

中等专业学校教材

---

# 电力系统故障分析

沈阳电力专科学校 蔡元宇 编

水利电力出版社

## 前 言

本书是根据原水利电力部中等专业学校继电保护及自动装置专业的教学大纲编写的。在编写中，力求深入浅出、突出重点、概念清楚，以适合中专教学的要求。为了巩固和加深所学的知识，各章附有习题。

本书的编写提纲经过原水利电力部中专继电保护及自动装置专业组审定，全书由南京电力专科学校许正亚副教授主审，提出了许多宝贵意见，例题及习题由沈阳电力专科学校蔡超豪进行了验算，对此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

沈阳电力专科学校教授 蔡元宇

1990年5月

# 目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 电力系统故障分析的基本方法	2
第一节 电力系统的短路故障	2
第二节 标么制	4
第三节 电力系统中各元件的电抗	6
第四节 标么值的换算	8
第五节 短路电流的计算步骤	11
第六节 无限大容量电力系统供电的电路三相短路计算	14
第七节 网络变换和化简	18
习 题	23
第二章 对称故障的分析计算	26
第一节 同步发电机的等值电路	26
第二节 发电机供电电路三相短路计算	31
第三节 应用运算曲线求任意时刻的短路电流	39
第四节 短路电流的近似计算	44
习 题	49
第三章 对称分量法及电力系统各序网络图	53
第一节 对称分量法	53
第二节 对称分量法在不对称故障计算中的应用	55
第三节 电力系统各元件的序参数及等值电路	57
第四节 电力系统各序网络图的制定	64
习 题	69
第四章 不对称短路计算	71
第一节 单相接地短路	71
第二节 两相短路	75
第三节 两相接地短路	77
第四节 计算不对称短路的正序等效定则	81
第五节 应用运算曲线求故障点正序短路电流	83
第六节 不对称故障时电网中电流、电压的分布	85
第七节 变压器两侧电压、电流对称分量的相位关系	90
第八节 中性点不接地系统的单相接地故障	97
第九节 中性点经消弧线圈接地系统的接地故障	102
习 题	104

第五章 电力系统的非全相运行分析 .....	107
第一节 概述 .....	107
第二节 单相断线 .....	108
第三节 两相断线 .....	110
第四节 单相接地短路并断线时的潜供电流 .....	113
习 题 .....	114
第六章 电力系统短路故障的计算机算法 .....	115
第一节 节点导纳矩阵 .....	115
第二节 节点阻抗矩阵 .....	119
第三节 对称短路的计算机算法 .....	122
第四节 不对称短路的计算机算法 .....	125
第五节 任意时刻短路电流的计算 .....	130
第六节 电力系统短路计算程序举例 .....	130
习 题 .....	135
附录 I 短路电流周期分量运算曲线数字表 .....	136
附录 II 电力系统短路电流计算程序(T4) .....	140
附录 III 短路电流计算简化程序(C4) .....	153
部分习题答案 .....	160
参考文献 .....	162

## 绪 论

电力系统是由发电机、变压器、输电线路和负荷等元件组成的网络。发电厂的发电机生产电能，变压器、电力线路输送、分配电能，各种用电设备消耗电能。正常运行时，发电机输出的功率与用电设备所吸取的功率相平衡，电力系统的频率和电压都是稳定的。这种运行状态称为稳态。严格地说，这时的功率、电流、电压、频率也并不是常量，而是持续地变化，但由于变化很小，实际上可以认为是常量。

在电力系统运行过程中，常常受到各种突然的扰动，这些扰动使电力系统处于暂态过程之中，这时功率、电流、电压、频率会发生较大的变化，严重时可能会造成对系统的危害。例如短路故障引起较正常电流大得多的短路电流，可能使设备过热或受力而损坏；短路故障改变了网络结构，因而改变了各发电机的输出功率，造成各发电机组输入功率和输出功率不平衡，有可能引起发电机组互相失去同步；由于雷击或断路器操作引起的过电压可能危及设备的绝缘等等。因此，必须对电力系统的各种暂态过程进行分析研究，以确保电力系统安全运行。

电力系统暂态过程通常可以分为电磁暂态和机电暂态来研究。在暂态过程刚开始的一段时间内，系统中的发电机以及其它转动机械的转速由于惯性作用还来不及变化，暂态过程主要决定于各元件的电磁参数，这一阶段称为电磁暂态。随着暂态过程的发展，转速已有了变化，于是暂态过程的情况将不仅与电磁参数有关，而且还和转动机械的机械参数（转速、角位移）有关，这种牵涉角位移的暂态过程，我们称它为机电暂态过程。

本课程主要研究电力系统中由于故障所引起的电磁暂态过程。研究电磁暂态过程的重点在于分析计算短路故障后网络中电流、电压的变化，这时不计发电机组间角位移的变化（即设各发电机组转速不变）。机电暂态过程将在《电力工程》中研究。至于有关雷电及操作引起的暂态过电压，由高压工程有关书籍讨论。

# 第一章 电力系统故障分析的基本方法

## 第一节 电力系统的短路故障

电力系统可能发生各种类型的故障，常见的、对电力系统危害比较严重的有：短路、断线以及各种复故障等。由于短路故障对电力系统的危害最为严重，所以本书将选择短路故障作为重点来分析。

