

电力行业高技能人才培养系列教材

变电检修工

(适用于技师、高级技师)

河南电力技师学院 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力行业高技能人才培养系列教材

变电站值班员
抄表核算收费员
电气试验工
电力电缆工
● 变电检修工 ●
继电保护工
配电线路工
用电检查员
装表接电工
高压线路带电作业工
油务员

策划编辑 李建强 010-63416251

赵鸣志 010-63416255

封面设计 左 铭

上架建议：电力工程/供用电

ISBN 978-7-5083-7658-5



9 787508 376585 >

定价：29.80元

电力行业高技能人才培训系列教材

变电检修工

(适用于技师、高级技师)

河南电力技师学院 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内容提要

本教材是为配合劳动和社会保障部与中国电力企业联合会共同启动的“电力高技能人才培养项目”而组织编写的。按模块化技能培训（DUCAM）的基本模式要求编写，为《电力行业高技能人才培养系列教材》之一。全书共包含三个单元、八个模块、三十三个课题。第一单元为专业基础，主要介绍电力系统、高压技术；第二单元为高压开关类设备检修，主要介绍高压隔离开关检修，SF₆高压断路器检修，SF₆气体绝缘全封闭组合电器（GIS）；第三单元为变压器类设备检修，主要介绍大型变压器检修，电力互感器检修，变压器有载分接开关检修等内容。

本教材结合实际设备，贴近现场，突出了技能培训。各单元模块后有针对性地给出了思考题，以方便读者自学学习效果使用。

本书可作为变电检修高技能人才的培训教材，也可供从事变电检修人员在工作中使用，并可作为高职高专师生学习与参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

变电检修工/河南电力技师学院编. —北京：中国电力出版社，2008

（电力行业高技能人才培养系列教材）

ISBN 978-7-5083-7658-5

I. 变… II. 河… III. 变电所-检修-技术培训-教材
IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 096904 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>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 367 千字

印数 0001—4000 册 定价 29.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电力行业高技能人才培养系列教材》

编 委 会

主 任： 苏国政

副主任： 赵顺通 仝全利

委 员：（按姓氏笔画排序）

邓启民 吴 兵 吴 荻 沈世峰 宋素琴

陈 岳 陈建国 徐文忠 郭海云



前 言



2003 年底,劳动和社会保障部全面启动了国家高技能人才培养工程。为了加快电力行业高技能人才队伍建设,劳动和社会保障部与中国电力企业联合会共同启动了“电力高技能人才培养项目”,组织编写了“电力行业特有工种技师、高级技师培训规范”,以指导电力行业高技能人才培养工作的开展。

河南电力技师学院作为河南省电力公司生产技能人员培训中心,自 1997 年全面开展电力行业高技能人才培养工作,在电力行业高技能人才培养方面积累了丰富的经验。但在培训过程中深感电力高技能人才培养教材匮乏且针对性不强,无法满足《变电检修培训规范》的要求。为进一步规范高技能人才培养工作,提供适用的配套教材,河南省电力公司专门成立编写委员会,指导河南电力技师学院组织编写了《电力行业高技能人才培养系列教材》。

在本次编写过程中,各编写组在编写委员会的指导下,积极组织研讨,充分听取电力行业专家有关编写的意见和建议,认真进行职业能力分析,以国家职业标准及相关规程、规范为依据;结合各工种职业技能鉴定规范及新知识、新技术、新设备、新工艺的内容采用模块化结构进行编写。教材内容主要针对技师培训需求,兼顾高级工、高级技师培训,以适用为主、够用为度,突出了专业理论知识与实际操作内容相结合的职业培训特色。

本书是电力行业高技能人才培养系列教材之一,分为三个单元,共包含八个模块,分别介绍了变电检修按照本专业要求所必需的主要知识。本书总的内容:专业基础单元、高压开关类设备检修单元和变压器类设备检修单元。

本书由符贵主编,其中第一单元模块一的内容由彭理燕编写;第一单元模块二的内容由陈邓伟、马晓娟编写;第二单元模块一和模块三的内容由徐文忠编写;第三单元模块一和模块二的内容由曲在辉编写;第二单元模块二和第三单元模块三的内容由符贵编写,并担任主审及统稿。

本套系列培训教材的编写得到了河南省电力公司及电力行业有关专家的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,肯请读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月



