

高等学校教材

# 电力系统故障分析

华北电力学院主编

电力工业出版社

高等学校教材  
**电力系统故障分析**  
华北电力学院主编

\*

电力工业出版社出版  
(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售  
水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 24印张 544千字  
1980年6月第一版 1980年6月北京第一次印刷  
印数00001—24200册 定价2.45元  
书号 15036·4063

## 内 容 提 要

本书较全面地叙述了电力系统故障分析与计算的基本原理和方法。全书共分八章，包括：故障分析的基本知识；同步电机的基本方程和对称故障分析；电力系统元件的各序参数和等值电路；简单不对称故障的分析计算；不对称故障时电流、电压的分布计算；利用电子数字计算机计算电力系统故障的方法；复故障计算；高压远距离输电线路的短路暂态过程。在附录中还介绍了计算任意时间短路电流周期分量有效值的运算曲线。

本书系高等学校电力系统继电保护及自动化专业教材，同时可作为电力类其它专业的教学参考书，也可供从事电力系统和继电保护自动化工作的工程技术人员参考。

## 前 言

本书是根据1978年水利电力部制订的高等学校教材编审规划(草案)组织编写的。

在编写过程中,除了对传统的内容进行精选,并系统地予以介绍外,还力求把当前有关电力系统故障计算的新发展、新成就反映到书中来;在注意阐述基本概念和基本原理的同时,尽量顾及了电力系统实际计算的需要。书中标注\*的部分是选学及参考的内容,教师在授课时可灵活掌握。

参加本书编写工作的有:重庆大学的米麟书同志(编写第六、七章);华北电力学院的刘万顺同志(编写第一、二、三章及附录一),何之文同志(编写第四、五章),俞有瑛同志(编写第八章及附录二)。由刘万顺同志主编。

书中插图由华北电力学院吕树珍同志绘制。

本书从初稿到修改稿都经华中工学院何仰赞同志详细审阅,提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

在编写过程中,承蒙杨以涵、杨奇逊、周波、王佩章、徐国禹、刘芳宁、林宪枢、叶一麟等同志分别校阅了初稿有关章节,并提出了许多宝贵意见。还有不少学校和单位热情地提供参考资料,在此,一并致以谢意。

对于书中的缺点和错误,诚恳地希望读者提出批评指正。

编 者

1979年12月

# 目 录

## 前 言

第一章 故障分析的基本知识 .....	1
1-1 概述 .....	1
1-2 电力系统各主要元件的等值电路 .....	4
1-3 标么制 .....	7
1-4 网络变换及化简 .....	19
1-5 由无限大功率电源供电的三相短路 .....	26
第二章 同步电机的基本方程和对称故障分析 .....	34
2-1 同步电机的原始方程 .....	35
2-2 坐标变换及 $d q 0$ 系统 .....	41
2-3 派克-戈列夫方程 .....	47
2-4 同步电机的常用标么制 .....	54
2-5 运算电抗 .....	57
2-6 同步电机三相短路暂态过程分析 .....	58
2-7 同步电机的暂态及次暂态参数 .....	74
2-8 由发电机供电电路三相短路的实用计算 .....	84
*2-9 负荷影响 .....	86
第三章 电力系统元件的各序参数和等值电路 .....	92
3-1 不对称三相电路中对称分量法的应用 .....	92
3-2 序阻抗的基本概念 .....	99
3-3 发电机的阻抗 .....	100
3-4 负荷的阻抗 .....	103
3-5 变压器的阻抗 .....	104
3-6 架空线路的阻抗 .....	111
3-7 电缆的阻抗 .....	125
*3-8 架空输电线的相序电容 .....	126
3-9 电力系统相序网络的构成 .....	133
第四章 简单不对称故障的分析计算 .....	137
4-1 概述 .....	137
4-2 横向不对称故障的分析计算 .....	138
4-3 系统参数 $\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}$ 、 $\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}$ 取不同值时不对称短路处各相电流、电压的变化特点 .....	149
4-4 短路点经过渡阻抗的横向不对称故障的分析计算 .....	155
4-5 纵向不对称故障的分析计算 .....	161
*4-6 不对称故障时的通用故障图及对称性变换 .....	173