### 一、短路的定义及其种类

所谓短路，是指电力系统正常运行情况以外的相与相之间或相与地（或中性线）发生短接的情况。在正常运行时，除中性点外，相与相或相与地之间是绝缘的。

在三相系统中，可能发生的短路有：三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路。三相短路也称为对称短路，系统各相与正常运行时一样仍处于对称状态。其他类型的短路都是不对称短路。

电力系统运行经验表明，在各种类型的短路中，单相短路占大多数，两相短路和三相短路的机会较少。三相短路虽然较少发生，但情况较严重，应给以足够的重视。况且，从短路计算方法来看，一切不对称短路的计算，在采用对称分量法后，都可归结为对称短路的计算。因此，对三相短路的研究是有其重要意义的。

### 二、产生短路的原因

产生短路的主要原因是电气设备载流部分的绝缘损坏。引起绝缘损坏的原因有：各种形式的过电压（例如遭到雷击），绝缘材料的自然老化、脏污、直接的机械损伤等。绝缘的破坏在大多数情况下是由于没有及时发现和消除设备中的缺陷，以及设计、安装和运行维护不良所致。运行人员带负荷拉隔离开关，或者线路检修后未拆除地线就送电等误操作，也会引起短路故障。此外，鸟兽跨接在裸露的载流部分以及风、雪、雹、雾等自然现象所造成的短路也是屡见不鲜的。总之，产生短路的原因有客观的，也有主观的，只要运行人员加强责任心，严格按照规章制度办事，就可以把短路故障的发生控制在一个很低的限度内。

### 三、短路对设备及系统的危害

随着短路类型、发生地点和持续时间的不同，短路的后果可能只破坏局部地区的正常供电，也可能威胁整个系统的安全运行。短路的危险后果一般有以下几个方面：

（1）短路故障使故障点附近的支路中出现比正常值大许多倍的电流，由于短路电流的电动力效应，导体间将产生很大的机械应力，致使导体和它们的支架变形或绝缘子损坏。

（2）短路电流通过设备使发热增加，短路持续时间较长时，设备或其绝缘可能过热以致损坏。

（3）短路还会引起网络中电压降低，特别是靠近故障点处电压下降得最多，结果可能使部分用户的供电受到破坏。图1-1示出简单供电网络在正常运行时（曲线1）和K

点发生三相短路时(曲线2)各处电压变化的情况。K点三相短路时,K点电压降至零。由于变压器、电抗器和线路L-1、L-2流过很大的短路电流,造成很大的电压降,致使配电所B的母线电压下降很多,使由配电所B供电的用电设备不能正常工作。

(4)当短路发生地点离电源不远而持续时间又较长时,并列运行的发电厂可能失去同步,破坏系统稳定,造成大片地区停电。这是短路故障的最严重后果。

(5)发生不对称短路时,不平衡电流产生不平衡磁通,会在邻近的平行的通讯线路内感应出相当大的电势,造成对通讯的干扰。

为了保证电气设备安全而可靠地运行,减轻短路故障的影响,除应努力设法消除可能引起短路的一切原因外,还应尽快地切除短路故障部分,使系统电压在较短时间内恢复到正常值。此外还可采用限制短路电流的措施,如安装电抗器等。

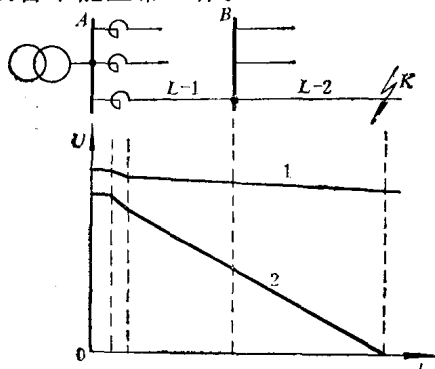


图 1-1 正常运行和短路故障时电网各处电压的变动

#### 四、短路计算的任务和若干简化假设

在电力系统和电气设备的设计和运行中,短路计算是解决一系列技术问题所不可缺少的基本计算。例如:选择合理的电气接线图,选用有足够热稳定性和机械强度的电气设备及载流导体,确定限制短路电流的措施,在电力系统中合理地配置各种继电保护并整定其参数等等。因此,掌握短路发生以后的物理过程以及短路时电流、电压的计算方法是非常必要的。

在实际工作中,根据一定的任务进行短路计算时,必须首先确定计算条件。所谓计算条件,一般包括:短路发生时系统的运行方式,短路的类型和发生地点,以及短路后所采取的措施等。从短路计算的角度来看,系统运行方式指的是系统中投入运行的发电、变电、输电、用电的设备的多少以及它们之间相互连接的情况。计算不对称短路时,还应包括中性点的运行状态。对于不同的计算目的,所采用的计算条件是不同的。

在短路的实际计算中,为了简化计算,常采取以下一些简化假设:

(1)发电机无摇摆现象。这种假设主要是考虑到在短路瞬间,电磁过程要比引起发电机摇摆的机电过程快得多。为了使计算简化,作了这种假设,并认为各发电机的电压初相位相同,即假设各发电机的电动势同相位。