目 录

前言

第一单元 专业基础

模块一 电力系统	1
课题一 电力系统概述	1
课题二 电力系统频率及电压调节	10
课题三 电力系统的稳定	15
思考题	25
模块二 高电压技术	26
课题一 电气设备绝缘概述	26
课题二 电气设备预防性试验	28
课题三 变压器油中溶解气体分析诊断与故障检查	45
思考题	58

第二单元 高压开关类设备检修

模块一 高压隔离开关	59
课题一 高压隔离开关的类型	59
课题二 110kV 及以上电压等级高压隔离开关检修与调试	59
课题三 高压隔离开关检修及故障处理	63
课题四 主要 220kV 及以上隔离开关介绍	66
思考题	71
模块二 SF ₆ 高压断路器	72
课题一 SF ₆ 断路器的基本知识	72
课题二 典型 SF ₆ 断路器	77
课题三 高压断路器的操动机构	86
课题四 SF ₆ 断路器检修	105
课题五 SF ₆ 断路器的运行与维护	119
思考题	121
模块三 SF ₆ 气体绝缘全封闭组合电器 (GIS)	122
课题一 GIS 概述	122

课题二	GIS 的基本组成	123
课题三	GIS 的安装和验收	126
课题四	GIS 运行与维护	131
课题五	GIS 常见故障分析处理	132
思考题		134

第三单元 变压器类设备检修

模块一	大型变压器	135
课题一	大型变压器基本结构	135
课题二	大型变压器的安装及验收	143
课题三	大型变压器的检修	150
课题四	大型变压器常见故障分析处理	157
思考题		163
模块二	电力互感器	164
课题一	电力互感器的结构	164
课题二	电力互感器的检修	173
课题三	电力互感器常见故障分析处理	184
课题四	新型电力互感器介绍	193
思考题		196
模块三	变压器有载分接开关	197
课题一	有载分接开关的基本知识	197
课题二	有载分接开关的结构	203
课题三	操动机构及电气控制回路	214
课题四	有载分接开关检修	220
课题五	常见故障及处理	229
思考题		233
参考文献		234

第一单元

专业基础



模块一 电力系统

课题一 电力系统概述

一、电力系统的组成

电力系统是由生产、输送、分配和消费电能的发电机、变压器、电力线路和电力用户组成的整体，是将一次能源转换成电能并输送和分配到用户的一个统一系统。电力系统还包括保证其安全可靠运行的继电保护装置、安全自动装置、调度自动化系统和电力通信等相应的辅助系统（一般称为二次系统），以及通过电或机械的方式联入电力系统中的设备（如发电机的励磁调节器、调速器等）。

二、电力系统分析课程的主要内容

电力系统课程研究的问题有电力系统运行和电力系统规划两方面。本课程的重点在前者，适当兼顾电力系统规划方面的某些问题。本课程可分两部分，即电力系统稳态分析和电力系统暂态分析。

电力系统稳态运行指电力系统正常的、相对静止的运行状态。电力系统稳态分析包括三个方面，即电力系统的基本知识和等值网络；电力系统正常运行状况的分析和计算；电力系统有功功率与频率、无功功率与电压的控制和调整。电力系统暂态过程指电力系统急剧地从一种运行状态向另一种运行状态过渡的过程。电力系统的暂态过程可划分为三类：波过程、电磁暂态过程和机电暂态过程。

波过程主要与运行操作或雷击时的过电压有关，涉及电流、电压波的传播。这类过程最短暂，属于高电压技术课程的范畴。

电磁暂态过程主要与电力系统中发生短路故障和自励磁有关，涉及电流、电压，有时也涉及功率角随时间的变化。机电暂态过程主要与电力系统受到各种扰动下系统的振荡、稳定性破坏、异步运行等有关，涉及功率、功率角、旋转电机的转速等随着时间的变化。这两类过程是电力系统暂态分析讨论的内容。

电力系统中三类暂态过程是相互关联的，对其中一类过程进行讨论时，可对其他过程作某些合理的简化处理，以突出研究的重点。

三、电力系统的潮流分布

电力系统带上负荷运行时，在电源电动势的激励下，电流或与电流、电压相对应的功率

从电源（发电机）通过电力网中的各元件（变压器、电力线路、电抗器等）流向负荷分布于电力网各处，称为潮流分布。由于负荷的随机性，电力网的接线方式和电源运行状态的变化，通过各元件的潮流也随之变化。计算电力系统在正常运行及各种可能的故障运行方式下的潮流分布，各节点电压及元件中的功率损耗，对于电力系统的设计和运行都是十分必要的。本节简介的潮流计算是指电力系统在稳定运行状态下的功率分布和各节点（母线）电压的计算。

