

电力系统故障分析

周荣光 编著

# 电力系统 故障分析

周荣光 编著

清华大学出版社



# 电力系统故障分析

周荣光 编著

清华大学出版社

## 内 容 提 要

本书内容包括：标么制；同步发电机三相突然短路分析；电力系统三相短路的实用算法；电力系统各元件的序参数；简单电力系统不对称故障分析；复杂电力系统的不对称故障分析；电力系统故障分析的计算机方法以及运算曲线法。每章附有若干习题，供读者练习。

本书是按教学要求编写的，可作为高等学校“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业的专业课教材（课内学时为40—50学时），也可作为从事电力系统工作的工程技术人员的参考书。

## 电力系统故障分析

周荣光 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京京辉印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：9.75 字数：248千字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数：00001—10000 定价：1.70元

ISBN 7-302-00206-1/TK·6 (课)

## 前 言

本书是作者在清华大学电机系为本科学生开设“电力系统故障分析”课程时,经过多年教学实践,在原用讲义的基础上编写而成。早先,清华大学电机系电力系统及其自动化教研组曾组织几位有多年教学经验的教师,在张宝霖教授的主持下集体编写过“电力系统短路”讲义,该讲义被校内外有关单位采用,反映良好。本书吸取该讲义的基本部分,参考近年来国内外有关文献,并考虑本科学生在学习本课时已具备的基础知识的条件进行改编而成,所以本书也是集体经验的总结。

“电力系统故障分析”是“电力系统及其自动化”专业的主要专业课之一。它是专业课中的基础部分,也是较困难的一部分,所以帮助本专业学生学好这门课,是专业教学中的重要工作。

本书作为教材,在编写中把教学要求放在重要地位,希望能做到便于学生的学习也便于教师的讲授。本书具有以下特点:

(一) 内容的取舍、安排和叙述力求按照初学者的认识规律:循序渐进,由特殊到一般,由简单到复杂。举例说,“同步发电机三相突然短路分析”这部分内容,现有教材中多从坐标转换和电机基本方程入手来进行叙述分析,根据我们的经验,这样做对刚进入专业课学习的学生来说,台阶过高,学习效果差。另外,就本课的主要任务和可能安排的时间(约40—50学时)来说,用很多时间来讲坐标转换和电机基本方程,显得是喧宾夺主。所以在本书中叙述这部分内容时,采用电机学中所用的古典方法,同时引入以自感,互感为基础的电路分析方法。这样做,一方面和电机学的基础知识相联系,学生易于接受,另一方面又为后续课中学习坐标转换和电机基本方程打下较好的基础。

(二) 物理概念与数学分析计算方法相结合。介绍各种计算方法是本课程的重要内容,但只有和相应的物理概念结合起来,才能使學生真正掌握这些计算方法。例如,电力系统各元件的参数计算,公式很多,如果没有弄清楚各参数所代表的物理本质,对学生来说这些计算方法就变成一堆不易记住的繁琐公式。

(三) 工程计算方法与基础理论的联系。本书中所介绍的计算方法和公式,主要是在电路原理及电机学的基本原理上发展而来,有些进行了工程上的简化。指明其间的相互关系,便于初学者对工程方法有进一步的理解。

(四) 新引进内容与传统内容的联系。反映新技术在电力系统中的应用而新增的内容,如故障分析的计算机计算方法,在本书中是作为传统方法的发展来介绍,而不是相互隔开的不同部分。

本书原稿由清华大学张宝霖教授审阅,在编写过程中,王宗淦教授,张宝霖教授,陈寿孙副教授,文学宓副教授,陈刚讲师都提供过宝贵意见,特此致谢。

限于作者的水平,书中难免有缺点错误,欢迎读者给予批评和指正。

作者 1987.1.

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§1-1 短路、短路的起因及其后果.....	1
§1-2 短路的类型.....	2
§1-3 计算短路电流的目的.....	3
§1-4 电力系统故障分析课程的内容.....	4
<b>第二章 标么制及等值网络</b> .....	5
§2-1 标么制.....	5
§2-2 标么制的基值.....	6
§2-3 标么值的转换.....	9
§2-4 有变压器联系的不同电压级电网中各元件参数标么值的计算.....	10
§2-5 小结.....	15
习题.....	16
<b>第三章 同步发电机三相突然短路分析</b> .....	18
§3-1 同步发电机三相突然短路的电流波形.....	18
§3-2 三相短路电流的分析.....	19
§3-3 同步发电机的暂态参数及短路电流交流分量的计算.....	21
§3-4 同步发电机短路电流直流分量的计算.....	35
§3-5 带负载条件下发电机的突然短路.....	35
§3-6 小结.....	41
习题.....	42
<b>第四章 电力系统三相短路的实用算法</b> .....	43
§4-1 “无限大容量”电源条件下的三相短路电流计算.....	43
§4-2 近点短路的短路电流计算.....	46
§4-3 网络变换及化简.....	47
§4-4 异步电动机对短路电流的影响.....	56
§4-5 小结.....	57
习题.....	57
<b>第五章 电力系统各元件的序参数</b> .....	60
§5-1 对称分量法.....	60
§5-2 发电机的正、负、零序电抗.....	66
§5-3 变压器的正、负、零序电抗.....	67

