在直流电路中的电感器和电容器上的直流电压的快速变化引起的电压瞬变。

注：见 4.10。

3.2.2

电网换相瞬变 commutation transient on line

重复瞬变 repetitive transient

换相后，在交流电网中产生的电压瞬变。

注：见 4.10。

3.3 有关温度的术语

3.3.1

热阻 thermal resistance

R_{th}

有效结温与规定的外部基准点之间的温差，与器件在热平衡条件下的稳态功率耗散的商。

注 1：大多数情况下，功率耗散可假设为等于热流。

注 2：改写 GB/T 2900.66—2004, 定义 521-05-13。

3.3.2

瞬态热阻抗 transient thermal impedance

Z_{th}

为下述 a) 与 b) 之商：

a) 在一个时间间隔结束时，有效结温与规定的外部基准点之间的温差变化；

b) 在 a) 中引起温度变化的同一时间间隔开始时刻，功率耗散的阶跃变化。紧接该时间间隔开始前的瞬间，温度的分布不随时间变化。

注：瞬态热阻抗以时间间隔的函数给出。

3.3.3

有效结温 virtual junction temperature; equivalent junction temperature

T_j

半导体器件内部的结的有效温度。

GB/T 3859.2—2013

[GB/T 2900.66—2001, 定义 521-05-15]

注 1: 有效结温不一定是半导体器件中的最高温度。

注 2: 鉴于功率耗散、热阻或瞬态热阻抗与运行方式对应, 有效结温能由规定的特性曲线计算。

3.3.4

有效温度 **virtual temperature**

(半导体器件)内部等效温度 internal equivalent temperature (of a semiconductor device)

以简化的半导体器件电、热能模式为基础的理论温度。

[GB/T 2900.66—2001, 定义 521-05-11]

3.4 有关谐波的术语

3.4.1

谐波 **harmonic**

周期量中具有的频率为其基波频率的整数倍的正弦分量。

3.4.2

(变流器的)特征谐波 **characteristic harmonic (of converters)**

变流器在理想三相平衡条件下运行时产生的谐波。

注: 对于脉波数为 p 的变流器, 其特征谐波的次数为 $k p - 1$ (k 为正整数)。

3.4.3

非特征谐波 **uncharacteristic harmonic**

变流器产生的特征谐波之外的那些谐波。

3.4.4

系统(存在的)骚扰 **systems borne disturbance**

骚扰可归因于诸如配电系统负荷变化、操作暂态、电网中配置变化等多种因素。一般仅可用统计数值表述。

注 1: 这类骚扰有:

过电压、操作暂态、雷击;

电动机启动、切换电容器引起的电压变化;

故障和故障跳闸: 单相对地、相间;

非永久性电压不平衡, 由负序分量与正序分量之比表述;

频率变化和相位移;

纹波控制信号;

电压和电流的谐波分量和间谐波分量。

注 2: 引自 GB/T 3859.1—2013 中 5.2.2。

3.4.5

变流器(产生的)骚扰 **converter generated disturbance**

变流器运行时, 由于其非线性产生的骚扰。

注 1: 这类骚扰有:

电压暂降和隆起: 用与相邻稳态电压的方均根值之差表示;

规定运行条件下的谐波电流: 用谐波次数、幅值和相位关系表示, 并考虑平均值、大概值和短时(例如 1 min)的最大值、偶然值;

换相缺口: 用宽度、深度、面积表示;

重复换相瞬变: 用能量、峰值、上升率等表示为短时冲击;

可能由变压器冲击电流、内部或外部故障跳闸等引起的非重复瞬变;

间谐波分量(例如变频器)

注2:上述骚扰可能由考虑的变流器产生,也可能由其他变流器产生,且实际骚扰电平可能随所考虑之处的网络阻抗变化

注3:许多变流器具有高脉波数和带移相变压器,该处的谐波问题可能减轻,而主要关心的是电压变化

注4:引用GB/T 3859.1—2013中5.2.2

4 变流器及其系统的性能

4.1 应用领域

4.1.1 概述

半导体电力变流器用于电能变换的大部分工业领域,也用于将机械能、化学能和其他能源转换为电能以及相反的转换,还用于电力系统进行供电电源调节。

4.1.2 变流系统和设备

变流系统和设备应用示例如下,但不限于此:

- a) 直流负载,稳定、可调电压、电流控制(线性稳压电源、开关电源);
- b) 交流电力控制器(交流或直流输出);
- c) 交流变频:
 - 电网换相变流器;
 - 电机空转能量回收;
 - 机械换相变流器;
 - 自换相变流器:
 - 电压恒定(电压型);
 - 电流恒定(电流型)
- d) 调速电气传动(由特定的标准覆盖,例如国家标准《调速电气传动系统》);
- e) 不间断电源设备(UPS、EPS) (由特定的标准覆盖,例如国家标准《不间断电源设备》、《应急逆变电源》);
- f) 化学工艺处理(电解、电镀、电泳);
- g) 计算机电源;
- h) 牵引变电站、铁道、有轨电车、矿山、电动车辆;
- i) 电信电源;
- j) 电磁体、励磁电源;
- k) 无线电发射直流电源;
- l) 电弧炉直流电源;
- m) 感应加热电源(中频加热电源、超声频电源、高频加热电源);
- n) 直流、高频焊接和等离子切割电源;
- o) 蓄电池充电、放电、化成及分容设备;
- p) 照明用电子整流器;
- q) 新能源发电变换和接入系统(太阳能光伏发电、风能发电、波浪能发电、储能变换);
- r) 电力系统:
 - 灵活交流输电、灵活直流输电;
 - 电能质量控制(无功功率补偿、电力有源滤波器、动态电压恢复器);

GB/T 3859.2—2013

- 电力工程直流电源系统；
- 电子式避雷器(电涌保护器 SPD)；
- 发电机励磁电源。

s) 电能储存系统。

4.1.3 供电电源调节(有源功率和无源功率)

供电电源调节的应用示例如下：

- a) 中压或高压系统(输电和配电无功功率补偿,如 SVC、SVG)；
- b) 低压系统(节能)；
- c) 分离的、备用的或分布式发电站；
- d) 直流或交流电源,尤其是太阳能、风能或化学能变换。

注：上述应用涉及的某些特定的标准已有现行标准或正在考虑中。

4.2 主要技术参数

4.2.1 应给出的主要项目

见 GB/T 3859.1—2013 中 8.1.2。除此之外,下述列出的是避免在规范中被忽略的一些与订货商的要求和供应商的产品有关的重要信息。

4.2.2 其他信息

4.2.2.1 与供电电源有关的参数

确认供电电源的下列条件是必要的：

- a) 电压和频率(如适用)：额定值变化范围、不平衡度、短时停电；
- b) 短路容量(或对供电电缆、电网和变压器的说明)：最小值、统计平均值、最大值；
- c) 现有的其他负载(电动机、电容器补偿装置、电炉等)；
- d) 骚扰的限值(无功功率、电流谐波等,经常发生或允许的)；
- e) 接地方式。

4.2.2.2 与输出有关的参数

下列内容对于设计变流联结及其控制是必要的：

- a) 输出电压和频率(如适用)；
- b) 要求的变化范围(连续的或分段的)；
- c) 电压和(或)电流的反向能力(运行象限)；
- d) 电压、电流、频率的允许波动范围；
- e) 负载特性；
- f) 接地方式；
- g) 输出波形畸变等。

4.2.2.3 环境条件

下列内容对于变流器的冷却、结构以及柜体、外壳(罩)的设计是必要的：

- a) 温带、热带、北极带气候；
- b) 温度、湿度、含尘量(除非另有规定,GB/T 16935.1—2008 中第 1 级适用)；
- c) 非正常运行条件；

- d) 户外或户内安装；
- e) 防护等级(按 GB 4208)；
- f) 符合特定标准(具体的标准,包括安全标准)。

4.2.2.4 电气运行条件

下列内容可能与上述有些重复,但仍应给出,以确认细节:

- a) 供电网络情况:
 - 1) 变流器专用供电系统(仅向变流器供电)；
 - 2) 一般工业供电系统(同时向包括电动机的负载供电)；
 - 3) 高品质的供电系统(向包括计算机、信息处理及医疗等设备负载的家庭、商业系统供电)。
- b) 设备抗扰度等级:各个参量可选择不同的抗扰度等级。

4.2.3 非正常运行条件

4.2.3.1 特殊环境温度

环境温度条件的优先规定值见 GB/T 3859.1—2013 中 5.3.1.1 和 5.3.1.2。

对于必须考虑特殊条件的情形,如下规定适用:

- 对组件和变流变压器可规定不同的冷却媒质温度。与变流变压器有关的冷却媒质温度规定见 GB/T 3859.3,与组件有关的冷却媒质温度规定见 GB/T 3859.1；
- 最高和最低环境温度或冷却媒质温度可由订货商或供应商规定。

4.2.3.2 尘埃和固体微粒含量

对于特殊应用,可根据 GB/T 16935.1 或其他标准分别规定污染等级,例如规定不同于 GB/T 16935.1—2008 规定的污染等级 1。

4.3 变流变压器和电抗器

见 GB/T 3859.3 或 GB/T 18494.1。

4.4 计算因子

4.4.1 概述

表 1 给出各种变流联结的计算因子。其中,文字符号和含义见 4.6.2 和参见 GB/T 3859.1—2013 中 3.12。

表 1 电气联结和计算因子

联结 序号	变压器联结		变流器联结	p	q	网侧 电流 因数 ^b I'_A/I_A	网侧 电流 因数 I_A/I_A	$\frac{I_{A0}}{I_A}$	$\frac{I_{A0}}{I_A}$	$\frac{I_{A0}}{I_A}$	$\frac{d_{A0}}{d_A}$	变流器损耗试验 时短接的端子			变流器 运行时 总损耗	测量 α ₀ 时 短接的 端子
	网侧	阀侧										A	B	C		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
单变流器, 单相联结																
1				2	2		0.5	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	$3.14 (\pi)$	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	0.1	0.2			$0.5 (P_A + P_B)$	1-2
2				3	3		$0.171 \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)$	$0.577 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	$0.866 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$		1-2-3			$P_A + P_B + P_C$	1-2-3
3				6	6		$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$0.108 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	$1.56 \sim 0.500$		1-3-5-2-4-6			$0.75 (P_A + P_B)$	均分 1-3-5 和 2-4-6
4				6	6		$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$0.108 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$2.09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	$1.50 \sim 0.500$		1-2-3-4-5-6			$0.5 (P_A + P_B)$	均分 1-3-5 和 2-4-6
5				6	3		$0.108 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$0.289 \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \right)$	$2.12 \left(\frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \right)$	0.500		1-3-5-2-4-6			$0.5 (P_A + P_B)$	均分 1-3-5 和 2-4-6
6				6	2		$0.272 \left(\frac{1}{3\sqrt{3}} \right)$	$0.236 \left(\frac{1}{3\sqrt{2}} \right)$	$3.14 (\pi)$	$0.750 \sim 0.500$		1-3-5-2-4-6			$1.125 \times (P_A + P_B)$	1-4-2-5-3-6

表 1 (续)

联结 序号	变压器联结		变流器联结	p'	q'	网侧 电流 因数 ^{a)} I'_1, I_{d0}	阀侧 电流 因数 ^{c)} I_1, I_d	$\frac{U_{d0}}{U_{c0}}$	$\frac{U_{d0}}{U_{c0}}$	$\frac{d_{AS}}{c_{AS}}$	变压器损耗试验 时短接的端子			变流器 运行时的 总损耗	测量 e_{AS} 时 短接的 端子	
	网侧	阀侧									A	B	C			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
单变流器, 均一双向联结																
7				2	2	1	1	0.900 $\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1.57 $\left(\frac{\pi}{2}\right)$	0.707 $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$	1-3				P_A	1-3
8				6	3	0.816 $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$	0.816 $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0.500 $\left(\frac{1}{2}\right)$	1-3-5				P_A	1-3-5
9				12	3	0.789 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	0.408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0.259 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	11-13-15-21-23-25	11-13-15-21-23-25			$0.036 P_A + P_{d0} + 0.928 P_c$	均分 11-13-15 和 21-23-25
10	同联结序号 9, 但具有两个不同的变压器		同联结序号 9	12	3	0.789 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	0.408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0.519 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$					$1.07 P_c$	11-13-15 和 21-23-25
11				12	3	0.789 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	0.408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	1.35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0.259 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	均分 11-13-15-21-23-25	11-13-15-21-23-25			$1.34 P_A - 0.08 P_{d0} + 0.27 P_c$	均分 11-13-15 和 21-23-25

表 1 (续)

联结 序号	变压器联结		变流器 联结	p^a	q^a	网侧 电流 因数 ^b I'_{L}/I_d	阀侧 电流 因数 ^c I_v/I_d	$\frac{U_a}{U_{cn}}$	$\frac{U_M}{U_{M0}}$	$\frac{d_{sn}}{e_{sn}}$	变压器损耗试验 时短接的端子			变流器 运行时的 总损耗	测量 e_{sn} 时 短接的 端子		
	网侧	阀侧									A	B	C				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	
单变流器, 均—双拍联结																	
12		或 		12	3		$1.58 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$2.70 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0.524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0.259		11- 13-15	21- 23-25	11- 13-15 21- 23-25	$0.036 (P_A + P_C) + 1.07P_C$	均分 11- 13-15 和 21- 23-25
13	同联结序号 12, 但具有两个不同的变压器		同联结序号 12	12	3		$1.58 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$2.70 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0.524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0.519			11- 13-15 21- 23-25	$1.07P_C$	11-13-15 21-23-25	
单变流器, 非均—双拍联结																	
14				2	2		$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$0.900 \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$0.707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	1-3			P_A	1-3	
15		或 		6	3		见 1.4.2	见 1.4.3	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	1.05 $\left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.500	1-3-5			P_A	1-3-5	

表 1 (续)

联结 序号	变压器联结		变流联结 (4)	ρ' q'	网侧 电流 因数 ^a I'_1/I_{N1}	阀侧 电流 因数 ^a I'_2/I_{N2}	U_{a0}/U_{N1}	d_{a0}/α	变压器损耗试验 时短接的端子			变流器 运行时的 总损耗	测量 $c\%$ 时 短接的 端子 (17)				
	网侧	阀侧							A	B	C						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	
双变流器联结																	
16				见联结序号 5													
17				见联结序号 5													
18				见联结序号 8													
19				见联结序号 8													

^a 参见 GB/T 3859.1—2013 中表 1。

^b 变压器初级。

^c 变压器次级。

^d ρ' 一个单元绕组的阻抗。

^e $\alpha < \mu; 0.707(1/\sqrt{2}); \alpha > \mu; 0.354(1/(2\sqrt{2})); \cos \mu = 1 - X_1 \times I_{N1}/(\sqrt{2} \times U_{N1})$ 。

杭州高电 HZHV TECH
http://www.hzhv.com/

GB/T 3859.2—2013

4.4.2 电压比

表1中的第10栏和第11栏分别给出了电压比:

$$U_{\text{N}}/U_{\text{L}} \quad \text{和} \quad U_{\text{N}}/U_{\text{H}}$$

其中:

U_{H} 理想空载直流电压;

U_{L} 变压器阀侧绕组电压;

U_{N} 空载状态下,出现在臂的端子之间的理想峰值空载直流电压,忽略阀的内部和外部电压降。在轻载电流接近过渡电流时,比值保持不变。

注:对于表1中的序号5、序号11和其他使用相间变压器的联结,空载时的 $U_{\text{N}}/U_{\text{H}}$ 比值升高。

4.4.3 变流器网侧电流因数

表1中的第8栏为网侧电流方均根值 I_{L} 与直流电流 I_{d} 的比值,假设条件为直流电流平滑,交流电流为矩形波,且单拍或双拍联结的电压比为式(1):

$$U_{\text{L}}/U_{\text{N}} = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

U_{L} 网侧相间电压;

U_{N} 阀侧两个换相的相之间的电压。

对于不同的电压比,网侧电流近似为式(2):

$$I_{\text{L}} = I'_{\text{L}} \times U_{\text{L}}/U_{\text{N}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

注:对于表1中的序号11、15的联结,网侧电流因数取决于延迟角 α ,且有如下关系:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha < \pi/3 & \quad I'_{\text{L}}/I_{\text{d}} = \sqrt{2/3} \approx 0.816 \\ \pi/3 < \alpha < \pi & \quad I'_{\text{L}}/I_{\text{d}} = \sqrt{(\pi - \alpha)/\pi} \end{aligned}$$

4.4.4 变流器阀侧电流因数

表1中的第9栏给出了变压器每个端子的阀侧电流方均根值 I_{V} 与直流电流 I_{d} 的比值。

注:对于表1中的序号11、15的联结,阀侧电流因数取决于延迟角 α ,且有如下关系:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha < \pi/3 & \quad I_{\text{V}}/I_{\text{d}} = \sqrt{2/3} \approx 0.816 \\ \pi/3 < \alpha < \pi & \quad I_{\text{V}}/I_{\text{d}} = \sqrt{(\pi - \alpha)/\pi} \end{aligned}$$

4.4.5 电压调整值

表1中的第12栏给出了比值

$$d_{\text{N}}/e_{\text{N}}$$

其中:

d_{N} 在额定负载下,变压器换相电抗产生的直流电压调整值。用相对于 U_{N} 的标么值表示;

e_{N} 变压器阀侧绕组按表1中第17栏短路,在整个设备的网侧额定电流 I_{N} 下,变压器阻抗电压的电感性分量。用额定交流电压 U_{N} 的标么值表示。

仅对于换相数 $q=3$ 的联结,能由三相变压器的 e_{N} 计算电感性直流电压调整值 d_{N} 。

对于带三相变压器的所有其他联结, d_{N} 与 e_{N} 的比值取决于变压器初级与次级的电抗之比。

注1:假设重叠角 $\mu < 2\pi/p$, p 为脉波数。见5.1.1。

注2:对于表1中的序号9、序号12和序号13的联结,第12栏的数据假设 e_{N} 以整个设备的网侧电流为基础。如果每个变流器在其额定网侧电流(分别为 $0.816I_{\text{N}}$ 和 $1.632I_{\text{N}}$)下分别试验,第12栏的值为0.5。

4.4.6 磁路

假设表 1 中三相电流供电的联结的磁路为三柱式铁芯。

4.4.7 功率损耗因数

表 1 中的第 16 栏给出了变流器运行时的功率损耗与按第 13~15 栏短接相应的端子,在整个设备的网侧额定电流 I_N 下进行短路试验时的功率损耗之间的关系。

根据 GB/T 3859.3—1993 中 4.1,该因数的有效性受限制。

4.5 并联联结和串联联结

4.5.1 阀器件的并联联结或串联联结

4.5.1.1 概述

当半导体器件并联或串联时,应采取措施保证所有器件在其电压和电流额定值范围内工作。

4.5.1.2 阀器件并联时的电流均衡

阀器件并联时,电流分配的不均衡可由正向电压或通态电压的差异、开通时间和触发延迟角的差异引起。各并联臂阻抗的差异也有相当大的影响。

如果制造商借助匹配阀器件的正向特性或通态特性以及开通时间性能达到并联阀器件的电流分配均衡,宜由设备供应商说明。

4.5.1.3 阀器件串联时的电压均衡

阀器件串联时,电压分配不均衡的可由反向特性或断态特性的差异、导通时刻的差异以及恢复电荷的差异引起。

4.5.2 组件和设备单元的并联或串联

4.5.2.1 概述

当变流组件和设备单元串联或并联连接时,也应采取措施。

4.5.2.2 并联联结

并联时,应考虑是否带有电压调节装置:

- 无电压调节装置:对于设计为并联联结的设备单元,在设备总额定输出下运行时,各并联单元均不应超过其额定值工作。

如果设备需要与不同特性的其他电源设备并联运行时,对负载分配的要求应专门规定。

- 有电压调节装置:对这样的设备,要求并联运行时,对负载分配的要求应另行规定。

4.5.2.3 串联联结

当组件或设备单元设计为串联联结时,应采取措施保证各单元均工作在其额定电压限值内,即使交流侧开路、直流侧仍连接至有源负载。

串联联结时,对地电压可远高于端子间电压。此时,应进行相应的绝缘设计和试验。

4.6 功率因数

4.6.1 概述

对于脉波数等于或大于 6 的变流器,总功率因数的意义不大。对普通用途有用的值是基波功率因数 $\cos\varphi_1$ 。

基波功率因数 $\cos\varphi_1$ 与变流变压器的网侧参数有关。

由于这个原因,如果要求保证的话,除非另有规定,基波功率因数在平衡且为正弦波电压的假设下计算。

三相晶闸管均一联结的基波功率因数应按 4.6.4 确定。

对于额定输出大于 300 kW 的单相设备、三相非均一联结设备和具有顺序相控的变流器,基波功率因数的确定方法另行规定。

当变流器在整流方式运行时,消耗来自交流系统的有功功率和无功功率。

当变流器在逆变方式运行时,它向交流系统输送有功功率,但仍消耗来自交流系统的无功功率。

注:许多应用中,例如电气传动用小型脉宽调制(PWM)变流器直流电抗器很小或没有时,纹波对总功率因数影响很大。

4.6.2 确定基波功率因数使用的文字符号

确定基波功率因数使用的文字符号见表 2。

表 2 确定基波功率因数使用的文字符号

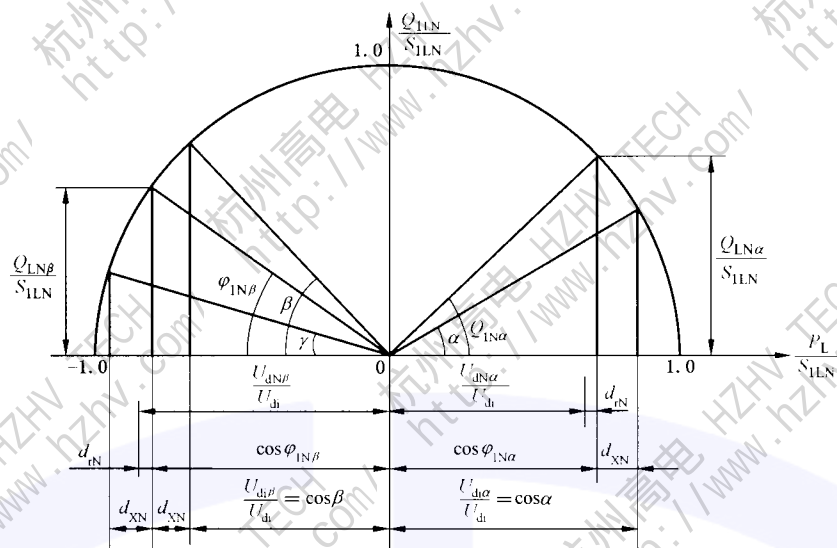
文字符号	含 义
$\cos\varphi_{1N}$	延迟角为零时,额定直流电流下的基波功率因数
$\cos\varphi_{1\alpha}$	延迟角为 α 时,额定直流电流下的基波功率因数
d_N	在额定电流下,用 U_d 的标么值表示的总电阻性直流电压调整值。 $d_N = d_{dN} + d_{rN}$
d_{sN}	在额定电流下,用 U_d 的标么值表示的总电感性直流电压调整值。 $d_{sN} = d_{stN} + d_{sN}$
d_{dN}, d_{stN}	在额定直流电流下,由变流器的其他部分,例如阳极电抗器、网侧电抗器、变压器(如有这些部分)引起的电阻性、电感性直流电压调整值。用 U_d 的标么值表示
d_{rN}, d_{stN}	在额定直流电流下,由变流变压器引起的电阻性、电感性直流电压调整值。用 U_d 的标么值表示
d_{iN}	在额定直流电流 I_N 下,当网侧端子间的电压方均根值保持恒定时,由交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值。用 U_d 的标么值表示
E_{dN}	直流电动机在额定转速和额定磁通下的反电势
f_N	电网额定频率
I_{dN}	额定直流电流
I_{iN}	网侧额定方均根电流(变流器或变压器的,如包括变压器)
I_{i1N}	I_{iN} 的基波分量的方均根值
p	脉波数
P_{iN}	在额定直流电流下,网侧有功功率, $P_{iN} = U_{dN} \cdot I_N + P_{rN}$