(2)负荷只作近似估计。在电力系统的负荷中,异步电动机往往占很大的比重,它的等值阻抗会随转速变化,为了使计算简化,按照不同精确度的要求,它可以采用等值电动势和串联电抗来代表(见第二章),也可采用恒定电抗来代表(见第三章)。在不要求精确计算的场合,常忽略不计负荷的影响,本章暂不考虑负荷的影响。

(3)不计发电机、变压器等元件磁路饱和,即系统各元件的参数都是恒定的。此种假设使分析和计算大为简化,并且在分析过程中可以应用叠加原理。

(4)三相系统对称。除了短路故障本身破坏了系统的对称外(如不对称短路),电

力系统其它部分可当作是对称的。

(5) 忽略高压输电线的电阻和电容, 忽略变压器的电阻和励磁电流。这就是说, 发电、输电、变电和用电的元件均可用纯电抗表示。加上所有发电机电动势都同相位的条件, 这就避免了复数运算。

(6) 金属性短路。短路处往往存在一定的电阻, 如外物电阻、电弧电阻、接地电阻等, 这种电阻称为过渡电阻。所谓金属性短路, 就是不计过渡电阻的影响, 认为过渡电阻等于零的理想情况。在一般情况下, 这是允许的, 只有在某些继电保护整定计算时, 才需要考虑过渡电阻的影响。

必须指出, 这些假设都是相对的、有条件的, 在一种场合不大起作用的因素, 在另一种情况下则可能显示更大的甚至是决定性的影响。例如在分析接地短路故障时, 对中性点接地的电力系统, 可以忽略高压输电线的对地电容; 但对中性点不接地的电力系统, 故障电流经对地电容构成回路, 高压输电线的对地电容就不能予以忽略了。因此, 采取任一假设时, 都不可忘记它适用的合理范围。

电力系统的短路故障有时也称为横向故障, 因为它是相对相或相对地的故障。前面提到的断线故障也称为纵向故障, 例如一相或两相断线, 使系统发生非全相运行, 它们的分析方法和不对称短路的分析方法是类似的, 第五章中将予讨论。在电力系统中的不同地点(两处以上)同时发生故障的情况, 称为复故障, 本书不作介绍。

## 第二节 标么制

在电工计算中, 一般采用有单位制, 例如电流用A做单位, 电压用V做单位等等。而在电力系统故障的计算中, 除了少数情况采用有名制外, 一般都采用标么制进行计算, 使运算步骤简化, 所以我们先讨论一下标么制。

### 一、标么值

所谓标么值, 和百分值一样也是一种相对单位值, 其一般数学表达式为:

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际有名值}^{\text{①}}}{\text{基准值 (与实际有名值同单位)}} \quad (1-1)$$

对于任一物理量均可用标么值表示。例如发电机的电压 $U_G = 10.5\text{kV}$ , 若选定电压的基准值 $U_B = 10\text{kV}$ , 则发电机电压的标么值为:

$$U_{G*} = \frac{10.5}{10} = 1.05$$

式中 $U_{G*}$ 的下标“\*”表示标么值。

标么值的基准值一般来说是可以任意的, 所以, 当我们说一个物理量的标么值时, 必须同时说明它是以什么量作为基准值的, 否则只说一个标么值就没有意义了。

知道了标么值和它相对应的基准值后, 当然也很容易求得实际有名值:

① 实际有名值可以是交流电路中的有效值、模、相量或复数, 基准值只取有效值或模。



$$\text{实际有名值} = \text{标么值} \times \text{基准值} \quad (1-2)$$

其单位与基准值相同。工程上一般都习惯于把额定值选为该物理量的基准值。这样，如果该物理量处于额定（标准）状态下，其标么值为1（么），标么值的名称即由此而来。以额定值为基准值得出的标么值，称为额定标么值。

标么值同百分值的关系是：百分值除以100即得同样基准值表示的标么值，即：

$$\text{标么值} = \text{百分值} / 100 \quad (1-3)$$

## 二、基准值的选取

前面说过，基准值的选取是任意的，但是采用标么值的目的是为了简化计算和便于对计算结果作出分析评价，所以选取基准值应尽量能实现这些目的。

### 1. 单相电路

在单相电路中，电压 $U_\phi$ 、电流 $I_\phi$ 、视在功率 $S_\phi$ 和阻抗 $|Z_\phi|$ 这四个物理量之间存在下列关系：

$$U_\phi = |Z_\phi| I_\phi, \quad S_\phi = U_\phi I_\phi \quad (1-4)$$

如果选定上述各量的基准值，使与有名值具有相同的关系统，即：

$$U_{\phi B} = |Z_{\phi B}| I_{\phi B}, \quad S_{\phi B} = U_{\phi B} I_{\phi B} \quad (1-5)$$

将有名值的关系式除以基准值的关系式对应项，可得：

$$U_{\phi*} = |Z_{\phi*}| I_{\phi*}, \quad S_{\phi*} = U_{\phi*} I_{\phi*} \quad (1-6)$$

