

ICS 号 29.200
中国标准文献分类号 K46

团 体 标 准

T/CPSS 1007—2018

大功率聚变变流器短路试验方法

Short-circuit test method for high power converter in
fusion device

2018-06-06 发布

2018-06-06 实施

中国电源学会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 短路试验的要求.....	3
4.1 总则.....	3
4.2 确定短路电流.....	4
4.2.1 基本假定.....	4
4.2.2 直流侧直接短路的故障电流.....	4
4.2.3 直流侧经电抗器后短路的故障电流.....	10
4.3 试验环境条件.....	12
5 动稳定能力试验.....	12
5.1 试验目的.....	12
5.2 试验方法.....	12
5.3 测试流程.....	12
5.3.1 计算试验电流对应的调压阻抗接入值.....	12
5.3.2 试验电路整定.....	13
5.3.3 测量绝缘电阻.....	13
5.3.4 记录试品的初始状态.....	13
5.3.5 小电流试验.....	13
5.3.6 100%短路电流试验.....	14
5.3.7 空载试验.....	14
5.4 合格判定准则.....	14
6 热稳定能力试验.....	14
6.1 试验目的.....	14
6.2 试验方法.....	14
6.2.1 直接试验法.....	14
6.2.2 等效试验法.....	15
6.3 测试流程.....	16
6.3.1 直接试验法的测试流程.....	16
6.3.2 等效试验法的测试流程.....	17
6.4 合格判定准则.....	18

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电源学会提出并解释。

本标准起草单位：中国科学院等离子体物理研究所、厦门科华恒盛股份有限公司、华中科技大学、荣信电力电子股份有限公司、合肥中科电器科学研究有限责任公司。

本标准主要起草人：高格、张秀青、傅鹏、周奇、焦东亮、王志东、张明。

大功率聚变变流器短路试验方法

1 范围

本标准规定了额定容量20 MVA以上的使用晶闸管的大功率变流器短路试验方法，包括相关专业术语的定义、短路试验的要求、动稳定能力试验和热稳定能力试验的试验方法、测试流程及其合格判定准则。

本标准适用于核聚变电源应用领域，电解铝应用领域的电压超过1 000 V的大功率变流器短路试验也可参考本标准。

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

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

GB/T 3859.2—2013 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 3859.3—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

GB/T 13422—1992 半导体电力变流器电气试验方法

GB/T 16927.4—2014 高电压和大电流试验技术 第4部分：试验电流和测量系统的定义和要求

3 术语和定义

GB/T 2900.33—2004界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为便于使用，以下重复列出了GB/T 2900.33—2004中的一些术语和定义。

3.1

交流/直流变流器 a.c./d.c. converter

用于整流或逆变，或既可以整流也可以逆变的电力电子变流器。

3.2

半导体变流器 semiconductor converter

使用半导体阀器件的电力电子变流器。

注：类似术语也适用于其他的半导体或特定电子阀器件变流器，或具体类型的变流器，例如晶闸管变流器，晶体管逆变器。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-12-42]

3.3

可控阀器件 controllable valve device

在导电方向，其电流通路为双稳态可控的一种器件。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-14-03]

3.4

不可控阀器件 non-controllable valve device

整流二极管 rectifier diode

无需施加任何控制信号，电流通路即可在其导电方向导通的一种反向阻断阀器件。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-14-04]

3.5

(阀)臂 (valve) arm

电力电子变流器或开关的一部分电路，以任意两个交流或直流端子为界，包括一个或多个连接在一起的同时导电的电子阀器件及其他组件（如有）。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-15-01]

3.6

桥臂 bridge arm

桥式联结变流器中的阀臂。臂的一端连接交流电路的相端子，另一端连接直流端子。

3.7

触发 triggering

使擎住阀器件或由其构成的臂实现开通的控制动作。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-16-61]

3.8

触发（延迟）角 triggering (delay) angle

相控时，触发脉冲滞后于基准点的时间间隔，以电角度表示。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-16-33]

3.9

额定直流电流 rated direct current

对于规定的负载条件和运行条件，制造商规定的直流电流平均值。

3.10

理想空载直流电压 ideal no-load direct voltage

假设相位控制不减弱、电子阀器件无门槛电压且轻载时电压不上升，交流/直流变流器的理论空载直流电压。

[GB/T 2900.33—2004，定义551-17-15]

3.11

短路电流 short-circuit current

在系统运行中，变流器发生短路时流过的电流。

3.12

峰值电流 peak current

电流瞬态过程起始后，出现的第一个大半波电流的峰值。

3.13

热累积 heat accumulation

电流平方在单位时间内的积分，其物理意义是在单位导体中产生的热量。

3.14

非弹性形变 inelastic deformation

一个物体在弹性限度外受到较大力时可能会发生断裂、变形，无法回到原来形状的现象。

3.15

动态均流 dynamic current balance

动态变化的电流在变流器各并联支路上的分布情况。

3.16

动态均流系数 dynamic current balance coefficient

短路电流峰值对应的各并联支路电流的平均值与承担电流最大的支路电流的比值。

3.17

容许偏差 tolerance

测量值与规定值之间的允许差值与规定值之比。

4 短路试验的要求

4.1 总则

外部短路包括直流侧直接短路和直流侧经电抗器后短路故障。

变流器的机械结构应能承受直流侧直接短路的动稳定效应而不发生非弹性变形或损坏，其组件在直流侧直接短路后（如半导体器件或快速熔断器）能否损坏由制造方和用户协商。在动稳定校验的短路试验中，测试电流采用短路电流的冲击峰值，短路电流的持续时间一般为不低于80 ms。

在变流器外接电抗器的电路中，变流器及其组件应能承受直流侧经电抗器后短路的热稳定效应而不损坏。在热稳定校验的短路试验中，测试电流采用短路电流的稳态值，短路电流的持续时间为2 s，对于某些特殊变流器，经制造方与用户协商后，短路电流持续时间可以小于2 s。