表 2 (续)

文字符号	含 义
P_{N}	在额定直流电流下,电路中电阻的功率损耗
Q_{ILN}	在额定直流电流下,与电流 I_{ILN} 相关的无功功率
R_{e}	电动机电枢回路电阻
R_{s}	电源的系统电阻
R_{sc}	与变流器基波表观功率有关的短路比
S_{ILN}	在额定负载下,基于网侧电流基波分量 I_{ILN} 的网侧表观功率, $S_{\text{ILN}} = U_{\text{d}} \times I_{\text{ILN}} = U_{\text{LN}} \times I_{\text{ILN}} \times \sqrt{3}$
S_{s}	电源的短路容量
S_{N}	变压器额定表观功率
μ	重叠角
U_{d0}	理想空载直流电压
U_{dN}	额定直流电压
U_{dRN}	在额定直流电流下,总电阻性直流电压调整值
U_{dIXN}	在额定直流电流下,总电感性直流电压调整值
U_{dIN}	在额定负载下,不包括总电阻性直流电压调整值的理想内在直流电压调整值
X_{s}	电源的系统电抗
α	整流运行时的相控延迟角,或相关的下标
β	逆变运行时的相控超前角,或相关的下标
γ	逆变运行时的换相熄弧角
φ_{N}	在额定直流电流下,网侧电流基波分量的位移角(忽略变压器励磁电流)

4.6.3 整流运行和逆变运行时,用于基波功率因数 $\cos\varphi_{\text{N}}$ 和无功功率 Q_{ILN} 近似的圆图

变流器整流运行和逆变运行时,近似的基波功率因数 $\cos\varphi_{\text{N}}$ 和近似的无功功率 Q_{ILN} 可使用图 2 给出的圆图估算。



说明： $\cos\varphi_{1Na}=U_{d1Na}/U_{di}=P_{1Na}/S_{1LN}$ ； $\cos\varphi_{1Nb}=U_{d1Nb}/U_{di}=P_{1Nb}/S_{1LN}$ 。

图 2 用于基波功率因数近似的圆图

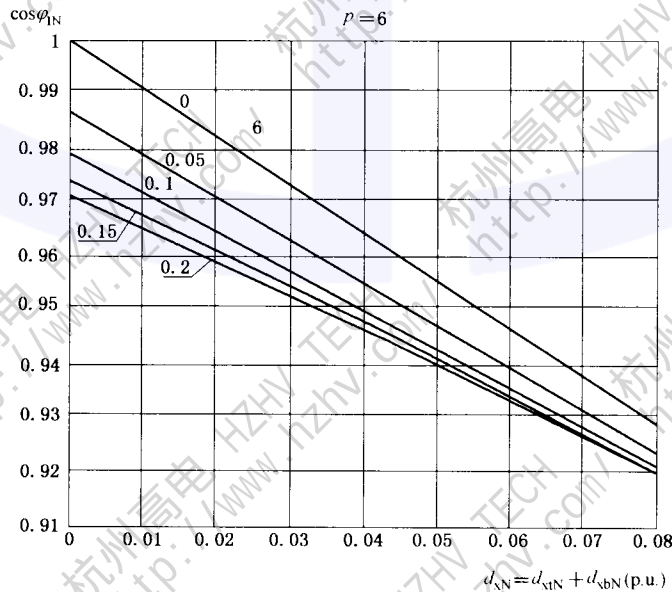
4.6.4 基波功率因数 $\cos\varphi_1$ 的计算

4.6.4.1 在额定直流电流下,延迟角为零时的基波功率因数 $\cos\varphi_{1N}$

对合理的交流系统电抗值而言,基波功率因数可分别由图 3 和图 4 得到。如无其他说明,假设网侧端子电压的方均根值保持恒定。

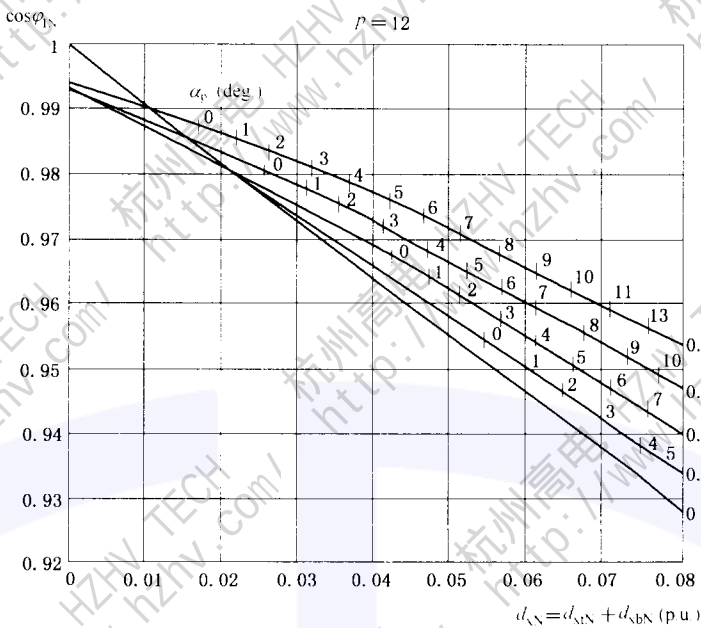
图 3 用于 6 脉波联结。图 4 用于 12 脉波联结。

图 4 中标示的 α_p 值是在某一运行区域内,12 脉波联结产生的固有延迟角,即使没有相控也存在。而对于相控变流器,为在标示条件下存在的最小延迟角。



说明： $1/R_{1SC}=S_{1LN}/S_C=U_{di}\times I_{dN}/S_C$ 。

图 3 $p=6$ 时,以 d_N 为变量的基波功率因数



说明:1 $R_{sc} = S_{IN} / S_1 = U_{di} / I_{dN} = S_1$

图 4 $p = 12$ 时,以 d_N 为变量的基波功率因数

4.6.4.2 在额定直流电流下,延迟角为 α 时的基波功率因数 $\cos \varphi_{1\alpha}$

如有延迟角为 α 的相位控制,其对应的 $\cos \varphi_{1\alpha}$ 值可由式(3)计算。在实际应用中,这已足够准确。

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_{1N}) \dots\dots\dots (3)$$

在逆变范围内,基波功率因数可由式(4)得到:

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \beta + (1 - \cos \varphi_{1N}) \dots\dots\dots (4)$$

对于逆变器而言,图 3 和图 4 的横坐标表示,在额定负载下,电感性直流电压增加(用 U_{di} 的标么值表示)。

对于非均一联结,有式(5):

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \frac{\alpha}{2} - (1 - \cos \varphi_{1N}) \cos \frac{\alpha}{2} \dots\dots\dots (5)$$

对于延迟角分别为 α_1 和 α_2 的不对称控制,有式(6):

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} - (1 - \cos \varphi_{1N}) \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \dots\dots\dots (6)$$

4.6.4.3 在非额定负载下的基波功率因数 $\cos \varphi_{1\alpha}$

对于不是额定负载的其他负载,当使用图 3 和图 4 的曲线计算时,为得到对应于实际直流电流 I_d 的基波功率因数 $\cos \varphi_{1\alpha}$,应取 I_d 、 d_{N1} 和 d_{N2} 的实际值,即由式(7)计算:

$$d_N = d_{N1} + d_{N2} = (d_{N1} + d_{N2}) \times I_d / I_{dN} \dots\dots\dots (7)$$

用于分别由图 3 和图 4 得到 $\cos \varphi_{1\alpha}$ 的值,有式(8):

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_{1N}) \dots\dots\dots (8)$$

4.6.5 变流因数

对于脉波数等于或大于 6 的变流器,其变流因数近似等于功率效率(见 GB T 3859.1 2013 中

GB/T 3859.2—2013

3.7.11和3.7.12)

对于小功率变流器、脉波数等于或小于6的变流器(按用户要求)以及认为直流电路电压和电流的交流分量不产生有用功率的应用,除给出功率效率外,还应给出变流因数。

变流因数宜总是在规定的负载条件下,由输入/输出的方法确定。

4.7 直流电压调整值

4.7.1 概述

对于连接至没有功率因数补偿电容器的系统的单个变流器,电压调整值主要为:

电阻性电压调整值,即变流器内的功率损耗引起的电压调整值;

——由换相引起的电感性电压调整值。换相使半导体组件端子上的电压波形发生畸变,使直流电压(基本上由交流电压的不连续采样构成)发生变化;

——由供电电源的阻抗和变流器非正弦输入电流(它也使变流器端子上的电压波形发生畸变)引起的电压调整值。

理想空载直流电压 U_{d0} 系指供电电源无穷大情况下的电压值,即电压调整值应包括无穷大电源和变流器交流端子间存在的所有阻抗的影响。

然而,本部分假设变流器交流端子间的网侧电压方均根值恒定,而不是无穷大电源处的电网电压方均根值恒定。

因此,理想空载直流电压 U_{d0} 是对变流器端子间的电压而言,电压调整值由两个因素引起:

——固有直流电压调整值,即变流器自身的电压调整值(见4.7.2和GB/T 3859.1—2013中3.7.7);

附加直流电压调整值,由于交流系统阻抗对变流器端子间电压的影响引起(见4.7.3)。

当系统包括功率因数补偿电容器时,系统的频率特性影响电压波形和电压调整值。

4.7.2 固有直流电压调整值

4.7.2.1 概述

给出的固有直流电压调整值为由变流变压器与变流设备的其他部分(如电抗器等)引起的直流电压调整值之和,再加上随电流而变化的半导体器件的通态电压和(或)正向电压。

假设变流器网侧端子的交流电压恒定。

电压调整值是对变压器的主分接而言。当晶闸管变流器在逆变范围运行时,电压调整值与直流电压相加,从而使直流电压增加。

固有直流电压调整值应由设备部件的电抗和功率损耗计算。如果供应商愿意优先采用直接测量法,也可在设备进行输入/输出负载试验时直接测量确定。

对于单相设备,非均一联结的晶闸管设备和顺序相控变流器确定固有直流电压调整值的方法将予以规定。

4.7.2.2 变流变压器和相间变压器引起的电阻性直流电压调整值

变流变压器和相间变压器引起的电阻性直流电压调整值由式(9)计算:

$$U_{\text{drtN}} = P_{\text{rtN}} / I_{\text{dN}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

P_{rtN} ——在额定直流电流下,变压器绕组的损耗。

4.7.2.3 其他部件引起的电阻性直流电压调整值

这些部件有串联平波电抗器、网侧电抗器、饱和电抗器、均流装置、二极管和晶闸管。不包括阀器件

的门槛电压。它们引起的电阻性直流电压调整值由式(10)计算：

$$U_{\text{drlN}} = P_{\text{drlN}} / I_{\text{dN}} \quad \cdots \cdots (10)$$

式中：
 P_{drlN} ——在额定直流电流下，各部件的损耗。

4.7.2.4 变流变压器引起的电感性直流电压调整值

对于所有联结，电感性电压调整值可根据变压器的换相电抗试验结果（见 GB/T 3859.3）由式(11)计算：

$$U_{\text{dlsN}} = d_{\text{dlsN}} \times U_{\text{dN}} \quad \cdots \cdots (11)$$

注：式(11)不适用于多重换相。对于表1给出的联结，电压调整值也可由表1给出的计算因子 d_{dlsN} 、 e_{N} 和 e_{N} （见 1.1.5）计算。此时，有式(12)：

$$U_{\text{dlsN}} = \left(\frac{d_{\text{dlsN}}}{e_{\text{N}}} \right) \times e_{\text{N}} \times U_{\text{dN}} \quad \cdots \cdots (12)$$

4.7.2.5 其他部件引起的电感性直流电压调整值

这些部件有阀侧电抗器、网侧电抗器和均流电抗器等。计算电压调整值使用的文字符号见表3。

表 3 计算电压调整值使用的文字符号

文字符号	含 义
d_{dlsN}	在 I_{dN} 下，由网侧电抗器引起的、用 U_{dN} 的标么值表示的电感性直流电压调整值
d_{dlsN}	在 I_{dN} 下，由网侧电抗器引起的、用 U_{dN} 的标么值表示的电感性直流电压调整值
U_{dlsN}	对应于 d_{dlsN} 的电感性直流电压调整值
U_{dlsN}	对应于 d_{dlsN} 的电感性直流电压调整值
X_{bl}	电抗器、变压器等在网侧的每相电抗
X_{bv}	电抗器、变压器等在阀侧的每相电抗
I_{dN}	对应于 I_{dN} ，根据矩形波电流计算的电抗器电流的方均根值
I_{dN}	额定直流电流
U_{dN}	电抗器等网侧端子的相间额定电压
g	分配 I_{dN} 的换相组数
p	脉波数
q	换相数
s	串联换相组数
δ	由电抗器同时换相的换相组数

- a) 对于网侧电抗器、变压器等
对于三相系统，有式(13)和式(14)：

$$d_{\text{shLX}} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{bN}} \times X_{\text{bl}}}{U_{\text{bN}}} \times \sin \frac{\pi}{p} \quad \cdots \cdots (13)$$

$$U_{\text{dshLX}} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{bN}} \times U_{\text{di}} \times X_{\text{bl}}}{U_{\text{bN}}} \times \sin \frac{\pi}{p} \quad \cdots \cdots (14)$$

——对于单相系统,有式(15)和式(16):

$$d_{\text{shLX}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{\text{bN}} \times X_{\text{bl}}}{U_{\text{bN}}} \quad \cdots \cdots (15)$$

$$U_{\text{dshLX}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{\text{bN}} \times U_{\text{di}} \times X_{\text{bl}}}{U_{\text{bN}}} \quad \cdots \cdots (16)$$

b) 对于阀侧电抗器,有式(17)和式(18):

$$d_{\text{shvX}} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times \frac{I_{\text{bN}} \times X_{\text{bv}}}{U_{\text{bl}}} \quad \cdots \cdots (17)$$

$$U_{\text{dshvX}} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times I_{\text{bN}} \times X_{\text{bv}} \quad \cdots \cdots (18)$$

其他部件引起的电感性直流电压调整值由式(19)计算:

$$U_{\text{dshX}} = U_{\text{dshLX}} + U_{\text{dshvX}} \quad \cdots \cdots (19)$$

4.7.2.6 变流器的固有直流电压调整值

在额定直流电流下,变流变压器和相间变压器(如有)引起的直流电压调整值由式(20)计算:

$$U_{\text{diX}} = U_{\text{diLX}} + U_{\text{diXv}} \quad \cdots \cdots (20)$$

在额定直流电流下,变流器的其他部件引起的直流电压调整值由式(21)计算:

$$U_{\text{dshX}} = U_{\text{dshLX}} + U_{\text{dshvX}} \quad \cdots \cdots (21)$$

额定直流电流下的固有直流电压调整值由式(22)计算:

$$U_{\text{diX}} + U_{\text{dshX}} = U_{\text{diLX}} + U_{\text{diXv}} + U_{\text{dshLX}} + U_{\text{dshvX}} \quad \cdots \cdots (22)$$

4.7.3 交流系统阻抗引起的直流电压调整值

4.7.3.1 交流系统阻抗对变流器直流电压调整值的影响

即使变流器端子电压的方均根值保持恒定,其直流端子上也会出现由交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值。

对电压调整值的影响是变流器非正弦电流使其端子上的电压波形发生变化的结果。

这种影响取决于脉波数以及电源短路容量与变流器在额定直流电流下的基波表观功率之比 R_{isc} 。

注: R_{sc} 为 GB/T 3859.1—2013 中额定表观功率。为便于计算交流系统阻抗的影响,这里使用 R_{isc} 。

4.7.3.2 交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值的计算

图 5 给出在额定直流电流下,交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值 d_{LX} (用 U_{di} 的标幺值表示)。相应的电压调整值 U_{diLX} 由式(23)计算:

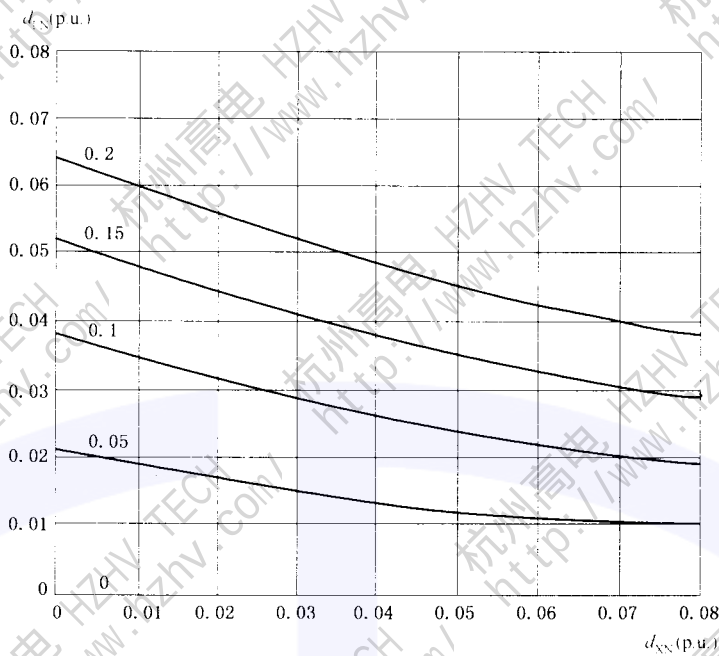
$$U_{\text{diLX}} = d_{\text{LX}} \times U_{\text{di}} \quad \cdots \cdots (23)$$

如无其他说明,假设变流器网侧端子电压的方均根值保持恒定。

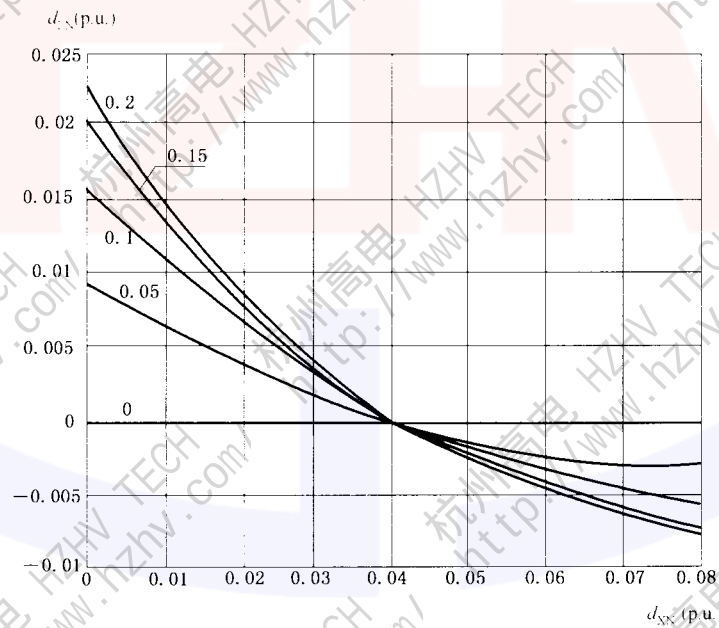
当使用图 5 的曲线计算非额定负载下的实际电压调整值 d_{L} ,并由此得到实际附加调整值 U_{diL} 时,应取 I_{d} 、 d_{L} 和 d_{sh} 的实际值。即先由式(24)计算:

$$d_{\text{xt}} + d_{\text{sh}} = (d_{\text{xtN}} + d_{\text{shN}}) \times I_{\text{d}} / I_{\text{dN}} \quad \cdots \cdots (24)$$

然后,使用图 5 计算 U_{diL} 。



a) $p=6$ 时的函数 d_{LN}



b) $p=12$ 时的函数 d_{LN}

说明:1 $R_{LN}=S_{LN}/S_c=U_{LN}/I_{LN}/S_c$

图 5 $p=6$ 和 $p=12$ 时,以 d_{NN} 为自变量的函数 d_{LN}

4.7.3.3 交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值的测量

变流器直流侧的伏特表不直接显示固有直流电压调整值(4.7.2),而是较大的值。
变流器带负载运行时,交流系统阻抗的影响不能用显示交流电压方均根值的伏特表直接测量。
交流系统阻抗引起的附加直流电压调整值可借助辅助整流器(必要时,通过变压器)连接在变流器

GB/T 3859.2—2013

网侧端子上的专门测量电路得到足够准确的近似测量。

该辅助整流器与变流器具有相同的换相数和脉波数,其直流电压的纹波相对于交流电网电压的相位与变流器直流电压的纹波相对于交流电网电压的相位相同。

在变流器负载变化期间,辅助整流器输出电压标么值的变化代表了系统阻抗引起的变流器直流电压标么值的变化。

4.7.3.4 同一供电系统中的其他变流器对直流电压调整值的影响

如果同一交流系统也向其他变流器供电,即使考虑的变流器的端子交流电压的方均根值为常数,仍可使该变流器产生附加的电压调整值。

为使供应商考虑这种情况,订货商应在订货前说明其他变流器的功率容量、联结形式、安装位置和其他主要特点。

4.7.4 供需双方应就变流器直流电压调整值交换的信息

为使供应商计算交流系统阻抗的影响,订货商应在订购前提供交流系统的数据。当为此目的给出系统短路容量时,其值应与计算总电压调整值的交流系统配置对应。

那么,供应商应提供:

