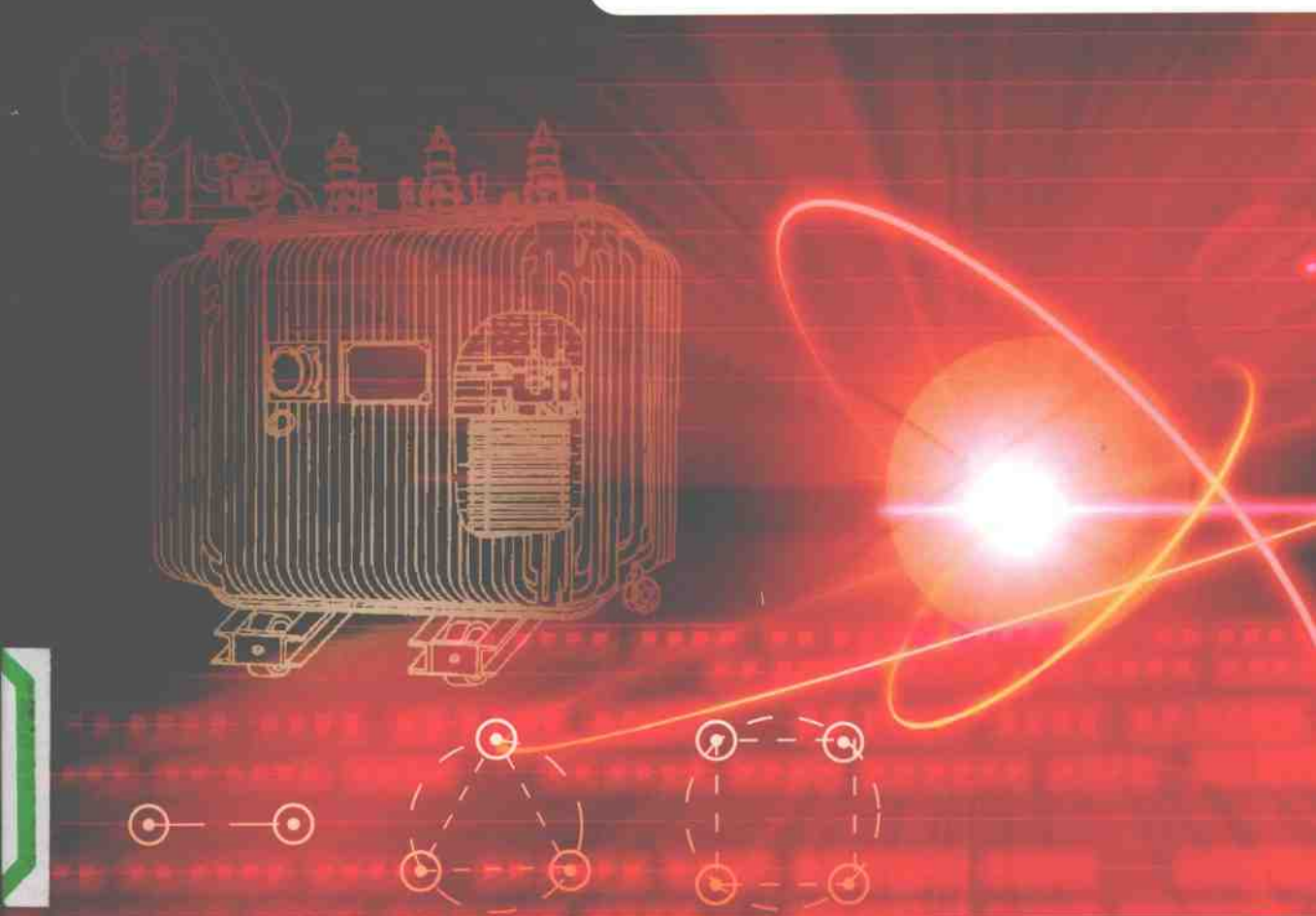


DIANQI SHEBEI DE
XUANZE YU JISUAN

电气设备的 选择与计算

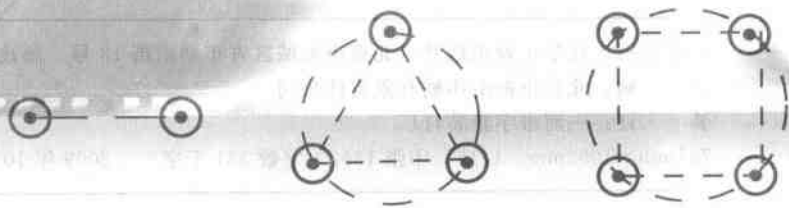
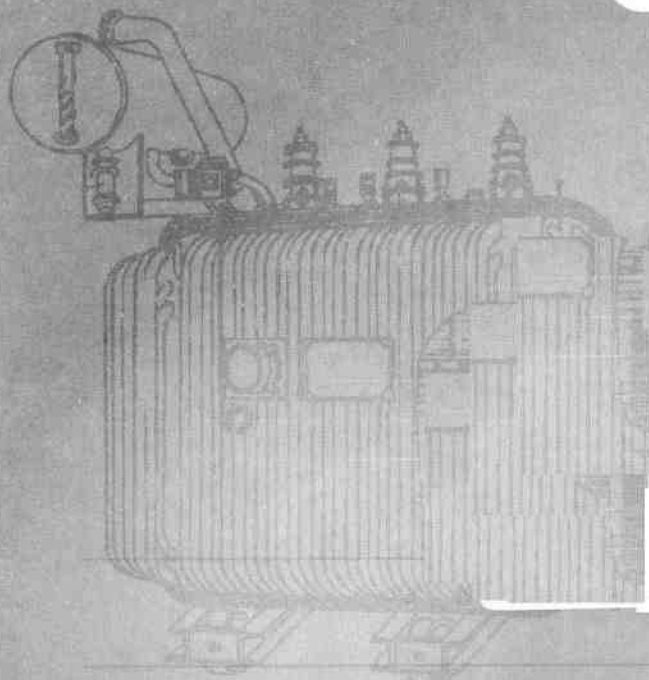
王越明 主编 王朋 刘睿 副主编