*4-7	应用 $\alpha\beta 0$ 系统计算不对称故障	180
<b>第五章</b>	<b>不对称故障时电流、电压的分布计算</b>	<b>184</b>
5-1	电流和电压分布计算的基本方法	184
5-2	单电源网络中不对称短路时电压的分布规律	189
5-3	变压器两侧电压、电流对称分量的相位关系	195
5-4	短路处过渡电阻对电流、电压分布的影响	210
<b>第六章</b>	<b>用电子数字计算机计算电力系统故障的方法</b>	<b>221</b>
6-1	概述	221
6-2	电力系统故障计算用的等值网络及其节点方程	222
6-3	系统故障时网络电气量值的计算	234
6-4	节点导纳矩阵( $Y$ )的形成	249
6-5	求节点阻抗矩阵( $Z$ )的方法	256
*6-6	电力系统结构变更时对 $Y$ 与 $Z$ 的修正计算	276
6-7	节点导纳方程的常用解法	280
*6-8	大型电力系统故障的计算方法	294
*6-9	网络节点编号的优化问题	303
<b>第七章</b>	<b>复故障计算</b>	<b>309</b>
7-1	概述	309
7-2	双口网络的口参数方程	310
7-3	应用双口网络理论计算双重复故障	314
*7-4	$N$ 重复故障计算	328
*7-5	小电流接地系统中两点异相接地故障计算	330
<b>第八章</b>	<b>高压远距离输电线的短路暂态过程</b>	<b>334</b>
8-1	高压电网短路暂态过程中各种暂态分量的基本分析	334
8-2	高压电网三相短路暂态过程的计算	346
*8-3	对称分量法在不对称短路暂态过程计算中的应用	354
<b>附录一</b>	<b>计算任意时间短路电流周期分量有效值的计算曲线</b>	<b>363</b>
<b>附录二</b>	<b>运算法中将初始条件化为零值的方法</b>	<b>374</b>

# 第一章 故障分析的基本知识

## 1-1 概 述

电力系统有两种基本的运动状态，即稳态与暂态。

电力系统稳态运行时，发电厂所发出的功率与用户所需要的功率相平衡，系统的频率和电压都是稳定的。

然而，这种运行中的稳态，并不是绝对不变的。当系统受到某种干扰时，功率的平衡即被打破，运动状态也将随之而变。由于系统中包含有许多惯性元件，运动状态的变化不能瞬时完成，而必须经历一个过渡状态，这种过渡状态称为暂态。

实际上干扰有大有小，电力系统在经受干扰以后，其过渡的结局有两种可能性：一种情况是，系统从原来的稳态过渡到另一种新的稳态，其运行参数（电压和频率）相对于正常值的偏差能够保持在一定的允许范围内，系统仍能继续正常工作，例如负荷的增减，原动机的调整等，正常运行中的电力系统，实际上就是经常处于这种较小变动的过程中；另一种情况是，当电力系统发生各种故障的时候，系统的运行参数发生剧烈变化，因而引起有可能导致电力系统的正常运行局部地甚至全部地遭到破坏，或者即使能够达到一种新的稳定状态，但其运行参数也将大大偏离正常值，使得电能质量严重变坏，如不采取特别措施，系统就很难恢复正常运行，这就是电力系统运行的事故状态。这种状态的出现，将给工农业生产、国防建设以及人们的生活带来严重的恶果。

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他转动机械的转速由于惯性作用还来不及变化，暂态过程主要地决定于各元件的电磁参数，暂态过程的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。

《电力系统故障分析》这门课程主要是研究电力系统中由于故障所引起的电磁暂态过程，搞清楚暂态发生的原因、发展过程及后果，从而为与电力系统的故障作斗争准备必要的理论知识。

电力系统可能发生的故障类型比较多，常见的、对电力系统危害比较严重的有：短路、断相以及各种复杂故障等。由于短路故障是电力系统中危害最严重的故障，所以我们将选择短路故障作为重点来分析。

### 一、短路的概念

所谓短路，是指电力系统正常运行情况以外的一切相与相之间或相与地之间的“短接”。在电力系统正常运行时，除中性点外，相与相或相与地之间是绝缘的。如果由于某种原因使其绝缘破坏而构成了通路，我们就称电力系统发生了短路故障。

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。运行人员带负荷拉刀闸，或者线路检修后未拆除地线就加上电压等等误操作，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，产生短路的原因有主观的也有客观的。但是，只要我们提高警惕，加强责任心，严格地按科学态度办事，就可以把短路故障的发生控制在一个很低的限度内。

## 二、短路的种类

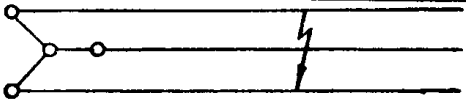
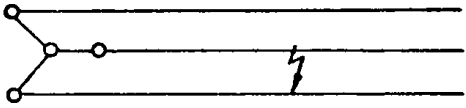
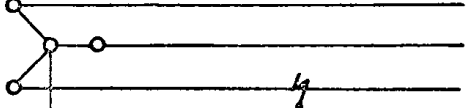
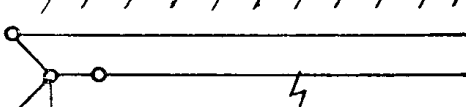
在三相系统中，三相同时短接的情况称为三相短路。由于各相阻抗相同，三相对称，所以又称为对称短路。除三相短路外，其他各种短路都称为不对称短路。电力系统在同一地点所发生的不对称短路有：两相短路、两相接地短路和单相接地短路。在发生此类短路时，三相系统将处于不对称的状态。

