

煤矿电工手册

(第二分册)

地面供电(下)

总 编: 顾永辉 范廷瓚

主 编: 张宏勋 张洪钧 胡天禄

虞瑞增

编写人: 施福谦 吴荣光 张洪钧

张宏勋 潘先悟 李育实

何景林 王绍义 程宝峰

(以章次为序)

煤炭工业出版社

第二章 短路电流计算

第一节 概 述

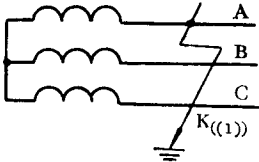
一、短路的种类

在供电系统中比较常见的，而且危害较大的故障就是短路。它是指供电系统中不等电位的导电部分在电气上被短接时的总称。根据短接的情况不同，可将短路分为如表2-1-1所示的几种。一般对于三相对称短路采用计算曲线法；对于不对称短路，则采用对称分量法。

表 2-1-1 短路的种类和特点

短路名称	表示符号	示意图	短路性质	短路后的特点
三相短路	$K_{(3)}$		三相同 时在一点 短接，属 于对称短 路	1.三相金属性短路时，电流和电压保持对称 2.短路电流值通常大大地超过线路的额定电流 3.线路始端的残余电压小于额定相电压，短路点电压为零 4.短路电流与线路始端残余电压间的相位关系决定于线路阻抗相角，通常大于线路正常运行方式下的相角
两相短路	$K_{(2)}$		二相在 一点短 接，属 于不对称短 路	1.两相短路时，电流和电压的对称性被破坏，短路相的回路中流过很大的短路电流；短路点故障相的相电压等于二分之一额定相电压，在线路始端电压稍高，但未达到额定电压值，而线电压三角形发生畸变 2.故障的二相电流与电压间相角关系有显著差别，即相角$\varphi_B \neq \varphi_C$
两相接地短路	$K_{(1,1)}$		在中性 点接地系 统中，二 相在相同 地点与地 短接，属 于不对称 短路	1.两相接地短路严重破坏电压对称性，短路点故障相电压等于零；线路始端故障相电压显著低于额定值，并决定于短路点前线路上的电压降；非故障相电压，可认为等于额定值 2.线路中流过很大的短路电流。电流的对称性亦显著地被破坏
大接地 电流系统 中的单相 接地短路	$K_{(1)}$		在中性 点接地系 统中，一 相与地短 接，属于 不对称短 路	1.短路电流仅在故障相中流通，三相不对称可分解成正序、负序和零序电流。线路始端故障相电压显著下降，线电压三角形发生畸变 2.短路点非故障相电压高于额定电压，A相短路，此时B相电压滞后正常情况下的B相电压，而C相电压则超前正常情况下的C相电压

续表

短路名称	表示符号	示意图	短路性质	短路后的特点
小接地电流系统中的单相接地短路	$K_{(1)}$		在中性点不接地系统中，一相与地短接，属于不对称短路	1. 故障相对地电压降为零，非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍。线电压三角形不变。系统中性点电压偏移就是电网上出现的零序电压 2. 线路分布电容引起的电容电流流经接地故障点，此电流值不大。个别情况下接地电容电流可能引起故障点电弧飞越，出现过电压 3. 接地后电网处于不对称状态，故电流向量发生畸变

任何一种短路都有可能扩大而造成三相短路。因为短路后所产生的电弧，会迅速破坏相间绝缘，而形成三相短路。在电缆网路中，更为常见。

由于煤矿供电系统大都为小接地电流系统，且目前多距大发电厂较远，故单相短路电流值一般小于三相短路电流值，而两相短路电流值亦比三相短路电流值小，因此在以后的计算中，以三相短路电流为重点进行计算。

二、计算短路电流的目的

发生短路故障后，短路回路中将出现数值很大的短路电流。在煤矿供电系统中，短路电流要比额定电流大几十倍甚至几百倍，通常可达数千安。这样大的电流通过电气设备和导线必然要产生很大的电动力，并使载流体温度的急剧上升而损坏设备。同时短路点电压将降为零，在短路点附近，电压也要相应显著下降，造成这些地方的供电中断或严重影响电动机工作。在发生接地短路时所出现的不对称短路电流，还将对与架空线路平行敷设的通讯线路产生干扰。更危险的是当短路点离发电厂很近，而且短路的持续时间较长时，可造成发电机失去同步，而使整个电力系统的运行解列，这是最严重的后果。

为了防止发生短路所造成的危害及限制故障范围的扩大，需要进行一系列的计算及采取相应措施，以保证系统在正常或故障的情况下，做到安全、可靠又经济。掌握短路电流计算很重要。因此，计算短路电流的目的，可归纳为下列几点：

1. 作为系统主接线方案比较的项目之一，以便判断那种主接线方式更能保障供电的安全和可靠，然后再决定系统的主要运行方式。
2. 作为校验电器设备的依据，以便确定所选的设备，在发生短路故障时是否会被损坏。
3. 正确地选择和校验限制短路电流所需的设备，以确保电器设备不被短路电流损坏。
4. 确定选择和校验继电保护装置所需的各项参数。
5. 根据故障的实际情况，进行故障分析，找出事故的原因。

在短路电流计算中，要求出下列几种数值，以供今后使用：

1. 次暂态短路电流 I'' ，即三相短路电流周期分量第一周期的有效值。它可供计算继电保护装置的整定值和计算短路冲击电流 i_k 及短路全电流最大有效值 I_{km} 之用。须注意：应该用电力系统在最大运行方式下，继电保护装置安装处发生短路时的次暂态短路电流来计算保护装置的整定值；而用电力系统在最小运行方式下，继电保护装置保护范围最远点

