



## 前 言

本书系根据1990年10月召开的电力工程类高等工程专科会议上审定的《电力系统故障分析》编写大纲编写的，作为电力工程类高等专科学校“电力系统继电保护”专业的《电力系统故障分析》课程教材。

在编写过程中，从高等工程专科学校培养应用人才这一特点出发，叙述了电力系统故障分析的基本原理和方法，同时从继电保护实用角度叙述了电力系统故障时电气量的有关特点及其影响因素。所举例题力求结合继电保护有关内容。在叙述过程中，注重基本概念和基本原理的阐述，并力求简明、清晰。书中标注“\*”号的部分可作自学或选讲的内容，教师在授课时可灵活掌握。

上海电力学院陆敏政同志审阅了本书，并提出许多宝贵意见，为此表示衷心的感谢。限于编者水平，书中不妥和错误之处，恳切希望广大师生和读者批评指正。

编 者

1991年9月

# 目 录

## 前 言

第一章 故障分析基础知识 .....	1
第一节 概述 .....	1
第二节 电力系统各元件正序参数和等值电路 .....	3
第三节 标么制 .....	13
第四节 网络化简 .....	17
第五节 电力系统三相短路分析 .....	21
第六节 同步发电机的稳态短路电流 .....	31
第七节 电流分布系数和转移阻抗 .....	33
第二章 同步发电机基本方程和有关参数 .....	37
第一节 回路方程和磁链方程 .....	37
第二节 坐标变换 .....	41
第三节 派克方程 .....	47
第四节 同步发电机稳态运行电气量 .....	50
*第五节 具有阻尼绕组同步发电机基本方程 .....	52
*第六节 运算网络和运算电抗 .....	54
第七节 同步发电机的暂态和次暂态参数 .....	58
第八节 同步发电机三相短路分析 .....	65
第三章 电力系统元件序阻抗和等值电路 .....	71
第一节 序阻抗的基本概念 .....	71
第二节 同步发电机的负序和零序电抗 .....	73
第三节 异步电动机的参数和等值电路 .....	75
第四节 变压器的零序参数和等值电路 .....	77
第五节 输电线路的零序参数和等值电路 .....	100
第四章 电力系统横向短路故障分析 .....	120
第一节 对称分量法在横向短路故障分析中的应用 .....	120
第二节 电力系统相序网络的组成 .....	127
第三节 两相短路故障分析 .....	131
第四节 单相接地短路故障分析 .....	154
第五节 两相接地短路故障分析 .....	183
第六节 三相短路故障分析 .....	206
第七节 横向短路故障综合特点 .....	210
*第八节 发电机、变压器的匝间短路故障 .....	225
第五章 电力系统纵向不对称故障分析 .....	239

第一节	纵向不对称故障分析方法 .....	239
第二节	单相断线分析 .....	241
第三节	两相断线分析 .....	256
第四节	单相、两相断线时电气量特点 .....	259
<b>第六章</b>	<b>电流、电压分布和复故障分析</b> .....	<b>264</b>
第一节	变压器两侧电压、电流对称分量关系 .....	264
第二节	电流、电压的分布 .....	284
第三节	复故障分析 .....	294
第四节	中性点不接地系统两点接地分析 .....	316
*第五节	同杆双回路跨线故障简介 .....	320
第六节	应用 $\alpha$ 、 $\beta$ 、0 分量分析故障简介 .....	324
<b>第七章</b>	<b>电力系统振荡分析</b> .....	<b>330</b>
第一节	概述 .....	330
第二节	振荡时电气量变化分析 .....	331
第三节	振荡和短路时电气量特点分析 .....	336
	<b>主要参考文献</b> .....	<b>348</b>

# 第一章 故障分析基础知识

## 第一节 概 述

### 一、故障的概念

电力系统的故障一般分为简单故障和复合故障。简单故障指的是电力系统正常运行时某一处发生短路或断相故障的情况，而复合故障则是指两个或两个以上简单故障的组合。

短路故障（横向故障）指的是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，图1-1示出了三相系统中短路故障的类型。

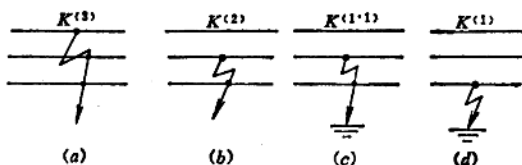


图 1-1 短路故障类型

(a)三相短路；(b)两相短路；(c)两相接地短路；(d)单相接地短路

(a)为三相短路，用符号 $K^{(3)}$ 表示；(b)为两相短路，用符号 $K^{(2)}$ 表示；(c)为两相接地短路，用符号 $K^{(1,1')}$ 表示；(d)为单相接地短路，用符号 $K^{(1)}$ 表示。其中三相短路为对称短路，其余为不对称短路。

引起短路故障的主要原因是各种形式的过电压、绝缘材料自然老化、脏污、直接机械损伤造成电气设备载流部分的绝缘损坏。线路对树枝放电、大风引起的碰线、鸟害、树枝等物掉落在导线上以及雪、雹等自然现象也能引起短路故障。此外，运行人员带负荷拉刀闸，或检修线路后忘拆除接地线就加上电压等误操作也是引起短路故障的原因之一。大量的运行实践表明，短路故障中单相接地最多，相间短路较少。

断相故障（纵向故障）是指一相或两相断开的非全相运行状态。线路单相接地短路时，故障相断路器跳闸，断路器合闸过程中三相触头不同时接通，分相检修线路或断路器，输电线一相或两相断线等均会造成非全相运行。非全相运行时，系统处于不对称状态。

