ICS 29.240.01
CCS F21

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2108—2020

高压直流输电系统主回路参数计算导则

Guide for main circuit parameter calculation of HVDC System

2020-10-23 发布　　2021-02-01 实施

国家能源局　发布

目　　次

前　　言 III
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义、符号 1
4　一般技术要求 2
5　主回路参数计算 3
6　直流系统运行特性的计算 9

前　言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压直流输电技术标准化技术委员会(DL/TC 12)归口。

本标准起草单位：国网经济技术研究院有限公司。

本标准主要起草人：马为民、李亚男、蒋维勇、刘心旸、樊纪超、邹欣、张和、申笑林。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心(北京市白广路二条一号，100761）。

高压直流输电系统主回路参数计算导则

1 范围

本标准规定了高压直流输电系统主回路参数、运行控制参数及主要设备相关技术参数的计算条件和方法。

本标准适用于采用电网换相换流器的高压直流输电系统。

2 规范性引用文件

下列文件对本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所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（包括所有修改单）适用于本文件。

GB/T 13498 高压直流输电术语

GB/T 31460 高压直流换流站无功补偿与配置技术导则

DL/T 5426 ±800kV 高压直流输电系统成套设计规程

3 术语和符号

3.1 术语

GB/T 13498 界定的术语和定义适用于本文件。

3.2 符号

GB/T 13498 界定的以及下列符号适用于本文件：

P_{d} ——直流输电系统单极或单单元输送功率，对于远距离高压直流输电系统指送端换流站平波电抗器直流线路侧功率；

P_{conv} ——换流器有功功率；

P_{cu} ——6 脉动换流器在额定功率下运行时，换流变压器和平波电抗器上的损耗之和；

Q_{d} ——12 脉动换流器消耗的无功功率；

Q_{conv} ——换流器无功功率；

Q_{f} ——换流站无功补偿容量；

U_{dL} ——极线对地的直流电压，对于远距离直流输电指平波电抗器线路侧直流电压；

U_{d} ——极线对中性线直流电压；

U_{dio}——6 脉动换流器的理想空载直流电压。

U_{v}——换流变压器阀侧线电压；

U_{l}——换流变压器网侧线电压；

I_{d}——直流电流；

I_{v}——换流变压器阀侧线电流；

d_{xtot}——总换相电抗的标幺值；

d_x ——6 脉动换器感性压降的标幺值；

d_r ——6 脉动换流器电阻性压降的标幺值；

u_k ——6 脉动换流器中换流变压器短路阻抗压降标幺值

U_{PLC} ——PLC 滤波器电抗器换相压降标幺值

U_T ——单阀正向导通压降；

R_d ——直流输电系统除换器外的单极回路直流电阻；

R_e ——接地极电阻；

R_g ——接地极线路电阻；

R_{th} —— 单阀压降的等效电阻，与换流器的电压、电流相关；

S_n ——与 6 脉动换流器对应的三相换流变压器容量；

S_{n3w} ——与 12 脉动换流器对应的单相三绕组换流变压器容量；

S_{n2w} ——与 6 脉动换流器对应的单相双绕组换流变压器容量；

S_{sc} ——换流站交流母线的三相短路容量（MVA）；

n_N ——换流变压器额定变比；

η ——有载调压开关分接范围；

$\Delta\eta$ ——有载调压开关档距。

L_d ——单极直流回路总电感；

L_{dr} ——平波电抗器电感；

L_{tr} ——换流变压器每相电感。

注：本导则中角标 N 表示额定值，R 表示整流侧，I 表示逆变侧，Max 表示最大值，Min 表示最小值，Old 表示过负荷。

4 一般技术要求

4.1 通过高压直流系统主回路参数计算应得到各种运行工况下直流系统运行参数及设备参数，包括无偏差理想条件下的参数和各种偏差最不利组合条件下的参数。

4.2 在计算设备的极限运行参数时应使用最不利的控制偏差和制造偏差及其组合。

4.3 主回路参数计算宜对整流侧和逆变侧分别进行。

4.4 对于长距离直流系统，计算时额定电压已经确定；对于背靠背直流系统，额定电流已经确定。主回路参数计算的其它输入条件按照 DL/T 5426 的规定执行，包括交流系统条件、直流线路参数、接地极及线路参数、直流系统运行接线方式和控制模式等。