发生短路时的次暂态短路电流来校验保护装置的灵敏度。因此，计算时应分别计算这二种运行方式下的次暂态短路电流值；

2. 次暂态三相短路容量 S'' ，用来判断母线短路容量是否超过规定值、作为选择限流电抗器的依据，并可供下一级变电所计算短路电流之用；

3. 短路发生后0.2秒时的短路电流周期分量有效值（此时非周期分量基本上已衰减完了） $I_{0.2}$ ，可用来校验开关电器的额定断流量；

4. 短路发生后0.2秒时三相短路容量 $S_{0.2}$ ，可用来校验开关电器的额定断流容量（亦称额定断路容量）；

5. 短路电流稳态有效值 I_∞ ，可用来校验设备、母线及电缆的热稳定性；

6. 短路冲击电流 i_k 和短路全电流最大有效值 I_{km} ，可用来校验电器设备、载流导体及母线的动稳定性。

三、一般规定及注意事项

电力系统短路后，电路中各种参数的变化是很复杂的，影响的因素也很多。为了简化计算短路电流的方法，在不影响工程计算精确度的情况下，忽略了一些因素的影响。同时为了避免计算过程中出现某些差错，提出一些需要注意的事项，以供参考。

1. 认为各发电机是同步旋转的，电流的频率相同，电势的相位也相同，即发电机无摇摆现象。

2. 认为变压器是理想变压器，不考虑励磁电流的影响，而且变压器的磁路始终不饱和，因此短路后变压器的电抗乃是一个常数。

3. 系统各元件的分布电容忽略不计。

4. 一般所说的短路是指金属性短路，即不考虑电弧电阻的影响。

5. 短路前，系统的电势和电流是对称的。

6. 计算短路电流用的系统图（简称计算系统图），应以电器设备装设处，能产生最大短路电流的那种正常运行接线方式为准，可不考虑短时的变换接线方式（例如经常不并列运行而仅在切换过程中才并列的各段母线等）。

7. 确定短路点的原则：若需要计算选择与校验电器设备所需的短路参数及计算继电保护装置整定值所需的短路参数时，就应将短路点定在该电器设备或保护装置与电网连接的母线处；如果需要计算校验保护装置灵敏度所需的短路参数时，则应将短路点定在该保护装置保护范围的最远点。

8. 计算高压系统短路时，如果系统元件（如发电机、变压器、电抗器、线路等）本身的电抗为 X ，电阻为 R ，当 $\frac{1}{3}X > R$ 时，只需计及元件的电抗值；当短路回路中各元件的总电阻 R_Σ 大于三分之一的总电抗 X_Σ 时，就应同时考虑总电阻和总电抗。并用总阻抗 $Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}$ 的值去进行计算。

9. 在某些情况下应该考虑同步调相机和异步电动机对短路电流值的影响，详见本章第四节。

10. 计算电抗器的电抗时，应采用加于电抗器端点的实际额定电压，不能用平均电压值，否则误差较大。

11. 在简化系统的阻抗时, 距短路点远的电源与近的电源不能合并, 其详细计算方法见本章第三节。

12. 必须将阻抗标么值, 归算到以电源总额定容量为基准的标么值(称为计算电抗), 才可以去查计算曲线。当计算电抗大于3时, 即可按电源容量为无限大的系统求短路电流的方法去处理。

四、所需的原始资料

在计算短路电流之前, 必须备齐计算中所需的原始资料, 除了应该掌握本变电所的主接线系统、主要运行方式、各级变压器的型号、容量、台数和供电线路的电压等级、距离及大型电机等资料外, 尚需向电力管理部门收集下列的资料:

1. 电力系统近期及远期的总额定容量;

2. 上一级变电所母线(即本变电所电源线所连接的那段母线)在最大运行方式下的短路容量(或电抗标么值)和最小运行方式下的短路容量(或电抗标么值)。

对于矿区附近有发电厂的, 或本矿有坑口发电厂的, 就需要同时收集: 各发电机组的型号、容量、功率因数、同步电抗和台数、接线方式, 变压器容量、台数和短路电压百分值, 以及输电线路的电压等级和距离等资料。

在着手计算时, 尚需考虑如下的因素:

1. 若本变电所两条电源进线, 正常情况下不是并联运行的, 则要事先判断那条进线的短路容量最大, 那条次之, 然后分别计算最大运行方式下和最小运行方式下的短路电流。

2. 需考虑本矿(或矿区)变电所今后可能发展到的容量, 用该容量所需的主变压器参数来计算短路电流, 并用它来校验电器设备, 而用目前主变压器的参数计算的短路电流, 来确定继电保护装置的整定值及校验灵敏度。

3. 如果发电厂与矿区距离不远, 而发电厂在近期内装机容量有较大的发展, 计算时亦应计算。在发展后的装机容量下, 当下井馈电母线的短路容量超过规定值时, 应在设计地面变电所时, 预留安装限流电抗器的位置。

第二节 电路各元件阻抗的计算

对高压供电系统通常采用标么值(相对值)的方法来计算短路电流, 因此, 应事先求出系统中各元件的电抗标么值。

一、基 准 值

在标么值的计算中, 基准值是作为一个比较标准。经常使用的有: 基准容量 S_b ; 基准电压 U_b ; 基准电流 I_b ; 基准电抗 X_b 。这四个量中可选定二个量, 其他的二个量即可用公式求得。不能四个量均任意选定。通常选取基准容量 $S_b = 100$ 兆伏安, 或者等于系统的额定容量; 选取系统各段的平均电压为基准电压 $U_b = 1.05 U_N$ 千伏。基准电流和基准电抗可由下式决定:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} U_b} \quad (\text{kA}) \quad (2-2-1)$$

$$X_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} I_b} = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\Omega) \quad (2-2-2)$$

常用基准值如表2-2-1所示。

表 2-2-1 常用基准值 ($S_b = 100\text{MVA}$)

电网额定电压 kV	0.127	0.22	0.38	0.66	3.0	6.0	10.0	35.0	60.0	110
基准电压 U_b kV	0.133	0.23	0.40	0.69	3.15	6.3	10.5	37.0	63.0	115
基准电流 I_b kA	434.0	251.0	144.3	83.7	18.3	9.16	5.50	1.56	0.92	0.502

二、标 么 值

标么值 (亦称相对值) 就是某电气量的实际值与同单位的同电气量的选定值之比。标么值是没有单位的量。由于选定值的不同, 所以标么值有二种:

(一) **标么额定值** 它是以额定参数为基准的标么值。大都选设备的额定容量为基准。

$$\text{标么额定值} = \frac{\text{某电气量的实际值}}{\text{同单位同电气量的额定值}}$$

比较常见和使用的只有电抗标么额定值, 通常发电机、电动机、限流电抗器和变压器的电抗都是以标么额定值表示的。在计算短路电流时, 不能用标么额定值去进行运算, 因为系统中各元件的标么额定值, 不是以一个共同选定的基准为比较标准的, 必须将它变换成标么基准值 (简称为标么值) 方可进行运算。

$$X_N^* = \frac{X}{X_N} \quad (2-2-3)$$

式中 X_N^* —— 电抗标么额定值;

X —— 电抗实际值;

X_N —— 电抗额定值。

有时设备的标么额定值亦可用百分值表示。百分电抗值与电抗标么额定值之间有下列的关系:

$$X\% = \frac{X}{X_N} \times 100 = X_N^* \times 100 \quad (2-2-4)$$

(二) **标么基准值** (简称标么值) 它是以任意选定的基准值为基准的标么值。

$$\text{标么基准值} = \frac{\text{某电气量的实际值}}{\text{同单位同电气量的基准值}}$$

对于不同的电量, 即有:

$$\text{电压标么基准值 (简称电压标么值): } U_b^* = U^* = \frac{U}{U_b}$$

$$\text{电流标么基准值 (简称电流标么值): } I_b^* = I^* = \frac{I}{I_b}$$

容量标么基准值 (简称容量标么值): $S_b^* = S^* = \frac{S}{S_b}$

电抗标么基准值 (简称电抗标么值): $X_b^* = X^* = \frac{X}{X_b}$

在计算某个系统的短路电流时, 对于某一种电气量只能选取一个基准值。

(三) 不同基准的标么值相互变换的方法

1. 当二个标么值的基准电压相同, 而基准容量不同时, 可按下式将基准容量为 S_{b1} 的标么值变换为以基准容量为 S_{b2} 的标么值:

$$X_{b2}^* = X_{b1}^* \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \quad (2-2-5)$$

2. 当二个标么值的基准容量相同, 而基准电压不同时, 可按下式, 将基准电压为 U_{b1} 的标么值变换为以基准电压为 U_{b2} 的标么值:

$$X_{b2}^* = X_{b1}^* \frac{U_{b1}^2}{U_{b2}^2} \quad (2-2-6)$$

3. 当二个标么值的基准容量和基准电压均不同时, 可按下式进行变换:

$$X_{b2}^* = X_{b1}^* \cdot \frac{U_{b1}^2}{U_{b2}^2} \cdot \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \quad (2-2-7)$$

或者用:

$$X_{b2}^* = X_{b1}^* \cdot \frac{U_{b1}}{U_{b2}} \cdot \frac{I_{b2}}{I_{b1}} \quad (2-2-8)$$

三、电路中各元件的电抗和电抗标么值

电路中各种元件的电抗及电抗标么值的详细计算公式, 归纳在表2-2-2中。

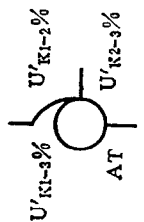
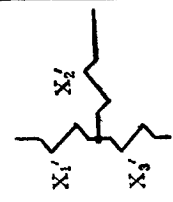
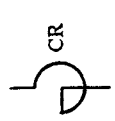
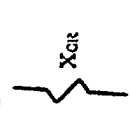
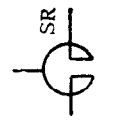
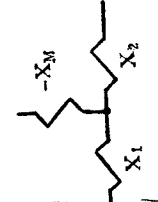
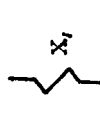
表 2-2-3 发电机的电抗平均值

名 称	电 抗 平 均 值		
	X_G'' 或 X_1	X_2	X_0
中容量汽轮发电机	12.5%	16%	6%
有阻尼绕组的水轮发电机	20%	25%	7%
没有阻尼绕组的水轮发电机	27%	45%	7%

表 2-2-2 电路中各元件的电抗和电抗标么值计算公式

电路中的元件类别	名称	计算系统图		等值电抗	等值电抗的计算公式	电抗标么值的计算公式	符号意义	各种系数的平均值①	各元件电抗标么值列于下表
		元件图例	系统图						
电 源	电力系统			X_s		$X_s^* = \frac{S_b}{S_s}$	X_s^* ——电力系统电抗标么值; S_b ——基准容量,兆伏安; S_s ——电力系统短路容量,兆伏安	若一时无法知道 S_s 之值,可用与系统连接的油开关额定断路容量代替	见表 2-2-4
	发电机			X_G	$X_G'' = \frac{X_G' \%}{100} \cdot \frac{U_b^2 \cos \varphi_{N.G.}}{P_{N.G.}}$ $X_G' = \frac{X_G'' \%}{100} \cdot \frac{S_b \cos \varphi_{N.G.}}{P_{N.G.}}$	$X_G'' = \frac{X_G' \%}{100} \cdot \frac{S_b \cos \varphi_{N.G.}}{P_{N.G.}}$ $X_G' = \frac{X_G'' \%}{100} \cdot \frac{S_b \cos \varphi_{N.G.}}{P_{N.G.}}$	X_G'' ——发电机电抗百分值; X_G' ——发电机电抗百分值; $P_{N.G.} \cos \varphi_{N.G.}$ ——发电机的额定功率和额定功率因数; U_b ——基准电压	见表 2-2-3	
变 压 器	双卷变压器			X_{Tr}	$X_{Tr} = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{N.Tr}^2}{S_{N.Tr.}}$ $X_{Tr}^* = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$	$X_{Tr}^* = \frac{X_{Tr.1} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$ $X_{Tr}^* = \frac{X_{Tr.2} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$ $X_{Tr}^* = \frac{X_{Tr.3} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$	U_k ——变压器短路电压百分数; $S_{N.Tr.}$ ——变压器额定容量	变压器短路电压百分数 (亦称阻抗电压百分值) 请查产品样本	见表 2-2-5
	三卷变压器			X_1, X_2, X_3	$X_1 = \frac{1}{2}(U_{K1-2} \% + U_{K1-3} \% - U_{K2-3} \%)$ $X_2 = \frac{1}{2}(U_{K1-2} \% + U_{K2-3} \% - U_{K1-3} \%)$ $X_3 = \frac{1}{2}(U_{K1-3} \% + U_{K2-3} \% - U_{K1-2} \%)$	$X_{Tr.1}^* = \frac{X_{Tr.1} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$ $X_{Tr.2}^* = \frac{X_{Tr.2} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$ $X_{Tr.3}^* = \frac{X_{Tr.3} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N.Tr.}}$	$X_{Tr.1}^*$ 、 $X_{Tr.2}^*$ 、 $X_{Tr.3}^*$ ——分别为变压器高、中、低压绕组的等值电抗标么值; $U_{K1-2} \%$ 、 $U_{K1-3} \%$ 、 $U_{K2-3} \%$ ——分别为三卷变压器高—中、中—低、高—低压绕组的短路电压百分数	三卷变压器的 高—中、中—低、高—低压绕组的 短路电压百分数 可查产品样本	见表 2-2-6