电力系统的运行经验表明，发生各种短路的概率是不同的。其中单相接地较多，约占65%，而相间短路则较少。但是不能由此就轻视相间短路的研究，特别是三相短路，虽然它发生的机会较少，但情况较严重，又是研究其他短路的基础，所以要予以足够的重视。

各种短路的示意图和代表符号列于表1-1。

表 1-1

各种短路的示意图和代表符号

短 路 种 类	示 意 图	短 路 代 表 符 号
三 相 短 路		$K(3)$
两 相 短 路		$K(2)$
单 相 接 地 短 路		$K(1)$
两 相 接 地 短 路		$K(1,1)$

## 三、短路的现象及后果

电力系统发生短路时，系统的总阻抗要减小，这在三相短路时是显而易见的，其他类型短路时也是如此。因而伴随短路所产生的基本现象是：电流剧烈增加，例如发电机出线端处三相短路时，电流的最大瞬时值可能高达额定电流的10~15倍，从绝对值来讲可达上



万安培，甚至十几万安培。在电流急剧增加的同时，系统中的电压将大幅度下降，例如系统发生三相短路时，短路点的电压将降到零，短路点附近各点的电压也将明显降低。

由于短路时有上述现象发生，因而短路所引起的后果是破坏性的。具体表现在以下几个方面：

1. 短路点的电弧有可能烧坏电气设备，同时很大的短路电流通过设备会使发热增加，当短路持续时间较长时可能使设备过热而损坏。

2. 很大的短路电流通过导体时，要引起导体间很大的机械应力，如果导体和它们的支架不够坚固，则可能遭到破坏。

3. 短路时，系统电压大幅度下降，对用户工作影响很大。系统中最主要的电力负荷是异步电动机，它的电磁转矩同它的端电压的平方成正比，电压下降时，电磁转矩将显著降低，使电动机停转，以致造成产品报废及设备损坏等严重后果。

4. 当电力系统中发生短路时，有可能使并列运行的发电厂失去同步，破坏系统稳定，使整个系统的正常运行遭到破坏，引起大片地区的停电。这是短路故障最严重的后果。

5. 不对称接地短路所造成的不平衡电流，将产生零序不平衡磁通，会在邻近的平行线路内（如通讯线路，铁道讯号系统等）感应出很大的电动势。这将造成对通讯的干扰，并危及设备和人身安全。

由上述可见，对短路过程的研究具有十分重要的意义。实际上，短路问题已成为电力技术方面的基本问题之一。在发电厂、变电站以及整个电力系统的设计和运行的许多工作中，都必须有短路计算的结果作依据，例如：选择合理的电气接线图，选用有足够热稳定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，研制和在电力系统中合理地配置各种继电保护和自动装置，并正确的整定其参数等等。因此深入掌握短路问题的理论及其计算方法是很有必要的。

#### **四、断相故障及复杂故障**

电力系统除了短路故障外还可能发生断相故障以及各种类型的复杂故障。

所谓断相故障是指电力系统一相断开或两相断开的情况。这种故障也属于不对称性故障。

在电力系统中的不同地点（两处或两处以上）同时发生不对称故障的情况，称为复杂故障。

随着电力系统的发展，发生这些故障的实际可能性是存在的。因此必须加强对这些故障的分析和研究。

#### **五、关于合理假设的必要性**

影响电力系统暂态过程的因素很多，例如磁路的饱和，各种物理过程的相互影响等，若在实际计算时把这些影响因素统统考虑，那是十分复杂的，有时是不可能的。另外，在许多情况下这样做也没有必要。因此，通常是在满足工程要求的情况下，采取一些合理的假设，以便略去次要因素，突出主要矛盾，简化计算分析。

不过，在实际计算中由于故障的情况及各种问题对计算分析的要求都可能不同，因而

制订完全统一的假设也很难做到，所以只能对于具体的问题进行具体分析，弄清主次，从实际出发来恰当确定。

对于各种短路，对于系统中的各个元件，通常可采用以下几个基本的假设：

1. 磁路的饱和、磁滞忽略不计。这样，系统中各元件的参数便都是恒定的，可以运用迭加原理。

2. 系统中三相除不对称故障处以外都可当作是对称的，因而在应用对称分量法时，对于每一序的网络可用单相等值电路进行分析。

3. 各元件的电阻略去不计。从高压网络来看，通常发电机的  $R < 0.05x$ ，变压器的  $R \approx 0.1x$ ，线路的  $R \approx (0.2-1)x$ ，各元件的电阻都比电抗小得多。事实上，即使短路回路的  $R_s = \frac{1}{3}x_s$ ，略去电阻而求得的短路电流也仅增大5%左右，这在实际工程中是容许的。