4.5 主回路参数计算流程见图 1。

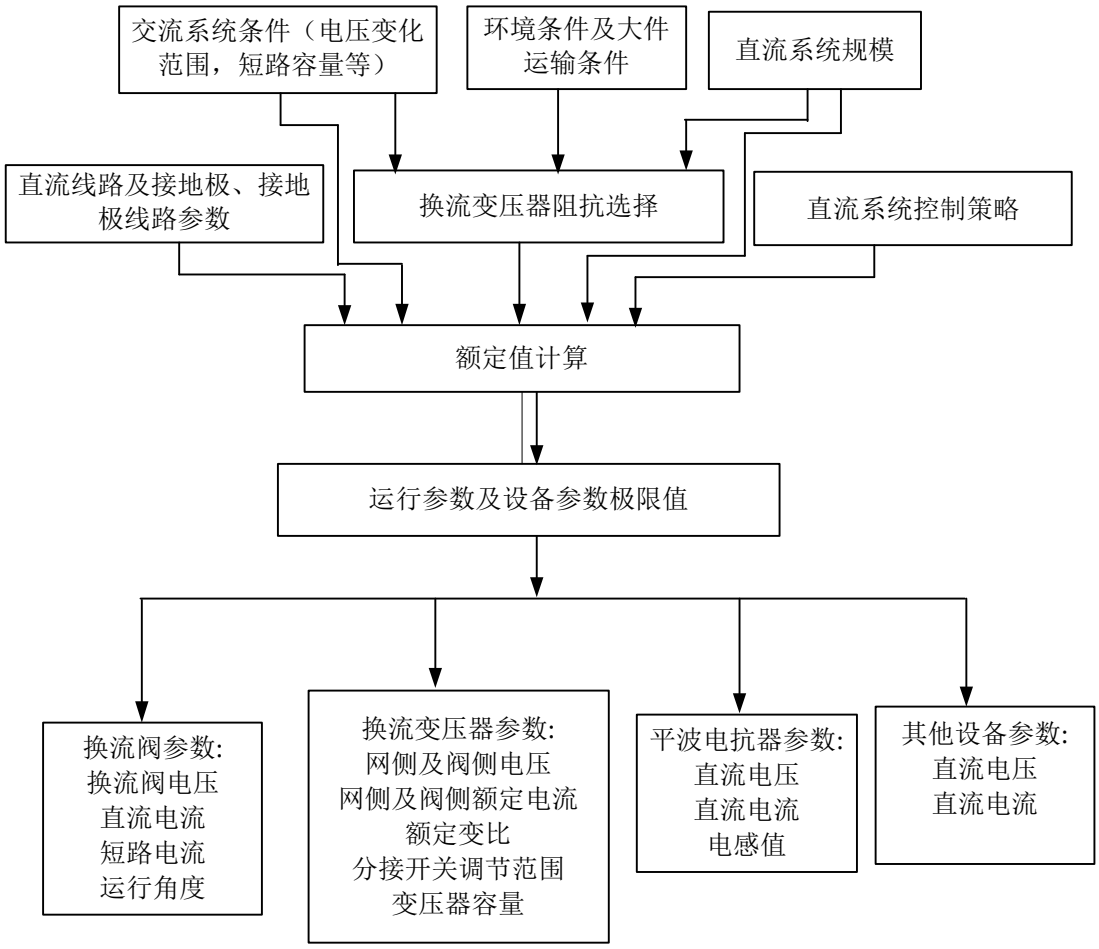


图 1　直流系统主回路参数计算流程

5　主回路参数计算

5.1　换流变压器短路阻抗确定

5.1.1　选择换流变压器短路阻抗在电气上应满足使换流阀短路电流不超过其耐受值的要求，同时考虑大件设备运输条件、设备制造可行性等因素后确定。采用初步选定的变压器短路阻抗计算主回路参数后，需对换流阀短路电流进行核算，以确定最终的换流变压器短路阻抗。

