



ELECTRIC POWER
POWER

(附：思考题、习题及参考答案)

电力系统分析

学习指导

■ 主编 刘宗岐 郭家骥



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力系统分析 学习指导

(附：思考题、习题及参考答案)

主编 刘宗岐 郭家骥



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为全国高等教育电气类专业本、专科开设的“电力系统分析”课程学习指导教材。

本书由两部分组成，第一部分讨论电力系统的稳态运行及其分析和计算，第二部分讨论故障发生后电力系统的暂态分析和计算。本书除对每一章的核心、重点及前后联系进行综述外，还对每一章的基本概念、难点及学习方法进行详细总结，并附有典型例题分析和相当数量的思考题、习题及习题答案。

本书可供普通高等教育电气类专业本、专科学生使用，也是电气类专业本、专科函授生学习的指导教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员和电力类相关专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析学习指导/刘宗歧，郭家骥主编. —北京：
中国电力出版社，2005

附思考题、习题及参考答案

ISBN 7-5083-3406-X

I. 电... II. ①刘...②郭... III. 电力系统—分析—
高等学校—教学参考资料 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 055860 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 308 千字

印数 0001—5000 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

本书是为高等学校电气类专业本、专科教学计划所规定开设的“电力系统分析”或“电力系统稳态分析”和“电力系统暂态分析”课程编写的学习指导教材。本课程是教育部规定高等学校电气工程及其自动化本科专业和发电厂及电力系统、电力系统及其自动化、供用电工程、用电监察与管理等专科专业的一门主干专业课。作为专业课，该课程主要讲授电力系统正常运行的基本概念、基本理论和基本计算，电力系统发生故障时的分析计算，电力系统运行中产生稳定性问题的原理及改善稳定性的方法等三部分内容。其任务是使学生掌握电力系统稳态分析、电力系统暂态分析的概念，以便使学生能够通过对相关内容进行分析计算，对电力系统运行中的各种状况给出正确解释。该课程为“发电厂电气部分”、“电力系统远动及调度自动化”、“高电压技术”及其相关课程奠定理论基础。

该课程的特点是：涵盖内容广，概念多，计算复杂，难度大，逻辑性强，与实际密切相关。为了帮助学生能够深入理解基本概念和难点，掌握重点，学习好本课程，我们编写了本教材。本教材主要依据全国电力系统及其自动化专业教学指导委员会制定的电力系统分析教学大纲规定的应知、应会的基本要求编写。

本教材共分为十章，每章内容包括：①本章的核心、重点及前后联系；②本章的基本概念、难点及学习方法指导；③典型例题分析；④思考题、习题及习题答案。教材编写时尽量采用通俗易懂的语言说明概念和难点的理解方法，提示重点内容，以期能够起到辅导作用。此外，本教材还编入了相当数量的例题和自测题，同时还列写了大量的思考题和习题，并附有习题参考答案。

本教材第一章至第六章由刘宗歧编写，第七章至第十章由郭家骥编写。

本教材在编写过程中，难免会有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2005年1月

目 录

前言

第一部分 电力系统稳态分析	1
第一章 电力系统的基本概念	1
第二章 电力系统各元件的特性参数和等值电路	5
第三章 简单电力系统潮流计算	22
第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法	44
第五章 电力系统有功功率平衡与频率调整	71
第六章 电力系统无功功率平衡与电压调整	88
第二部分 电力系统暂态分析	106
第七章 电力系统对称故障分析计算	106
第八章 电力系统不对称故障的分析计算	144
第九章 电力系统静态稳定性	165
第十章 电力系统暂态稳定性	189
参考文献	212

电力系统的基本概念

本章主要阐述了有关电力系统的一些基本知识。

一、本章的核心、重点及前后联系

(一) 本章的核心

本章的核心是电力系统的基本知识。其中包括电力系统的概念、电力系统的接地方式和电压等级。

(二) 本章重点

- (1) 动力系统、电力系统和电力网的定义及相互区别。
- (2) 一次能源和二次能源的定义及发电厂的分类。
- (3) 我国电力工业概况及今后我国电力工业发展的方针。
- (4) 电力系统的特点及运行应满足的基本要求,联合电力系统的优越性。
- (5) 电力系统的接线方式及优、缺点,电力系统额定电压的确定,目前我国电力系统的额定电压等级及选择确定原则,电压等级、输送容量与输送距离间的关系。
- (6) 电力系统中性点的运行方式及优、缺点,消弧线圈的工作原理,全补偿过补偿及欠补偿。