电力系统潮流计算的目的主要有：

- (1) 在电力系统规划、设计中，用于选择系统接线方式，选择电气设备及导线的截面。
- (2) 在电力系统运行中，用于确定运行方式，制定检修计划和确定调压措施。
- (3) 为继电保护和自动装置的操作和设计提供整定数据。

为了进行潮流电压及稳定性等计算，需将电力系统的接线用等值电路表示，这样，便可以将《电工基础》中的各种基本理论和分析方法用于电力系统中的各种场合的计算。

（一）电力系统的等值电路和参数计算简介

电力系统的主要元件是：发电机、变压器、电力线路、电抗器、电容器组等。这些元件是用阻抗、导纳、电压源等电路元件表征的。

(1) 电阻是用来反映导线流过电流时产生有功功率损耗效应的参数。

(2) 电抗是用来反映导线流过交变电流时产生磁场效应的参数。这个磁场效应不仅包括导线流过交流电流时本身产生的自感作用，还包括其他相导线对它的互感作用。

(3) 电导是用来反映相间绝缘介质损耗功率的参数，对于架空线路主要为绝缘子泄漏电流损耗和电晕损耗；对于电缆线路主要为绝缘介质极化与泄漏损耗。

(4) 电纳是用来反映导线之间和导线对大地之间电容效应的参数。

(5) 电压源是给定的电压，随着负载增大，电流增大，理想状态下电压不变，实际会在传送路径上消耗，负载增大，消耗增多。

1. 电力线路的等值电路和参数计算

(1) 电力线路的等值电路。电力线路的电阻、电抗、电导、电纳，都是沿线路均匀分布的。但是，为了计算的方便，一般将 300km 以下的电力线路（ $f=50\text{Hz}$ 的工频）用集中参数等值电路表示。线路长度超过 300km 的电力线路，则需按均匀分布线路来计算。由于三相电路是对称的，因此，三相线路的等值电路只画一相即可。线路的参数实际上是沿线路均匀分布的，其均匀分布参数的等值电路如图 1-1-1 所示。

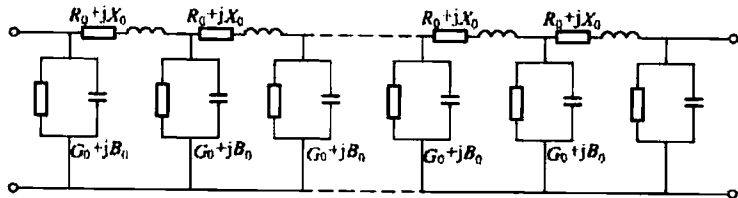


图 1-1-1 电力线路的均匀分布参数等值电路

图 1-1-1 中， R_0 、 X_0 、 B_0 、 G_0 为导线单位长度的电阻、电抗、电纳和电导。其中 R_0 和 X_0 的单位为 Ω/km ， B_0 、 G_0 的单位为： S/km 。

实际工作中，我们用集中参数电路等效。由计算得知，电力线路的集中参数等值电路产

生的误差是很小的。电力线路的集中参数等值电路如图 1-1-2 所示，称为 Π 形等值电路。

并联电导 G_0 是用于表征电力线路绝缘介质中与电压平方成正比的有功功率损耗的参数。对于架空线路，主要指电晕损耗和绝缘子泄漏损耗；对于电缆线路，主要指绝缘介质的极化损耗和泄漏损耗。

架空线路的绝缘子漏电所产生的损耗很小，可以忽略不计。实际运行表明，35kV 及以下的电力线路无电晕损耗， $G_0 = 0$ 。对于 110kV 及以上电压等级的电力线路，在设计时需验算产生电晕的临界电压，称为电晕临界电压 U_{cr} ，必须保证电晕临界电压大于线路工作电压 U ，即 $U_{cr} > U$ 。因此，电力线路晴天时在额定电压 U 附近不会出现电晕， $G_0 = 0$ ，所以在大多数等值电路中忽略并联电导 G ，即取 $G \approx 0$ ，相应的等值电路如图 1-1-3 所示。

