



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电力系统分析课程设计 指导及示例分析

主 编 郭力萍 顾秀芳  
副主编 周志霞 韩如月 徐 涛



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电力系统分析 课程设计指导 及示例分析

主 编 郭力萍 顾秀芳

副主编 韩如月 徐 涛



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书面向全日制高等学校电气工程及其自动化专业学生,是为电力系统分析课程设计编写的指导书。

本书共6章,涵盖了电力系统稳态分析和电力系统故障分析两大内容,较详尽地阐述了电力系统基本元件等值模型、电力系统潮流计算(手算和计算机辅助计算)、高压电网的规划设计、电力系统无功补偿与调压计算、电力系统经济运行、电力系统短路故障计算等内容。针对每部分内容编写了设计示例及分析,给出具体的设计原则、设计方法、设计方案、(仿真及编程)计算过程等,并对设计结论给予一定的分析,便于学生参考和应用。

本书适用于高等学校电气工程及其自动化专业学生使用,同时也可作为相关技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析课程设计指导及示例分析 / 郭力萍,  
顾秀芳主编. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.9  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5084-9043-4

I. ①电… II. ①郭… ②顾… III. ①电力系统—系  
统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第200799号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 <b>电力系统分析课程设计指导及示例分析</b>
作 者	主编 郭力萍 顾秀芳 副主编 周志霞 韩如月 徐涛
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 208千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>18.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

课程设计是培养学生建立初步工程概念，提高学生工程设计能力和计算能力的一个重要实践性教学环节。学生通过工程设计规程、设计原则和方法的学习，将课程中涉及的基本概念、基本原理和基本计算方法等理论知识与工程设计要求有机结合。电力系统分析课程设计是电气工程学科相关专业的一个必修教学环节，一般安排在电力系统分析课程学习结束后进行。

本书作为电力系统分析课程设计的辅导教材，是针对电力系统分析课程中涉及的电力系统基本元件等值模型、电力系统潮流计算、高压电网的规划设计、电力系统无功补偿与调压计算、电力系统经济运行、电力系统短路故障计算等内容编写的。通过学习本书内容，学生可以加深对电力系统分析基础理论的理解，掌握电力系统规划、仿真建模、电压调整、经济运行等设计内容的基本要求和基本步骤，强化学生的电力系统潮流计算及短路计算能力。

本书由郭力萍、顾秀芳主编，其中第1章、第3章由郭力萍编写，第2章、第4章由郭力萍、顾秀芳共同编写，第5章、第6章由韩如月、徐涛和周志霞三位教师共同编写。郭力萍负责全书的统稿，周志霞负责全书的校对工作以及第二章和第四章示例的计算。

在本书的编写过程中，内蒙古工业大学岳峰、高培青等同学给予大力帮助，谨此致谢。

本书在出版过程中，承蒙中国水利水电出版社编辑张秀娟的大力支持和帮助，并提出了很多修改意见，在此深表谢意。

鉴于编者水平和时间有限，书中难免有欠妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011年8月

## 前言

<b>1 电力系统基本元件等值模型</b> .....	1
1.1 架空线路模型分析与讨论 .....	1
1.2 变压器模型分析与讨论 .....	3
1.3 多电压等级电力网元件参数归算 .....	8
1.4 设计示例 .....	10
<b>2 电力系统潮流计算</b> .....	14
2.1 手算潮流及示例 .....	14
2.2 基于 MATLAB 的潮流计算及示例 .....	22
2.3 设计示例 .....	40
2.4 基于潮流计算的电网运行方式 .....	42
<b>3 高压电网的规划设计</b> .....	44
3.1 电网规划的基本原则与计算 .....	44
3.2 电力网供电电压等级选择 .....	46
3.3 导线选择与校验 .....	47
3.4 电力网最优设计方案的确定 .....	50
3.5 综合费用及设计方案经济性比较 .....	51
3.6 设计示例 .....	54
<b>4 电力系统无功补偿与调压计算</b> .....	60
4.1 电力系统无功补偿方法 .....	60
4.2 无功补偿装置容量及其配置 .....	64
4.3 调压措施的合理应用 .....	67
4.4 设计示例 .....	69
<b>5 电力系统经济运行</b> .....	80
5.1 变压器经济运行方式 .....	80
5.2 电力系统负荷经济分配 .....	83
5.3 设计示例 .....	86
<b>6 电力系统短路故障计算</b> .....	90
6.1 三相短路的计算机算法 .....	90