(三) 本章前后联系

本章所涉及的都是有关电力系统的基本概念,都是本专业日常工作必需的基本知识,要求全部熟练掌握,并能灵活应用。

二、本章的基本概念、难点及学习方法指导

本章主要讲述一些电力系统的基本概念和基本知识,是对电力系统运行进行分析计算的基础,应牢固掌握。

(一) 本章的基本概念

本章讲述的基本概念主要有:

- (1) 电力系统、动力系统和电力网的定义及三者之间的区别。
- (2) 一次能源和二次能源的定义及发电厂根据一次能源不同的分类。
- (3) 今后我国电力工业发展的方针。
- (4) 电力系统的特点及电力系统运行应满足的基本要求。
- (5) 如何根据用户对供电可靠性的要求不同将电力系统的负荷分为三级。
- (6) 衡量电能质量的主要指标(电压偏移、频率偏差和波形畸变率)及目前我国规定的允许变化范围。
- (7) 衡量电力系统运行经济性的主要指标(煤耗率和网损率)及提高措施。

- (8) 联合电力系统的优越性。
- (9) 电力系统接线图, 电气接线图和地理接线图的定义、相互间的区别及适用范围。
- (10) 电力系统接线方式的分类及各类接线方式的优、缺点。
- (11) 电力系统的额定电压及用电设备、电力线路、同步发电机、变压器一次和二次绕组的额定电压的确定。
- (12) 目前我国电力系统的额定电压等级及选择确定原则。
- (13) 电压等级、输送容量和输送距离之间的关系。
- (14) 电力系统的中性点, 电力系统中性点接地方式的分类及各种接地方式的优、缺点。

(15) 消弧线圈的工作原理, 全补偿过补偿及欠补偿。

(二) 本章难点及学习方法指导

本章的难点主要有两个, 即电力系统的电压等级和电力系统中性点的运行方式。

1. 电力系统的电压等级

(1) 电力系统的额定电压等级主要取决于输送电能的经济性和设备制造的系列性两个因素。①从输送电能的经济性来看, 因为输电线路的三相功率为 $S = \sqrt{3}UI$, 当 S 一定时, 线电压 U 与线电流 I 成反比, 如果 U 提高, I 就减小, 则导线的截面就可以减小, 导线的投资及金属消耗就减少; 但当 U 提高后, 对绝缘的要求提高, 而杆塔、变压器、断路器等绝缘投资将增大。②从设备制造的系列性来看, 为了保证生产的系列性, 又不可能任意确定更多的电压等级。综合考虑以上两个因素后, 对应一定的输送功率和输电距离, 存在一个最合理的线路电压, 电力系统中的发电、输电、配电和用电设备都按照该电压设计和制造, 在该电压下运行可使设备的经济性能和技术性能达到最佳, 该电压称为额定电压。

(2) 目前我国电力系统的额定电压 (以 kV 为单位的线电压) 主要有 3、6、10、35、60、110、154、220、330、500…。

(3) 用电设备、电力线路、同步发电机、变压器一次和二次绕组的额定电压一般可按照以下原则确定:

1) 用电设备的额定电压等于它所在系统的额定电压, 用电设备一般允许电压偏移为其额定电压的 $\pm 5\%$ 。

2) 电力线路的额定电压等于它所在系统的额定电压 (与接在该系统的用电设备的额定电压相等), 为使接在该电力线路上任一点的用电设备均满足其对电压质量的要求, 电力线路从首端到末端的电压损耗一般不允许超过其额定电压的 10% , 且应使输电线路的首端电压比额定电压高 5% 。

3) 同步发电机作为电源, 总是接在输电线路的首端, 所以发电机的额定电压应比所接输电线路的额定电压高 5% 。

4) 变压器的一次绕组从电网中接受电能, 相当于用电设备, 所以变压器一次绕组的额定电压应等于其所接输电线路的额定电压; 而变压器的二次绕组接在下一级输电线路的首端, 相当于发电机, 所以变压器二次绕组的额定电压应比所接输电线路的额定电压高 5% 。但考虑到变压器二次绕组的额定电压规定为空载时的电压, 而在额定负荷下, 变压

器内部压降约为 5%。为使正常负载运行时变压器二次绕组的额定电压比输电线路的额定电压高 5%，变压器二次绕组的额定电压一般应比输电线路的额定电压高 10%。只有漏抗很小、二次侧直接与用电设备相连的和电压特别高（如 500kV 以上）的变压器，其二次绕组的额定电压才允许比输电线路的额定电压高 5%。