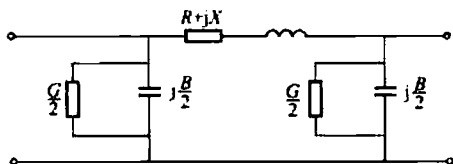


图 1-1-2 电力线路的集中参数等值电路

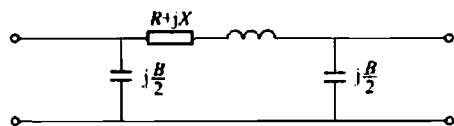


图 1-1-3 忽略并联电导 G 时电力线路的集中参数等值电路

在潮流计算中，110kV 及以上电压等级的输电线路的并联电纳常用电容功率表示，如图 1-1-4 (a) 所示，电容功率 Q_c 与电纳的关系如下：

$$Q_c = U_N^2 B \quad (1-1-1)$$

式中 U_N ——输电线路额定电压，kV；

B ——线路电纳，S；

Q_c ——线路电容功率，Mvar。

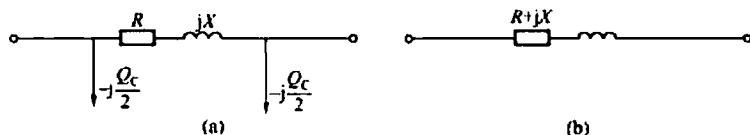


图 1-1-4 用电容功率表示并联电纳的等值电路

(a) Π 形等值电路；(b) 简化后的等值电路

对于 35kV 及以下电压等级的配电线路，由于电压低、线路短，由电纳引起的容性无功功率不大，故可忽略并联电纳，等值电路简化后如图 1-1-4 (b) 所示。

(2) 电力线路参数的工程计算。如果已知电力线路的长度 L (km) 及其单位长度的电阻 R_0 、电抗 X_0 、电纳 B_0 和电导 G_0 ，则可按以下公式计算集中参数等值电路中的网络参数 R 、 X 、 B 和 G

$$R = R_0 L \quad (1-1-2)$$

$$X = X_0 L \quad (1-1-3)$$

$$B = B_0 L \quad (1-1-4)$$

$$G = G_0 L \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-2) ~ 式 (1-1-5) 可知，如果能求出 R_0 、 X_0 、 B_0 、 G_0 ，则可以很方便地计算 R 、 X 、 B 、 G 。参数的公式计算在此不作介绍。

2. 双绕组电力变压器的等值电路和参数计算

由电机学可知, 变压器可以用 T 形等值电路表示, 但是为了减少网络的节点数, 将励磁阻抗移至 T 形等值电路的电源侧, 并将励磁阻抗用励磁导纳或导纳中通过的三相功率表示, 这种电路称为 Γ 形电路。

(1) 双绕组变压器的等值电路。图 1-1-5 (a) 所示为励磁支路用导纳表示的等效电路, 图 1-1-5 (b) 所示为励磁支路用励磁损耗 (铁损、空载损耗) 表示的 Γ 形等效电路, 图 1-1-5 (c) 所示为忽略空载损耗时的等值电路。 $Z_T = R_T + jX_T$ 称为串联阻抗, $Y_T = G - jB_T$ 为并联导纳。

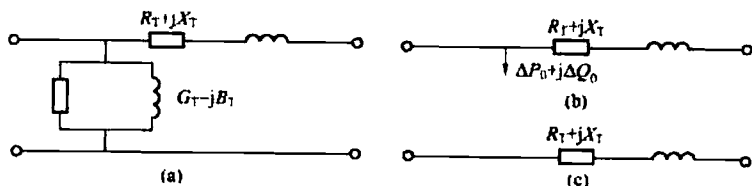


图 1-1-5 双绕组变压器的等值电路

(a) 用导纳表示的等值电路; (b) 用励磁损耗表示的等值电路;
(c) 简化后的等值电路

(2) 双绕组变压器的参数计算。若已知短路损耗 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 (%)，可以用来计算变压器的各种参数。

1) 电阻。变压器的电阻与绕组损耗 (铜耗) 有关, 近似等于短路损耗, 因此电阻可以表示为

$$R_T = (\Delta P_k \cdot U_N^2 / S_N) \times 10^3 \quad (1-1-6)$$

式中 S_N —— 变压器额定容量。

2) 感抗。由短路电压的定义, 得出

$$X_T = (U_k \cdot U_N^2 / S_N) \times 10 \quad (1-1-7)$$

3) 励磁导纳或导纳中的励磁损耗。变压器励磁导纳中功率损耗包括电导中空载有功损耗与电纳中励磁无功损耗两个部分。

$$B_T = \frac{\Delta Q_0}{U_N^2} = \frac{I_0}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} \quad (1-1-8)$$