### 二、线路故障的分析

大量统计资料表明：高压电网的短路故障中，线路故障约占90%左右，母线、变压器和高压配电装置等故障约占10%。对于线路（220kV）故障，某电力系统20年（1959~1979）的统计数字如下：

单相接地短路	510次（87.9%）
两相接地短路	34次（5.8%）
两相短路	8次（1.4%）
三相短路	11次（1.9%）
断线	8次（1.4%）
转换性故障	4次（0.7%）
非全相运行中又发生单相接地短路	5次（0.9%）

可以看出，线路短路故障中单相接地短路占绝大多数，所以线路短路故障开始发生时，绝大多数的故障可能是单相接地，考虑到故障常具有转变扩展性质，单相短路故障很容易发展为多相短路故障。从这点出发，缩短故障切除时间，可避免多相短路故障对电力系统造成的严重影响，并使单相重合闸充分发挥作用；同时，缩短故障切除时间，也可减轻故障点设备的损伤程度。

两相接地短路故障比单相接地短路故障少得多，但比三相短路故障多，这合乎故障发展的特点。上述统计资料表明，对中性点直接接地的高压电力系统，单相和两相接地的短路故障占了绝大多数，所以反应接地短路故障的保护担负着十分重要的任务，任何情况下，应保证反应接地短路故障的保护有较好的性能并可可靠投入运行。

三相短路故障有两种类型：第一种是发展性三相短路，由单相、两相故障发展为三相短路故障。应当指出，大多数三相短路故障属于这种类型，在短路初瞬电力系统是不对称的；此外，发展为三相短路故障的时间不是固定的，有长有短。第二种是三相同时的对称短路，主要由雷害造成。例如当线路杆塔接地电阻较大、架空地线保护耐雷水平较低而雷击架空地线时，塔顶电位突然升高，大大超过瓷瓶的绝缘强度，其结果是向三相导线闪络，造成三相短路。当然，这种情况较多在山区线路上发生，因为山区线路的杆塔位置多选择在山顶或山坡比较高耸的地方，容易遭受雷击。另外，断路器三相触头同时接通情况较好时，合闸送电于忘拆接地线的输电线也表现为三同时性对称短路。在三同时性对称短路时，电力系统一直处于对称状态。

运行实践表明，三相短路故障比两相短路故障多，占有一定比例，且三相短路故障对电力系统影响最严重。所以，对三相短路故障应予足够重视。

两相短路故障，发生原因较为特殊，所以所占比例较小。如大风造成的导线异常摆动，在两相导线摆动靠近时引起闪络，发生两相短路。这种短路故障的特点是：只有保护动作迅速时才能跳闸，如保护动作时间较长或短路电流较大的一侧先跳闸后，故障可能自行消除。此外，这种故障会连续发生，有时一天内一条线路会连续发生多次。船桅与过江导线相碰，飞机与导线相碰，换位杆塔上连接两不同相的绝缘瓷瓶间发生闪络，阻波器引线烧断等均会引起两相短路故障。如不迅速切除，两相短路故障可能发展为两相接地短路或三相短路故障。

装设单相重合闸的线路发生单相接地短路，在两侧断路器跳闸后，线路处于非全相运行过程中，健全相仍然可能发生单相接地故障。在设计保护和考虑单相重合闸时，应注意这一故障情况。

在分析短路故障时，还应注意如下三点：

第一是故障的转换性。所谓转换性故障，指的是在短时间内，一种故障转换为另一种性质不同的故障。如A相接地后，由于雷害，短时间内B相又发生接地。有时可能出现A相接地后，发展为AB相短路而接地消失的现象。也有可能故障开始时是两相短路，短时间内转换为两相接地短路。在分析短路故障时，应充分注意转换性故障的特点。

第二是故障的重复性。输电线路发生故障，在重合闸合闸成功的短时间内，在同一地点又发生故障的可能性较大，尤其是大气条件恶劣的情况下更是如此。

第三是故障点的过渡电阻。过渡电阻由弧光电阻和过渡物电阻组成。对相间短路故障来说，过渡电阻主要是弧光电阻。对接地短路故障来说，过渡物电阻是接地电阻。接地电阻比弧光电阻要大得多，一般可将弧光电阻忽略而只计接地电阻。对接地电阻可作如下说明：

1) 杆塔上因瓷瓶闪络而发生的接地短路故障，接地电阻是杆塔本身的接地电阻，如有架空地线，则是架空地线并联杆塔接地电阻的综合值。

2) 输电线直接对树枝、竹杆、农作物等放电引起的接地短路故障，或带电导线断落于接地电阻很大的石头、建筑物或其他物体上，这种短路故障的接地电阻较大，可达几十欧姆甚至数百欧姆。