2. 电力系统中性点的运行方式

(1) 电力系统中性点是指星形接线的变压器或发电机的中性点。电力系统中性点的运行方式可分为两类：①电力系统中性点直接接地；②电力系统中性点不接地，其中包括电力系统中性点不接地及电力系统中性点经消弧线圈接地两种。

(2) 两种接地方式的优、缺点。对于中性点直接接地的电力系统，其优点是安全性和经济性好，缺点是供电可靠性差。而对于中性点不接地的电力系统，其优点是供电可靠性高，缺点是经济性差，且在发生单相接地故障时，易产生过电压。在我国，额定电压在 110kV 及以上的电力系统采取中性点直接接地，额定电压在 60kV 及以下的电力系统一般采用中性点不接地，只有在发生单相接地故障时，接地电流超过允许值的 60kV 及以下的电力系统才采取中性点经消弧线圈接地。

(3) 在中性点不接地的电力系统中发生单相接地故障时，由于电力线路分布电容的存在，使短路点流过一个纯容性的接地电流，该接地电流可按式计算

$$I_d = 3UC_0 = 3I_{C0} \quad (1-1)$$

当该接地电流 I_d 达到一定数值后，可能因在短路点产生间歇性电弧而使电力系统产生过电压，烧毁电气设备。为减少该纯容性的接地电流，使短路点的电弧易于熄灭，故采用中性点经消弧线圈接地方式。

(4) 消弧线圈的工作原理是，当中性点经消弧线圈接地的电力系统发生单相接地故障时，短路点流过的电流由两部分组成，一个是流过线路分布电容的纯容性接地电流，另一个是流过中性点消弧线圈的可视为纯感性的接地电流，两者相互抵消，从而使流过短路点的接地电流减小。

(5) 流过消弧线圈的纯感性电流 I_L 与流过线路分布电容的纯容性电流 I_d 的相对大小表明了消弧线圈对线路分布电容的补偿程度。若 $I_L < I_d$ ，称为欠补偿；若 $I_L = I_d$ ，称为全补偿；若 $I_L > I_d$ ，称为过补偿。全补偿时，易产生谐振过电压，故电力系统不允许使用全补偿方式；欠补偿时，在部分线路切除或系统频率下降时，可能因线路分布电容的减小而出现谐振过电压现象，故电力系统一般不使用欠补偿方式；过补偿时，不会因部分线路切除或系统频率下降而导致出现谐振过电压现象，故电力系统一般采用过补偿方式。

三、典型例题分析

典型例题分析略。

四、思考题、习题及习题解答

(一) 思考题、习题

1-1 电力网、电力系统和动力系统的定义是什么？

1-2 对电力系统运行的基本要求是什么？

1-3 电力系统的电气接线图和地理接线图有何区别？

1-4 何为电力系统的中性点？其运行方式如何？它们有什么特点？我国电力系统中性点运行情况如何？

1-5 中性点不接地的电力系统发生单相接地故障时，各相对地电压有什么变化？单相接地电流的性质如何？怎样计算？

1-6 消弧线圈的工作原理是什么？补偿方式有哪些？电力系统一般采用哪种补偿方式？为什么？

1-7 电力系统的额定电压是如何确定的？系统各元件的额定电压如何确定？

1-8 目前我国电力系统的额定电压等级有哪些？额定电压等级选择确定原则有哪些？

1-9 电力系统的接线方式有哪些？各自的优、缺点有哪些？

1-10 联合电力系统的优越性有哪些？

1-11 某一 60kV 电力线路长为 100km，每相导线对地电容为 $0.005\mu\text{F}/\text{km}$ ，当电力线路末端发生单相接地故障时，试求接地电容电流值（60kV 系统中性点经消弧线圈接地）。

(二) 习题解答

1-11 $I_d = 16.324\text{A}$

电力系统各元件的特性参数和等值电路

本章主要针对建立稳态分析时运用的电力系统数学模型展开了两方面的讨论——电力系统中各元件的参数和等值电路，以及由这些元件构成的电力系统的等值电路。

一、本章的核心、重点及前后联系

(一) 本章的核心

本章的核心是建立电力系统各元件的数学模型。其中包括发电机的数学模型、电力线路的数学模型、电力变压器的数学模型、负荷的数学模型及电力网络的等值电路。

(二) 本章重点

(1) 发电机的参数、等值电路、运行极限。

(2) 电力线路的结构、参数（电阻、电抗、电导、电纳）计算及判断电力线路发生电晕的临界电压的计算，三相导线的几何平均距离、导线的几何平均半径、分裂导线的等值半径、电晕现象及电晕临界电压的定义。