在短路试验中，试验电流一般取短路电流计算值的1.0~1.1倍。试验电流的容许偏差不超过表1的规定值。

大功率变流器短路试验，如无另行规定，推荐的试验次数如下：

- 对于动稳定能力试验，每相短路冲击一次；
- 对于热稳定能力试验，短路冲击2次；
- 对于用于特殊场合的变流器，经制造方和用户协商，可适当增加试验次数，但不超过3次；
- 相邻两次短路冲击试验之间至少间隔20 min。

表1 容许偏差

参数	最大容许偏差
试验电流	15%
耐受时间	5%
直流电压	3%

4.2 确定短路电流

4.2.1 基本假定

基本假定如下：

- a) 假定供电电压为三相对称系统（正弦波），除特殊情况外，电压振幅恒定不变：
 - 1) 当供电电源的额定容量为整流装置额定容量的 50 倍以上时，按无限大功率电源考虑，计算其短路电流稳态分量时，可忽略电源电抗；
 - 2) 当供电系统的短路容量为整流装置额定容量的 50 倍以上时，或以电源额定容量为基准，至短路点的综合计算电抗相对值 X_{Σ} 大于 3 时，可不考虑电源电抗的暂态变化，因此短路电流稳态分量的振幅恒定不变。
- b) 假定短路点的电阻和电抗恒等于零。
- c) 假定突然短路，并且短路电源电压初始相角 $\phi_0 = 0$ 的情况下发生。
- d) 假定换相回路无损耗，并设整流元件加上正向电压时立即导通。
- e) 当分支阻抗 Z_{zh} 小于总阻抗的 20% 时，按仅有公共阻抗 Z_g 处理。
- f) 基于非相控整流电路分析短路故障电流。对于相控整流器，若在自然换相点处（即 $\alpha = 0^\circ$ ）触发相应的晶闸管导通，其工作情况与非相控整流器的工作情况一样，所分析的短路电流为最严重的短路故障电流。

4.2.2 直流侧直接短路的故障电流

4.2.2.1 三相桥式接线直流侧短路

按阻抗在电路中的位置及其所起作用不同，可以分为仅有公共阻抗 Z_g ，以及兼有公共阻抗 Z_g 和分支阻抗 Z_{zh} 两种情况，对三相桥式接线而言，电源阻抗和整流变压器阻抗为公共阻抗，桥臂阻抗属于分支阻抗。具体情况如下：

- a) 仅有公共阻抗 Z_g

三相桥式接线直流侧短路电路如图1(a)所示，其中 X_g 是公共感抗、 R_g 是公共电阻，与公共阻抗 Z_g 之间的关系为： $Z_g = \sqrt{X_g^2 + R_g^2}$ 。通常桥臂阻抗 Z_b 较小，在变压器阀侧同相逆并联接线系统中，变压器二次引线和桥臂电抗均较小，绝大多数情况可按仅有公共阻抗来处理，此时三相桥式接线直流侧短路的等值电路如图1(b)和(c)所示。

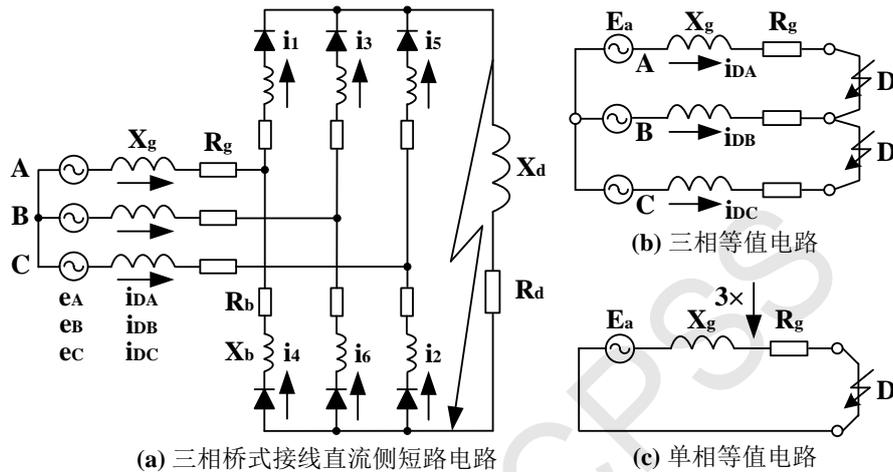


图 1 三相桥式接线直流侧短路电路

假定： $X_b=0$ 、 $R_b=0$ ，短路前负荷电流 $I_d=0$ ， $X_d=0$ 、 $R_d=0$ ，整流元件上加正向电压立即导通，且电源各相电压 e_A 、 e_B 、 e_C 按式（1）定义：

$$\begin{cases} e_A = \sqrt{2}E_a \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_B = \sqrt{2}E_a \sin(\omega t) \\ e_C = \sqrt{2}E_a \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

1) 直流侧短路电流的稳态值 I_{dDP} 、 I_{dDm} 按式（2）定义：

$$\begin{cases} I_{dDP} = 3I_{bDP} = \frac{3}{\pi} I_{Dm} = \frac{3\sqrt{2}E_a}{\pi Z_g} \quad (\text{平均值}) \\ \text{或 } I_{dDP} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dN}}{Z_{g^*}} = 1.1 \frac{I_{dN}}{Z_{g^*}} \quad (\text{平均值}) \\ I_{dDm} = \frac{\pi}{3} I_{dDP} = I_{Dm} = \frac{\sqrt{2}E_a}{Z_g} \quad (\text{峰值}) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- I_{bDP} —— 桥臂稳态电流的平均值；
- I_{Dm} —— 变压器阀侧线电流稳态短路值的振幅；
- Z_g —— 公共阻抗 $\sqrt{X_g^2 + R_g^2}$ ；
- Z_{g^*} —— 公共阻抗的标么值；
- E_a —— 电源相电压的有效值；
- I_{dN} —— 额定直流电流。