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \quad (1-1-9)$$

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0 \%}{100} \cdot S_N \quad (1-1-10)$$

3. 三绕组变压器

(1) 三绕组变压器的等值电路。等值电路中的阻抗是将同相的三个绕组的阻抗归算在一个基准电压下的值。励磁导纳或导纳中通过的三相功率损耗, 与双绕组变压器的等值电路表示方法相同, 这种电路称为 Γ -星形电路。

三绕组变压器的等值电路如图 1-1-6 所示。图 1-1-6 (a) 所示为以励磁导纳表示励磁支路; 图 1-1-6 (b) 所示为以导纳中励磁功率损耗表示励磁支路。

(2) 参数计算。

1) 电阻。三绕组变压器各绕组的电阻与绕组设计制造容量的大小有关。

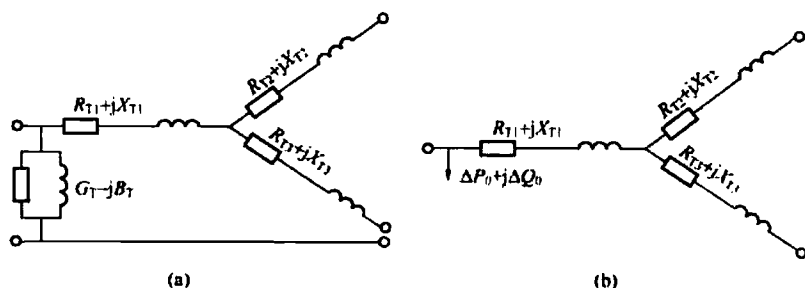


图 1-1-6 三绕组变压器的等值电路

(a) 以励磁导纳表示励磁支路；(b) 以导纳中励磁功率损耗表示励磁支路

对于容量比为 100/100/100 的三绕组变压器，由已知的三组短路损耗 ΔP_{k12} 、 ΔP_{k23} 、 ΔP_{k31} 可求出每个绕组的短路损耗

$$\Delta P_{k1} = 1/2(\Delta P_{k12} + \Delta P_{k31} - \Delta P_{k23}) \quad (1-1-11)$$

$$\Delta P_{k2} = 1/2(\Delta P_{k23} + \Delta P_{k12} - \Delta P_{k31}) \quad (1-1-12)$$

$$\Delta P_{k3} = 1/2(\Delta P_{k31} + \Delta P_{k23} - \Delta P_{k12}) \quad (1-1-13)$$

各绕组的电阻计算式为

$$R_{T1} = (\Delta P_{k1} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10^3 \quad (1-1-14)$$

$$R_{T2} = (\Delta P_{k2} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10^3 \quad (1-1-15)$$

$$R_{T3} = (\Delta P_{k3} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10^3 \quad (1-1-16)$$

对于容量比为 100/50/100 的三绕组变压器，需要先利用下式将查出的短路损耗，归算到第一绕组的额定容量之下。

以容量比为 100/100/50 的变压器为例，归算公式为

$$\Delta P_{k23} = \Delta P'_{k23} (S_N / S_{N3})^2 = 4\Delta P'_{k23} \quad (1-1-17)$$

$$\Delta P_{k31} = \Delta P'_{k31} (S_N / S_{N3})^2 = 4\Delta P'_{k31} \quad (1-1-18)$$

式中 S_{N3} —— 变压器低压绕组的额定容量。

2) 感抗。三绕组变压器容量较大，各绕组感抗的计算式为

$$X_{T1} = (U_{k1} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10 \quad (1-1-19)$$

$$X_{T2} = (U_{k2} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10 \quad (1-1-20)$$

$$X_{T3} = (U_{k3} \cdot U_N^2 / S_N) \times 10 \quad (1-1-21)$$

三绕组变压器每相高压、中压、低压三个绕组在铁芯上的组装有两种不同的方式。由于组装方式不同，各绕组间的漏磁通以及由此引起的短路电压百分数也不相同。在选用三绕组变压器时，可以按照不同的要求，选择所需要的组装方式。

3) 励磁导纳。三绕组变压器的励磁导纳或导纳中功率损耗的计算方法，与双绕组变压器相同。

4. 自耦变压器

在 220kV 及以上电压等级的中性点直接接地系统中，自耦变压器得到了广泛的应用。自耦变压器的高压、中压绕组接成自耦型，低压绕组三相接成三角形，可以补偿三次谐波磁