- 变流器的固有直流电压调整值(见 4.7.2.6): $U_{dN} + U_{dN}$;
- 当网侧端子电压方均根值保持恒定时,变流器的总电压调整值: $U_{dN} + U_{dN} + U_{dN}$ 。

当订货商未给出系统阻抗值时,供应商应对交流系统短路容量假设某个限定值,或作为替代,提请订货商注意,对于交流系统短路容量的任何值,可借助图 5 计算总电压调整值。

电压调整值的计算示例在第 5 章给出。

4.8 逆变状态下的可靠运行

为防止换相失败和直通,设计时应考虑要求的最大电流、最高直流电压和最低网侧电压可能同时发生。稳态和瞬态两种情况均应考虑。

除非另有说明,在逆变运行时,变流器应能承载与工作制等级对应的所有额定电流,且在交流系统最低额定电压下不发生直通。

逆变运行时,在诸如交流系统远方故障引起电压跌落的瞬态条件下,换相失败尤其可能在最高直流电压下发生。

为减少换相失败或其后果,下述措施可一并采用或分别采用:

- 设定较低的电流限值;
- 使用较高的网侧电压;
- 设定较低的电流变化率限值;
- 使用快速直流断路器或磁性接触器,尤其是在逆变运行时;
- 设定较高的欠电压继电器设定值(在额定限值内);
- 使用门极脉冲序列触发(不使用窄触发信号);

在触发设备的同步输入端设置交流滤波器,防止对控制角的骚扰。

这些措施不可能防止所有换相失败,但在大多数应用中会减少失败的次数。

跳闸之后的自动再启动可另行规定,但应对操作人员的安全采取严密的防护措施。

4.9 交流电压波形

交流电源线与中性线间电压(即相电压)或线间电压(即线电压)的瞬时值相对于基波的偏离(例如在电力变流器换相期)可达到实际电网电压峰值的 0.2 p. u. 或更大(见图 6)。每次换相开始和结束时

可能出现附加振荡。

图 6 给出 6 脉波变流器(表 1 中的序号 8 联结)的典型换相缺口和一个幅值为 U_{ISM} 的瞬态过程。

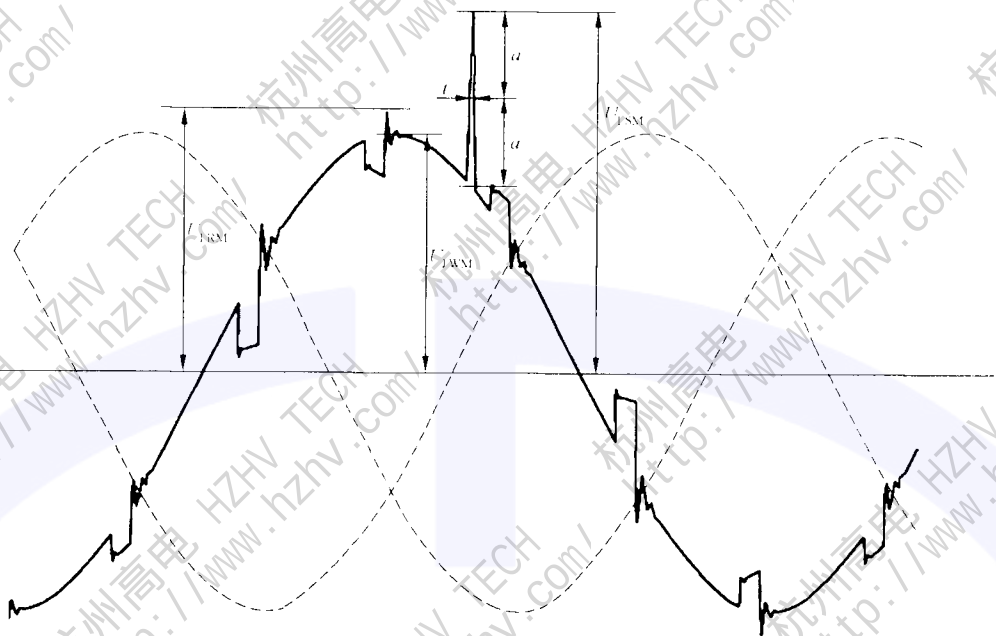


图 6 交流电压波形

不重复瞬变主要来自故障跳闸和开关操作以及架空线上可能出现的雷击,可能对中压或低压系统有些影响。

以下值仅基于个别变流变压器的特性和额定值(S_N)作为示例给出:

- a) 瞬态能量: $400S_N$ J (见注 1);
- b) 上升时间(从峰值的 10% 上升至峰值的 90%): $1\ \mu\text{s}$;
- c) 重复峰值(U_{LRM} U_{LWM}): $1.25\ \text{p. u.}$;
- d) 不重复峰值(U_{ISM} U_{LWM}): $2.0\ \text{p. u.} \sim 2.5\ \text{p. u.}$ (见注 2);
- e) 数值保持在 $0.5\ \text{p. u.}$ 以上的时间: $3\ \mu\text{s} \sim 300\ \mu\text{s}$ 。

其中:

U_{LRM} —— U_L 的最大瞬时值。包括重复过电压,但不包括不重复过电压;

U_{ISM} —— U_L 的最大瞬时值。包括不重复过电压;

U_{LWM} —— U_L 的最大瞬时值。不包括瞬态过电压。

注 1: S_N 的单位为兆伏安(MVA)。瞬态能量来自变压器励磁电流的中断。假设变压器励磁电流为其额定值的 $0.05\ \text{p. u.}$ 。

注 2: 峰值是在假设使用典型抑制器的情况下给出。没有抑制器时可达 $10\ \text{p. u.}$ 或更大。

如果多个不带专用变压器的变流器连接在同一母线上,抑制器电路应与公用变压器匹配。

4.10 影响施加在变流器阀器件上的电压的电路运行条件

变流器阀器件可能不仅遭受交流电网电压,而且遭受叠加在阀器件两端的理论电压上的重复和不重复电压。

图 7a) 和图 7b) 分别给出了施加在不可控和可控变流器阀器件上的电压波形(假设换相数 $q=3$, 脉波数 $p=6$)。

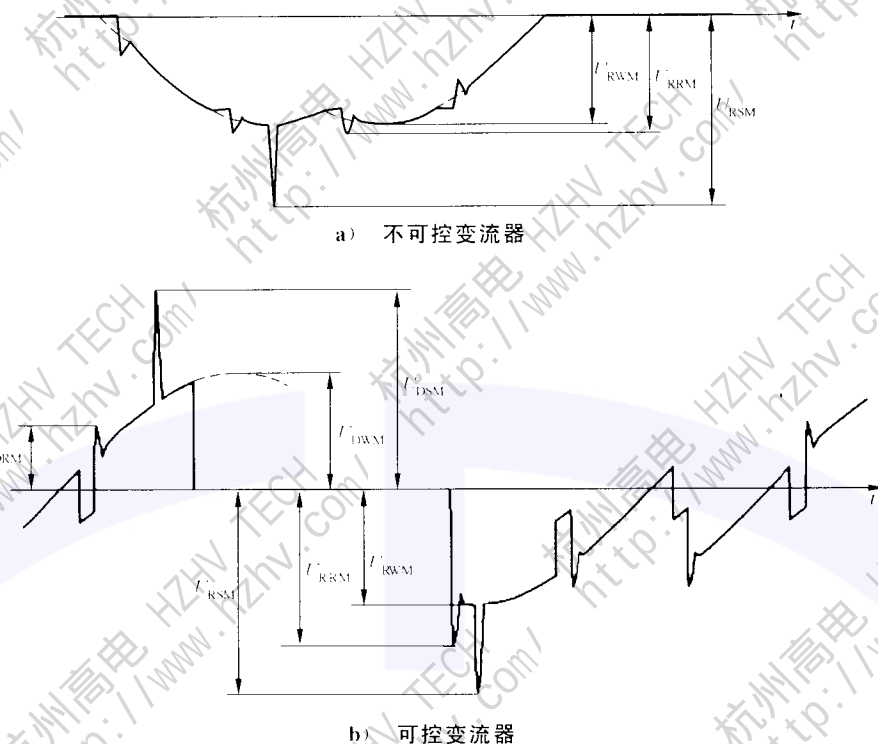


图 7 影响施加在变流器阀器件上的电压的电路运行条件

U_{RWM} 和 U_{DWM} 为施加在变流器阀器件上的电路电压的峰值。

U_{RRM} 和 U_{DRM} 为施加在变流器阀器件上重复电压的峰值,由使用的半导体的特性和电路参数(如电感、RC 网路等)共同引起。

U_{RSM} 和 U_{DSM} 为施加在变流器阀器件上的不重复电压的峰值,可能由断路器动作、大气骚扰等产生。这种电压可采用浪涌抑制元件使之降至最低。

设计变流器时,应保证使用的半导体阀器件的电压额定值不低于图 7 所示的三种电压中的任何一种。

4.11 过电压保护

本部分主要涉及瞬态(暂态)过电压,未提及非正常运行或故障引起的持续过电压(例如 PWM 变流器和反电势负载等情况下)。这种持续过电压的保护措施已比较成熟。

过电压保护的主要对象是电力半导体器件。因为其电、热时间常数很小,对电压应力敏感,很短时间的过电压也可能引起其转折导通、性能下降或永久性损坏。

过电压保护一是应尽可能防止产生过电压,二是应将出现的过电压幅值、脉冲宽度、频度、上升和下降陡度等限制在可接受的限值内。

通常,防止过电压的产生一般通过系统设计和安装工艺实现,可采取改善电力半导体器件的工作方式(例如软开通、软关断)以及优化安装和布线工艺以减少分布参数等措施。重复性过电压防护通常采用阻尼电路,而非重复性过电压防护采用非线性元器件效果较好(见图 8)。一般根据电力变流设备的容量、性能、运行环境 and 应用特点等,有针对性地采用图 8 中的一种或多种措施。有关图 8 中的过电压保护措施的更多信息,可参见附录 A。必要时,订货商应与供应商达成协议。

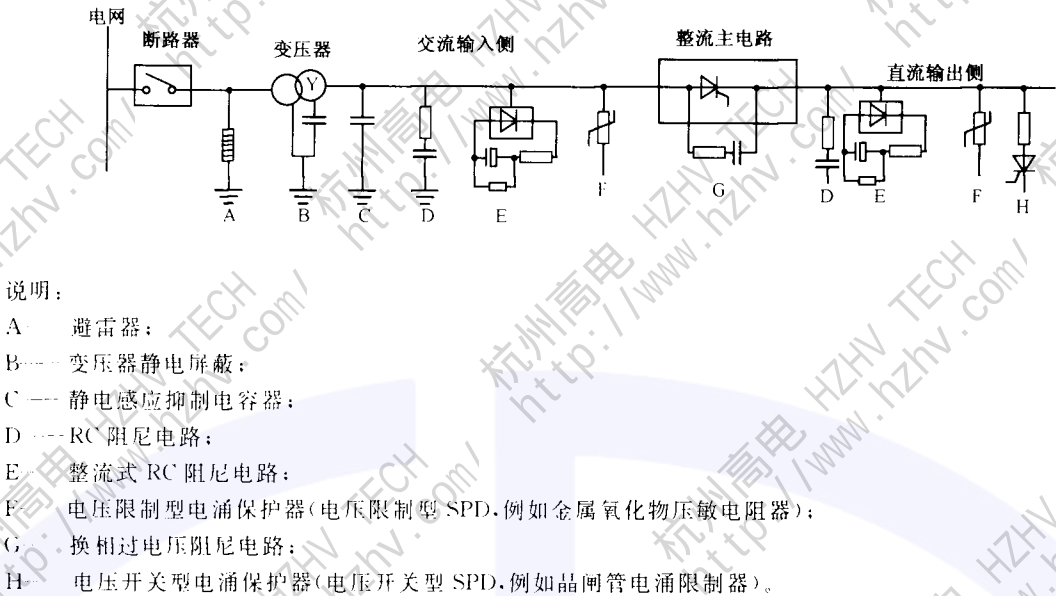


图 8 过电压保护措施示意图

4.12 环境条件对变流器运行的影响

当变流器实际运行条件超出 GB T 3859.1 中规定的正常运行环境条件的规定值时,对变流器运行的主要影响有:

- 环境温度或热转移媒质温度过高,可使温升超过规定限值;
- 环境温度或热转移媒质温度过低,可能引起冷凝、霜冻;
- 空气相对湿度过高,影响绝缘性能,并可能引起凝露;
- 海拔高于 1 000 m 时,空气冷却(自然对流或强迫)效率降低,温升增加;
- 空气中含有过量的盐、碱、酸等腐蚀性气体或导电性尘埃,可引起腐蚀,影响绝缘性能;
- 当可能存在上述情况时,供需双方应在订货时确认,协商采取相应的措施。

5 主要参数计算

5.1 运行参数的实际计算

5.1.1 概述

如果需要多次反复计算变流器的有关参数,使用计算机或至少使用可编程计算器代替使用 4.6 和 4.7 给出的公式和图计算更便利。

在大多数情况下,使用下述公式计算已足够准确,尤其是对标准设计的变流器而言。

计算中使用的文字符号见 GB T 3859.1。

5.1.2 假设条件

通常情况下,计算时使用如下假设:

- 均一联结;
- 平波电感无穷大,即忽略直流电流纹波;
- 脉波数 $p=6$,换相数 $q=3$;
- 忽略交流电压不平衡;
- 稳态运行,即直流电压和直流电流恒定;

GB/T 3859.2—2013

——重叠角 $\mu < 2\pi/p$ 。

5.1.3 初步计算

基波表观功率由式(25)计算:

$$S_{1,N} = U_{di} \times I_{dN} \quad \dots\dots\dots (25)$$

额定直流电流下的电感性直流电压调整值由式(26)计算:

$$U_{dxN} = \frac{\pi}{3} \times \frac{d_{xN}}{e_{xN}} \times \frac{S_{1,N}}{S_{com}} \times U_{di} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

 $1/S_{com} = e_{xN}/S_{1N} + X_L/U_{1N}^2 + 1/S_C$; $X_L = 2\pi \times f_{1N} \times L$; S_C ——供电电源短路容量; L ——电缆或电网的电感量。

对于 6 脉波联结(见表 1),有:

$$d_{xN}/e_{xN} = 0.5$$

电感性直流电压调整值由式(27)计算:

$$d_{xN} = \frac{\pi}{3} \times \frac{d_{xN}}{e_{xN}} \times \frac{S_{1,N}}{S_{com}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

额定电流下的电阻性直流电压调整值由式(28)计算:

$$U_{drN} = P_{rN} / I_{dN} \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中:

 P_{rN} ——电路电阻在额定直流电流下的功率损耗,阀器件门槛电压产生的损耗除外; $d_{rN} = P_{rN} / (U_{di} \times I_{dN}) = P_{rN} / S_{1,N}$ (见注 2)。注 1: 设 $U_{1N}/U_{1N} = 1$, 且所有交流电感归入容量为 S_{com} 的变压器感抗 X_N 之中, d_{xN} 计算如下:

$$d_{xN} = \frac{I'_{1N} \times X_N \times \sqrt{3}}{U_{1N}} \times \sin \frac{\pi}{6}; I'_{1N} = I_{dN} \times \sqrt{2/3}; X_N = U_{1N}^2 / S_{com}; \sin \frac{\pi}{6} = 0.5; U_{1N} = \frac{\pi \times U_{di}}{3\sqrt{2}}$$

因而有式(29):

$$d_{xN} = 0.5 \times \frac{\pi}{3} \times \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_{1,N}} = 0.5 \times \frac{S_{1,N}}{S_{com}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

注 2: 变压器负载损耗可表示为: $e_{rN} \times S_{1,N}$;考虑其他附加损耗: $d_{rN} = (e_{rN} \times S_{1,N} + \text{其他损耗}) / S_{1,N}$;这里, 仅当 $S_{1,N}$ 基于额定直流电流 I_{dN} 时, 等式才正确。

5.1.4 运行条件计算

5.1.4.1 直流电压

对于 6 脉波均一联结, 下述公式适用:

a) 整流器

有式(30):

$$U_{di} \times \cos \alpha = U_{di} + U_{TO} + (U_{drN} + U_{dxN}) \times I_d / I_{dN} \quad \dots\dots\dots (30)$$

b) 逆变器

有式(31):

$$U_{di} < \cos(\alpha + \mu) = U_{di} + U_{TO} + (U_{drN} - U_{dxN}) \times I_d / I_{dN} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

 $U_{di} = U_{om} \times 3\sqrt{2}/\pi$;

U_{10} ——任何电流通路上,所有串联的阀器件门槛电压之和;

I_d/I_{dN} ——直流电流的标么值。

对于直流电动机传动变流器的通常情况, U_d 的值为直流电动机的反电势 E_a (正比于转速和电动机磁通)加上额定电流下的电枢压降。有式(32):

$$U_d = E_{aN} \times \frac{E_d}{E_{aN}} + R_a \times I_{dN} \times \frac{I_d}{I_{dN}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

在这种情况下,电阻性电压调整值 U_{dN} 包括除阀器件门槛电压的损耗之外的所有损耗(阀器件的电阻、电枢、直流和交流电缆、平波电抗器及变压器绕组的)引起的电压调整值。

在其他情况下, U_d 是变流器直流端子上的电压,那么, U_{dN} 不包括变流器之外的直流电路(电缆和负载或电源的)中的损耗引起的电压调整值。

U_{dN} 包括交流电路的电感(变压器漏抗、电网或阳极感抗、电缆感抗、电源系统的感抗等,见5.1.3)引起的所有电压调整值。

注1: 在一些不是稳态的情况下,需要提供电流上升率 di/dt ,在变流器直流电压中增加一项 $L_a \times (di/dt)$,其中, L_a 为直流电路的总电感。

注2: 对于二极管变流器, $\alpha=0, \cos\alpha=1$ 。有式(33):

$$\cos\mu = 1 - 2(U_{dN} - U_{d0}) \quad \dots\dots\dots (33)$$

输出电压由式(31)计算:

$$U_d = U_{d0} - (U_{dN} - U_{10} + U_{dN}) \quad \dots\dots\dots (34)$$

5.1.4.2 位移角

大多数情况下,式(35)近似能满足要求:

$$\cos\varphi_1 = (U_d + U_{10} + U_{dN} \times I_d/I_{dN}) / U_{d0} \quad \dots\dots\dots (35)$$

更准确的公式为式(36):

$$\tan\varphi_1 = \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \mu)} \quad \dots\dots\dots (36)$$

注: 式(36)中使用弧度作为计量单位。

5.1.4.3 整流或逆变运行

对于整流运行,认为电流和电压都是正值,有功功率和无功功率也是正值。

对于逆变运行,认为电流和无功功率是正值,而电压和有功功率为负值。

作为示例,表4和表5分别给出运行条件和运行点。

表4 整流或逆变运行条件

项 目	数 值	单 位
E_{aN}	150	V
I_{dN}	1 812	A
S_c	115	MVA
X_c/R_c	8	p. u.
S_N	1.25	MVA
e_{aN}	0.055	MVA
e_{dN}	0.012	MVA
U_{1N}	400	V
U_{10}	2.1	V
R_a	9.93	mΩ

表 5 运行点

项目	整流 稳态	起动	逆变	单位
I_d/I_N	1.03	1.6	1.175	p. u.
E_d/E_N	1.035	0.0	-0.288	p. u.
U_{d0}	540	540	540	V
U_N	15.0	23.3	17.1	V
U_{gr}	5.2	8.1	5.96	V
α	23.2°	83.1°	98.3°	
μ	5.2°	1.97	3.7°	
$\cos\varphi$	0.892	0.072	-0.176	
φ	26.9°	85.9°	93.3°	
S_{d0}	1.01	1.57	1.15	MVA
P_d/P_N	0.899	0.113	0.213	MW
Q_{d0}	0.155	1.56	1.13	Mvar

5.2 变流器负载引起的供电系统电压变化

5.2.1 基波电压变化

电压的变化可由式(37)估算：

$$\Delta U/U \approx \frac{S_{d0}}{S_0} \cdot \cos[\tan^{-1}(X_0/R_0) - \varphi_0] \dots\dots\dots (37)$$

式中：

X_0 供电电源感抗；

R_0 供电电源电阻。

注： X_0/R_0 可在1 p. u. ~10 p. u. 变化。

5.2.2 电压变化要求的最小 R_{isc} 值

电压变化要求的最小供电电源短路容量与变流器基波表观功率之比由式(38)计算：

$$R_{isc} = S_0/S_{d0N} \dots\dots\dots (38)$$

考虑空载和高峰负载之间的电压调整值时，最小 R_{isc} 由式(39)计算：

$$R_{iscmin} = S_{0min}/S_{d0N} = \cos[\tan^{-1}(X_0/R_0) - \varphi_{0N}] \cdot (\Delta U_0/U_0)_{0N} \dots\dots\dots (39)$$

式中：

$S_{0min} = U_{0N} \cdot I_{d0N}$ ；

I_{d0N} 额定连续直流电流(最大值)。

示例：

假设 $X_0/R_0 = 10, \tan^{-1}(X_0/R_0) = 81.29^\circ$ 。

假设 $\cos\varphi_0 = 0.1, \varphi_0 = 81.26^\circ$ 。

因此， $\cos[\arctan(X_0/R_0) - \varphi_{0N}] \approx 1.0$ 。

如果 $(\Delta U_0/U_0)_{0N} = 0.08$ ，

那么 $R_{iscmin} \approx 1/0.08 \approx 12.5$ 。

5.2.3 变流变压器的变比

实际系统电压的变化可两步或多步重复演算，逐步逼近。
第一次逼近时，利用对应于空载系统电压的阀侧电压估计值计算 P_1 、 Q_1 、 φ_1 。
然后，对电压进行修正，以便计算新的 P_1 、 Q_1 、 φ_1 和 $\Delta U_1/U_{1N}$ 。有式(40)：

$$U_{1N}^* = U_{1N} \times [1 - (\Delta U_1/U_{1N})_{\text{old}}] \dots\dots\dots(40)$$

为优化变压器变比和额定值，可使用新的电压变化值进一步逼近。当然，其他判据诸如其他原因引起的电压变化也应考虑。
作为计算示例，考虑表 6 中的条件的计算结果见表 7。

表 6 运行条件

项 目	文字符号	数值	单位
额定值			
直流电压	U_{dN}	5 000	V
直流电流	I_{dN}	2 200	A
直流电路电阻	R_{dN}	0.136	Ω
变压器额定值	S_{dN}	15	MVA
短路电压			
电感性分量	e_{dN}	0.085	p. u.
电阻性分量	e_{rN}	0.008 7	p. u.
二次电压	U_{2N}	5 080	V
阀器件门槛电压	U_{0V}	38	V
电源短路容量(e_{dN} 和 e_{rN} 包括交流电缆)	S_{sc}	150	MVA

表 7 逐步逼近的结果

项 目	逐步逼近		单位
	初值	终值	
U_1	5 080	4 745	V
U_{d1}	6 860	6 408	V
I_{d1} / I_{dN}	1.0	1.0	p. u.
E_{d1} / E_{dN}	1.0	1.0	p. u.
U_{d1s}	669	583	V
U_{0V}	66	57	V
α	32.7	27.6	
μ	17.0°	17.6°	
$\cos\varphi_1$	0.746	0.798	p. u.
φ_1	41.7°	37.0°	
S_1	15.1	14.1	MVA
P_1	11.3	11.3	MW
Q_1	10.0	8.5	Mvar
$\Delta U_1/U_1$	0.076	0.066	p. u.