续表

电路中的元件类别	计 算 系 统		等 值 电 路	电抗标么值的计算公式	电抗标么值的计算公式	符 号 意 义	各种系数的平均值①	各元件电抗标么值列于下表
	元件名称	元件图例						
变 压 器	自耦变			$X'_1 = \frac{1}{2}(U'_{K1-2}\% + U'_{K1-3}\% - U'_{K2-3}\%)$	$X_{AT-1}^* = \frac{X'_1}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N \cdot AT}}$	X'_1, X'_2, X'_3 ——分别为自耦变压器的高、中、低压绕组的等值电抗	自耦变压器高、中、低压绕组的短路电压百分数 $U'_{K1-2}\%$ 、 $U'_{K2-3}\%$ 、 $U'_{K1-3}\%$ 可查产品样本	见 表 2-2-7
	压 器			$X'_2 = \frac{1}{2}(U'_{K1-2}\% + U'_{K2-3}\% - U'_{K1-3}\%)$	$X_{AT-2}^* = \frac{X'_2}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{N \cdot AT}}$			
电 抗	限流电抗器			$X_{CR} = \frac{X_{CR}\%}{100} \cdot \frac{U_{N \cdot CR}}{\sqrt{3} \cdot I_{N \cdot CR}}$	$X_{CR}^* = \frac{X_{CR}\%}{100} \cdot \frac{U_{N \cdot CR}}{\sqrt{3} \cdot I_{N \cdot CR}} \times \frac{S_b}{U_b^2}$	X_{CR}^* ——限流电抗器的电抗标么值; $X_{CR}\%$ ——限流电抗器的百分电抗; $U_{N \cdot CR}, I_{N \cdot CR}$ ——限流电抗器的额定电压和额定电流	$X_{CR}\%$ 值可查产品样本	见 表 2-2-8
	分裂电抗器			$X_M = K_M \cdot X$ $X_1 = X_2 = X + X_M = X \times (1 + K_M)$	$X_M^* = \frac{K_M X S_b}{U_b^2}$ $X_1^* = X_2^* = \frac{(1 + K_M) X S_b}{U_b^2}$	X_M ——互感电抗; K_M ——互感系数; X ——分裂电抗器的一支自感电抗; X_1, X_2 ——分裂电抗器两臂的等值电抗	$K_M \approx 0.4 \sim 0.6$	见 表 2-2-9
线 路	单导			$X_l = x \cdot L$ $x = 0.14451g \frac{2D}{d} + 0.0157\mu$	$X_l^* = X_l \cdot \frac{S_b}{U_b^2} = x \cdot L \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$	x ——架空线路单位长度电抗值, Ω/km ; L ——架空线路长度, km; X_l^* ——架空线路的电抗标么值; D ——各相导线间几何均距, mm; d ——导线直径, mm; d_{eq} ——相分裂导线的等效直径, mm; μ ——导线的相对磁导系数③	当 $U_N = 3 \sim 10 \text{ kV}$ 时 $x = 0.35 \Omega/\text{km}$ 当 $U_N = 35 \sim 220 \text{ kV}$ 时 $x = 0.4 \Omega/\text{km}$ 对有色金属: $\mu = 1$; 当 $U_N = 6 \sim 10 \text{ kV}$ 时 $x \approx 0.22 \Omega/\text{km}$ (可参考表 2-2-10)	见 表 2-2-11
	架空线路			$X_l = x \cdot L$ $x = 0.14451g \frac{2D}{d} + 0.0157\mu$ $X_l^* = X_l \cdot \frac{S_b}{U_b^2} = x \cdot L \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$	$X_l^* = X_l \cdot \frac{S_b}{U_b^2} = x \cdot L \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$			见 表 2-2-12