§5-4	架空输电线路的正、负、零序电抗	73
§5-5	小结	78
	习题	79
<b>第六章 简单电力系统不对称故障分析</b> .....81		
§6-1	同步发电机不对称短路时的谐波电流	81
§6-2	简单电力系统相序网络的制定	82
§6-3	简单电力系统的单相直接接地故障分析	83
§6-4	简单电力系统的两相直接短路故障分析	85
§6-5	简单电力系统的两相直接短路接地故障分析	87
§6-6	正序等效定则	90
§6-7	简单电力系统经过阻抗的故障分析	90
§6-8	小结	93
	习题	93
<b>第七章 复杂电力系统的不对称故障分析</b> .....96		
§7-1	故障分路	96
§7-2	复杂电力系统相序网络的制订	96
§7-3	复杂电力系统的单相直接接地故障分析	100
§7-4	复杂电力系统两相直接短路故障分析	105
§7-5	复杂电力系统的两相直接短路接地故障分析	106
§7-6	对称分量经变压器后的相位变化	111
§7-7	不对称横向故障的一般形式	113
§7-8	电力系统的非全相运行分析	115
§7-9	电力系统的多重故障分析	118
§7-10	小结	130
	习题	130
<b>第八章 电力系统故障分析的计算机方法</b> .....133		
§8-1	三相短路的计算机计算方法	133
§8-2	简单不对称故障的计算机计算方法	136
§8-3	小结	139
	习题	140
<b>第九章 运算曲线法</b> .....141		
§9-1	运算曲线	141
§9-2	运算曲线法应用于单机系统	144
§9-3	运算曲线法应用于复杂电力系统——按总计算法	145
§9-4	运算曲线法应用于复杂电力系统——按个别计算法	147
	参考文献	149

# 第一章 绪 论

## § 1-1 短路、短路的起因及其后果

电力系统中多数故障的原因是相与相之间发生短路，在中性点直接接地的系统中，还有相与地之间的短路。发生短路时，短路电流可能达到很大的数值，上万安甚至十几万安。这样大的电流所产生的热和力的作用会使电气设备遭受破坏。为了预防这种情况，电气设备必须有足够的机械强度和热稳定度，也就是说必须经得起最大可能短路电流的作用，而不致损坏。

发生短路的主要原因是电气设备载流部分的绝缘损坏，如果预防性的绝缘试验没有进行，或者进行得不够仔细，则由于绝缘的自然老化就可能发生这种情况。绝缘损坏还可能由于过电压（雷击等）和任何机械损伤（如掘沟时损伤电缆等）所引起。运行人员的误操作（如未拆地线就合闸，或者带负荷拉隔离刀闸等）也要引起故障。鸟兽跨越裸露的载流部分时，也会造成短路。

依照短路发生的地点和持续时间的不同，它的后果可能使用户的供电情况部分地或全部地发生故障，我们用图 1-1 所示电网作为例子来加以说明。

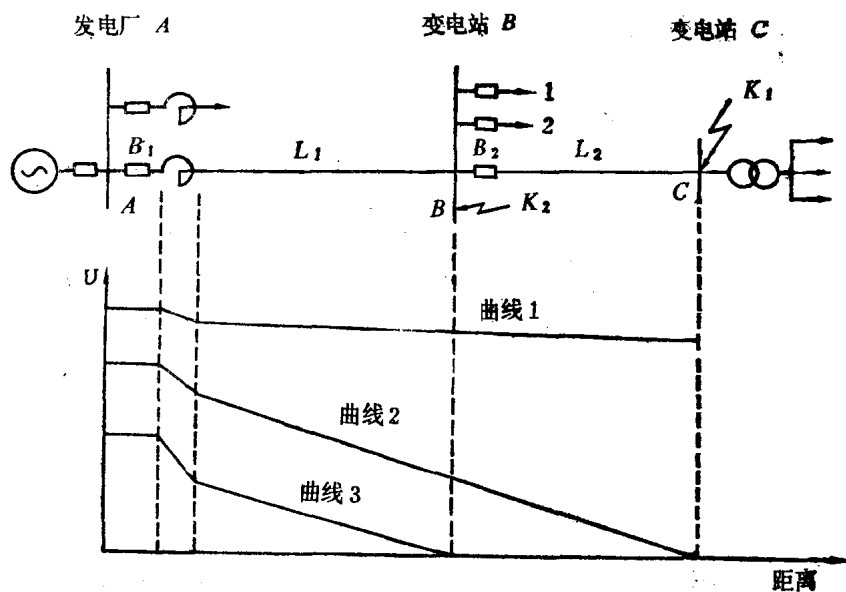


图 1-1

曲线 1 表示正常运行时电网各点的电压情况。当  $K_1$  点发生三相短路时，短路电流从发电机经过线路  $L_1$  和  $L_2$  流到短路点  $K_1$ 。因为短路电流很大，所以在发电机、电抗器、线路中的电压降落都增大，这时变电站 C 的母线电压为零，而变电站 B 和发电厂 A 的母线电压都将大大下降，如曲线 2 所示，这种情况将一直持续到断路器  $B_2$  跳闸为止。在短路故障存在期间，