GB/T 3859.2—2013

5.2.4 变压器额定值

变压器的电流额定值取决于工作制。
变压器额定值随系统阻抗增大而增加。
空载下的供电电压确定了铁芯尺寸和绕组匝数，线圈导体的截面积取决于电流额定值。
变压器的尺寸也随 $\tan\varphi_1$ 增大而增加。

- 注 1：为在高电流上升率时具有高过载能力，变压器额定值可能还要增加。
- 注 2：如果因为响应速度的原因，最小控制角较大时，平均基波功率因数减小，变压器额定值增加。
- 注 3：对于中小型变流器，其直流侧电感可能较小，直流电流纹波大，要求较大的变压器额定值。计算因子 0.816 ($\sqrt{2/3}$ ，见表 1 中第 8 栏)可能增大至 0.85。

5.3 变流器无功功率消耗的补偿

5.3.1 平均无功功率消耗

大多数情况下，变流器的负载工作制随生产要求而变化。因此，按最合理或最经常出现的工况选定基准工作制是必要的。
平均有功功率消耗和平均无功功率消耗针对工作制的每个区段计算。表 8 给出计算示例。

表 8 有功功率消耗和无功功率消耗计算结果示例

项目	恒加速	稳态	恒减速	单位
持续时间	5	2	4.5	s
Q_{avg}	36	12.2	21.4	Mvar
P_{avg}	18.5	13.9	-7.06	MW
S_{avg}	40.5	18.5	22.6	MVA
P_{avg}/S_{avg}	0.457	0.751	-0.313	p. u.
S_{rms}	41.6	18.5	23.1	MVA

示例：
负载工作制一个循环周期(总持续时间)为 11.5 s(“正向”轧制速度)，则有：
 $Q_{avg} = (36 \times 5 + 12.2 \times 2 + 21.4 \times 4.5) / 11.5 = 26.15 \text{ Mvar}$
 $P_{avg} = (18.5 \times 5 + 13.9 \times 2 - 7.06 \times 4.5) / 11.5 = 7.7 \text{ MW}$
 $S_{rms} = \sqrt{(18.5^2 \times 5 + 18.5^2 \times 2 + 23.1^2 \times 4.5) / 11.5} = 32 \text{ MVA}$

5.3.2 需要补偿的平均无功功率

当根据要求值计算需要补偿的平均无功功率时，使用式(41)：
 $Q_c = Q_{avg} - P_{avg} \times \tan\varphi_{req} = P_{avg} \times (\tan\varphi_{avg} - \tan\varphi_{req}) \dots\dots\dots (41)$

式中：
 P_{avg}, Q_{avg} ----- 有功和无功功率消耗；
 $\tan\varphi_{avg}$ ----- 没有补偿时，计算出的 $\tan\varphi_1$ ；
 $\tan\varphi_{req}$ ----- 要求的平均 $\tan\varphi_1$ 值；
 Q_c ----- 需要补偿的无功功率。

示例：
使用 5.3.1 中的示例的数据和计算结果，有： $\tan\varphi_{avg} = 26.15 / 7.7 = 3.4$
于是：

$$\tan\varphi_{\text{eq}} = 0.4;$$

$$Q_c = 26.2 - 7.7 \times 0.4 = 23.1 \text{ Mvar};$$

注 1: 可看出, 无功功率补偿在工作制的某些区段过剩, 在某些区段又不足。抑制电压波动可能需要调节措施实现在较接近要求的补偿范围内补偿。

注 2: IEC TC 77 及其分会的出版物试图给出作为电压波动幅度递减函数的电压变化可接受的限值和关于电压闪烁的可接受限值。也见 GB/T 19236。

5.3.3 固定无功功率补偿的电压波动

使用电容器调整功率因数时, 如果供电电压升高, 提供的无功功率较多; 反之, 如果供电电压降低, 提供的无功功率较少。

考虑到上述情况, 计算电压波动时采用一种近似方法, 即从系统短路容量中扣除电容器补偿装置的容量。

示例:

使用上述示例的数据, 且 $S_s = 315 \text{ MVA}$ 。

——带 23.1 Mvar 功率因数补偿时, 空载下的电压变化为:

$$\Delta U/U = 23.1 / (315 - 23.1) = 0.0791$$

——高峰负载修正后的电压 (在 $2.3 I_N$ 和 $0.978 U_N$ 下加速):

$$\Delta U/U = (26.3 - 23.1 + 23.5/8) / (315 - 23.1) = 0.021$$

于是, 最大电压波动为:

$$0.079 + 0.021 = 0.1 (\text{p. u.})$$

注 1: 对于电阻性压降等引起的电压变化的最小化, 要求的 $\tan\varphi_{\text{eq}}$ 可能不是最佳的。

注 2: 对于阻抗较高的系统中负载波动大的情况下, 可能需要快速调整无功功率补偿, 尽管打算切换电容器补偿装置就可满足无功功率每天只变化两三次的要求。

静态开关或其他措施可用于更频繁操作的场合, 以代替传统的接触器和断路器。后者存在机械磨损, 且补偿时间滞后使得补偿导致电压变化和闪烁更为严重。

5.4 供电电压畸变

5.4.1 换相缺口

5.4.1.1 缺口面积

换相缺口 (每个半周的主缺口) 面积 A_N 在任两相之间可见, 可由式 (42) 估算:

$$A_N = U_{\text{th}} / (6 f_1 \times R_{\text{isc}}) \dots\dots\dots (42)$$

示例 1:

$f_1 = 50 \text{ Hz}$, $U_{1N} = 400 \text{ V}$, $R_{\text{isc}} = 75$, $U_{\text{th}} = 621.2 \text{ V}$, $A_N = 27\,600 \text{ V} \cdot \mu\text{s}$ 。如果用标幺值表示 (电网峰值电压 $\times$ 角度), 有:

$$A_E = 180 (\pi \times R_{\text{isc}}) \approx 57.3 R_{\text{isc}}$$

示例 2:

对于同样的 R_{isc} , 有:

$$A_E = 0.764 (\text{p. u.} \times \text{角度})$$

5.4.1.2 缺口宽度

忽略杂散电容和杂散电感的影响, 变流器交流端子处的缺口宽度 W_N 可计算。如果忽略线路的全部电容, 缺口深度降低时, 缺口宽度保持与接近供电电源线路无穷远处的其他点相同。

总宽度用角度度量, 且等于重叠角 μ 。

杂散电容和杂散电感引起的振荡可明显改变缺口的形状。

GB/T 3859.2—2013

如果多个完全相同的变流器由同一系统供电,且运行在触发角基本相等的情况下,可由额定值等于各变流器额定值之和且具有相同联结、相同脉波数的单个等效变流器代替。等效换相电感为各变流器的电感并联再加上公共电感。

5.4.1.3 缺口深度

给定点的缺口深度 D_N 由式(43)计算:

$$D_N = A_N / W_N \dots\dots\dots (43)$$

a) 带专用变压器的变流器

考虑的变流器在其他变流器连接点处引起的缺口幅值取决于专用变压器的阻抗。该阻抗可看作是总换相短路容量的一个电感性部分。

缺口深度从变流组件交流端子处的 1 p. u. 减小至供电电源无穷远处的零。计算采用类似于故障电流的计算方法。

表 9 给出下述条件下缺口深度的示例。

表 9 带专用变压器的变流器缺口深度示例

	电压 kV	$1 / S_c$ MVA ⁻¹	短路容量 MVA	缺口深度($\alpha=90^\circ$) p. u.
电源	63	1/730	730	47.2/730=0.065
变压器	20	0.125/40	222	47.2/222=0.213
网侧	20	$2\pi \times 50 \times 0.32 \times 10^{-3} \times 0.13 \cdot 20^2$	221	47.2/221=0.214
变流变压器	0.4	0.07/4.2	47.2	47.2/47.2=1.0

注:用峰值电压的标么值表示的缺口深度与变流器负载无关,随 $\sin\alpha$ 变化。按此处的假设,当 $\alpha=90^\circ$ 时有最大值。

示例 1:

- 供电电源(50 Hz):63 kV,730 MVA;
- 供电变压器:63 kV/20 kV,40 MVA,0.125 p. u. ;
- 馈电电缆:20 kV,0.32 mH/km,130 m;
- 变流变压器:20 kV/0.4 kV,4.2 MVA,0.07 p. u. 。

b) 由公用变压器供电的变流器

在这种情况下,换相电感包括变流器连接电缆的电感(各变流器具有各自的电感)。
在下述条件下考虑。

示例 2:

使用与示例 1 相同的 20 kV 级供电电源,每个变流器经 400 V 电缆 150 m 连接至 1.6 MVA,20 kV/0.4 kV、短路电压标么值 0.06 p. u. 的变压器。

如果重叠角 μ 小($2^\circ \sim 5^\circ$)且各变流器具有不相关的 α 值,换相缺口深度按上述计算,只增加 400 V 电缆的阻抗而已。

表 10 给出一个变流器引起的缺口深度。如果忽略杂散电容的影响,缺口面积也从变流器到供电电源无穷远处减小,但宽度不变。

如果所有变流器在相同控制角下运行,且假设各变流器线路阻抗相等,阻抗并联构成最严酷的情形。

例如 10 个变流器连接至同一个 400 V 变压器,且在相同的时间和相同的控制角下运行,总短路容量将增加至 19.4 MVA(而不是 7.34 MVA),结果产生更大的缺口深度。见表 11。

表 10 由公用变压器供电的一个变流器运行时产生的缺口深度示例

	电压 kV	I _S MVA ¹⁾	短路容量 MVA	缺口深度(α=90°) p. u.
电源	63	1 730	730	7.34/730=0.010 1
变压器	20	0.125/40	222	7.34/222=0.033 1
网侧	20	2π×50×0.32×10 ⁻³ ×0.13/20 ²	221	7.34/221=0.033 2
变流变压器	0.1	0.06/1.6	23.8	7.34/23.8=0.308
电缆	0.1	2π×50×0.32×10 ⁻³ ×0.15/0.1 ²	7.34	7.34/7.34=1.0

表 11 10 个变流器同时运行产生的缺口深度示例

	电压 kV	I _S MVA ¹⁾	短路容量 MVA	缺口深度(α=90°) p. u.
电源	63	1 730	730	19.4/730=0.027
变压器	20	0.125/40	222	19.4/222=0.087
网侧	20	2π×50×0.32×10 ⁻³ ×0.13/20 ²	221	19.4/221=0.088
变流变压器	0.4	0.06/1.6	23.8	19.4/23.8=0.815
电缆	0.4	(1/10)×2π×50×0.32×10 ⁻³ ×0.15/0.4 ²	19.4	19.4/19.4=1.0

5.4.2 同一供电网中的多个变流器运行

如果多个变流器连接至同一供电网,必须考虑变流器之间的相互影响,尤其是与各个阀器件并联的 RC 电路。主要为:

- a) RC 阻尼电路的损耗将随变流器的数量增加。对于单独在电网运行,臂中有 RC 电路的 6 脉波桥式联结变流器,在最严酷情况下(延迟角 α=90°),换相缺口在电阻中产生的损耗可由式(44)计算:

$$P_{\max} \approx 3.5U_c^2 \times C \times f_1 \dots\dots\dots (44)$$

式中:

- C —— 一个 RC 电路中的电容量;
U_c —— 变流器组件端子上的方均根电压;
f₁ —— 基波频率;
P_{max} —— 一个 RC 电路的损耗。

实际上,变流器在 α=90°仅短时运行,因而损耗将会很小(例外:例如造纸机冷却干燥滚筒时,可能以 0.02 p. u. ~0.05 p. u. 的速度运行数小时)。可由式(45)计算:

$$P_{\text{avg}} \approx 3.5U_c^2 \times C \times f_1 \times \sin^2 \alpha \dots\dots\dots (45)$$

如果多个变流器在同一供电网运行,每个变流器中的 RC 阻尼电路的损耗将按网侧端子处电压缺口的幅值和数量成比例地增加。

因此,变流器中由于其他变流器的缺口而产生的损耗主要取决于两变流器的触发延迟角、可能存在的换相重叠角和各自阻抗相对的重要性。

在大多数情况下,连接在同一供电网的变流器不超过 4 个,如果 sinα≤0.5,就没有问题。如果连接更多变流器,就需要认真考虑。

GB/T 3859.2—2013

- b) 如果变流器之间的去耦电感小,即连接线短且无网侧电抗器时,与变流器并联的电容也增加 di/dt 应力。
- c) 变流器也将在电网中引起电压降落,这已经在变流器技术规范中考虑。对于需要在逆变状态下运行的变流器,这尤为重要。

5.5 变流器运行在网侧产生的谐波

5.5.1 网侧电流的方均根值

网侧电流的方均根值可计算如下:

- a) 第一次近似计算(忽略重叠角)见 4.4.3;
- b) 当已知触发延迟角 α 和重叠角 μ 时,可由式(46)对三相桥式联结进行更准确的计算:

$$I_L = I'_{L,\alpha,\mu} = I_L \times \sqrt{1 - 3\Psi(\alpha,\mu)} \dots\dots\dots (46)$$

式中:
 I_L ——按 4.4.3 中的方法,第一次近似计算的值;
 $\Psi(\alpha,\mu)$ 由式(47)计算:

$$\Psi(\alpha,\mu) = \frac{\sin\mu \times [2 + \cos(2\alpha + \mu)] - \mu \times [1 + 2\cos\alpha \times \cos(\alpha + \mu)]}{2\pi \times [\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)]^2} \dots\dots\dots (47)$$

角度用弧度度量。
不同重叠角和延迟角下的 $I'_{L,\alpha,\mu}/I_L$ 值如表 12 所示。

表 12 不同重叠角和延迟角下的 $I'_{L,\alpha,\mu}/I_L$ 值

μ	$I'_{L,\alpha,\mu}/I_L$				
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0	0.991	0.993	0.993	0.993	0.993
15°	0.983	0.979	0.979	0.979	0.979
25°	0.972	0.966	0.965	0.965	0.965
35°	0.960	0.953	0.951	0.950	0.950

- c) 当相关的直流侧电感小时,由于直流电流纹波的存在,网侧电流实际的方均根值可能大于按上述 a) 和 b) 中的方法计算的值(见 5.2.4 的注 3)。

5.5.2 网侧的谐波(适用 6 脉波变流器的近似方法)

5.5.2.1 概述

在初始设计阶段,如果由其变压器的额定值得知变流器容量,可使用 5.5.2.2 和 5.5.2.3 中的公式和图 9。通过计算机模拟很容易计算谐波。

5.5.2.2 谐波电流

当触发延迟角和重叠角已知,且忽略直流电流纹波时,谐波电流频谱可由式(48)计算:

$$I_{ho} = I_{L0} \times \sqrt{a^2 + b^2 - 2a \times b \times \cos(2\alpha + \mu)} / d \dots\dots\dots (48)$$

式中:
 I_{ho} —— 触发延迟角为 α 时的谐波电流;
 $a = \frac{1}{h-1} \times \sin \frac{(h-1) \times \mu}{2}$;

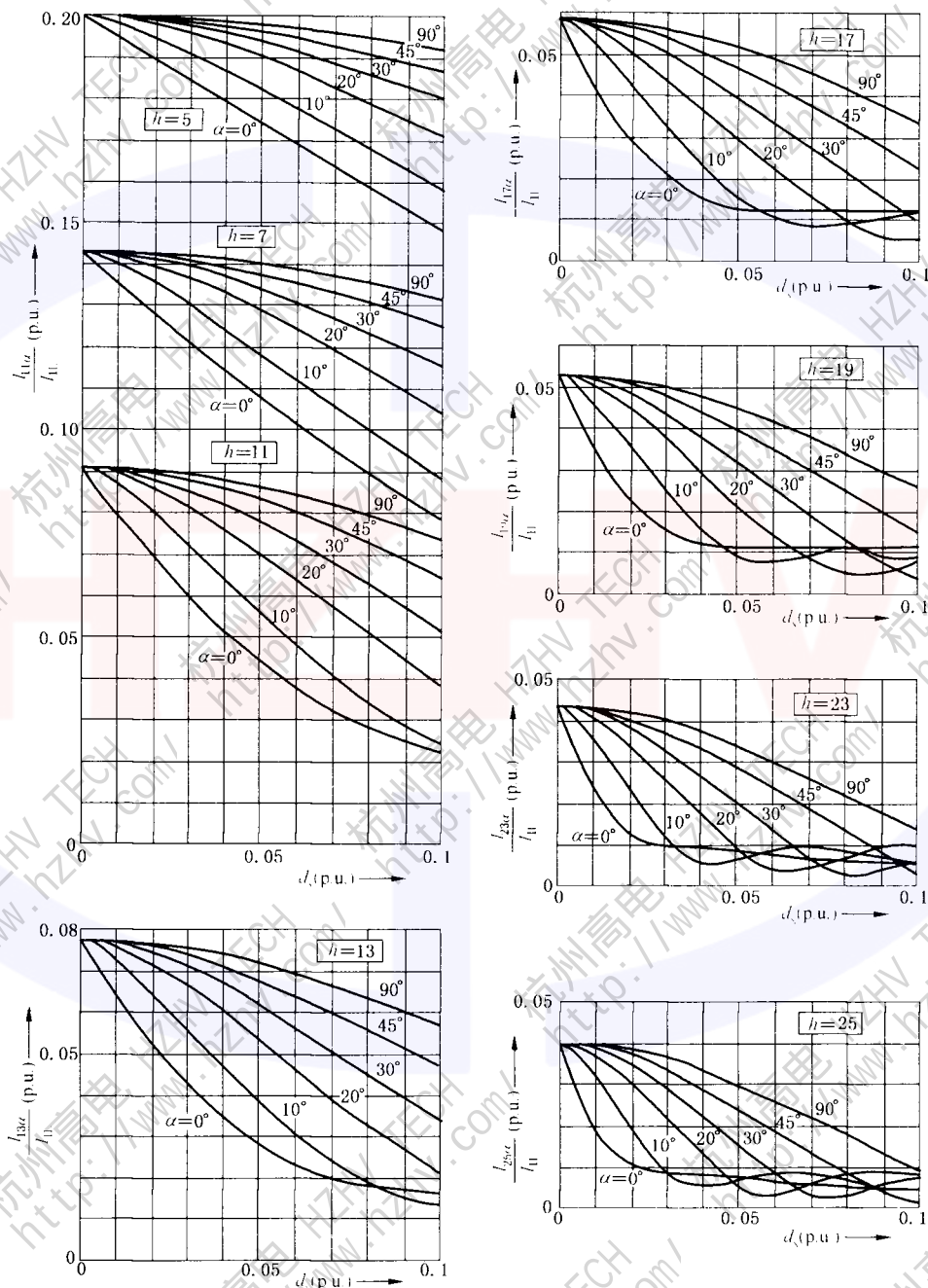
$$b = \frac{1}{h+1} \times \sin \frac{(h-1) \cdot \mu}{2};$$

$$d = h \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha - \mu)] \text{ 或 } d = 2h \cdot d_1;$$

h ——谐波次数;

I_{11} ——基波电流;

图 9 为某些典型情况的计算结果;



说明:

d ——电感性直流电压调整值;

α ——触发延迟角(逆变时使用熄断角 γ)

图 9 交流侧谐波电流频谱($p=6$)

GB/T 3859.2—2013

基波电流由式(49)计算:

$$I_{IL} = S_{IL} / \sqrt{3} U_{LN} \quad \dots\dots\dots (49)$$

在逆变运行时,用熄断角 γ 代替触发延迟角 α 。图 9 中假设直流电流平滑。

注 1: 根据直流负载电路电感,直流电流纹波可使 5 次谐波电流增加 0.3 p. u. 或更多,而 11 次~ $(6k-1)$ 次谐波电流增加不多。7 次~ $(6k-1)$ 次谐波电流通常降低。

注 2: 由于供电电压不平衡,可能存在其他非特征谐波。这会阻碍预期的谐波消除。

5.5.2.3 谐波电压

谐波电压 $U_{h\alpha}$ 为谐波电流 $I_{h\alpha}$ 与系统谐波阻抗 Z_h 的乘积,由式(50)计算:

$$U_{h\alpha} = Z_h \times I_{h\alpha} \quad \dots\dots\dots (50)$$

在没有电容器补偿装置和长的供电线路时,系统阻抗可由适用变压器的式(51)近似计算:

$$|Z_h| = \frac{U_{LN}^2}{S_{IL}} \times \sqrt{\frac{1 + 1/(Q_c + Q_p)^2 + 4(h \times Q_c)^2}{1/Q_p^2 + 1/h^2}} \quad \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$Q_c = X_c/R_c$ (约为 8 p. u. ~12 p. u.);

$Q_p = R_p/X_p$ (约为 80 p. u. ~120 p. u.);

$S_c = U_{LN}^2/X_c$;

R_c ——与负载损耗对应的串联电阻;

R_p ——与空载损耗对应的串联电阻;

X_c ——供电变压器的漏抗。

式(52)给出相对于线与中性线间电压(相电压)的第 h 次谐波电压:

$$\frac{|U_{h\alpha}|}{U_{LN} / \sqrt{3}} = \frac{S_{IL}}{U_c} \times \frac{I_{IL}}{I_{IL}} \times \sqrt{\frac{1 + 1/(Q_c + Q_p)^2 + 4(h \times Q_c)^2}{1/Q_p^2 + 1/h^2}} \quad \dots\dots\dots (52)$$