DIANQI SHEBEI DE
XUANZE YU JISUAN

电气设备的 选择与计算

王越明 主编 王朋 刘睿 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备的选择与计算/王越明主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-122-06194-2

I. 电… II. 王… III. 电气设备-基本知识 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 114844 号

责任编辑: 高墨荣

装帧设计: 韩 飞

责任校对: 陈 静

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 351 千字 2009 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前言

电力系统是国民经济的重要能源部门，随着社会的发展，电力系统的规模越来越大，结构越来越复杂。在电力系统电气设备的设计和运行中，短路电流的计算分析和电气负荷计算是解决一系列技术问题不可缺少的基本计算，是合理选择电气设备、合理配置继电保护及定值整定和运行方式分析等问题的重要依据，对于工程设计的安全性和经济合理性有十分重要的意义。

本书以有关国家标准、行业标准和专业性文件为指导，收集近年来有关的技术资料并结合现场实际，加以整理、补充和完善而成。

本书较全面系统地介绍了短路电流和负荷的计算方法、步骤以及常用电气设备的选择计算方法，主要包括短路电流计算、负荷计算，电气主接线设计，变压器、高压开关电器、低压电器、互感器、母线、避雷器以及电动机等常用电气设备的选择计算等内容，配合具体计算选择实例，深入浅出，简明扼要，方便读者学习阅读。

本书适合广大从事电气设备运行管理、规划设计、运行维护等工程技术人员使用，亦可作为电气工程技术人员培训教材和大专院校电气工程等专业的教学用书。

本书由王越明任主编，王朋、刘睿任副主编。全书共 10 章，第 1 章、第 2 章、第 4 章由黑龙江科技学院王越明编写，第 6 章、第 9 章由黑龙江科技学院刘睿编写，第 3 章由哈尔滨工业大学刘鹏编写，第 5 章、第 7 章、第 8 章由黑龙江科技学院王朋编写，第 10 章由黑龙江大学庞桂云编写。全书由王庆十担任主审。

本书在编写过程中得到了中国天辰工程有限公司黑龙江分公司姬秋红、何忠等同志的大力支持，在此表示诚挚的感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，本书难免有不妥之处，恳请广大读者指正。

编 者



第1章 短路电流计算	1
1.1 短路的基本概念	1
1.1.1 短路的原因及类型	1
1.1.2 短路的危害	2
1.2 短路电流计算概述	3
1.3 电力系统各主要元件的参数及等值电路	4
1.3.1 电力线路的参数及等值电路	4
1.3.2 变压器的参数及等值电路	9
1.3.3 发电机和负荷的参数及等值电路	14
1.3.4 标幺值法	15
1.4 网络变换及化简	23
1.5 对称短路的分析和计算	25
1.5.1 无限大容量系统三相短路及短路电流	25
1.5.2 有限容量系统三相短路及短路电流	29
1.5.3 大型电动机对短路电流的影响	31
1.5.4 短路电流周期分量的近似计算	31
1.6 不对称短路电流的计算	32
1.6.1 对称分量法的应用	32
1.6.2 短路回路各元件的序电抗	33
1.6.3 不对称短路的序网络图	34
1.6.4 不对称短路的分析计算	35
1.6.5 正序等效定则	38
1.7 低压电网短路电流的计算	38
1.7.1 低压电网短路电流计算的特点	38
1.7.2 低压电网短路回路各元件的阻抗	39
1.7.3 低压电网短路电流计算	39
1.8 短路电流的电动力效应与热效应	40
1.8.1 短路电流的电动力效应	40
1.8.2 短路电流的热效应	40
1.9 短路电流计算实例	42
第2章 负荷计算	45
2.1 负荷计算的基本概念	45

2.2 负荷曲线	46
2.2.1 负荷曲线	46
2.2.2 与负荷曲线有关的参数	48
2.3 用电设备组计算负荷的确定	49
2.3.1 计算负荷的基本概念及确定方法	49
2.3.2 用电设备容量的确定	50
2.3.3 负荷计算	51
2.4 变配电所总负荷的计算	58
2.4.1 功率损耗计算	58
2.4.2 变电所总计算负荷	60
2.5 功率因数的提高	60
2.6 尖峰电流的计算	62
第3章 电气主接线	64
3.1 对主接线的基本要求	64
3.2 电气主接线的基本形式	65
3.2.1 有母线系统接线	65
3.2.2 无母线系统接线	68
3.2.3 单元接线	69
3.3 电气主接线实例	70
第4章 变压器的选择	72
4.1 电力变压器的基本知识	72
4.1.1 变压器的工作原理	72
4.1.2 变压器的结构	73
4.1.3 变压器的分类	75
4.2 电力变压器的选择	76
4.2.1 主变压器容量的选择	76
4.2.2 主变压器台数的选择	78
4.2.3 主变压器型号的选择	78
4.2.4 变压器的额定数据	80
第5章 开关电器的选择	82
5.1 开关电器的基本概念	82
5.1.1 电弧	82
5.1.2 高压断路器	84
5.1.3 隔离开关	87
5.1.4 高压负荷开关	89
5.2 高压开关电器的选择	90
5.2.1 电气设备选择的一般原则	90
5.2.2 高压断路器的选择	91
5.2.3 高压隔离开关选择	93
5.2.4 高压负荷开关的选择	93
5.2.5 高压开关柜选择	93
5.3 低压开关电器的选择	94