所以，在分析接地短路故障时，不应忽略接地电阻的影响。

### 三、短路的现象及后果

电力系统发生短路时，因系统的总阻抗要减小，所以故障回路的电流剧烈增加，同时伴随着电压大幅度降低，特别是靠近短路点的母线电压降得更低，甚至为零（如三相短路）。

短路的后果是破坏性的，表现在以下几个方面：

1) 短路电流的热效应可能使设备过热而损坏，特别是短路点电弧会烧坏电气设备；短路电流的电动力效应也可能使设备受到破坏。

2) 系统电压大幅度降低，影响用户的正常工作，甚至使电动机停转。

3) 短路是对电力系统的一个严重冲击，可能使并列运行的发电厂失去同步，破坏系统稳定运行，引起大面积停电的严重后果。

4) 不对称接地短路将产生零序电流，所产生的零序磁通会干扰附近的通信线路。

由上述可见，短路故障的后果是严重的，所以分析研究短路故障，对电力系统安全可靠运行有着重要的现实意义。对继电保护和自动装置来说，分析短路故障就更必要了。

### 四、故障分析的基本假设

在满足一般工程要求的前提下，采取一些合理的假设分析故障是必要的，以便略去次要因素，突出主要问题，简化分析。电力系统故障分析的基本假设如下：

1) 不计磁路饱和、磁滞的影响。这样系统中各元件的参数是恒定的，可以应用叠加原理。

2) 系统是三相对称系统。不对称仅存在于不对称故障处，因而应用对称分量法时，可将各序的网络用单相等值电路进行分析。

3) 各元件序参数的阻抗角可认为相等，进而可认为系统综合序阻抗的阻抗角相等。

4) 在进行短路电流大小计算时，一般可略去各元件的电阻。

5) 负荷只作近似估计，或作为恒定阻抗，或当作临时附加电源，视情况而定。

## 第二节 电力系统各元件正序参数和等值电路

在分析计算短路故障时，首先要根据已知条件和要求建立电力系统等值网络，然后进

行化简，并进行分析计算。在这过程中，确定电力系统中各元件等值电路和参数换算是必不可少的。以下讨论对称短路情况下各元件的等值电路（正序等值电路）。

### 一、发电机

进行短路故障分析时，可认为发电机的转子是对称的，即  $d$  轴和  $q$  轴的参数相等；此外，在短路瞬间以及短路过程中发电机电动势间的相位差不变，即忽略了发电机的摇摆现象。

从电气角度看，计算短路瞬间的电气量，可采用暂态或次暂态参数。图1-2(a)示出了短路前同步发电机的简化相量图（注脚符号[0]表示短路前电气量），图(b)为相应的等值电路。考虑到短路瞬间的次暂态电动势不突变（将在第二章第七节详细分析），结合图1-2(a)可得

$$\dot{E}_0'' = \dot{E}_{[0]}'' = \dot{U}_{G[0]} + j\dot{I}_{G[0]}X'' \quad (1-1)$$

式中  $\dot{E}_0''$ ——短路瞬间的次暂态电动势；

$\dot{E}_{[0]}''$ ——短路前瞬间的次暂态电动势；

$\dot{U}_{G[0]}$ ——短路前瞬间的发电机端电压；

$\dot{I}_{G[0]}$ ——短路前瞬间的发电机电流；

$X''$ ——发电机的次暂态电抗， $X_0'' = X_1'' = X_2''$ 。

取模值，有

$$E_{[0]}'' = \sqrt{(\dot{U}_{G[0]} + \dot{I}_{G[0]}X'' \sin\varphi_{[0]})^2 + (\dot{I}_{G[0]}X'' \cos\varphi_{[0]})^2} \\ \approx \dot{U}_{G[0]} + \dot{I}_{G[0]}X'' \sin\varphi_{[0]} \quad (1-2)$$

式中  $\varphi_{[0]}$  为短路前瞬间发电机的功率因数角。由(1-2)式可见，等值电路中的  $E_{[0]}''$  完全可由短路前瞬间发电机的电气量求得。

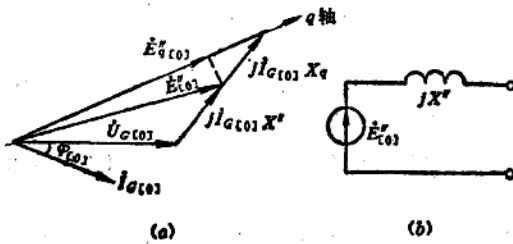


图 1-2 同步发电机的简化相量图及等值电路  
(a)简化相量图；(b)等值电路

计算稳态短路电气量时，图1-2(b)等值电路参数必须改变，将次暂态电抗  $X''$  换以稳态时的电抗  $X_0$ ；次暂态电动势  $E_{[0]}''$  换以稳态电动势  $E_0$ 。

### 二、变压器

在求取短路故障分析用的变压器等值电路时，必须注意两点：第一，对于系统中大多数三相电力变压器，其正序磁通在铁芯中是畅通的，因而建立磁通所需的励磁电流很小，约为

额定电流的5%左右，所以励磁电抗  $X_m$  较大，一般可视为开路；第二，等值电路中不计电阻，只计电抗。

#### (一)一般变压器

##### 1. 双绕组变压器

由于励磁电抗开路，所以原“T”形等值电路现演变为一个漏抗支路  $X_r$ （或短路电抗），如图1-3所示。所以



$$X_r = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \times U_K \% = U_K \% \times \frac{U_N^2}{S_N} \quad (1-3)$$

式中  $S_N$ ——变压器额定容量 (MVA)；

$U_N$ ——变压器额定线电压 (kV)；

$U_K \%$ ——以百分形式表示的变压器短路电压值 (注意, 小写的  $u_K$  表示短路电压)；

$X_r$ ——折算到  $U_N$  侧的变压器一相高低压绕组总漏抗 ( $\Omega$ )。

应当指出, 该  $X_r$  值与变压器的接线方式无关。

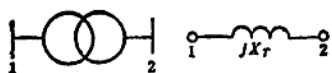


图 1-3 双绕组变压器等值电路

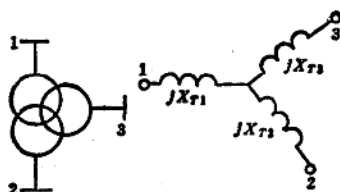


图 1-4 三绕组变压器等值电路

## 2. 三绕组变压器

设三绕组变压器高、中、低三侧分别以 1, 2, 3 表示, 如将各绕组两两看成一个双绕组变压器, 则三绕组变压器的等值电路如图 1-4 所示。令各绕组两两间的短路电压分别为  $U_{K(1-2)} \%$ 、 $U_{K(1-3)} \%$ 、 $U_{K(2-3)} \%$ , 可求得各绕组的短路电压为