上式说明，在标么制中电路各物理量之间的基本关系式与有名制中的完全相同。因而有名制中的有关公式就可以直接应用到标么制中。

四个基准值为两个方程式所约束，一般给出 $S_{\phi B}$ 和 $U_{\phi B}$ ，这时电流和阻抗的基准值可由式(1-5)求出。

### 2. 三相电路

在对称三相电路中，将其看作等效Y接线，则线电压 $U$ 、线电流 $I$ （等于相电流 $I_\phi$ ）、三相视在功率 $S$ 、等值阻抗 $|Z|$ （即相阻抗 $|Z_\phi|$ ）以及相电压 $U_\phi$ 、单相功率 $S_\phi$ 等物理量之间存在下列关系：

$$U = \sqrt{3} |Z| I = \sqrt{3} U_\phi, \quad S = \sqrt{3} UI = 3S_\phi \quad (1-7)$$

选定上述各量的基准值，使它们与有名值具有相同的关系统：

$$U_B = \sqrt{3} |Z_B| I_B = \sqrt{3} U_{\phi B}, \quad S_B = \sqrt{3} U_B I_B = 3S_{\phi B} \quad (1-8)$$

将式(1-7)除以式(1-8)的对应项，可得：

$$U_* = |Z_*| I_* = U_{\phi*}, \quad S_* = U_* I_* = S_{\phi*} \quad (1-9)$$

由此可见，在标么制中三相电路的计算公式与单相电路的完全相同，线电压标么值与相电压标么值相等，三相功率标么值与单相功率标么值相等。这样就简化了公式，给计算带来了方便。

$U_B$ 、 $I_B$ 、 $S_B$ 和 $|Z_B|$ 等四个基准值为两个方程式所约束，一般给定电压和功率的基准值，则电流和阻抗的基准值可由式(1-8)得出：

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \quad (1-10)$$

$$|Z_B| = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (1-11)$$

有了电压、电流、功率和阻抗的基准值后，相应的标么值如下：

$$\left. \begin{aligned} U_* &= \frac{U}{U_B} \\ I_* &= \frac{I}{I_B} = \frac{\sqrt{3} U_B I}{S_B} \\ \bar{S}_* &= \frac{\bar{S}}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B} = \frac{P}{S_B} + j \frac{Q}{S_B} = P_* + jQ_*, \quad S_* = \frac{S}{S_B} \\ Z_* &= \frac{Z}{|Z_B|} = \frac{R + jX}{|Z_B|} = R \frac{S_B}{U_B^2} + jX \frac{S_B}{U_B^2} = R_* + jX_* \end{aligned} \right\} (1-12)$$

在工程计算中，式(1-12)中各有名值的单位采用如下：线电压为kV，线电流为kA，三相视在功率、有功功率、无功功率分别为MVA、MW、Mvar，阻抗、电阻、电抗均为 $\Omega$ 。三相视在功率基准值可以采用电力系统的额定容量，也可以采用某一整数，例如100MVA、1000MVA等。在短路电流的计算中，常采用电力网平均额定电压作为基准值，将在第四节中介绍。

这里再强调一下，在对称三相电路中，由于将其看作为等效Y接法，无论是标么值还是基准值，线电流等于相电流，等值阻抗即为相阻抗。在标么制中，线电压标么值与相电压标么值相等，三相功率标么值与单相功率标么值相等，但它们的基准值并不相同。在以后的学习中将会发现，在对称的三相短路中，故障时的节点电压常采用线电压来表示，基准值电压为 $U_B$ ；而在不对称短路中，常采用的是相电压的对称分量，基准值电压为 $U_{\phi B}$ 。

### 第三节 电力系统中各元件的电抗

计算短路故障时，必须知道电力系统中各元件的电抗值（电阻一般忽略不计），在1000V以上高压装置的计算中一般只考虑各主要元件，如：同步电机、电力变压器、电抗器、架空线及电缆线的电抗。配电装置中的母线、长度较小的连接导线及断路器、电流互感器等的阻抗，由于对短路计算的影响很小，不予考虑。电力系统的主要元件三相都是对称的，我们将三相电路看作等值Y接法来进行，各元件的电抗值均指一相的等值电抗，并采用标么值来表示。由于是以各元件的额定线电压和额定三相视在功率为基准值，故称为额定标么值。

#### 一、同步电机

在三相短路电流的实用计算中，一般只需知道同步电机在短路起始瞬间的电抗，即纵轴次暂态电抗 $X_d''$ 。产品目录中一般给出同步电机的额定线电压 $U_N$ 、三相额定容量 $S_N$ 和纵轴次暂态电抗的额定标么值 $X_d''_*$ 。在数据不全的情况下作近似计算时，可采用表1-1所列的平均值。

表 1-1

类 型	$X_{d*}$	类 型	$X_{d*}$
汽轮发电机	0.125	同步调相机	0.20
水轮发电机	0.20	同步电动机	0.20

## 二、电力变压器

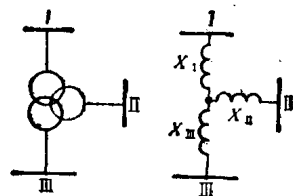
产品目录中给出了变压器的额定线电压 $U_N$ 、三相额定容量 $S_N$ 和短路电压百分值 $U_K\%$ 。