馈电网的电压降低使受电器的正常工作受到破坏。我们知道，异步电动机的转矩与其外加电压的平方成正比，当电压降低很多时，电动机的转矩就可能减小到不足以带动被驱动的机械（如车床、起重机等）以致电动机停转。例如，当  $K_1$  点短路时变电站  $B$  的母线电压很低，则由变电站其余未发生短路的线路 1 和 2 供电的电动机便有停机的可能。如果短路时变电站母线电压降低不是太多，则由母线供电的电动机仍能继续工作，但其转速将减小，在某些生产过程中转速减小使技术操作过程发生故障，或使产品质量下降。此外，当转速减低时，电动机将吸取较大的电流，而使电动机过热，时间长后会缩短电动机的寿命。总之，电网内发生短路，不仅中断短路点以后的用户供电（例如图中  $K_1$  点短路时变电站  $C$  的用户供电都中断），而且可能破坏电网中接在其他母线上的受电器的正常工作。

当  $K_2$  点发生三相短路时，变电站  $B$  的母线电压为零，发电厂  $A$  的母线电压也将严重下降，如曲线 3 所示，这时接在发电厂母线上的用户受到更大威胁。断路器  $B_1$  跳闸后，变电站  $B$  和  $C$  的用户供电都将停止。由此可知，短路点离发电厂愈近，则中断供电或受威胁和受损失的用户愈多，最严重的情况是在发电厂的母线上发生三相短路，这时全部用户供电都要中断。

当在由很多发电厂组成的电力系统中发生短路时，其后果更为严重，由于短路造成电网电压大幅度下降，可能导致并列运行的发电机失去同步，或者导致电网枢纽点电压的崩溃，所有这些都可能导致电力系统瓦解而造成大面积停电事故，这是最危险的后果。

## § 1-2 短路的类型

在电力系统中，可能发生的短路类型有：三相短路、两相短路、单相短路和两相短路接地。前一种短路又称为对称短路，后三种短路通常称为不对称短路，表 1-1 给出这几种短路的简略记号。

表 1-1

短路类型	示意图	代表符号
三相短路		$F^{(3)}$
二相短路		$F^{(2)}$
单相短路		$F^{(1)}$
二相短路接地		$F^{(1,1)}$

运行经验指出，架空输电线是电力系统中比较薄弱的环节，发生短路的机率最高，我国某电力系统多年统计出在不同范围内发生短路故障的相对次数列出如下：

在 110kV 线路上 78.0%



容量为6000kW以上的发电机	7.5%
110kV 变压器	6.5%
110kV 母线	8.0%
	100.0%

再将 110kV 线路上各种类型短路故障的相对机率列表如下：

三相短路	5%
二相短路	4%
单相短路	83%
二相短路接地	8%
	100%

从上列数字中可以看出，单相短路占压倒多数，国外的运行经验也证明了这一点。三相短路的机率是很小的，但这并不说明三相短路无关重要，相反对三相短路应该加以重视，因为三相短路的情况最严重，有时为了最后论断电力系统在故障情况下工作的可能性，它起着决定性的作用。此外，研究三相短路之所以重要，还由于我们在分析计算不对称短路时，往往把不对称短路看成某种假定的三相短路来处理。

### § 1-3 计算短路电流的目的

短路电流的计算主要是为了解决下面几方面的问题：

1. 作为选择电气设备（电器、母线、瓷瓶、电缆等）的依据。

电力系统中的电气设备在短路电流的力效应和热效应作用下，必须不受到损坏，以免扩大事故范围造成更大的损失。为此在设计时必须校验所选择的电气设备的热稳定性和力稳定度，也就需要计算发生短路时流过电气设备的短路电流。

2. 继电保护的设计和调整。

电力系统中应配置什么样的继电保护，以及这些保护装置应如何整定，必须对电力网中发生各种短路情况进行计算和分析才能正确解决，在这些计算中不但要求出在故障支路中的短路电流数值，而且还要计算短路电流在网络各支路中的分布情况。

3. 接线图的比较和选择。

在设计电力网接线图时，往往会出现这种情况，一个供电可靠性高的接线图，因为电的联系强，在发生短路时电流太大，以致必须选用昂贵的电气设备，而使所设计的接线图在经济上不合理，这时适当改变电路的接法或者增加限制短路电流的设备，就会得到既可靠又经济的接线图。所以评价和比较各种接线图时，计算短路电流是一项很重要的内容。在电厂扩建计划中增加新的机组时，对拟定的接线图也要进行短路电流计算，以便对新装的和原有的电气设备进行热稳定性和力稳定度的校验。

另外，在确定输电线对铁道讯号系统和通讯的干扰影响，以及进行事故分析时，都要计算短路电流。

## § 1-4 电力系统故障分析课程的内容

电力系统故障分析共分九章。第一章为绪论，介绍电力系统发生故障的起因和后果，短路的类型以及计算短路电流的必要性。第二章讨论标么制的应用。在短路电流的计算中普遍采用标么制，而不用有名单位，所以首先需要熟悉标么制。第三章讨论同步发电机三相突然短路的物理过程，暂态参数的意义以及短路电流的工程计算公式，这一章也是故障分析的基础。第四章为电力系统三相短路的工程实用算法。介绍计算远点短路和近点短路的超暂态电流和冲击电流的工程方法。第五章介绍对称分量法和电力系统各元件的序参数。这一章是分析不对称故障的基础。第六章和第七章分析简单电力系统和复杂电力系统的不对称故障，这部分是本书的重点内容。第八章介绍电力系统简单故障的计算机算法。第九章为运算曲线法。介绍利用运算曲线计算任意时间三相短路电流的周期分量。