5.1.2　换流阀短路过程第一周波的短路电流可以采用式（1）计算，短路过程第二及第三周波的短路电流采用式（2）计算：

$$I_{crest}=\frac{I_{dN}\cdot k_r\cdot U_{dio}}{2d_{xtot}\cdot U_{dioN}}\cdot(1+\cos\alpha)-\frac{I_d}{2} \quad (1)$$

$$I_{crest}=\frac{I_{dN}\cdot k_r\cdot U_{dio}}{2d_{xtot}\cdot U_{dioN}}\cdot(1+\cos\alpha) \quad (2)$$

式中：

I_{crest}——*短路电流峰值；*

k_r——换流器甩负荷造成的工频过电压系数。

U_{dio}及U_{dioN}根据 5.5 及 5.6 中公式进行计算；d_{xtot}等于d_x与折算至换流变压器阀侧的交流系统等值阻抗之和；d_x与换流变短路阻抗的关系如式（3）所示：

$$2d_{\mathrm{x}} \approx u_{\mathrm{k}} + u_{PLC} \tag{3}$$

式中，u_{PLC}一般取 0.2%。

k_{r}根据式（4）计算：

$$k_{\mathrm{r}} = \sqrt{\left(1+\frac{Q_{\mathrm{conv}}}{2\times(S_{\mathrm{SC}}-Q_{\mathrm{f}})}\right)^2+\left(\frac{P_{\mathrm{conv}}}{2\times(S_{\mathrm{SC}}-Q_{\mathrm{f}})}\right)^2} \tag{4}$$

5.2 平波电抗器电感值确定

5.2.1 平波电抗器电感值可采用式（5）初步确定，成套设计时应使S_{i}的取值在 0.22~1.0 范围内。

$$Si = \frac{U_{dN}}{L_d \cdot I_{dN}} \tag{5}$$

式中：

$L_{\mathrm{d}} = L_{\mathrm{dr}} + 3.5L_{\mathrm{tr}}$

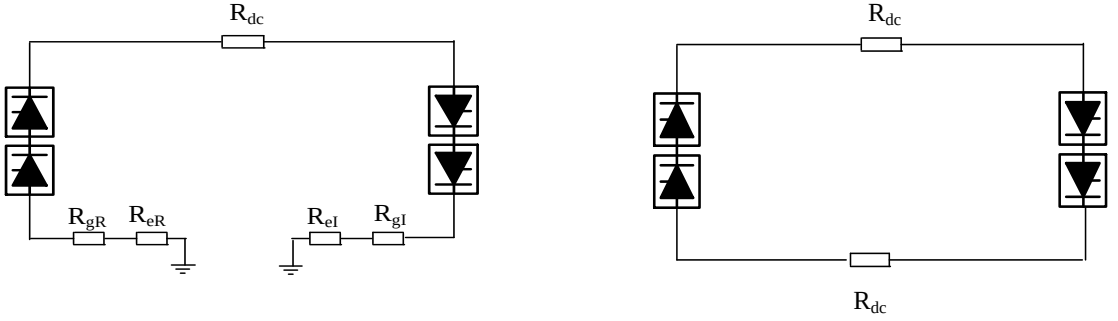
S_{i} ——直流电流变化因子，反映了额定直流电压施加在电抗器上时最大可能的直流电流变化率。