如果  $R_s > \frac{1}{3}x_s$ ，即当短路是发生在电缆线路或截面很小的架空线上时，特别在钢导线上时，电阻便不能忽略。此外，在计算暂态电流的衰减时间常数时，微小的电阻也必须计及。

4. 金属性短路。短路处，相与相（或地）的接触，往往经过一定的电阻（如外物电阻、电弧电阻、接地电阻等等），一般称之为“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，不计过渡电阻的影响工程上是允许的，只有在某些继电保护计算时，才需要考虑它的影响。

必须指出，任何一条假设都是相对的、有条件的，在一种场合下不大起作用的因素，在另一种情况下则可能显示重大的甚至是决定性的影响。例如在低压系统中，参数的分布性可以不考虑，但在分析超高压远距离输电线路的暂态过程时，电气参数的分布性常常就需要考虑，否则在分析某些继电保护装置的动作行为时就可能得出错误的结论。因此，采取任一假设时，都不可忘记它运用的合理范围。当然，多考虑一些实际因素将使计算复杂化，但是随着电子计算机的发展和普及，这些复杂的计算问题是完全能够解决的。

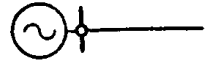
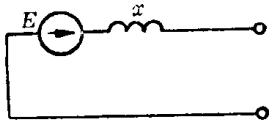

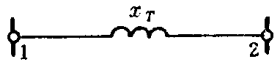
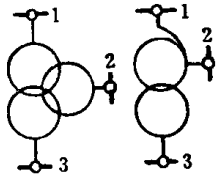
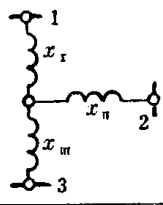

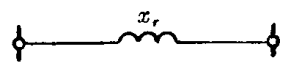
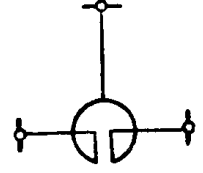
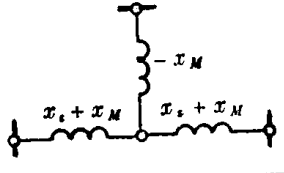
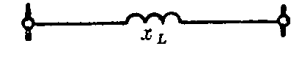
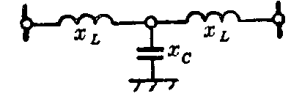
在本章中，我们将以无限大功率系统的三相短路为例，介绍有关故障计算的一般程序和方法。短路计算的大体步骤是：首先根据已知的条件和要求建立电力系统的等值网络，然后化简网络，并对网络进行暂态过程的计算和分析。在建立电力系统的等值网络时，有两个方面的问题要解决：一个是要确定电力系统各元件的等值电路；另一个是要对各元件的参数进行换算。下面一节，我们首先讨论电力系统各主要元件的等值电路。

## 1-2 电力系统各主要元件的等值电路

一个元件的等值电路和在计算时所采用的具体假设有关。一般在进行短路的计算和分析时，为了简便和突出基本内容，我们将结合各元件的特定情况再引用一些合理的具体假设。短路的类型不同，一个元件的等值电路也往往有所不同。需要强调的一点是，下面所讨论的等值电路是仅对三相短路时的对称电流而言的。各元件的等值电路图或接线图，为了简单明了，一般多画成单线图。所谓单线图，是将三相系统以单相表示，而且省略了中

线之后得到的。各主要元件的等值电路列于表1-2中。

表 1-2

设 备 符 号		代 表 符 号	等 值 电 路
发 电 机			
变 压 器	双 卷		
	三 卷 或 自 耦		
电 抗 器	普通电抗器		
	分裂电抗器		
线 路	忽略分布电容		
	考虑分布电容		

### 一、发电机

从电气角度来看，发电机可用其相应的电势和电抗来表示。三相短路时，基频电流所产生的旋转磁场和转子的旋转是同步的。因此在计算短路瞬间的电气量时，可以采用发电机的暂态或次暂态参数，计算短路后的稳态情况时可以采用发电机的同步参数。

在这里，我们假定发电机的转子对称，即假定发电机的纵轴（ $d$ 轴）与横轴（ $q$ 轴）的参数是相等的，发电机可以用一个等值电路来表示。此外，短路瞬间系统中各发电机电势之间的相位差，以及短路过程中发电机的摇摆现象也忽略不计，即假定在短路过程中系统内所有发电机的电势相位均相同。在此假设下，计算所得的结果仅仅是短路点的电流数值稍稍偏大，而发电机之间电路中的电流数值稍稍偏小而已。

### 二、变压器

变压器的励磁电流较小（仅为额定电流的5%左右），一般可忽略不计。这样，对于双绕组变压器可用一个漏抗支路表示。对于普通三绕组变压器（或自耦变压器）可用一个星形等值电路表示。