通并可以接发电机、同步补偿机、静止补偿器，以及引出第三种电压。

就变压器各绕组端点接线条件而言，自耦变压器完全等值于普通三绕组变压器，因而自耦变压器的参数和等值电路的确定也与三绕组变压器相同。

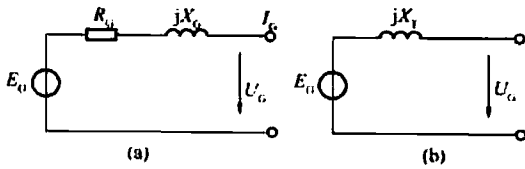


图 1-1-7 常用的发电机等值电路
(a) 一般等值电路；(b) 简化后的等值电路

5. 同步发电机的等值电路及参数

由戴维南等效电源定理可知，任意线性含源二端网络，都可以等效成一个电压源与一个阻抗串联的电路。因此，发电机作为实际的交流电源，其等值电路，如图 1-1-7 (a) 所示。电力系统中的同步发电机，一般容量较大，其电阻远小于感抗，因此，可近似令电阻为零。

故常用的发电机简化后的等值电路如图 1-1-7 (b) 所示。

由于制造厂提供的发电机电抗数据往往以百分数 $X_G\%$ 表示。根据 $X_G\%$ 可计算 X_G ，同步电抗公式如下

$$X_G = \frac{X_G\%}{100} \cdot \frac{U_G^2 \cos\varphi}{P_N} \quad (1-1-22)$$

式中 U_G —— 发电机额定电压，kV；

P_N —— 发电机额定有功功率，kW；

$\cos\varphi$ —— 发电机功率因数。

6. 负荷的等值电路及参数

等值电路如图 1-1-8 所示。用电设备从电网某点取用的功率，称为该点的负荷，以 $S = P + jQ$ 表示。综合负荷与电压的关系在一般情况下，可用恒定功率与等值阻抗、等值导纳表示等值阻抗为

$$Z = U^2 / S = U^2 / (P + jQ) \quad (1-1-23)$$

等值导纳为

$$Y = S / U^2 = (P + jQ) / U^2 \quad (1-1-24)$$

式中 U —— 负荷处的电网线电压，kV；

S —— 负荷视在功率，MVA；

P —— 有功负荷，kW；

Q —— 无功负荷，kvar。

7. 电抗器的等值电路和参数计算

电抗器的电阻一般很小，可以忽略不计，因此，电抗器的等值电路是一个纯感抗 X 。等值电路如图 1-1-9 所示。一般制造厂提供的是电抗器的电抗百分数 $X\%$ 。 X 的计算公式如下

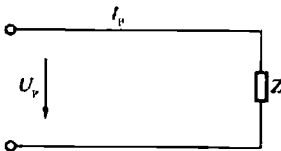


图 1-1-8 负荷的等值电路

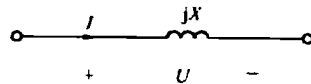


图 1-1-9 电抗器的等值电路

$$X = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \quad (1-1-25)$$

式中 X ——电抗器的电抗, Ω ;

$X\%$ ——电抗器的电抗百分数;

I_N ——电抗器的额定电流, A;

U_N ——电抗器的额定电压, kV。

8. 电力系统的等值电路图

综上所述, 电力系统的等值电路图就是将系统内的各发电机、变压器、电力线路、负荷等, 用等值电路表示所画出的电路图。图 1-1-10 所示为某系统一次主接线图, 图 1-1-11 所示为某系统不计网损的等值电路图。