2) 直流侧短路电流的冲击峰值 i_{dch} 按式（3）定义：

$$i_{dch} = K_{ch} \cdot I_{Dm} = K_{ch} \cdot \frac{\sqrt{2}E_a}{Z_g} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

K_{ch} ——冲击值暂态系数，可按图 2 查取（参见《电力工程电气设计手册》）。一般对于感性回路来说， $1 < K_{ch} < 2$ 。

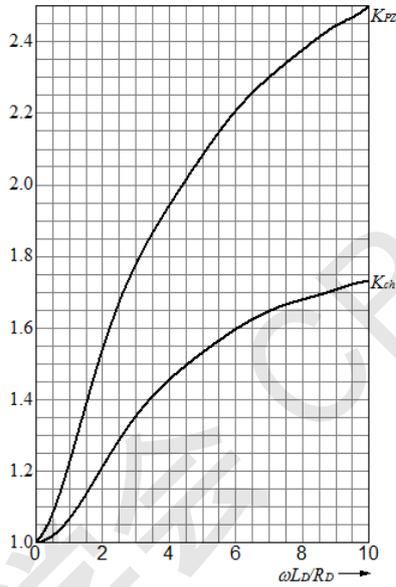


图 2 冲击值暂态系数曲线

b) 兼有公共阻抗 Z_g 和分支阻抗 Z_{zh}

对于三相桥式接线，当桥臂电阻 R_b 和桥臂电抗 X_b 不可忽略时，作为兼有公共阻抗和分支阻抗来处理，并视桥臂阻抗为分支阻抗（即 $Z_b = Z_{zh}$ ），此时图 1(a) 所示的三相桥式接线短路电路的等值电路相当于三个单相等值电路，可按图 3 确定等效分支阻抗。

对于兼有公共阻抗和分支阻抗的情况，分析短路电流时应分以下几步进行：

- 1) 根据 $L_b/R_b = L_{zh}/R_{zh}$ ，按曲线查取相应的 L_{Dx} 和 R_{Dx} ，从而确定等效分支阻抗 Z_{Dx} 。
- 2) 确定变压器阀侧线电流稳态短路值 I_{Dm} ，按式（4）计算：

$$I_{Dm} = \frac{\sqrt{2}E_a}{\sqrt{(R_g + R_{Dx})^2 + (X_g + X_{Dx})^2}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

R_g ——公共阻抗的电阻值；

X_g ——公共阻抗的电抗值；

R_{Dx} ——等效分支阻抗的电阻值，可按图 4 查取；

X_{Dx} ——等效分支阻抗的电抗值，可按图 4 查取。

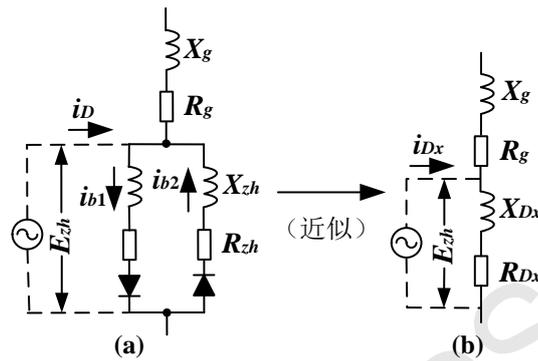


图 3 确定等效分支阻抗 Z_{Dx} 的的等值电路

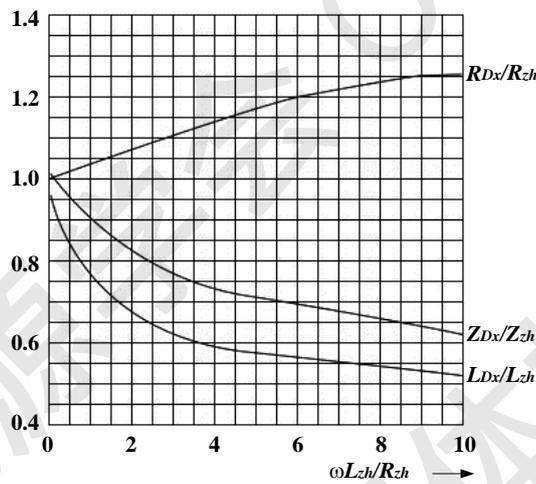


图 4 等效阻抗 Z_{Dx} 系数曲线

- 3) 确定支路两端电压 E_{zh} ，按式 (5) 计算：

$$E_{zh} = \frac{E_a}{\sqrt{(R_g + R_{Dx})^2 + (X_g + X_{Dx})^2}} \cdot \sqrt{R_{Dx}^2 + X_{Dx}^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

- 4) 确定不计暂态分量时桥臂电流的周期分量（正弦全波波形）的振幅值 I_{bDm} 、和半波平均值 I_{bDP} ，按式 (6) 计算：

$$I_{bDm} = \frac{\sqrt{2}E_{zh}}{Z_{zh}} = \frac{\sqrt{2}E_{zh}}{\sqrt{R_{zh}^2 + X_{zh}^2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$I_{bDP} = \frac{I_{bDm}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}E_{zh}}{\pi Z_{zh}}$$

- 5) 确定计入暂态分量后桥臂支路电流的稳态平均值 I'_{bDP} ，按式 (7) 计算：

$$I'_{bDP} = K_{PZ} \cdot I_{bDP} \quad \dots\dots\dots (7)$$

- 6) 确定直流侧短路电流的稳态值。

由可以看出，当兼有公共阻抗和分支阻抗时，直流短路电流稳态平均值仍为三个桥臂电流稳态平均值之和，可按式 (8) 计算直流侧短路电流的稳态值为 I_{dDP} ：

$$I_{dDP} = 3 \times I'_{bDP} = 3 \times K_{PZ} \cdot I_{bDP} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