### 三、输电线路

在考虑分布电容的情况下（如超高压远距离输电线路），通常等值电路以T型或Π型四端网络表示。对于一般线路可将分布电容忽略不计，即假定  $C=0$  或  $I_c=0$ ，这时输电线路即变为一个具有纯电抗的元件。

图 1-1 为一对称的三相输电线（即各相的自感抗及各相之间的互感抗都相等）。设输电线路单位长度的自感抗为  $x_L$ ，互感抗为  $x_M$ ，当对称的三相电流通过时，以A相为例，可写出如下方程：

$$\Delta \dot{U}_a = j\dot{I}_a x_L + j\dot{I}_b x_M + j\dot{I}_c x_M = j\dot{I}_a (x_L - x_M) = j\dot{I}_a x_1 \quad (1-1)$$

式中  $x_1 = x_L - x_M$  为输电线路单位长度上一相的等值电抗。应当指出，依据这一参数所画出的已是无互感的等值电路。

在短路电流的实用计算中，当不能确知输电线路的参数时，每相电抗可选用下列的平均值：

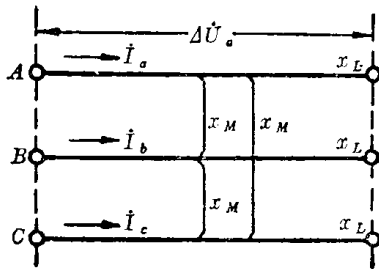


图 1-1 三相输电线路

6~220千伏架空线	0.4欧/公里；
35千伏三芯电缆	0.12欧/公里；
6~10千伏三芯电缆	0.08欧/公里。

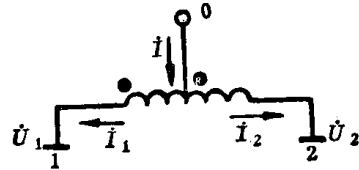


图 1-2 分裂电抗器

### 四、电抗器

电抗器由电阻很小的电感线圈所构成，因此，等值电路可以用其电抗表示。普通的电抗器每相用一个电抗表示即可。下面着重介绍一下分裂电抗器。

分裂电抗器的结构与普通电抗器差不多，只不过分裂电抗器在线圈中间有一个抽头，从而将线圈分成了匝数相等的两部分，如图 1-2 所示。中间抽头通常接在电源侧。正常工作时，两支路中的电流方向相反，两侧线圈间有电和磁的联系，一侧电流所产生的磁通在另一侧线圈中感应的电势将促使电压损失减小，这是分裂电抗器的优点之一。设每支路的自感抗（或称分裂电抗）为  $x_s$ ，两支路间的互感比例系数为  $m_0$ ，互感抗为  $x_M = m_0 x_s$ ，电流  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ ，于是电抗器每两个抽头间的电压为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{0-1} &= j\dot{I}_1 x_s - j(\dot{I} - \dot{I}_1) x_M = j(x_s + x_M) \dot{I}_1 + j\dot{I}(-x_M) \\ \Delta \dot{U}_{0-2} &= j\dot{I}_2 x_s - j(\dot{I} - \dot{I}_2) x_M = j(x_s + x_M) \dot{I}_2 + j\dot{I}(-x_M) \\ \Delta \dot{U}_{1-2} &= j(x_s + x_M)(-\dot{I}_1) + j(x_s + x_M) \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

根据式（1-2）即可得如表1-2中所示的分裂电抗器的等值电路。

### 五、负荷

一般只作近似估计，或当作恒定电抗，或当作某种临时附加电源，视具体情况而定，详见第二章第2-9节。

### 1-3 标 么 制

对于有各单位制大家已经比较熟悉，例如在电工的计算中，一般就用有名制，即电流用“安”、电压用“伏”、阻抗用“欧”、功率用“瓦”等有各单位来进行计算。而在电力系统故障的计算中，除了少数个别情况采用有名制外，一般都采用标么制进行计算。因为标么制有很多优点，它可使复杂的关系和过程简化，使计算工作变得简易。

#### 一、标么值

所谓标么制，是相对单位制的一种表示方法。在标么制中参与计算的各种物理量都用无单位的相对数值（即标么值）来表示。标么值的一般数学表达式为：

$$\text{标么值(相对值)} = \frac{\text{实际值(任意单位)}}{\text{基准值(与实际值同单位)}} \quad (1-3)$$

其实，标么值也并不是什么新鲜的东西。大家在电机学课程中已经用过，在我们的工作和日常生活中也经常使用这样的概念。通常一些反映倍率性质的数，大都就是标么值，只不过我们并没有称它们为标么值就是了。譬如说，某工厂今年的产量比去年增长10%，这就是说，如果把去年的产量当作100，今年产量的增加量就是10，或者把去年的产量当作1.0，今年产量的增加量就是0.1。又譬如，某先进生产者一天完成了生产定额的1.8倍，这个“1.8”和前面的“0.1”实际上就是标么值。