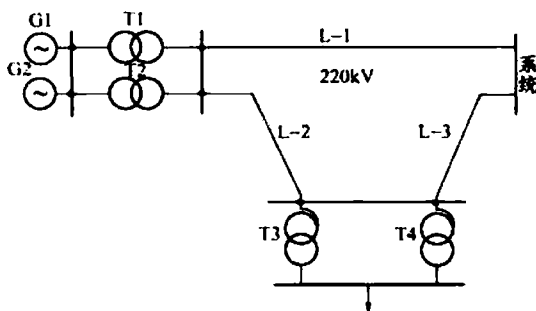


图 1-1-10 某系统一次主接线图

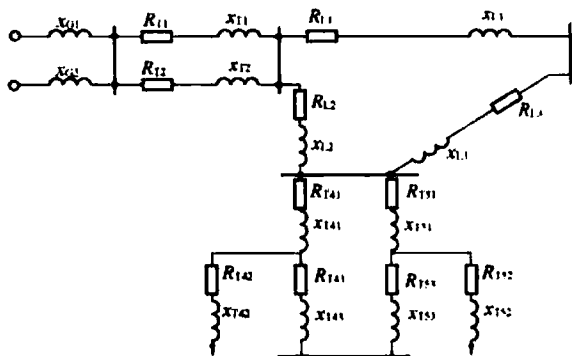


图 1-1-11 某系统不计网损的等值电路图

(二) 电力网的功率损耗及计算

电力网的主要电气元件是电力线路和电力变压器, 将各电力线路和电力变压器的功率损耗相加, 则为整个电力网的功率损耗。

1. 三相电力线路中产生的功率损耗

$$\begin{aligned} \Delta S &= 3I^2(R + jX) \times 10^{-6} - jQ_c = \Delta P + j\Delta Q - jQ_c \\ &= \Delta P + j\Delta Q - jQ_c = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot (R + jX) - jQ_c \end{aligned} \quad (1-1-26)$$

式中 ΔP ——线路电阻中有功功率损耗, $\Delta P = (P^2 + Q^2)R/U^2$, MW;

ΔQ ——线路感抗中无功功率损耗, $\Delta Q = (P^2 + Q^2)X/U^2$, Mvar;

Q_c ——线路电纳中无功功率, Q_c 对 ΔQ 起补偿作用。

应该指出, 在应用式 (1-1-26) 时, 必须采用某一点的功率与电压。在某些情况下, 电力网各点电压尚为未知数, 这时就可用平均额定电压替代该点的实际电压, 计算结果一般能满足工程上的准确度。

2. 变压器的功率损耗

(1) 双绕组变压器。双绕组变压器的等值电路首端电压为 U_1 , 末端电压为 U_2 , 阻抗中通过的电流为 I , 则三相变压器中的功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta S &= 3I^2(R_T + jX_T) \times 10^{-6} + \Delta P_0 + j\Delta Q_0 \\ &= [(P^2 + Q^2)/U^2](R_T + jX_T) + \Delta P_0 + j\Delta Q_0 \end{aligned}$$

$$= [(P^2 + Q^2)/U^2]R_T + \Delta P_0 + j[(P^2 + Q^2)/U^2]X_T + j\Delta Q_0$$

$$= \Delta P_T + j\Delta Q_T \quad (1-1-27)$$

$$\Delta P_T = [(P^2 + Q^2)/U^2]R_T + \Delta P_0 = (S^2/U^2)R_T + \Delta P_0 \quad (1-1-28)$$

若功率 S 以兆伏安为单位, 并代入

$$R_T = \Delta P_k \cdot U_k^2/S_N, X_T = U_k \cdot U_k^2/S_N, \Delta Q_0 = I_0 \cdot S_N/100, U \approx U_N$$

则双绕组变压器功率损耗计算式变为

$$\Delta P_T = \Delta P_k (S/S_N)^2 + \Delta P_0 \quad (1-1-29)$$

$$\Delta Q_T = U_k/[100(S/S_N)^2] + I_0 \cdot S_N/100 \quad (1-1-30)$$

(2) 三绕组变压器、自耦变压器。仿照式 (1-1-29) 和式 (1-1-30), 三绕组变压器、自耦变压器的功率损耗计算式, 可以写出

$$\Delta P_T = (P_1^2 + Q_1^2)R_{T1}/U_1^2 + (P_2^2 + Q_2^2)R_{T2}/U_2^2 + (P_3^2 + Q_3^2)R_{T3}/U_3^2 + \Delta P_0 \quad (1-1-31)$$

$$\Delta Q_T = (P_1^2 + Q_1^2)X_T/U_1^2 + (P_2^2 + Q_2^2)X_T/U_2^2 + (P_3^2 + Q_3^2)X_T/U_3^2 + \Delta Q_0 \quad (1-1-32)$$

也可以写成如下形式

$$\Delta P_T = \Delta P_{k1}(S_1/S_N)^2 + \Delta P_{k2}(S_2/S_N)^2 + \Delta P_{k3}(S_3/S_N)^2 + \Delta P_0 \quad (1-1-33)$$

$$\Delta Q_T = U_{k1}/[100(S_1/S_N)^2] + U_{k2}/[100(S_2/S_N)^2] + U_{k3}/[100(S_3/S_N)^2] + I_0 \cdot S_N/100 \quad (1-1-34)$$

