

中华人民共和国国家标准

半导体变流器 应用导则

GB/T 3859.2—93

代替 GB 3859-83

Semiconductor convertors
Application guide

本标准等效采用 IEC 146-1-2(1991)《半导体变流器:一般要求和电网换相变流器 第2部分:应用导则》。

1 主题内容与适用范围

1.1 主题内容

本标准给出的是关于变流器应用方面的资料,包括计算方法和有关性能的进一步说明。

1.2 适用范围

本标准主要涉及电网换相变流器,所叙述的内容及计算方法均以电网换相变流器为基础。但是某些章节(例如等效结温计算、安全运行方面的资料等)亦可用于其他变流器。

本标准是 GB/T 3859.1 的延伸和补充。其内容主要是对变流器的技术条件、性能及其变化作出说明,并给出相关背景材料及计算方法,为变流器和 GB/T 3859.1 的应用提供方便。

2 引用标准

- GB/T 3859.1 半导体电力变流器 基本要求的规定
- GB/T 3859.3 半导体电力变流器 变压器和电抗器
- GB 10236 半导体变流器与电网互相干扰及其防护方法导则
- GB/T 2900.33 电工术语 电力电子技术
- GB 4208 外壳防护等级的分类

3 术语及定义

这里给出的是本标准中使用的术语及定义。有关变流器和电力电子技术方面的其它术语可参见 GB/T 3859.1 和 GB/T 2900.33。某些术语在其他情况下可能有更广泛的含意,在此只反映本标准使用时特定的含义。

3.1 关于变流器故障的术语

3.1.1 直通 conduction through

变流器运行时,晶闸管联结的一个臂在正常导电周期之末,未能实现正向阻断,而使晶闸管在断态期间继续流过直流电流(见图 1a))。

3.1.2 开通故障 conduction failure

变流器联结的一个臂未能在正常导电期间实现导通,或未能在正确的时刻开通(见图 1c))。

注:由于变流器延迟角的微小变化而产生的轻微不对称度,不认为是开通故障。

3.1.3 穿通 break through

在正常的断态期间,变流器的一个臂丧失正向阻断能力,致使在该期间部分时间有通态电流通过

(见图 1b))。

注：穿通既可在整流运行时发生，也可在逆变运行时发生，并且可由各种原因引起，例如结温过高，高于额定断态峰值的电压浪涌、以及过高的断态电压上升率或不应有的门极电流。

3.1.4 击穿 break down

使半导体器件永久丧失其正向阻断电压或反向阻断电压特性的故障(正向击穿或反向击穿)。

3.1.5 误通 false firing

阀或臂在不正确的时刻开通。

3.1.6 换相失败 commutation failure

电流未能由晶闸管联结的导通臂转换到相继臂。

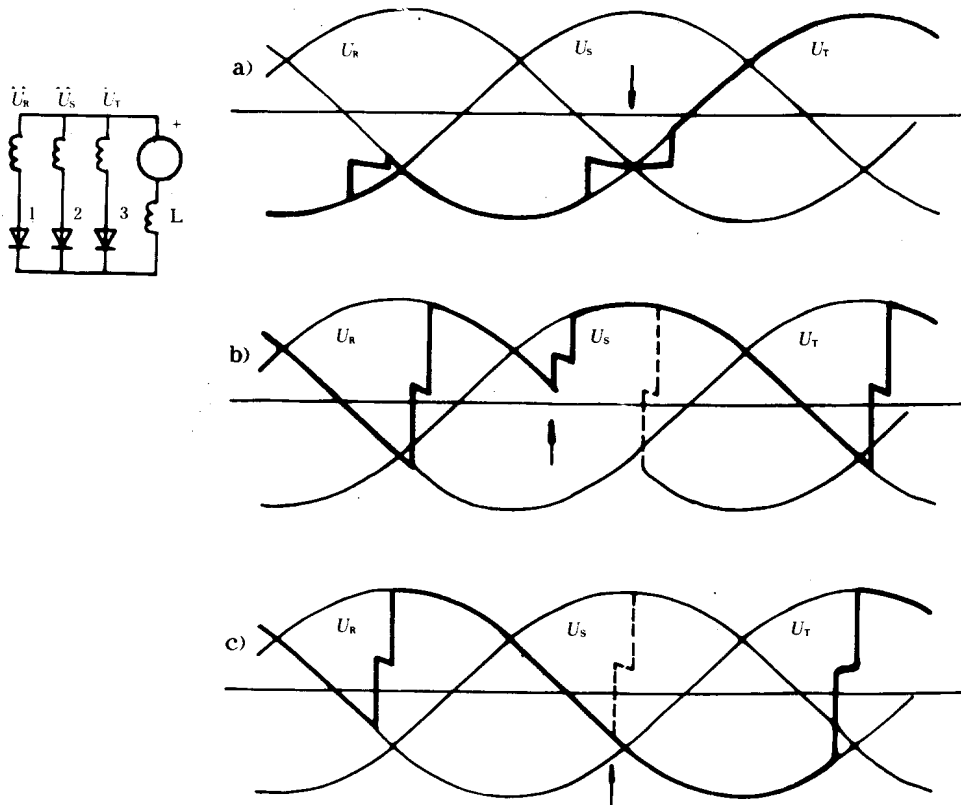


图 1 变流器故障时的电压

a) 臂 3 直通; b) 臂 2 穿通; c) 臂 2 开通故障

3.2 与变流器瞬态现象有关的术语

3.2.1 直流侧瞬态过程 d. c. side transients

加于直流电路中电感和电容器等元件上的直流电压的急剧变化引起的电压瞬态过程。

3.2.2 电源的换相瞬态过程(重复瞬态过程) commutation transient on line(repetitive transient)

换相之后在交流电网中产生的电压瞬态变化。

3.3 关于谐波的术语

3.3.1 谐波 harmonic

非正弦周期波形中所含的频率为其基波频率整数倍的正弦分量。

3.3.2 特征谐波(变流器的) characteristic harmonic

变流器在理想三相对称条件下运行时所产生的那些谐波。对于 p 脉波的变流器,其特征谐波次数为 $K \cdot p \pm 1$,其中 $K=1,2,3,\dots$ 。

3.3.3 非特征谐波 uncharacteristic harmonic

变流器产生的特征谐波以外的那些谐波。

3.3.4 系统扰动 system borne disturbances

由于诸如配电系统中负荷变化、开关的过渡过程、电源网络结构改变等一系列情况而引起的扰动,一般只能用统计值来确定。这类扰动的例子有:

- 过电压、开关过渡过程、雷击;
- 电动机起动、切换电容器引起的电压变动;
- 单相接地、相间故障和故障清除;
- 半永久性电压不平衡,应由负序对正序分量之比来规定;
- 频率变化和相位漂移;
- 纹波控制信号;
- 电压和电流的谐波。

3.3.5 变流器扰动 convertor generated disturbances

变流器负载的非线性变化引起的扰动。这类扰动的例子有:

- 电压突降和突升,用与相邻的稳态电压的方均根值之差表示;
- 谐波电流,用规定运行条件下的序次、幅值和相位关系的下列数值来表示:
 - a) 平均值,即出现概率最大的值;
 - b) 最大值,即短时(如 1min)的偶然值。
- 换相缺口,用宽度、深度、面积表示;
- 换相引起的重复性过渡过程,象窄脉冲那样由能量、峰值、上升速率等表示;
- 由变压器的合闸浪涌电流、清除内部或外部故障等因素引起的非重复性过渡过程;
- 非整次的谐波(例如变频器)。

注:① 上述干扰可能由该变流器本身或其它变流器产生,被研究处的实际干扰电平可能随网络阻抗的改变而变化。

② 使用多台多脉波数和带移相变压器的变流器时,谐波可能成为次要问题,而电压变化却成为问题的关键。

4 变流器的标志

4.1 电联结标志

按电力电子专业的有关标准。

4.2 负载类型的标志

为使变流器安全可靠运行,变流器的制造厂应在变流器的有关技术文件(技术条件、说明书等)中,说明所设计的变流器及其额定值所适用的负载类型和特点,并提请用户注意所选用的变流器与所使用的负载相适应。

变流器的负载类型及标志字母如下:

- a. 电阻性负载(W);
- b. 大电感负载(L),例如:直流电机磁场、电磁铁、具有高 X/R 比的电抗器等需电压反向和过电压保护的感性负载;
- c. 电动机(M);
- d. 蓄电池充电(B);
- e. 电容性负载(C),例如:储能电池、电容器组、电化装置、逆变器(电压型的)等储能性负载;
- f. 再生性负载(G),例如:需要处理再生能量并保护主电路故障措施的起重、卷扬、电机车牵引及其他再生性负载等。

4.3 冷却方式的标志符号

4.3.1 使用的字母符号

4.3.1.1 冷却媒质或热转移媒质的字母符号(见表1)。

表 1

冷却媒质或热转移媒质	字母符号
矿物油	O
绝缘液(非矿物油)	L
气 体	G
水	W
空 气	A
两态冷却的流体	P

4.3.1.2 循环方法的字母符号(见表2)。

表 2

循 环 方 法	字母符号
自然(对流)	N
强迫(不专门配置驱动装置)	E
强迫(变流器具有驱动装置)	F
蒸发冷却	V

4.3.2 字母组合的排列方式

4.3.2.1 直接冷却

直接冷却用两个字母标志,其排列组合方式为:冷却媒质的字母符号在前(左),循环方式的字母符号在后(右)。例如:

AN: 表示空气冷却,自然对流。

4.3.2.2 间接冷却

间接冷却用四个字母标志,其排列组合方式为:前(左)两个字母表示热转移媒质及其循环方式,后(右)两个字母表示冷却媒质及其循环方法。例如:

OFAF: 表示用泵强迫循环的油作为热转移媒质和用(风机)强迫循环的空气作为冷却媒质。

4.3.2.3 混合冷却方式

如果变流器在运行中交替地使用自然或强迫两种循环方式,则用以斜线隔开的两组字母符号来共同表示这种混合冷却方式。两组符号各表示一种所采用的冷却方式,一般是斜线前(左)的一组对应冷却效率较低或环境温度较低的那一种,而冷却效果较高的那一种冷却方式的标志符号则放在斜线的右边。两组字母符号的排列按 4.3.2.1 和 4.3.2.2 的规定。因此,实际上混合冷却方式是用所采用的各冷却方式符号加斜线来标志。

a. 对直接混合冷却,用以斜线分开的两组两个字母来标志。例如:

AN/AF: 表示采用自然空气直接冷却和兼用强迫空气直接冷却的混合冷却。

b. 对间接混合冷却用以斜线分开的两组四个字母来标志。例如:

OFAN/OFAF: 表示间接冷却的热转移媒质都是采用强迫油循环方式,而冷却媒质则交替采用自然空气和强迫空气循环的混合冷却方式。

4.4 变流器的线端标志及导线颜色

4.4.1 线端标志

为了制造和安装使用方便,在需要时(一般在电气原理图中已标明),变流器的各种引入、引出线,主电路、二次电路及触发电路的连线,应在其线端予以标志。标志应清晰和便于识别,标志符号及标志方法应符合产品技术条件的规定。

4.4.2 导线和母线的标志颜色

变流器的输入、输出线等的颜色标志应符合表3的规定。

表 3

电路	导线类型	标志颜色	排列位置
交 流	U 相	黄	上、或左、或远位
	V 相	绿	均在中间位置
	W 相	红	下、或右、或近位
	中性线	淡蓝	—
	接地中性线	黄、绿色交替(各宽 15~100mm)	—
直 流	正极	棕	上、或左、或远位
	负极	蓝	下、或右、或近位
	中线	淡蓝	最下、或最右、或最近位

注:① 方向可变的直流母线,以主要工作方式(第一工作方式)为基础。

② 排列位置以正对产品的正视方向为基础。

5 关于变流器技术性能的补充说明

5.1 变流器的应用领域

5.1.1 作为电能变换设备

- a. 直流负载:各种可调或不可调直流电源、稳定电源;
- b. 交流电力控制器(可输出交流或直流);
- c. 交流变频:电网换相变流器、转差能量反馈、机械换相变流器、自换相变流器(电压型、电流型);
- d. 速度调节;
- e. 电化学加工(电解、电镀、电泳);
- f. 计算机电源;
- g. 牵引变电站、铁路、有轨电车、矿山、电气车辆;
- h. 通讯电源;
- i. 电磁铁、磁场电源;
- j. 无线电发射机直流电源;
- k. 等离子切割;
- l. 电弧炉直流电源;
- m. 太阳能利用。

5.1.2 改善供用电质量

- a. 高压和中压系统:输配电系统和工厂内的功率因数补偿;
- b. 低压系统:节能技术;
- c. 独立和备用电源;
- d. 太阳能、风能或化学能的直流或交流电源。

5.2 变流器的主要技术参数

5.2.1 必须规定的项目

GB/T 3859.1 的内容,特别是第 8.1 条铭牌中与额定值有关的内容必须规定或加以说明。

5.2.2 其他技术参数

除 GB/T 3859.1 规定的和提出的一些项目外,还有一些与变流器设计、生产和运行有关但易被忽略的技术参数,在需要时应给以规定和说明,制造厂和用户应就此取得一致。

5.2.2.1 与电源有关的参数

- a. 电压和频率(如适用):额定值及其变动范围,不平衡度、短时断电等方面的要求;
- 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. 同一供电网络中可能有的其它负载:例如电动机、电容器组、电炉等,应特别说明;
- d. 干扰的极限(经常发生或允许的);
- e. 接地的方式。

5.2.2.2 与输出有关的参数

- a. 输出电压和频率(如适用);
- b. 要求输出量的变化范围(连续的或分级的);
- c. 电压和(或)电流的反向能力(运行的象限);
- 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。

5.2.2.3 关于环境条件的说明

- a. 温带、热带、寒带气候;
- b. 温度、湿度、含尘量;
- c. 各种非正常工作条件的说明;
- d. 安装在户外还是室内;
- e. 防护等级(根据 GB 4208);
- f. 设计、制造依据,(标准代号)。

5.2.2.4 关于电气使用条件的说明

- a. 供电母线的情况:
 - 变流器专用系统(仅向变流器供电);
 - 一般用途系统(同时向交流电动机负载供电);
 - 高质量的供电系统(向抗扰能力低的计算机、医疗设备等类型负载供电);
- b. 设备抗扰等级:各个参量可以选择不同的抗扰等级。

5.2.3 关于异常工作条件

5.2.3.1 特殊环境温度条件的确定

如果变流器运行的环境温度不符合 GB/T 3859.1 第 5.1 条的规定,可以按如下方式处理:

- a. 对变流装置和变流变压器规定不同的冷却媒质温度;
- b. 供需双方就最高和最低环境温度或冷却媒质的温度进行协商,并取得协议;
- c. 按附录 A 规定降容使用。

5.2.3.2 灰尘和固体微粒含量的规定

一般情况下,供需双方都有义务在订货时提醒对方注意变流器安装运行场所环境空气的污染情况,若超出了一般工业环境的污染度的规定,有可能影响变流器的性能和安全运行时,则需采取相应的防范措施,或设计适合污染较严重的特殊环境条件使用的变流器。

5.3 计算因数

因为变流器除 GB/T 3859.1 给出的七种最常用的电联结形式之外,还有很多种电联结可供使用。表 4 给出的计算因数实际上是对 GB/T 3859.1 的补充。使用的字母及定义均与 GB/T 3859.1 的规定相同。在使用 GB/T 3859.1 未包括的字母或与 GB/T 3859.1 有差异的字母及定义时,本标准在适当位置都作了说明。

5.3.1 电压比

表 4 的第 10、11 给出了两个电压比:

$$\frac{U_{di}}{U_{v0}}; \frac{U_{im}}{U_{di}}$$

式中: U_{di} ——理想空载直流电压;

U_{v0} ——变压器阀侧绕组电压;

U_{im} ——在空载状态下,出现在臂的两端子之间的理想空载峰值电压,忽略阀的内部和外部电压降。轻载时接近过渡电流处的比值仍保持不变。

注: 序号 5、11 和其他使用相间电抗器联结方式,空载时 U_{im}/U_{di} 的比值升高。

表 4 变压器电联结和计算因数

联结代号	变压器联结		网侧电 流因数 $\frac{I_1}{I_d}$	阀侧电 流因数 $\frac{I_v}{I_d}$	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_M}{U_{di}}$	$\frac{d_{xN}}{e_{xN}}$	变压器损耗试验时 短接的端子			变压器运行时 绕组的总损耗	测量 e_{xN} 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
单变压器单拍联结																
1				2	2	2	0.5	0.707	0.45	3.14	0.707	0-1	0-2	—	0.5(P _A +P _B)	1-2
2				3	3	3	0.471	0.577	0.675	2.09	0.866	1-2-3	—	—	P _A +I _d ² r ₂ /3	1-2-3
3				6	6	6	0.816	0.408	1.35	2.09	1.5	1-3-5	2-4-6	—	0.75(P _A +P _B)	1-3-5 和 2-4-6 的 平均
4				6	6	6	0.816	0.408	1.35	2.09	1.5	1-2	2-3	1-3-5 和 2-4-6 的 平均	(P _A + 2P _B + 3P _C)/6	1-3-5 和 2-4-6 的 平均
5				6	3	3/2	0.408	0.289	0.675	2.42	0.5	1-3-5	2-4-6	—	0.5(P _A +P _B)	1-3-5 和 2-4-6 的 平均
6				6	2	2/3	0.272	0.236	0.45	3.14	0.75	1-3-5	2-4-6	—	1.125(P _A +P _B)/2	1-4 2-5 3-6

续表 4

联结代号	变压器联结		阀联结	p	q	$\frac{\partial q_s}{g}$	网侧电	阀侧电	$\frac{U_{di}}{U_{vo}}$	$\frac{U_{dM}}{U_{di}}$	$\frac{d_{xN}}{e_{xN}}$	变压器损耗试验时短接的端子			测量 e_{xN} 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
7				2	2	8	1	1	$0.9 \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$	0.707	1-2	—	—	P_A	1-2
8				6	3	6	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	35	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.5	1-2-3	—	—	P_A	1-2-3
9				12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.26	1-3-5	2-4-6	1-3-5 2-4-6	$0.035(P_A + P_B) + 0.93P_C$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
10	同 9, 但有两个不同的变压器		同 9	12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.52	—	—	$1.07P_C$	1-3-5 2-4-6	
11				12	3	3	$0.789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0.408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1.35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1.05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0.26	1-3-5 和 2-4-6 的平均	2-3 4-5 6-1	1-2 3-4 5-6	$1.34P_A - 0.08P_B - 0.27P_C$	1-3-5 和 2-4-6 的平均
12				12	3	12	$1.577 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0.816 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right)$	$2.7 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0.524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0.26	1-3-5	2-4-6	1-3-5 2-4-6	$0.035(P_A + P_B) + 0.93P_C$	1-3-5 和 2-4-6 的平均

单变压器均—双拍联结

续表 4

联结代号	变压器联结		阀联结	p	q	$\frac{\partial QS}{g}$	网侧电 流因数 $\frac{I'_L}{I_d}$	阀侧电 流因数 $\frac{I_v}{I_d}$	$\frac{U_{dL}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{dM}}{U_{dL}}$	变压器损耗试验时 短接的端子			测量 ϵ_{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	13	14	15	17
13	同 12, 但有两个独立变压器		同 12	12	3	12	$1.577 \left[\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right]$	$0.816 \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)$	2.7	0.524	—	—	1-3-5 2-4-6	1-3-5 2-4-6
单变流器非均一双拍联结														
14				2	2	—	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	0.9	1.57	1-2	—	—	1-2
15				6	3	—	见 5.3.2	见 5.3.3	1.35	1.05	1-2-3	—	—	1-2-3
双变流器联结														
16				见联结形式 5										
17				见联结形式 5										
18				见联结形式 8										
19				见联结形式 8										

5.3.2 变压器网侧电流因数

表4第8栏给出的网侧电流方均根值 I'_L 与直流电流 I_d 的比值,以这样的假定条件为依据:即直流电流平滑,交流电流为矩形波,且单拍或双拍联结的电压比为:

$$\frac{\text{网侧线电压}}{\text{阀侧正在换相的换相组间的电压}} = \frac{U_L}{U_{v0}} = 1$$

网侧电流在不同的电压比值下近似为:

$$I_L = I'_L \times \frac{U_{v0}}{U_L}$$

对于序号第15联结方式,网侧电流因数与延迟角有如下关系:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha < \frac{\pi}{3} & \quad \frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.816 \\ \frac{\pi}{3} < \alpha < \pi & \quad \frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \end{aligned}$$

5.3.3 变压器阀侧电流计算因数

表1第9栏给出了变压器每个端子上阀侧电流的方均根值 I_v 与直流电流 I_d 的比值。

对于序号第15联结方式,阀侧电流因数与延迟角有如下关系:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha < \frac{\pi}{3} & \quad \frac{I_v}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.816 \\ \frac{\pi}{3} < \alpha < \pi & \quad \frac{I_v}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \end{aligned}$$