续表

电路中的元件类别	计算系统图		等值电抗	等值电抗的计算公式	电抗标么值的计算公式	符号意义	各种系数的平均值①	各元件电抗标么值列于下表
	元件图例	系统图						
线路				$X_{cl} = x' \cdot L$ ②	$X_{cl}^* = x' \cdot L \cdot \frac{S_b}{U_0^2}$	X_{cl}^* ——电缆的电抗标么值; x' ——电缆的单位长度电抗	当 $U_N = 3 \sim 6 \text{ kV}$ 时; $x' = 0.68 \Omega/\text{km}$; 当 $U_N = 35 \text{ kV}$ 时; $x' = 0.12 \Omega/\text{km}$	见表 2-2-13 和 表 2-2-14
异步电动机					$X_{im}^* = X_{im}'' \frac{S_b \cos \varphi_{N, im}}{P_{N, im}}$	X_{im}^* ——异步电动机电抗标么值; X_{im}'' ——异步电动机的次暂态电抗	$X_{im}'' \approx 0.17$	
同步电动机				$X_{syn}'' = \frac{X_{syn}''}{100} \times \frac{U_0^2 \cos \varphi_{N, syn}}{P_{N, syn}}$	$X_{syn}^* = \frac{X_{syn}''}{100} \times \frac{S_b \cos \varphi_{N, syn}}{P_{N, syn}}$	X_{syn}^* ——同步电动机的电抗标么值; X_{syn}'' ——同步电动机的次暂态电抗百分值; $P_{N, syn} \cos \varphi_{N, syn}$ ——同步电动机的额定功率和功率因数	对 $P_{N, syn} \geq 1000 \text{ kW}$; $X_{syn}'' \approx 20$ (详见表 2-2-15 和表 2-2-16)	见表 2-2-17
同步调相机					$X_{sc}^* = X_{sc}'' \frac{S_b \cos \varphi_{N, sc}}{P_{N, sc}}$	X_{sc}'' ——同步调相机次暂态电抗; $P_{N, sc}$ ——同步调相机额定功率; $\cos \varphi_{N, sc}$ ——同步调相机额定功率因数	$X_{sc}'' \approx 0.16$	见表 2-2-18

①若该系数在产品样本中难于查到,建议采用本栏所给的平均值去计算电抗标么值;

②对电缆线路,其单位长度的电抗值大大地小于其单位长度电阻值;

③相分裂导线的等效直径 d_{eq} ,可用下式求得: $d_{eq} = 2\sqrt[n]{r \cdot a^{n-1}}$ (mm),式中 r ——每根导线的半径,毫米; m ——每相导线股数; n ——导线每相分裂根数; a ——每相导线的自几何均距,毫米; $a = \sqrt[m]{D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6}$ 。

表 2-2-4(a) 汽轮发电机电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

型 号	额 定 容 量		额 定 电 压 kV	次暂态电抗标么值(正序电抗标么值)	负序电抗标么值	零序电抗标么值
	kW	kVA				
QF-6-2	6000	7500	6.3	1.65	2.15	0.833
QF-12-2	12000	15000	6.3	0.772	0.945	0.39
QF-12-2	12000	15000	10.5	0.852	1.04	0.474
QF-25-2	25000	31250	6.3	0.39	0.474	0.205
QF-25-2	25000	31250	10.3	0.364	0.445	0.245
QFQ-50-2	50000	62500	6.3	0.196	0.239	0.100
QFQ-50-2	50000	62500	10.5	0.208	0.255	0.107
TQC-5060/2	2500	3125	6.3	4.12	5.03	2.31
TQC-5466/2	6000	7500	6.3	1.54	1.87	0.935
TQC-5674/2	12000	15000	6.3	0.812	0.992	0.428
TQC-6075/2	25000	31250	6.3	0.512	0.625	0.248
TQ-1.5-2	1500	1875	6.3	5.71	6.96	1.465
TQ-25-2	25000	31250	6.3	0.404	0.496	0.251
TQ-25-2	25000	31250	10.5	0.418	0.512	0.191
TQQ-50-2	50000	62500	10.5	0.216	0.265	0.0895
TQN-50-2	50000	62500	6.3	0.337	0.414	0.169
TQN-100-2	100000	117500	10.5	0.155	0.19	0.0782

表 2-2-4(b) 中小型汽轮发电机的电抗百分值

型 号	额定电压 kV	额定容量 MW	功率因数 $\cos\varphi$	效 率 %	额定电流 A	各种电抗的百分值%				
						同步电抗 X_G	暂态电抗 X'_G	次暂态电抗 X''_G	负序电抗 X_2	零序电抗 X_0
TQT0.75-4-400	0.4	0.75	0.8	93.5	1355	138.3	36.04	14.11	15.59	
TQTK0.75-4-400	0.4	0.75	0.8	93.5	1355	138.3	36.04	14.11	15.59	
TQT1-4-400	0.4	1.0	0.8	95.5	1800	118.64	25.9	8.4	82	5.7
TQT1.5-4-400	0.4	1.5	0.8	95.9	2700	158.0	38.6	18		
TQT0.75-4-6300	6.3	7.5	0.8	93.5	86	113.1	29.07	11.25	12.79	
TQTK0.75-4-6300	6.3	7.5	0.8	93.5	86	113.1	29.07	11.25	12.79	
TQTK1-4-6300	6.3	1.0	0.8	93.5	114.5	117.36	30.04	16.86	16	6.65
TQT1.5-4-6300	6.3	1.5	0.8	95.5	172	154.3	38	18.4		
QF-3-2	6.3/3.15	3.0	0.8	95.3	344/688	193.83	17	10.33	12.6	4.89
QFK-3-2	6.3/3.15	3.0	0.8	95.3	344/688	193.83	17	10.33	12.6	4.89
QFG-3-2	6.3/3.15	3.0	0.8	95.3	344/688	193.83	17	10.33	12.6	4.89
TQC-5466/2	6.3	6.0	0.8	96.86	688	209	18.2	11.56	14.1	7.02
QF-6-2	6.3	6.0	0.8	96.4	688	205.9	19.9	12.39	15.1	6.24
QFG-6-2	6.3	6.0	0.8	96.4	688	205.9	19.9	12.39	15.1	6.24
TQC-5674/2	6.3	12.0	0.8	97.1	1375	229.9	19.2	12.4	15.1	6.57
QF ₁ -12-2	6.3/10.5	12.0	0.8	97.4	1375/825	190.1	20	12.21	14.9	6.37
QF ₂ -12-2	6.3	12.0	0.8	97.7	1375	159.83	18	11.33	13.84	6.23
TQC-6075/2	6.3	25.0	0.8	97.84	2860	217.7	25	16.2	19.8	7.6
QF ₂ -25-2	6.3/10.5	25.0	0.8	97.4	2860/1716	190.72	19.72	12.22	14.9	6.37
QFQ-50-2	10.5/6.3	50.0	0.8	98.5	3440/5730	186	20	12.4	15.25	8.1
QFS-125-2	13.8	125.0	0.85	98.35	6150	186.7	25.7	18	22	6.9
QFSS-125-2	13.8	125.0	0.85	98.315	6150	235	32.5	21.5	26.3	10.2