3. 降低电力网功率损耗的措施

(1) 提高负荷的功率因数。

- 1) 合理选择、使用异步电动机;
- 2) 合理选择变压器的容量及运行方式;
- 3) 安装并联无功补偿装置。

(2) 合理确定电力网的运行电压水平。

(3) 合理调整负荷提高负荷率。

(4) 改变电力网的接线及运行方式。

- 1) 电力网升压改造, 简化电压等级, 减少变电层次;
- 2) 改造电力网的迂回卡脖现象, 采取高压深入大城市负荷中心的供电方式;
- 3) 开式网改为闭式网运行。

(三) 电力网的电压损失及计算

1. 基本概念

电流流过电力网元件时, 电压会发生变化。电力网中任意两点之间电压的相量差称为这两点的电压降落, 简称为电压降。电力网中任意两点之间电压的代数差称为这两点电压的电压损失, 也称为电压损耗。注意: 电压损失即为两点电压有效值之差。在电力网中某点的实际电压与额定电压的代数差, 称为电压偏移。电压偏移常用百分数表示, 电压偏移为正时表示实际电压高于额定电压, 电压偏移为负时, 表示实际电压低于额定电压。

2. 电压损失的计算公式

电压损失的计算公式为

$$\Delta U_i = \Delta U + j\delta U \quad (1-1-35)$$

$$\Delta U_i \approx \frac{PR + QX}{U_i} \quad (1-1-36)$$

式中 ΔU_i ——电压降落可分解成两个分量即 $j\delta U + \Delta U$ ，其中 ΔU 为纵分量， $j\delta U$ 为横分量， i 为某节点。工程计算中近似地认为电压损失为 ΔU ，与电压降的纵分量相等。

3. 调整电力网电压的措施详见课题二（电力系统频率及电压调节）

（四）电力网环节首末端的功率、电压的平衡关系

电力网等值电路中每一个电流不变的单元，称为电力网的一个环节。

1. 环节首末两端的功率平衡关系

环节首末两端的功率平衡关系为

$$S_1 = S_2 + \Delta S \quad (1-1-37)$$

$$S_2 = S_1 - \Delta S \quad (1-1-38)$$

其中

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot (R + jX) \quad (1-1-39)$$

式中 S_1 ——环节首端三相功率，MVA；

S_2 ——环节末端三相功率，MVA；

$R + jX$ ——环节阻抗， Ω ；

ΔS ——环节元件中的功率损耗，MVA。

如图 1-1-12 所示的环节，已知环节末端功率 S'_2 ，求首端功率 S'_1 ，在认为末端电压为未知数时，近似计算一般用额定电压代替末端电压。功率平衡关系为

$$S_2 = S'_2 + (-jQ_{L2}) = P_2 + jQ_2$$

$$\Delta S = 3I^2(R + jX) \times 10^{-6}$$

$$= [(P_2^2 + Q_2^2)/U_N^2](R + jX)$$

$$S_1 = S_2 + \Delta S$$

$$S'_1 = S_1 + (-jQ_{L1})$$

式中 U_N ——线路额定电压，kV。

2. 环节首末端电压的平衡关系

环节首末端电压的相量如图 1-1-13 所示。其中图 1-1-13 (a) 所示为以 $\dot{U}_2$ 为参考相量的相量图，图 1-1-13 (b) 所示为以 $\dot{U}_1$ 为参考相量的相量图。

$$U_1 = U_2 + \Delta U \quad (1-1-40)$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U \quad (1-1-41)$$

$$\Delta U_i \approx \frac{P_i R + Q_i X}{U_i} \quad (1-1-42)$$

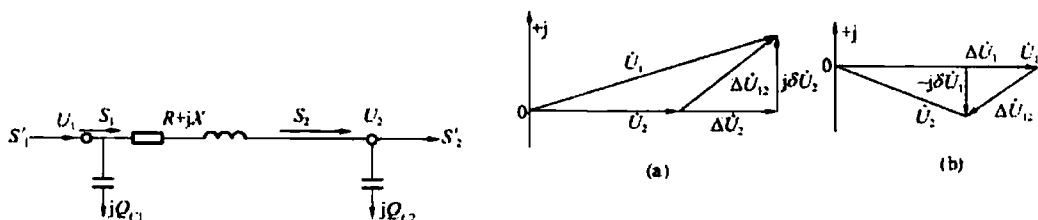


图 1-1-12 某环节的等值电路图

图 1-1-13 环节首末端电压的相量图

(a) 以 $\dot{U}_2$ 为参考相量；(b) 以 $\dot{U}_1$ 为参考相量