5.2.2 平波电抗器电感值根据式（5）确定后，还应进行电流断续、短路电流、换相失败、直流系统谐振等校核，确定最终的平波电抗器电感值。

5.3 主回路电阻

5.3.1 直流系统主回路参数计算时采用图 2 表示的单极直流系统回路作为一个基本单元：

单位为欧姆（Ω）



a） 单极大地返回　　b） 单极金属返回

注 1：Rdc 是直流输电线路电阻，该电阻通常取 20℃值；
Rg 是接地极线路电阻；
Re 是接地极电阻。
注 2：对于背靠背系统，图中所示电阻均可取 0。

图 2 直流系统单极结构示意图

5.3.2 单极大地返回的直流输电系统，$R_{\mathrm{d}} = R_{\mathrm{dc}} + R_{\mathrm{gR}} + R_{eR} + R_{gI} + R_{eI}$。单极金属回线的直流输电系统，$R_{\mathrm{d}} = 2R_{\mathrm{dc}}$。双极对称运行的直流输电系统，$R_{\mathrm{d}} = R_{\mathrm{dc}}$。

5.4 额定直流电压及电流

5.4.1 对于长距离直流输电工程，首先利用已确定的额定直流电压按式（6）计算额定直流电流。

$$I_{\mathrm{dN}}=\frac{P_{dN}}{U_{dN}} \tag{6}$$

5.4.2 对于背靠背直流工程，首先利用已确定的额定直流电流按式（7）计算额定直流电压。

$$U_{dN}=\frac{P_{dN}}{I_{\mathrm{dN}}} \tag{7}$$

5.5 额定理想空载直流电压

整流侧理想空载直流电压额定值U_{dioNR}可用下式（8）计算：

$$\frac{U_{dNR}}{n}=U_{dioNR}\cdot\left(\cos\alpha_N-(d_{xNR}+d_{rNR})\right)-U_T \tag{8}$$

式中，n 为单极中六脉动换流桥的串联数，以下同。

逆变侧理想空载直流电压额定值U_{dioNI}可用下式（9）计算：

$$\frac{U_{\mathrm{dNI}}}{n}=U_{\mathrm{dioNI}}\cdot(\cos\gamma_{\mathrm{N}}-(d_{\mathrm{xNI}}-d_{\mathrm{rNR}}))+U_{\mathrm{T}} \tag{9}$$

注：式（8）和式（9）中，α_{N}一般取 15°，当逆变侧采用定关断角控制时，γ_{N}一般取 17°。采用定直流电压控制时，γ_{N}一般取 19°。

式（8）及式（9）中d_{r}可取厂家提供的经验值，精确的d_{r}可采用公式（10）计算得到：

$$d_r=\frac{P_{cu}}{U_{dioN}\cdot I_{dN}}+\frac{2\cdot R_{th}\cdot I_{dN}}{U_{dioN}} \tag{10}$$

注：式（10）中，系数 2 代表每个 6 脉动换流桥中总是有两个换流阀处于导通状态。

5.6 非额定条件下的参数计算

当直流系统运行在离开额定功率的其他功率水平时，运行参数可能偏离其额定值，计算时应合理考虑各种控制偏差和制造偏差及其组合，具体的取值应根据直流主设备及控制保护厂家提供的参数确定，当无法获得具体参数时可采用表 1 及表 2 的典型值。在计算受端换流器的理想空载直流电压时，R_d应在设计要求的方式中选取最严格的数值。

表 1 主回路参数计算用偏差典型值

参数	定义	典型值
δd_x	正常运行时换流变压器感性压降最大制造公差	$\pm5\%,\mathrm{d}_{xN}$
δU_{d}	直流电压测量误差	$\pm0.5\%U_{dRN}$
δI_{d}	直流电流测量误差	$\pm0.3\%I_{dN}$
δ_{Udio}	电容性电压测量装置测量误差	$\pm1.0\%U_{dioN}$