(3) 短电力线路、中等长度电力线路和长电力线路的区分及等值电路的区别，中等长度电力线路和长电力线路的 T 型和 Π 型等值电路表示方法的不同，电力线路的特性阻抗、传播常数的物理意义。

(4) 双绕组、三绕组、自耦变压器的参数（电阻、电抗、电导、电纳）计算；三绕组、自耦变压器的三个绕组容量比不为 100/100/100 时，各绕组的短路损耗、短路电压百分比的折合计算；三绕组变压器中只知道最大短路损耗时，各绕组电阻的计算。

(5) 双绕组、三绕组、自耦变压器的 T 型等值电路和等值变压器模型。

(6) 负荷、负荷曲线及负荷的静态电压、频率特性。

(7) 电压级的归算及以有名制、标幺制表示的等值电路。

(三) 本章前后联系

(1) 本章主要是电力系统各元件的数学模型的建立，是进行电力系统分析计算的基础。

(2) 本章有许多数学计算公式及推导过程，对于数学计算公式要求熟练掌握，而对于计算公式的推导过程，则仅要求学习时理解。

(3) 本章所涉及元件的等值电路有 T 型等值电路、T 型等值电路、 Π 型等值电路等，要求在建立电力系统的等值网络时，能根据需要熟练应用。

二、本章的基本概念、难点及学习方法指导

首先应该明确，本章研究的电力系统各元件的参数和等值电路，是对电力系统稳态运行和暂态过程进行分析计算的基础，应该牢固掌握。

(一) 本章的基本概念

本章讲述的基本概念主要有：

- (1) 国际电工委员会推荐的复功率约定及在该约定下无功功率的正负含义。
- (2) 发电机的运行极限。
- (3) 架空输电线路的组成及各部分的作用，杆塔及绝缘子的分类，导线材料及型式。
- (4) 电缆输电线路的组成及各部分的作用。
- (5) 三相导线的完全换位、几何平均距离 D_m ，分裂导线的等值半径 r_{eq} 。
- (6) 导线的电晕现象、电晕损耗、电晕临界电压 U_{cr} 。
- (7) 电力线路的传播系数 γ 、特性阻抗 Z_c 。
- (8) 电力系统的负荷、负荷分类、综合用电负荷、供电负荷、发电负荷及负荷特性，负荷曲线的定义、分类、峰谷差及系统最大综合用电负荷。
- (9) 标么制、基准值选取，三相输电线路参数标么值的特点及等值电路标么值的归算方法。

(二) 本章难点及学习方法指导

本章的难点主要有四个，即发电机的运行极限、电力线路的参数及等值电路、变压器的参数及等值电路和电力网络等值电路的制定。

1. 发电机的运行极限

发电机组的运行总受一定条件，如定子绕组温升、励磁绕组温升、原动机功率等的约束。这些约束条件决定了发电机组发出的有功、无功功率有一定的限额。图 2-1 (a)、(b) 所示为隐极式发电机组的相量图和运行极限图，它反映了发电机可能发出的有功和无功功率的调节范围及电压、电势相量图，依据该相量图可确定隐极式发电机组的运行极限如下：

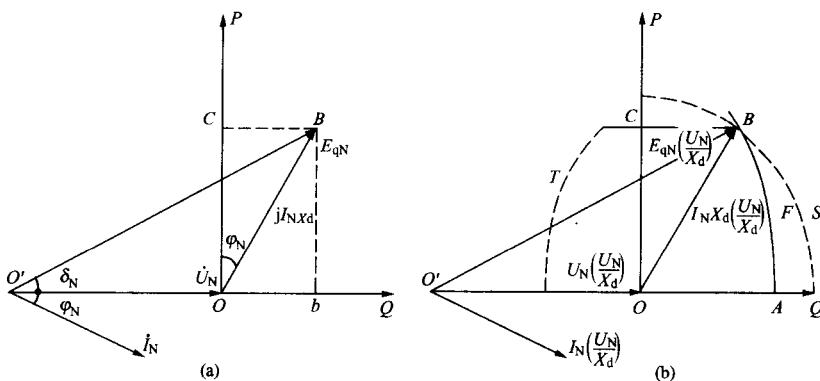


图 2-1 隐极式发电机组的运行极限

(a) 相量图；(b) 运行极限图

(1) 定子绕组温升约束。定子绕组温升取决于发电机定子电流，也就是取决于发电机的视在功率。当发电机运行在额定条件时，该约束即体现在运行点不越出以 O 点为圆心，

以 OB (其长度代表发电机额定运行条件下的额定视在功率) 为半径所作的圆弧 S 。

(2) 励磁绕组温升约束。励磁绕组温升取决于发电机励磁电流, 也就是决于发电机的空载电势。当发电机运行在额定条件时, 该约束即体现在运行点不越出以 O' 点为圆心, 以 OB' (其长度代表发电机额定运行条件下的空载电势) 为半径所作的圆弧 F 。