因此，所谓标么值实际上就是一个物理量的实际具名值与一个预先选定的同量纲的基准值的比值。

如果发电机的电压 $U_G = 10.5$ 千伏。若选定电压的基准值 $U_B = 10$ 千伏，则发电机电压的标么值为（为了区别于具名值，在字母的右下角加以\*）

$$U_{G*} = \frac{10.5 \text{ 千伏}}{10 \text{ 千伏}} = 1.05$$

若选电压的基准值为 $U_B = 10.5$ 千伏，则发电机电压的标么值为

$$U_{G*} = \frac{10.5 \text{ 千伏}}{10.5 \text{ 千伏}} = 1.0$$

从这里可以看出，由于标么值是两个同量纲的数的比值，所以标么值是个无单位的数。实际上标么值就相当于某物理量的具名值对基准值的倍数。例如在上例中标么值所表示的含义是：

在第一种情况下，发电机端电压 $U_G$ 是基准电压 $U_B = 10$ 千伏的1.05倍；

在第二种情况下，发电机端电压 $U_G$ 是基准电压 $U_B = 10.5$ 千伏的1.0倍。

两种情况，虽然标么值不同，但它们所表示的物理量都是一样的（10.5千伏）。两者之所以不同是因为基值选得不同。而标么值的基值一般来说是可以任选的，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值的，否则只说一个标么值就没有什么意义了。这就是标么值的相对性。

从上面的例子还可以看出：只要基值取得恰当，采用标么制可将一个很复杂的数字变成一个很简单的数字，从而使计算得到简化。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 1.0（么）。标么值的名称即由此而来。

认识一个概念，还需要认识这个概念同其它概念之间的相互联系。标么值同具名值的关系在式（1-3）中已经体现的比较清楚了。标么值同百分值的关系是：标么值乘以100，即得用同样基数表示的百分值，即

$$\text{百分值} = \text{标么值} \times 100\%$$

百分值也是个相对值，所以两者的意义很接近。但在电力系统的计算中，标么值的应用范围比百分值要广泛得多，因为两个百分值相乘后所得的数并不等于百分值，而必须将乘积除以100才能得百分值，例如5%乘以6%不等于30%，而应等于0.3%。可是两个标么值相乘后即可得其对应的标么值，例如 $0.05 \times 0.06$ 正好等于0.003，计算起来也就方便多了。

虽然标么值的数字不能直接反映事物的物理概念，但它能更鲜明地反映事物的本质，反映数量同质量的辩证关系，反映事物的相对关系。例如上述例子中，工厂产品的年产增加量的标么值就能够说明工厂产品的年增长速度。所以，标么制不仅在工程技术上，而且在其他许多领域中都得到了广泛的应用。

## 二、三相系统基准值的选择

采用标么值进行计算时，第一步的工作是选取各个物理量的基准值。当基准值选定后，其所对应的标么值即可根据标么值的定义很容易地进行计算了。

一般说来，基准值是可以任意选择的。但是，为了计算简便，要求各个电气量（计算中常用的量有电压、电流、功率和阻抗等）的基准值之间能满足一定的关系。为了说明这一点，我们首先分析一下当任意选择各个物理量的基准值时存在什么问题，然后再从解决这一问题的角度出发看看基准值之间应当满足什么样的关系为好。

通常对称的三相电力系统在进行故障的分析计算时，均化成等值星形电路。因此，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，线电流等于相电流，三相功率是单相功率的3倍。同时由欧姆定律和功率方程式可知，在电压 $U_{LL}$ （线电压）、电流 $I$ 、阻抗 $Z$ （ $z$ ）和三相功率 $S_{(3)}$ 之间存在着如下关系：

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U_{LL}}{\sqrt{3} z} \\ S_{(3)} &= \sqrt{3} U_{LL} I \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

又由式（1-3）得

$$\left. \begin{aligned} U_{LL} &= U_{LL} * U_{LLB} \\ U_{LN} &= U_{LN} * U_{LNB} \\ I &= I * I_B \\ z &= z * z_B \\ S_{(3)} &= S_{(3)} * S_{(3)B} \\ S_{(1)} &= S_{(1)} * S_{(1)B} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中  $U_{LL}$ ——线电压（伏、千伏），其标么值为  $U_{LL*}$ ；  
 $U_{LN}$ ——相电压（伏、千伏），其标么值为  $U_{LN*}$ ；  
 $I$ ——相（线）电流（安、千安），其标么值为  $I_*$ ；  
 $z$ ——等值星形电路的一相阻抗（欧），其标么值为  $z_*$ ；  
 $S_{(3)}$ ——三相视在功率（千伏安、兆伏安），其标么值为  $S_{(3)*}$ ；  
 $S_{(1)}$ ——一相视在功率（千伏安、兆伏安），其标么值为  $S_{(1)*}$ ；  
 $U_{LLB}$ ——基准线电压（伏、千伏）；  
 $U_{LNB}$ ——基准相电压（伏、千伏）；  
 $I_B$ ——基准电流（安、千安）；  
 $z_B$ ——基准阻抗（欧）；  
 $S_{(3)B}$ ——基准三相视在功率（千伏安、兆伏安）；  
 $S_{(1)B}$ ——基准单相视在功率（千伏安、兆伏安）。