双绕组变压器短路电压百分值等于变压器在额定电流时的电压降与其额定电压的比值的百分数，变压器电抗的额定标么值等于短路电压百分值除以100，即：

$$X_{T*} = U_K\% / 100$$

三绕组变压器各绕组间短路电压的百分值分别用 $U_{KI-II}\%$ 、 $U_{KII-III}\%$ 和 $U_{KI-III}\%$ 表示，I、II和III分别表示高压、中压和低压。必须注意，三绕组变压器各绕组容量可能不同，但短路电压百分值都是对变压器额定容量而言的。三绕组变压器的等值电路如图1-2所示。等值电抗 $X_I$ 、 $X_{II}$ 和 $X_{III}$ 的标么值为：

$$\left. \begin{aligned} X_{I*} &= \frac{1}{200} (U_{KI-II}\% + U_{KI-III}\% - U_{KII-III}\%) \\ X_{II*} &= \frac{1}{200} (U_{KI-II}\% + U_{KII-III}\% - U_{KI-III}\%) \\ X_{III*} &= \frac{1}{200} (U_{KI-III}\% + U_{KII-III}\% - U_{KI-II}\%) \end{aligned} \right\}$$



(1-13) 图 1-2 三绕组变压器及其等值电路

三绕组变压器的三个绕组的额定电压通常是不同的，用以连接三个不同电压等级的系统。有一种称为分裂低压绕组的变压器，它也是一种三绕组变压器。I 为高压绕组，II 和 III 为两组相同的低压绕组（容量各为高压绕组的一半），运行时两个低压绕组分别接到两台容量相同的发电机（作升压变压器用）或给两段相同的厂用电母线供电（作降压变压器用）。用一个实例来说明，当 $U_{KI-II}\% = U_{KI-III}\% = 13.5$ ， $U_{KII-III}\% = 20$ ，则由式（1-13）得各绕组等值电抗标么值为：

$$X_{I*} = \frac{1}{200} (13.5 + 13.5 - 20) = 0.035$$

$$X_{II*} = X_{III*} = \frac{1}{200} (13.5 + 20 - 13.5) = 0.1$$

正常运行时，绕组II、III相当于并联运行，与高压绕组I一起，穿越电抗只有 $0.035 + 0.1/2 = 0.085$ 。而绕组I-II、I-III与II-III之间的电抗均较大，可限制II或III侧母线发生短路时的故障电流。

### 三、电抗器

电抗器在电力网中用来限制短路电流，一般给出额定线电压 $U_N$ 、额定电流 $I_N$ 和电抗百分值 $X_R\%$ 等参数，其电抗百分值定义为 $X_R\% = (\sqrt{3} I_N X_R / U_N) \times 100$ ，电抗标么值为电抗百分值除以100。

### 四、架空线和电缆线

在实用计算中，架空线和电缆线路每公里的电抗值可采用表1-2所示的平均数。

表 1-2

线路种类	电抗 ( $\Omega/\text{km}$ )	线路种类	电抗 ( $\Omega/\text{km}$ )
6~220kV架空线	0.4	3~10kV电缆线路	0.07~0.08
1000V以下架空线	0.3	1000V以下电缆线路	0.06~0.07
35kV电缆线路	0.12		

## 第四节 标么值的换算

### 一、不同基准值的标么值之间的换算

在电力系统的实际计算中，对于直接电气连接的网络，各元件的参数必须按统一的基准值换算。如上节所述，从手册或产品目录中查得的电机和电器的阻抗值，一般都是以各自的额定值为基准的额定标么值。由于各元件的额定值不尽相同，因此，必须把它们换算成统一基准值（统一的基准线电压 $U_B$ 和统一的基准三相视在功率 $S_B$ ）的标么值。

进行换算时，先把额定标么电抗还原为有名值，再计算其统一基准值时的标么值。

对于发电机和变压器，额定标么电抗 $X_{*(N)}$ 的基准值已知为 $U_N^2/S_N$ ，按式(1-2)有：

$$X_{(\text{有名值})} = X_{*(N)} \frac{U_N^2}{S_N}$$

电抗的统一基准值为 $U_B^2/S_B$ ，按式(1-1)得：

$$X_{*(B)} = X_{(\text{有名值})} \frac{S_B}{U_B^2} = X_{*(N)} \frac{U_N^2}{S_N} \frac{S_B}{U_B^2} \quad (1-14)$$

对于电抗器，它的额定标么电抗的基准值已知为 $U_N/\sqrt{3}I_N$ ，按式(1-2)有：

$$X_{(\text{有名值})} = X_{*(N)} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}$$

电抗的统一基准值为 $U_B^2/S_B$ ，按式(1-1)得：

$$X_{*(B)} = X_{(\text{有名值})} \frac{S_B}{U_B^2} = X_{*(N)} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \frac{S_B}{U_B^2} \quad (1-15)$$

对于线路，可以直接由有名值换算成统一基准值的标么值：

$$X_{*(B)} = X_{(\text{有名值})} \frac{S_B}{U_B^2} \quad (1-16)$$

**【例 1-1】** 某汽轮发电机的额定有功功率为50MW，额定功率因数  $\cos\varphi=0.8$ ，额定电压为10.5kV， $X_{d*(N)}''=0.141$ ，如选取 $S_B=100\text{MVA}$ 、 $U_B=10.5\text{kV}$ ，试求 $X_{d*(B)}''$ 。