(3) 原动机功率约束。原动机的额定功率与其配套的发电机额定有功功率相等。该约束即体现在运行点应在以经 B 点 (线段 OC 的长度代表发电机的额定有功功率) 所作与横轴平行的直线 BC 以下。

(4) 其他约束。当发电机以超前功率因数运行时, 发电机受定子端部温升和并列运行稳定性等条件的约束。其中发电机受定子端部温升的约束往往更为苛刻, 一般通过试验得到并在发电机运行规范中给出, 该约束即体现在运行点应在图中虚线 T (代表发电机定子端部温升的临界值) 以右。

归纳以上分析可见, 隐极式发电机组的运行极限体现为图 2-1 中由线段 OA 、 BC 和曲线段 AB 及虚线 T 所包围的面积。若发电机发出的有功、无功功率所对应的运行点位于该面积内, 则发电机组可保证安全运行。对于凸极式发电机组也可得到类似结论。

2. 电力线路的参数及等值电路

电力线路主要有四个参数, 均以单位长度的参数表示。以下分别对四个参数进行分析计算。

(1) 单位长度电力线路的电阻 r_1 的大小可由手册查出或按下式计算

$$r_1 = \rho / S \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-1)$$

可见 r_1 与电力线路材料的电阻率 ρ 和额定截面积 S 有关。当实际运行温度不等于 20°C 时, 应将按式 (2-1) 计算的电阻值按下式归算

$$r_1 = r_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (2-2)$$

式中 α ——材料的温度系数;

t ——实际运行温度。

(2) 单位长度电力线路的电抗 x_1 与导线的半径 r 、导线材料的相对导磁率 μ_r 、三相导线的几何平均距离 D_m 及电源的频率 f 有关。对非磁性物质的铝和铜 $\mu_r = 1$, 其单位长度电力线路的电抗 x_1 可按下列两式之一计算

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega/\text{km}) \\ x_1 &= 0.1445 \lg \frac{D_m}{r'} \quad (\Omega/\text{km}) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

其中: $r' = 0.779r$, 称为导线的几何平均半径。

而对于磁性物质铁 $\mu_r \neq 1$, 其单位长度电力线路的电抗 x_1 可按下式计算

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \mu_r \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-4)$$

注意: 使用这些公式计算单位长度电力线路的电抗时, 实际上已经假设三相电力线路已经完整换位, 从而三相导线的电抗完全相等。还应注意, 因为单位长度电抗 x_1 与导线

的半径 r 和几何平均距离 D_m 为对数关系, 因而 r 、 D_m 对 x_1 的影响不大, 所以工程计算中可近似取 $x_1 = 0.4\Omega/\text{km}$ 。

在高压或超高压输电线路中, 为了防止发生电晕, 经常采用分裂导线。分裂导线改变了导线周围的磁场分布, 等效地增大了导线的半径, 从而减少了线路电抗, 其单位长度电力线路的电抗 x_1 可按下式计算

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_{\text{eq}}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-5)$$

其中 r_{eq} 为分裂导线的等效半径。可见分裂导线分裂根数 n 愈多, x_1 下降的愈多, 但 n 超过 3 后 x_1 下降就不明显了。

注意: 同杆架设的双回输电线路, 因其每回导线中流过的三相电流对称, 所以两回路之间的互感对每回线路的电抗影响不大, 故每回线的电抗仍可按下式计算。

(3) 单位长度电力线路的电纳 b_1 与导线的半径 r 、三相导线的几何平均距离 D_m 有关, 可按下式计算

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (\text{S}/\text{km}) \quad (2-6)$$

注意: 使用该式计算单位长度电力线路的电纳时, 实际上也已经假设三相电力线路已经完整换位。当采用分裂导线时, 单位长度电力线路的电纳 b_1 按下式计算

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r_{\text{eq}}}} \times 10^{-6} \quad (\text{S}/\text{km}) \quad (2-7)$$