## 第二章 标么制及等值网络

### § 2-1 标 么 制

短路电流计算中电压、电流、阻抗和功率等物理量，常不用其实际值表示，而采用标么值。标么值并不是新的特殊的东西，而是人们在日常经常使用的概念。例如在报上看到报道今年的产量比去年同时期增加10%，意思是说把去年的产量当做100来衡量，今年产量增加量便是10，换一说法如把去年的产量当做1来衡量，则今年产量增加量便是0.1，就称0.1为今年产量增加量的标么值。

可见，当我们用标么值来表示一个量时，就是把这个量和一个基准量去比较，同时把基准量当做1个衡量单位来看待。因此标么值的计算公式是

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值 (任意单位)}}{\text{基值 (与实际值同单位)}}$$

显然，同一个实际值，当所选的基值不同时其标么值也就不同。所以当我们说一个物理量的标么值时，必须同时说明是以什么作为基值，否则光说一个标么值是没有意义的。

采用标么制的优点可概括如下：

1. 应用标么制，易于比较电力系统各元件的特性及参数。电力系统中各种电气设备的额定电压的高低，容量的大小彼此相差很大，它们的特性和参数，用实际值表示时也就差别很大，很难进行比较，但用标么值表示后，这些特性和参数都在一定的范围内，就便于进行对比分析。例如一台其额定值为110千伏，10000千伏安的变压器，其短路电压为 $U_{S1} = 11.6$ 千伏，而另一台其额定值为10.5千伏，7500千伏安的变压器，其短路电压为 $U_{S2} = 1.05$ 千伏，这两个短路电压值相差很大，不好比较，如果都取它们各自的额定电压作为基值，则其标么值为：

$$U_{S1*} = \frac{11.6}{110} = 0.105$$

$$U_{S2*} = \frac{1.05}{10.5} = 0.1$$

(用\*符号表示标么值)，说明它们的短路电压都是其额定电压的10%左右。

2. 采用标么制，便于判断电气设备的特性和参数的好坏。举例说，假如知道一台发电机运行中其端电压是10.5千伏，相电流为1000安，从这些数值不能断定运行情况是否正常。但如果得到的数据是以发电机额定值做为基值的标么值，譬如 $U_* = 1.0$ ， $I_* = 0.8$ ，则立即可以断定发电机的运行电压是正常的，负载电流则小于额定电流。可见用标么值表示比用实际值能给人以更明确的概念。

3. 应用标么制，可以使计算工作大大简化。

## § 2-2 标么制的基值

前面说过, 采用标么制时, 首先应选定基值。在短路电流计算中使用的物理量有电压、电流、功率和阻抗, 所以基值也应有四个, 即电压基值  $U_B$ , 电流基值  $I_B$ , 功率基值  $S_B$  和阻抗基值  $X_B$ 。原则上这些基值可以任意选择, 但实际上为了计算的方便, 基值的选择必须遵守一定的约束, 下面我们加以说明。

### 一、单相电路的基值

在单相电路中, 用实际值进行计算时, 存在下列电学公式:  $S = UI$ ,  $U = XI$ 。采用标么制来进行计算时, 我们希望方程式的形式仍保持不变, 即  $S_* = U_* I_*$ ,  $U_* = X_* I_*$ 。要达到这一点, 所选基值之间必须保持一定关系。根据标么值的定义, 前面实际值的公式可写成:

$$S_* S_B = U_* U_B \cdot I_* I_B$$

也即

$$S_* = U_* I_* \frac{U_B I_B}{S_B}$$

如果我们希望方程式仍保持  $S_* = U_* I_*$ , 显然其基值之间必须满足关系:

$$\frac{U_B I_B}{S_B} = 1$$

也即

$$S_B = U_B I_B \quad (2-1)$$

同理, 为了保持  $U_* = X_* I_*$ , 则必须满足关系

$$U_B = X_B I_B \quad (2-2)$$

公式 (2-1), (2-2) 就是单相电路中所选基值必须遵守的关系, 因此, 四个基值可以任意选二个其余二个则必须由公式 (2-1), (2-2) 计算得出。通常的做法是先任意选定  $S_B$  和  $U_B$ , 而  $I_B$  和  $X_B$  则由公式求出。

同理可以证明为了保持公式  $S_* = P_* + jQ_*$ ,  $Z_* = R_* + jX_*$ ,  $Z_* = \frac{1}{Y_*}$ 。必须满足  $S_B = P_B = Q_B$  (即视在功率, 有功功率, 无功功率的基值相等),  $Z_B = R_B = X_B$  (即阻抗、电阻、电抗的基值相等),  $Z_B = \frac{1}{Y_B}$  (即阻抗与导纳的基值成反比)。