5.3.4 电压调整率

表4第12栏给出了比值: d_{xN}/e_{xN} ,其中 d_{xN} 为额定负载下的变压器换相电抗所产生的直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示; e_{xN} 为在整台设备的额定网侧电流 I_{LN} 下,变压器阻抗电压的感性分量,用额定交流电压 U_{LN} 的标么值表示,变压器的阀侧绕组按第17栏短路。

对于换相数 $q=3$ 的联结方式,感性直流电压调整率 d_{xN} 可以由通常给出的三相变压器的 e_{xN} 计算得出。

对于其他各种联结方式, d_{xN} 和 e_{xN} 的比值取决于变压器的网侧和阀侧的电抗之比。

注: ① 假定重叠角 u 小于 $2\pi/p$, p 为脉波数。

② 序号9、12、13联结方式中,第12栏的数据假设 e_{xN} 以整台设备的线电流为基础。如果每台变流器以其额定线电流(分别为 $0.816I_{dN}$ 和 $1.632I_{dN}$) 进行试验,则第12栏的值为0.5。

5.3.5 磁路

在表4中对应于三相电流供电的联结,假定磁路为三柱铁心。

5.3.6 功率损耗因数

表4第16栏给出的是变流器在正常运行时和在整台设备的额定电流 I_{ILN} 下,按第13、14、15栏进行短路试验时,各功率损耗之间的关系。

有关该因数的准确程度见 GB/T 3859.3 第4.1条的说明。

5.4 并联和串联联结

5.4.1 阀器件的并联或串联

当电力半导体器件并联或串联时,应采用一定措施,以确保所有器件在其电压和电流的额定值范围内工作(见 GB/T 3859.1)。

如果制造厂依靠挑选器件的参数来达到上述目的,则应在产品的有关文件中予以说明。

5.4.2 装置和设备单元的并联或串联

5.4.2.1 并联

a. 没有电压调节设施时:当所设计的这种设备并联时,且在总的额定输出运行时,各并联单元都应不超过额定值工作。

如果设备需要与不同特性的其它电源并联运行,对负载分配的要求应专门作出规定;

b. 有电压调节设施时:这类设备需并联运行时,对负载分配的要求,应专门作出规定。

5.4.2.2 串联

当变流装置或变流设备单元作串联运行时,需采取防护措施,即使在交流侧开路,直流侧接有有源负载时,仍能保证各单元均工作在额定电压极限之内。

串联运行时,对地电压可能大大高于各装置或设备的两个端子之间的电压,此时,变流器的绝缘设计和试验,均应以比较高的对地电压为基础。

5.5 功率因数

5.5.1 概述

对于脉波数为 6 或 6 个以上的变流器,总功率因数的意义不大,通常实用的是基波的位移因数 $\cos\varphi_1$ 。

位移因数 $\cos\varphi_1$ 与变流变压器的网侧参数有关。

为此,如果要求保证的话,除非另有协议,关于位移因数的计算,可假设各相对称,且电压为正弦波。

对于三相晶闸管均一联结的位移因数,应按 5.5.4 条计算确定。

对于额定输出大于 300kW 的单相设备,三相非均一联结的设备,以及顺序控制的变流器,应规定位移因数的确定方法。

当变流器运行在整流方式时,消耗来自电网系统的有功和无功功率。

当变流器在逆变方式运行时,它向电网输送有功功率,但仍消耗来自电网的无功功率。

注:许多应用中,例如小型脉宽调制(PWM)传动,当只有很小或没有电抗器时,纹波对总的功率因数影响很大。

5.5.2 确定位移因数时所使用的符号

$\cos\varphi_{dN}$: 延迟角为零时,额定直流电流下的位移因数;

$\cos\varphi_{d\alpha N}$: 延迟角为 α 时,额定直流电流下的位移因数;

d_{rN} : 额定负载时的阻性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示。 $d_{rN} = d_{r1N} + d_{r2N}$;

d_{xN} : 额定负载时的感性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示。 $d_{xN} = d_{x1N} + d_{x2N}$;

d_{r1N}, d_{x1N} : 额定直流电流时,由变流器的其他部分例如阳极电抗器,网侧电抗器和变压器(如有)产生的阻性、感性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示;

d_{r2N}, d_{x2N} : 额定直流电流时,由变流变压器引起的阻性、感性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示;

d_{LN} : 额定直流电流下,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率,用 U_{di} 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;

p : 脉波数;

P_{LN} : 额定负载时网侧有功功率, $P_{LN} = U_{dN} \cdot I_{dN} + P_{rN}$;

P_{rN} : 额定负载时电路电阻的功率损耗;

Q_{iLN} : 额定负载时,网侧基波电流 I_{iLN} 的无功功率;

f_{1N} : 电网额定频率;

I_{dN} : 额定直流电流;

R_a : 电动机电枢回路电阻;

R_c : 电源系统的阻抗;

R_{sc} : 短路比;

S_{iLN} : 额定负载时网侧基波电流 I_{iLN} 的表观功率, $S_{iLN} = U_{di} \cdot I_{dN} = U_{LN} \cdot I_{iLN} \cdot \sqrt{3}$;

- S_c : 电源的短路容量;
- S_{IN} : 变压器额定表观功率;
- u : 重叠角;
- U_{di} : 理想空载直流电压;
- U_{dN} : 额定直流电压;
- U_{drN} : 额定负载时,阻性直流电压调整值;
- U_{dpN} : 额定负载时,包括所有阻性直流电压调整值在内的理想内部直流电压调整值;
- X_c : 电源系统的感抗;
- α : 整流运行时的相控延迟角,或有关量的角注;
- β : 逆变运行时的相控超前角,或有关量的角注;
- γ : 逆变运行时的换相裕度角;
- φ_{IN} : 额定电流时,电网电流(基波)的位移角(忽略变压器励磁电流);

5.5.3 位移因数和无功功率的圆图

变流器的位移因数 $\cos\varphi_{IN}$ 和无功功率 Q_{ILN} 可近似用图 2 的圆图来估算。

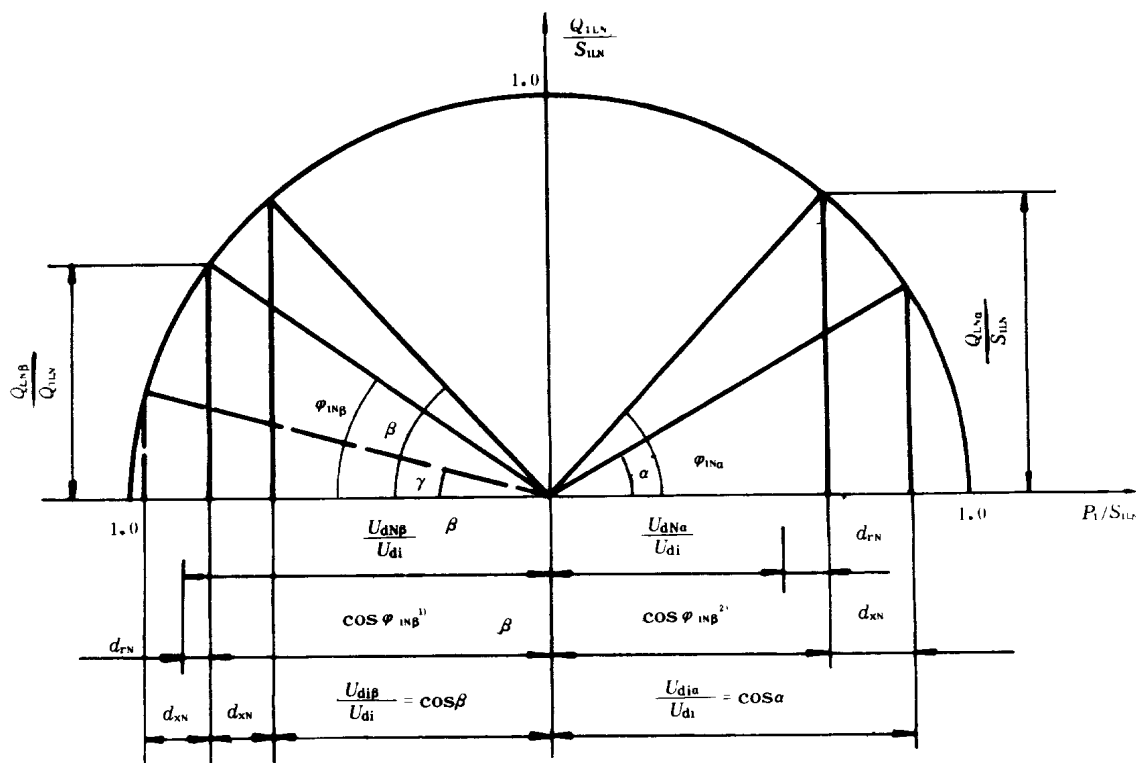


图 2 位移因数近似圆图

图中: $\cos\varphi_{IN\beta} = U_{dpN\beta} / U_{di} = P_{IN\beta} / S_{ILN}$; $\cos\varphi_{IN\alpha} = U_{dpN\alpha} / U_{di} = P_{IN\alpha} / S_{ILN}$ 。

5.5.4 位移因数 $\cos\varphi$ 的计算

5.5.4.1 延迟角为零,直流电流为额定值时的位移因数 $\cos\varphi$

对一般交流系统电抗来说,这种位移因数可分别由图 3 和图 4 获得。如无其他说明,则假设网侧电压的方均根值保持恒定。

图 3 表示 6 脉波联结。

图 4 表示 12 脉波联结。

图 4 所标示的 α_p 值是在某一运行区域内,12 脉波联结所产生的固有延迟角,即使没有相控也存在。

而对于相控变流器,则表示在规定条件下的最小延迟角。

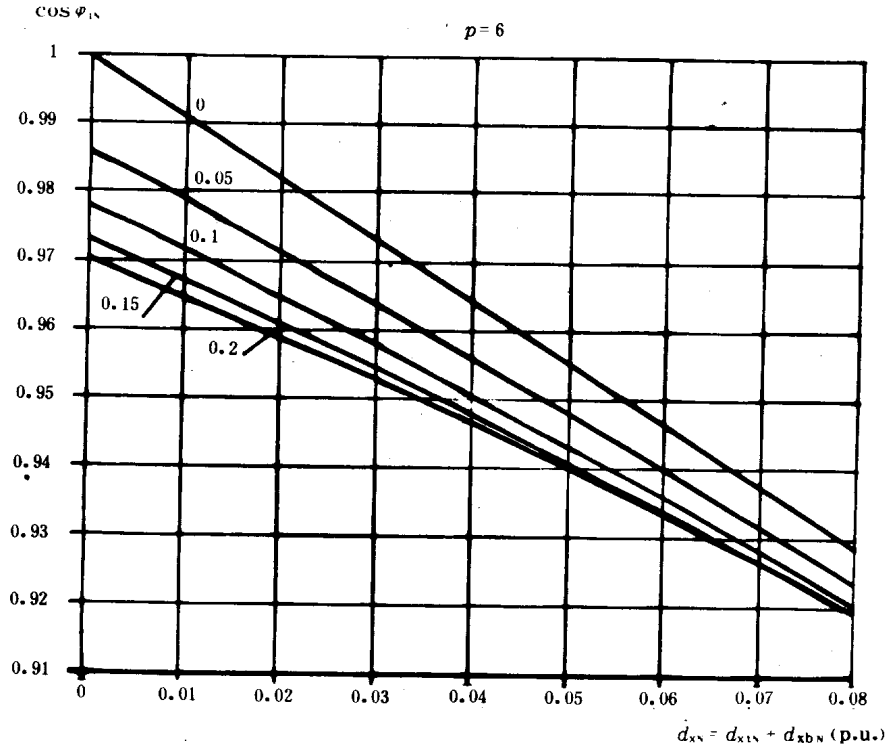


图3 $p=6$ 以 d_{xN} 为变量的位移因数

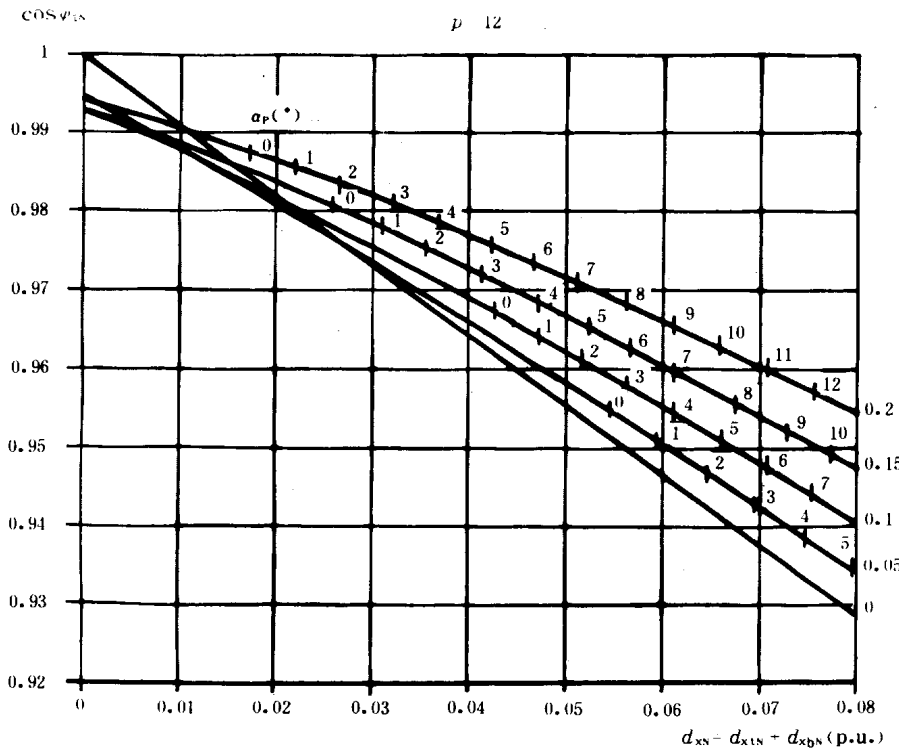


图4 $p=12$ 以 d_{xN} 为变量的位移因数

注: 图3和图4的参数为:

$$\frac{1}{R_{sc}} = \frac{S_{JLN}}{S_c} = \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_c}$$

5.5.4.2 延迟角为 α ,额定直流电流下的位移因数 $\cos\varphi_{aN}$

如果有延迟角为 α 的相位控制,则其对应的 $\cos\varphi_{aN}$ 值可由下式计算,在实际应用中,其精度是足够的:

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

在逆变范围内,其位移因数也可以由下式得到:

$$\cos\varphi_{aN} = \cos\beta - (1 - \cos\varphi_{1N})$$

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

对非均一联结,适用下述公式:

$$\cos\varphi_{aN} = \cos(\alpha/2) - (1 - \cos\varphi_{1N}/\cos(\alpha/2))$$

对于延迟角分别为 α_1 和 α_2 的不对称控制,适用下述公式:

$$\cos\varphi_{aN} = \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) - \frac{1 - \cos\varphi_{1N}}{\cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)}$$

5.5.4.3 非额定值负载时的位移因数 $\cos\varphi_a$

对于不是额定值的其他负载,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 的位移因数 $\cos\varphi_a$,应取 I_d, d_{x1}, d_{xb} 的实际值。

$$\text{即: } d_{x1} + d_{xb} = (d_{x1N} + d_{xbN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

然后,分别由图3和图4得到 $\cos\varphi$ 的值,则:

$$\cos\varphi_a = \cos\alpha - (1 - \cos\varphi)$$

5.6 变流因数

对于脉波数为6或6以上的变流器,其变流因数近似等于功率效率(见GB 3859.1的3.1.3.12和3.1.3.13)。

对于小功率变流器以及脉波数为6或6以下的变流器,当直流电路的电压和电流的交流分量不产生有功功率时,若用户要求,除给出功率效率外,还应给出变流因数。

在规定的负载条件下,总是用输入/输出的方法来确定变流因数。

5.7 直流电压调整率(值)

接入没有功率因数补偿电容器系统的单个变流器的电压调整率,主要为:

- 阻性电压调整率,变流器内部功率损耗所产生的电压调整率;
- 由换相产生的感性电压调整率。换相使半导体装置端子上的电压波形发生畸变,并使直流电压发生变化,它基本上是由交流电压的不连续性引起;
- 由电源阻抗和变流器非正弦输入电流(它使变流器端子上的电压波形发生畸变)产生的电压调整率。

理想空载直流电压 U_{di} 系指无穷大电源情况下的电压值,因此电压调整率应包括无穷大电源和变流器交流端子间存在的全部阻抗的影响。

本标准假设变流器交流端子间的线电压方均根恒定,而不是无穷大电源处的电压恒定。

因此,理想空载直流电压 U_{di} 是对变流器端子间的电压而言的,这样,电压调整率应看作由两个因素所引起:

- 固有直流电压调整率,即变流器自身的电压调整率(5.7.1);
- 附加直流电压调整率,由交流系统阻抗产生。

当系统中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率。

为了使供方能计算出交流系统阻抗的影响,用户应在订货前给出交流系统的数据。当为此而给出系

统的短路容量时(所给出的值应对应于交流系统的结构型式),就可求出总电压调整值。

供方应说明下列值:

——变流器的固有直流电压调整值(5.7.1.5条);

$$U_{dtN} + U_{dbN}$$

——当网侧端子电压保持常数时,变流器的总电压调整值。

$$U_{dtN} + U_{dbN} + U_{dLN}$$

当用户没有提供交流系统阻抗值时,供方可将交流系统的短路容量假设为一限定值,或者提醒用户使用图5,以便计算出交流系统任何短路容量下的总直流电压调整值。

电压调整值的计算实例在第6章中给出。

5.7.1 固有直流电压调整值(率)

所给出的固有直流电压调整率为由变压器与交流设备的其他部分(如电抗器等)所产生的直流电压调整率之和,外加随电流而变化的晶闸管通态电压和二极管的正向电压。

假定变流器网侧端子的交流电压恒定。

电压调整率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来计算电压调整值可以在设备的输入/输出负载试验时直接测量确定。供方应优先采用测量法。

对单相设备,非均一联结的晶闸管设备和顺序控制变流器,应规定固有直流电压调整值的确定方法。

5.7.1.1 主变压器和相间变压器产生的阻性直流电压调整值

此项调整值由下式计算:

$$U_{drtN} = \frac{\text{额定电流时变压器绕组损耗}}{I_{dN}}$$

5.7.1.2 由其他部件产生的阻性直流电压调整值

例如由串联平波电抗器,网侧电抗器,饱和电抗器,均流装置,二极管、晶闸管等产生的直流电压值。

$$U_{drbN} = \frac{\text{额定电流时各部件的损耗}}{I_{dN}}$$

5.7.1.3 变流变压器引起的感性直流电压调整值

对于各种联结,感性电压调整值可以由变压器的换相电抗试验结果(见本标准第11章)用下式计算。

$$U_{dxtN} = d_{xtN} \times U_{di}$$

注:该公式不适用于多重换相。对于表4所列的联结,电压调整值也可由表4所给出的计算因数 d_{xtN}/e_{xN} 和 e_{xN} (见5.3.4)计算,此时:

$$U_{dxtN} = \left(\frac{d_{xtN}}{e_{xN}} \right) \times e_{xN} \times U_{di}$$

5.7.1.4 其他部件产生的感性直流电压调整率

例如由网侧电抗器,均流电抗器产生的直流电压调整率。

计算公式中使用的符号如下:

d_{xblN} : 在 I_{dN} 时,由网侧电抗器产生的感性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示;

d_{xbvN} : 在 I_{dN} 时,由阀侧电抗器产生的感性直流电压调整率,用 U_{di} 的标么值表示;

U_{dxbLN} : 对应于 d_{xblN} 的感性直流电压调整值;

U_{dxbvN} : 对应于 d_{xbvN} 的感性直流电压调整值;

X_{bL} : 电抗器、变压器等网侧每相的电抗;

X_{bv} : 电抗器、变压器等阀侧每相的电抗;

I_{bN} : 电抗器的方均根电流值。根据矩形波电流计算对应额定直流电流 I_{dN} ;

I_{dN} : 额定直流电流;

U_{bN} : 电抗器等网侧端子的额定线电压;

g : 均分 I_{dN} 的换相组数;

p : 脉波数;

q : 换相数;

s : 串联换相组数;

δ : 每个电抗器同时换相的换相组数。

a. 网侧电抗器、变压器等

对于三相系统:

$$d_{xbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)$$

$$U_{dxbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times U_{di} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)$$

对于单相系统:

$$d_{xbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}}$$

$$U_{dxbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL} \times U_{di}}{U_{bN}}$$

b. 对于阀侧电抗器

$$d_{xbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times \frac{I_{bN} \times X_{bv}}{U_{di}}$$

$$U_{dxbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times I_{bN} \times X_{bv}$$

其他部件产生的感性直流电压调整值:

$$U_{dxbN} = U_{dxbLN} + U_{dxbvN}$$

5.7.1.5 变流器的固有直流电压调整值

额定直流电流下,由主变压器和相间变压器(如有)产生的直流电压调整值由下式表示:

$$U_{dtN} = U_{drtN} + U_{dxtN}$$

额定直流电流下,由变流器的其他部件产生的直流电压调整值由下式表示:

$$U_{dbN} = U_{drbN} + U_{dxbN}$$

额定直流电流下的固有直流电压调整值则为:

$$U_{dtN} + U_{dbN} = U_{drtN} + U_{dxtN} + U_{drbN} + U_{dxbN}$$

5.7.2 交流系统阻抗产生的直流电压调整值

5.7.2.1 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为常数,其直流端子上也会出现由交流系统阻抗产生的附加直流电压调整值。