K_{PZ} ——平均值暂态系数，可按图2查取；

I_{bDP} ——桥臂电流周期分量半波平均值。

7) 计算直流侧短路电流的冲击峰值。

按图5查取冲击电流倍数，取其1/2为三相桥式变流器系统的冲击电流。查曲线依据的阻抗值应为支路阻抗 X_{zh} 、 R_{zh} ，其百分值应按支路电势 E_{zh} 归算。

4.2.2.2 双反星形带平衡电抗器接线直流侧短路

从短路回路中阻抗配置的不同情况来区分，双反星形带平衡电抗器接线的直流侧短路可分为三种情况：

a) 仅有公共阻抗 Z_g 的直流侧短路

当整流变压器阀侧同名相绕组完全交错排列（相互间无漏抗），而阳极回路其它电抗又可以忽略时，其支路阻抗为零，则只有公共阻抗 Z_g 。发生直流侧短路时，其三相等值电路与图1所示的三相桥式接线等值电路一样。因此对于直流侧短路电流计算，可参照4.2.2.1所述的方法处理。

假定匝比为1，则直流侧短路电流稳态值 I_{dDP} 、 I_{dDm} 按式（9）计算：

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{dDP} = 6I_{bDP} = \frac{6}{\pi} I_{Dm} = \frac{6\sqrt{2}E_a}{\pi Z_g} \quad (\text{平均值}) \\ \text{或 } I_{dDP} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dN}}{Z_{g^*}} = 1.1 \frac{I_{dN}}{Z_{g^*}} \quad (\text{平均值}) \quad \dots\dots\dots (9) \\ I_{dDm} = \frac{\pi}{3} I_{dDP} = 2I_{Dm} = \frac{2\sqrt{2}E_a}{Z_g} \quad (\text{峰值}) \end{array} \right.$$

式中：

Z_g ——是公共阻抗，对于双反星形带平衡电抗器接线，公共阻抗在网侧，如果网侧与阀侧之间匝比不为1，则 Z_g 是利用匝比归算至阀侧的公共阻抗值。

当只有公共阻抗时，直流侧短路与变压器二次侧交流三相短路一样，故短路电流的冲击峰值 i_{dch} 按式（10）计算（假定匝比为1）：

$$i_{dch} = K_{ch} \cdot I_{dDm} = K_{ch} \cdot \frac{2\sqrt{2}E_a}{Z_g} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

K_{ch} ——冲击值暂态系数，可按图2查取。

b) 仅有分支阻抗 Z_{zh} 的直流侧短路

若系统热容量很大，其阻抗可以忽略，且整流变压器的绕组布置及结构尺寸，又恰好使得一次绕组与两个同名二次绕组间漏抗之和等于两二次绕组间的漏抗时，按三绕组变压器阻抗归算方式计算后，就出现仅有分支阻抗 Z_{zh} 的情况。

如果公共阻抗 Z_g 可以忽略，仅考虑分支阻抗 Z_{zh} ，则直流侧短路电流的平均值 I_{dDP} 为各桥臂电流平均值之和，可由式（11）计算：

$$I_{dDP} = 6I_{bDP} = 6K_{PZ} \cdot \frac{\sqrt{2}E_a}{\pi Z_{zh}} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

K_{PZ} ——平均值暂态系数，可按图2查取。

短路电流的冲击峰值可按图5曲线确定。由分支阻抗的百分值（以整流变压器额定参数为基准），从图5可直接查出短路电流峰值的倍数，及峰值出现的时间（电角度）。

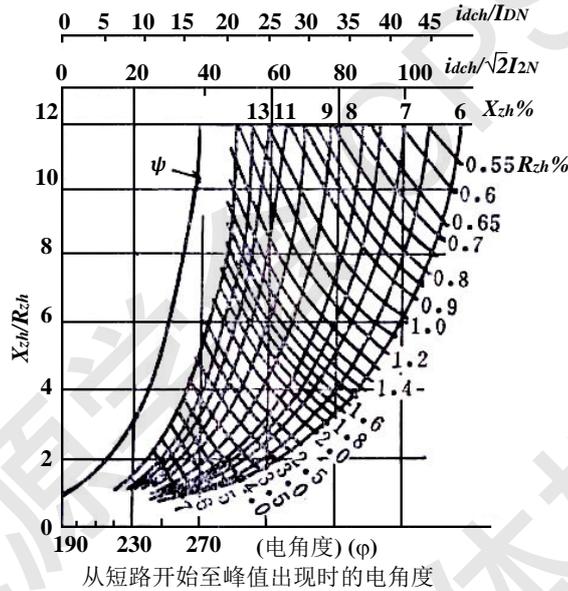


图5 直流侧短路峰值电流与阻抗的关系

- c) 兼有公共阻抗 Z_g 和分支阻抗 Z_{zh} 的直流侧短路
 当整流臂总阻抗较大，网侧阻抗也不可忽略时，应作为兼有公共阻抗和分支阻抗来处理。
 当兼有公共阻抗和分支阻抗时，双反星形带平衡电抗器接线整流装置直流侧短路的等值电路变换过程如图6所示。直流侧短路时，六个整流臂都向短路点馈入电流，因此可按式（12）计算直流侧短路电流的稳态平均值 I_{dDP} ：

$$I_{dDP} = 6I_{bDP} = 6K_{PZ} \cdot \frac{\sqrt{2}E_{zh}}{\pi Z_{zh}} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