$$\left. \begin{aligned} U_{K1} \% &= \frac{1}{2} [U_{K(1-2)} \% + U_{K(1-3)} \% - U_{K(2-3)} \%] \\ U_{K2} \% &= \frac{1}{2} [U_{K(1-2)} \% + U_{K(2-3)} \% - U_{K(1-3)} \%] \\ U_{K3} \% &= \frac{1}{2} [U_{K(1-3)} \% + U_{K(2-3)} \% - U_{K(1-2)} \%] \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

于是, 由 (1-3) 式求得各绕组的等值电抗值为

$$\left. \begin{aligned} X_{r1} &= U_{K1} \% \frac{U_N^2}{S_N} \\ X_{r2} &= U_{K2} \% \frac{U_N^2}{S_N} \\ X_{r3} &= U_{K3} \% \frac{U_N^2}{S_N} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

升压结构和降压结构的三绕组变压器, 虽然绕组的排列次序不同, 但等值电路是完全相同的。只是升压结构的三绕组变压器低压绕组在中间 (高压绕组在外层, 中压绕组在里层), 故  $U_{K(1-2)} \%$  较大而已; 同样, 降压结构的三绕组变压器中压绕组在中间 (高压绕组在外层, 低压绕组在里层), 故  $U_{K(1-3)} \%$  较大, 排在中层的绕组, 其等值电抗较小, 或具有不大的负值。

### 3. 自耦变压器

自耦变压器的等值电路完全和三绕组变压器相同。只是因为自耦变压器第三绕组的额定容量 $S_{N3}$ 总是小于变压器的额定容量 $S_N$ ，所以短路电压要归算到额定容量（三绕组变压器的 $U_K\%$ 制造厂家已归算到额定容量），如下式所示

$$\left. \begin{aligned} U_{K(1-3)}\% &= U'_{K(1-3)}\% \frac{S_N}{S_{N3}} \\ U_{K(1-2)}\% &= U'_{K(1-2)}\% \frac{S_N}{S_{N3}} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

其中“'”表示未归算值。然后按三绕组变压器的公式求出其参数。

#### (二) 分裂绕组变压器

应用分裂绕组变压器，可有效限制发电机电压系统和厂用电系统的短路电流。一般分裂绕组变压器有一个高压绕组（标号为1），两个相同的低压（分裂）绕组（标号为2、3），其短路电抗 $X_{K(1-2)}$ 、 $X_{K(1-3)}$ 、 $X_{K(2-3)}$ （或短路电压 $U_{K(1-2)}\%$ 、 $U_{K(1-3)}\%$ 、 $U_{K(2-3)}\%$ ，按(1-3)式可将短路电压换算为短路电抗）有下列特征

$$X_{K(1-2)} = X_{K(1-3)} \quad (\text{对称性})$$

$$\text{分裂电抗 } X_f = X_{K(2-3)}, \text{ 特别大}$$

为使 $X_f$ 特别大，要求两个分裂绕组间的磁耦合尽量弱；由于 $X_{K(1-2)} = X_{K(1-3)}$ ，所以分裂绕组也可以并联运行。为保证两分裂绕组的对称性，三相分裂绕组变压器的绕组通常采用轴向布置和径向布置方式。

图1-5示出了三相三柱式轴向分布分裂绕组变压器的接线，分裂绕组 $a, x_2$ 、 $a, x_3$ 在同一铁芯柱上，另两相在另两个铁芯柱上，高压不分裂绕组同样分成两个相同的并联绕组，与分裂绕组对称地排列在同一铁芯柱上。由于分裂绕组沿轴向排列，称为轴向布置式。

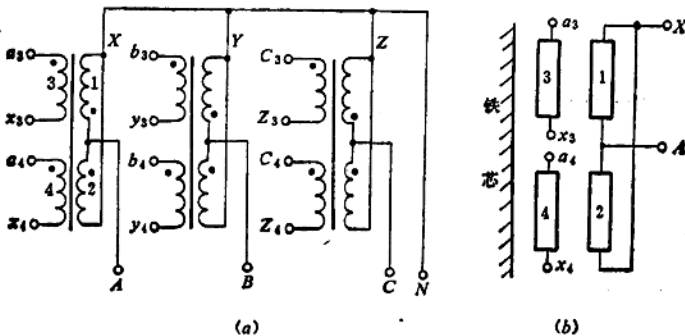


图 1-5 三相三柱轴向布置分裂绕组变压器  
(a)接线；(b)绕组排列

图1-6示出了三相三柱式径向布置分裂绕组变压器的绕组排列方式（只画出一相）。由图可见，一相的分裂绕组2、3和不分裂绕组1按同心圆方式围绕一个芯柱。这种布置方式，当分裂绕组较多时，很难保证参数的对称性。