对电压调整值的影响是由于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和系统短路容量对变流器表观功率之比(R_{sc})。

5.7.2.2 由交流系统阻抗产生的附加直流电压调整值的计算

图5给出了额定直流电流下,交流系统阻抗产生的附加直流电压调整率 d_{LN} ,用 U_{di} 的标么值示。相应的电压调整值 U_{dLN} 为:

$$U_{dLN} = d_{LN} \times U_{di}$$

如果没有其他说明,假设变流器网侧端子电压的方均根值为常数。

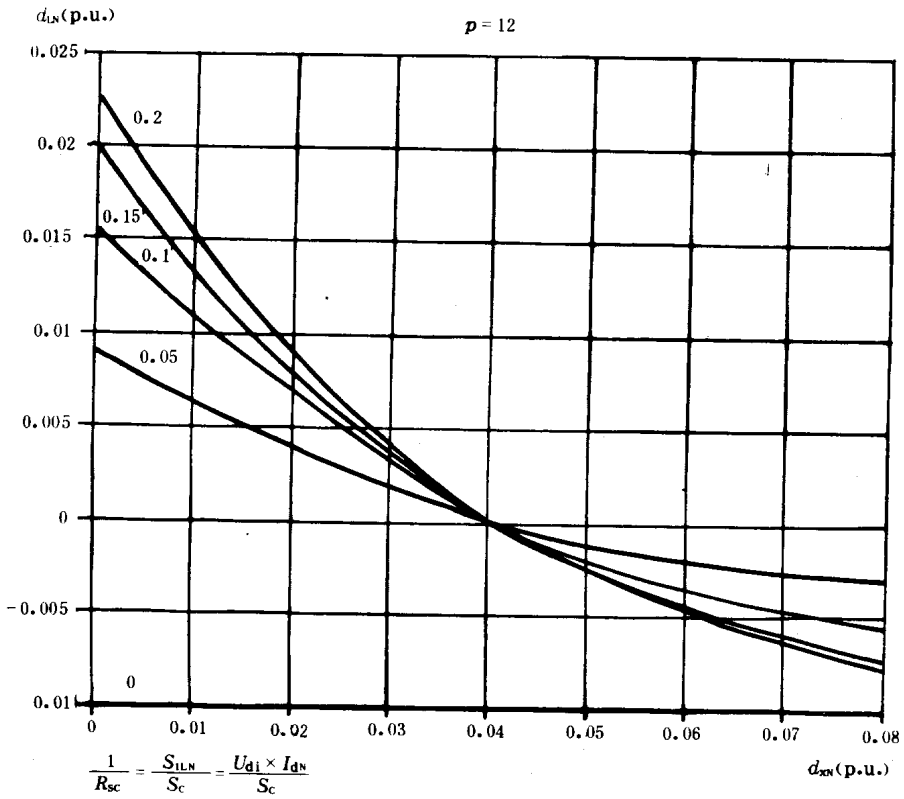
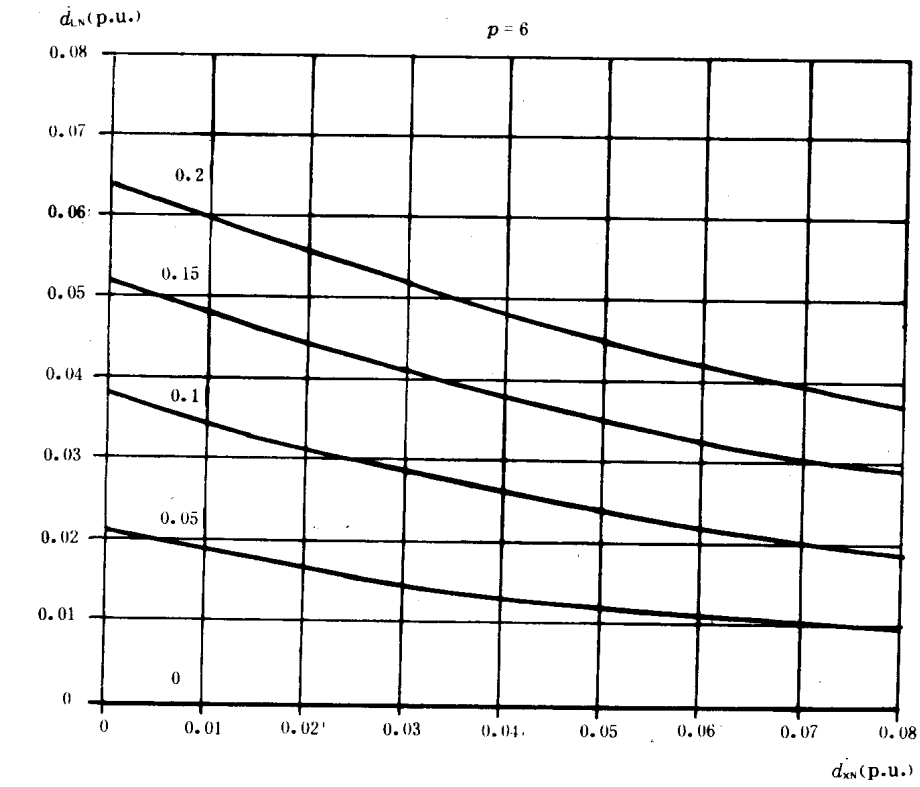


图 5 $p=6$ 和 $p=12$ 时以 d_{xN} 为自变量的函数 d_{LN}

当使用图 5 的曲线计算额定负载之外的其他负载下产生的实际电压调整率 d_L 时,应取 I_d, d_{xi} 和 d_{xb} 的实际值,并由此求取实际的附加调整值 U_{dL} 。即先计算:

$$d_{xi} + d_{xb} = (d_{xiN} + d_{xbN}) \times I_d / I_{dN}$$

然后使用图 5 的图形,计算 U_{dL} 。

5.7.2.3 由交流系统阻抗产生的附加直流电压调整率的测量

变流器直流侧的伏特计不能直接测量出固有直流电压调整值(5.7.1 条),而测出的值一般较大,因为包括了交流系统阻抗等的影响。

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计直接测量。

交流系统阻抗产生的附加直流电压调整值可通过联接在变流器网侧端子(必要时,可通过一个变压器)上的辅助整流器的专门测量线路来测量,可得到足够精确的值。

这样的辅助整流器应与变流器有相同的换相数和脉波数,其直流电压的纹波对交流电网电压的相位应与变流器直流电压的纹波对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表示了由系统阻抗引起的变流器直流电压标么值的变化。

5.7.2.4 同一供电系统中,其他变流器对直流电压调整值的影响

如果同一系统也向其他变流器供电,即使变流器端子上交流电压的方均根值为常数,仍可能在该变流器上产生附加的电压调整值。

为了使生产厂考虑这些条件,用户应在订货前说明这些变流器的功率,联结型式,安装位置以及其他一些主要特点。

5.8 逆变状态下的可靠运行

为了防止换相失败或直通,设计时应考虑所要求的最大电流,最高直流电压和最低网侧电压可能同时发生,并同时考虑稳态和瞬态两种情况。

除非另有说明,当逆变运行时,变流器应能承担与工作制等级相对应的全部电流额定值,在交流系统为最小额定电压时,不发生直通。

逆变运行时,在诸如由于交流系统远方故障引起电压跌落的瞬态条件下,尤其在最高直流电压时,可能产生换相故障。

采用一种或同时采用几种下列方法,可以减少换相故障的发生。

- 设定较低的电流极限;
- 使用较高的阀侧电压;
- 设定较低的电流变化率极限;
- 采用快速直流短路器或磁性电抗器,在逆变运行时尤其有效;
- 设定较高的欠压继电器(在额定极限内);
- 使用门极脉冲列触发(而不是短时触发信号);
- 在触发设备的同步输入端设置交流滤波器以避免对控制角的干扰。

这些方法不可能防止所有的换相故障,但在大多数应用中可以减少故障的次数。

跳闸之后自动再起动,可以作专门规定,而对操作人员的安全应采取严密的防护措施。

5.9 交流电压波形

交流电源的线电压(或相电压)的瞬时值相对于基波的偏离量(例如电力变流器换相期间),可达到原电压峰值的 0.2p. u. 或更大(见图 6),且在每次换相结束时会出现附加的振荡。

不重复瞬态过程大部分来自故障跳闸和开关操作,以及可能在架空线上出现的雷电冲击,它可能对某些中压和高压系统有影响。

基于专用的变流变压器的特性和额定值(S_N),以下的值仅作为例子给出。

- a. 瞬态能量: $400S_N, J$;

- b. 上升时间: (0.1~0.9 峰值) $1\mu\text{s}$;
- c. 重复峰值 ($U_{\text{LRM}}/U_{\text{LWM}}$) 1.25 p. u. ;
- d. 不重复峰值 ($U_{\text{LSM}}/U_{\text{LWM}}$) 2.0……2.5 p. u. ;
- e. 数值在 0.5p. u. 以上的持续时间: $3\sim 300\mu\text{s}$ 。

如果几个没有专用变压器的变流器联结在同一母线上,抑制器电路应与公共变压器匹配。其中:

U_{LRM} : U_{L} 的最大瞬时电压值,包括重复过电压,而不包括不重复过电压;

U_{LSM} : U_{L} 的最大瞬时电压值,包括不重复过电压;

U_{LWM} : U_{L} 的最大瞬时电压值,不包括瞬态过电压。

注: ① S_{N} 应用 MVA 表示,瞬态能量来自变压器励磁电流的中断,假设变压器的励磁电流为其额定电流的 0.05 p. u. 值。

② 给出的不重复峰值基于使用典型抑制器的情况,没有抑制器时,可达 10(p. u.)或更大。

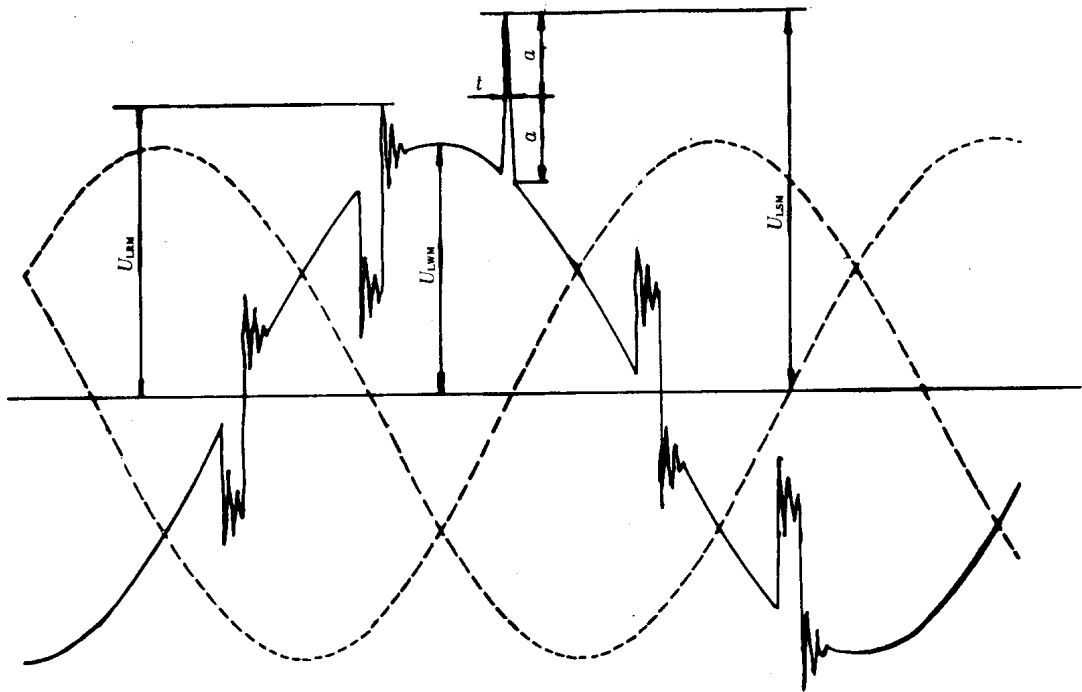


图 6 交流电压波形

图 6 示出了六脉波电力变流器(表 4 中序号 8 的联结方式)的幅值 U_{LSM} 和典型换相缺口的一个瞬态过程。

5.10 电路运行条件对变流器电路单元电压的影响

变流器电路单元不仅仅承受交流电源电压,有时还要承受理论电压与重复和非重复过电压之和。

图 7a 和图 7b 分别示出了施加于不可控和可控的变流器电路单元上的电压波形,假设换相数 $q=3$, 脉波数 $p=6$ 。

U_{RWM} 和 U_{DWM} 为施加于变流器电路单元上的峰值电压。

电压 U_{RRM} 和 U_{DRM} 为加于变流器电路单元的正、反向重复峰值电压,由所用半导体器件的特性和电路参量(例如电感,RC 网络等)共同引起。

电压 U_{RSM} 和 U_{DSM} 为加于变流器电路单元的不重复峰值电压,可能由线路断路器的动作,大气干扰等产生。这种电压可以预先设置浪涌抑制元件使之减至最小。

在变流器设计时,必须保证所选用的半导体器件的额定电压超过图 7 所示的三种电压的任何一种。

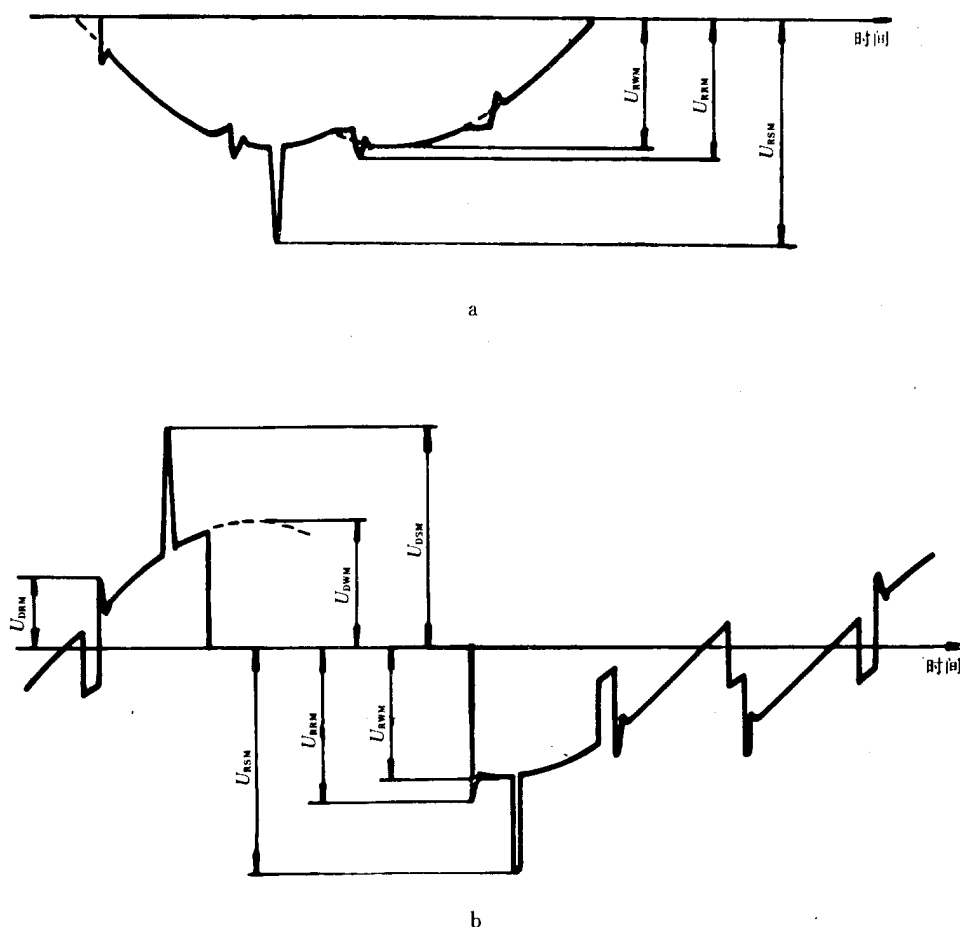


图7 电路运行条件对变流器单元上电压的影响

5.11 环境条件与变流器安全运行

5.11.1 环境温度或冷却媒质温度高于规定值时的运行

见附录 A。

5.11.2 变流器在高海拔地区的运行

见附录 B。

5.11.3 变流器无露运行

见附录 C。

5.12 触发装置的抗扰性能

采取必要的措施(例如增设滤波装置,增大触发电平,合理布线等)以减少并避免电网和周围环境对触发装置的电磁扰动。有关变流器触发装置的抗扰性能,可以根据不同情况和要求,在产品分类标准中作出规定,或由供需双方商定。

6 变流器主要参数的计算

6.1 运行参数的实际计算

变流器有关参量的计算,可使用本标准 5.5~5.7 给出的公式和图形进行计算,在多数情况下,利用这些图形和公式得到的计算结果,特别是对标准设计变流器来说,已足够精确。有条件时,使用计算机或可编程的计算器,可大大提高计算效率和计算的准确性,当需要进行多次反复计算时,尤为必要。

6.1.1 计算的假定

计算中使用下列假设：

- 均一联结；
- 平波电抗器无限大，即忽略直流电流脉动；
- 脉波数 $p=6$ ，换相数 $q=3$ ；
- 交流电压的不平衡可以忽略不计；
- 稳态运行，即直流电压和电流恒定；
- 重叠角 u 小于 $2\pi/p$ 。

6.1.2 初步计算

基波表观功率：

$$S_{1LN} = U_{di} \times I_{dN}$$

额定直流电流下的感性直流电压调整值：

$$U_{dxN} = \frac{\pi}{3} \times \frac{d_{xtN}}{e_{xtN}} \times \frac{S_{1LN}}{S_{com}} \times U_{di}$$

式中：

$$\frac{1}{S_{com}} = \frac{e_{xN}}{S_{tN}} + \frac{X_L}{U_{LN}^2} + \frac{1}{S_c}$$

$$X_L = 2 \times \pi \times f_{1N} \times L$$

S_c ——是系统短路容量；

L ——是电缆或电网感抗。

对于六脉波联结(见表4)：

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

感性直流电压调整率(值)：

$$d_{xN} = \frac{\pi}{3} \times \frac{d_{xtN}}{e_{xN}} \times \frac{S_{1LN}}{S_{com}}$$

$$U_{dxN} = d_{xN} \times U_{di}$$

额定电流下的阻性直流电压调整值：

$$U_{drN} = \frac{P_{rN}}{I_{dN}}$$

式中： P_{rN} ——电路电阻在额定负载下的功率损耗；

$$d_{rN} = P_{rN} / (U_{di} I_{dN}) = P_{rN} / S_{1LN}$$

注：① 设 $U_v/U_L = 1$ ，并假设全部交流电感已归入容量为 S_{com} 的变压器感抗 X_{tN} ，则得 d_{xtN} 计算公式如下：

$$d_{xtN} = \frac{I_L \times X_{tN} \times \sqrt{3}}{U_{LN}} \times \sin\left(\frac{\pi}{6}\right); I_L = I_{dN} \times \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$X_{tN} = \frac{U_{LN}^2}{S_{com}}; \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0.5; U_{LN} = \frac{\pi \times U_{di}}{3 \sqrt{2}}$$

因此：

$$d_{xtN} = 0.5 \times \frac{\pi}{3} \times \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_{com}} = 0.5 \times \frac{S_{LN}}{S_{com}}$$

② 变压器负载损耗可表示为：

$$e_{tN} \cdot S_{tN}$$

考虑其他附加损耗：

$$d_{tN} = \frac{e_{xN} \cdot S_{tN} + \text{其他损耗}}{S_{1LN}}$$

6.1.3 运行条件的计算

6.1.3.1 直流电压

对于六脉波均一联结,可用如下公式:

对整流器:

$$U_{di} \times \cos\alpha = U_d + V_{T0} + (U_{drN} + U_{dxN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

对逆变器

$$U_{di} \times \cos(\alpha + u) = U_d + V_{T0} + (U_{drN} - U_{dxN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

此处:

$$U_{di} = U_{v0} \times 3 \sqrt{2} / \pi$$

V_{T0} ——任何电流通路上,所有串联联结阀器件门槛电压之和;

I_d/I_{dN} ——直流电流的标么值。

对直流电动机调速用变流器,通常 U_d 的值为直流电动机反电势 E_d (正比于转速和电动机磁通) 加上额定电流下的电枢压降。

$$U_d = E_{dN} \times \frac{E_d}{E_{dN}} + R_a \times I_{dN} \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

在这种情况下,阻性电压调整值 U_{drN} 包括全部损耗(阀器件、电枢、直流和交流电缆、平波电抗器及变压器绕组)产生的电压调整值。

另外, U_d 是变流器直流端子上的电压,那么 U_{drN} 应不包括变流器之外直流电路的损耗(电缆,负载或电源的)产生的电压调整值。

U_{dxN} 包括交流电路的全部电感(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 6.1.2)产生的电压调整值。

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 $L \times (di/dt)$ (L 是直流电路的总电感)。