(4) 电力线路的电导主要取决于绝缘子的泄漏和导线的电晕, 若忽略正常运行时绝缘子的泄漏损失, 电力线路的电导主要由导线电晕的有功功率损失决定。只有当导线的实际运行电压超过某一临界电压 U_{cr} (称电晕临界电压) 时, 才会发生电晕, 此时单位长度电力线路的电导 g_1 按下式计算

$$g_1 = \frac{\Delta P_g}{U^2} \times 10^{-3} \quad (\text{S}/\text{km}) \quad (2-8)$$

若导线的实际运行电压没有超过电晕临界电压 U_{cr} , 则 $g_1 = 0$ 。

输电线路的电晕临界相电压 U_{cr} 与导线表面状况的粗糙系数 m_1 、气象系数 m_2 、导线的半径 r 、三相导线的几何平均距离 D_m 及空气的相对密度 δ 有关。输电线路的电晕临界相电压 U_{cr} 可按下式计算

$$U_{\text{cr}} = 49.3 m_1 m_2 r \delta \lg \frac{D_m}{r} \quad (\text{kV}) \quad (2-9)$$

若采用分裂导线, 与导线分裂数 n 和分裂间距 d 有关的分裂导线表面最大场强 K_m 对 U_{cr} 也有影响, 此时 U_{cr} 可按下式计算

$$U_{\text{cr}} = 49.3 m r \delta \frac{n}{K_m} \lg \frac{D_m}{r_{\text{eq}}} \quad (\text{kV}) \quad (2-10)$$

其中, 分裂导线表面最大场强 K_m 可由下式计算

$$K_m = 1 + 2(n - 1) \frac{r}{d} \sin \frac{\pi}{n} \quad (2 - 11)$$

当输电线路三相导线三角排列时，其电晕临界相电压 U_{cr} 可按上述两式计算；而当输电线路三相导线水平排列时，其边相导线的电晕临界相电压比 U_{cr} 高 6%，而中间相的电晕临界相电压较 U_{cr} 低 4%。

在电力线路设计时，晴天一般不会发生电晕。对 110kV 及以上电力线路，不发生电晕是确定导线半径的条件之一。在规程中规定了不必校验电晕电压的导线的最小直径如表 2-1 所示。

表 2-1 不必校验电晕电压的导线最小直径

线路额定电压 (kV)	60 以下	110	154	220	330
导线外径 (mm)	—	9.6	13.68	21.28	33.2

(5) 电力线路全长的参数为单位长度的参数乘以电力线路的长度。

(6) 电力线路的等值电路因电力线路的长短而异：①长度不超过 100km 的电力线路称短电力线路，其等值电路中可忽略线路的导纳，用图 2-2 (a) 所示的一字形电路来表示；②长度在 100~300km 的电力线路称中等长度电力线路，其等值电路中可忽略线路的电导，用图 2-2 (b) 所示的 Π 形或图 2-2 (c) 所示的 T 形电路来表示；③长度超过 300km 的电力线路称长电力线路，其等值电路一般不能再集中参数来考虑，而是要考虑分布参数的特性，并可进一步简化为图 2-2 (d) 所示的 Π 形等值电路。

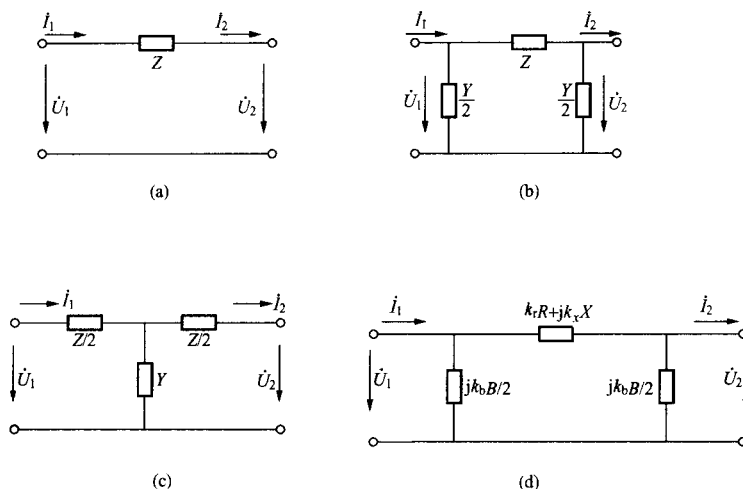


图 2-2 电力线路等值电路

(a) 一字形电路；(b) Π 形电路；(c) T 形电路；(d) 简化的 Π 形电路

3. 变压器的参数及等值电路

在学习变压器的参数和等值电路前，首先要重温电机学中有关电力变压器的基本结构和主要试验参数，主要包括短路损耗、短路电压百分数、空载损耗、空载电流（空载电流

百分数), 然后根据这些试验参数分别对变压器的四个参数进行分析计算。

(1) 变压器绕组的电阻 R_T 主要决定于变压器绕组的短路损耗 P_k 。变压器绕组的短路损耗 P_k 应为短路时绕组电阻的损耗和变压器电导的损耗之和。由于短路时变压器所加的电压很低, 所以电导的损耗远小于电阻的损耗, 计算中可近似认为变压器的短路损耗等于变压器绕组电阻的损耗。