### 1. 三相三柱式径向布置双分裂绕组变压器

由图1-6绕组排列可以看出，这是一台三绕组变压器，故等值电路如图1-4所示，只是有 $X_{K(1-2)} = X_{K(1-3)}$ 的特殊关系。由(1-4)式、(1-5)式得到相应的参数为

$$X_{T1} = \frac{1}{2} [X_{K(1-2)} + X_{K(1-3)} - X_{K(2-3)}] = X_{K(1-2)} - \frac{1}{2} X_{K(2-3)}$$

$$X_{T2} = X_{T3} = \frac{1}{2} X_{K(2-3)}$$

如果定义两分裂绕组间的短路电抗为分裂电抗 $X_f$ ；定义两分裂绕组并联时，高、低压绕组间的短路电抗为穿越电抗 $X_c$  ( $X_c = X_{T1} + \frac{1}{2} X_{T2}$ )，则“T”形等值电路的参数可表示为

$$X_{T1} = X_c - \frac{1}{2} X_{T2} = X_c - \frac{1}{4} X_f$$

$$X_{T2} = X_{T3} = \frac{1}{2} X_f$$

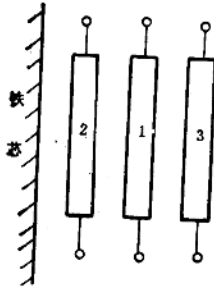


图 1-6 三相三柱径向布置双分裂绕组变压器的绕组排列

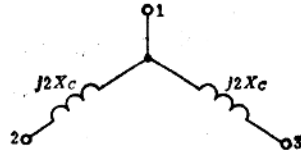


图 1-7  $K_f = 4$  时分裂绕组变压器等值电路

再定义分裂电抗与穿越电抗之比为分裂系数 $K_f$ ，则有

$$\left. \begin{aligned} X_{T1} &= \left(1 - \frac{1}{4} K_f\right) X_c \\ X_{T2} &= X_{T3} = \frac{1}{2} K_f X_c \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

显然，当 $K_f = 0$ 时，有 $X_{T2} = X_{T3} = 0$ 、 $X_{T1} = X_c$ ，这实际上是一个普通双绕组变压器；当 $K_f = 4$ 时，有 $X_{T2} = X_{T3} = 2X_c$ 、 $X_{T1} = 0$ ，则等值电路如图1-7所示。由图可见，在低压侧（如2侧）短路时，另一低压侧（如3侧）供给的短路电流受到 $4X_c$ 的限制而大大降低。

### 2. 三相三柱式轴向布置双分裂绕组变压器

如图1-5所示，两级电压、低压双分裂的变压器实际上是四绕组变压器，其中1，2为高压并联绕组，3，4为低压分裂绕组。

在不计励磁电流的条件下，四绕组变压器有 $X_{K(1-2)}$ 、 $X_{K(1-3)}$ 、 $X_{K(1-4)}$ 、 $X_{K(2-3)}$ 、 $X_{K(2-4)}$ 、 $X_{K(3-4)}$ 。

$X_{K(2-4)}$ 、 $X_{K(3-4)}$ 六个独立参数，图1-8示出了四绕组变压器的一种等值电路，有八个支路，六个独立参数，六个独立参数可表示为（分析从略）

$$\left. \begin{aligned} X_{T1} &= \frac{1}{2}[X_{K(1-2)} + X_{K(1-3)} - X_{K(2-3)}] - \frac{1}{2}\sqrt{P_1 P_2} \\ X_{T2} &= \frac{1}{2}[X_{K(1-2)} + X_{K(2-4)} - X_{K(1-4)}] - \frac{1}{2}\sqrt{P_1 P_2} \\ X_{T3} &= \frac{1}{2}[X_{K(1-3)} + X_{K(3-4)} - X_{K(1-4)}] - \frac{1}{2}\sqrt{P_1 P_2} \\ X_{T4} &= \frac{1}{2}[X_{K(2-4)} + X_{K(3-4)} - X_{K(2-3)}] - \frac{1}{2}\sqrt{P_1 P_2} \\ e &= \sqrt{P_1 P_2} + P_1 \\ f &= \sqrt{P_1 P_2} + P_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

而  $P_1 = X_{K(1-4)} + X_{K(2-3)} - X_{K(1-3)} - X_{K(2-4)}$   
 $P_2 = X_{K(1-4)} + X_{K(3-2)} - X_{K(3-4)} - X_{K(1-2)}$

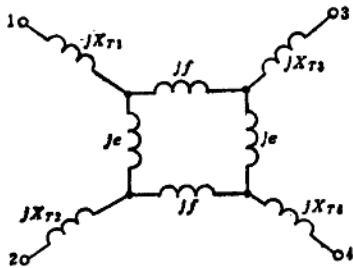


图 1-8 四绕组变压器的等值电路

联系到三相三柱式轴向布置双分裂绕组变压器的具体情况，有

$$\left. \begin{aligned} X_{K(1-2)} &= X_{K(3-4)} \\ X_{K(1-4)} &= X_{K(2-3)} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

在不计励磁电流的条件下，短路电抗  $X_{K(2-3)}$  等于绕组 3 和 2 漏抗之和，计及绕组 3 和 4、绕组 1 和 2 的漏抗相等的情况，故  $X_{K(2-3)}$  可表示为

$$X_{K(2-3)} = \frac{1}{2}[X_{K(1-4)} + X_{K(1-2)}] \quad (1-10)$$

计及(1-9)式、(1-10)式，得到  $P_1$ 、 $P_2$  为

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 2[X_{K(1-4)} - X_{K(1-2)}] \\ P_2 &= X_{K(1-4)} + X_{K(2-3)} - X_{K(3-4)} - X_{K(1-2)} \\ &= 2X_{K(2-3)} - [X_{K(3-4)} + X_{K(1-2)}] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