E_{zh} ——分支阻抗两端的支路电压；

Z_{zh} ——分支阻抗；

K_{PZ} ——平均值暂态系数，可按图2查取。

采用4.2.2.1条列项b)直流侧短路电流的分析方法，先按图4确定等效分支阻抗 Z_{Dx} ，然后确定支路电动势 E_{zh} ，进而确定整流臂电流稳态平均值 I_{bDP} 和直流侧短路电流的稳态平均值 I_{dDP} 。直流侧短路电流冲击峰值仍按图5的曲线确定，图中阻抗的百分值应按 E_{zh} 换算。

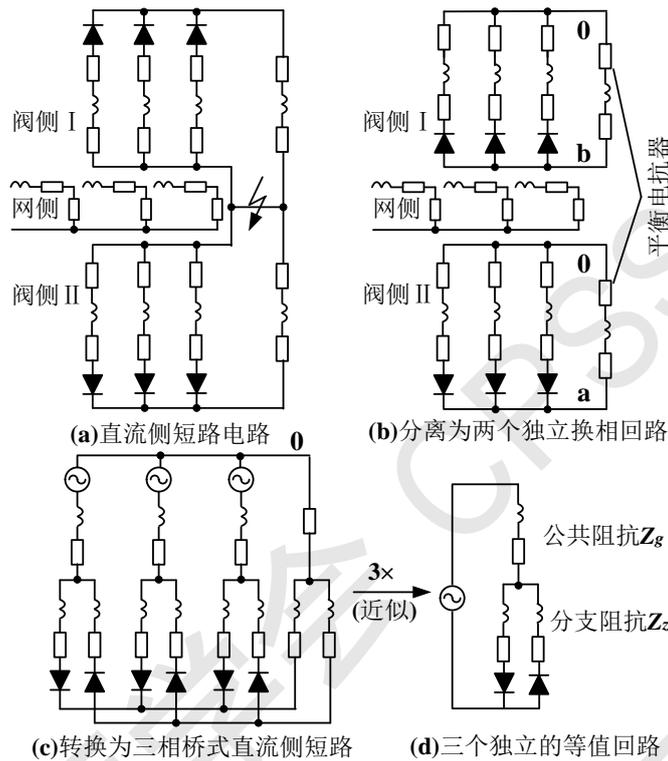


图 6 双反星形带平衡电抗器直流侧短路等值电路的变换过程（兼有公共阻抗和分支阻抗时）

4.2.2.3 确定公共阻抗和分支阻抗

计算直流侧短路电流时，网侧供电系统阻抗，属于公共阻抗 Z_g 。

对于三相桥式接线，整流变压器阻抗属于公共阻抗，桥臂阻抗属于分支阻抗。通常桥臂阻抗较小，可按仅有公共阻抗处理。

对于双反星形带平衡电抗器接线，除阳极线路阻抗属于分支阻抗外，应区分整流变压器的公共阻抗和分支阻抗，可通过两个试验获得这种接线整流变压器的公共阻抗和分支阻抗数值：

- 短接阀侧一个星形绕组，网侧在额定电流下进行试验，所得结果为公共阻抗与分支阻抗之和，即 $Z_g + Z_{zh}$ ；
- 将两个反星形绕组全部短接，网侧在额定电流下进行试验，所得结果为公共阻抗与一半支路阻抗之和，即 $Z_g + \frac{1}{2} Z_{zh}$ ；
- 联立两个试验结果，可确定整流变压器的公共阻抗 Z_g 和分支阻抗 Z_{zh} 。

4.2.3 直流侧经电抗器后短路的故障电流

对于三相桥式变流器，当变流器输出接直流电抗器，且短路发生在直流电抗器之后，在分析直流侧短路电流时，可将变流器等效成带内阻的直流电源，其等效电路模型如图7所示。直流侧突发短路时，短路电流 i_{df} 按式（13）计算：

$$i_{df} = \frac{U_d}{R_s + R_r} \left(1 - e^{-(R_s + R_r)t/L_r} \right) \dots\dots\dots (13)$$

式中：

U_d ——三相桥式变流器直流输出电压的平均值；

R_s ——系统的等效内阻，其值取决于折算到整流变二次侧的系统漏电抗，即 $R_s = \frac{3X_B}{\pi}$ ；

R_r ——直流电抗器的电阻；

L_r ——直流电抗器的电感；

T ——短路持续的时间。

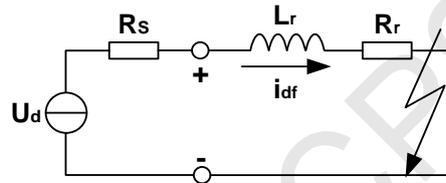


图 7 三相桥式变流器经直流电抗器后短路的等效电路模型

对于大功率的三相桥式变流器，发生短路时，变流器以3个桥臂和4各桥臂轮流导通的运行方式。从交流侧看，相当于交流两相和三相短路交替转换的过程。此种情况下，可由式（14）计算变流器的直流输出电压的平均值 U_d ：

$$U_d = \sqrt{3}U_{d0} \cos(\alpha_p - 30^\circ) - \frac{9\omega L_s}{\pi} i_d \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

α_p ——强制触发角；

L_s ——交流系统每相等值电感；

ω ——系统基波角频率；

U_{d0} ——不计换相且触发角为零时的变流器整流电压平均值，即理想空载直流电压，其值为交流系统等值电源线电压有效值的1.35倍。

短路故障导致高压开关动作后，变流器仅起到续流作用，此时电路为一阶零输入响应，其等效的电路模型如图8所示。短路电流 i_{df} 按式（15）计算：

$$i_{df} = I_{df(t=t_0)} \cdot e^{-R_r t/L_r} = \frac{U_d}{R_s + R_r} \left(1 - e^{-(R_s + R_r)t_0/L_r}\right) \cdot e^{-R_r t/L_r} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中：

t_0 ——短路故障发生到高压开关断开时刻所需的时间；

$I_{df(t=t_0)}$ ——高压开关断开时刻所对应的短路电流值。

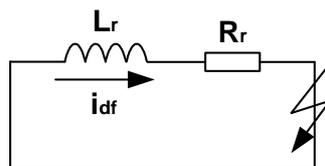


图 8 高压开关断开后的等效电路模型

综合高压开关断开前后短路电流的表达式，按式（16）计算直流电抗器后短路时变流器直流侧的短路电流 i_{df} ：

$$i_{df} = \begin{cases} \frac{U_d}{R_S + R_r} (1 - e^{-(R_S + R_r)t/L_r}) & t \in [0, t_0] \\ \frac{U_d}{R_S + R_r} (1 - e^{-(R_S + R_r)t_0/L_r}) \cdot e^{-R_r t/L_r} & t \in [t_0, \infty] \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