### 二、三相系统的基值

在对称三相系统中, 我们可以取一相来进行计算, 这时代表一相的等值电路中, 电压、电流、功率和电抗都是一相的量, 因此, 前面关于单相系统选择基值的方法完全可用于三相系统, 只要按相电压、相电流、每相视在功率选基值及换算就可。但是在三相系统中一般给定的数据都以线电压和三相总功率来标明, 并通常以等效 Y 接法为依据。同时计算的结果也往往要求算出某些点的线电压和三相总功率。用实际值进行计算时, 这就需要进行换算, 线电压与相电压之间要进行  $\sqrt{3}$  倍的换算, 每相功率与三相总功率之间要进行 3 倍的换算。在用标么值进行计算时, 为了方便, 我们希望避免这些换算, 就是说在选择基值时, 想法使线电压的标么值和相电压的标么值相等, 三相总功率的标么值和每相功率的标么值相等, 这一

来用标么值表示的电压和功率就没有上述换算的必要了。怎样才能做到前面的要求呢？我们知道 Y 接法的三相系统中线电压  $U_L$  和相电压  $U_\phi$  的关系是  $U_L = \sqrt{3} U_\phi$ ，代入标么值的关系得  $U_{L*} U_{LB} = \sqrt{3} U_{\phi*} U_{\phi B}$ ，即

$$U_{L*} = U_{\phi*} \frac{\sqrt{3} U_{\phi B}}{U_{LB}}$$

如果希望  $U_{L*} = U_{\phi*}$  则只要  $U_{LB} = \sqrt{3} U_{\phi B}$  就可，就是说我们只要选线电压的基值  $U_{LB}$  等于相电压的基值  $U_{\phi B}$  的  $\sqrt{3}$  倍，二者的标么值就相等。同理，由于三相总功率  $S_{3\phi}$  与每相的功率  $S_\phi$  的关系是  $S_{3\phi} = 3S_\phi$ ，所以只要选  $S_{3\phi B} = 3S_{\phi B}$ （即三相总功率的基值等于 3 倍每相功率的基值），则标么值  $S_{3\phi*} = S_{\phi*}$ 。

另外，前面说过计算用的等值电路是代表一相的量，因此在计算中遵守单相电路的关系： $S_{\phi*} = U_{\phi*} I_{\phi*}$ ， $U_{\phi*} = X_* I_{\phi*}$ 。现在把上述关系  $S_{3\phi*} = S_{\phi*}$ ， $U_{L*} = U_{\phi*}$ ，（同时注意到 Y 接法中  $I_{\phi*} = I_{L*}$ ）代入这二公式，由前一式子得  $S_{3\phi*} = U_{L*} I_{L*}$ ，也即

$$\frac{S_{3\phi}}{S_{3\phi B}} = \frac{U_L}{U_{LB}} \cdot \frac{I_L}{I_{LB}} \quad \text{或} \quad S_{3\phi} = U_L I_L \frac{S_{3\phi B}}{U_{LB} I_{LB}}$$

但是我们知道在三相系统中应遵守关系  $S_{3\phi} = \sqrt{3} U_L I_L$ ，故上式必须满足

$$\frac{S_{3\phi B}}{U_{LB} I_{LB}} = \sqrt{3}$$

或

$$S_{3\phi B} = \sqrt{3} U_{LB} I_{LB} \quad (2-3)$$

同理，由后一式子得  $U_{L*} = X_* I_{L*}$ ，也即

$$\frac{U_L}{U_{LB}} = \frac{X}{X_B} \cdot \frac{I_L}{I_{LB}} \quad \text{或} \quad U_L = X I_L \frac{U_{LB}}{X_B I_{LB}}$$

但 Y 接法三相系统中应遵守  $U_L = \sqrt{3} X I_L$ ，所以上式中应满足

$$U_{LB} = \sqrt{3} X_B I_{LB} \quad (2-4)$$

公式 (2-3)，(2-4) 就是三相系统中选择基值时应遵守的两个关系。只要遵守上述的关系，虽然计算用的是一相的等值电路，其中某一点的电压和功率本来只代表该点的相电压和一相的功率的标么值，但同时它们又代表该点线电压和三相总功率的标么值（不过要注意它们的基值是不一样的）。这样给三相系统的计算带来很大的方便。

例：图 2-1 的三相对称系统，已知电源的线电压  $U_1 = 381\text{V}$ （每相电势  $E_\phi = 220\text{V}$ ），电路的阻抗值给定，要求负载处的线电压  $U_2$  及负载的三相总功率  $S_2$ 。