**解** 发电机的额定容量（视在功率） $S_N$ 为50/0.8MVA，由式（1-14）：

$$X_{d*(B)}''=0.141 \times \frac{10.5^2}{50/0.8} \times \frac{100}{10.5^2}=0.226$$

**【例 1-2】** 一台电抗器的参数为 $U_N=10\text{kV}$ 、 $I_N=0.3\text{kA}$ 、 $X_R\%=4$ 。若取 $U_B=10.5\text{kV}$ 、 $S_B=100\text{MVA}$ ，试求 $X_{R*(B)}$ 。

**解** 电抗器的额定标么电抗为4/100，利用式（1-15）有：

$$X_{R*(B)}=\frac{4}{100} \times \frac{10}{\sqrt{3} \times 0.3} \times \frac{100}{10.5^2}=0.698$$

## 二、平均额定电压

在电力系统中，因为在线路上有电压降落，同一电压等级中各元件的额定电压就可能不一样，例如同一电压等级的升压变压器绕组额定电压与降压变压器绕组的额定电压有所不同。但是，为了简化计算，我们可以假定同一电压等级中的各个元件的额定电压是一样的，令其在数值上等于同一电压等级中的最高额定电压与最低额定电压的平均值，称为平均额定电压，用 $U_p$ 表示。以220kV网络为例，升压变压器二次侧的额定电压为242kV，降压变压器的一次侧额定电压为220kV，所以其平均额定电压为：

$$U_p=\frac{242+220}{2}=230\text{kV}$$

现将常用的各电压等级的平均额定电压列于表 1-3中，它们通常也用线电压表示。

表 1-3

$U_N$ (kV)	0.38	3	6	10	35	60	110	220	330	500
$U_p$ (kV)	0.4	3.15	6.3	10.5	37	63	115	230	345	525

## 三、变压器联系的网络中各元件参数标么值计算

电力系统中往往有许多不同电压等级的线路段，由升压变压器或降压变压器相耦联，在进行故障计算时，为了简单起见，通常是把具有磁耦联的电路变换为仅有电联系的等值电路。下面用图1-3为例说明换算的方法。图中 $\dot{E}$ 为理想电压源，代表发电机，其电动势正方向由“-”极到“+”极。

在简化计算中，以变压器两侧网络的平均额定电压之比来代替变压器的实际变比。这种近似可使计算大为简化，计算结果亦能满足一般工程的要求，因而得到了较广泛的应用。

首先，我们选定网络计算的基准功率。经变压器耦联的线路段，变压器两侧的电压不同，电流也不同，但功率是一样的。所以各段的基准功率是相同的。基准功率一经选定就是各段共同的基准功率。通常我们选网络计算的基准功率为100MVA，即 $S_B=100\text{MVA}$ 。

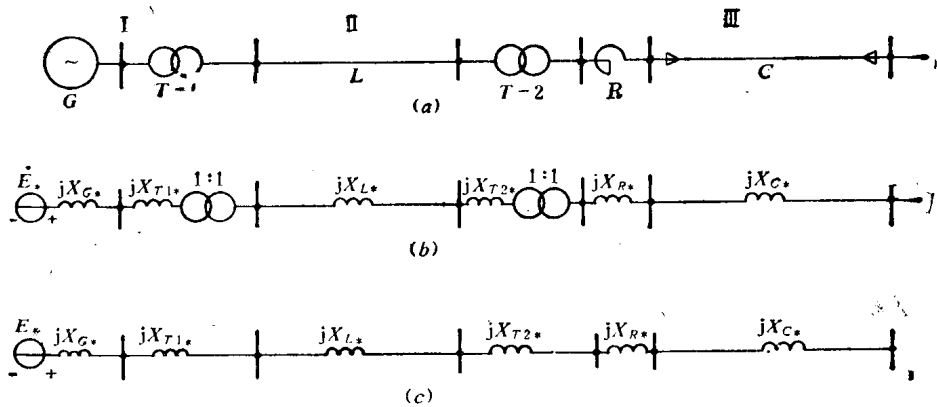


图 1-3 有三段不同电压等级的输电线及其等值电路

其次，对不同电压的线路段，分别选各自的平均额定电压为基准电压(记作 $U_B=U_P$ )。在图1-3(a)中，选第I段网络的基准电压 $U_{B1}$ 等于平均额定电压 $U_{P1}$ ，第II段网络的基准电压 $U_{B11}$ 等于平均额定电压 $U_{P11}$ ，第III段网络的基准电压 $U_{B111}$ 等于平均额定电压 $U_{P111}$ 。并假定发电机额定电压为 $U_{P1}$ ，变压器T-1的变比为 $U_{P1}/U_{P11}$ ，变压器T-2的变比为 $U_{P11}/U_{P111}$ 。