表 2　主回路参数计算用控制参数典型值

Parameter	描述	典型范围
$\alpha \pm \Delta\alpha$	额定触发角及稳态变化范围	15° ± 2.5°
α_{min}	控制系统要求的最小触发角	5°
$\gamma \pm \Delta\gamma$	额定关断角及其范围	17° ± 1°（逆变侧定关断角控制方式） 19° ± 2°（逆变侧定电压控制方式）
ΔU_d	与一档抽头变化对应的整流侧电压变化范围或直流电压控制误差	U_{dNR} 与一档有载调节开关抽头变化对应的单 12 脉动换流器电压变化量，当逆变侧采用定熄弧角控制时为 0

5.7　非额定条件下的理想空载直流电压

5.7.1　长距离直流输电系统整流侧理想空载直流电压可以采用式（11）计算：

$$U_{dioR}=\frac{U_{dR}/n+U_T+(d_{xR}+d_{rR})\cdot I_d/I_{dN}\cdot U_{dioNR}}{\cos\alpha} \tag{11}$$

注：根据实际的直流控制策略，式（11）中直流电压和直流电流变量在考虑误差及偏差时，不能同时取大值。

在式（11）中，当：

$$U_d=U_{dN}(1+\Delta U_{dOLTCI}+\delta U_d)$$
$$d_{xR}=d_{xN}(1+\delta d_x)$$
$$I_d=I_{dN}(1-\Delta I_{dOLTCI}+\delta I_d)$$
$$\alpha=\alpha_N+\Delta\alpha$$

时，空载直流电压达到最大值U_{diomaxR}。其中$\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}}$和$\Delta I_{\mathrm{dOLTCI}}$分别为由于有载调开关控制导致的直流电压和直流电压偏差。如果逆变侧采用定电压控制，$\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}}$和$\Delta I_{\mathrm{dOLTCI}}$为 0。

在式（11）中，当：

$$U_d=U_{dN}(1-\Delta U_{dOLTCI}-\delta U_d)$$
$$d_{xR}=d_{xN}(1-\delta d_x)$$
$$I_d=I_{dN}(1+\Delta I_{dOLTCI}-\delta I_d)$$
$$\alpha=\alpha_N-\Delta\alpha$$

时，空载直流电压达到额定直流电压运行工况的最小值U_{diominR}。如果逆变侧采用定电压控制，以上计算中$\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}}$和$\Delta I_{\mathrm{dOLTCI}}$为 0。

5.7.2　当逆变侧采用定关断角控制策略时，长距离直流系统逆变侧理想空载直流电压采用式（12）计算：

$$U_{dioI}=\frac{(U_{dR}-R_d\cdot I_d)/n-U_T+(d_{xI}-d_{rI})\cdot I_d/I_{dN}\cdot U_{dioNI}}{\cos\gamma} \tag{12}$$

在式（12）中，当

$$U_{\mathrm{dR}}=U_{\mathrm{dNR}}\cdot(1-\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}})$$
$$d_{\mathrm{xI}}=d_{\mathrm{xNI}}\cdot(1+\delta d_{\mathrm{x}})$$
$$I_{\mathrm{d}}=I_{\mathrm{dN}}\cdot(1.0+\Delta I_{\mathrm{dOLTC}}+\delta I_{\mathrm{dmeas}})$$
$$\gamma=\gamma_{\mathrm{N}}+\Delta\gamma$$
$$R_{\mathrm{d}}=R_{\mathrm{dmin}}$$

时，U_{dioI}取得最大值。如果逆变侧采用定电压控制，以上计算中$\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}}$和$\Delta I_{\mathrm{dOLTCI}}$为 0。

在式（12）中，当

$$U_{\mathrm{dR}}=U_{\mathrm{dNR}}\cdot(1+\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}})$$

$$d_{\mathrm{xI}}=d_{\mathrm{xNI}}\cdot(1-\delta d_{\mathrm{x}})$$

$$I_{\mathrm{d}}=I_{\mathrm{dN}}\cdot(1.0-\Delta I_{\mathrm{dOLTC}}+\delta I_{\mathrm{dmeas}})$$

$$\gamma=\gamma_{\mathrm{N}}-\Delta\gamma$$

$$R_{\mathrm{d}}=R_{\mathrm{dmax}}$$

时，U_{dioI}取得最小值。如果逆变侧采用定电压控制，以上计算中$\Delta U_{\mathrm{dOLTCI}}$和$\Delta I_{\mathrm{dOLTCI}}$为0。