5.3.1 低压断路器	94
5.3.2 低压刀开关	95
5.3.3 低压熔断器	96
5.4 开关电器选择实例	98
第6章 母线和输电线路的选择	103
6.1 母线的选择	103
6.1.1 基本概念	103
6.1.2 截面的选择	105
6.1.3 动热稳定性校验	109
6.1.4 母线选择举例	113
6.2 输电线路的选择	115
6.2.1 基本概念	115
6.2.2 截面的选择	121
6.2.3 定性校验热稳定	128
6.2.4 输电线路选择举例	128
第7章 互感器的选择	131
7.1 电压互感器的选择	131
7.1.1 电压互感器的一般知识	131
7.1.2 按照基本技术参数选择	132
7.2 电流互感器的选择	136
7.2.1 电流互感器的一般知识	136
7.2.2 测量用电流互感器	138
7.2.3 保护用电流互感器	141
7.2.4 TP类保护用电流互感器	145
7.3 电子式互感器简介	150
7.4 互感器选择举例	154
7.4.1 发电机差动保护用电流互感器选择	154
7.4.2 220kV 线路保护用电流互感器的选择	155
7.4.3 母线差动保护用电流互感器选择	156
7.4.4 超高压输电线路保护用电流互感器选择	159
7.4.5 超高压电网降压变压器差动保护用电流互感器选择	160
7.4.6 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选择	161
第8章 避雷器	164
8.1 基本概念	164
8.2 配置方式	167
8.2.1 主变压器的避雷器配置	167
8.2.2 小容量变电所雷电侵入波过电压的简易保护	167
8.2.3 气体绝缘全封闭组合电器 (GIS) 变电所的雷电侵入波过电压保护	168
8.3 氧化锌避雷器的技术参数	169
8.3.1 氧化锌避雷器的物理量	169
8.3.2 技术参数	171
8.4 避雷器的选择计算	173

8.5 避雷器选择举例	175
第9章 其他高压电器的选择	177
9.1 限流电抗器的选择	177
9.1.1 基本概念	177
9.1.2 按照基本技术参数选择	177
9.1.3 按照短路条件校验	179
9.2 高压熔断器的选择	180
9.2.1 基本概念	180
9.2.2 按照基本技术参数选择	181
9.2.3 高压熔断器的校验	182
9.3 穿墙套管和绝缘子的选择	184
9.3.1 基本概念	184
9.3.2 按照基本技术参数选择	186
9.3.3 稳定性校验	186
第10章 电动机的选择	188
10.1 电动机选择的基本原则和内容	188
10.1.1 电动机选择的基本原则	188
10.1.2 电动机选择的主要内容	188
10.2 电动机结构形式和类型的选择	189
10.3 电动机工作制的选择	191
10.4 电动机的发热和冷却过程	192
10.5 电动机功率的选择	194
10.5.1 电动机的额定功率的和实际功率	194
10.5.2 恒定负载电动机额定功率的选择	194
10.5.3 周期性变动负载电动机额定功率的选择	198
参考文献	202

1.1 短路的基本概念

根据电力系统的运行经验,破坏系统正常运行的故障中最为常见而且危害性最大的是各种形式的短路。所谓短路是指不等电位的导体(含零电位的“大地”)之间的电气短接。例如:相与相之间的短路、中性点接地系统中一相或几相的接地短路、三相四线系统中相线与中性线的短路等。

1.1.1 短路的原因及类型

(1) 短路的原因

电力系统产生短路的主要原因是电气设备载流部分的相间绝缘或相对地绝缘被破坏。具体分析主要有以下几个方面。

① 电气设备的绝缘损坏。造成电气设备绝缘损坏的原因很多,主要是由于电气设备在制造时可能存在某些缺陷、电气设备年久陈旧且长期低电压过电流运行使绝缘会迅速老化、绝缘瓷瓶表面污秽使绝缘下降、绝缘受到机械性损伤等,上述原因会造成带电部分的相与相或相与地形成回路。

② 供电系统受到雷电的侵袭或在切换电路时产生过电压,将电气装置绝缘薄弱处击穿,造成短路。

③ 运行人员误操作造成短路。如设备检修未拆除地线就加电压或在未断开断路器之前,拉开隔离开关,形成强大的电弧,造成弧光短路等。

④ 鸟兽跨越不同电位的裸露导体或施工时挖伤电缆造成短路。

⑤ 恶劣的气候条件以及其他的意外事故也可能造成短路故障。

(2) 短路的类型

在三相系统中,有下列几种短路形式。

① 三相短路:用符号 $k^{(3)}$ 表示,如图 1-1(a) 所示。三相短路时,三相短路回路中的阻抗相等,三相电压和电流仍然保持对称,属于对称短路。短路时电流增大,短路点电压为零,电压完全降落于短路回路中。短路后电压与电流的相位差较正常时增大,接近于 90° 。

② 两相短路:用文字符号 $k^{(2)}$ 表示,如图 1-1(b) 所示。两相短路时,整个系统的电压、电流的对称性遭到破坏,属于不对称短路。短路后短路点相间电压为零,故障两相短路