基准值选定以后，可对每一元件都按本段的基准值用公式(1-14)至(1-16)将其电抗换算成标么值。由于采用了平均额定电压的近似计算，式(1-14)中的 $U_N=U_P=U_B$ ，因而将发电机和变压器的额定标么电抗换算成统一基准值的标么电抗的计算式可进一步简化为：

$$X_{*(B)} = X_{*(N)} \frac{S_B}{S_N} \quad (1-17)$$

变压器可看成电抗串联一理想变压器的等值电路[图1-3(b)]，后者的变比用标么值表示时为1/1，以T-1为例，证明如下：

$$K_* = \frac{K}{K_B} = \frac{U_{P1}}{U_{P2}} / \frac{U_{B1}}{U_{B2}} = \frac{U_{P1}}{U_{B1}} / \frac{U_{P2}}{U_{B2}} = 1/1$$

变比为1/1的变压器在等值电路图上可予省略，于是有磁耦合的电路已变为仅有电联系的等值电路[图1-3(c)]。

这样做的好处是避免了折算的麻烦，这正是采用标么值在复杂网络运算中的主要优点。

**【例 1-3】** 按 $S_B=100\text{MVA}$ 、 $U_B=U_P$ ，计算图1-3(a)所示输电系统各元件电抗的标么值。已知各元件的额定值及参数如下：

发电机G 30MVA, 10.5kV, 额定标么电抗为 0.26

变压器T-1 31.5MVA, 10.5/121kV,  $U_k\% = 10.5$

架空线路L 80km, 0.4Ω/km

变压器T-2 15MVA, 110/6.6kV,  $U_k\% = 10.5$

电抗器R 6kV, 0.3kA,  $X_R\% = 5$

电缆线路C 2.5km, 0.08Ω/km

解 按 $S_B = 100\text{MVA}$ 、 $U_B = U_P$ ，即 $U_{B1} = 10.5\text{kV}$ 、 $U_{B11} = 115\text{kV}$ 、 $U_{B111} = 6.3\text{kV}$ 。利用式(1-15)到(1-17)对各元件电抗标么值[图1-3(c)]计算如下：

$$X_{G*} = 0.26 \times \frac{100}{30} = 0.867$$

$$X_{T1*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{31.5} = 0.333$$

$$X_{L*} = 0.4 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.242$$

$$X_{T2*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{15} = 0.7$$

$$X_{R*} = \frac{5}{100} \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.3} \times \frac{100}{6.3^2} = 1.46$$

$$X_{C*} = 0.08 \times 2.5 \times \frac{100}{6.3^2} = 0.504$$

式(1-15)到(1-17)以后要经常使用，应熟练掌握。

#### 四、由标么值转换为有名值

标么值是个相对值，没有具体单位，在计算中只作为一个中间桥梁。因为在选择和校验电气设备及继电保护整定等工作中均需知道电气量的有名值，所以必须将计算结果的标么值还原成有名值。由式(1-12)，由标么值还原为有名值的换算式为：

$$\left. \begin{aligned} U &= U_* U_B \\ I &= I_* I_B = I_* \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \\ S &= S_* S_B \\ X &= X_* |Z_B| = X_* \frac{U_B^2}{S_B} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

其单位与式(1-12)对应的单位相同。

### 第五节 短路电流的计算步骤

在进行短路电流计算以前，应根据计算目的搜集有关资料，如电力系统接线图、运行方式和各元件的技术数据等。进行计算时，首先作出计算电路图，再根据它对各故障点作出等值电路图，然后利用网络化简规则，将等值电路逐步化简，求出短路回路总电抗，根据总电抗即可求出短路电流值。本节及本章第六、七节将分别予以介绍。

#### 一、计算电路图的制作

计算电路图是一种简化了的单线图(如图1-4所示)，即用单线图代表三相电路。图中仅画出与计算短路电流有关的元件以及它们之间的连接，并标明各元件的参数。假定现

在我们只讨论对称的三相短路，因为三相对称，可以归结为一相的计算，所以可用单线图来表示。图中各元件按顺序编号。计算电路图中各元件的连接方式和故障点的设置应根据计算短路电流的目的决定。

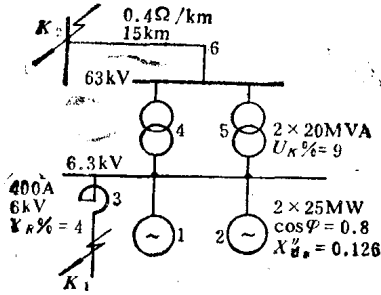


图 1-4 计算电路图举例

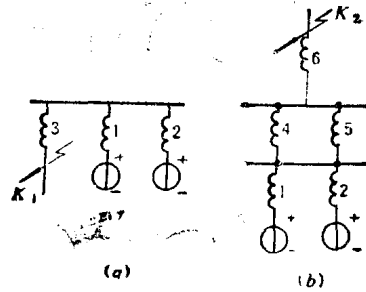


图 1-5 等值电路图

为选择校验电气设备，必须计算可能通过被选择设备的最大短路电流值。但此值应按正常运行方式决定。如正常工作时分开运行的几台变压器，只在切换过程中才短时并联，则计算电路图应按分开运行作出。