② 对于二极管变流器, $\alpha = 0, \cos\alpha = 1$

重叠角的余弦为: $\cos u = 1 - 2(U_{dx}/U_{di})$

输出电压为: $U_d = U_{di} - (U_{dr} + V_{T0} + U_{dx})$

6.1.3.2 位移角

下面给出的近似公式,大多数情况下能满足要求:

$$\cos\varphi_1 = \frac{U_d + V_{T0} + U_{drN} \times \frac{I_d}{I_{dN}}}{U_{di}}$$

更为精确的公式是:

$$\tan\varphi_1 = \frac{2u + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + u)}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + u)}$$

注: 在后一个公式中应使用弧度作单位。

6.1.3.3 整流或逆变运行计算

对整流运行,电流和电压认为是正的,同时有功功率和无功功率也认为是正的。

逆变运行时,电流和无功功率为正值,而电压和有功功率为负值。

计算实例如下:

已知参数:

	数 值	单 位
E_{dN}	450	V
I_{dN}	1812	A
S_c	115	MV·A
X_c/R_c	8	p. u.
S_{tN}	1.25	MV·A
e_{xN}	0.055	p. u.
e_{rN}	0.012	p. u.
U_{LN}	400	V
V_{T0}	2.1	V
R_s	9.93	mΩ

额定运行点：

	稳态整流运行	起 动	逆变运行	单 位
I_d/I_{dN}	1.03	1.6	1.175	p. u.
E_d/E_{dN}	1.055	0.0	-0.288	p. u.
U_{di}	540	540	540	V
U_{dr}	15.0	23.3	17.1	V
U	5.2	8.1	5.96	V
α	23.2	83.4	98.3	(°)
u	5.2	4.97	3.7	(°)
$\cos\varphi$	0.892	0.072	-0.176	p. u.
φ	26.9	85.9	93.3	(°)
S_{1L}	1.01	1.57	1.15	MV·A
P_L/P_{1L}	0.899	0.113	-0.213	MW
Q_{1L}	0.455	1.56	1.13	Mvar

6.2 由变流器负载引起的电源系统电压变化

6.2.1 基波电压的变化

电压的变化可以由如下公式估算：

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{S_{1L}}{S_c} \times \cos \left[\arctan \left(\frac{X_c}{R_c} \right) - \varphi_1 \right]$$

式中： X_c ——电源感抗；

R_c ——电源电阻。

注： X_c/R_c 可在4~10(p. u.)之间变化。

6.2.2 电压变化要求的最小 R_{sc} 值

电源系统短路容量与变流器基波表观功率之比为：

$$R_{sc} = \frac{S_c}{S_{1LN}}$$

考虑空载和尖峰负载之间的电压调整率时，最小 R_{sc} 为：

$$R_{scmin} = \frac{S_{cmin}}{S_{1Lm}} = \frac{\cos \left(\arctan \left(\frac{X_c}{R_c} \right) - \varphi_m \right)}{\left(\frac{\Delta U_L}{U_L} \right)_m}$$

式中: $S_{ILm} = U_{di} I_{dmN}$

I_{dmN} ——额定连续直流电流(最大值)。

例子:

假设 $X_C/R_C = 10$, 那么 $\tan^{-1}(X_C/R_C) = 84.29^\circ$

假设 $\cos\varphi_{1m} = 0.1$; 则 $\varphi_{1m} = 84.26^\circ$

因此:

$$\cos[\arctan(X_C/R_C) - \varphi_{1m}] \approx 1.0$$

如果 $(\Delta U_L/U_L)_m = 0.08$

那么:

$$R_{SCmin} \approx 1.00/0.08 = 12.5$$

6.2.3 变流变压器变比的变化

实际系统电压的变化可由两步或几步重复演算, 逐步逼近。

首先利用估计的对应于变压器额定分接的阀侧电压计算 P_1, Q_1, φ_1 。

然后对电压进行修正, 计算新的 $P_1, Q_1, \varphi_1, \Delta U_L/U_L$ 。

$$U_{L(n+1)} = U_{LN} \times \left[1 - \left(\frac{\Delta U_L}{U_L} \right)_n \right]$$

为选定最佳的变比和额定值, 可使用新的电压变化值进一步反复计算。当然, 由其他原因引起的电压变化值也应予以注意。

例:

额定值	符号	值	单位
直流电压	U_{dN}	5000	V
直流电流	I_{dN}	2200	A
直流电路电阻	R_a	0.136	Ω
变压器额定值	S_{IN}	15	MV · A
短路电压			
感性分量	e_{xN}	0.085	p. u.
阻性分量	e_{rN}	0.0087	p. u.
二次电压	U_{LN}	5080	V
阀器件电压降	V_{T0}	38	V
电源短路容量 (e_{xN} 和 e_{rN} 包括交流电缆)	S_C	150	MV · A

项目	演 算 步 骤		单位
	最 初	最 后	
U_L	5080	4745	V
U_{di}	6860	6408	V
I_d/I_{dN}	1.0	1.0	p. u.
e_d/e_{dN}	1.0	1.0	p. u.
U_{dx}	669	583	V

续表

项目	演 算 步 骤		单位
	最 初	最 后	
U_{dr}	66	57	V
α	32.7	27.6	(°)
u	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	MV·A
P_1	11.3	11.3	MW
Q_1	10.0	8.5	Mvar
$\Delta U/U$	0.076	0.066	p. u.

6.2.4 变压器额定值的增加

变压器的电流额定值随工作制而定。

变压器的电压额定值随系统阻抗的增大而增加。

空载下的供电电压确定了铁心尺寸和匝数,两线圈导体的截面则取决于电流额定值。

变压器的尺寸也随 $\tan\varphi_1$ 的增加而增大。

注: ① 为了提供高电流上升率时大的过载能力,变压器的额定值可能还要增加一些;

② 如果由于速度响应的原因,最小控制角较大时,平均位移因数减小,则变压器额定值增加。

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,变压器需要较大的电流额定值。计算因数 $0.816(\sqrt{2/3})$,表 4 第 8 栏)可能增为 0.85。

6.3 变流器无功功率耗的补偿

6.3.1 平均无功功率

大多数情况下,变流器的负载工作制是随生产的要求而变化的。因此,需要使用按最合理和最经常出现的情况选定基准工作制。

计算工作制各区段的平均有功和无功功率。

例子:

	等加速	稳 态	等减速	单 位
持续时间	5	2	4.5	s
Q_{avg}	36	12.2	21.4	MV·A
P_{avg}	18.5	13.9	-7.06	MW
S_{avg}	40.5	18.5	22.6	MV·A
P_{avg}/S_{avg}	0.457	0.754	-0.313	p. u.
S_{rms}	41.6	18.5	23.1	MV·A

一个循环的总持续时间为 11.5s(“正向”轧制速度)。

$$Q_{avg} = (36 \times 5 + 12.2 \times 2 + 21.4 \times 4.5) / 11.5 = 26.15 \text{ Mvar}$$

$$P_{avg} = (18.5 \times 5 + 13.9 \times 2 - 7.06 \times 4.5) / 11.5 = 7.7 \text{ MW}$$

$$S_{rms} = \sqrt{(41.6^2 \times 5 + 18.5^2 \times 2 + 23.1^2 \times 4.5) / 11.5} = 32 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

6.3.2 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,用如下公式计算:

$$Q_c = Q_{avg} - P_{avg} \times \tan \varphi_{req} = P_{avg} \times (\tan \varphi_{avg} - \tan \varphi_{req})$$

式中: P_{avg}, Q_{avg} ——有功和无功功率损耗;

$\tan \varphi_{avg}$ ——无补偿时计算出的 $\tan \varphi$;

$\tan \varphi_{req}$ ——要求的平均 $\tan \varphi$;

Q_c ——需要补偿的无功功率。

例子:

利用前面(6.3.1)例子的数据和结果

$$\tan \varphi_{avg} = \frac{26.2}{7.7} = 3.4$$

于是 $\tan \varphi_{req} = 0.4$; $Q_c = 26.2 - 7.7 \times 0.4 = 23.1$ Mvar

注: ① 可以看出补偿的无功在负载循环内的某一段时间内过剩,而在另一段时间内又不足,为了抑制电压的波动,可能需要采用某种调节措施,以在较接近所要求的补偿范围内进行补偿。

② 电压变化的允许极限是电压波动频度的函数。这种极限和电压闪变极限可由供需双方商定(参见 GB 10236)。

6.3.3 无功补偿引起的电压波动

用电容器调整功率因数时,若电源电压升高,则可提供较多的无功功率,反之,提供的无功功率减少。

考虑到上述事实,在计算电压波动时,采用一种近似的计算方法,即从系统的短路容量中扣除电容器装置的容量。

例子: 使用上例中的数据,且 $S_c = 315 \text{ MV} \cdot \text{A}$

a. 带 23.1Mvar 功率因数补偿时,空载下的电压波动:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{23.1}{315 - 23.1} = 0.0791$$

b. 尖峰负载时修正后的电压($2.3I_{dN}$ 和 $0.978U_{dN}$ 下加速):

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{26.3 - 23.1 + 23.5/8}{315 - 23.1} = 0.021$$

最大的电压波动为:

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

注: ① 对于电阻压降等产生的最小电压变化,所要求的 $\tan \varphi_{req}$ 可能不是最佳的。

② 在阻抗较高的系统,负载波动较大的情况下,可能需要快速可调无功补偿。如果无功功率每天只需要变化 2~3 次,则切换电容器装置就可以满足要求。静态开关或另一些方法可用于很频繁操作的场合,以代替常规的接触器和断路器,因为后者会产生机械磨损和补偿时间迟后,致使补偿作用也产生多次电压变化并使闪变的危害更为严重。

6.4 直流电压的谐波含量

直流电压中所叠加的交流电压(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:

$$\frac{U_h}{U_{di}} = \frac{\sqrt{(A+B-C)}}{D}$$

谐波次数: $h = kp$, p 为脉波数, k 为正整数。

式中:

$$A = (h^2 + 1) \times [1 + \cos(h\alpha) \times \cos\alpha]$$

$$B = 2 \times h \times \sin(h\alpha) \times \sin\alpha$$

$$C = (h^2 - 1) \times [\cos(h\alpha) + \cos\alpha] \times \cos(\alpha + u)$$

$$D = (h^2 - 1) \times \sqrt{2}$$

注: 如果交流侧电压不对称,将出现 $2f_1$ 次谐波分量,其幅值与 U_{dN} 的比近似等于负序电压对额定值(正序)之比。如门极信号在一个周期内不等距,也可能出现其他非特征谐波。

6.5 变流器运行时引起的电源电压畸变

6.5.1 换相缺口

电网换相变流器在换相期间使电网电压出现缺口,有关换相缺口的基本概念和计算(换相缺口的面积、宽度和深度),见 GB 10236 第 4.2 条。

6.5.2 同一电网系统多台变流器运行的影响

若多台变流器联接到同一电网之上,必需考虑变流器之间的相互作用,特别是与各个阀器件并联的 RC 电路的作用。

a. RC 阻尼电路的损耗将随变流器的数目而增加。对于六脉波桥式变流器单独在电网运行,各臂有 RC 电路,在最坏的情况下,换相缺口在电阻中引起的损耗(延迟角 $\alpha=90^\circ$):

$$P_{\max} \approx 3.5 U_v^2 \cdot C \cdot f_1$$

式中: C ——RC 电路中的电容;

U_v ——变流装置端子上的方均根电压;

f_1 ——基波频率;

P_{\max} ——一个 RC 电路的损耗。

实际上,变流器在 $\alpha=90^\circ$ 运行仅是很短的时间,那么损耗将会大大降低(也有例外,如造纸机、干燥滚筒的冷却可能以 0.02~0.05 p. u. 的速度转动数小时),此时,可以用下式计算:

$$P_{\text{avg}} \approx 3.5 \times U_v^2 \times C \times f_1 \times \sin^2 \alpha$$

如果数台变流器在同一网路运行,每个变流器 RC 阻尼电路的损耗将按其网侧电压缺口的大小和数目成比例地增加。

因此,在一个变流器中,由另外的变流器产生的缺口而导致的损耗,主要取决于两变流器的延迟角,可能的换相重叠角,并且与各自的阻抗有重要关系。

大多数情况下,不超过 4 台变流器连接在同一电网,只要 $\sin \alpha \leq 0.5$,就不会造成什么问题。若更多的变流器连接到同一电源时,这一问题就需要仔细考虑。

b. 若变流器之间的去耦电感较小,即连接线短且无网侧电抗器时,并联联结的变流器的阻尼电容会增加 di/dt 应力。

c. 变流器也将在电网中产生电压降落。这必须在变流器的技术指标中予以考虑,这对需要在逆变状态下工作的变流器尤为重要。

6.6 变流器运行在网侧产生的谐波

6.6.1 网侧基波电流的方均根值

a. 一次近似(忽略重叠角)见第 5.3.2 条;

b. 对三相桥式联结,当延迟角 α 和重叠角 u 已知时,可以用较精确的公式:

$$I_L^*(\alpha, u) = I_L \times \sqrt{1 - 3\varphi(\alpha, u)}$$

式中: I_L ——由 5.3.2 的方法给出的网侧电流的近似值。

$$\varphi(\alpha, u) = \frac{\sin u \times [2 + \cos(2\alpha + u)] - u \times [1 + 2 \times \cos \alpha \times \cos(\alpha + u)]}{2 \times \pi \times [\cos \alpha - \cos(\alpha + u)]^2}$$

角度使用弧度表示。

不同重叠角下的 $I_L^*(\alpha, u)/I_L$ 的值如表 5 所示。

表 5

u	$I_L^*(\alpha, u)/I_L$				
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=15^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=90^\circ$
5°	0.994	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
30°	0.960	0.953	0.951	0.950	0.950

c. 当相关的直流侧电感较小时,由于直流电流纹波的存在,网侧电流实际的方均根值可能比按 a 和 b 方法的计算值较大(参见 6.2.4 注③)。

6.6.2 网侧的谐波(使用六脉波变流器的近似方法)

在设计初始阶段,如果变流器容量仅由其变压器额定值确定,则可以用 6.6.2.1 和 6.6.2.2 的公式。

6.6.2.1 谐波电流

变流器理想网侧谐波电流, $I_{hL} = I_{1L}/h$, 其实际值可如下计算:

$$I_{hL} = I_{1L}/(h-5/h)^{1.2}$$

式中: I_{hL} ——谐波电流;

h ——谐波次数 ($5 \leq h \leq 31$);

I_{1L} ——基波电流。

基波电流由下式给出:

$$I_{1L} = S_{1L}/U_{LN} \cdot \sqrt{3}$$

注: ① I_{hL} 的公式是近似的,当 α 值较大时尤其如此。

② 根据直流负载电路电感,直流电流的纹波可能使 5 次谐波电流增大 0.3p. u. 或更大,而 11~(6k-1)次分量增加不多。7~(6k+1)次通常较低。

③ 由于供电电压不对称,可能存在其他非特征谐波,这降低了谐波消除设施的预期作用。

6.6.2.2 谐波电压

谐波电压 U_h 为谐波电流 I_h 与系统谐波阻抗 Z_h 的乘积。

$$U_h = Z_h \times I_h$$

在没有电容器装置和长的供电线路,系统阻抗大体上可以使用以下(适用于变压器的)公式:

$$|Z_h| = \frac{U_{LN}^2}{S_C} \times \sqrt{\frac{1+1/(Q_s \times Q_p)^2+1/(h \times Q_s)^2}{1/Q_p^2+1/h^2}}$$

式中: $Q_s = X_s/R_s$ (约为 8~12p. u.);

$Q_p = R_p/X_s$ (约为 80~120p. u.);

$S_C = U_{LN}^2/X_s$;

R_s ——与负载损耗相对应的串联电阻;

R_p ——与空载损耗相对应的并联电阻;

X_s ——主变压器的漏抗。

下式给出相对于相电压的第 h 次谐波电压的标么值:

$$\frac{|U_h|}{U_{LN}/\sqrt{3}} = \frac{S_{1L}}{S_C} \times \frac{I_{hL}}{I_{1L}} \times \sqrt{\frac{1+1/(Q_s \times Q_p)^2+1/(h \times Q_s)^2}{1/Q_p^2+1/h^2}}$$

6.6.3 谐波畸变与最小 R_{sc}

谐波畸变可以通过增加变流器的脉波数 p 来减小,通常的作法是使几个六脉波的基本变流器组合在一起。

特征谐波的次数由下式给出:

$$h = kp \pm 1, k \text{ 为正整数}$$

基本六脉波变流器单元的特征谐波和整个变流器的非特征谐波通常不能完全消除,其剩余值可能达到基本六脉波变流器额定值的 0.05~0.15p. u.。

如果对非特征谐波取保守值 0.15p. u., 并设 $Q_s = 8p. u.$, $Q_p = 100p. u.$, 对于 $p = 6, 12, 18, 24$ 计算出表 6 所列不同的 $S_{1L}/S_C = 1/R_{sc}$ 值。

表 6 还给出了四个最低序次特征谐波含量和缺口面积(以标么值 \times 角度表示)(A_E 为 $\alpha = 90^\circ$ 时的

值)。

表 6 低压系统要求的最小 R_{SC}

HD	p=6			p=12			p=18			p=24		
	R_{SC}	A_E	U_5	R_{SC}	A_E	U_{11}	R_{SC}	A_E	U_{17}	R_{SC}	A_E	U_{23}
r. m. s.		p. u.	p. u.		p. u.	p. u.		p. u.	p. u.		p. u.	p. u.
p. u.		×			×			×			×	
		角度			角度			角度			角度	
0.01	231	0.25	0.004 1	150	0.19	0.004 3	106	0.18	0.005 5	99	0.14	0.005 4
0.015	154	0.40	0.006 2	100	0.29	0.006 5	71	0.27	0.008 1	66	0.22	0.008 1
0.03	77	0.74	0.012 3	50	0.57	0.013 0	35	0.55	0.016 5	33	0.43	0.016 3
0.05	46	1.24	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 4	12	1.19	0.044 7
0.1	23	2.48	0.0409	15	1.89	0.042 8	10	1.84	0.055 5	9	1.49	0.055 9

注：① HD 为谐波畸变因数(相对谐波含量)。

② 对中压系统以 $R_{SCmin}=3 \times R_{SC}$ 作为最小要求值(允许谐振)。

③ 对高压系统以 $R_{SCmin}=2 \times R_{SC}$ 作为最小要求值(允许谐振)。

④ 不适用于有电容器柜或滤波器的系统。

⑤ 当脉波数 p 一定时, $HD \cdot R_{SC} = \text{常数}$ 。

⑥ 表列谐波畸变为变流器本身引起的畸变。

⑦ 给出的为单一缺口面积(不存在多重换相)。

⑧ 计算谐波畸变所使用的 S_{ILN} 对应于额定表观功率。

6.6.4 谐波电流频谱的计算

在 6.6.2.1 中给出近似公式适用以下情况: 仅仅知道除额定表观功率和负载标么值而不知道其它运行条件, 但延迟角 γ 和重叠角 u 为已知, 而直流纹波又忽略不计时, 可以使用如下公式(见图 8):

$$I_h = I_{IL} \times \frac{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos(2\alpha + u)}}{d}$$