解：1. 用实际值计算。取一相的等值电路如图 2-2，很显然

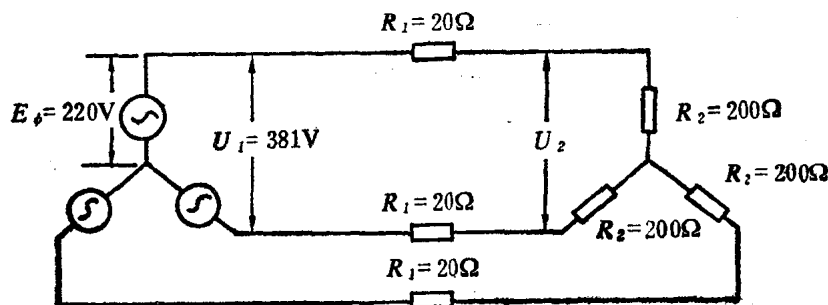


图 2-1

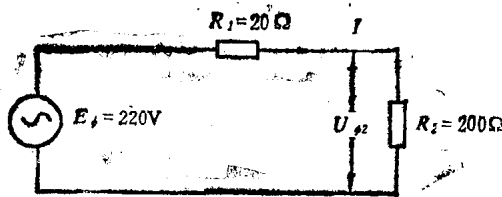


图 2-2

$$I = \frac{E_\phi}{R_1 + R_2} = \frac{220}{20 + 200} = 1 \text{ A}$$

$$U_{\phi 2} = IR_2 = 1 \times 200 = 200 \text{ V}$$

$$S_{\phi 2} = IU_{\phi 2} = 1 \times 200 = 220 \text{ VA}$$

$U_{\phi 2}$  是相电压,  $S_{\phi 2}$  是单相功率, 故

$$U_2 = \sqrt{3} U_{\phi 2} = \sqrt{3} \times 200 = 346.4 \text{ V}$$

$$S_2 = 3S_{\phi 2} = 3 \times 200 = 600 \text{ VA}$$

2. 用单相系统标么值计算。选  $S_B = 100 \text{ VA}$ ,  $U_B = 220 \text{ V}$  则  $I_B = \frac{S_B}{U_B} = \frac{100}{220} = 0.455 \text{ A}$ ,

$$X_B = \frac{U_B}{I_B} = 484 \Omega, \text{ 则}$$

$$R_{1*} = \frac{R_1}{X_B} = \frac{20}{484} = 0.0413$$

$$R_{2*} = \frac{200}{484} = 0.413$$

$$E_{\phi*} = \frac{E_\phi}{U_B} = \frac{220}{220} = 1.0$$

等值电路如图 2-3。显然

$$I_* = \frac{E_{\phi*}}{R_{1*} + R_{2*}} = \frac{1}{0.4543} = 2.2$$

$$U_{\phi 2*} = I_* R_{2*} = 2.2 \times 0.413 = 0.909$$

$$S_{\phi 2*} = I_* U_{\phi 2*} = 2.2 \times 0.909 = 2$$

故  $U_{\phi 2} = U_{\phi 2*} U_B = 0.906 \times 220 = 200 \text{ V}$

$$S_{\phi 2} = S_{\phi 2*} S_B = 2 \times 100 = 200 \text{ VA}$$

所以

$$U_2 = \sqrt{3} U_{\phi 2} = \sqrt{3} \times 200 = 346.4 \text{ V}$$

$$S_2 = 3S_{\phi 2} = 3 \times 200 = 600 \text{ VA}$$

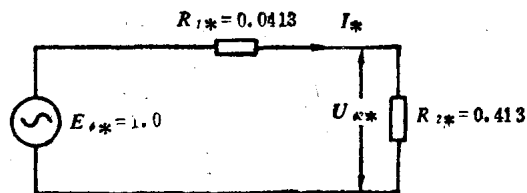


图 2-3

3. 按三相系统取基值的标么值计算。取  $S_{3\phi B} = 3S_{\phi B} = 3 \times 100 = 300 \text{ VA}$ ,  $U_{LB} = \sqrt{3} U_{\phi B} = \sqrt{3} \times 220 = 381 \text{ V}$

则

$$I_B = \frac{S_{3\phi B}}{\sqrt{3} U_{LB}} = \frac{300}{\sqrt{3} \times 381} = 0.455 \text{ A}$$

$$X_B = \frac{U_{LB}}{\sqrt{3} I_B} = \frac{381}{\sqrt{3} \times 0.455} = 484 \Omega$$

可见  $I_B$  和  $X_B$  与按单相系统取基值时相同。同时

$$U_{1*} = \frac{U_1}{U_{LB}} = \frac{381}{381} = 1.0 = E_{\phi*}$$

因此, 等值电路和图 2-3 完全一样, 所以

$$U_{\phi 2*} = 0.909 = U_{\phi 2*}$$

$$S_{\#2*} = 2 = S_{2*}$$

也就是说这时计算得的负载处电压标么值既代表相电压又代表线电压，功率标么值既代表相功率又代表三相总功率，不过相电压的基值是 220V 而线电压的基值是 381V，相功率的基值是 100VA，而三相总功率的基值是 300VA。故

$$U_2 = U_{2*} U_{LB} = 0.909 \times 381 = 346.3 \text{ V}$$

$$S_2 = S_{2*} S_{\#2,B} = 2 \times 300 = 600 \text{ VA}$$

### § 2-3 标么值的转换

在工程计算中，常遇到标么值的转换问题，因为通常电力系统中的发电机、电动机、变压器及电抗器等设备其参数的标么值都是根据它们各自的额定值规定的，即以各自的额定电压  $U_r$ ，额定功率  $S_r$ ，做为基值。而各个设备的额定值又往往各不相同，基值不相同的标么值是不能直接进行运算的（即不能直接进行相加，相减或乘除等运算），因此在计算短路电流时需要把这些不同基值的标么值转换为统一选定基值  $U_B$ ， $S_B$  条件下的标么值。转换的公式导出如下：