双绕组变压器中高低压绕组的总电阻可由下式计算

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{10^3 S_N^2} \quad (\Omega) \quad (2-12)$$

这里要特别注意公式中各量的单位。

由于三绕组变压器的短路试验是两两绕组进行的, 所以其短路损耗有三个值, 每个短路损耗值都是该试验两个绕组总电阻的损耗, 当三个绕组的容量比为 100/100/100 时, 由三个短路损耗值可按式求得每个绕组的短路损耗值

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(1-3)} - P_{k(2-3)}] \\ P_{k2} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-3)}] \\ P_{k3} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-3)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-2)}] \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

从而按下式求得每个绕组的电阻

$$R_{Ti} = \frac{P_{ki} U_N^2}{10^3 S_N^2} \quad (\Omega) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-14)$$

当三个绕组的容量比不为 100/100/100 时, 则额定容量较小的绕组与另外任何一个绕组作短路试验时, 其相应的短路损耗值 (如第三绕组) 容量较小, $P'_{k(1-3)}$ 、 $P'_{k(2-3)}$ 均为额定容量较小的绕组 (第三绕组) 电流达到额定时的值, 所以应按下式将相应的短路损耗值归算到对应于变压器额定容量时的值

$$\left. \begin{aligned} P_{k(2-3)} &= P'_{k(2-3)} \left(\frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 \\ P_{k(1-3)} &= P'_{k(1-3)} \left(\frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

然后再由这三个归算后的短路损耗值按上述公式求得每个绕组的短路损耗值和电阻。

有时变压器在出厂时只给出最大短路损耗 $P_{k, \max}$, 这是指两个额定容量为 100% 的绕组作短路试验时的短路损耗值。假设变压器的设计是按同一电流密度选择各绕组的导线截面, 则按下式求各绕组的电阻

$$\left. \begin{aligned} R_{T(100)} &= \frac{P_{k, \max} U_N^2}{2 \times 10^3 S_N^2} \quad (\Omega) \\ R_{T(50)} &= 2R_{T(100)} \quad (\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

在计算三绕组变压器各绕组的电阻时, 要特别注意公式中各量的单位。

(2) 变压器绕组的电抗 X_T 主要决定于变压器绕组的短路电压百分数。变压器的短路

电压 U_k 应为短路时绕组电阻和电抗的电压的相量和, 由于变压器电抗比电阻大得多, 电阻电压可忽略不计, 所以计算中近似认为变压器的短路电压就等于变压器绕组电抗上的电压。短路电压百分数等于短路电压与额定电压的比值再乘以百分之百。

双绕组变压器高低压绕组的总电抗可由下式计算

$$X_T = \frac{U_k(\%) U_N^2}{100 S_N} \quad (\Omega) \quad (2-17)$$

与短路损耗一样, 三绕组变压器的短路电压百分数也有三个值, 每个短路电压百分数也都等于每两个绕组总电抗的短路电压百分数, 当三个绕组的容量比为 100/100/100 时, 由三个短路电压百分数按下式求得每个绕组的短路电压百分数

$$\left. \begin{aligned} U_{k1}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}(\%) + U_{k(1-3)}(\%) - U_{k(2-3)}(\%)] \\ U_{k2}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}(\%) + U_{k(2-3)}(\%) - U_{k(1-3)}(\%)] \\ U_{k3}(\%) &= \frac{1}{2} [U_{k(1-3)}(\%) + U_{k(2-3)}(\%) - U_{k(1-2)}(\%)] \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

然后按下式求得每个绕组的电抗

$$X_{Ti} = \frac{U_{ki}(\%) U_N^2}{100 S_N} \quad (\Omega) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-19)$$

当普通三绕组变压器的三个绕组的容量比不为 100/100/100 时, 因制造商提供的短路电压百分数均已归算至变压器额定容量, 所以在计算变压器的电抗时, 三绕组变压器的短路电压百分数就不需要再归算了。