将式（1-5）代入式（1-4）得

$$\left. \begin{aligned} I_* I_B &= \frac{U_{LL*} U_{LLB}}{\sqrt{3} z_* z_B} \\ S_{(3)*} S_{(3)B} &= \sqrt{3} U_{LL*} U_{LLB} I_* I_B \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

由此可得到任意选择基准值时各量标么值之间的关系式为

$$\left. \begin{aligned} I_* &= \frac{U_{LL*}}{z_*} \times \frac{U_{LLB}}{\sqrt{3} z_B I_B} \\ S_{(3)*} &= U_{LL*} I_* \times \frac{\sqrt{3} U_{LLB} I_B}{S_{(3)B}} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

如令

$$\frac{U_{LLB}}{\sqrt{3} z_B I_B} = k_1, \quad \frac{\sqrt{3} U_{LLB} I_B}{S_{(3)B}} = k_2$$

则上式即变为

$$\left. \begin{aligned} I_* &= \frac{U_{LL*}}{z_*} k_1 \\ S_{(3)*} &= U_{LL*} I_* k_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

可见，如果任意选择基准值，则利用标么值来进行电路计算时，其公式就和用具名值计算时所用的公式形式不同，多出了一个系数  $k$ ，这就等于另搞一套公式，显然是不方便的，而且也不便于记忆。如果能使  $k_1 = k_2 = 1$ ，则标么值的计算公式将大为简化，于是（1-8）式可写成

$$\left. \begin{aligned} I_* &= \frac{U_{LL*}}{z_*} \\ S_{(3)*} &= U_{LL*} I_* \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

可以看出，式（1-9）与单相电路的计算公式形式完全一样，显得特别方便。由此可知，为了满足上述要求，基准值的选择就不应是任意的，而是应当满足下列条件：

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_{LLB}}{\sqrt{3} z_B I_B} &= 1 \\ \frac{\sqrt{3} U_{LLB} I_B}{S_{(3)B}} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

或者

$$I_B = \frac{U_{LLB}}{\sqrt{3} z_B}$$

$$S_{(3)B} = \sqrt{3} U_{LLB} I_B$$

以上两式的意义是：电压和电流都为基值时，功率亦应为基值，基准电流在基准阻抗上的压降应等于基准电压。根据这两个表达式，在四个基准量中如有两个基准量已定，其它两个基准量也就确定了。因此，在电力系统故障的分析计算中，只能任意选择其中的两个基准量。通常是选择基准功率 $S_{(3)B}$ 和基准电压 $U_{LLB}$ ，而基准电流 $I_B$ 和基准阻抗 $z_B$ ，可由下列公式求得

$$\left. \begin{aligned} I_B &= \frac{S_{(3)B}}{\sqrt{3} U_{LLB}} \\ z_B &= \frac{U_{LLB}}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_{LLB}^2}{S_{(3)B}} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

基准功率和基准电压虽说可以任意选，但是为了便于计算，基准功率 $S_{(3)B}$ 通常取100或1000兆伏安，有时也可选某电厂各机组容量之和。基准电压分别选为网络各级的额定电压或平均额定电压，常用的平均额定电压值列于表1-3。

当选定了基准值后，各电气量的标么值可按下列公式计算：

$$\left. \begin{aligned} U_{LL*} &= \frac{U_{LL}}{U_{LLB}} \\ I_* &= \frac{I}{I_B} = \frac{I}{\frac{S_{(3)B}}{\sqrt{3} U_{LLB}}} = \frac{\sqrt{3} U_{LLB} I}{S_{(3)B}} \\ S_{(3)*} &= \frac{S_{(3)}}{S_{(3)B}} \\ x_* &= \frac{x}{z_B} = \frac{\sqrt{3} I_B x}{U_{LLB}} = \frac{S_{(3)B}}{U_{LLB}^2} \cdot x \\ R_* &= \frac{R}{z_B} = \frac{\sqrt{3} I_B R}{U_{LLB}} = \frac{S_{(3)B}}{U_{LL(B)}^2} \cdot R \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中  $R$  和  $x$  —— 分别为等值星形电路一相的电阻和电抗。