注: 暂态电抗亦称瞬变电抗; 次暂态电抗亦称超瞬变电抗。

表 2-2-5 110kV及以下的双卷变压器的电抗标么值 ($S_b = 100$ 兆伏安)

额定容量 kVA	变压器一次侧电压		变 压 器 一 次 侧 电 压										额定容量		变压器一次侧电压			备 注
	10kV (6kV)	35kV	在下列 $U_k\%$ 下的电抗标么值 $X_{\%}$										kVA		60kV	110kV	在下列 $U_k\%$ 下的电抗标么值 $X_{\%}$	
	在下列 $U_k\%$ 下的电抗标么值 $X_{\%}$											kVA		8	9	10.5		
	4	4.5	6.5	4.5	5.5	10	10.5	12	6.5	7	7.5	8	9	10.5				
100	40.0	45.0	65.0	1000	4.5	5.5			6.5						16000	0.563	0.657	本表 适用于 铜线变 压器和 铝线变 压器
125	32.0			1250	3.6	4.4			5.2						20000	0.40	0.45	
135		33.3		1600	2.82	3.44			4.06			5.0			31500	0.254	0.285	
160	25.0		40.6	1800	2.5	3.05			3.61			4.0			40000		0.263	
180		25.0		2000		2.75			3.25						40500	0.222	0.259	
200	20.0		32.5	2500	2.20	2.20			2.60	2.8					45000	0.20	0.233	
240		18.8		3150	1.75				2.22	2.22		2.54			50000		0.21	
250	16.0		26	3200	1.72				2.19	2.19		2.50			60000	0.15	0.175	
315	12.7		20.6	4000	1.375				1.75	1.75					63000		0.167	
320		14.1		4200	1.31				1.67	1.67		1.90			75000	0.12	0.14	
400	10.0		16.3	5000	1.10				1.40	1.40					90000		0.117	
420		10.7		5600	0.982						1.34				120000		0.087	
500	8.0		13.0	6300	0.874						1.19	1.27						
560		8.0		7500							1.00		1.20					
630	6.36		10.3	8000		0.8					0.938							
750		6.0		10000				1.20			0.75		0.90					
800		5.63	8.13	15000			0.70					0.533	0.60	0.70				

本表适用于铜线变压器和铝线变压器

表 2-2-6 60~220千伏三卷变压器的电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

三卷变压器额定容量	60kV		110kV		220kV	
	在下列 U_k 下的变压器电抗标么值 X_{tr}^*					
	第一种组合方式 (升压型) $U_{K1-2}\% = 17, U_{K1-3}\% = 10.5$ $U_{K2-3}\% = 6$		第一种组合方式 (升压型) $U_{K1-2}\% = 17, U_{K1-3}\% = 10.5$ $U_{K2-3}\% = 6$		第一种组合方式 (升压型) $U_{K1-2}\% = 22 \sim 24, U_{K1-3}\% = 13 \sim 15(16)$ $U_{K2-3}\% = 7 \sim 9$	
MVA	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 14 \sim 15\%$	$X_{II} = 8 \sim 9\%$
	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_I = 15.5\%$	$X_{II} = 8.5\%$
	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 14 \sim 15\%$	$X_{II} = -1 \sim 0\%$
	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_I = 15.5\%$	$X_{II} = 0.5\%$
MVA	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 14 \sim 15\%$	$X_{II} = 8 \sim 9\%$
	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_I = 15.5\%$	$X_{II} = 8.5\%$
	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 10.75\%$	$X_{II} = 6.25\%$	$X_I = 14 \sim 15\%$	$X_{II} = -1 \sim 0\%$
	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_{II} = -0.25\%$	$X_{III} = -0.25\%$	$X_I = 15.5\%$	$X_{II} = 0.5\%$
5.6	1.075	0.625	1.92	1.116	≈ 0	≈ 0
7.5	0.717	0.416	1.435	0.834	≈ 0	≈ 0
10.0			1.075	0.625	≈ 0	≈ 0
15.0			0.717	0.416	≈ 0	≈ 0
20.0			0.538	0.312	≈ 0	≈ 0
31.5			0.342	0.198	≈ 0	≈ 0
40.5			0.266	0.154	≈ 0	≈ 0
45.0			0.239	0.139	≈ 0	≈ 0
60 (或 3×20)			0.179	0.104	≈ 0	≈ 0
75 (或 3×25)			0.143	0.083	≈ 0	≈ 0
90 (或 3×30)			0.119	0.069	≈ 0	≈ 0
120 (或 3×40)					≈ 0	≈ 0
150 (或 3×50)					≈ 0	≈ 0
180 (或 3×60)					≈ 0	≈ 0
240 (或 3×80)					≈ 0	≈ 0
300 (或 3×100)					≈ 0	≈ 0
360 (或 3×120)					≈ 0	≈ 0
450 (或 3×150)					≈ 0	≈ 0

注: 括号外的数字用于三相变压器; 括号内的数字用于单相变压器。

表 2-2-7 220千伏自耦变压器的电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

自耦变压器 型 号	额定容量 kVA	$U'_{K1-2}\%$	$U'_{K1-3}\%$	$U'_{K2-3}\%$	$X_1\%$	$X_2\%$	$X_3\%$	自耦变压器电抗标么值 X_{AT}^*		
								$X_{AT.1}^*$	$X_{AT.2}^*$	$X_{AT.3}^*$
DFSO	60000	12	12	16	4	8	8	0.067	0.133	0.133
SFPSO	150000	11.4	33	19.6	12.4	-1	20.6	0.083	≈ 0	0.137
OSFPS	180000	8.5	30.8	20	9.65	-1.15	21.15	0.054	≈ 0	0.117
OSFPS	240000	8.9	32.2	21	10.05	-1.15	21.15	0.042	≈ 0	0.092