5.5.3 谐波畸变和最小 R_{isc} 要求

谐波畸变可通过增加变流器的脉波数 p 减小。一般由多个基本 6 脉波变流器的组合实现。

特征谐波的次数由式(53)给出:

$$h = k \times p \pm 1 \quad \dots\dots\dots (53)$$

式中:

k ——正整数。

通常成为基本 6 脉波变流器单元的特征量和整个变流器的非特征量的这些谐波不会完全消除,其剩余值可达基本 6 脉波变流器值的 0.05 p. u. ~0.15 p. u.。

如果对非特征谐波取保守值 0.15 p. u.,并设 $Q_c = 8$ p. u. 和 $Q_p = 100$ p. u.,表 13 中的值由 $p=6$ 、 $p=12$ 、 $p=18$ 和 $p=24$ 以及由式(54)计算的不同的值得到:

$$S_{IL} (S_c = 1/R_{isc}) \quad \dots\dots\dots (54)$$

表 13 还给出了最低次数的特征谐波和缺口面积 A_E (以标么值乘以角度表示, $\alpha=90^\circ$ 时)的值。

表 13 低压系统的最小 R_{sc} 要求

THD	$p = 6$			$p = 12$			$p = 18$			$p = 24$		
	R_{sc}	A_F	U_{sc}	R_{sc}	A_F	U_{sc}	R_{sc}	A_F	U_{sc}	R_{sc}	A_F	U_{sc}
	p. u.	p. u. $\times$ 角度	p. u.	p. u.	p. u. $\times$ 角度	p. u.	p. u.	p. u. $\times$ 角度	p. u.	p. u.	p. u. $\times$ 角度	p. u.
0.01	231	0.25	0.001 1	150	0.19	0.013	106	0.18	0.005 5	99	0.11	0.005 4
0.015	151	0.40	0.002 2	100	0.29	0.005	71	0.27	0.008 1	66	0.22	0.008 1
0.03	77	0.71	0.012 1	50	0.57	0.013 0	35	0.55	0.016 5	33	0.43	0.016 3
0.05	46	1.21	0.020 6	30	0.93	0.021 7	21	0.91	0.027 5	20	0.72	0.026 8
0.08	29	1.98	0.032 7	19	1.51	0.034 2	13	1.47	0.044 1	12	1.19	0.044 7
0.1	23	2.48	0.040 9	15	1.89	0.042 8	10	1.84	0.055 5	9	1.49	0.055 9
注 1：对于中压系统，采用 $R_{scmin} = 3R_s$ 作为最小要求（谐振余量）。 注 2：对于高压系统，采用 $R_{scmin} = 2R_s$ 作为最小要求（谐振余量）。 注 3：不用于直接连接电容器组或滤波器的系统。 注 4：插值法：对于给定的脉波数 p，$THD \cdot R_{sc} = \text{常数}$。 注 5：总谐波畸变作为变流器对现有的畸变的影响给出。 注 6：缺口面积针对单一缺口（不存在多重换相）给出。 注 7：对应于额定表观功率的畸变，使用 S。 * THD——总谐波率（总谐波畸变）。												

5.5.4 谐波电流相位移的估计

假设电流简化为梯形波，相位移为：

对于基波电流， φ_1 （见 5.1.1.2）；

对于 k 次谐波电流，由式(55)计算：

$$\varphi_k = (1 \pm k \times p) \times \varphi_1 + k \times p \times \theta \dots\dots\dots (55)$$

式中：

k ——正整数；

p ——脉波数；

θ ——变压器的相位移

5.5.5 谐波电流的叠加

如果多个变流器由同一系统供电，当已知相位关系（包括变压器的相位移，如有）时，相同频率的谐波电流可矢量相加。然而，设计参数、运行条件等的较小变化可导致计算结果的低准确度低，尤其是谐波次数高于 13 或 17 时，因为角度误差也乘以“ k ”（例如为 12 或 18）。在谐波频谱的较高频带，非特征谐波可能会显著超过特征谐波。

5.5.6 峰值和平均值谐波频谱

谐波电流正比于基波电流。应检查高峰负载下的谐波电流和谐波电压及其影响，尤其是对电容器峰值电压的影响。但是，电容器和其他电路元件能承受短时过载，尤其是平均过载为中等时。因此，允许电容器的方均根电流值超过其额定值（例如，在连续工作制时，为额定电流的 1.3 p. u.）。

GB/T 3859.2—2013

5.5.7 变压器的相位移

采用适当的变压器绕组联结,可利用谐波电流的相位移消除某些谐波。表 14 给出了示例。

表 14 变压器相位移和谐波次数

脉波数	变压器相位移 角度	谐波次数	
		非特征	特征
12	0~30	5~7, 15~19, ...	11~13, 23~25, ...
18	0~20, 40	5~7~11~13, ...	17~19, 35~37, ...
24	0~15, 30, 45	5~19, 29~37	23~25, (47~49)...
36	0~10, 20, 30, 40, 50	5~31, 41~...	35~37

在变压器的实际设计中,尤其是匝数少的情况,完全消除谐波是不可能的,非特征谐波仍可能有剩余,可达具有相同(总)额定值的等效 6 脉波联结的理论值的 0.05 p. u. ~0.2 p. u.。

直流电流纹波和相位不平衡等其他因素也对谐波频谱产生影响

5.5.8 两个 6 脉波变流器的顺序触发

在认为有必要将无功功率消耗减少至最小的某些情况下,可对变流器进行顺序触发,其优点为:

· 直流电压为其额定值或最大值的 0.5 p. u. 以下时,无功功率消耗大大减少。这尤其适用于大型可逆轧机,因为轧辊咬入轧件就是在大约一半速度下,稳态运行的时间相对较短;

· 两个 6 脉波变流器可由同一变压器的“YY”或“△△”绕组供电,只要:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ$$

与 6 脉波联结相比,谐波频谱更接近于 12 脉波联结。

然而,这些优点可能不足以补偿如下因素:

· 对于可能发生短时停电的电网,逆变器部分的运行受到跳闸或熔断器熔断的损害;

· 谐波频谱通常与 6 脉波联结的典型频谱相似,只有当 $\alpha_1 - \alpha_2 \approx 30^\circ$ 时,才可能减少 5 次、7 次、17 次、19 次以及更高次数的谐波。因此,谐波滤波器(如有)应有针对性地设计;

· 虽然减少无功功率需求允许降低电容器额定值,但谐波过载的存在可能要求电容器有一定的余量。

由此看来,似乎不可能就这类情况给出简单的规则,因此,可根据供电系统和运行情况,对每种应用的情况进行多个方案比较。

5.6 功率因数补偿和谐波畸变

5.6.1 总则

使用电容器补偿装置的必要性由于节能政策而越来越大:

- a) 供电部门可能规定最小功率因数;
- b) 由于无功功率,变压器和电缆的功率损耗增加;
- c) 如果没有补偿,变压器、电缆和开关装置可能过载。

如果变流器负载为系统负载中的重要部分,应仔细研究电容器补偿装置的使用。

有关功率因数补偿可参见 GB/T 10236。

5.6.2 谐振频率

交流电动机负载可显著改变谐波阻抗,在初步设计时,可使用图 10 中的曲线估计谐振频率和放大

倍数。假设系统阻抗为纯电感性/纯电阻性的($Q_p = 8 \text{ p.u.}$, $Q_p = 100 \text{ p.u.}$), 而将电缆的电容计入电容器的容量中。

5.6.3 直接并联的电容器补偿装置

根据经验, 对于没有变流变压器的变流器来说, 在其交流侧直接并联电容器进行补偿是不可取的, 在可运行的最小交流电动机负载很小时尤其如此。
功率因数调整最好在变流变压器的一次侧进行, 以避免半导体器件承受过高的 di/dt 应力。使用扼流电抗器可将这种应力降至最低, 但谐波电流仍将会使直接并联的电容器补偿装置过载, 尽管电容器的连接电缆引入了一些电抗。

还应注意, 防护无线电频率干扰的滤波器中的电容器也会受到谐波电流引起的过载的危害。

5.6.4 谐振频率的估算

具有系统电感的电容器补偿装置的谐振频率由式(56)计算:

$$f_r = h_r \cdot f_1 \dots\dots\dots (56)$$

式中:

$$h_r = \sqrt{S_{cl}/Q_c};$$

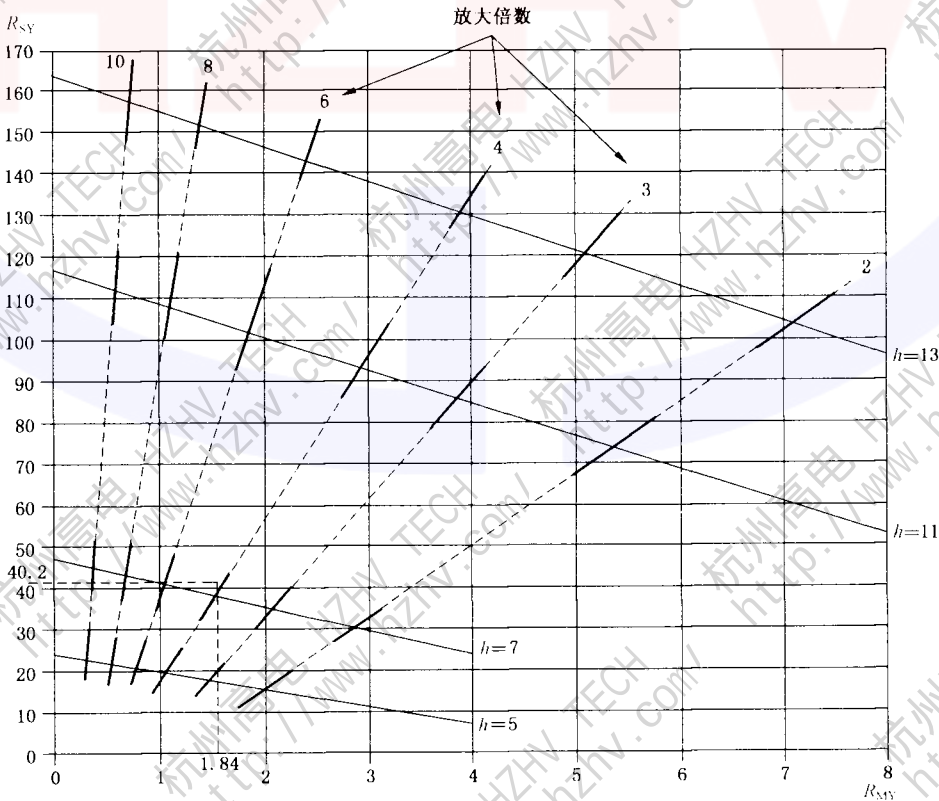
Q_c ——电容器补偿装置的容量。

如果电动机负载容量 S_M 足够大, 可利用图 10 估算。图中:

横坐标和纵坐标可分别由式(57)和(58)计算:

$$R_{MY} = S_M/Q_c \dots\dots\dots (57)$$

$$R_{SY} = S_c/Q_c \dots\dots\dots (58)$$



说明: 放大倍数只在图中实线的交点附近的区域存在, 在虚线部分不存在。

图 10 电容器额定值和交流电动机负载对谐振频率和放大倍数的影响

GB/T 3859.2—2013

示例：

供电网：92 MVA、20 kV；

交流电动机 负载：1 MVA(总容量 850 kW, $\cos\varphi_s = 0.85$)；

变流器负载：500 kVA(其中，直流电动机 400 kW)；

供电变压器：2 MVA、20 kV/0.4 kV, $\cos\varphi_s = 0.96$ p.u.；

功率因数校正：

- 交流电动机：250 kvar
- 变流器：360 kvar
- 总计：610 kvar

100 V 母线处的短路容量：24.5 MVA；

预期的谐振频率为：

$$f_1 = \sqrt{S_c / Q} = f_1 = \sqrt{24.5 / 0.61} = f_1 = 6.31 f_1$$

图 10 中的坐标值：

$$R_{s1} = S_c / Q = 1 / 0.61 = 1.61$$

$$R_{s1} = S_c / Q = 24.5 / 0.61 = 40.2$$

由图 10 查出补偿后的谐振频率近似为 $7f_1$ ，放大倍数可估算为 4

由 R_{s1} 为 24.5/0.5=49，从表 E3 查得 6 脉波变流器的总谐波畸变 THD 的方均根值为 0.05 p.u.，7 次谐波为 0.02 p.u.，但考虑到放大倍数，7 次谐波将为 $0.02 \times 4 = 0.08$ p.u.。对于工厂内的供电母线，这也许还可接受，但对于公用电网则不然。

5.6.5 去谐电抗器

宜选用去谐电抗器消除谐振。

- 电力电容器通常由许多铝箔与介质绕制的电容单元串并联构成，其电感量的自谐振频率为 10 kHz~50 kHz；
- 连接电缆的电感量可引起 2 kHz~5 kHz 的谐振(取决于电缆的长度、尺寸和布置等。电缆的电容量相对于频率达数千赫的电容器补偿装置可忽略不计)；
- 为了限制冲击电流，经常使用 50 μ H 或 60 μ H 的扼流电抗器(在中压系统中)。然而，对于中压电容器补偿装置，产生的串联调谐频率仍为其额定频率的 50 倍~70 倍；
- 如果并联谐振频率接近存在的某一谐波，可能有必要使用电感量比扼流电抗器大的去谐电抗器。例如 12 脉波变流器的情形，剩余的 5 次、7 次谐波如果被放大 5 倍~10 倍，会导致电容器过载及其他不希望的影响；
- 对这种情形，可使用去谐电抗器降低谐振频率(低于 5 次，且不与 1 次、3 次谐波重合)。使用附加电阻器可改善阻尼；
- 式(59)可用于第一次近似：

$$\frac{1}{h_1'^2} = \frac{1}{h_1^2} + \frac{Q}{S_c} \dots\dots\dots (59)$$

式中：

$h_1' \times f_1$ ——新的谐振频率；

$h_1 \times f_1$ ——调谐频率；

Q ——电容器额定容量；

S_c ——在电容器母线处的系统短路容量。

示例：

$Q = 2.56$ Mvar；

$h_1 = 4.25$ ；

$S_c = 125$ MVA；

$h_1 = 5.35$ ；

要求的调谐频率 $f = h_1 \times f_1$ 。

注：此示例中，谐振频率高于5次谐波，但如果要考虑交流电动机或其他负载和多个 S_{c} 值，尤其是当 R_{sc} 的值在要求的兼容电平边界上时，上式和图10中的曲线可能显得不足。

5.6.6 纹波控制频率(载波频率)

在大多数公用电网中，远程控制和监视(开关装置、电压控制、负载流量参数等)是利用叠加一个特定频率(可为175 Hz、188 Hz、595 Hz或与工频的任何有影响的谐波不同的其他频率)的控制电压实现。

在可能存在扼流电抗器或去谐电抗器的某些场合，使用电容器补偿装置将增加系统在特定频率下的阻抗。这可能将危害纹波控制系统的寄生的瞬态放大。

这个问题必须与有关主管部门一起研究。可使用间歇滤波器防止纹波控制系统频率范围内有用的信号被衰减和寄生的瞬态被放大。

5.7 直流电压的谐波含量

直流电压中叠加的交流电压(纹波分量)的 h 次谐波分量的方均根值与理想空载直流电压有关，由式(60)计算。图11给出脉波数 $p=6$ 时的计算结果。

$$U_h = \frac{U_{\text{di}}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{e^2 + f^2 - 2e \times f \times \cos(2\alpha + \mu)} \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中：

$$e = \frac{1}{h-1} \times \cos \frac{(h-1) \times \mu}{2};$$

$$f = \frac{1}{h+1} \times \cos \frac{(h+1) \times \mu}{2};$$

$$h = k \times p;$$

k ——正整数；

p ——脉波数。

注：如果交流侧电压不平衡，将出现 $2p$ 次谐波分量，其幅值与 U_{di} 之比近似等于负序电压与额定值(正序)之比。

如果门极信号在一个周期内不等距，也可能产生其他非特征谐波。

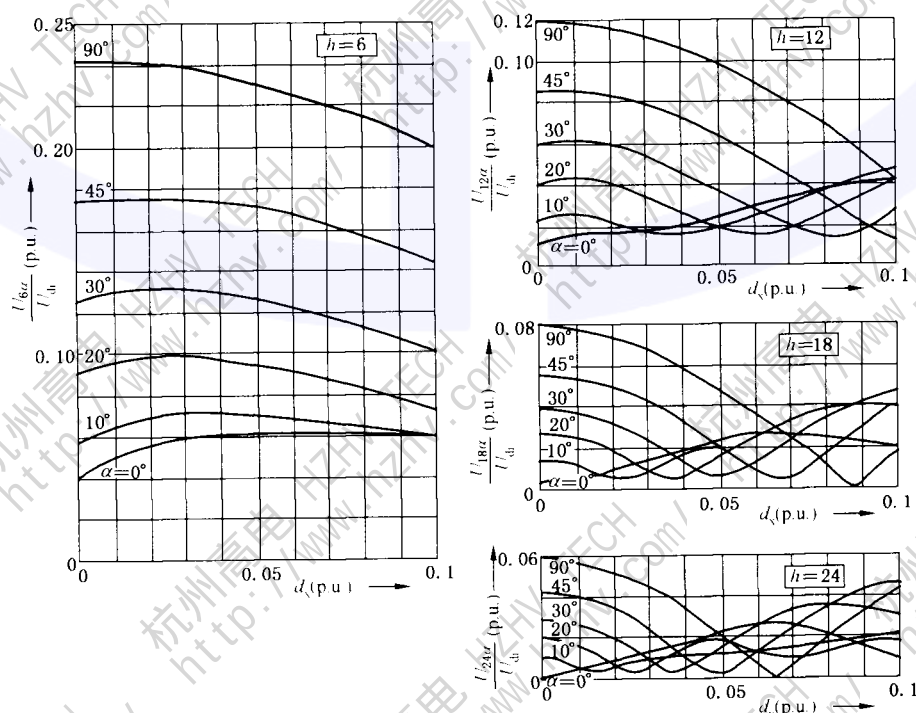


图 11 直流电压的谐波含量($p=6$)

GB/T 3859.2—2013

5.8 其他考虑

5.8.1 随机控制角

对于多个变流器在无关联的工作制周期下使用的情况,无功功率需求和谐波电流频谱的估算可基于最严酷情况或可获得的数据:工业类型、应用种类或以往类似应用的经验。

按最严酷情况处理可能使安全裕度过大,通常的结果是尺寸、成本和损耗增加。除非最严酷情况出现的概率较大(例如概率超过 5%),或时间较长(每小时超过数分钟),否则,这种方法不宜采用。

在大多数情况下,设计宜基于多半的工况:在最严酷情况下,即使性能可能达不到要求也不应发生损坏。

某些情况下可能要考虑多种方案进行比较,以得到最佳设计。

5.8.2 次谐波的不稳定性

次谐波不稳定性的情形已有发生,其中一些归因于过大的谐波畸变伴随变化的波形失真。这是变流器自身受到电容器补偿装置与系统电感之间意外谐振的骚扰。这可在频率可达 4 次谐波的频率,尤其是具有高性能、快速响应控制的情况下出现。

5.8.3 谐波滤波器

如果谐波引起的畸变太大,可能无法用改变谐振频率或电容器容量的办法解决,通常可能需要增设谐波滤波器。这已超出本部分的范围。

5.8.4 电缆电容量的估计

如果系统电压为 15 kV 或以上,电缆的电容量不可忽略不计,尤其对于广延的系统。

表 15 给出的数值根据每千米电缆的电容量平均值为 0.25 $\mu\text{F}/\text{km}$ ~0.32 $\mu\text{F}/\text{km}$ (取决于电缆的绝缘水平和截面积)计算而得。

表 15 电缆电容量的近似值(kvar/km)

电网频率 Hz	系统电压 kV									
	6	10	13.8	15	20	25	30	63	90	150
50	3	8	16	19	33	51	73	317	643	1 770
60	4	11	20	22	42	65	92	391	784	2 121

5.9 直流侧短路时的电流计算值

在直流侧短路情况下,某些变流器的稳态电流值可由表 16 估算。

表 16 给出对应于表 1 中的部分联结的短路电流与(I_{dN}/e_{xN})值的比值。

表 16 直流侧短路时的变流器电流值

表 1 中的 联结序号	阀侧电流 方均根值 p. u.	臂电流			直流电流 平均值 p. u.
		方均根值 p. u.	峰值 p. u.	平均值 p. u.	
1	0.71	0.71	1.41	0.45	0.90
2	0.74	0.74	1.15	0.55	1.65
3	0.33	0.33	0.66	0.21	1.27
5	0.29	0.29	0.58	0.18	1.10
6	0.22	0.22	0.44	0.14	0.85
7	1.00	0.71	1.41	0.45	0.90
8	0.82	0.58	1.15	0.37	1.10
9	0.40	0.28	0.56	0.18	1.07
12	0.80	0.56	1.12	0.36	1.07

5.10 抗扰度等级的选用

5.10.1 概述

电磁兼容性要求见 GB/T 3859.1—2013 中 3.9、5.2.5.3.2.1 和 6.3.5。

抗扰度等级 A、B、C 三级和抗扰电平的要求见 GB/T 3859.1—2013 中 5.3.2.1 和 6.3.5。

a) A 级：A 级电平用于预期在恶劣电气条件下运行的变流器，例如多个变流器直接连接至 R_{1sc} 小的公用变压器（变流器专用母线）

这种变流器也建议用于下述场合：

- 超过 B 级或 C 级电平的可能性不大，但故障的后果却是代价昂贵或造成损坏；
- 今后可能计划增加其他变流器或骚扰负载。

b) B 级：B 级电平用于预期在大多数时间、大多数地点遇到的一般电气条件下运行的变流器。可用于：

- 一般工业系统，包括向交流电动机那样的其他负载供电；
- 也可用于恶劣电气条件，如果采取一些措施（设置浪涌抑制器、隔离变压器、谐波滤波器、静止式补偿装置）改善运行条件，使骚扰电平低于 B 级抗扰电平（或超过的可能性足够小），满足要求的可用性。

c) C 级：C 级电平用于普遍被分散使用的功率小且 R_{1sc} 相对较大、对于非临界功能、负载相当稳定的变流器。

这种变流器可用于高品质系统，只要不明显改变骚扰电平。

5.10.2 抗扰度等级的选择

抗扰度等级选择的意思是将预期的变流器运行条件与规定的抗扰度等级的抗扰电平比较后进行评定。因而要求对电网运行条件有良好的了解。

假设电网设计遵循相关的电力工程规范，对载流能力、短路和过电压保护、功率因数等都作了相应考虑。还假设电网容量在允许的电压抗扰电平内足以提供负载（包括变流器）要求的有功功率和无功功率。