对于三绕组自耦变压器, 因其第三绕组的额定容量总小于变压器的额定容量, 且在制造商提供的数据中, 不仅短路损耗未归算, 而且短路电压百分数也未归算至变压器额定容量, 此时应按式将第三绕组有关的短路电压百分数归算至变压器额定容量

$$\left. \begin{aligned} U_{k(2-3)}(\%) &= U'_{k(2-3)}(\%) \frac{S_N}{S_{N3}} \\ U_{k(1-3)}(\%) &= U'_{k(1-3)}(\%) \frac{S_N}{S_{N3}} \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$

然后按上述公式求得每个绕组的电抗。

在计算三绕组变压器各绕组的电抗时, 同样要注意公式中各量的单位。

(3) 变压器的电导 G_T 主要决定于变压器的空载损耗 P_0 。严格来讲, 变压器的电导 G_T 对应的是变压器中的铁损, 而铁损与变压器的空载损耗 P_0 近似相等, 所以在计算变压器的电导时, 就近似认为电导的有功损耗等于空载损耗。

变压器的电导 G_T 可按下式计算

$$G_T = P_0 / U_N^2 \times 10^{-3} \quad (S) \quad (2-21)$$

(4) 变压器的电纳 B_T 主要决定于变压器的空载电流 I_0 或空载电流百分数 $I_0\%$ 。变压

器的空载电流 I_0 应为流过变压器电导和电纳上的电流相量和, 但由于变压器的电导 G_T 比变压器的电纳 B_T 小得多, 从而流过变压器电导的电流远小于流过电纳的电流, 所以计算中近似认为变压器的空载电流等于流过变压器电纳的电流。空载电流百分数等于空载电流与变压器额定电流的比值再乘以百分之百。

变压器的电纳 B_T 可按下式计算

$$\left. \begin{aligned} B_T &= \frac{\sqrt{3} I_0}{10^3 U_N} \quad (\text{S}) \\ B_T &= \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} \quad (\text{S}) \end{aligned} \right\} \quad (2-22)$$

(5) 变压器的等值电路有 Γ 形或 T 形等值电路之分, 在电力系统计算中, 变压器的等值电路通常作成 Γ 形, 双绕组和三绕组变压器的 Γ 形等值电路如图 2-3 (a)、(b) 所示。

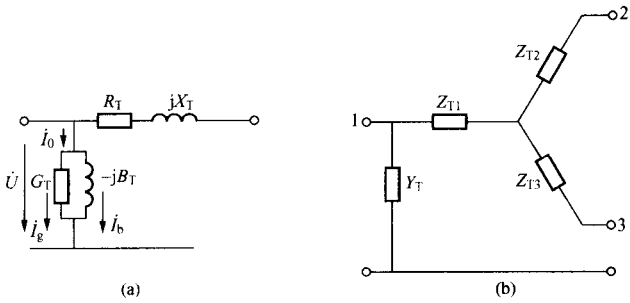


图 2-3 变压器 Γ 形等值电路
(a) 双绕组; (b) 三绕组

在变压器 Γ 形等值电路中, 通常将励磁支路放在电源侧。变压器电纳的符号恰好与电力线路的电纳符号相反, 前者为感性而后者为容性。

(6) 等值变压器模型。在上述变压器等值电路中, 总是将变压器参数归算至某一电压侧, 从而使变压器的等值电路总有一端或两端的端部参数与实际参数不同。在电力系统分析计算中, 大都采用这种等值电路。但是在某些场合 (如电力系统潮流计算) 对电力系统分析计算时, 为了保证变压器所有的端部参数都与实际参数相同, 便于电力系统的分析和计算, 通常采用另外一种等值变压器模型, 如图 2-4 所示。

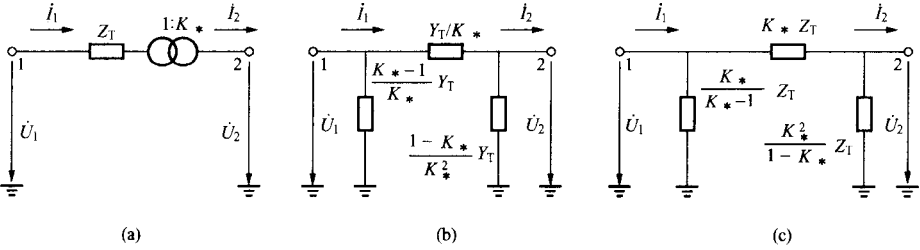


图 2-4 变压器的 II 型等值电路

此等值电路可由变压器电路电压、电流的关系直接导出, 简化过程如下:

由图 2-4 (a) 得到如下关系

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= K \dot{I}_2 \\ \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_T &= \frac{\dot{U}_2}{K} \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$