根据(1-9)式、(1-11)式，得到三相三柱式轴向布置双分裂绕组变压器的等值电路参数为

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{1}{2}[X_{K(1-2)} + X_{K(1-3)} - X_{K(2-3)}]$$

$$X_{T3} = X_{T4} = \frac{1}{2}[X_{K(1-3)} + X_{K(3-4)} - X_{K(1-4)}]$$

$$e = 2[X_{K(1-4)} - X_{K(1-2)}] = 2e'$$

$$f = 0$$

作出等值电路,如图1-9(a)所示。考虑到高压绕组1和2永远并联,将 $X_{r1}$ 、 $X_{r2}$ 、 $e'$ 组成的三角形电路变换为星形电路,再与 $X_{r3}$ 、 $X_{r4}$ 合并,得到简化等值电路,如图1-9(b),其中

$$X'_{r1} = \frac{X_{r1}^2}{2X_{r1} + e'}$$

$$X'_{r2} = X'_{r3} = X_{r3} + \frac{e' X_{r1}}{2X_{r1} + e'}$$

由图1-9(b)可以得到

分裂电抗  $X_f = 2X'_{r1}$ ,

穿越电抗  $X_c = X'_{r1} + \frac{1}{2}X'_{r2}$ ,

分裂系数

$$K_f = \frac{X_f}{X_c} = \frac{4X'_{r1}}{2X'_{r1} + X'_{r2}}$$

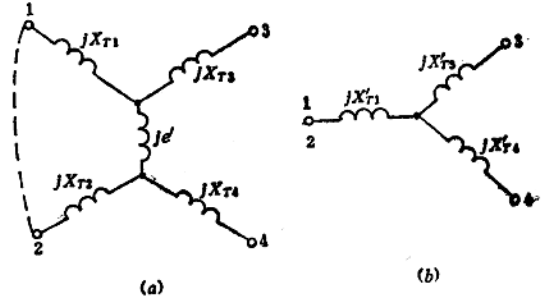


图 1-9 三相三柱式轴向布置双分裂绕组变压器等值电路  
(a)等值电路; (b)化简后的等值电路

而

$$X'_{r2} = X_{r3} + \frac{e' X_{r1}}{2X_{r1} + e'} \leq X_{r3} + X_{r1}$$

$$\begin{aligned} 2X'_{r1} + X'_{r2} &= \frac{2X_{r1}^2}{2X_{r1} + e'} + X_{r3} + \frac{e' X_{r1}}{2X_{r1} + e'} \\ &= X_{r3} + X_{r1} \end{aligned}$$

故

$$K_f \leq \frac{4(X_{r1} + X_{r3})}{X_{r1} + X_{r3}} = 4 \quad (1-12)$$

### 3. 单相双柱双分裂绕组变压器

图1-10(a)示出了单相双柱两绕组双分裂变压器接线( $a_1, x_1, a_2, x_2$ 为低压分裂绕组),这实际上是两台双绕组普通变压器的并联,每个铁芯柱容量为变压器额定容量 $S_N$ 之半。

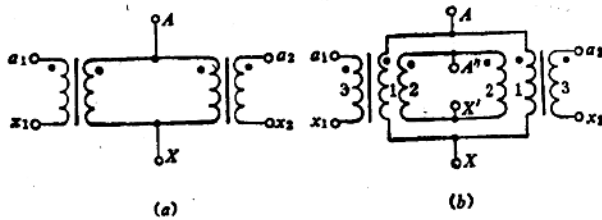


图 1-10 单相双柱双分裂绕组变压器接线  
(a)单相双柱两绕组; (b)单相双柱三绕组

若每一铁芯柱高、低压绕组间的短路电抗为 $X_x$ (以 $0.5S_N$ 为基准),则该台变压器的穿越电抗为(以 $0.5S_N$ 为基准)

$$X_c = X_x / X_x = \frac{1}{2}X_x$$

而分裂电抗相当于两台双绕组变压器的串联，所以分裂电抗为（以 $0.5S_N$ 为基准）

$$X_f = 2X_K$$

由此得到分裂系数

$$K_f = \frac{X_f}{X_C} = 4$$

等值电路如图1-7所示（1端相当于A、2端相当于 $a_1$ 、3端相当于 $a_2$ ）。

图1-10(b)示出了单相双柱三绕组双分裂变压器接线，AX为高压绕组，A'X'为中压绕组， $a_1x_1$ 和 $a_2x_2$ 为低压分裂绕组（分别以1、2、3表示）。每一铁芯柱高、中、低电压绕组构成了普通的三绕组变压器，其“T”形等值电路的参数为

$$X_{T1} = \frac{1}{2} [X_{K(1-2)} + X_{K(1-3)} - X_{K(2-3)}]$$

$$X_{T2} = \frac{1}{2} [X_{K(1-2)} + X_{K(2-3)} - X_{K(1-3)}]$$

$$X_{T3} = \frac{1}{2} [X_{K(1-3)} + X_{K(2-3)} - X_{K(1-2)}]$$

整台变压器的等值电路为两个同样的“T”形等值电路在高压侧和中压侧并联，如图1-11(a)所示。简化后的等值电路如图1-11(b)所示，其中高压侧和中压侧的电抗为 $\frac{1}{2}X_{T1}$ 和 $\frac{1}{2}X_{T2}$ ，对于 $X_f$ 和 $X_c$ 可通过如下方法求得。