选择变流器的抗扰度等级首先根据传统电网的参数（例如在稳态和瞬态条件下，频率的变化、交流

GB/T 3859.2—2013

电压的幅值和电网重要节点处的不平衡度等),初步选定一个抗扰度等级。这时,仅考虑变流器参数的基波分量,而忽略变流器的非线性现象的后果。

然后,全面评估变流器的电气运行条件,涉及电压和电流波形的所有方面都应考虑。

这将使变流器与其最终用途和其供电电网的电气运行条件有良好的匹配。但应牢记,这些条件可由于连接的负载数量、供电母线联结、公用电网的变化等改变。

电流和电压畸变的参数能根据本条给出的信息评估。

下面给出示例。

如果变流器符合某等级的抗扰电平(比如B级),变流器产生的骚扰(当加入存在的对电网的骚扰时)不应超过选定的等级(在此,为B级)的抗扰度限值。因而,通常需要变压器或交流电抗器,只有A级变流器可能例外。

示例:

图 12 给出工厂配电(虚线以下部分)及其电网相关单元(虚线以上部分)的简图。

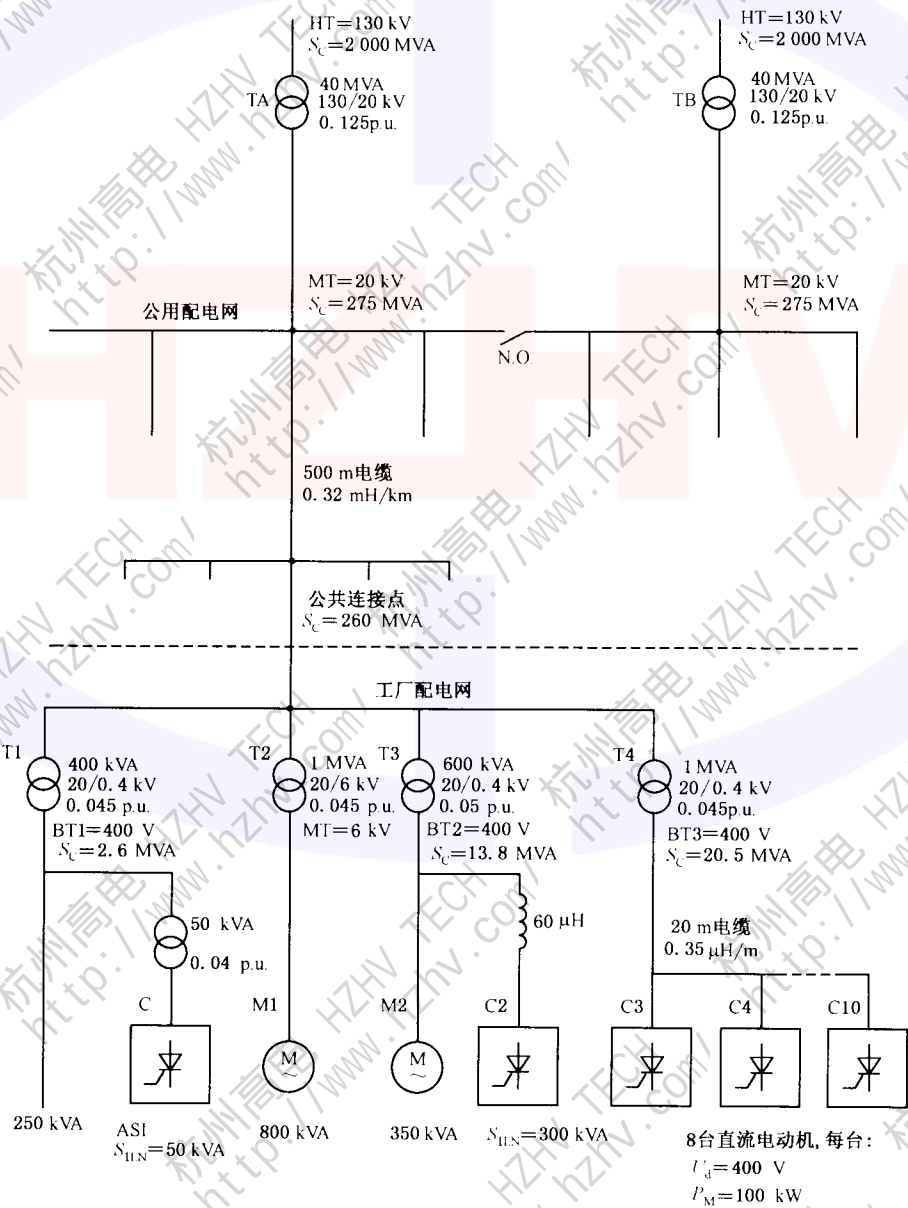


图 12 配电示例

额定值和其他相关参数也在图 12 中标出

假设电网类型变流器的抗扰度等级如下：

- MV：公用配电网（外部用户允许）和工厂配电网；
- LV1：高品质电网，用于符合 C 级抗扰电平 的敏感（低抗扰度）设备和变流器（如同 C₁）；
- LV2、MV1：工厂配电网，用于符合 B 级抗扰电平的普通设备和变流器（如同 C₂）；
- LV3：变流器专用电网，用于符合 A 级抗扰电平的变流器（如同 C₃~C₄）；
- 变流器 C₁：C 级；
- 变流器 C₂：B 级；
- 变流器 C₃~C₄：A 级。

注 1：由高压（HV）降至中压（MV）的变压器（TA 和 TB）决不可并联工作。但在一个变压器出现故障的情况下，另一个变压器也可在其过载能力 1.3 p.u. 范围内向故障变压器带的负载供电。这不会使公用配电网的短路容量发生任何变化。

注 2：像往常评估电压畸变严酷度的第一次近似的情形那样，本示例不包括功率因数补偿电容器。

注 3：假设连接至 LV3 母线的直流电动机传动设备等 效于差异因数 0.8 的单个变流器。

注 4：本示例不考虑交流电动机提供的短路容量

表 17 为图 12 示例的计算值。

表 17 图 12 示例的计算值

项目	1 S ₁ MVA	S ₂ MVA	总负载 kVA	变流器负载 kVA	谐波畸变 p.u.	缺口深度 p.u.	ΔU/U p.u.
电网 130 kV	2 000	2 000					0,007
变压器 TA 40 MVA	320						
母线 20 kV		275,8					
中压电缆 (0,32 mH/km)	7 957						
公共连接点		266,6	2 300	1 250	0,011	0,1 ^b	0,006
变压器 T1	8,9						
电网 LV1		8,6	300	50	0,013 4	0,127	0,024
变压器 T2	1,25						
变流器端子		1,09		50	0,106	1,0	
变压器 T3	12						
电网 LV2		13,76	600	300	0,05	0,38	0,03
电动机 350 kVA		2,275	300				
电抗器 60 μH	8,5						
变流器端子		5,25		300	0,132	1,0	
变压器 T4	22,2						
电网 LV3		20,5	900	900	0,104	0,97	0,031
电缆 400 V,20 m,8 μH/(0,35 μH/m)	582						
变流器端子		20		900	0,104	1,0	

表 17 (续)

项目	$1/S_c$ MVA ⁻¹	S_c MVA	总负载 kVA	变流器负载 kVA	谐波畸变 p. u.	缺口深度 p. u.	$\Delta U/U$ p. u.
注 1: 谐波畸变、缺口深度和电压调整值($\Delta U/U$)的计算值仅考虑图 12 所示负载的影响。还应考虑其他影响中压母线的因素。 注 2: 由表中的值可见, 由于公共连接点相对稳定, 承受变流器负载没有问题。表中, 计算公共连接点处的谐波畸变和缺口深度的 3 个数值为 3 个变流器负载分别影响的结果。 注 3: 交流电抗器对于变流器 C2 的交流供电是必要的, 以避免电网 LV2 处的缺口幅值超过 B 级的最大允许值。							
^a $0.000\ 4+0.002\ 6+0.007\ 8=0.010\ 8$。 ^b $0.004\ 1+0.02+0.075=0.1$。 ^c $0.35\times6.5=2.275(I_{\text{start}}/I_N=6.5)$。							

6 试验要求

6.1 由短路试验估算功率损耗

6.1.1 单相联结

功率损耗由直接测量额定负载下的输入和输出功率确定, 或通过分别测量各种损耗进行计算。由供应商选择。

6.1.2 多相双拍联结

短路功率损耗可采用方法 A1、方法 B 或方法 C 测量(见 6.3)。

6.1.3 多相单拍联结

短路功率损耗可采用方法 A2(方法 A1 的改进)、方法 B、方法 C、方法 D 和方法 E 测量(见 6.3)。

6.2 采用短路法估算功率损耗的步骤

将堆或组件的直流端子短接, 其交流端子通过足够大的电抗器供电, 以使输入电流几乎为正弦波, 供电电压应在额定频率下足以产生期望幅值的电流流动。输入功率在堆或组件的交流端子上测量。使用的瓦特表不应因运行条件(如: 电压降低、杂散磁场等)影响测量结果。

在额定直流电流 I_{dN} 和 k 倍电流 kI_{dN} 下接连进行两次短路试验。其中, 有式(61):

$$k = FF_s / FF_T \dots\dots\dots (61)$$

式中:

FF_s ——实际运行时, 臂电流的波形因数(不考虑重叠角);

FF_T ——试验时, 臂电流的波形因数。

首先, 在 kI_{dN} 下, 达到恒定温度后测量损耗 P_2 。然后, 尽可能快地将电流减小至 I_{dN} , 测量损耗 P_1 。

对应于正常运行时的额定直流电流的损耗 P 可由式(62)计算:

$$P = \frac{k+1}{k} \times P_2 - kP_1 \dots\dots\dots (62)$$

适用时, 如果直流短路联结和分流器的损耗可观, 应进行测量并从 P_1 和 P_2 中扣除。

这样估算的损耗为在忽略重叠角情况下期望的损耗。

试验方法在下述假设条件下有效(也见 GB/T 3859.1—2013 中 7.4.1.1)：

- a) 阀的正向电压降能用一个恒定分量(门槛电压)加上一个直接与电流成正比的电阻性分量表示；
- b) 由于电流波形的差异引起的，在正常运行情况下和试验时的杂散损耗的不同，可由方均根值较大的试验电流补偿；
- c) 变流器直流侧电路的电感忽略不计。

注：双拍联结时，直流电路的电感能通过续流使直流输出电流大于对应的交流电流。

根据使用的联结不同，按 6.3.1～6.3.6 试验。均压电阻器、阻尼电路和浪涌抑制器(如有)工作时的损耗也应计算并计入。对于晶闸管变流器，控制角宜设定为可能的最小值。

6.3 试验方法

6.3.1 方法 A1

本方法适用于双拍联结，试验线路如图 13 所示。本方法在 $1.1I_{dN}$ 和 I_{dN} 两种电流下测量。组件在额定直流电流下工作时的功率损耗由式(63)计算(见注)：

$$P = 1.91P_2 - 1.1P_1 \tag{63}$$

式(63)实际上假设试验时的波形为正弦波。

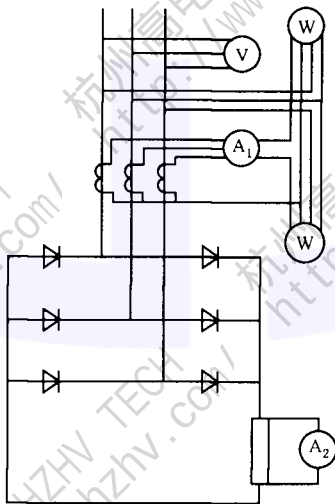
如果不是正弦波电流，与 I_{dN} 、 P_1 和 P_2 相乘的系数按 6.2 给出的方法确定。

当试验设备不能将电流调节到上述规定的准确值时，可在稍高于或稍低于规定的电流值下测量，然后对这些测得的瓦特表读数使用内插法得到输入的有功功率。

注：实际运行时，臂电流的波形因数(不考虑重叠角)为 $\sqrt{3} = 1.732$ 。

正弦半波(如同试验时)的波形因数为 $(\pi/2) = 1.57$ 。

波形因数的比值 $k = 2\sqrt{3}/\pi$ 。因此，6.2 中的公式中的因数使用给出的数值。



说明：

- A₁——显示方均根值的交流电流表；
- A₂——显示平均值的直流电流表；
- V——显示方均根值的交流电压表；
- W——瓦特表。

图 13 试验方法 A1 的简图

GB/T 3859.2—2013

6.3.2 方法 B

本方法适用于单拍和双拍联结。

当包括变压器在内的整个变流器由同一制造商供货时,如果方便只测量变流器总损耗,可采用类似于 A1 的测量方法,但瓦特表应连接至变压器的网侧。

变压器应达到对应于 P 时的稳态温度,其铜损耗应折算到基准温度(具有规定的温升再加 20 K)。

采用方法 B 进行的测量可作为确定变压器的温升的一部分。

6.3.3 方法 C

本方法适用于单拍和双拍联结。

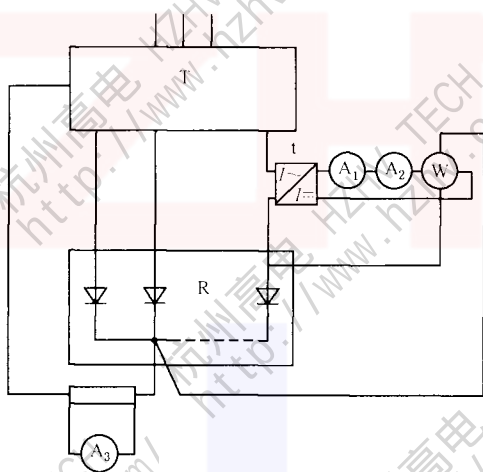
可使用经过校验的试验变压器代替方法 B 中特定的整流变压器。整流组件的损耗等于从总损耗 P 中减去试验变压器损耗之后的值。

当要求单独的损耗时,可校验实际的变压器并作为试验变压器使用。

6.3.4 方法 D

本方法适用于单拍联结

本试验按图 11 所示电路,采用短路试验的方法进行。



说明:

A 显示方均根值的交流电流表;

A₁ 显示平均值的直流电流表;

A₂ 显示平均值的直流电流表;

R 有 n 个臂(图中只给出第 1、2 和最后一个臂)的受试整流堆或组件;

T 整流变压器,合同涉及或等效试验的变压器;

t 带宽足够的直流电流互感器;

W 低压瓦特表(电流线圈的电阻小于 $r/1000$)。

图 14 试验方法 D 的简图

应校验安培表 A₁ 和 A₂ 读数之间的关系,以检查整流臂电流的测量结果。

注:当整流器的电流额定值足够小时,互感器 t 可省去不用,直接连接 A₁、A₂ 和 W 测量整流臂的电流。

在臂电流为 $I_a = I_{aN}/n$ 和 $I_s = kI_{aN}/n$ 下进行测量。其中:

- n —— 堆或组件中的整流臂的数量；
- I_1 —— 电流表 A_1 显示的方均根值；
- I_2 —— 电流表 A_2 显示的平均值；
- k —— 系数。对 120° 导电角的多相电路, $k=\sqrt{3} \cdot FF_1$ ；对 60° 导电角的多相电路, $k=\sqrt{6} \cdot FF_1$ ；
- FF_1 —— 在 $I_2=I_{A2}/n$ 下试验时, 臂电流的波形因数, $FF_1=I_1/I_2$, I_1 和 I_2 由安培表 A_1 和 A_2 测得。

如果以 P_1 和 P_2 分别表示当臂的平均电流为 $I_1=I_{A1}/n$ 和 $I_2=kI_{A2}/n$ 时瓦特表的读数, 整流堆或组件在额定直流电流 I_{A2} 下的损耗由式(64)计算:

$$P=n \cdot a^2 \cdot \left(\frac{k-1}{k} \cdot P_1 + kP_2 \right) \dots\dots\dots (64)$$

式中:

- a —— 互感器 t 的变比；
- P_1 —— 瓦特表 W 显示的功率。

如果供应商保证整流堆或组件的臂基本一致, 那么, 只在两个臂上试验就可认为足够, 取二者损耗的平均值。其中, 一个臂靠近组件的中间位置, 另一个靠近外侧。而且, 选择的两个臂不宜相差 180° 电角度, 也不宜位于平衡电抗器(如有)的同一侧。

如果组件的所有其他损耗未真正包含在损耗测量中, 均应单独测量和计算并计入总功率损耗 P 中。

如果试验设备不能将电流调节到上述规定的准确数值, 可在稍高于和稍低于规定的上述电流值下测量, 然后对这些测得的值使用内插法得到在规定电流下输入的有功功率。

注: 对于大电流组件, 采用方法 D(图 11)和方法 A2(见 6.3.6)测量臂的损耗时, 应将瓦特表的直流电压接线柱连接至臂和通路(直流汇流排)之间的连接处。瓦特表仅用于测量臂的损耗。通路的损耗单独测量, 或由计算得出。令人满意的方法是, 在额定电流下进行短路试验时, 沿通路的各段测量平均压降(使用毫伏表), 通路各段实际运行时的损耗由式(65)计算:

$$P=U \cdot I \cdot (FF_2) \dots\dots\dots (65)$$

式中:

- U —— 段的电压降(平均值);
- I —— 段的电流(平均值);
- FF_2 —— 段中的实际运行电流的波形因数

6.3.5 方法 E

本方法适用于单拍联结。

如果一个整流组件能与另一个等价的组件构成双拍联结, 损耗测量可按 6.3.1 中的方法 A1 进行。

当连接两个整流组件构成一个双拍联结时, 应避免使大电流母线排联结(通路)中的损耗发生显著变化。

6.3.6 方法 A2

本方法适用于单拍联结。

方法 A2 与方法 A1 基本相同, 把直流电流互感器连接至单拍联结的一个换相组的汇流排上进行测量, 如方法 D 的图 14 所示。

交流和直流安培表的使用同方法 D。

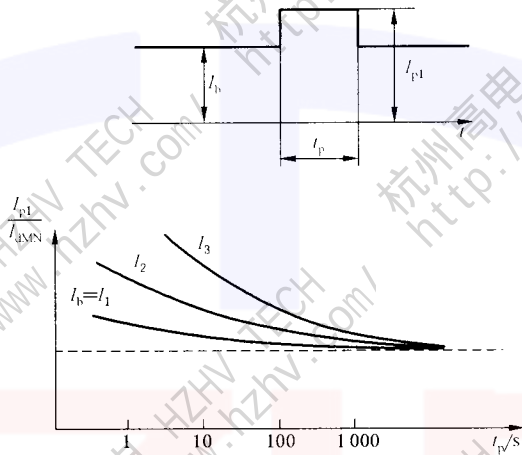
测量可在各单个换相组上依次进行, 然后相加。采用本方法进行试验时, 应调节热转移媒质的温度与正常运行时的温度基本相同。

7 变流器的负载电流和结温计算

7.1 高峰负载额定电流值的说明

允许的高峰负载的全部信息宜以电流的幅值、持续时间和重复频率或不导通时间给出 (GB/T 3859.1—2013 中 6.4.3 基于此)。

在 GB/T 3859.1—2013 中表 12 没有适合的标准工作制等级的情况下,有许多可用的描述高峰负载信息的方法特性。图 15 和图 16 可用作说明表征单个高峰负载和重复高峰负载特性的基本方法。



说明: $I_{dMN} > I_1 > I_2 > I_3$ 。 I_{dMN} 为额定连续直流电流。 I_1 、 I_2 和 I_3 为基本负载电流 I_b 的不同的值。

图 15 单个高峰负载

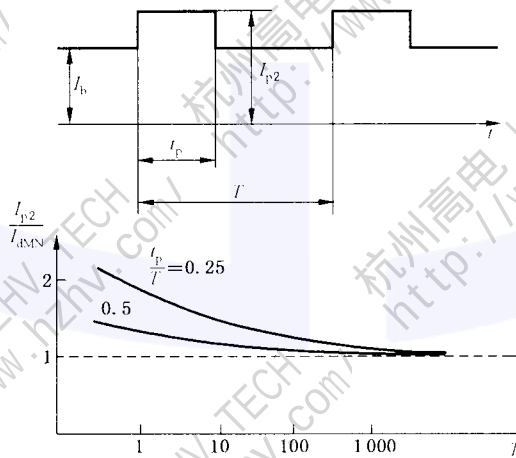


图 16 重复高峰负载

当基本负载电流 I_b 小于 I_{dMN} 时,幅值为 I_{p1} 的高峰负载可叠加的时间为 t_p ,但是具有足够长的时间间隔以保证在每一次高峰负载前达到平衡温度。

其值为 I_{p2} 的重复高峰负载可叠加的时间为 t_p ,时间间隔为 T 。值得说明的是,示例中给出的重复负载图形仅对基本负载 I_b 的一种单一值适用。

无论采用何种形式,均应规定冷却条件。

7.2 与有效结温有关的文字符号

表 18 给出与有效结温有关的文字符号。

表 18 与有效结温有关的文字符号

文字符号	含 义
T_j	有效结温(见 3.3.3)
$T_{j,avg}$	有效结温在电源频率一个周期内的平均值
$T_{j,avg}(t)$	t 瞬间的 $T_{j,avg}$
ΔT_j	有效结温的最高瞬时值与 $T_{j,avg}$ 之差
$T_{j,max}$	有效结温的最高瞬时值
T_x	在规定的外部基准点 x 处的温度。例如,变流器的环境温度
P_{avg}	通态或正向功率损耗在电源频率一个周期内的平均值
$\hat{P}$	通态或正向功率损耗的最大瞬时值
$\hat{P}_{avg}$	P_{avg} 的最大瞬时值
P_M	$\hat{P}_{avg}$ 在负载循环一个周期内的平均值
ΔP_j	功率损耗在 t 瞬间的突变
k	功率损耗在 t 瞬间之前的突变次数
t_1	变流联结中一个臂的等效导通周期
t_p	高峰负载脉冲的等效脉冲宽度
f_{1N}	额定电源频率
T	负载循环的一个周期
T_{1N}	对应于电源频率的一个周期
R_{th}	热阻(见 3.3.1)
R_T	对应于时间间隔 T 的热阻
Z_{th}	瞬态热阻抗(见 3.3.2)
Z_{tr}	对应于时间间隔($t_r - t_i$)的瞬态热阻抗
Z_{ti}	对应于时间间隔 t_i 的瞬态热阻抗
Z_T	对应于时间间隔 T 的瞬态热阻抗
Z_{tr-T}	对应于时间间隔($t_r - T$)的瞬态热阻抗
Z_{tr}	对应于时间间隔 t_r 的瞬态热阻抗