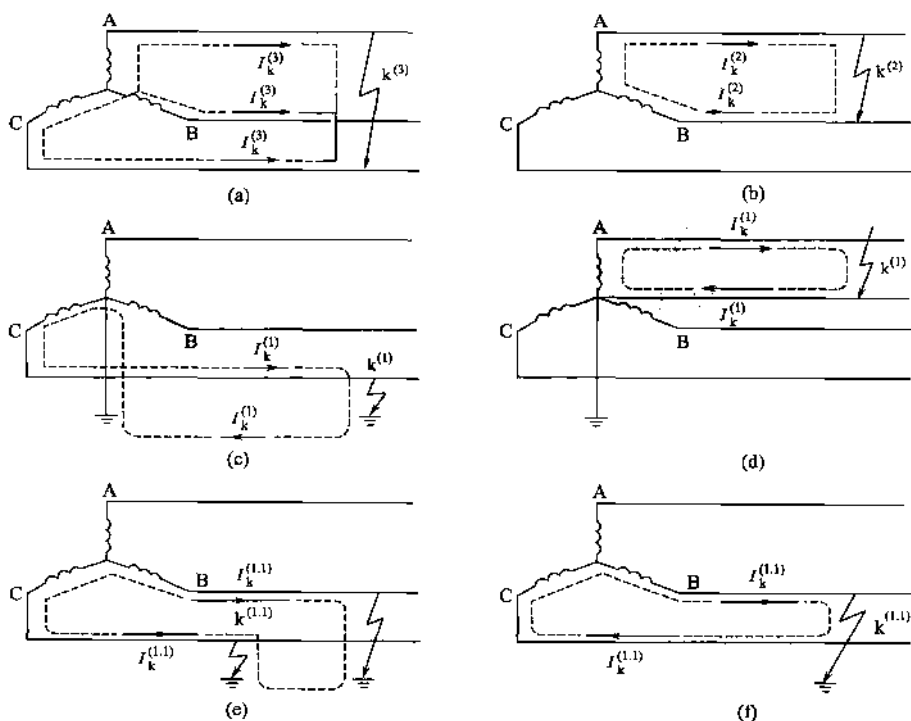


图 1-1 短路的种类

电流的大小相等而方向相反。

③ 单相短路：用文字符号 $k^{(1)}$ 表示，如图 1-1 (c)、(d) 所示。单相短路发生在中性点直接接地系统中或三相四线制系统中，发生在中性点直接接地系统的单相短路称为单相接地短路，短路后电压和电流的对称关系均受到破坏，属于不对称短路。

④ 两相接地短路：用文字符号 $k^{(1,1)}$ 表示，如图 1-1 (e)、(f) 所示。两相接地短路是指两相在同一地点或不同地点同时发生单相接地。在中性点直接接地系统中，单相接地属于短路，将被继电保护装置迅速切除。因此，在不同地点同时发生两相接地短路的可能性较小，只有在雷电强烈时期，尤其在双回路供电的情况下有可能在两点或三点同时发生接地故障。在中性点不接地系统中，发生单相接地时其接地电流一般很小，通常允许工作 0.5~2h。在此期间，由于其他两相对地电压升高到 $\sqrt{3}$ 倍，容易击穿绝缘，造成另一相也接地而形成两相接地短路。两相接地短路后的情况与前述的两相短路的情况基本一样。

1.1.2 短路的危害

短路故障一旦发生，往往会对电力系统的正常运行造成十分严重的后果，主要表现在以下几方面。

① 短路时产生很大的短路电流（大容量系统中可达数万或数十万安培），短路电流产生的电动力效应和热效应，使故障设备及短路回路中的其他设备遭到破坏。

② 短路时电网电压突然下降，会影响其他电气设备的正常运行，例如，在用电设备中占有很大比重的异步电动机，其电磁转矩与电压的平方成正比，当电压下降幅度较大时，电动机将停止转动；离短路点较远的电动机，因电压下降幅度较小而能继续运转，但它的转速将降低，导致产生废、次产品。此外由于电压下降，转速降低，而电动机拖动的机械负载又未变化，电动机绕组将流过较大的电流，如果短路持续时间较长，电动机必然过热使绝缘迅



速老化, 缩短电动机的寿命。

③ 严重的短路会影响整个电力系统的稳定性, 使各电厂并列运行的发电机组失去同步, 使系统瓦解而造成大面积停电, 这是短路造成的最严重、最危险的后果。

④ 对通信干扰, 非对称短路的不平衡电流在周围空间将产生很大的交变磁场, 干扰附近的通信线路和自动控制装置的正常工作。

1.2 短路电流计算概述

(1) 短路电流计算的目的

短路电流是指由于故障或误操作而在电路中造成短路时所产生的过电流。这一短路电流比正常电流一般大几十倍甚至几百倍。在大的电力系统中, 短路电流可达几万安培甚至几十万安培, 可对电力系统产生极大的危害。

由于短路会产生十分严重的后果, 因而引起了高度重视。除尽量消除导致短路的原因外, 还应在短路故障发生后及时采取措施, 尽量减少短路造成的损失, 如采用继电保护将故障隔离, 在合适的地点装设电抗器以限制短路电流, 采用自动重合闸消除瞬时故障使系统尽量恢复正常等。这些措施均须建立在短路电流计算的基础上。在发电厂、变电所以及整个电力系统的设计工作中, 都必须事先进行短路计算, 短路电流的计算有以下几个方面的作用。