4.3 试验环境条件

试验推荐在以下条件下进行：

- a) 温度：5 °C~35 °C；
- b) 相对湿度：45%~75%（或最高以不出现凝露为准）；
- c) 气压：86 kPa~106 kPa。

5 动稳定能力试验

5.1 试验目的

动稳定能力试验用于检验变流器的机械结构对短路电动力的承受能力，变流器能否有电气损伤由使用方和生产方协商。

5.2 试验方法

对于允许变流器组件电气损伤的动稳定能力试验，为方便控制和确保试验电流达到测试要求，本试验可采用器件等效的试验方法。例如用二极管替代可控的半导体器件；用铝锭替代快速熔断器（如果存在）。

对于大功率变流器，动稳定能力试验可采用图9所示的测试电路，变流器输出端直接短路，脉冲变压器给被试变流器供电，在脉冲变压器回路中接入分断开关、选相合闸开关和调压阻抗。调压阻抗应能调整到满足规定试验电流的条件，电流传感器安装在变流器的输出端，其测量范围应满足测试要求。分断开关用于切断试验电源，控制试验电流的耐受时间。

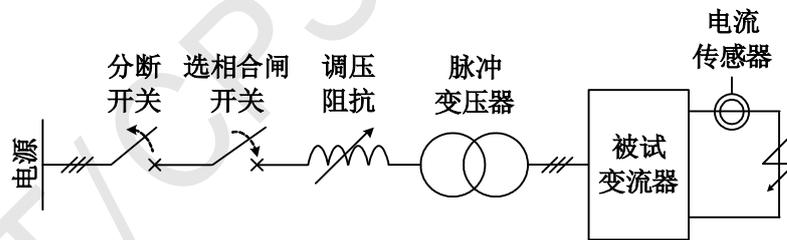


图 9 动稳定能力试验的测试电路

在图9中，变流器的输入回路也可采用其他连接方式，但测试电路中的电源应有足够容量以保证被试变流器的动稳定性能够得到验证。

5.3 测试流程

5.3.1 计算试验电流对应的调压阻抗接入值

试验前应计算试验电流所对应的调压阻抗值。在 $X/R > 10$ 的感性回路中，计算冲击电流时回路电阻 R 可忽略不计，冲击电流 i_{ch} 按式（17）计算：

$$i_{ch} = K_{ch} \cdot \frac{\sqrt{2}E_a}{\sqrt{R^2 + (X_T + X_Z)^2}} \approx K_{ch} \cdot \frac{\sqrt{2}E_a}{X_T + X_Z} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- K_{ch} ——短路冲击系数；
- E_a ——变流器交流输入电压的相电压有效值；
- R ——回路电阻值，通常忽略不计；
- X_T ——回路的电抗；
- X_Z ——调压阻抗归算到脉冲变压器阀侧的电抗值。

调压阻抗的电感值 L_Z 可按式（18）计算：

$$L_Z = \frac{X_Z \cdot k^2}{2\pi f} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- k ——脉冲变压器的变比；
- f ——交流电的频率。

5.3.2 试验电路整定

试验电路整定时采用内阻与被试变流器相当的连接排代替被试变流器，将脉冲变压器输出端短接，调整调压阻抗的接入值、选相合闸开关的合闸角以及分断开关的分断延时，以获得满足规定的短路试验电流峰值和耐受时间。

在不超过30%短路电流的情况下，进行小电流试验，校验测量和采集设备，校准选相合闸角和分断延时。

结合5.3.1计算的调压阻抗值和小电流试验的情况，确定调压阻抗的接入值，并将调压阻抗调整到适合调压阻抗接入值的位置，进行100%短路电流试验。

若短路电流峰值与规定值偏差超出表1的规定值，则微调调压阻抗的接入值，重复测试，直至输出电流峰值达到规定的要求。

5.3.3 测量绝缘电阻

用绝缘电阻测试仪，测量被试变流器主回路对地的绝缘电阻。

试验中施加的电压由委托方提供。

按照GB/T 3859.1—2013中7.2.3.1判断试品的绝缘电阻值是否满足绝缘要求。对于电压 $U_M/\sqrt{2}$ 不超过1 000 V的，绝缘电阻不得小于1 M Ω ；电压 $U_M/\sqrt{2}$ 超过1 000 V时，绝缘电阻应大于1 000 Ω/V 。

若绝缘电阻不满足其绝缘要求，则不能对其进行过电流能力试验。

5.3.4 记录试品的初始状态

在被试变流器机械结构的关键部位（汇流排或支路的连接处等）和支撑的关键位置，做好标记，并且记录标记位置的初始形态。

5.3.5 小电流试验

回路小电流（不超过短路电流的30%）试验，以检验测量和采集设备、核定试验电流。

5.3.6 100%短路电流试验

调压阻抗调到适合调压阻抗接入值的位置，对试品进行A相100%短路电流试验。

运行结束后，观察试品及其关键部位的结构有无变形或损坏。若有非弹性形变或损坏，则试品不合格，终止试验；否则试验继续。

至少间隔20 min，对试品进行B相100%短路电流试验。

运行结束后，观察被试变流器及其关键部位的结构有无变形或损坏。若有非弹性形变或损坏，则试品不合格，终止试验；否则试验继续。

至少间隔20 min，对试品进行C相100%短路电流试验。

运行结束后，记录标记位置的最终状态。

5.3.7 空载试验

对于不允许电气组件损坏的变流器，短路电流试验之后，对被试变流器施加额定电压，进行空载试验，以检验被试变流器在耐受规定的短路电流冲击之后，其半导体器件是否均仍保持其阻断特性。