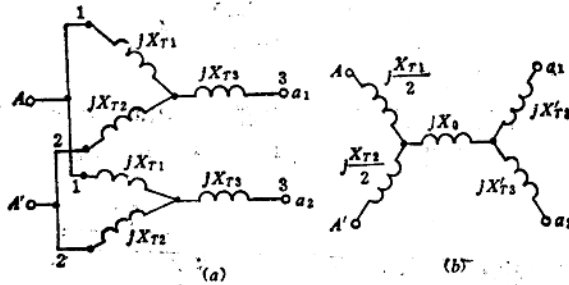


图 1-11 单相双柱三绕组变压器等值电路。  
(a)等值电路；(b)简化后的等值电路

由图1-11(b)得到分裂电抗 $X_f = 2X'_{T1}$ ；由图1-11(a)得到分裂电抗

$$\begin{aligned} X_f &= 2X_{T1} + 2X_{T1} // 2X_{T2} \\ &= 2X_{T1} + \frac{2X_{T1}X_{T2}}{X_{T1} + X_{T2}} = 2X_{T1} + \frac{2X_{T1}X_{T2}}{X_{K(1-2)}} \end{aligned}$$

于是有

$$X'_f = X_{T1} + \frac{X_{T1}X_{T2}}{X_{K(1-2)}} \quad (1-13)$$

若将图1-11(a)、(b)中的 $a_1$ 、 $a_2$ 短接, 则根据等值条件有

$$X_s + \frac{1}{2}X'_{r1} = \frac{1}{2}X_r,$$

故 
$$X_s = \frac{1}{2}(X_r - X'_{r1}) = -\frac{X_{r1}X_{r2}}{2X_{K(1-2)}} \quad (1-14)$$

上述关于单相双柱双分裂绕组变压器的 $X$ 参数均以—个铁芯柱的容量(即额定容量之半)为基准。

### 三、电抗器

电抗器在电力系统中起的作用是: 短路故障时限制短路电流和提高母线残余电压。不论是普通电抗器还是分裂电抗器, 由于各相电抗器之间没有互感作用, 所以求取等值电路时可单独考虑。

#### 1. 普通电抗器

等值电路为一个电抗元件, 如图1-12所示。由于制造厂给出了电抗的百分值 $X_L\%$ , 所以

$$X_L = X_L\% \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \quad (1-15)$$

式中  $X_L$ ———相电抗器的电抗( $\Omega$ );  
 $U_N$ ——电抗器的额定线电压(kV);  
 $I_N$ ——电抗器的额定电流(kA)。

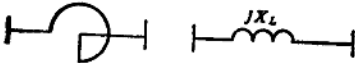


图 1-12 普通电抗器等值电路

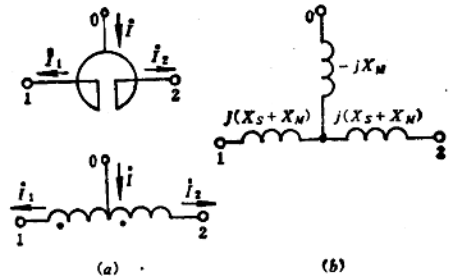


图 1-13 分裂电抗器及其等值电路  
 (a)分裂电抗器; (b)等值电路

#### 2. 分裂电抗器

与普通电抗器比较, 分裂电抗器在线圈中间有一个抽头, 将线圈分成匝数相等的两部分, 通常中间抽头接在电源侧, 如图1-13(a)所示。设每支路的自感抗为 $X_s$ , 两支路间互感抗为 $X_m$ , 则在图中极性下, 各端点间的电压降可写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{1-1} &= j\dot{I}_1 X_s - j(\dot{I}_1 - \dot{I}_2) X_m = j\dot{I}_1 (X_s + X_m) - j\dot{I}_2 X_m \\ \Delta \dot{U}_{1-2} &= j\dot{I}_1 X_s - j(\dot{I}_1 - \dot{I}_2) X_m = j\dot{I}_1 (X_s + X_m) - j\dot{I}_2 X_m \\ \Delta \dot{U}_{2-1} &= -j\dot{I}_1 (X_s + X_m) + j\dot{I}_2 (X_s + X_m) \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

根据(1-16)式, 可画出如图1-13(b)所示的等值电路。

如果两臂间的耦合系数为 $K_m = \frac{X_m}{X_s}$ , 则(1-16)式可改写为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{1-1} &= j(1 + K_m) X_s \dot{I}_1 - j K_m X_s \dot{I}_2 \\ \Delta \dot{U}_{1-2} &= j(1 + K_m) X_s \dot{I}_1 - j K_m X_s \dot{I}_2 \\ \Delta \dot{U}_{2-1} &= -j(1 + K_m) X_s \dot{I}_1 + j(1 + K_m) X_s \dot{I}_2 \end{aligned}$$

一般 $K_m$ 为0.4~0.6。

#### 四、输电线路

输电线路的等值电路，在进行故障分析时一般可将分布电容忽略不计，此时的等值电路为一个阻抗元件，如图1-14所示。令 $x_L$ 为单位长度自感抗， $x_M$ 为单位长度互感抗（ $l$ 为输电线路总长度），当通过对称三相电流时，输电线路一相的总压降（如A相）为

$$\Delta \dot{U}_A = \dot{I}_A j x_L l + \dot{I}_B j x_M l + \dot{I}_C j x_M l = \dot{I}_A j (x_L - x_M) l$$

于是，输电线路一相的等值电抗 $X_1$ 为

$$X_1 = x_1 l = (x_L - x_M) l \quad (1-17)$$

单位长度的等值电抗为 $x_1 = x_L - x_M$ 。注意，这已将三相间有互感的输电线路变为无互感的等值电路了。图1-14中的电阻 $R_L = Rl$ 为一相的总电阻（ $R$ 为单位长度输电线路一相的电阻）。有时，为分析简便，不计电阻 $R_L$ 而只计 $X_1$ 。