① 选择电气设备。在选择各种电气设备时, 需要计算出可能通过电气设备的最大短路电流及其产生的电动力效应及热效应, 以便检验电气设备的动稳定性和热稳定性。

② 配置和整定继电保护装置。系统中应配置哪些继电保护以及保护装置的参数整定, 都必须对电力系统各种短路故障进行计算和分析, 而且不仅要计算短路点的短路电流, 还要计算短路电流在网络支路中的分布, 并要作多种运行方式的短路计算。

③ 选择限流电抗器。当短路电流过大时, 会造成设备选择困难或不经济, 这时可在供电线路中串接电抗器来限制短路电流。通过短路电流的计算, 决定是否使用限流电抗器, 并确定所选电抗器的参数。

④ 确定供电系统的接线和运行方式。供电系统的接线和运行方式不同, 短路电流的大小也不同。只有在计算出在某种接线和运行方式下的短路电流, 才能判断这种接线及运行方式是否合理。

⑤ 在设计 110kV 及以上电压等级的架空线路时, 要计算短路电流以确定电力线邻近架设的通信线是否存在危险及干扰。

(2) 短路电流计算的假设条件

无论是电力系统的设计或是运行和管理, 各环节都免不了对短路故障的分析和计算。但是, 实际的电力系统是十分复杂的, 突然短路的暂态过程更加复杂, 要精确计算任意时刻的短路电流非常困难。然而实际工程中并不需要十分精确的计算结果, 但却要求计算方法简捷适用, 其计算结果只要能满足工程允许误差即可。因此, 工程中适用的短路计算是采用在一定假设条件下的近似算法, 这种近似算法在电力工程中称为短路电流的实用计算。

① 短路过程中发电机之间不发生摇摆, 系统中所有发电机的电势同相位;

② 短路前电力系统是对称三相系统;

③ 不计磁路饱和, 这样, 使系统各元件参数恒定, 电力网络可看作线性网络, 能应用叠加原理;

④ 忽略高压架空输电线的电阻和对地电容, 忽略变压器的励磁支路和绕组电阻, 每个元件用纯电抗表示;

⑤ 对负荷只作近似估计, 一般情况下, 认为负荷电流比同一处短路电流小得多, 可以

忽略不计。计算短路电流时仅需考虑接在短路点附近的大容量电动机对短路电流的影响；

⑥ 短路是金属性短路，即短路点相与相或相与地间发生短接时，它们之间的阻抗为零。

(3) 短路电流计算的步骤

① 绘制短路计算电路图（即系统单线计算电路图）。在进行短路计算时，应先绘制短路计算电路图。在短路计算电路图中，只需画出与短路计算有关的部分。

② 绘制等值电路。为了避免短路计算出现错误，使计算清楚明了，在短路计算时还应绘制等值电路图。短路计算用的等值电路图，应对每种运行方式、每个短路计算点绘制一个。在图中，各元件的阻抗用规定的图形符号表示。在图形符号旁边用一个分数注明元件的编号（分子）及其阻抗（分母）。元件的阻抗用复数表示，实部表示电阻，虚部表示电抗。

③ 计算短路回路的阻抗。根据前面所述的方法求出各元件的阻抗，并标在等值电路图上，然后计算回路的总阻抗。

④ 计算短路电流。计算短路点的三相短路电流的周期分量 $I_k^{(3)}$ 及其他短路电流。

⑤ 计算短路点的三相短路容量 $S_k^{(3)}$ 。

1.3 电力系统各主要元件的参数及等值电路

1.3.1 电力线路的参数及等值电路

三相电力线路分为架空线路和电缆线路两类，一般选用电阻率低、资源丰富的材料作导电部分。

电力线路实质上是分布参数的电路，沿导线每一长度单元各相都存在电阻、自感、对地电容和漏电导，各相之间有互感、电容和漏电导。实际考虑的参数包括电阻、电感、电导、电容。线路的电感以电抗的形式表示，而电容以电纳的形式表示。

(1) 架空线路的参数

① 电阻。在频率为 50~60Hz 交流系统中，对于导线截面积小于 400mm² 的线路，在进行电力系统的计算时均可采用直流电阻代替有效电阻。因为当导线通过交流电时，由于集肤效应和邻近效应等影响，导线的有效电阻与在直流下的直流电阻比值，随频率的升高而增大，随导线的截面积的增大而上升。各类导线和电缆的单位长度电阻可从产品中查到，但大多数只提供温度 20℃ 时的直流电阻。

在缺乏手册资料时，可用下式计算各种铜、铝导线在 20℃ 时的单位长度电阻

$$r_1 = \frac{\rho}{S} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1-1)$$

式中 S ——导线载流部分的额定（标称）截面积，mm²；

ρ ——20℃ 时的导线电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ； $\rho_{\text{铜}} = 31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ， $\rho_{\text{铝}} = 18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ 。

铜和铝的电阻率是温度的函数，温度每变化 10℃，电阻率约变化 4%。当导线的实际温度与 20℃ 相差很大时，可用下式求 t 时的电阻值

$$r = r_{(20)} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (1-2)$$

式中 r —— t 时的电阻， Ω/km ；

$r_{(20)}$ ——20℃ 时的电阻， Ω/km ；

α ——电阻温度系数， $\alpha_{\text{铝}} = 0.0036^\circ\text{C}^{-1}$ ， $\alpha_{\text{铜}} = 0.00382^\circ\text{C}^{-1}$ 。

② 电抗。输电线路的电抗是由相应的电感产生的。当输电线路通过三相交变电流时，既有自感，又有互感；导体既有内磁链，又有外磁链。当三相线路对称排列，或不对称排列

经整循环换位后，每相导线单位长度的电抗可计算如下。

a. 单导线

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 u_r (\Omega/\text{km}) \quad (1-3)$$