如已知以额定值为基值的电抗标么值为  $X_{*r}$ ，则根据公式 (2-4) 有

$$X_{*r} = \frac{X}{X_r} = X \frac{\sqrt{3} I_r}{U_r} = X \frac{S_r}{U_r^2} \quad (2-5)$$

设按统一选定的基值条件下的电抗标么值为  $X_{*B}$ ，则

$$X_{*B} = \frac{X}{X_B} = X \frac{\sqrt{3} I_B}{U_B} = X \frac{S_B}{U_B^2} \quad (2-6)$$

现在要找出  $X_{*r}$  和  $X_{*B}$  之间的转换关系，因实际的电抗值  $X$  是不变的，故

$$X = X_{*r} X_r = X_{*B} X_B$$

即

$$X_{*B} = X_{*r} \frac{X_r}{X_B} = X_{*r} \frac{I_B U_r}{I_r U_B} = X_{*r} \frac{S_B U_r^2}{S_r U_B^2} \quad (2-7)$$

公式 (2-7) 就是将  $X_{*r}$  转换为  $X_{*B}$  的关系式。通常当选基值电压等于额定电压时，即  $U_B = U_r$ ，则公式 (2-7) 变成更简单的关系

$$X_{*B} = X_{*r} \frac{S_B}{S_r} \quad (2-8)$$

例：图 2-4(a) 给出发电机和电抗器的参数，它们都是以各自的额定值为基值的标么值，用以计算的等值电路图 2-4(b) 中  $X'_{d*B}$ ， $X_{D*B}$  和  $E'_{d*B}$  都应是转换到统一基值的标么值，现在来求这些参数的标么值。

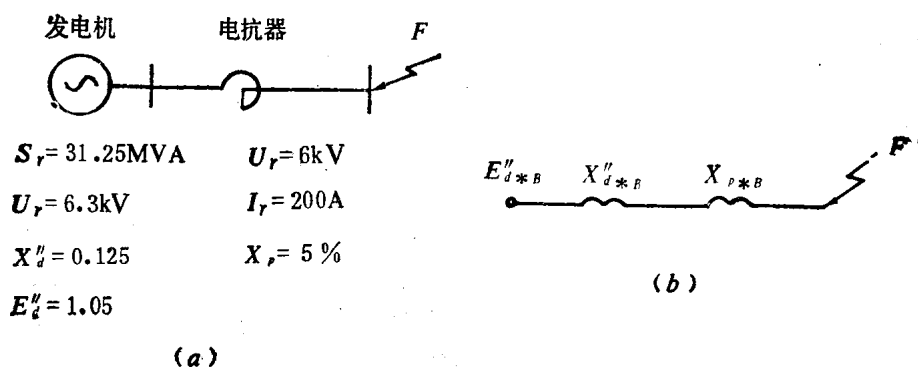
解：选统一的基值为  $U_B = 6.3 \text{ kV}$ ， $S_B = 100 \text{ MVA}$ 。则  $I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 9.16 \text{ kA}$ ， $X_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{6.3}{\sqrt{3} \times 9.16} = 0.397 \Omega$ 。按公式 (2-8) 有

$$X'_{d*B} = X'_{d*r} \frac{S_B}{S_r} = 0.125 \times \frac{100}{31.25} = 0.4$$

按公式 (2-7) 有

$$X_{P*B} = X_{P*r} \frac{I_B U_r}{I_r U_B} = 0.05 \times \frac{9160 \times 6}{200 \times 6.3} = 2.18$$

$$E''_{d*B} = E''_{d*r} \frac{U_r}{U_B} = E''_{d*r} = 1.05$$



$S_r = 31.25 \text{MVA}$        $U_r = 6 \text{kV}$   
 $U_r = 6.3 \text{kV}$        $I_r = 200 \text{A}$   
 $X''_d = 0.125$        $X_r = 5\%$   
 $E''_d = 1.05$

图 2-4

## § 2-4 有变压器联系的不同电压级电网中 各元件参数标么值的计算

### 一、不同电压等级电网中基值的选择

图 2-5(a) 所示的电网中，有两个电压级  $U_1$  和  $U_2$ ， $X_1$  是  $U_1$  电压级中的电抗值， $X_2$  是  $U_2$  电压级中的电抗值，联系变压器的变比是  $K = \frac{U_{r1}}{U_{r2}}$ ，其中  $U_{r1}$  是变压器接在  $U_1$  电压级的绕组的额定电压， $U_{r2}$  则是变压器接在  $U_2$  电压级绕组的额定电压。变压器的漏电抗已归入  $X_1$  (或  $X_2$ ) 中。为了进行短路电流计算，需要把图 2-5(a) 的电网用其等值电路来代替，等值电路中各电抗都应该是统一基值条件下的标么值如图 2-5(c) 所示。要做到这点有以下方法。