计算电路图还应考虑到发电厂或变电所本身及其所在电力系统的发展情况。

设计继电保护装置时，可能要计算电气装置或整个电力系统不同运行方式的短路电流，如部分发电机工作时的短路电流。这些都应在计算电路图中反映出来。

在实用计算时采用平均额定电压代替实际电压，并标注在计算电路图的母线上。

## 二、等值电路图的确定

由于短路电流是对各故障点分别进行计算的，所以等值电路图可以按指定的各故障点分别作出。图1-5(a)、(b)分别表示了图1-4对故障点 $K_1$ 、 $K_2$ 的等值电路图，它们也用单线图画出，图中发电机用理想电压源（简称电压源）串接电抗表示，其它元件用电抗表示。图中各元件的编号与计算电路图相对应，也可标注其电抗值。

## 三、短路回路总电抗的计算

电力系统短路计算中，除了少数情况采用有名值外，多数都采用标么值进行计算。标么值的定义及其换算方法已在前面作了介绍。首先选定基准功率 $S_B$ 和基准电压 $U_B$ 。一般选 $S_B$ 为100MVA、1000MVA或该系统的总容量。在短路电流计算中常采用简化的计算方法，在各级电压中采用平均额定电压 $U_p$ 作为基准电压，记作 $U_B = U_p$ ，以变压器两侧网络的平均额定电压之比代替变压器的实际变比。这样可按式(1-15)~(1-17)计算各元件的电抗标么值。然后利用网络等效变换的规则进行合并和简化（见第七节）。

图1-6(a)为经简化后最简单的等值电路，也用单线图画出。 $\dot{E}_z$ 为等效电势， $jX_z$ 为等效电抗，称为回路的总电抗，均为标么值（为了方便起见，在不发生混淆的情况下，以下省略标么值下标“\*”）。这种作法，就是把整个网络以故障点 $K$ 和中性点 $N$ （图中用虚线表示）为两个端点，简化为等值的有源两端网络。因此，短路电流便等于 $\dot{I}_k = \dot{E}_z / jX_z$ 。我们还可以进一步略去图中虚线和电抗的虚数符号，电势、电压和电流也可以不必用相量



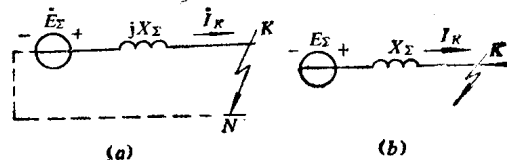


图 1-6 简化后最简单的等值电路

表示, 只计算有效值, 从而图1-6(a)简画为图1-6(b), 有  $I_k = E_Z / X_Z$ 。

下面用一个例子来说明求总电抗的方法。

**【例 1-4】** 计算图1-4中故障点  $K_1$  和  $K_2$  的短路回路总电抗的标么值。

**解** 根据图1-4中已知条件, 选  $S_B = 100$  MVA,  $U_B = U_p$ , 并作  $K_1$  点短路的等值电路

图, 如图1-7(a)所示, 各元件编号与图1-4相同。用式(1-17)计算  $X_1$  和  $X_2$ , 得:

$$X_1 = X_2 = X_d'' \frac{S_B}{S_N} = 0.126 \times \frac{100}{25/0.8} = 0.403$$

用式(1-15)计算  $X_3$ , 得:

$$X_3 = \frac{X_R\%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{4}{100} \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.4} \times \frac{100}{6.3^2} = 0.873$$

由于图1-7(a)中虚线连接的两点是等电位点, 所以可予合并。合并后电动势大小不变, 而容量等于两台发电机容量之和。短路回路总电抗标么值  $X_7$  为  $X_1$ 、 $X_2$  相并联后串联  $X_3$ , 得:

$$X_7 = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + X_3 = \frac{1}{2} \times 0.403 + 0.873 = 1.075$$

$K_2$  点短路的等值电路如图1-7(b)所示, 各元件编号与图1-4相同。用式(1-17)计算  $X_4$  和  $X_5$ , 得:

$$X_4 = X_5 = \frac{U_K\%}{100} \frac{S_B}{S_N} = \frac{9}{100} \times \frac{100}{20} = 0.45$$

线路电抗  $X = 0.4 \times 15 \Omega$ , 用式(1-16)计算  $X_6$ , 得:

$$X_6 = X \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 15 \times \frac{100}{63^2} = 0.151$$

短路回路总电抗标么值  $X_8$  为先将  $X_1$ 、 $X_2$  并联、 $X_4$ 、 $X_5$  并联, 然后将它们和  $X_6$  串联, 得:

$$X_8 = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + \frac{X_4 X_5}{X_4 + X_5} + X_6 = \frac{1}{2} \times 0.403 + \frac{1}{2} \times 0.45 + 0.151 = 0.578$$

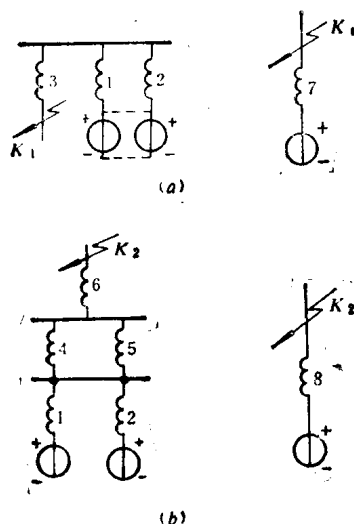


图 1-7 例1-4电路