式中 r ——导线的半径，mm 或 cm；

u_r ——导磁材料的相对磁导率，对于铝和铜 $u_r = 1$ ；

D_m ——三相导线几何均距，单位与 r 相同。

三相导线的排列图如图 1-2 所示。当三相相间距离分别为 D_{ab} 、 D_{bc} 、 D_{ca} 时， $D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$ (mm 或 cm)。若相间距离为 D ，三相等边三角形排列时， $D_m = D$ ，三相水平排列时， $D_m = 1.26D$ 。

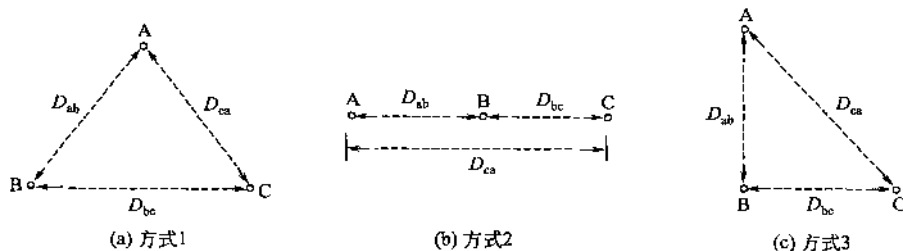


图 1-2 导线排列

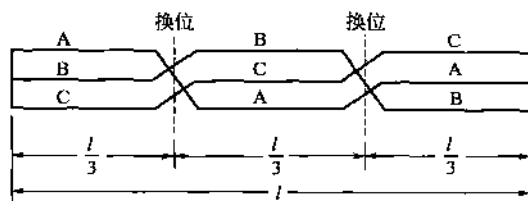
对于铜、铝导线式(1-3)变为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 (\Omega/\text{km}) \quad (1-4)$$

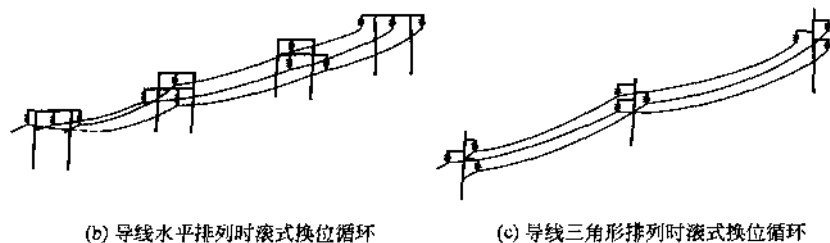
式中 0.0157 ——每相每千米长的内感抗常数；

$0.1445 \lg \frac{D_m}{r}$ ——该相导线的外感抗，它和导线间的互感有关。

若三相导线非对称排列时，由于互感的不同，将造成三相导线电抗的不同。为了消除这种不平衡现象，输电线路的各相导线必须进行换位。换位的方法如图 1-3 所示。为了达到三角电抗值相等，在全线总长中，换位的次数必须为“3”的倍数，称“整循环换位”。



(a) 一次正循环换位



(b) 导线水平排列时滚式换位循环

(c) 导线三角形排列时滚式换位循环

图 1-3 导线换位

从上面输电线路单位长度电抗的计算式可看出：输电线路单位长度电抗的大小，主要决定于三相导线的几何均距亦即导线的线间距离。因此高压线路电抗大，低压线路电抗小；架空线路电抗大，电缆线路电抗小。虽然线间距离、导线截面积对电抗大小有影响，但在式(1-4)中，它们是对数关系，故各种线路的电抗值变化不大。近似计算时，35kV及以上线路可取 $x_1 = 0.4\Omega/\text{km}$ ，6~10kV线路可取 $x_1 = 0.36\Omega/\text{km}$ ，0.38kV线路可取 $x_1 = 0.33\Omega/\text{km}$ 。

b. 分裂导线。分裂导线又称为复导线，就是将每相导线分成若干根，相互之间保持一定距离，各导线布置在正多边形顶点，正多边形的边长，叫分裂间距。分裂导线单位长度电抗计算式为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_e} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1-5)$$

$$r_e = \sqrt[n]{r \prod_{i=2}^n d_{1i}} \quad (1-5a)$$

式中 n ——每相分裂根数；

r_e ——分裂导线的等值半径；

r ——分裂导线中每一根导线的半径，mm或cm；

d_{1i} ——一相分裂导线中第1根与第*i*根的距离， $i=2, 3, \dots, n$ 。

一相中各根导线之间的距离 d_{1i} 比一根导线半径 r 大得多，因此由式(1-5a)算出的分裂导线等值半径 r_e 也比单根导线半径大得多，所以分裂导线的等值电抗较小。显然分裂根数愈多， x_1 下降愈多，但分裂根数超过三四根时，电抗下降大为减缓，线路结构反而大为复杂，所以实际应用中，分裂根数一般不超过四根。如图1-4所示，当分裂间距为 d 时

$$\text{对于二分裂导线} \quad r_e = \sqrt{rd} \quad (1-5b)$$

$$\text{对于三分裂导线} \quad r_e = \sqrt[3]{rd^2} \quad (1-5c)$$

$$\text{对于四分裂导线} \quad r_e = \sqrt[4]{r\sqrt{2}d^3} \quad (1-5d)$$

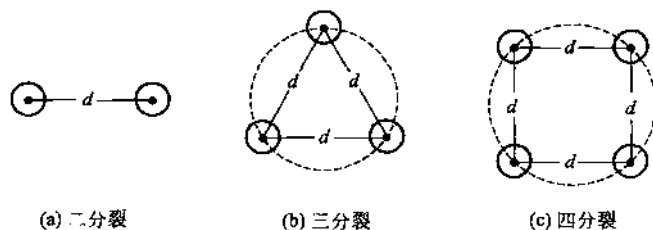


图1-4 一相分裂导线的布置

与单根导线相同，分裂导线的 D_m 、 r_e 与电抗均呈对数关系，其电抗主要与分裂数有关，其他因素影响不大。当分裂根数为2、3、4根时，近似计算其电抗可分别取为 $0.33\Omega/\text{km}$ 、 $0.30\Omega/\text{km}$ 、 $0.28\Omega/\text{km}$ 。