7.3 通过有效结温计算确定承受高峰负载的能力

7.3.1 概述

有效结温的计算是确定二极管或晶闸管堆或组件承受高峰负载能力的基础,但是,通常情况下,该

GB/T 3859.2—2013

温度不是评定高峰负载能力的惟一的量。

由于工作周期的复杂性,对于许多应用尤其是对于重复负载工作制、复杂的等效传热路径或温升和损耗间的非线性关系,计算有效结温时使用计算机程序经常是方便的。

有效结温计算方法在 7.3.3~7.3.6 给出。

有效结温计算方法在下述假设条件下有效:

- a) 待计算的有效结温仅取决于考虑的半导体器件的功率损耗。
换句话说,各半导体器件有其自身的到冷却媒质的传热路径,与堆或组件的其他功率耗散元件的传热路径实际无关或等效无关。
注 1: 这不适用于四象限变流组件。在该类组件中,属于正向和反向分组的半导体器件共用相同的散热体。
- b) 在有效结和基准点之间的热阻和瞬态热阻抗与温度无关,温升和功率损耗之间是线性关系;
注 2: 这种情况在对流冷却时通常达不到。
- c) 半导体的功率损耗主要是导电损耗,开通、关断和与电压相关的损耗。尤其是在自换相变流器或大电流的电网换相变流器中,这种与电压相关的损耗可能必须考虑。

7.3.2 施加在半导体器件上的功率脉冲波形的近似

选择矩形波脉冲等效功率损耗具有:

与实际功率脉冲的峰值相同(见图 17a);

脉冲持续时间调整至给出与实际功率脉冲相同的平均值(见图 17b)。

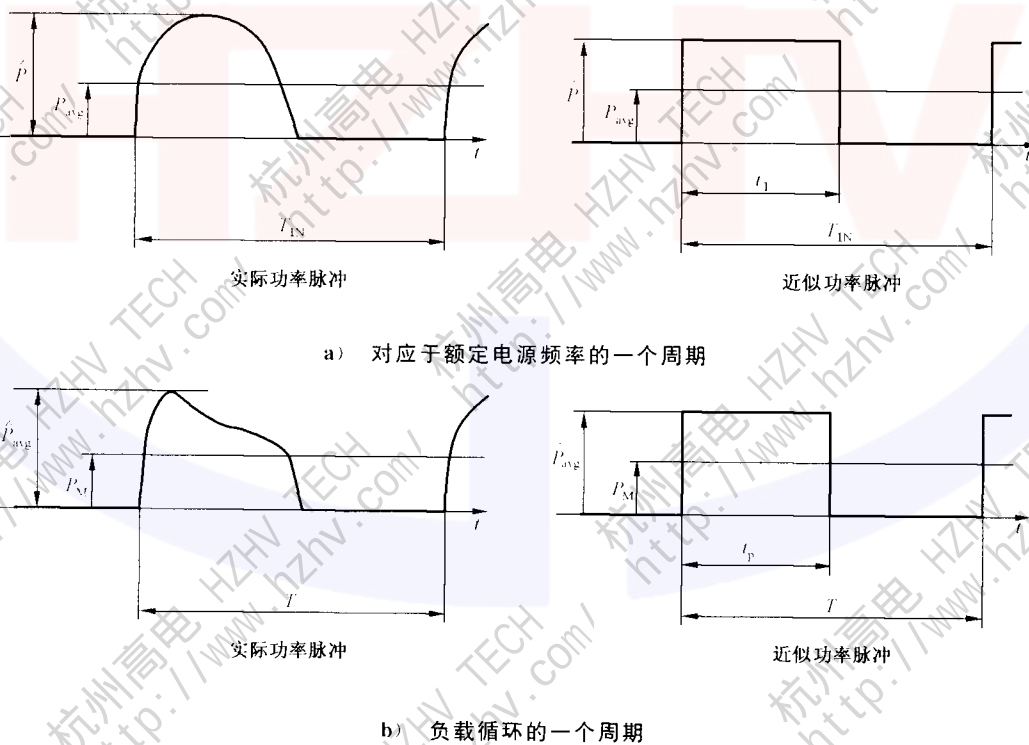


图 17 功率脉冲波形的近似

这种功率脉冲波形的近似方法适用于:

- a) 在电源频率的一个周期内,即等于一个变流器电路单元的导电周期。有式(66):

$$t_1 = \frac{P_{avg}}{P} \times T_{IN} \dots\dots\dots (66)$$

- b) 变流器负载是周期性的,周期可达数分钟。有式(67):

$$t_p = \frac{P_M}{P_{avg}} \times T \tag{67}$$

在某些情况下,尤其是脉冲持续时间长于1 s 和实际的功率损耗波形与矩形波相差较大时,可能要采用若干个不同幅值和持续时间的矩形波构成近似的功率脉冲,以得到更准确的结果。推荐选择各脉冲具有与要代替的实际功率损耗脉冲相同的持续时间和与其截面相同的平均值。

7.3.3 温度计算的叠加法

本方法基于使用瞬态热阻抗曲线。假设功率损耗根据 7.3.2 近似的矩形脉冲表示。
在时间 t_n 两规定点 A 和 B 之间的温度差 T_n 为在 t_n 之前的全部功率跃变(ΔP_i)影响下的温度的和。由式(68)计算:

$$T_n = \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta P_i \times Z_{th}) \tag{68}$$

正的功率跃变产生正的温度影响,负的功率跃变产生负的温度影响。
本方法的示例在 7.3.6 中表 19 给出。

7.3.4 连续负载有效结温计算

7.3.4.1 概述

图 18 给出连续负载的功率损耗和有效结温的示例。在这种情况下,有效结温随交流电源电压的频率变化。
功率损耗由 7.3.2 给出的方法得到,有效结温与时间的关系曲线如图 18 所示。

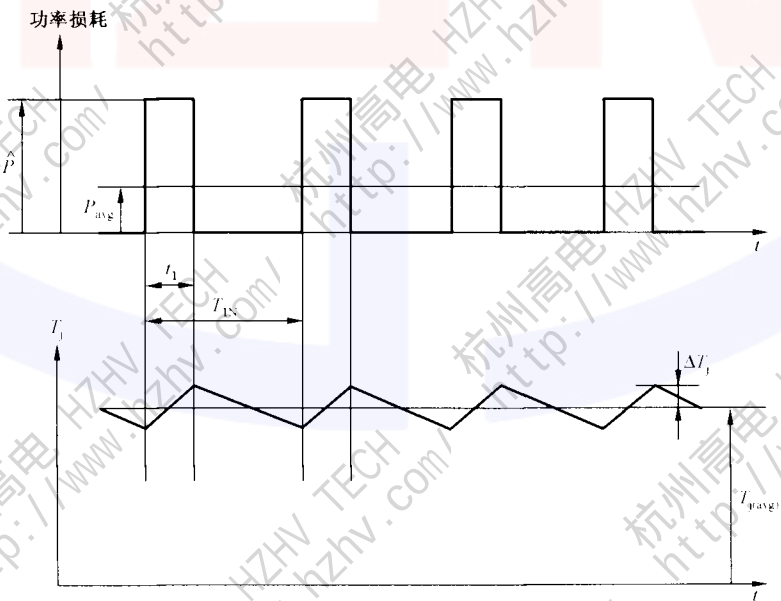


图 18 连续负载下有效结温的计算

7.3.4.2 有效结温平均值的计算

有效结温的平均值由式(69)计算:

$$T_{avg} = T_a + P_{avg} \times R_{th} \tag{69}$$

GB/T 3859.2—2013

7.3.4.3 最高瞬时有效结温的计算

在一个周期内,最高瞬时有效结温由式(70)计算:

T_j = T_{j(avgt)} + ΔT_j (70)

温度偏差 ΔT_j 的准确值可采用 7.3.3 所述的功率脉冲叠加法,由式(71)计算:

ΔT_j = $\frac{T_{1N}}{t_1} \times P_{avg} \times \left[\sum_{k=1}^{n-2} Z_{n(2k-1)} - \sum_{k=1}^{(n-2)/2} Z_{n(2k)} \right] + P_{avg} \times R_{th}$ (71)

由于 ΔT_j 通常小于 T_{j(avgt)},推荐使用式(72)近似计算:

ΔT_j = $\frac{T_{1N}}{t_1} \times P_{avg} \times \left[Z_{t1} - Z_T + \left(1 - \frac{t_1}{T} \right) \times Z_{(t1-T)} \right]$ (72)

7.3.5 周期性负载有效结温计算

图 19 给出周期性负载功率损耗和有效结温的示例。在这种情况下,有效结温不仅随交流电压频率下的时间变化(见 7.3.4),而且随负载变化决定的较低频率变化。

半导体的结在导电周期中的加热和冷却引起的温度偏差,按 7.3.4 中计算连续负载的方法计算。在负载周期的某一时间,有效结温在电源频率一个周期内的平均值按 7.3.4.2 中的方法计算。

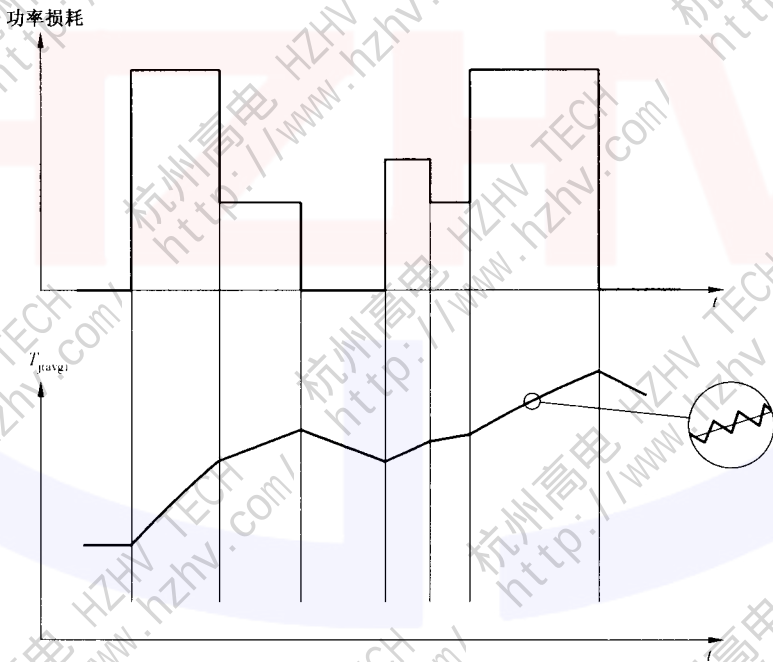


图 19 周期性负载的有效结温计算

那么,在时间 t_n,有效结温平均值由式(73)计算:

T_{j(avgt)n} = T_x + $\sum_{k=1}^{n-1} (\Delta P_k \times Z_{n_k})$ (73)

在时间 t_n,有效结温的最高瞬时值由式(74)计算:

T_j = T_{j(avgt)} + ΔT_j (74)

7.3.6 几种典型应用的有效结温计算

几种典型应用的有效结温计算见表 19。

表 19 几种典型应用的有效结温计算

负载条件	功率损耗曲线	平均有效结温曲线	计算公式
单脉冲			$T_{j,avg} = T_a + P_1 \times Z_{th}$ $T_{j,peak} = T_a + P_1 \times Z_{th} - P_1 \times Z_{th2}$
脉冲序列			$T_{j,avg} = T_a + P_1 \times Z_{th}$ $T_{j,peak1} = T_a + P_1 \times Z_{th1} - P_1 \times Z_{th2} + P_3 \times Z_{th3}$ $T_{j,peak2} = T_a + P_1 \times Z_{th1} - P_1 \times Z_{th2} + P_3 \times Z_{th3} - P_3 \times Z_{th4} + P_5 \times Z_{th5}$ $- P_5 \times Z_{th6} + P_5 \times Z_{th7}$ 依此类推
等幅值脉冲长序列			$T_{j,avg} = T_a + \sum_{i=1}^{n/2} (P_0 \times Z_{th(2i-1)}) - \sum_{i=1}^{(n/2)-2} (P_0 \times Z_{th(2i)})$ (n 为偶数) $T_{j,avg} = T_a + \sum_{i=1}^{(n+1)/2} (P_0 \times Z_{th(2i-1)}) - \sum_{i=1}^{(n+1)/2-2} (P_0 \times Z_{th(2i)})$ (n 为奇数) 或近似为: $T_{j,avg} = T_a + P_0 \times \left[Z_{th} - Z_r + \left(1 - \frac{t_r}{T}\right) \times Z_{th(rho)} + \frac{t_r}{T} \times R_{th} \right]$ (n 为偶数)

8 变流器运行

8.1 稳定性

变流器可具有内部或外部闭环控制系统,或稳定其输出量(电压、电流等)的其他闭环装置。

如果变流器具有内部闭环控制系统,该系统的基准值可以电的、机械的、或其他任何方式引入变流器。

如果变流器是外部闭环系统的一部分,引入变流器的是来自该闭环的控制信号,而变流器可被视为放大器,它是设备总控制系统的一个组成部分。

8.2 静态特性

控制系统的静态特性是指在整定值或要抵消的量的突然变化引起的瞬态过程消失后的那些特性。

如果变流器有内部稳定装置,应针对所有要抵消的影响量(例如网侧电压、交流系统条件、负载特性等)的规定变化范围确定其静态特性。规范应覆盖变流器稳定量的整定值范围。

如果变流器是外部闭环系统的一部分,静态特性应作为某些量在指定条件之下变流器输入信号与输出之间的关系给出。这些量是指那些可能影响这种关系的量,如网侧电压、交流系统条件、负载特性等。

GB/T 3859.2—2013

8.3 控制系统的动态特性

控制系统的动态特性应作为对一个阶跃变化影响量的响应时间或频率响应给出,或以供应商与订货商达成一致的任何其他适当方式给出。

动态特性宜针对主要影响输出的量的变化,尤其是整定值或控制信号的变化和负载的变化阐述。没有必要就那些对输出量只有很小影响的量的变化阐述控制系统的动态特性。

8.4 单变流器和双变流器的运行方式

8.4.1 单变流器联结

由于晶闸管只在一个方向上有通态区,在晶闸管单变流器中,不可能使电流反向。然而,在均一晶闸管联结中,直流电压能采用相控的方式反向。

图 20 给出从整流运行向逆变运行转换时,晶闸管变流器的直流电压和晶闸管联结中的一个臂上的电压的理论波形。该图基于脉波数 $p=6$ 、换相数 $q=3$ 的三相桥式联结,并假设直流电流在整个工作范围内恒定且连续。

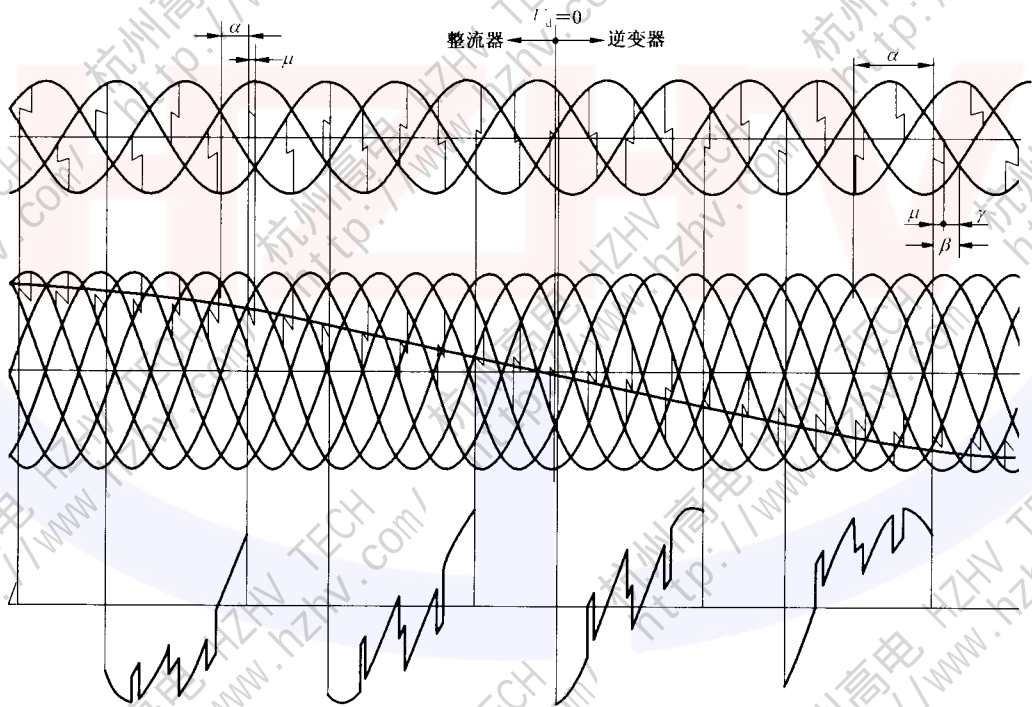


图 20 不同延迟角时的直流电压波形

图 21 给出触发延迟角 α 为 $0^\circ \sim 150^\circ$ 时的调节曲线族(例如直流电压平均值作为直流电流的函数),假设直流回路的电抗相对较小,变流器具有反电势负载。

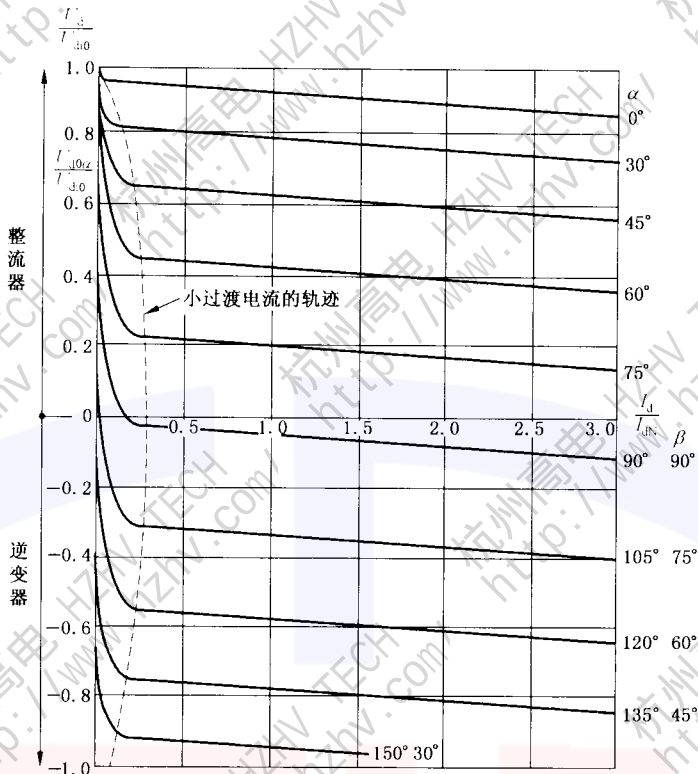


图 21 不同负载和延迟角下的直流电压

当晶闸管变流器在逆变运行时,为防止直通故障(见 3.1.5),必须限制触发延迟角。在图 20 中用熄断角 γ 表示,它取决于触发超前角 β 和重叠角 μ ,由式(75)确定:

$$\gamma = \beta - \mu \tag{75}$$

在所有情况下,必须保持熄断角大于晶闸管的关断时间。触发延迟角 α 或超前角 β 必要的限值可由式(76)计算:

$$\cos \beta = \cos \gamma - 2U_{dv} / U_{di} \tag{76}$$

式中:

U_{dv} 总电感性直流电压调整值。

8.4.2 双变流器联结和整流和逆变运行时的限制

不同控制角(其中一个为 α_1 ,另一个为 α_2)下,双变流器联结的理论调节曲线如图 22 所示。该曲线为理想条件下的曲线,假设直流回路的电感很大,以致过渡电流区域和两个变流器之间的相互影响均可忽略不计。

在图 22 中标示的换相限制线给出了逆变运行时的最大允许直流电流。在该电流下,熄断角 γ 达到临界值。对于给定的一组运行条件(直流电流、交流和直流电压等),如果触发延迟角 α 增大到超过该限制,将发生直通。

尽管单变流器整流运行区域的工作极限由 $\alpha=0^\circ$ 时的调节曲线给出,但在双变流联结中,为控制直流环流,仍有必要限制触发延迟角的最小值。

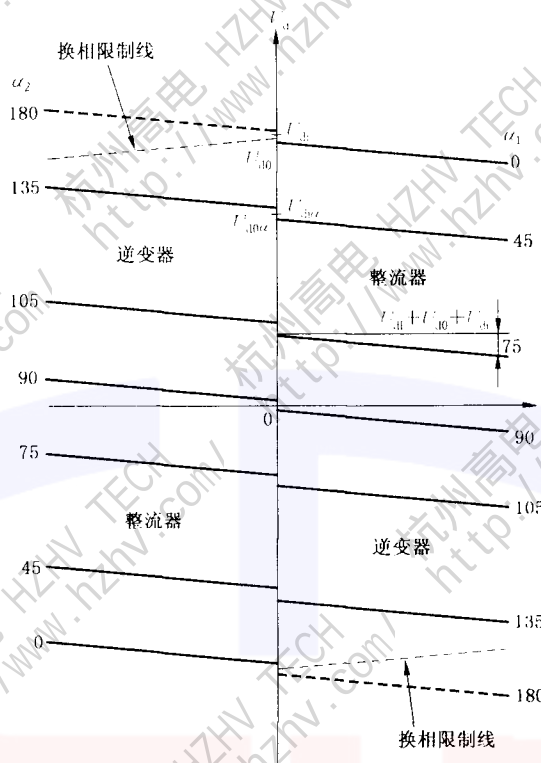


图 22 逆变运行时直流电压的限制

8.5 过渡电流

当直流电流减小到低于过渡电流值(见 GB/T 3859.1—2013 中 3.7.10)时,电压/电流特性曲线向上弯曲。这是因为当直流电压瞬时值低于负载的反电势时,直流回路的电抗不能在整个周期维持其直流电流。于是,直流电流出现间歇。

直流电流间歇情况下的直流电压和直流电流波形如图 23 所示。在此期间,直流电流为零时,直流电压瞬时值不再是图 23 中的虚线所示的理论波形,而是由负载的反电势决定。这就意味着变流器直流电压的平均值高于直流电流连续时得到的直流电压平均值。

过渡电流的值取决于直流回路的电感、负载的反电势和触发延迟角 α 的大小。在整流运行时,该值随直流回路电感的减小、负载反电势的增加以及触发延迟角 α 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的增加而增大。在逆变运行时,该值随直流回路电感的减小、负载反电势的增加以及触发延迟角的减小而增大(见图 23)。