由电阻和电抗标么值的计算可见，它们的标么值就等于基准电流通过时产生的电压降的标么值。此外在计算时，只需根据 $U_{LLB}$ 和 $S_{(3)B}$ 来求即可，而不必再求出 $I_B$ 和 $z_B$ 来。例如架空线路通常给出线路长度 $L$ 公里和每公里平均的电抗值（如0.4欧/公里），总电抗的欧姆值为 $0.4L$ ，于是其对应的标么值便可直接按下式求得

$$x_* = 0.4L \frac{S_{(3)B}}{U_{LLB}^2} \quad (1-13)$$

下面我们讨论线电压 $U_{LL}$ 和相电压 $U_{LN}$ 以及三相功率 $S_{(3)}$ 与一相功率 $S_{(1)}$ 标么值之间有什么关系。大家知道，用具名值表示时， $U_{LL} = \sqrt{3} U_{LN}$ ， $S_{(3)} = 3S_{(1)}$ 。如果基准值选为

$$\left. \begin{aligned} U_{LLB} &= \sqrt{3} U_{LNB} \\ S_{(3)B} &= 3S_{(1)B} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$



$$\left. \begin{aligned} \text{则有} \quad U_{LL*} &= \frac{U_{LL}}{U_{LLB}} = \frac{\sqrt{3} U_{LN}}{\sqrt{3} U_{LNB}} = \frac{U_{LN}}{U_{LNB}} = U_{LN*} \\ S_{(3)*} &= \frac{S_{(3)}}{S_{(3)B}} = \frac{3S_{(1)}}{3S_{(1)B}} = \frac{S_{(1)}}{S_{(1)B}} = S_{(1)*} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

可见，如按式(1-14)选定基准值，则线电压的标么值 $U_{LL*}$ 将与相电压的标么值 $U_{LN*}$ 相等。因此，可以用 $U_*$ 代表线电压和相电压的标么值，用 $S_*$ 代表三相功率和一相功率的标么值。但是，应当注意，当需要计算线电压和三相功率的具名值时，应将标么值乘以线电压和三相功率的基准值，而要计算相电压和一相功率的具名值时，应将标么值乘以相电压和一相功率的基准值。否则，可能得出错误的结果。

### 三、不同基准的标么值之间的相互转换

由于电力系统中各种电气设备如发电机、变压器、电抗器的铭牌参数均是以本身的额定条件为基准的标么值或百分值给出的，例如某汽轮发电机的次暂态电抗 $x_d''=0.125$ ，变压器的短路电压 $U_K\%=10.5$ 等等，而在进行电力系统的故障计算时，必须取统一的基准值，因此必须把以额定值为基准的标么值换算成统一基准的标么值。

下面以电抗为例说明换算的方法和步骤：

第一步，先将以 $x_N$ (额定值)为基准的电抗标么值 $x_{*(N)}$ 还原为具名值，即 $x = x_{*(N)} x_N$ ，第二步是将电抗的具名值 $x$ 换算成以统一的基准电抗 $x_B$ 为基准的标么值，转换的基本公式为：

$$x_{*(B)} = x_{*(N)} \frac{x_N}{x_B} \quad (1-16)$$

实际应用中，由于各个元件不一定是直接给出对应于额定情况的基准电抗 $x_N$ ，而可能是另外一些与之有关的参数(例如 $I_N$ 、 $U_N$ 、 $S_N$ 等)，同时，我们所选定的 $x_B$ ，也往往可能用另外一些形式的公式来表示，因此，各个元件的具体换算公式就可能有所不同。归纳起来，一般有两种情况：

(1) 当 $x_N$ 和 $x_B$ 分别以其相应的功率( $S_N$ 、 $S_B$ )和电压( $U_N$ 、 $U_B$ )表示时，即有

$$x_N = \frac{U_N^2}{S_N}; \quad x_B = \frac{U_B^2}{S_B}$$

代入式(1-16)，则有

$$x_{*(B)} = x_{*(N)} \frac{U_N^2}{S_N} \frac{S_B}{U_B^2} = x_{*(N)} \frac{S_B}{S_N} \left( \frac{U_N}{U_B} \right)^2 \quad (1-17)$$

(2) 当 $x_N$ 和 $x_B$ 分别以其相应的电流( $I_N$ 、 $I_B$ )和电压( $U_N$ 、 $U_B$ )表示时，则有

$$x_N = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}; \quad x_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B}$$

代入式(1-16)，则有

$$x_{*(B)} = x_{*(N)} \frac{I_B}{I_N} \frac{U_N}{U_B} \quad (1-18)$$

在计算中，如果取 $U_B = U_N$ ，则公式可简化为

$$x_{*(B)} = x_{*(N)} \frac{S_B}{S_N} \quad (1-19)$$