在工程计算中无论单根导线或分裂导线，其电抗值皆可由产品目录或手册中查得。

③ 电导。在三相线路中，凡是由线路电压作用引起的有功功率损耗都可用并联电导表示。电压为110kV以下的架空线路，与电压有关的有功功率损耗主要是由绝缘子表面泄漏电流所引起，一般可以略去不计。110kV及更高电压的架空线路，与电压有关的有功功率损耗主要是由电晕放电所引起。

线路开始出现电晕的电压称为临界电压 U_{cr} 。当线路运行电压超过临界电压时就产生电晕。三相电压对称时，如已知三相线路每公里的电晕有功功率损耗为 ΔP_0 (MW/km)，可



用下式计算每相等值电导

$$g_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \quad (\text{S/km}) \quad (1-6)$$

式中 ΔP_0 ——单位长度的电晕有功功率损耗, MW/km;

U ——线路电压, kV。

超高压线路的电晕放电不仅产生有功功率损耗, 而且还会引起对无线电通信的干扰。在设计超高压架空线路时, 选择的导线半径或分裂导线要满足在晴天基本上不产生电晕, 在非晴天产生电晕虽是难免的, 但应使有功功率损耗和无线电干扰低于一定水平。由于电晕损耗随天气而变化, 致使 g_1 难于准确计算, 而且其数值相对很小, 所以在一般计算时可忽略电导这一参数, 即取 $g_1 = 0$ 。

④ 电纳。在输电线路中, 导线之间和导线对地都存在着电容, 当交流电源加在电路上时, 随着电容的充放电就产生了电流, 这就是输电线路的充电电流或空载电流。电容的存在, 将影响沿线电压分布、功率因数、输电效率, 也是引起工频过电压的主要原因之一。反映电容效应的参数就是电纳。三相对称排列或经整循环换位后输电线路单位长度的电纳可按下式计算。

a. 单导线

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (\text{S/km}) \quad (1-7)$$

b. 分裂导线

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r_e}} \times 10^{-6} \quad (\text{S/km}) \quad (1-8)$$

式(1-7)和式(1-8)中 r 、 D_m 、 r_e 所代表意义同前。从这两个计算式可看出: 由于几何均距亦即线间距离的不同, 单位长度电纳, 高电压线路比低电压线路小, 电缆线路比架空线路大。与电抗一样, 影响电纳大小的与线路结构有关的参数均呈对数关系, 因此各种电压等级线路单位长度电纳变化不大。

(2) 电缆线路的参数

由于电缆线路结构比较复杂, 三相导体距离很近, 导体截面可能不是圆形, 导体外有铝(铅)包和钢铠, 绝缘介质不是空气等, 参数计算较架空线路复杂得多, 通常不进行计算。由于电缆的结构和尺寸是系列化的, 参数可事先测得, 应用时查产品目录或手册即可。

(3) 电力线路的等值电路

电力线路正常运行时, 三相电压和电流都可认为是完全对称的。故障时可能三相不对称, 但也可用对称分量法化为三相对称系统。因此, 电力系统元件和电力系统等值电路都可用一相的单线图表示。电力系统各元件的三相, 有星形和三角形两种接法, 作等值电路时均按星形接法; 如果是三角形接法, 则将其化为等值星形。

电力线路的参数是沿线均匀分布的, 分布参数电路的计算比较复杂。由于电力系统往往只要分析线路两端的状况——两端电压、电流、功率, 因此, 当线路不太长(架空线路 300km 以下, 电缆线路 100km 以下), 不要求计算沿线状况的时候, 可用集中参数电路来表示。

用集中参数表示的电力线路等值电路有 Π 形和 T 形两种, 由于 T 形多一个中间节点, 增加计算工作量, 所以在电力系统分析计算中, 电力系统常用 Π 形等值电路。

如果 $g_1 \approx 0$, 则电力线路 Π 形等值电路如图 1-5 所示。

图中 R 、 X 、 B 分别表示全线每相的总电阻、电抗、电纳, 当线路长度为 l 时:

$$R = r_1 l \quad (\Omega) \quad (1-9)$$

$$X = x_1 l \quad (\Omega) \quad (1-10)$$

$$B = b_1 l \quad (\text{S}) \quad (1-11)$$

在进行潮流分布的计算时, 通常将等值电路中电纳 $(j \frac{B}{2})$ 支路用对应的“电容功率”或“充电功率” $(-j \frac{\Delta Q_B}{2})$ 表示, $\Delta Q_B \approx BU^2$ 或用式 (1-12) 计算。

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_{B1} &= -\frac{1}{2} B U_1^2 \\ \Delta Q_{B2} &= -\frac{1}{2} B U_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

对于电压在 35kV 及以下的架空线路和电压在 10kV 以下的电缆线路, 由于电压比较低, 线路比较短, 电容影响很小, 电纳亦可忽略不计, 可采用更简化的, 只有集中电阻、电抗相串联的等值电路, 如图 1-6 所示。