注：R_{dmax}是某种运行接线方式下直流回路电阻的最大值，确定该值时应考虑导线温升的影响。

5.7.3 背靠背直流系统整流侧空载直流电压采用式（13）计算：

$$U_{\mathrm{dioR}}=\frac{2U_{\mathrm{dioI}}\cos\gamma+4U_{\mathrm{T}}+[R_{dc}+2(d_{xR}+d_{rR})\cdot U_{dioNR}/I_{dN}-2(d_{xI}-d_{rI})U_{dioNI}/I_{dN}]\cdot I_{d}}{2\cos\alpha} \quad (13)$$

选取最不利的测量误差和制造公差及其组合，可分别得到U_{diomaxR}和U_{diominR}。

5.7.4 背靠背直流系统逆变侧采用定U_{dio}控制时理想空载直流电压最大值及最小值可按式（14）和式（15）计算：

$$U_{\mathrm{diomaxI}}=U_{\mathrm{dioNI}}(1+\Delta U_{\mathrm{OLTCI}}) \quad (14)$$

$$U_{\mathrm{diominI}}=U_{\mathrm{dioNI}}(1-\Delta U_{\mathrm{OLTCI}}) \quad (15)$$

5.8 非额定条件下的直流电压

5.8.1 应按照工程实际采用的直流电压控制策略计算最大及最小直流电压。

5.8.2 逆变侧采用定关断角控制、由换流变压器的有载调压开关控制直流电压时，实际运行的直流系统可能出现的最小直流电压为：

$$U_{d\min}=U_{d}(1-\Delta U_{d}-\delta U_{\mathrm{d}}) \quad (16)$$

最高直流电压为：

$$U_{d\max}=U_{d}(1+\Delta U_{d}+\delta U_{\mathrm{d}}) \quad (17)$$

式中，ΔU_{d}是由于有载开关控制造成的直流电压误差，δU_{d}是直流电压测量误差。当远距离直流系统输送额定以下功率时，式(16)和式(17)中，U_{d}取U_{dN}；当传输高于额定直流功率的某一功率$P_{\max}$时，U_{d}可以采用式（11）计算。如果理想空载直流电压保持在其额定值，过负荷时的直流电压将低于传输额定直流功率时的电压；如果要求过负荷时的直流电压保持在额定电压上，此时空载直流电压将升高，大于额定运行时的值。

5.8.3 当逆变侧采取定电压控制时，式（16）和式（17）中ΔU_{d}为0，仅需考虑电压测量误差。

5.8.4 对于背靠背直流系统，逆变侧宜采用定U_{dio}控制，当输送功率P_{ref}时，直流电压可用下式计算：

$$\frac{\mathrm{U_d}}{\mathrm{n}}=U_{dioI}\cdot[\cos\gamma-(d_{x}I-d_{rI})\cdot\frac{P_{ref}/U_{d}}{I_{dN}}\cdot\frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}}]+U_{T} \quad (18)$$