表 2-2-8 限流电抗器的电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

额定电压 kV	百分 电抗 %	NKL 型 铝 线 水 泥 电 抗 器 的 额 定 电 流 A										
		150	200	300	400	500	600	750	1000	1500	2000	3000
6	3	1.745	1.305	0.873	0.654	0.524	0.436	0.349				
	4	2.33	1.745	1.165	0.873	0.698	0.582	0.466	0.349			
	5	2.91	2.18	1.455	1.09	0.873	0.728	0.582	0.436	0.291		
	6	3.49	2.62	1.745	1.305	1.045	0.873	0.698	0.524	0.349	0.262	
	8	4.66	3.49	2.33	1.745	1.395	1.165	0.934	0.698	0.466	0.349	0.233
	10	5.82	4.36	2.91	2.18	1.745	1.455	1.165	0.873	0.582	0.436	0.291
	12										0.524	0.349
10	3	1.045	0.784	0.524	0.392	0.314	0.262					
	4	1.395	1.045	0.698	0.524	0.418	0.349	0.279				
	5	1.745	1.305	0.873	0.654	0.524	0.436	0.349	0.262	0.175		
	6	2.09	1.565	1.045	0.784	0.627	0.524	0.418	0.314	0.209	0.157	
	8	2.79	2.09	1.395	1.045	0.836	0.698	0.559	0.418	0.279	0.209	
	10	3.49	2.62	1.745	1.305	1.045	0.873	0.699	0.524	0.349	0.263	0.1745
	12									0.418	0.314	0.209
10kV 电抗器 用于6kV时	10									0.970	0.728	0.485
	12									1.165	0.873	0.582

表 2-2-9 FK(L)型分裂电抗器每臂电抗标么值 ($S_b = 100$ 兆伏安)

额定电压 kV	每 臂 额定电流 A	每 臂 额 定 百 分 电 抗 %							
		3	4	5	6	8	10	12	15
6.3	150	1.832	2.444	3.050	3.66	4.88			
	200	1.372	1.832	2.29	2.75	3.664	4.58		
	300	0.916	1.222	1.526	1.832	2.44	3.05		
	400	0.687	0.912	1.144	1.373	1.832	2.29		
	500	0.549	0.733	0.916	1.098	1.466	1.832		
	600	0.458	0.611	0.763	0.916	1.222	1.527		
	750		0.488	0.611	0.733	0.977	1.222		
	1000			0.458	0.549	0.733	0.916	1.098	
	1500				0.366	0.488	0.611	0.733	0.916
	2000					0.366	0.458	0.549	0.678
	3000						0.305	0.366	0.458

续表

额定电压 kV	每 臂 额定电流 A	每 臂 额 定 百 分 阻 抗 %							
		3	4	5	6	8	10	12	15
10.5	150	1.10	1.467	1.833	2.20	2.93			
	200	0.825	1.10	1.376	1.65	2.20	2.75		
	300	0.55	0.733	0.916	1.10	1.467	1.833		
	400	0.413	0.55	0.688	0.825	1.10	1.376		
	500	0.33	0.44	0.55	0.66	0.88	1.10		
	600	0.275	0.367	0.458	0.55	0.734	0.916		
	750		0.293	0.367	0.44	0.587	0.734		
	1000			0.275	0.33	0.44	0.55	0.66	
	1500				0.22	0.293	0.367	0.44	0.55
	2000					0.22	0.275	0.33	0.412
	3000						0.183	0.22	0.275

表 2-2-10 各种线路的单位长度平均电抗值

线 路 种 类		单 位 长 度 的 平 均 电 抗 值			备 注	
		正序电抗 X_1 Ω/km	负序电抗 X_2 Ω/km	零序电抗 X_0 Ω/km		
无避雷线的架空 输 电 线 路	单回路 双回路	对于 3~10kV线路 0.35	$X_2 = X_1$	3.5 X_1 5.5 X_1 3 X_1 5 X_1	为每回路数值	
有钢质避雷线的 架空输电线路	单回路 双回路			对于35~220kV线路	2 X_1 3 X_1	为每回路数值
有良导体避雷线的 架 空 输 电 线 路	单回路 双回路	0.4				为每回路数值
1千伏三芯电缆		0.06	$X_2 = X_1$	0.7	$X_0 = 3.5 X_1$ $X_0 = 3.5 X_1$ $X_0 = 3.5 X_1$	
1千伏四芯电缆		0.066		0.17		
6~10千伏三芯电缆		0.08		0.28		
20千伏三芯电缆		0.11		0.38		
35千伏三芯电缆		0.12		0.42		
115千伏单相充电电缆		0.18				

表 2-2-11 每公里架空线路阻抗及其标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

导 线 型 号	单位长度		单 位 长 度 电 抗								
	电 阻 Ω/km	0.4kV		6.3kV		10.5kV		37kV		115kV	
		实际值 Ω/km	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	
TJ-10	1.84	0.381	0.438	1.103	0.438	0.397					
TJ-16	1.20	0.36	0.417	1.048	0.417	0.378	0.47	0.0343			
TJ-25	0.74	0.345	0.402	1.012	0.402	0.364	0.456	0.0333			
TJ-35	0.54	0.336	0.392	0.988	0.392	0.356	0.445	0.0325			
TJ-50	0.39	0.324	0.381	0.957	0.381	0.345	0.434	0.0317			
TJ-70	0.28	0.312	0.370	0.932	0.370	0.336	0.423	0.0309			
TJ-95	0.20	0.303	0.360	0.912	0.360	0.328	0.413	0.0303			
TJ-120	0.158	0.295	0.353	0.889	0.353	0.320	0.406	0.0297			