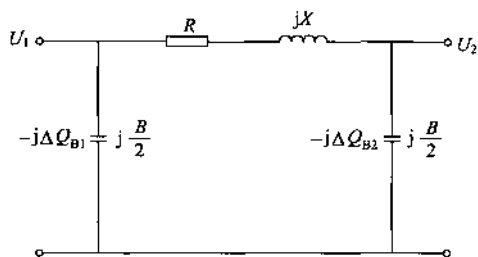


图 1-5 电力线路等值电路

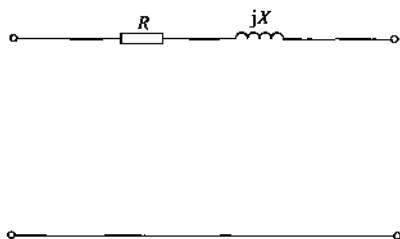


图 1-6 电力线路等值简化电路

当架空线路长度超过 300km, 电缆线路长度超过 100km 时, 可用多个串接的 Π 形等值电路来表示, 每个 Π 形等值电路所代表的线路长度, 可根据实际需要确定。

【例 1-1】 一条 220kV 输电线, 长 180km, 导线为 LGJ-400 (直径 2.8cm), 水平排列, 导线完全换位, 线间距离为 7m, 求该线路的参数 R 、 X 、 B , 并画出等值电路图。

解: 线路的电阻

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{400} \approx 0.08 \Omega/\text{km}$$

$$R = r_1 l = 0.08 \times 180 = 14.4 \Omega$$

线路的电抗

$$D_m = \sqrt[3]{700 \times 700 \times 2 \times 700} = 1.26 \times 700 = 882 \text{ cm}$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157$$

$$= 0.1445 \lg \frac{882}{1.4} + 0.0157 = 0.42 \Omega/\text{km}$$

$$X = x_1 l = 0.42 \times 180 = 75.6 \Omega$$

线路的电纳

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} = \frac{7.58}{\lg \frac{882}{1.4}} \times 10^{-6} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

$$B = b_1 l = 2.7 \times 10^{-6} \times 180 = 486 \times 10^{-6} \text{ S}$$

根据上面计算结果画出线路等值电路图, 见图 1-7。

1.3.2 变压器的参数及等值电路

变压器是电力系统的重要元件。电力系统中使用的变压器大多数是做成三相的, 容量特大的也有做成单相的, 在使用时都是接成三相变压器组。电力变压器有双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器三种。下面根据短路电流计算的需要, 确定变压器的参数和等值电路。

(1) 双绕组变压器

双绕组变压器的等值电路有 Γ 形和 T 形两种。由于 T 形等值电路在实际计算中很不方便, 因此在电力系统分析计算中选用 Γ 形等值电路。 Γ 形等值电路是将 T 形等值电路中并联励磁支路移到端点。双绕组变压器的等值电路如图 1-8 所示。

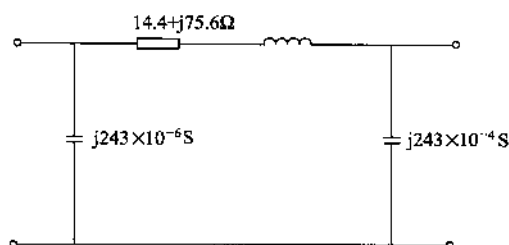


图 1-7 线路等值电路

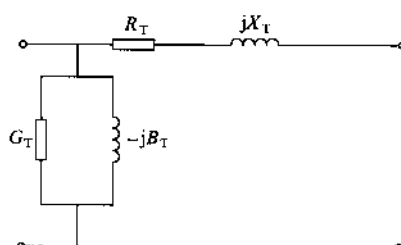


图 1-8 双绕组变压器的 Γ 形等值电路

为了简化计算, 励磁支路可以用额定电压下的励磁损耗来代替, 如图 1-9(a) 所示。这实质上是忽略了变压器端电压波动对其励磁损耗的影响。对于容量较小的配电变压器, 励磁损耗很小, 可以忽略其并联导纳, 等值电路简化成图 1-9(b)。

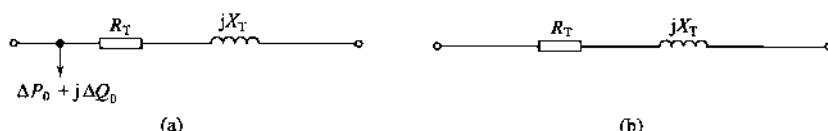


图 1-9 双绕组变压器的简化等值电路

双绕组变压器有四个参数: 电阻 R_T 、电抗 X_T 、电导 G_T 、电纳 B_T 。这四个参数可以用变压器的铭牌上四个表示电气性能的试验数据计算得到。这四个数据是: 短路损耗 ΔP_k 、短路电压百分数 $U_k\%$ 、空载损耗 ΔP_0 、空载电流百分数 $I_0\%$ 。

① 电阻 R_T 。变压器做短路试验时, 为了便于测量, 短路试验通常将高压侧绕组接到电源, 低压侧绕组直接短接, 试验时, 调节外加电压, 使电流达到额定值, 即可读取。由于此时外加电压较小, 相应的铁损也小, 可以认为短路损耗即等于变压器通过额定电流时原、副方绕组电阻的总损耗 (也称铜耗), 即

$$\Delta P_k \approx \Delta P_{Cu}$$

而铜耗与电阻之间有如下关系

$$\Delta P_k \approx \Delta P_{Cu} = 3I_N^2 R_T = 3 \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T = \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T$$

可得