5.4 合格判定准则

对于动稳定能力试验，如果试验结果满足以下条件，则试验合格：

- a) 测试电流及其耐受时间满足试验要求；
- b) 测量结果的偏差应不超过表 1 的规定值；
- c) 在耐受符合要求的短路电流冲击之后，变流器的机械结构无非弹性形变或损坏。

6 热稳定能力试验

6.1 试验目的

热稳定能力试验用于检验变流器及其组件对短路电流热效应的耐受能力。

6.2 试验方法

6.2.1 直接试验法

直接试验法可采用图10（b）所示的测试电路，用变压器给被试变流器供电，变压器回路接分断开关和调压阻抗，被试变流器的输出端接电抗器，通过闭合短路开关形成电抗器后短路。

利用大电阻负载，确保被试变流器各并联支路的半导体器件在小电流下全导通，然后闭合短路开关实现对被试变流器的短路冲击；通过分断开关控制试验电流的耐受时间。

在图10（b）中，变流器的输入回路也可有其他连接方式，但测试电路中的电源应有足够的容量以保证被试变流器对电抗器后短路故障抑制能力能够得到验证。

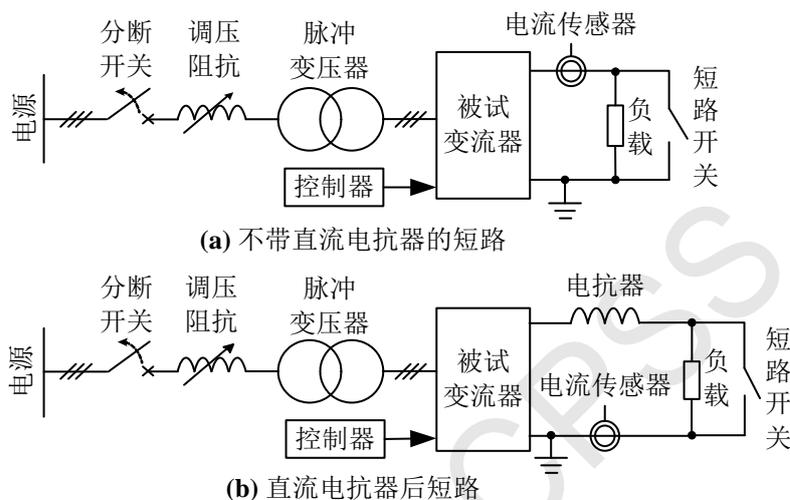


图 10 直接试验法的测试电路

6.2.2 等效试验法

6.2.2.1 等效试验法方法介绍

对于短路容量可达上百兆伏安的大功率变流器，试验电源很难直接满足直流电抗器后短路试验的要求，一般采用等效试验法，即验证变流器上单个半导体器件和快速熔断器对最大支路短路电流的耐受能力。

等效试验法是将全功率下变流器的直流电抗器后短路试验分解成动态均流试验和额定电压下单个半导体器件短路试验。

6.2.2.2 等效试验法——动态均流试验

在动态均流试验中，可采用图10（a）所示的测试电路，施加的试验电流峰值及其上升时间应与被试变流器实际短路电流一致，且试验条件应能模拟变流器实际运行时的最严重情况。

在图10（a）中，变流器的输入回路也可采用其他连接方式，但试验电源应有足够容量以保证被试变流器的动态均流特性能够得以验证。

试验后，利用桥臂支路电流和式（19）计算各桥臂的动态均流系数 K_I ：

$$K_I = \frac{\sum I_i}{n_p \cdot I_M} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中：

$\sum I_i$ ——被测桥臂各并联支路电流之和；

I_M ——被测桥臂中最大的支路电流；

n_p ——被测桥臂的并联支路数。

取最小的动态均流系数，进而确定单个半导体器件承受的最大短路电流 I_{Mmax} ，按式（20）计算：

$$I_{Mmax} = \frac{\sum I_i}{n_p \cdot K_{Imin}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中：

I_{Mmax} ——单个半导体器件承受的最大短路电流；

K_{Imin} ——变流器的最小动态均流系数，取自动态均流试验结果或由制造商规定。

6.2.2.3 额定电压下单个半导体器件短路试验

额定电压下单个半导体器件短路试验可采用图11所示的测试电路，整流变压器的输出电压应能够满足变流器额定输入电压的要求，电源和负载应能够满足试验电流条件，试验电流的峰值由直流电抗器后短路的动态均流试验获得，峰值耐受时间由制造商规定，试验电流在整个过程中产生的热累积应是实际短路故障中最大支路电流产生的热累积的1.0~1.1倍。