选取最不利的测量误差和制造公差及其组合，可得到最大和最小直流电压。

5.9 非额定条件下的直流电流

5.9.1 应按照工程实际采用的直流电压控制策略计算最大及最小直流电流。

5.9.2 如果没有特殊要求，直流系统允许的最小直流电流应大于换流器的断续电流要求，可取额定电流的 10%。也可根据系统要求取更小的值。

5.9.3 当直流系统传输额定直流功率 P_N 时，直流系统的最大连续运行直流电流为：

$$I_{d\max} = P_N / U_{d\min} + I_{dN} \cdot \delta I_d \tag{19}$$

ΔU_d 和 δI_d 远小于 1，因此上式可简化为：

$$I_{d\max} = I_{dN}(1 + \Delta U_d + \delta I_d) \tag{20}$$

当逆变侧采用定直流电压控制策略时，上式中的 ΔU_d 一项为 0。

5.9.4 当直流系统过负荷运行时，最大直流电流采用下式计算：

$$I_{d\max} = P_{old} / U_{d\min} + I_{dN} \cdot \delta I_d \tag{21}$$

5.10 换相角

5.10.1 整流器换相角可以采用式（22）计算：

$$\mu_R = \arccos(\cos\alpha - 2d_{xNR} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}) - \alpha \tag{22}$$

5.10.2 逆变器换相角可以采用式（23）计算：

$$\mu_I = \arccos（\cos\gamma - 2d_{xNI} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}}) - \gamma \tag{23}$$

5.11 换流器无功消耗

12 脉动换流器整流运行时消耗的无功功率采用式（24）计算：

$$Q_d = 2\chi I_d U_{dio} \tag{24}$$

式中，χ 定义为：$\chi = \frac{1}{4} \cdot \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu)}{\cos\alpha - \cos（\alpha + \mu）}$

逆变运行时，式（24）中用关断角 γ 代替 α。换流器无功消耗的计算参见 GB/T 31460。

5.12 换流变压器参数

5.12.1 与 6 脉动换流器相连接的换流变压器压器三相容量采用下式计算：

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{vN} \cdot I_{vN} = \frac{\pi}{3} \cdot U_{di0N} \cdot I_{dN} \tag{25}$$

与 12 脉动换流器相连的单相三绕组换流变压器压器容量采用下式计算：

$$S_{n3w} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot U_{vN} \cdot I_{vN} = \frac{2 \cdot \pi}{9} \cdot U_{dioN} \cdot I_{dN} \tag{26}$$

与 12 脉动换流器相连的单相双绕组换流变压器压器容量是三绕组容量的一半：

$$S_{n2w} = \frac{S_{n3w}}{2} \tag{27}$$

5.12.2 换流变压器阀侧空载线电压与理想空载直流电压之间的关系如下：

$$U_{vo} = \frac{U_{dio}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{3} \tag{28}$$

阀侧交流电流有效值采用下式计算：

$$I_{\mathrm{v}}=\sqrt{\frac{2}{3}}I_{\mathrm{d}} \tag{29}$$

5.12.3　换流变压器在主分接时的额定变比采用下式计算：

$$\eta_{\mathrm{nom}}=\frac{U_{\mathrm{lN}}}{U_{\mathrm{vN}}} \tag{30}$$

换流变压器压器最大变比采用下式计算：

$$n_{\max}=\frac{U_{l\max}}{U_{lN}}\cdot\frac{U_{di0N}}{U_{di0\min}} \tag{31}$$

换流变压器压器最小变比采用下式计算：

$$n_{\min}=\frac{U_{l\min}}{U_{lN}}\cdot\frac{U_{dioN}}{U_{dio\max}} \tag{32}$$

5.12.4　调压开关档数可以采用下式计算：

$$TC_{step}=\frac{\eta-1}{\Delta\eta} \tag{33}$$

6　直流系统运行特性的计算

6.1　直流系统运行特性计算应涵盖从最小直流功率直到过负荷功率的运行参数。

6.2　运行参数主要包括直流功率、直流电压、直流电流、理想空载直流电压（整流侧及逆变侧）、控制角度（触发角和关断角）、换相角（整流侧和逆变侧）、有载开关档位（整流侧及逆变侧）。

6.3　对典型双极直流系统，运行特性计算应分别针对双极、单极大地返回、单极金属返回进行。如果要求降压运行，还应对每种运行方式分别计算降压运行时的参数。

参考文献

［1］GB/T 13498-2017　高压直流输电术语
［2］GB/Z 20996.1　高压直流系统的性能　第 1 部分：稳态
［2］IEC 63127 Guidelines to system design of converter stations with Line-commutated converters