式中:

$$a = \frac{1}{h-1} \times \sin \frac{(h-1) \times u}{2}$$

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

$$d = h \times \{ \cos \alpha - \cos(\alpha + u) \}$$

或 $d = 2 \times h \times d_x$

逆变运行时, 用裕度角 γ 代替延迟角 α 。曲线(图 8)假定直流电流是平滑的。

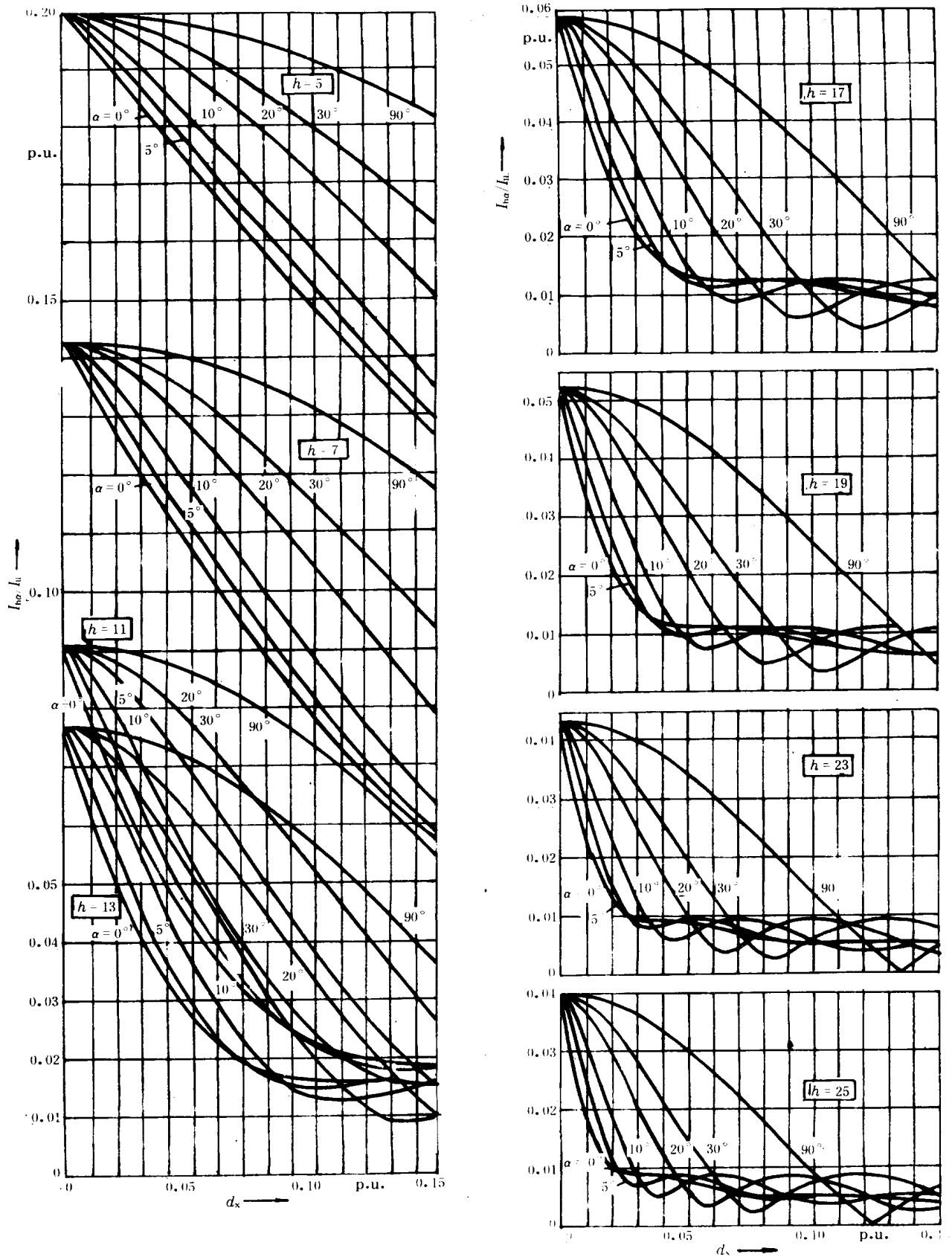


图 8 交流侧谐波电流的频谱($p=6$)
 d_x —直流电压调整率; α —延迟角(逆变时用 β)

6.6.5 谐波电流相移的估计

假定电流为梯形波,相位移给出如下:

基波电流的相位移 φ_1 ,见 6.1.3.2。

h 次的谐波电流的位移:

$$\varphi_h = (1 \pm k \times p) \times \varphi_1 + k \times p \times \Theta$$

式中: k ——正整数;

p ——脉波数;

Θ ——变压器相移。

6.6.6 谐波电流的叠加

若几个变流器由同一电源供电,且它们的相位关系,包括变压器的相移(如有)为已知,相同频率的谐波电流可以矢量相加。然而设计参数、运行条件等的微小变动会导致计算结果精度的降低,特别是在谐波次数高于 13 或 17 时,因为角度误差也会乘以 Kp (例如 12 或 18)。在谐波频谱的较高频率带内,非特征谐波可能显著超过特征谐波。

6.6.7 峰值和平均谐波频谱

谐波电流正比于基波电流,尖峰负载下的谐波电流和电压及其影响,特别是对电容器峰值电压的影响,应该加以检验。但是由于电容器和其它电路元件能承受短时过载,当它们的平均过载电压不太高时尤其如此。因此,电容器的方均根电流允许超过其额定电流(例如连续工作制额定电流的 1.3p.u.)。

6.6.8 变压器相移

采用适当的变压器绕组联结,可以利用谐波电流的相位移来消除一些谐波。

在变压器的实际设计中,特别是匝数少的情况,要完全抵消是不可能的,非特征谐波仍可能留有一定数值,对具有相同(总)额定值的等效六脉波联结来说,可达理论值的 0.05~0.2 标么值。

如直流电流纹波和相位不对称等其它因素也会对谐波的频谱产生影响。

表 7 变压器相移和谐波次数

脉波数	变压器相移(电角度)	谐 波 次 数	
		非 特 征	特 征
12	0,30	5~7,17~19,...	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,

6.6.9 顺序触发,双六脉波变流器

在某些场合,当认为有必要将无功减至最小时,可以利用变流器的顺序触发,其优点为:

在其直流电压为额定值或最大值的 0.5p.u. 以下时,无功功率损耗将大大减少,这特别适用于大型可逆轧机,因为轧轮咬钢就是在大约一半速度下进行的,稳态运行时间相对较短。

双六脉波变流器可由同一变压器的“YY”或“DD”绕组供电,只要:

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

与六脉波相比,谐波频谱更接近于 12 脉波。

然而,由于下列原因,这些优点可能不足以补偿由此带来的影响:

——对那些短时停电并非少见的网络,逆变器部分的运行有可能受到跳闸或熔断器熔断的影响;
——谐波频率常常与六脉波联结的典型频谱相似,只有当 $|\alpha_1 - \alpha_2| \approx 30^\circ$ 时,才有可能减少 5~7 次,17~19 次……谐波。因此,设计滤波器时,必须按此考虑;

——虽然减少无功功率可以降低电容器额定值,但谐波过载情况的存在将使电容器的尺寸增大。

因此,看来不可能就这类情况给出一个简单的规范。此时可根据供电系统和运行情况,对各种应用

领域进行比较。

6.7 功率因数补偿对谐波的影响

当变流器负载在系统中占有相当比重时,在某些情况下,可能由于大量消耗无功而使系统的功率因数低于规定值,这会带来诸如系统的其它电气设备过热、过载等一系列危害。为了节能和系统的安全运行,进行功率因数补偿是十分必要的。

有关功率因数补偿的详细资料可同时参见 GB 10236。

6.7.1 谐振频率

交流电动机可能显著地改变谐波阻抗,在初步设计时,使用图 9 可以估计谐振频率和放大倍数。假定系统阻抗为纯感性/阻性的, ($Q_s=8p. u. , Q_p=100p. u.$)。电缆电容应加到电容器组的容量中。

6.7.2 直接并联电容器补偿装置

根据经验,对没有变压器的变流器来说,在交流侧直接连接电容器进行补偿是不可取的,运行在最小交流电动机负载很小时尤其如此。

功率因数调整装置最好接在变流变压器的一次侧,以避免半导体器件受到过高的 di/dt 应力。使用扼流电抗器可以减少这种应力。尽管电容器的连接电缆存在一些电抗,但谐波电流仍会使电容器装置过载。

还应注意,对防无线电频率级干扰的滤波器来说,其电容器会受到谐波电流过载的危害。

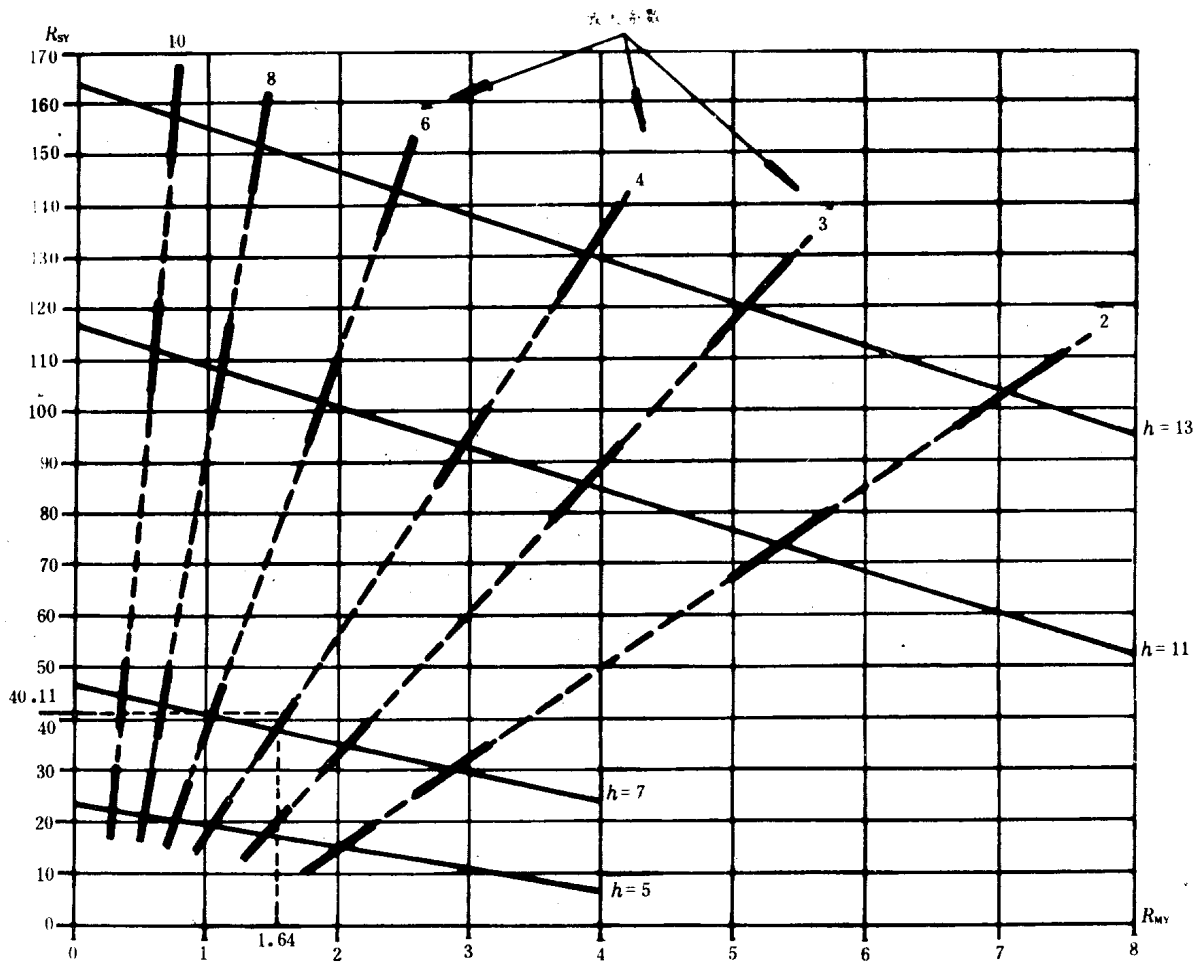


图 9 电容器额定值和交流电动机负载对谐振频率和放大系数的影响

注: 图中放大系数只在靠近实线交点位置存在,虚线部分不适用。

6.7.3 谐波频率的估算

电容器装置和系统电抗间的谐振频率由下式给出：

$$f_r = h_r \cdot f_1$$

此处：

$$h_r = \sqrt{S_C / Q_C}$$

Q_C = 电容器装置容量

如果交流电动机负载 S_M 足够大，可用图 9 估算，图中： $R_{SY} = S_C / Q_C$ ， $R_{MY} = S_M / Q_C$ 。

例：

电源： 92MV · A, 20kV；
交流电动机负载： 1MV · A (总容量 850kW $\cos\varphi_N = 0.85$)；
变流器负载： 500kV · A (直流电动机 400kW)；
供电变压器： 2MV · A, 20/0.4kV, $e_{xIN} = 0.06p. u.$ ；

调整功率因数需要的电容量：

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

400V 的母线短路容量：24.5MV · A；

预期谐波频率为： $f_r = \sqrt{24.5/0.61} \cdot f_1 = 6.34f_1$ ；

先计算坐标值： $R_{MY} = S_M / Q_C = 1/0.61 = 1.64$ ；

$$R_{SY} = S_C / Q_C = 24.5/0.61 = 40.2。$$

再根据图 9 找出调整后的谐波频率近似为 $7f_1$ ，预期放大系数约为 4。

R_{SC} 为 $24.5/0.5 = 49$ ，由表 6 (六脉波变流器) 得出，谐波畸变 HD 的方均根值应为 $0.05p. u.$ ，7 次谐波为 $0.02p. u.$ ，则放大系数将达 $0.02 \times 4 = 0.08p. u.$ ，这样的 7 次谐波，对工厂的输出母线来说还可接受，但对公共电网则就不然。

6.7.4 去谐电抗器

a. 电力电容器通常由许多电介质和金属薄膜绕制而成的电容元件串、并联组成，电容器电感引起的自振频率为 $10 \sim 50kHz$ 。

b. 除此之外，联结电缆的电感可能导致较低的谐振频率 (低到 $2 \sim 5kHz$)，这取决于电缆的长度、尺寸和布置情况 (相对于电容器装置，电缆的电容在几个 kHz 以下可以忽略不计)。

c. 为了限制冲击电流，常常使用电感为 $50 \sim 60\mu H$ 的限流电抗器 (中压系统)，对中压电容器装置来说，最终的串联调谐频率仍保持在额定频率的 $50 \sim 70$ 倍。

d. 如果发现并联谐振频率接近现有谐波之一，就可能有必要采用电感量比限流电抗器大得多的去谐电抗器。例如 12 脉波变流器中残留的 5 次和 7 次谐波如被放大 $5 \sim 10$ 倍的话，可能导致电容器过载及其它不希望有的影响。

e. 在使用去谐电抗器来改变谐振频率使之降低时 (低于 5 次，但不与 4 次，也不与 3 次谐波重合)，用附加电阻器会使阻尼改善。

f. 作为一次近似，可用下列公式：

$$1/h_r'^2 = 1/h_a^2 + Q_C / S_C$$

式中： $h_r' f_1$ —— 新的谐振频率；

$h_a f_1$ —— 调谐频率；

Q_C —— 电容器额定容量；

S_C —— 电容器母线排上的短路容量。

例:

$$Q_c = 2.56 \text{ Mvar};$$

$$h'_r = 4.25;$$

$$S_c = 125 \text{ MV} \cdot \text{A};$$

$$h_a = 5.35;$$

$$f_a = h_a f_1: \text{所需调谐频率。}$$

注: 此例中, 调谐频率高于 5 次谐波, 但如果有交流电动机或者有其他负载和若干 S_c 值需要考虑, 特别是当 R_{sc} 的值接近兼容极限时, 上式和图 9 可能有感不足。

6.7.5 脉动控制频率(载波频率)

在大多数公共电网中, 遥控和遥测(开关装置、电压控制、负载流量参数)是利用叠加上一个具有特殊频率的控制电压(其频率为 175Hz、180Hz、595Hz 或与电力系统的任何次重要谐波不同的其他频率)来实现。

在某些场合(可能存在扼流圈或去谐电抗器), 电容器装置的使用, 将增加系统在特定频率下的阻抗。此时可能将寄生的瞬态过程放大而危害纹波控制系统。

对这个问题, 必须与有关当局一起考虑, 可以利用扼流圈, 以防止在纹波控制系统的频率范围内有用信号被衰减和寄生瞬态信号的放大。

6.8 其他参数说明

6.8.1 随机控制角

当若干台变流器在不相关的工作制周期下同时运行时, 无功需要量和谐波电流频谱的估算, 可依据最恶劣的情况, 或掌握的经验数据, 例如参考工业类型, 应用方式, 或以往类似用途的经验。

按最恶劣的情况处理, 将使安全裕度过大, 从而导致尺寸、成本和损耗的增加。除非最恶劣情况的出现相对较多, 例如概率超过 5%, 或者每小时超过几分钟时, 否则这种方法不宜采用。

在多数情况下, 设计应依据最合理的条件, 即使运行性能可能达不到要求, 只要求检查时在恶劣条件下不发生损坏。

在某种情况下, 最佳设计可能需要考虑几种方案进行比较。

6.8.2 次谐波的不稳定性

次谐波所表现的不稳定性, 其中一些归因于过量的谐波畸变与变化不定的波形失真, 这种情况下, 来自变流器自身的干扰是由于电容器装置与系统电感之间非预期谐振而产生。对于频率高于 4 次谐波频率, 特别是对高性能、快速响应控制, 可能出现这种情况。

6.8.3 谐波滤波器

如果无法用改变谐振频率或电容器容量的办法来解决谐波问题(通常当畸变太大时如此), 就有可能需要谐波滤波器。这已是本标准之外的问题了, 可参考有关技术文献。

6.8.4 电缆电容的估计

若系统电压在 15kV 以上, 对多数系统来说电缆电容不能忽略不计。

表 8 数值乃根据电缆的每千米微法数等于 0.32~0.25(视绝缘水平和电缆截面而定)计算而得。

表 8 电缆的近似值 kvar/km

电源频率 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	1770
60	4	11	20	22	42	65	92	391	784	2121

6.9 变流器直流短路电流的计算

直流侧短路情况下,某些变流器的稳态电流值可以用表 9 估算。

表 9 给出的是对应于表 4 所列某些联结的短路电流标么值,即短路电流与(I_{dN}/e_{xN})的比。

表 9 变流器电流的短路值

表 4 所列的联结序号	阀侧电流方均根 (p. u.)	臂电流值			直流电流平均值 (p. u.)
		方均根 (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

6.10 抗扰等级的选用原则

(同时参考 GB 3859.1 的 5.2 和 5.7.7 条内容)。

6.10.1 变流器的抗干扰等级

a. 采用 A 级极限的变流器意味着须满足恶劣的电源条件,例如几个变流器直接接到一个公共变压器(变流器专用母线)而 R_{sc} 又较小。

这种变流器也可以用于以下情况,即超过 B 级或 C 级范围的概率虽然很少,但故障的后果却是代价昂贵或危险;也可以用于计划在以后增加其他变流器或干扰负载的场合。

b. 采用 B 级极限的变流器意味着只能满足多数场合预期的一般条件。这类变流器可以用在一般用途的工业系统,也可以用在其它负载,如交流电动机。

B 级变流器也可以用于恶劣的条件,但须设置一些补偿装置(浪涌抑制器、隔离变压器、谐波滤波器、静止补偿器),借以改善运行条件,以使干扰电平低于 B 级的抗扰极限,(或超出极限的可能很少),以满足要求的有效兼容条件。

c. 采用 C 级极限的变流器,可在很分散的情况下使用,有相对较高 R_{sc} 的小功率设备,在系统中不起关键性作用或负载相当恒定的装置。

这种变流器可以用于各种高品质系统,只要它们在这样系统中的使用不致显著改变干扰电平即可。

6.10.2 抗扰等级的选择

变流器抗扰等级的选择就是去把假定的工作条件与规定的抗扰等级的限定值进行比较。因此,应很好了解电源网络运行条件的要求。

假设供电网络的设计已遵循工程规范,对短路和过电压保护、功率因数等做了适当的考虑。

同样,假定电网容量足以提供负载所要求的(包括变流器的)有功和无功功率,而电压在允许极限以内。作为第一步,认为得到有关电网的常规参数(例如频率的变化,交流电压的大小,在稳态和瞬态条件下网络基本联结点处的不平衡度)是需要的。此时可能仅考虑变流器参数的基波分量,而忽略变流器的非线性。

然后,全面估计变流器的电气工作条件,所有与电压电流波形有关的情况应予以考虑。

这将使变流器能很好地适应其最终的应用和其供电母线的电气运行条件。但是,我们应该注意,这

些条件可能随所接负载的数量,供电母线的情况以及公共电网等因素的变化而变化。

电压参数和电流畸变的计算利用本章已给出的资料进行。

举例如下:

变流器遵照一个选定的抗扰等级(例如 B 级),那么,变流器产生的扰动与电网原有波动之和不应超过所选等级(B 级)的抗扰极限。因此,变压器的漏抗或交流电抗器通常是必要的,A 级变流器除外。

例子:

参考图 10,给出的是一个工业电站的电力配电系统(虚线以下)和某电网的有关单元(虚线之上)的简化图形。

与计算有关的额定值和参数也在图 10 中给出。

关于电源型式的假定:

MV:“公共配电系统”(用户考虑的范围之外)和“场内配电系统”;

LV1:用于易受干扰(抗扰能力低)的设备和履行 C 级抗扰能力的变流器的高品质电源(象 C_1 那样);

MV1, LV2:用于一般用途设备和履行 B 级抗扰能力的变流器的场内工厂配电系统电源(象 C_2 那样);