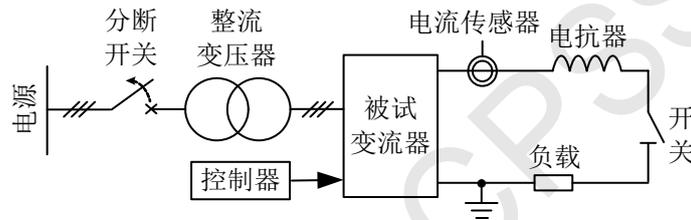


图 11 额定电压下单个半导体器件短路试验的测试电路

在试验中，被试变流器的每个桥臂上仅一个支路的半导体器件被触发导通，其余并联支路的半导体器件均处于阻断状态。

6.3 测试流程

6.3.1 直接试验法的测试流程

6.3.1.1 选择合适的调压阻抗

利用试验系统参数、试验电流参数以及直流电抗器（如有）参数，按式（21）计算调压阻抗的等效内阻：

$$I_t = \frac{1.35U_2}{R_s + R_{Zr} + R_d} \left(1 - e^{-(R_s + R_{Zr} + R_d)t/L_d} \right) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- I_t —— 直流侧试验电流；
- t —— 试验电流的上升时间；
- R_s —— 试验系统（不包括调压阻抗）的等效内阻；
- R_{Zr} —— 调压阻抗的等效内阻；
- R_d —— 直流回路的电阻（含电抗器和短路开关的内阻）；
- L_d —— 直流回路的电感；
- U_2 —— 脉冲变压器阀侧的线电压。

对于多支路并联的三相桥式变流器，调压阻抗的电感 L_{Zr} 与其等效内阻 R_{Zr} 之间的关系如式（22）所示：

$$R_{Zr} = \frac{9\omega L_{Zr}}{\pi} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- ω —— 系统基波角频率；
- L_{Zr} —— 调压阻抗的电感值；
- R_{Zr} —— 调压阻抗归算至直流侧的等效内阻。

6.3.1.2 确定分断开关的分断延时

分断延时是试验电流的耐受时间和短路开关的合闸时间之和。

6.3.1.3 测量绝缘电阻

按5.3.3 测量试品的绝缘电阻。

6.3.1.4 小电流试验

小电流试验用于校验测量和采集设备、核定试验电流。试验电流不超过短路电流的30%。

6.3.1.5 100%短路电流试验

调压阻抗调至合适位置，对被试变流器进行100%短路电流试验。

试验过程中不得出现任何故障报警。

运行结束后，查看试验波形，确认试验电流满足试验要求。

6.3.1.6 空载试验

100%短路电流试验之后，对被试变流器施加额定电压，进行空载试验，以检验被试变流器在耐受规定的短路电流冲击之后，其半导体器件是否均仍保持其阻断特性。

6.3.2 等效试验法的测试流程

6.3.2.1 动态均流试验

动态均流试验的测试流程如下：

a) 确定调压阻抗和变流器的触发角

根据试验电路参数和试验电流峰值确定调压阻抗值和变流器触发角。

b) 测量绝缘电阻

按5.3.3测量试品的绝缘电阻。

c) 半导体器件预加热：

1) 在均流试验中，如果对半导体器件的结温有要求，则试验之前应先确认半导体器件的结温满足测试要求。

2) 如果测试电路可以提供试品连续额定运行的条件，则小电流试验之后，应使试品在其额定电流下连续运行，直至其半导体器件的结温达到测试要求。

3) 如果测试电路不能满足试品连续额定运行的条件，则试验之前先通过辅助预热的方法，使其半导体器件的结温达到测试要求。

d) 小电流试验

对被试变流器进行小电流试验(不超过短路电流的30%)，以确校验测量和采集设备、核定试验电流。

e) 100%短路电流的动态均流试验：

1) 调压阻抗调至适当位置，对被试变流器进行 100%短路电流的动态均流试验。

2) 试验过程中不得出现任何故障报警。

3) 运行结束后，查看试验波形，确认试验电流满足试验要求。

f) 取试验电流峰值对应脉波的平均值，计算被试变流器各桥臂的动态均流系数(见 6.2)。

如果各桥臂动态均流系数均高于规定的限值，则取最小动态均流系数（或制造商规定的最小限值），进而确定单个半导体器件分担的最大短路电流 I_{Mmax} 。

6.3.2.2 额定电压下单个半导体器件短路试验

额定电压下单个半导体器件短路试验的测试流程如下：

- a) 测量绝缘电阻
按5.3.3 测量试品的绝缘电阻。
- b) 试验电流整定
 - 1) 模拟变流器直流电抗器后短路的电流波形，试验电流峰值由动态均流试验而得，基于热累积等效的原则计算试验电流的测试时间。
 - 2) 采用电流闭环控制，模拟实际的短路电流波形，对被试变流器进行试验电流整定。
 - 3) 若试验电流的峰值达到单个半导体器件分担的最大短路电流，峰值耐受时间满足制造商的规定值，且整个试验电流的热累积等于或略大于实际短路故障中单个半导体器件分担最大短路电流产生的热累积，则试验电流整定结束。
- c) 确定被测的单个半导体器件支路
在试验中，试品的每个桥臂上仅被测支路的半导体器件可以被触发导通，其余并联支路的半导体器件均处于阻断状态。
- d) 单个半导体器件的短路试验
采用电流闭环控制，根据整定的试验电流波形，对被试变流器的单个半导体器件进行短路试验。
- e) 空载试验
在额定电压下对被试变流器进行空载试验，检验各被测半导体器件在耐受规定的试验电流后是否仍保持其阻断特性。

6.4 合格判定准则

对于采用直接试验法的热稳定能力试验，如果试验结果满足以下条件，则试验合格：

- a) 测试电流及其耐受时间均满足试验要求；
- b) 短路试验之后，变流器空载试验合格；
- c) 测量结果的偏差应不超过表 1 的规定值。

对于采用等效试验法的热稳定能力试验，如果试验结果满足以下条件，则试验合格：

- a) 动态均流试验中施加的测试电流及其偏差应满足试验要求；
 - b) 变流器的动态均流系数满足要求；
 - c) 热等效试验中施加的测试电流峰值及其偏差应满足要求；
 - d) 热等效试验中，测试电流产生的热累积不小于实际短路故障中单个半导体器件分担的最大短路电流产生的热累积，且不超过单个半导体器件允许热累积的 80%；
 - e) 热等效试验之后，变流器空载试验合格。
-