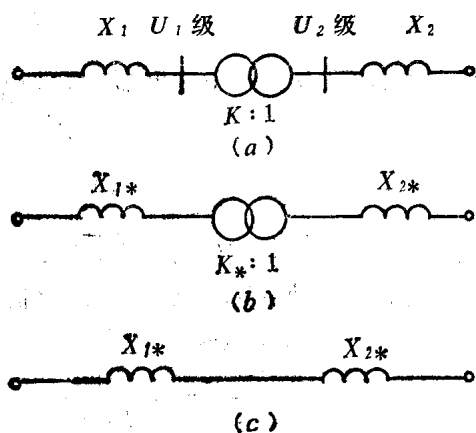


图 2-5

第一种方法是将电抗按照变压器变比  $K$  折合到同一电压等级，例如将  $X_1$  折合到  $U_2$  电压级，折合后的值为  $X'_1 = \frac{X_1}{K^2}$ ，然后在  $U_2$  电压级任选基值  $S_B$  和  $U_B$ ，便可求出各电抗的标么值为：

$$X'_{1*} = \frac{X_1}{K^2} \frac{S_B}{U_B^2}, \quad X_{2*} = X_2 \frac{S_B}{U_B^2} \quad (2-9)$$

这些电抗都是统一基值下的标么值，所以可以用于图 2-5(c) 的等值电路。这种方法要对电抗进行变压器的折合运算，当存在许多变压器时是很麻烦的。所以一般不这样做。

另外一种方法是在变压器两侧任选各自的电压基值（例如在  $U_1$  级选  $U_{B1}$  为基值， $U_2$  级选  $U_{B2}$  为基值）而功率基值则统一选为  $S_B$ 。则各电抗的标么值便为



$$X_{1*} = X_1 \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad X_{2*} = X_2 \frac{S_B}{U_{B2}^2} \quad (2-10)$$

同时，用标么值表示的变压器变比为

$$K_* = \frac{U_{r1} / U_{B1}}{U_{r2} / U_{B2}} = \frac{U_{r1}}{U_{r2}} \frac{U_{B1}}{U_{B2}} = \frac{K}{K_B} \quad (2-11)$$

式中  $K_B = \frac{U_{B1}}{U_{B2}}$  为基值电压之比， $K_*$  称标么值变比，于是图 2-5(a) 的网络就可用图 2-5(b) 的网络来代替，图 2-5(b) 是用标么值表示的网络。但仍然是由变压器联系的网络，这样的网络不能直接用于计算，必须想法将变压器取消。要做到这一点，可以在选择电压基值时使得公式 (2-11) 代表的变压器标么值变比为  $K_* = 1$ ，变比为 1 的变压器就可以取消，于是图 2-5(b) 的网络就变成图 2-5(c) 所示的等值电路。从公式 (2-11) 可见， $K_* = 1$  也就是  $K_B = K$ ，即

$$\frac{U_{B1}}{U_{B2}} = \frac{U_{r1}}{U_{r2}} \quad (2-12)$$

就是说，变压器的两个基值电压之比应等于变压器的实际变比。显然，最方便的做法就是选择电压基值等于变压器的额定电压。另外，可容易地证明当  $K_* = 1$  时公式 (2-10) 中的电抗标么值  $X_{1*}$  就等于公式 (2-9) 中的电抗标么值  $X'_{1*}$ 。

还有一种处理方法则是当  $K_* \neq 1$  时，把图 2-5(b) 电路中的电抗  $X_{1*}$  (或  $X_{2*}$ ) 和变压器一起转换成等值的  $\pi$  形电路。这种方法常在计算机计算电网时采用，在电力系统稳态分析中将进行详细介绍。

## 二、电力网的平均标称电压

上述是不同电压级电网中计算标么值的准确方法，可以推广到多级电压的电网，但在多级电压的电网中用准确方法计算往往比较麻烦，因此在工程实用计算中常采用近似的方法，下面进行介绍。

图 2-6(a) 所示的网络有三个电压等级  $U_1, U_2, U_3$ ，而由两台变压器  $T_1$  和  $T_2$  联系， $T_1$  的变比为  $K_1 = \frac{U_{r1}}{U_{r2}}$ ， $T_2$  的变比为  $K_2 = \frac{U'_{r2}}{U_{r3}}$ ，式中  $U_{r1}, U_{r2}, U'_{r2}, U_{r3}$  是变压器两侧的额定电压。将图 2-6(a) 转换为用标么值表示的网络时，可选统一的功率基值  $S_B$ ，各电压级任选相应的电压基值  $U_{B1}, U_{B2}, U_{B3}$ ，则各电抗的标么值为

$$X_{1*} = X_1 \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad X_{2*} = X_2 \frac{S_B}{U_{B2}^2}, \quad X_{3*} = X_3 \frac{S_B}{U_{B3}^2}$$

各变压器的标么值变比为

$$\left. \begin{aligned} K_{1*} &= \frac{U_{r1} / U_{B1}}{U_{r2} / U_{B2}} = \frac{U_{r1}}{U_{r2}} \frac{U_{B1}}{U_{B2}} = \frac{K_1}{K_{B1}} \\ K_{2*} &= \frac{U'_{r2} / U_{B2}}{U_{r3} / U_{B3}} = \frac{U'_{r2}}{U_{r3}} \frac{U_{B2}}{U_{B3}} = \frac{K_2}{K_{B2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

这时用标么值表示的网络如图 2-6(b) 所示。