LV3:变流器专用电源:履行 A 级抗扰能力的变流器($C_3 \sim C_{10}$)。

变流器的等级:变流器 C_1 :C 级

变流器 C_2 :B 级

变流器 $C_3 \sim C_{10}$:A 级

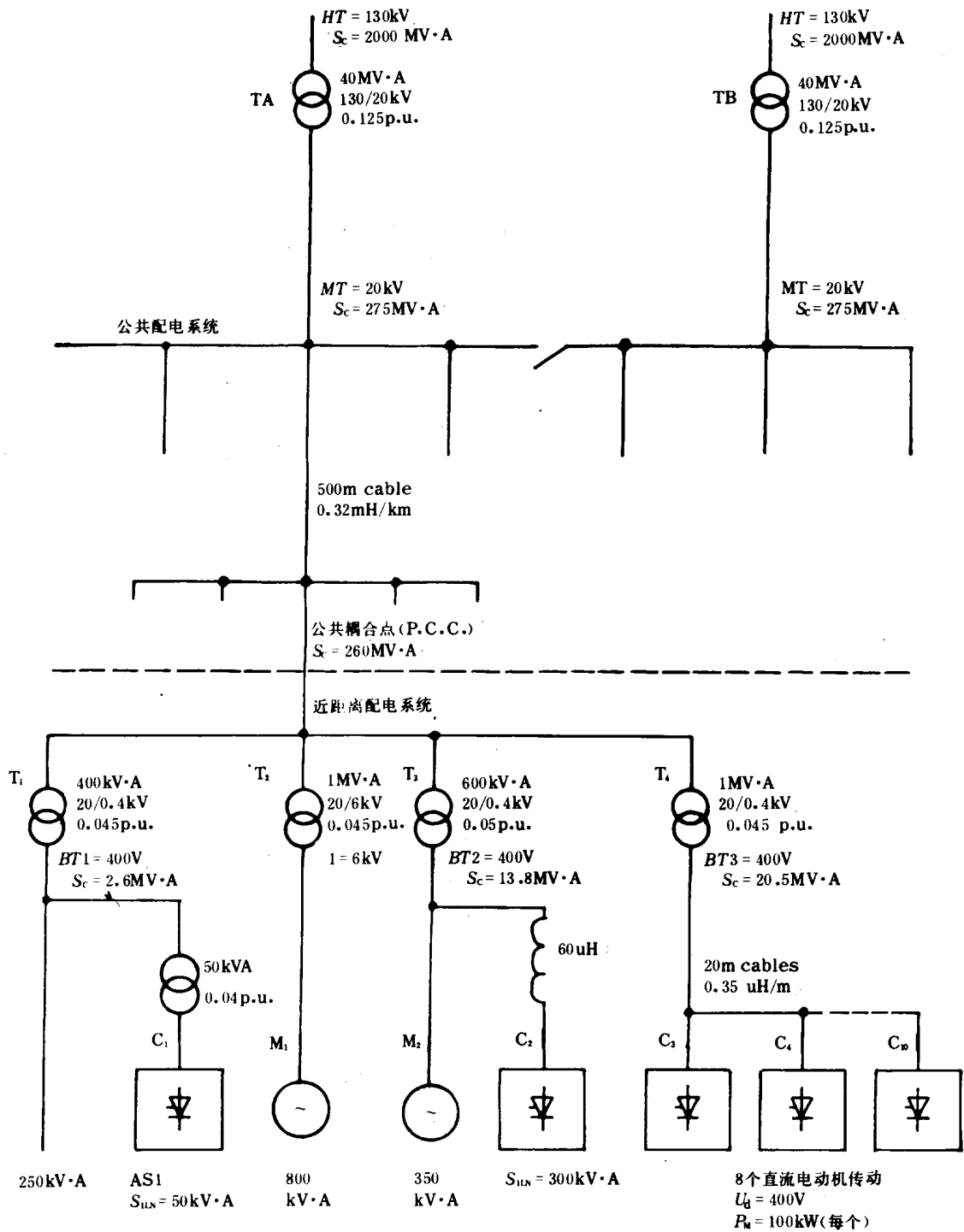


图 10 电力配电的例子

注：① 由 HV(高压)降到 MV(中压)的变压器(TA 和 TB)决不可并联工作。但在一台变压器出现故障的情况下，另一台变压器也可以在其过载能力(1.3 p.u.)范围内供给故障变压器所带的负载。这使公共配电网的短路容量不致发生任何变化。

② 本例不包括功率因数补偿电容器，通常，电压畸变的严格计算基本上是接近的。

③ 假定连接到 LV3 母线的直流电动机传动设备，等于一个有 0.8 分散因数的单变流器。

④ 本例不考虑交流电动机提供的短路功率。

表 10 给出了按图 10 电站的计算数据。

表 10 图 10 例子的计算值

	$1/S_c$ MV·A ⁻¹	S_c MV·A	总负载 kV·A	变流器负载 kV·A	THD (p. u.)	缺口深度 (p. u.)	$\Delta U/U$ (p. u.)
130kV 电源	$2\ 000^{-1}$	2 000	—	—	—	—	0.007
TA, 40kV·A 变压器	320^{-1}	—	—	—	—	—	—
20kV 母线	—	275.8	—	—	—	—	—
MV 电缆(0.32mH/km)	$7\ 957^{-1}$	—	—	—	—	—	—
P. C. C.	—	266.6	2 300	1 250	0.011 ¹⁾	0.1 ¹⁾	0.006
T ₁ 变压器	8.9^{-1}	—	—	—	—	—	—
LV1 电源	—	8.6	300	50	0.013 4	0.127	0.024
T ₂ 变压器	1.25^{-1}	—	—	—	—	—	—
变流器端子	—	1.09	—	50	0.106	1.0	—
T ₃ 变压器	12^{-1}	—	—	—	—	—	—
LV2 电源	—	13.76	600	300	0.05	0.38	0.03
350kV·A 电动机	—	2.275 ¹⁾	300	—	—	—	—
电抗器 60μH	8.5^{-1}	—	—	—	—	—	—
变流器端子	—	5.25	—	300	0.132	1.0	—
T ₄ 变压器	22.2^{-1}	—	—	—	—	—	—
LV3 电源	—	20.5	900	900	0.101	0.97	0.031
400V, 20m 电缆, 8/(0.35μH/m)	582^{-1}	—	—	—	—	—	—
变流器端子	—	20	—	900	0.104	1.0	—

注：① 谐波畸变缺口深度和电压调整率 $\Delta U/U$ 的计算值只考虑图 10 所示负载的影响，其他负载的作用对 MV 母线的影响应加上。

② 由表 10 的值可以看出，由于 P. C. C. (公共耦合点) 的相对稳定性，变流器负载没有问题可以承受。表 10 中给出的三个数值，在 P. C. C. 处的总谐波畸变(THD)和缺口深度的和，是三个变流器负载分别作用的结果。

③ 在变流器 C₂ 的交流供电中需要交流电抗器，以避免 LV2 处的缺口大小超过 B 级的最大允许值。

$$1) \text{YHD} = 0.000\ 4 + 0.002\ 6 + 0.007\ 8 = 0.010\ 8 \text{ p. u.};$$

$$\text{缺口深度 } D = 0.004\ 1 + 0.02 + 0.075 = 0.1 \text{ p. u.};$$

$$S_c = 0.35 \times 6.5 = 2.275 \text{ MV} \cdot \text{A} (I_{\text{start}}/I_N = 6.5).$$

7 关于检验的补充说明

7.1 由短路试验估算功率损耗的介绍

7.1.1 单相联结

功率损耗由直接测量额定负载下的输入和输出来决定，或者通过测量各种损耗而进行计算，由制造厂选择。

7.1.2 多相双拍联结。

可以用方法 A1、B 或 C(见 7.3)来测定短路功率损耗。

7.1.3 多相单拍联结。

可以用方法 A2(A1 的改进)、B、C、D、E(见 7.3)诸方法测定短路损耗功率。

7.2 由短路法计算功率损耗的步骤

将堆或装置的直流端子短接，其交流端子通过足够大的电抗器供电，以使输入电流基本正弦，电压

应足以在额定频率下产生所要求电流值流动,在堆或装置的直流端子上测量输入功率。测量使用精密的瓦特计,不因运行条件(例如电压降低,杂散磁场等)而影响测量结果。

依次在额定直流电流 I_{dN} 和 kI_{dN} 电流下快速地进行两次短路试验其中:

$$k = \frac{\text{实际工作中臂电流的波形系数(不考虑重叠角)}}{\text{试验时臂电流的波形系数}}$$

首先在 kI_{dN} 电流下达到平衡温度后测量损耗 P_2 , 然后尽可能快地将电流减少到 I_{dN} 后测量损耗 P_1 。正常工作对应于额定直流的损耗 P 可用下式计算:

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

若直流短路连接的导线和分流器的损耗相当可观,则应对其进行测量,并从 P_1 和 P_2 中扣除。

这样,损耗的计算是在预期的忽略重叠角的情况下进行的。

试验方法在下述假设条件下成立(见 GB 3859.1 中第 6.4.5 条):

- a. 阀的正向电压降用一恒定分量(门槛电压)加上一个与电流成正比的阻性分量表示;
- b. 由于电流波形的差异,所引起的在正常工作情况下和在试验时杂散损耗的不同,可以用试验电流较大的方均根值来补偿;
- c. 变流器直流侧电路的电感忽略不计。

注: 双拍联结时,由于直流电路电感的惯性作用,可能使直流输出电流大于对应的交流电流。

根据所使用的连接,试验按第 7.3.1~7.3.6 条进行。工作时,均压电阻,阻尼电路和浪涌抑制器(如有)也将产生损耗,则应予以计算并加到总损耗之中。这种情况下,晶闸管变流器的控制角应维护在最小允许值。

7.3 试验方法

7.3.1 方法 A1

本方法适合于双拍联结,试验线路示于图 11。这个方法在 $1.1I_{dN}$ 和 I_{dN} 两种电流下进行测量,在额定直流电流下工作时,装置的功率损耗为:

$$P = 1.91P_2 - 1.1P_1$$

此式实际上假定试验时波形为正弦波。

如不是正弦波电流,则对于 I_{dN} , P_1 和 P_2 的乘数,按第 7.2 条给出的方法确定。

当试验设备不能将电流调节到上述规定的准确数值时,则可以在稍高于或稍低于规定的电流值下进行测量,然后在这些所测量的瓦特计的读数中间,用内插法得到输入的有功功率。

注: 实际工作时,臂电流的波形因数(不考虑重叠角)为 $\sqrt{3} = 1.73$; 试验时正弦半波的波形系数为 $\pi/2 = 1.57$;

波形系数的比值 $k = 2\sqrt{3}/\pi = 1.1$, 因此,第 7.2 条中的公式中的系数使用具体数值。

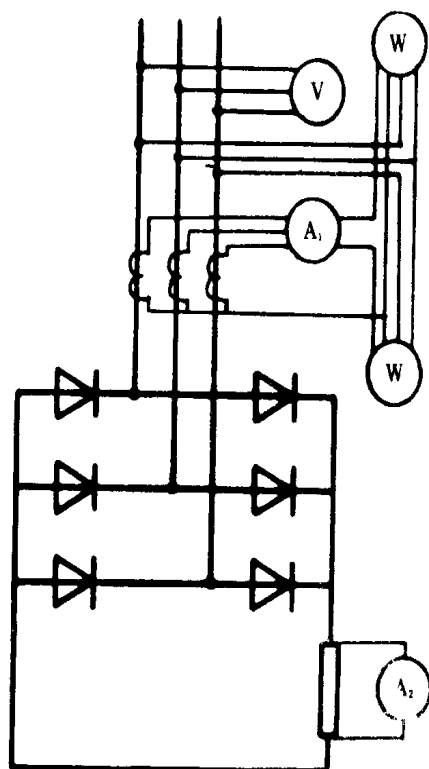


图 11 试验方法 A1

A_1 —交流安培计,指示方均根值; A_2 —直流安培计,指示平均值; V —交流电压表,指示方均根值; W —瓦特表

7.3.2 方法 B

这个方法适用于单拍和双拍联结。

当包括变压器在内的整套变流器由同一制造厂供货时,如果只测量变流器总损耗比较简单,则可以使用类似于 A1 的方法进行测量,但是瓦特表要接到变压器的网侧。

变压器应达到对应于 P_2 时的稳态温度,其铜耗应折算到规定温升 20K 的基准温度。

变压器温升部分确定可以使用方法 B 进行测量。

7.3.3 方法 C

本方法适合单拍和双拍联结。

可以使用一个校验过的试验变压器代替试验方法 B 的特定的整流变压器。整流装置的损耗等于从 P 中减去试验变压器损耗后的值。

7.3.4 方法 D

本方法适合单拍联结。

本试验按图 12 所示电路,以短路试验的方法进行。

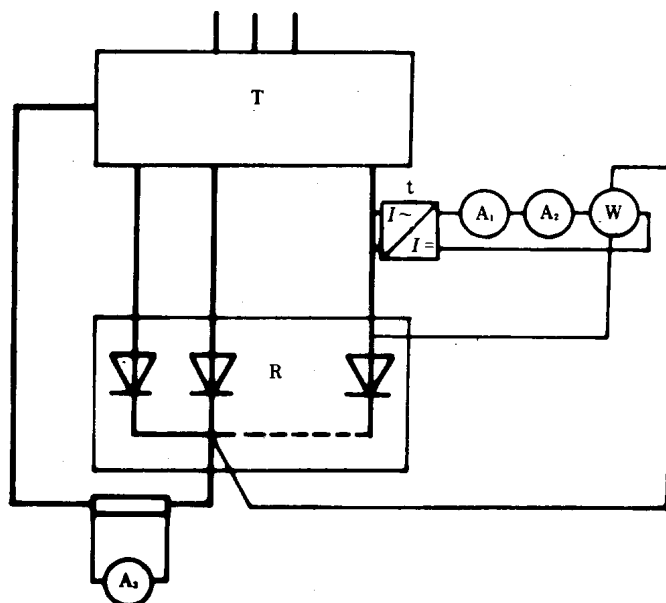


图 12 试验方法 D

R——有 n 个臂的受试整流堆或装置(图中只示出第一、二和最后一个臂); T——整流变压器, 合同要求的任何变压器, 或等效的低压试验变压器; t——频带足够宽的直流电流互感器, 其电流比为 a ; W——低压瓦特计(电流线圈的电阻小于 $\frac{r}{1000}$), 指示的功率为 P ; A_1 ——交流安培计, 指示方均根电流为 I_1 ; A_2 ——直流安培计, 指示平均电流为 I_2 ; A_3 ——直流安培计, 指示平均电流为 I_3 ;

安培计 A_2 和 A_3 读数之间的关系应予校对, 以检查整流臂电流的测量结果。

注: 当 R 额定电流很小, 则 t 可以省去不用, 而直接用 A_1 、 A_2 和 W 测量整流臂的电流。

在臂的平均电流为 $I_2 = I_{dN}/n$ 和 $I_2 = k \cdot I_{dN}/n$ 下进行测量, 其中:

n ——堆或装置中的并联臂数;

k ——对 120° 导电角的多相电路等于 $3/FF$, 对 60° 导电角的多相电路等于 $6/FF$,

FF ——等于 I_1/I_2 , 在 $I_2 = I_{dN}/n$ 下进行试验时的臂电流波形系数, I_1 和 I_2 由安培计 A_1 和 A_2 测出。

若以 P_1 和 P_2 分别表示当臂的平均电流为 $I_2 = I_{dN}/n$ 和 $I_2 = kI_{dN}/n$ 时瓦特表的读数, 则整流堆和装置在额定直流电流 I_{dN} 下的损耗功率为:

$$P = n \times a \times \left(\frac{k+1}{k} \times P_2 - k \times P_1 \right)$$

式中: a ——为互感器 t 的比值。

如果供货者能确保整流堆和装置各臂基本一致, 那么只要在两个臂上进行试验就可以认为足够了。其中一个臂应处于装置的中间, 另一个处在外侧, 然后取二者损耗的平均值。所选择的二个臂不应相差 180° 电角, 也不应位于平衡电抗器(如有)的同侧。

在损耗测量中, 不宜包括的装置的其他所有损耗, 均应单独进行测量或计算, 并加到功率损耗 P 中。

如果试验设备不能将电流调节到上述规定的精确值, 则可以在稍高或稍低于上述规定值的电流进行测量, 然后在这些测量值之间用内插法求得规定电流下输入的有功功率。

注: 在大电流装置中, 方法 D(图 12)和 A2(7.3.6)测量臂损耗时, 用附加在瓦特计直流端的臂和通路(汇流排)之间连接处产生的电压来实现。瓦特计仅测量臂的损耗。

通路的损耗另外用计算得到, 或单独进行测量。

最好的方法是短路试验时, 在额定电流下沿通路的各段测量平均压降(用毫伏), 然后用下式给出通路的各段实际工作时的损耗。

$$P = UI(FF)^2$$

式中： U ——段的压降，平均值；

I ——段的电流，平均值；

FF ——段实际工作电流的波形系数。

7.3.5 方法 E

本方法适合单拍联结。

如果一台整流装置可以与另一台等同的装置构成双拍联结，则损耗的测量可按 7.3.1 所述的方法（方法 A1）进行。

当联结两台整流装置构成为一个双拍联结时，应注意避免在大电流母线排联结中损耗的显著变化。

7.3.6 方法 A2

本方法适合单拍联结。

方法 A2 与方法 A1 基本相同，用直流电流互感器连接到单拍联结的一个换相组的汇流排上，如方法 D 的图 12 所示。

交流和直流安培计的使用同方法 D。

测量可在各单个换相组上依次进行并相加，采用本方法进行试验时，应调节热转移媒质的温度，以得到与正常运行时固有的温度基本相同。

8 变流器的负载电流与结温计算

8.1 额定尖峰负载电流值的说明

所允许的尖峰负载的全部数据应以电流的幅值、持续时间和重复频率或空闲时间给出。（参见 GB 3859.1 中第 5.6.3 条）

在找不到合适标准工作制等级（见 GB 3859.1 中第 5.6.3 条）情况下，有许多可用的方法描述尖峰负载。图 13、图 14 可以作为描述单个尖峰负载和重复尖峰负载的基本方法。

当基本负载电流 I_b 小于 I_{dmN} ，幅值为 I_{p1} 的尖峰负载可以叠加时间为 t_p ，而唯要有足够长的间隔，以保证在每一次尖峰负载之前得到平衡温度。

其值为 I_{p2} 的重复尖峰负载，可以叠加的时间 t_p ，间隔时间为 T 。值得说明的是，例子所给出的重复负载的图形仅对基本负载 I_b 为一种单一值时才是正确的。

无论采用何种形式，均应规定冷却条件。

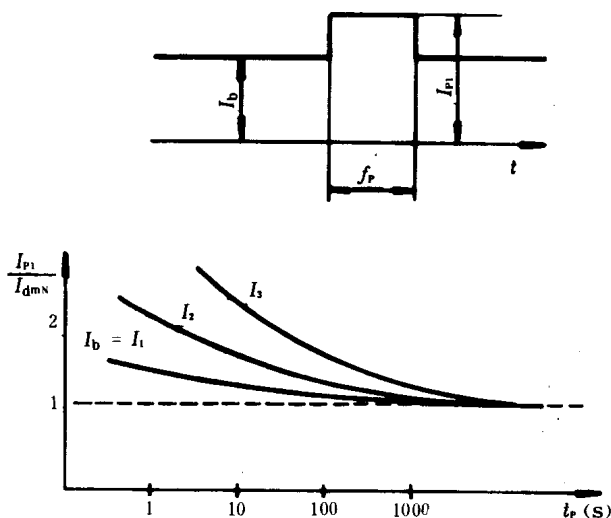


图 13 单一尖峰负载

I_{dmN} ——额定连续直流电流 $I_{dmN} > I_1 > I_2 > I_3$; I_1, I_2, \dots ——基本负载电流 I_b 的不同值

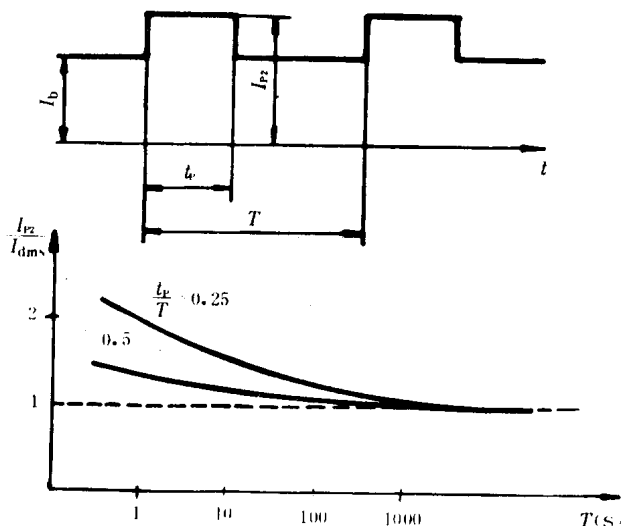


图 14 重复尖峰负载

8.2 与等效结温有关的定义和字母符号

8.2.1 字母符号

Θ_j : 等效结温(见第 8.2.4 条);

$\Theta_{j(\text{avg})}$: 电源频率的一个周期内等效结温的平均值;

$\Theta_{j(\text{avg})n}$: 指 t_n 瞬间的 $\Theta_{j(\text{avg})}$;

$\delta\Theta_j$: 最高瞬时等效结温与 $\Theta_{j(\text{avg})}$ 之差;

Θ_j : 等效结温最大瞬时值;

Θ_x : 规定点 X 的温度, 例如环境温度;

P_{avg} : 在电源频率一个周期内通态或正向功率损耗的平均值;

\hat{P} : 通态或正向功率损耗的最大瞬时值;

\hat{P}_{avg} : P_{avg} 最大瞬时值;

P_M : 在一个负载循环周期, P_{avg} 的平均值;

ΔP_v : 功率损耗在 t_v 瞬间的跃变;

k : 上述功率跃变在 T_n 期间的次数。

t_1 : 变流器联结的一个臂的等效导通周期;

t_p : 尖峰负载脉冲的等效持续时间;

f_{1N} : 额定电源频率;

T : 负载循环的一个周期;

T_{1N} : 对应于额定电源频率的一个周期;

R_{th} : 热阻(见第 8.2.2 条);

R_T : 对应时间间隔 T 的 R ;