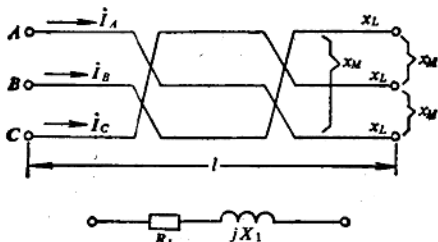


图 1-14 不计分布电容时三相输电线路等值电路

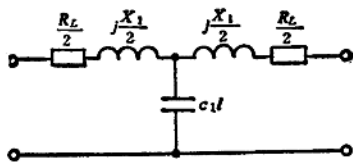


图 1-15 计及分布电容时三相输电线路等值电路（“T形”）

当输电线路的参数不能准确提供时，为实用计算的方便，每相电抗值可取下列数值。

(6~220)kV架空线	0.4Ω/km;
35kV三芯电缆	0.12Ω/km;
(6~10)kV三芯电缆	0.08Ω/km。

对超高压输电线路，采用分裂导线（参阅第三章第五节有关内容）可减小导线的有效电阻和相应的电抗。一般双分裂导线线路的正序电抗为（0.3~0.35）Ω/km，三分裂导线和四分裂导线线路的正序电抗为（0.25~0.3）Ω/km（分裂导线结构参阅图3-41）。

当输电线路较长或有必要计及分布电容时，等值电路通常以“T”形或“Π”形双口网络表示，图1-15示出的是“T”形双口网络。图中 $c_1$ 为单位长度输电线路一相对地等值正序电容，根据输电线路结构可查表求得。

#### 五、负荷

电力系统中的负荷，包含有大量的电动机，其中异步电动机最多。由于负荷的种类繁多，且各地负荷的组成有差异，所以在短路故障分析中，负荷一般只作近似估计。

##### 1. 异步电动机

在短路故障发生的短暂时间内（如0.01s），电动机转子回路内的感应电流还未衰减完，因此在这过程中异步电动机犹如一个隐极发电机，其等值电路如图1-2(b)所示。其次暂态电抗 $X''$ 可近似取为（与电动机启动时电抗相等）



$$X''=0.2 \quad (1-18)$$

考虑到异步电动机电流与发电机电流的流向完全相反, 电动机的次暂态电动势由(1-2)式可表示为

$$E''_s = E''_{t,s} = U_{t,s} - I_{t,s} X'' \sin \varphi_{t,s} \quad (1-19)$$

式中  $U_{t,s}$ ——短路故障发生前瞬间电动机端电压;

$I_{t,s}$ ——短路故障发生前瞬间电动机电流。

如果取  $U_{t,s}=1$ 、 $I_{t,s}=1$ 、 $\sin \varphi_{t,s}=0.6$  ( $\cos \varphi_{t,s}=0.8$ ), 则有

$$E''_s = E''_{t,s} = 1 - 0.2 \times 0.6 \approx 0.9 \quad (1-20)$$

可见, 发生短路故障时, 如果电动机的端电压  $U_s < E''_{t,s}$ , 则电动机变成临时电源向外供给短路电流; 如果短路发生在电动机端, 有  $U_s = 0$ , 所以电动机供给的短路电流为  $E''_s/X''$ ; 如果  $U_s > E''_{t,s}$ , 则电动机不向外供给短路电流。当然, 负荷向外供给短路电流的情况, 只在  $t \leq 0.01s$  时起作用, 而当  $t > 0.01s$  时, 可认为负荷暂态过程已结束, 可以不计其反馈电流的影响。

发生短路故障时同步电动机的情况与异步电动机相似。只是过激同步电动机因  $E''_s$  较高可看成临时电源, 而欠激同步电动机因  $E''_s$  较低与异步电动机更为相近。

## 2. 综合负荷

电力系统中的实际负荷, 是由不同性质的负荷组合而成的, 这称为综合负荷。

电力系统中电动机很多, 计及所有电动机的影响并无必要, 实际上只需计及接近短路故障点的容量较大的电动机。更符合实际情况的是综合负荷。其短路故障瞬间的等值电路, 仍可用一个次暂态电抗和次暂态电动势组成的串联支路来表示, 其值为

$$\left. \begin{aligned} X'' &= 0.35 \\ E''_s &= E''_{t,s} = 0.8 \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

综合负荷供给的短路电流比异步电动机衰减得更快。

正常状态下, 综合负荷可用  $X=1.2$  的支路阻抗代替。

## 第三节 标 么 制

在短路故障分析中, 可以用有名值进行计算分析, 如电压单位用 kV、电流单位用 kA、阻抗单位用  $\Omega$ 、功率单位用 W 等。实际工程计算中, 常采用标么值进行计算分析, 使计算过程简化, 这称为标么制。

### 一、标么值

标么值就是各物理量对基准值的相对数值, 是无单位的, 其表示式为

$$\text{标么值} = \frac{\text{有名值 (任意单位)}}{\text{基准值 (与有名值同单位)}}$$

在短路故障分析中, 常用到的电气物理量有  $U$ 、 $I$ 、 $Z$ 、 $S$ , 其基准值分别为  $U_B$ 、 $I_B$ 、 $Z_B$ 、 $S_B$ , 于是标么值为  $U_* = U/U_B$ 、 $I_* = I/I_B$ 、 $Z_* = Z/Z_B$ 、 $S_* = S/S_B$ 。