导线型号	单位长度	单位长度电抗									
	电阻	0.4kV	6.3kV		10.5kV		37kV		115kV		
	Ω/km	实际值 Ω/km	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	实际值 Ω/km	标么值	
LJ-16	1.98	0.358	0.416	1.043	0.416	0.378					
LJ-25	1.28	0.344	0.402	1.012	0.402	0.364					
LJ-35	0.92	0.334	0.392	0.988	0.392	0.356					
LJ-50	0.64	0.323	0.380	0.957	0.380	0.345					
LJ-70	0.46	0.312	0.369	0.932	0.369	0.336					
LJ-95	0.34	0.303	0.36	0.912	0.36	0.328					
LJ-120	0.27	0.295	0.353	0.889	0.353	0.320					
LGJ-35	0.85						0.438	0.032			
LGJ-50	0.65						0.429	0.0314			
LGJ-70	0.46		0.365	0.920	0.365	0.331	0.418	0.0307	0.448	0.00339	
LGJ-95	0.33		0.353	0.890	0.353	0.320	0.406	0.0298	0.436	0.0033	
LGJ-120	0.27		0.347	0.874	0.347	0.315	0.400	0.0292	0.429	0.00325	
LGJ-150	0.21		0.341	0.859	0.341	0.309	0.394	0.0286	0.422	0.00319	
LGJ-185	0.17		0.333	0.839	0.333	0.302	0.386	0.0283	0.416	0.00314	
LGJ-240	0.132		0.325	0.819	0.325	0.295	0.378	0.0277	0.407	0.00308	
LGJ-300	0.107						0.371	0.0272	0.400	0.00303	
LGJ-400	0.08						0.362	0.0265	0.391	0.00296	

注：1. 实际采用的电压 U 与表中所给的平均电压 U_{av} 不同时，所列的标么值应乘以系数 $(U_{av}/U)^2$ ；

2. 导线电抗值按单回路钢筋混凝土杆计算，导线间的几何均距对0.4千伏、6.3(10.5)千伏、37千伏及115千伏分别采用0.6米、1.5米、3.5米及5.5米。

表 2-2-12 架空线路每公里平均正序、负序、零序电抗及电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

类别	平均电压	正序及负序电抗 $X_1 = X_2$		每公里长度零序电抗标么值					
		实际值	标么值	有良导体避雷线		有钢质避雷线		无避雷线	
	kV	Ω/km	X_1^*	单回路 $X_0^* = 2X_1^*$	同杆双回路 $X_0^* = 3X_1^*$	单回路 $X_0^* = 3X_1^*$	同杆双回路 $X_0^* = 5X_1^*$	单回路 $X_0^* = 3.5X_1^*$	同杆双回路 $X_0^* = 5.5X_1^*$
单导线	3.15	0.35	3.52	7.04	10.56	10.56	17.6	12.3	19.35
	6.3	0.35	0.882	1.764	2.646	2.646	4.41	3.087	4.85
	10.5	0.35	0.317	0.634	0.950	0.950	1.585	1.11	1.74
	37	0.40	0.0292	0.0584	0.0876	0.0876	0.146	0.102	0.16
	63	0.40	0.0101	0.0202	0.0303	0.0303	0.0505	0.0353	0.0555
	115	0.40	0.00303	0.00606	0.00909	0.00909	0.01515	0.0106	0.0167
双分裂导线	6.3	0.22	0.55						
	10.5	0.22	0.20						

表 2-2-13 电缆的单位长度电阻及其标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

电缆截面 mm ²	电缆单位长度电阻		在平均电压下的每公里电缆的电阻标么值					
	Ω/km		铜 芯			铝 芯		
	铜	铝	6.3kV	10.5kV	37kV	6.3kV	10.5kV	37kV
4	4.6	7.75	11.60	4.17	0.336	19.50	7.04	0.565
6	3.07	5.17	7.73	2.79	0.224	13.00	4.70	0.377
10	1.84	3.10	4.63	1.67	0.134	7.81	2.82	0.226
16	1.15	1.94	2.90	1.04	0.084	4.88	1.77	0.142
25	0.74	1.24	1.87	0.67	0.054	3.12	1.13	0.090
35	0.53	0.89	1.34	0.48	0.039	2.24	0.81	0.065
50	0.37	0.62	0.94	0.34	0.027	1.56	0.56	0.045
70	0.26	0.44	0.65	0.24	0.019	1.11	0.40	0.032
95	0.19	0.33	0.48	0.17	0.014	0.83	0.30	0.024
120	0.15	0.26	0.38	0.14	0.011	0.65	0.24	0.019
150	0.12	0.21	0.30	0.11	0.009	0.53	0.19	0.015
185	0.10	0.17	0.25	0.09	0.007	0.43	0.15	0.012
240	0.08	0.13	0.20	0.07	0.006	0.33	0.12	0.0095

注：本表系按电(V)64—62, 78—62 电力电缆标准所给的铜芯线的电阻系数为 0.0184 欧姆·毫米²/米 铝芯线的电阻系数为 0.031 欧姆·毫米²/米编制而成。

表 2-2-14 电缆每公里平均正序、负序、零序电抗及电抗标么值($S_b = 100$ 兆伏安)

平均电压 kV	正序电抗及负序电抗 $X_1 = X_2$		零序电抗标么值	备 注
	实 际 值 Ω/km	标 么 值 X_1^*	X_0^*	
3.15	0.08	0.805	2.82	1 $X_0^* \approx 3.5 X_1^*$
6.3	0.08	0.202	0.707	2 3~35kV 电缆为三芯电
10.5	0.08	0.0726	0.254	缆 110kV 电缆为单相充
37	0.12	0.00876	0.0307	油电缆
115	0.18	0.00136		

表 2-2-15 电机次暂态电抗百分值

电 机 类 型	次 暂 态 电 抗 平 均 百 分 值 %			电 势 平 均 值
	$X''\%$ 或 X_1	X_2	X_0	E'^*
大型同步电动机	20	24	8	1.10
同步调相机	16	24	8	1.20
异步电动机	17			0.90

表 2-2-16 同步电动机次暂态电抗

同步电动机型号	额定容量 kW	额定电压 kV	次暂态电抗值 X''_{Syn}	同步电动机型号	额定容量 kW	额定电压 kV	次暂态电抗值 X''_{Syn}
TD143/24-20	250	6/3	0.178	TD143/21-10	500	6/3	0.176
TD118/24-8	320	6	0.1368	TD143/20-12	500	6	0.1687
TD118/36-12	400	6	0.156	TD143/21-24	500	6	0.171