Z_{th} : 瞬态热阻抗(见第 8.2.3 条);

Z_{nv} : 对应于 $t_n - t_v$ 期间的 Z 值;

Z_{t1} : 对应于 $t1$ 期间的 Z 值;

Z_T : 对应于 T 期间的 Z 值;

Z_{t1+T} : 对应于 $t1+T$ 期间的 Z 值;

Z_{tp} : 对应于 t_p 期间的 Z 值;

8.2.2 热阻 R_{th}

所规定的两个点或部位之间的温差与在热平衡条件下该两点或部位之间的热流的商。

注：大多数情况下，可以假定热流等于功率损耗。

8.2.3 瞬态热阻抗 Z_{th}

为下述 a 与 b 之商：

- a. 在一个时间间隔之后所得到的等效结温与外部规定点之间的温差变化；
- b. 在引起温度变化的同一时间间隔开始时的功率损耗的阶跃变化。在这个时间间隔开始之前，温度的分布不随时间变化。

注：瞬态热阻抗作为时间间隔的函数给出。

8.2.4 等效结温 θ_j

根据规定的半导体器件的热电性能的代表法所计算的半导体材料内部的温度。

注：① 等效结温不是半导体器件所必需有的最高温度。

② 基于等效结温、热阻和瞬态热阻抗与运行方式相对应，功率损耗可以用规定的特性曲线来计算。

8.3 通过等效结温的计算确定承受尖峰负载能力

等效结温的计算可为确定二极管或晶闸管堆、装置承受尖峰负载的能力提供依据。但是，通常情况下，该温度不只是作为评定尖峰负载能力的校正值。

由于负载循环的复杂性，对许多应用，特别是对于重复负载，复杂的等效传热网路，或温升和损耗间的非线性关系，计算等效结温时使用计算机程序计算等效结温是比较方便的。

等效结温计算方法在第 8.3.2~8.3.5 条说明。

计算方法在下述假设条件有效：

- a. 计算等效结温仅依据所考虑的电力半导体器件的功率损耗；在其它条件，各半导体有其自身冷却媒质的传热途径，实际上与堆或装置的其它功率损耗单元的传热途径无关；

注：这种情况不适用例如那些四象限装置，在该类装置中，属于正向和反向分组的电力半导体共用同一个散热体。

- b. 在等效结温和参考点之间的热阻或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：这种情况在对流冷却时通常不能达到；

- 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。特别是在自换相变流器或大电流的电网换相变流器中，这种由电压产生的损耗可能须作考虑。

8.3.1 施加于半导体器件的功率脉冲波形的近似(图 15)

用矩形波脉冲等效功率损耗必须选择：

- a. 与实际功率脉冲峰值相同；
- b. 调整脉冲的持续时间，给出与实际功率脉冲相同的平均值。

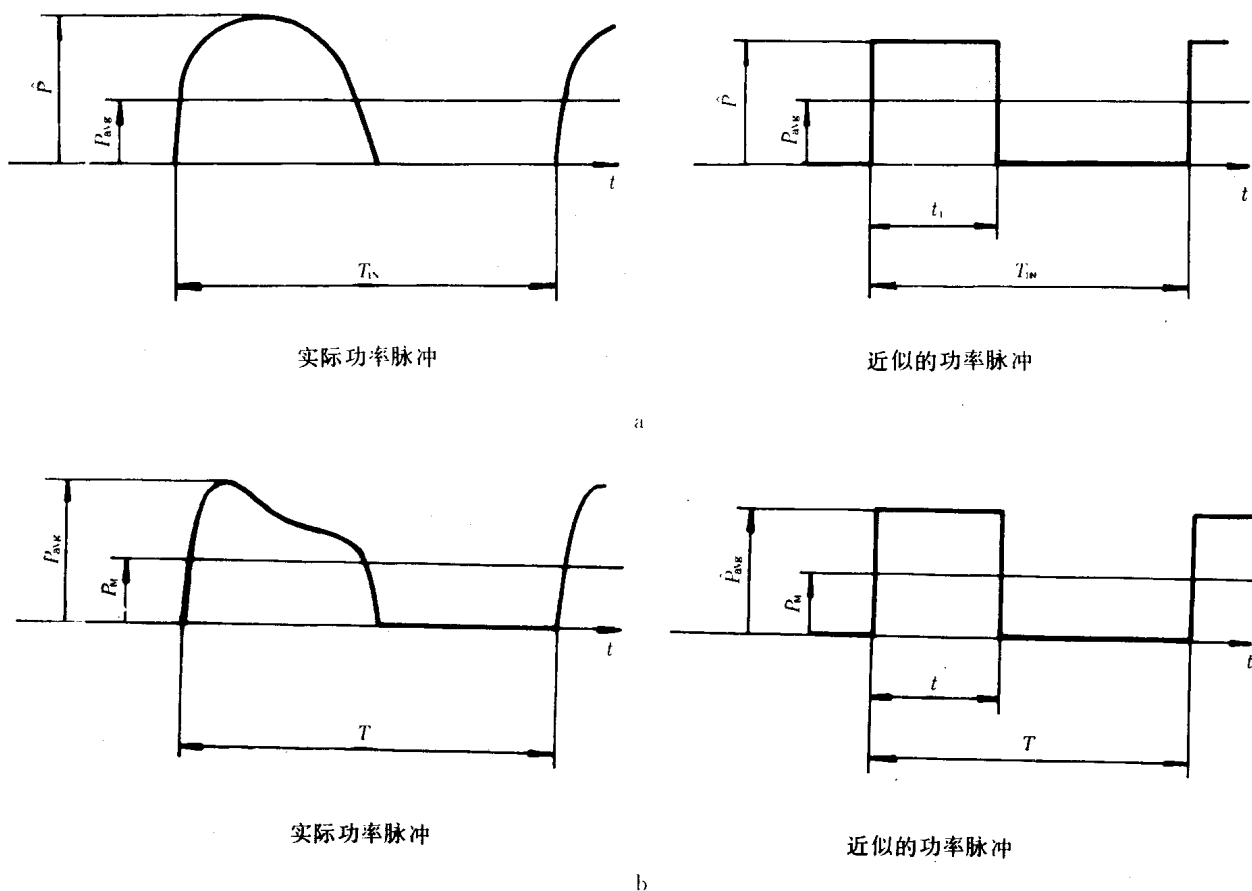


图 15 施加于半导体器件的功率脉冲波形的近似

这种功率损耗的近似方法适用于：

- a. 电源频率的一周期，即等于一个变流器电路单元的导电周期；
- b. 变流器负载是循环的，有数分钟的周期。

对于 a:
$$t_1 = \frac{P_{avg}}{P} \times T_N$$

对于 b:
$$t_p = \frac{P_M}{P_{avg}} \times T$$

在某些情况下，尤其是对于脉冲的持续时间大于 1s 和实际的功率损耗波形与矩形波相差较大时，可能需用数个不同幅值和持续时间的矩形波构成近似功率脉冲，以得到最精确的结果。各脉冲推荐选择具有相同的持续时间和与实际功率损耗脉冲截面相同的平均值来代替。

8.3.2 温度计算的叠加法

本方法是基于使用瞬态热阻抗曲线，假设功率损耗根据第 8.3.1 条近似的方形脉冲表示。

在时间 t_n ，两规定点 A 和 B 之间的温差 Θ_n 为在 t_n 之前的全部功率跃变 ΔP_v 影响下温度的总和。

$$\Theta_n = \sum_{v=1}^{n-1} \Delta P_v \times Z_{nv}$$

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。

表 11(8.3.5) 为本方法的例解。

8.3.3 连续负载等效结温计算

这种情况下，等效结温随交流电源电压的频率而变化。

功率损耗由 5.3.1 给出的方法近似，等效结温与时间的关系曲线由图 16 给出。

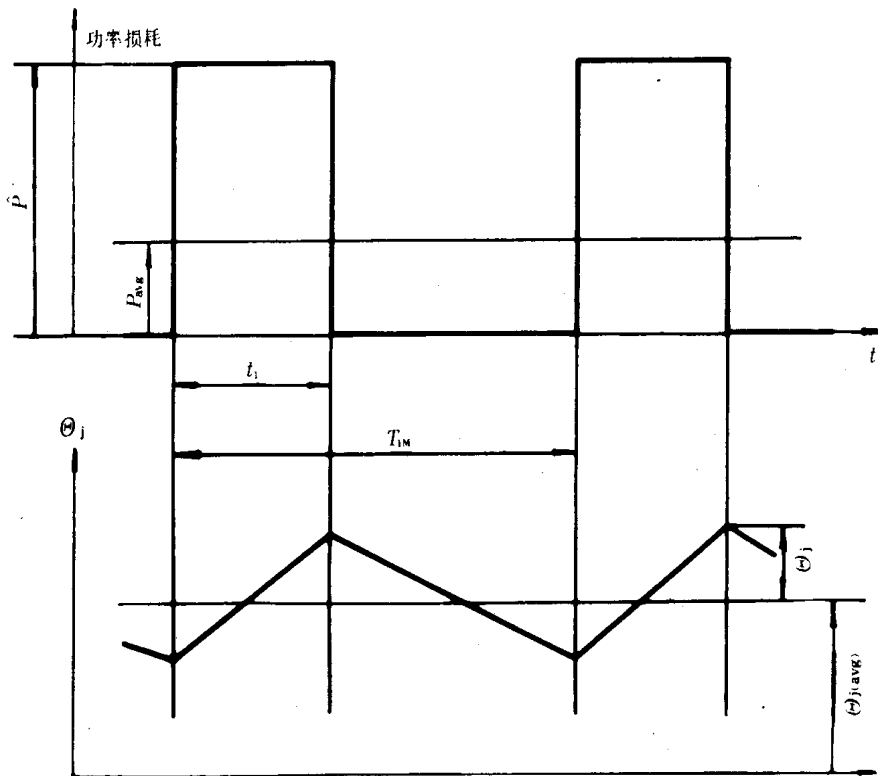


图 16 连续负载下等效结温的计算

8.3.3.1 等效结温平均值的计算

等效结温的平均值由下式给出：

$$\theta_{j(avg)} = Q_x + P_{avg} \cdot R_{th}$$

8.3.3.2 最大瞬时等效结温的计算

在一周范围内，最大瞬时等效结温用下式计算。

$$\theta_j = \theta_{j(avg)} + \delta\theta_j$$

温度飘移 $\delta\theta_j$ 的精确值，可以用第 8.3.2 条所述的功率脉冲叠加法计算。

$$\delta\theta_j = \frac{T_{1N}}{t_1} \times P_{avg} \left[\sum_{v=1}^{\frac{n}{2}} Z_{n \times (2v-1)} - \sum_{v=1}^{\frac{n-2}{2}} Z_{n \times (2v)} \right] - P_{avg} \times R_{th}$$

正常的 $\delta\theta_j$ 小于 $\delta\theta_{j(avg)}$ ，推荐使用下面的近似公式。

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

8.3.4 周期性负载时等效结温的计算

这种情况下，等效结温随交流电压频率时间而变化(8.3.3)，但同时随较低的负载变化频率而变化。

由于结在一个导电周期的加热和冷却而引起的温度飘移，就连续负载而论，可以按照 8.3.3 条的相同方法计算。在负载循环的某一时刻，一个电源频率周期内等效结温的平均值按 8.3.3.1 条给出的方法计算。

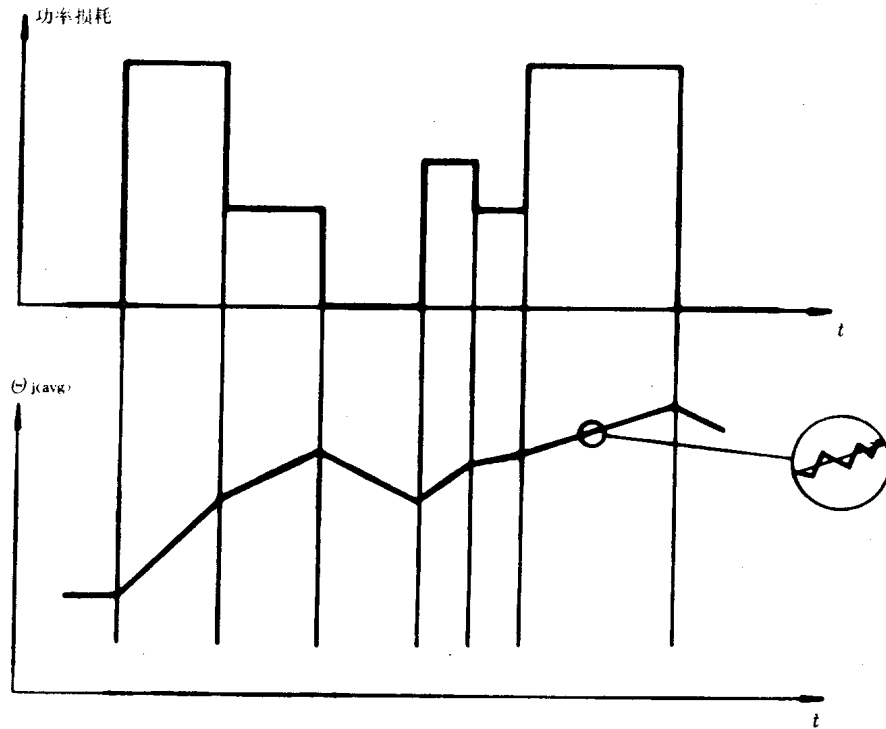


图 17 周期性负载的等效结温计算

在时间 t_n 的平均值等效结温用下列公式给出:

$$\Theta_{j(av)n} = \Theta_x + \sum_{v=1}^{n-1} \Delta P_v \times Z_{nv}$$

t_n 等效结温的最高瞬时值:

$$\Theta_j = \Theta_{j(av)} + \delta\Theta_j$$

8.3.5 几种典型应用的等效结温计算

表 11 等效结温的叠加法计算

负载条件	功率损耗的图形	平均等效结温曲线	计算公式
单负载脉冲			$\Theta_{j(av)2} = \Theta_x + P_1 \times Z_{21}$ $\Theta_{j(av)3} = \Theta_x + P_1 \times Z_{31} - P_1 \times Z_{32}$
负载脉冲列			$\Theta_{j(av)2} = \Theta_x + P_1 \times Z_{21}$ $\Theta_{j(av)4} = \Theta_x + P_1 \times Z_{41} - P_1 \times Z_{42} + P_3 \times Z_{43}$ $\Theta_{j(av)6} = \Theta_x + P_1 \times Z_{61} - P_1 \times Z_{62} + P_3 \times Z_{63} - P_3 \times Z_{64} + P_5 \times Z_{65}$ 等等
等幅负载脉冲列			$\Theta_{j(av)n} = \Theta_x + \sum_{v=1}^{\frac{n}{2}} P_0 \times Z_{n(2v-1)} - \sum_{v=1}^{\frac{n-1}{2}} P_0 \times Z_{n(2v)}$ ($n = \text{偶数}$) $\Theta_{j(av)n} = \Theta_x + \sum_{v=1}^{\frac{n-1}{2}} P_0 \times Z_{n(2v-1)} - \sum_{v=1}^{\frac{n-1}{2}} P_0 \times Z_{n(2v)}$ ($n = \text{奇数}$) 或近似为: $\Theta_{j(av)n} = \Theta_x + P_0 \times \left[Z_{tp} - Z_T + \left(1 - \frac{t_p}{T} \right) \times Z_{(T+t_p)} + \frac{t_p}{T} \times R_T \right]$ ($n = \text{偶数}$)

9 变流器运行

9.1 稳定

变流器可以具有内部或外部的闭环控制系统,或包括其他用来稳定其输出量(如电压、电流等)的装置。

如果变流器具有内部闭环系统,则该闭环系统的基准值可以是电的或机械的,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,引入到变流器的是来自该环的控制信号,而变流器可以看作为一个放大器,它是所设计设备总控制系统的一个组成部分。

9.2 静态特性

控制系统的静态特性是指在因整定值或对抗量突然变化所引起的瞬态过程消失之后的那些特性。

如果变流器内部有稳定装置,应针对所有的影响量(例如网侧电压、交流系统条件、负载特性等)所规定的变化范围来确定其静态特性,该特性应包括所设计变流器之稳定量的整定范围。

若变流器是外部闭环系统的一部分,则静态特性应作为某些量在指定条件之下变流器输入信号和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,例如网侧电压,交流系统条件,负载特性等。

9.3 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的响应时间或者响应频率给出,或者也可以是供货者和用户协商一致的任何适当方式给出。

动态特性应对那些对输出有主要影响的量的变化,特别是整定值或控制信号的变化,以及负载的变化做出说明。

没有必要就那些对输出量只有很小影响的量的变化来说明控制系统的动态特性。

9.4 单变流器和双变流器的运行方式

9.4.1 单变流器联结

由于晶闸管(反向阻断三极晶闸管)只在一个方向上有通态区,因此,在单晶闸管变流器中通过反向电流是做不到的。然而,在均一晶闸管联结中,直流电压可用相控方法反向。

图 18 示出了由整流运行向逆变运行转换时晶闸管变流器直流电压和晶闸管联结一个臂上电压的理论波形。该图基于脉波数 $p=6$,换相数 $q=6$ 的晶闸管联结,并假定在整个工作范围直流电流连续。

调节曲线(例如直流电压平均值作为直流电流的函数)表示在图 19 中。给出的是在 $0^\circ\sim 150^\circ$ 之间不同延迟角的一组曲线,并假设直流回路电抗相对较小,变流器为反电势负载。

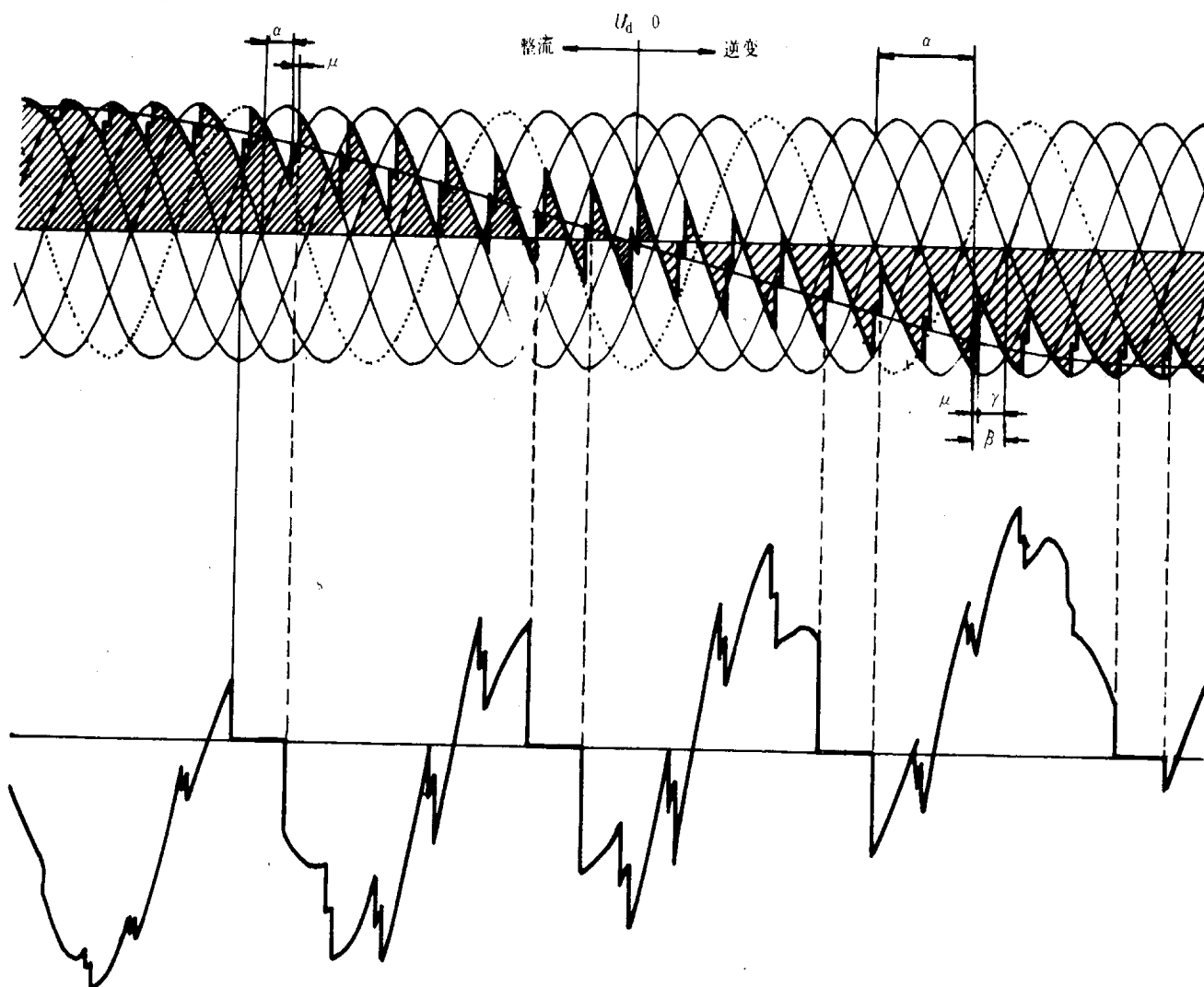


图 18 不同延迟角下的直流电压波形

当晶闸管变流器在逆变运行时,为防止直通故障,必须限制延迟角。在图 18 中用裕度角 γ 表示。它取决于超前角 β 和重叠角 u ,由如下关系式确定:

$$\gamma = \beta - u$$

在所有情况下,必须保持裕度角大于晶闸管的关断时间。延迟角 α 或超前角 β 必需的极限由下式计算:

$$\cos\beta = \cos\gamma - 2 \times \frac{U_{dx}}{U_{di}}$$

式中: U_{dx} ——总的感性直流电压调整值。

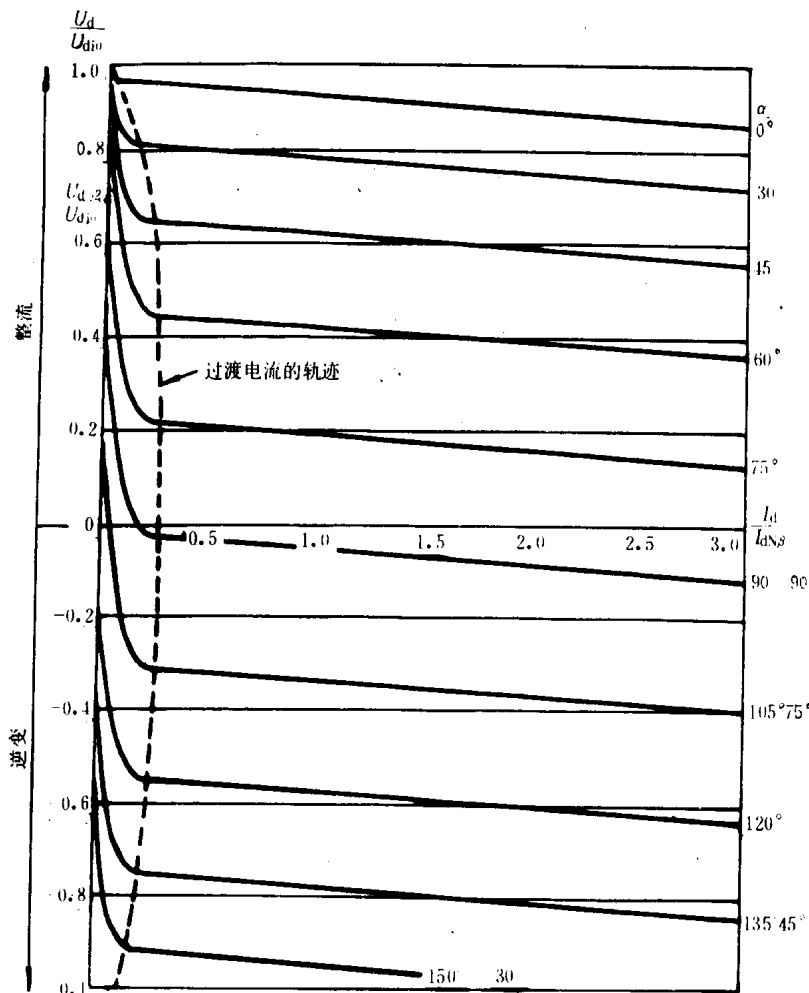


图 19 不同负载和延迟角下的直流电压

9.4.2 整流和逆变运行时双变流器联结及限制

不同控制角(其中一个为 α_1 , 另一为 α_2)下, 双变流器的理论调节曲线如图 20 所示, 该曲线为理想条件下的曲线, 假设直流回路电感很大, 过滤电流的区域和两变流器之间的相互影响均可以忽略不计。

在图 20 中所指示的换相极限线给出了逆变运行时的最大允许直流电流。在该电流下, 裕度角 γ 达到最大值。如果对于给出的一组运行条件(直流电流, 交流和直流电压等)的延迟角 α 增大到超出该极限范围, 将发生直通。

虽然对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, 但在双变流器中, 为控制直流环流, 仍有必要限制延迟角的最小值。

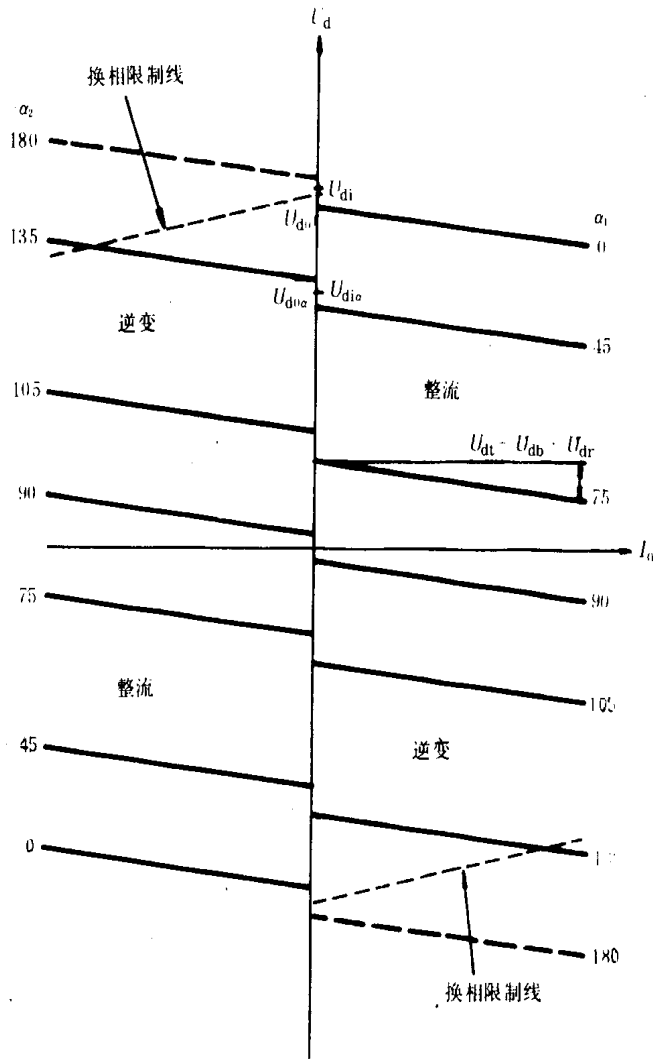


图 20 逆变运行时直流电压的极限

9.5 过渡电流

当直流电流减小到过渡电流值(见 GB 3859.1 中第 3.1.3.22 条)时,电压/电流特性曲线向上弯曲,这是因为当直流电压的瞬时值低于负载的反电势时,直流电路的电感不能在周期维持其电流,于是直流电流变为断续。

在直流电流断续条件下,直流电压和直流电流的波形表示在图 21 中,在直流电流为零期间,直流电压的瞬时值不再是图 21 虚线所示的那样的理论波形,而由负载反电势决定。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所得到的直流电压平均值。

过渡电流的值取决于直流电路的电感、负载的反电势和延迟角 α 的大小。在整流方式时,它随直流电路电感的减小、反电势的增加以及延迟角从 $0 \sim 90^\circ$ 的增加而增大。在逆变时,它随直流电路电感的减小、反电势的增加以及延迟角的减小而增大(图 21)。

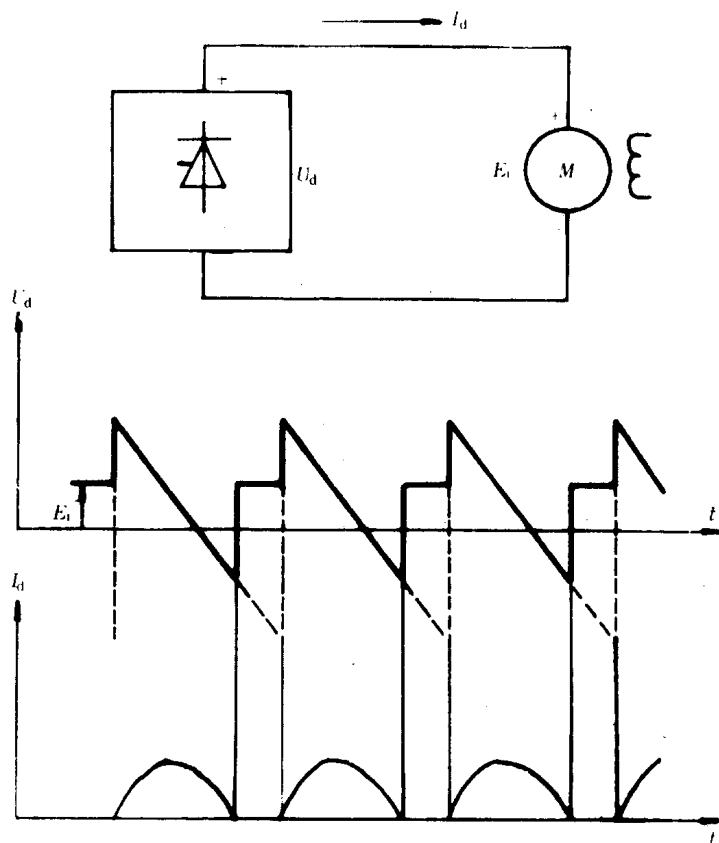


图 21 低于过渡电流时的直流电压

9.6 双变流器联结中直流环流的抑制

双变流器联结时,为限制直流环流,采取一些防护措施是必要的。最广泛使用的有如下三种方法。

9.6.1 限制延迟角

控制两个变流器的延迟角,使逆变方式运行的变流器之理想直流电压始终高于另一个整流运行变流器之直流电压。由于逆变方式时存在换相极限线,如图 20 所示,因此为了在整个运行范围内实现该要求,通常还需限制延迟角的最小值。

9.6.2 控制环流

控制两个变流器的延迟角,使直流环流自动地控制到显著小于额定直流电流值,为了避免直流电流断续,最好控制直流环流值,可使其稍大于最大过渡电流。

9.6.3 封锁触发脉冲

当一个变流器通电时,封锁信号应抑制另一个变流器所有晶闸管的门极触发信号(反过来也应如此)。这样,在任何时间,只有一个变流器可以工作,在两个变流器之间不会产生环流。

9.7 控制直流电动机用可逆变流器的工作原理

图 22 就几种电路类型示出了供直流电动机用的可逆变流器的工作程序。图形的上方示出了作为时间函数的电动机速度。图形的下边表示的是变流器作为整流器和作为逆变器的运行情况。基本变流器电路的运行也是以简化方式表示的。

9.7.1 电动机磁场反向

为使电动机制动,然后反向加速,用相控使电流降低到零,磁场电流反向,而在逆变运行时所需要的制动电流由相控调节。其次,反方向的从制动到加速可以由从整流到逆变(见图 22a)用进一步将相控前移来平稳的实现。

9.7.2 用倒向开关使电动机电枢反向

此种情况除采用倒向开关使电枢电流反向,代替磁场电流反向外,其运行程序与第 9.7.1 相类似

(见图 22b)。

9.7.3 电动机电枢的双变流器联结

电动机电枢与两个极性相反的变流器联结,每一方向的电动机电枢电流,总是有一个变流器传送见图 22c)。

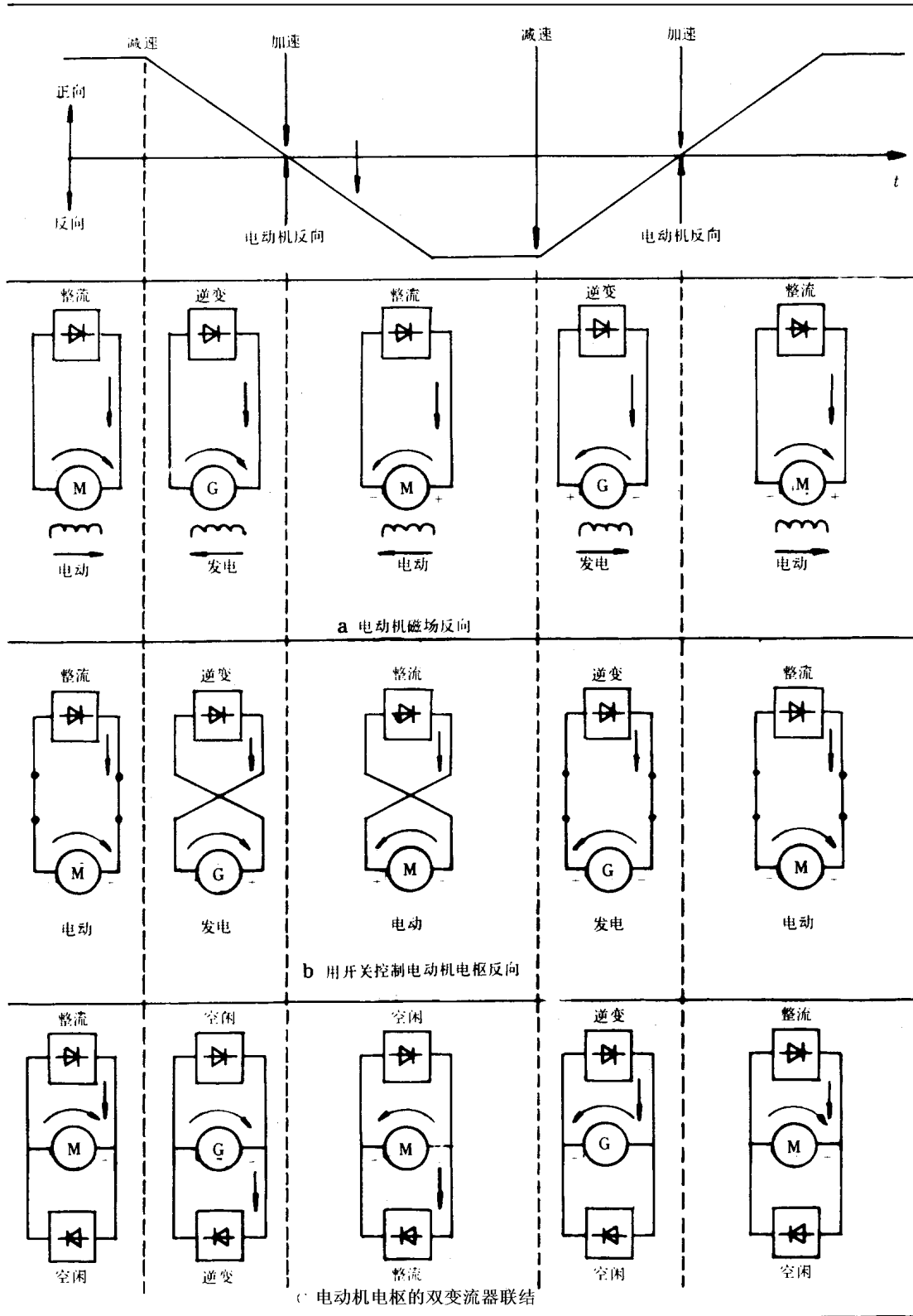


图22 变流器驱动可逆直流电动机运行方式

10 变流器故障处理

10.1 概述

安装手册和由供货者提供的任何形式的故障查寻图表都有利于设备维护。

了解设备的工作原理也是很重要的。

静止型设备趋向于在长时间内不发生故障的场合运行,因此,维护人员提高找寻故障的经验的机会很少。

发生故障时,对故障情况的观测是很有用的。例如负载情况,系统的任何变化或扰动,设备或其它临近设备的调整。在这些变化中,有一些可能影响设备,(本标准第5、6、7各章已有说明)。

保护和监控设备的指示可以给出有用的帮助,用逻辑装置跟踪故障和测定故障原因。对分析和防止发生类似故障是必要的。

10.2 故障检测

所有故障检测工作,从根本上来说,不仅仅是找出故障,而也是为了弄清楚故障的原因和得到证明。找出故障是困难的,换相故障就是一个例子。

故障可能由多种原因产生,例如:

- 门极脉冲位置不对;
- 器件参数变化(永久性或临时性的故障,使用特殊试验装置是有好处的);
- 逆变期间超过 dc/ac 电压比;
- 由于器件或电路的毛病,器件的关断时间显得不足。

其他一些故障可能需做同样仔细的考虑。

对在工厂或其他外部场合运行条件的了解,如第10.1条所述,对说明所发生故障和类似故障的原因是很有用的。

附录 A

环境温度和冷却媒质温度高于规定值时变流器的运行

(参考件)

A1 变流变压器和电抗器

当运行环境温度或冷却媒质温度超过正常运行条件的最高规定值时(但最多不超过 15K),为使变压器和电抗器安全运行,其允许的极限温升应相应降低,按表 A1 修正。

表 A1 冷却介质温度高于标准值时,温升极限值的降低数

k

变压器和电抗器	工作制等级			
	I	II	V	VI
自然风冷和强迫对流冷却 冷却空气最高温度每超过 1K 时,从 GB/T 3859.3 中 5.3 条所给的极限中扣除(绝缘等级 A 或 B)	1.0	0.7	0.6	0.5
流体-空气冷却 年平均或日平均冷却空气最高温度每超过 1K(无论哪一个超过较大时),从 GB/T 3859.3 中 5.3 条所给的极限值中扣除(绝缘等级为 A)	1.0	0.8	0.8	0.8
流体-水冷却 年平均或日平均冷却水最高温度每超过 1K(无论哪一个超过较大时),从 GB/T 3859.3 中 5.3 条所给的极限值中扣除(绝缘等级为 A)	1.0	0.8	0.8	0.8

A2 电力半导体器件、堆和装置

当变流器使用的半导体器件的冷却媒质温度超过正常运行条件的最高规定值时,应根据相应标准或产品说明书给出的通态电流与壳温修正曲线进行修正。

如果变流装置的配套件在上述情况下的修正值(电流容量下降)超过半导体器件,则应按该配套件的规定修正。

附录 B

变流器在高海拔地区使用时电流容量的修正

(参考件)

当电力半导体器件、堆和装置在高于 1 000m 的地区使用时,由于空气稀薄,影响了散热条件,半导体器件、堆和装置的电流容量将低于规定值,下图给出了电流容量随海拔高度而变化的关系曲线。在此假定冷却媒质温度保持不变。

海拔的升高还将使环境温度随之降低,根据我国气候特点,海拔每升高 100m 环境温度下降 0.5℃。因此在对用于高海拔地区的变流器进行电流容量修正时,应同时考虑电流容量随海拔升高而下降的不利因素和环境温度降低的有利因素。

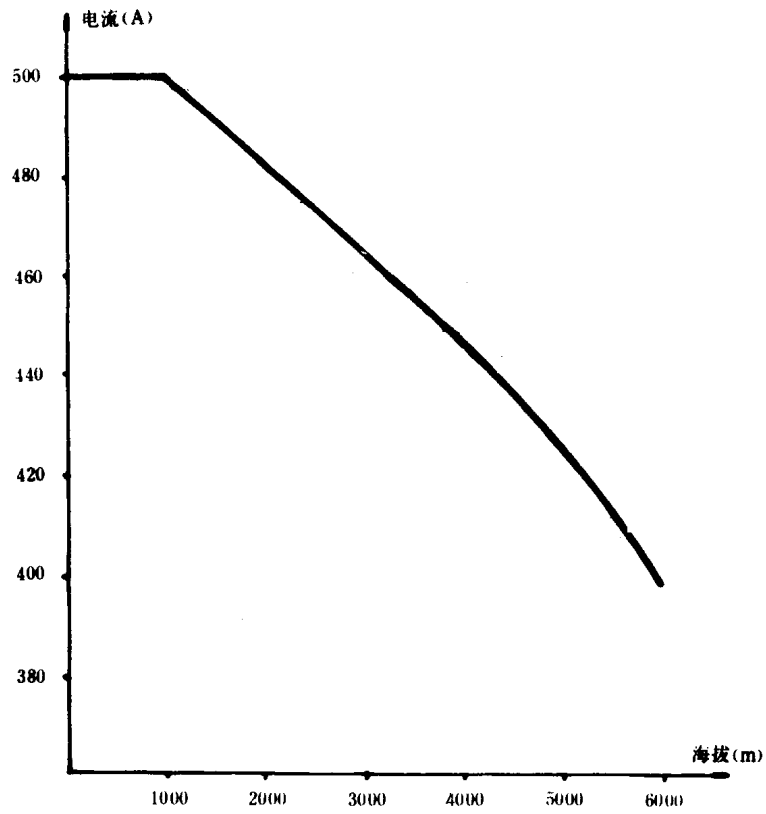


图 B1

附录 C
变流器无露运行的温度
(参考件)

不同环境温度和相对湿度时无露运行的最低温度如表 C1 所示。

表 C1

无露运行的最低液温, °C	相对湿度, %					
	95	90	85	80	75	70
环境温度, °C						
40	38.5	37	35	33	31.5	29.5
38	36.5	35	33	31	29.5	27.5
36	34.5	33	31.5	29	27.5	26
34	32.5	32	29	27.5	25.5	23.5
32	30.5	30	27.5	25.5	23	21
30	28.5	27	25.5	23	21.5	19.5
28	26.5	25	23.5	21.5	20	18.5
26	24.5	23	21.5	19.5	18	16.5

附加说明:

本标准由中华人民共和国机械电子工业部提出。

本标准由全国电力电子学标准化技术委员会归口。

本标准由机电部西安电力电子技术研究所负责起草。

本标准主要起草人周观允。