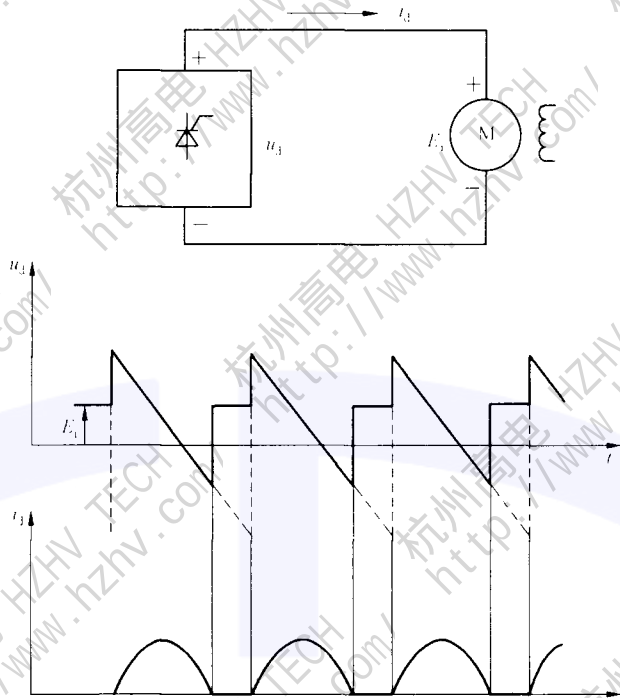


图 23 直流电流低于过渡电流值时的直流电压

8.6 双变流器联结中直流环流的抑制

8.6.1 概述

在双变流器联结中,为使其安全运行,有必要采取限制直流环流的措施。最广泛使用的有如下三种方法(见 8.6.2~8.6.4)

8.6.2 限制触发延迟角

控制两个变流器的触发延迟角,使逆变运行的变流器的理想直流电压始终高于另一整流运行的变流器的直流电压。由于逆变方式运行时存在换相限制线(见图 22),为了在整个运行范围内满足此要求,通常还有必要限制触发延迟角的最小值。

8.6.3 控制环流

控制两个变流器的触发延迟角,使直流环流值自动控制为显著小于额定直流电流的值。但是,为了避免出现直流电流间歇,最好将环流值控制在略大于最大过渡电流。

8.6.4 封锁触发脉冲

当一个变流器运行时,封锁另一个变流器所有晶闸管的触发脉冲,或反之。这样,任何时间只有一个变流器能运行,两个变流器之间不会出现环流。

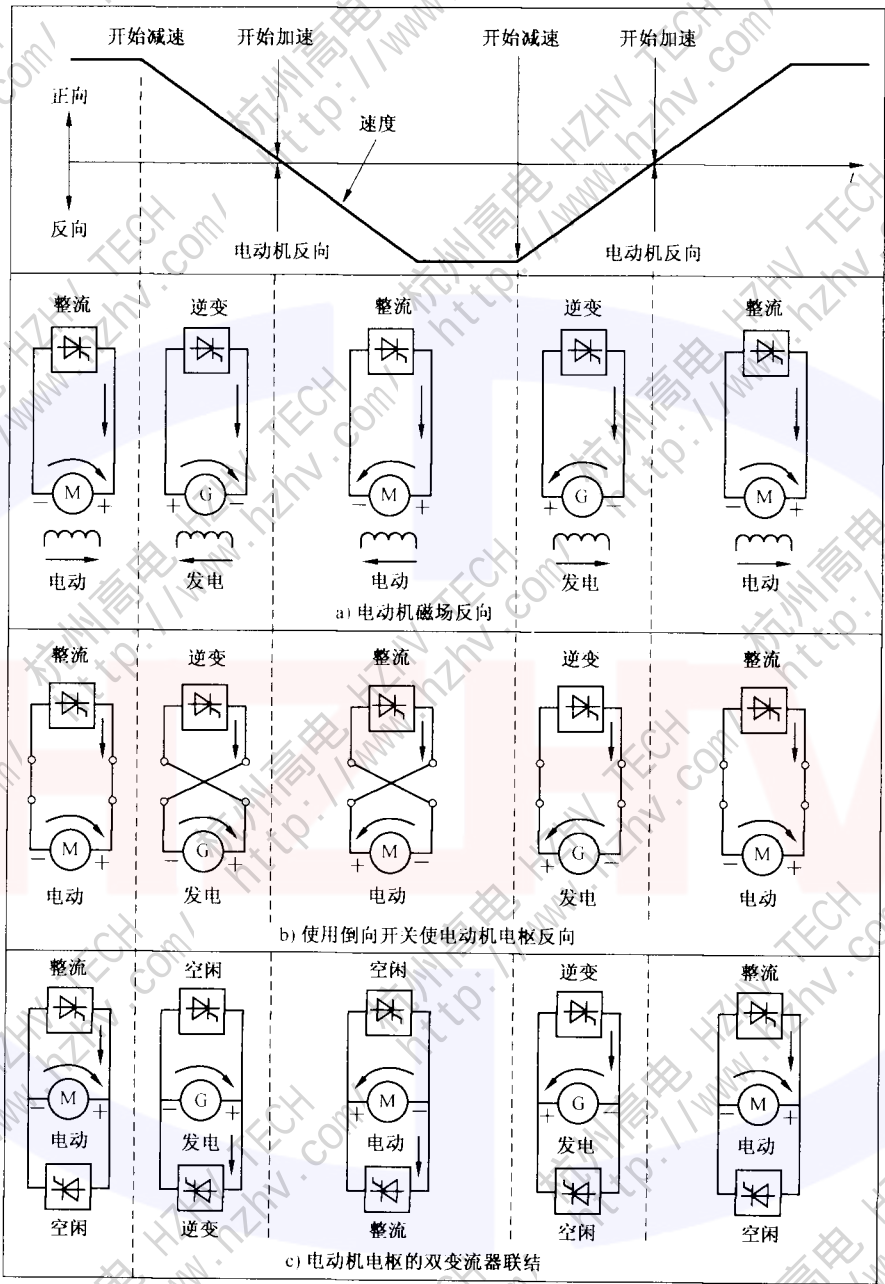
8.7 直流电动机控制用可逆变流器的工作原理

8.7.1 概述

图 21 给出可逆变流器供电的直流电动机传动的几种电路的运行顺序。图的最上方是作为时间函

GB/T 3859.2—2013

数的电动机速度,在其下面表示的是变流器作为整流器和作为逆变器运行的情况。基本变流电路的运行以简化方式给出。



8.7.2 电动机磁场反向

为使电动机停转,然后反向加速,通过相控使电流减小到零,磁场电流反向,逆变运行时要求的制动电流由相控调节。接着发生的反方向从制动到加速的转换能通过进一步将相控前移,由逆变平稳转换到整流运行实现[见图 24a)]。

8.7.3 使用倒向开关使电动机电枢反向

这种情况的运行顺序类似于 8.7.2,只是使用倒向开关代替磁场反向使电枢电流反向[见图 24b)]。

8.7.4 电动机电枢的双变流器联结

电动机电枢连接至极性相反的两个并联变流器。每个方向的电动机电枢电流总是由一个适合承载该电流的变流器供电[见图 21c)]。

9 变流器故障处理

9.1 概述

应充分重视供应商提供的说明手册和故障查询图表。

掌握设备的工作原理也很重要。

静止式设备预期在现场长期运行而不发生故障,此后,维护人员丰富他们查找故障的经验的机会很少。

发生故障时的情况的观察很有帮助,例如负载情况、系统的任何变化或骚扰、对设备或附近的其他设备的改变。在这些变化中某些能影响设备运行的方式在前述的示例中已经标明(见第 4 章~第 6 章)。

保护和监测设备的指示也能在故障探测的逻辑逼近和故障原因的确定方面给出有价值的帮助。

9.2 故障检测

从根本上来说,所有故障检测不仅要找出故障的位置,而且要确定故障的原因并得到证实。换相失败就是故障定位困难的示例。

故障可由多种原因引起,如:

- 位置不正确的触发脉冲;
- 半导体器件参数变化(永久性或暂时性的失效,使用专用检测仪表可能从中得益);
- 逆变期间超过 d.c. a.c. 电压比;
- 由于半导体器件或电路的缺陷,器件的关断时间不足。

其他故障可能需要类似的仔细考虑。

对运行场所条件和任何其他外部情况的了解(如 9.1 所述),对于阐述上述示例和类似故障的原因是大有帮助的。

9.3 故障电流保护

在如下故障情况下,变流器可能遭受过电流:

- 直流端子短路;
- 直通,尤其是与直流电源一起逆变运行;
- 阀器件击穿;
- 双变流器的误开通。

应借助改善触发延迟角、阻断阀器件、使用熔断器和或保护装置等方法 and 措施保护变流器。如果短路经由变流器的直流电抗器发生,过电流能得到控制。使用熔断器保护参见 GB/T 17950。

故障电流的值和波形取决于交流供电电源的电压和阻抗、发生故障时的触发延迟角等原因。计算机仿真技术的进步使得容易进行故障电流计算。

附录 A

(资料性附录)

几种过电压保护措施

A.1 避雷器

避雷器(图 8 中的 A)的主要作用是,发生暂态过电压时,保护变流变压器绕组的绝缘不受损伤,其性能和技术参数是按变流变压器的技术要求设计。在电力变流系统和设备中,往往当网侧电压为 10 kV 及以上时才设置避雷器。

变压器绕组的绝缘耐压强度远远高于变流器的耐冲击电压强度,或说变压器承受过电压的能力尤其是承受瞬态过电压的能力远远高于变流器,所以避雷器保护变流器的作用有限。这主要是因为变压器的绝缘强度取决于使用的绝缘材料类型和尺寸,而变流器主要取决于使用的电力半导体器件的阻断电压等级。因此,在设计暂态过电压保护时,应针对变流器采取专门的保护措施,选择电子式避雷器(例如使用半导体器件的电涌保护器)的参数时尤其应注意。

A.2 变压器静电屏蔽和静电感应抑制电容器

使用变压器静电屏蔽和静电感应抑制电容器(图 8 中的 B 和 C)是为了当出现过电压(主要是变压器网侧开关装置动作引起的操作过电压)时,消除分布参数引起的静电感应过电压在变压器网侧和阀侧的相互影响。这种措施主要用于防护静电感应操作过电压,不能有效防护暂态过电压。

A.3 RC 阻尼电路

RC 阻尼电路(图 8 中的 D、E 和 G)是使用最普遍的过电压保护措施,在大多数情况下,能有效保护电力变流系统和设备免受换相过电压和各种操作过电压的损伤。

应注意参数选择与系统联结形式和过电压类型的匹配。例如,防护电力半导体器件换相和开关过程引起的重复性过电压与防护网侧、阀侧和直流侧的各种非重复性操作过电压的 RC 计算和取值有很大不同。而且,在大型设备中,过电压的峰值可能较高,持续时间可能较长,尤其是当系统存在谐波时。

A.4 金属氧化物压敏电阻器(MOV)

A.4.1 概述

金属氧化物压敏电阻器(MOV)是一种以金属氧化物(例如氧化锌)为主要材料制成的非线性器件,具有陡峭的非线性伏安特性(非线性系数为 25~50),可有效抑制各种瞬态过电压。

注:在不同领域,“压敏电阻器”一词可能有不同的概念和定义。就本部分而言,“压敏电阻器”的含义相当于避雷器专业的电压限制型电涌保护器,也可理解为是压敏电阻型电涌保护器的简称。参见 GB/T 2900.12。

A.4.2 分类

电力变流设备过电压保护用 MOV 可分为高压型和高能型两类。二者的配方和制造工艺不同(即 $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3$ 族系和 $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 族系)。

在导电面积、动作电压和使用寿命相同的情况下,两类 MOV 的伏安特性曲线和脉冲降额曲线分别

如图 A.1 和图 A.2 所示。从图 A.1 和图 A.2 可看出,在限制过电压能力(幅值)方面,高压型 MOV 优于高能型 MOV;在允许的导通(电流)时间方面,高能型 MOV 优于高压型 MOV。也就是说,高压型 MOV 比较适用于放电电流峰值较大而放电持续时间较短的情况,例如暂态过电压的防护,而高能型 MOV 适用于放电电流初始值较低而持续时间较长的情况,例如操作过电压,尤其是大电感负载时的过电压防护。

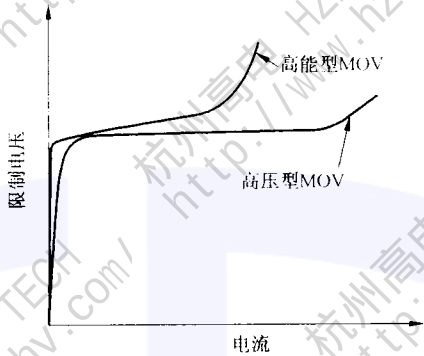


图 A.1 高压型和高能型 MOV 的伏安特性

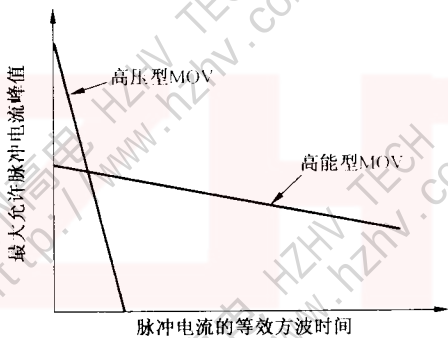


图 A.2 高压型和高能型 MOV 的脉冲降额曲线

A.4.3 选型

A.4.3.1 动作电压的确定

动作电压也称为压敏电压、导通电压、直流参考电压。外加电压超过该值时,MOV 从高阻抗状态转换为低阻抗状态(即 MOV 动作)。动作电压主要与 MOV 的荷电率[根据 GB/T 2900.12—2008,定义 3.25,MOV 的荷电率定义为其最大持续运行电压(峰值)与其参考电压(峰值)之比]和持续承受的最高电压有关,不仅涉及保护的有效性,而且涉及其自身的老化蜕变速度,也就是说涉及其使用寿命和可靠性。动作电压可由式(A.1)计算:

$$U_{dz} \geq U_{rms} S_m \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- U_{dz} — MOV 的动作电压;
- U_{rms} — 正常运行时,MOV 两端持续承受的最高电压;
- S_m — 最大荷电率。最大荷电率取值示例:对防护暂态过电压的高压型 MOV,其两端持续承受的主要为交流电压时,推荐取 0.97;主要为直流电压时,推荐取 0.84。对防护操作过电压的高能型 MOV,其两端持续承受的主要为交流电压时,推荐取 0.85;主要为直流电压时,推荐取 0.75。

在确定动作电压值时,应考虑系统电压上叠加有重复瞬态电压或纹波电压(对于直流系统)的影响,保证其总的功率损耗不超过 MOV 的额定功率。当由计算得到的持续电压与重复瞬态电压(或纹波电压)产生的损耗之和超过 MOV 的额定功率时,可采用阻尼吸收措施,将重复瞬态电压或纹波电压限制在允许的范围内,否则,应适当提高由公式计算的动作电压值,以免影响 MOV 的性能和使用寿命。

A.4.3.2 残压的影响

当过电压超过 MOV 的动作电压时,MOV 导通后流过放电电流(冲击电流)时两端的电压峰值称为残压(GB/T 2900.12—2008,定义 2.13,也称为限制电压)。不同类型、不同用途、不同材料配方和不同工艺的 MOV,即使在相同的动作电压下动作且动作后流过的放电电流相同,其残压值也可能有很大差异。在选型时,应确定动作后流过的最大放电电流,根据制造商提供的伏安特性曲线,核实选用的 MOV 在该电流下和使用寿命期内的残压低于被保护对象的额定电压。

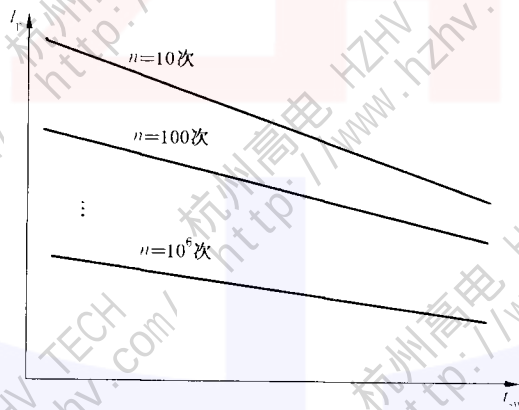
对于电力变流系统和设备内使用两种类型的 MOV 同时防护操作过电压和暂态过电压的情况,应注意匹配二者的参数,避免高能型 MOV 的正常动作引起高压型 MOV 误动作。

A.4.3.3 使用寿命和可靠性

MOV 的特性参数对电、热应力引起的老化十分敏感。为保证在设备使用寿命期内不因 MOV 老化蜕变导致保护失效,使用寿命和可靠性评估十分必要。

一般来说,MOV 导通后流过的放电电流(冲击电流)对其老化蜕变的影响是主要的、决定性的。因此,一般采用放电电流的等效脉冲降额曲线评估 MOV 的使用寿命和可靠性。

等效脉冲降额曲线表示不引起失效,可重复施加规定波形的冲击电流脉冲幅值 I_p 与脉冲宽度 t_w (一般采用等效矩形波宽度)和导通放电次数 n 的关系。图 A.3 给出了不同脉冲次数下的典型曲线族。



说明:

n 预期放电次数(次数可为 10^1 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5 、 10^6);

I_p 最大允许脉冲电流峰值;

t_w 单个脉冲的等效时间,即等效矩形波脉冲宽度,等于该脉冲对时间的积分除以 I_p 。

图 A.3 MOV 等效脉冲降额曲线示意图(双对数坐标)

对于电力变流设备,暂态过电压与一般电力系统并无本质上的差别,其预期放电次数、最大脉冲电流峰值和等效矩形波宽度的确定可参见 GB/T 19271.1;操作过电压的预期放电次数、最大脉冲电流峰值和等效矩形波宽度的确定与电力变流设备容量、电路拓扑、运行环境(例如电网条件)等因素有关,

应根据运行经验和统计数据确定。

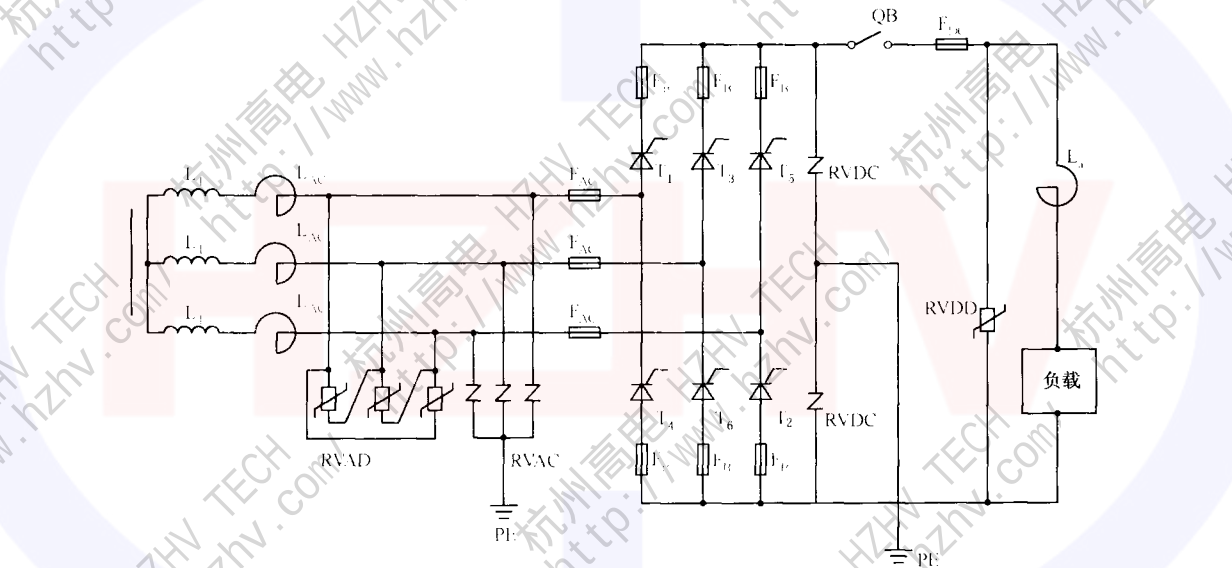
为使防护过电压的 MOV 在其整个使用寿命期内有效、可靠,应保证过电压引起的所有放电次数不超过等效脉冲降额曲线上对应放电电流峰值和等效矩形波宽度的预期放电次数 n 。

MOV 的放电电流峰值和等效矩形波宽度的确定,可能需要通过电路仿真和计算。由此得到的该电流峰值和等效矩形波宽度对应的动作位置,也不应超过等效脉冲降额曲线族上相应预期放电次数 n 的曲线。

A. 4. 4 连接

过电压保护用 MOV 的连接位置应尽可能靠近过电压源,连接线应尽可能短。
防护暂态过电压保护的高压型 MOV 通常连接在雷电波的侵入点与大地之间。由于雷击过电压可能出现在设备的输入电源侧,也可能出现在负载侧,因此,它可能连接在电源侧,也可能连接在负载侧,或在两侧同时使用。
防护操作过电压的 MOV 通常连接在设备中易出现操作过电压的位置,例如连接在变流变压器阀侧的相间,以防护断开空载变压器引起的过电压;连接在电感性负载或半导体器件两端,以防护切断感性电流产生的过电压。

图 A. 1 为 MOV 的连接位置示例。



- 说明:
- F_{Ac} 阀侧快速熔断器;
 - F_{Ar} 阀臂快速熔断器;
 - F_{Dr} 直流侧快速熔断器;
 - L_{Ac} 进线电抗器;
 - L_{Ad} 直流侧电抗器;
 - L_{Ar} 变压器阀侧绕组;
 - PE 保护性接地;
 - QB 直流快速开关;
 - RVAC 阀侧暂态过电压保护用 MOV;
 - RVAD 阀侧操作过电压保护用 MOV;
 - RVDC 直流侧暂态过电压保护用 MOV;
 - RVDI 直流侧操作过电压保护用 MOV;
 - $T_1 \sim T_6$ 被保护半导体器件。

图 A. 4 MOV 连接位置示例

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
半 导 体 变 流 器
通用要求和电网换相变流器
第 1-2 部分：应用导则

GB/T 3859.2-2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室：(010)64275323 发行中心：(010)51780235
读者服务部：(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

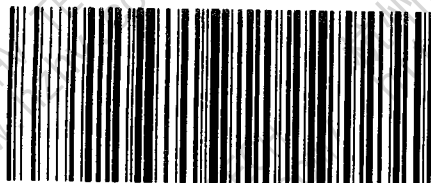
*

开本 880×1230 1/16 印张 4.75 字数 132 千字
2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月第一次印刷

*

书号：155066·1-47517 定价 63.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话：(010)68510107



GB/T 3859.2-2013