6.2	简单不对称短路的计算机算法	96
6.3	设计示例	101
<b>附录一 基于 MATLAB 的电力网潮流计算总程序</b>		<b>106</b>
<b>附录二 电力系统常用设备的技术参数</b>		<b>117</b>
附表 1	部分汽轮发电机技术参数表	117
附表 2	部分水轮发电机技术参数表	117
附表 3	常用 6~110kV 架空线路的电阻和电抗值	118
附表 4	常用 220kV 架空线路的电阻和电抗值	118
附表 5	常用三芯电缆的电阻电抗及电纳值	118
附表 6	常用 110kV 及 220kV 架空线路电容值和充电功率	119
附表 7	常用 LGJ 铝绞线在环境温度 20℃ 时的长期允许载流量	119
附表 8	常用铝芯电力电缆 (单根) 长期允许载流量	119
附表 9	不同环境温度时导体载流量的修正系数 $K_t$	120
附表 10	不同土壤热阻系数时导体载流量的修正系数 $K_s$	120
附表 11	6~10kV 双绕组无励磁调压变压器技术参数表	120
附表 12	6~10kV 双绕组有载调压变压器技术参数表	121
附表 13	6~10kV 低损耗全密封波纹油箱配电变压器技术参数表	122
附表 14	6~10kV 级 SC (B) 9-50~2500/10 环氧树脂绕注干式电力变压器技术参数表	122
附表 15	35kV 双绕组无励磁调压配电变压器技术参数表	123
附表 16	35kV 双绕组有载调压变压器技术参数表	124
附表 17	35kV 级 SC9-315~8000/35 配电变压器技术参数表	125
附表 18	110kV 双绕组无励磁调压变压器技术参数表	125
附表 19	110kV 双绕组变压器技术参数表	126
附表 20	110kV 双绕组有载调压变压器技术参数表	128
附表 21	110kV 三绕组无励磁调压变压器技术参数表	128
附表 22	110kV 三绕组有载调压变压器技术参数表	129
附表 23	220kV 双绕组无励磁调压变压器技术参数表	129
附表 24	220kV 双绕组有载调压变压器技术参数表	130
附表 25	220kV 三绕组无励磁调压变压器技术参数表	130
附表 26	220kV 三绕组有载调压变压器技术参数表	131
附表 27	220kV 有载调压自耦变压器技术参数表 (一)	131
附表 28	220kV 有载调压自耦变压器技术参数表 (二)	132
附表 29	TBB 6~35kV 并联电容器成套装置主要技术参数	132
附表 30	110/10kV 变电所二类指标典型设计综合投资参考数据 (1998 年)	133
<b>参考文献</b>		<b>134</b>

# 1 电力系统基本元件等值模型

## 1.1 架空线路模型分析与讨论

电力系统稳态分析中，架空线路数学模型常表示为含电阻  $R$ 、电抗  $X$ 、电纳  $G$  和电导  $B$  等四个参数的等值电路。架空线路的参数是均匀分布的，即使是极短的一段线路，其每一个长度元都具有电阻和电感，而导线之间则具有电导和电容。不同电压等级、不同长度的线路呈现的物理特性会不同，在进行电力系统分析时，架空线路可以分别采用两种电路模型表示，即集中参数电路模型和分布参数电路模型。

架空线路采用何种模型，取决于与电路的尺寸和（工作）波长的比较情况。通常认为，集中电路由外形尺寸很小的集中元件组成，这里所谓“很小”是与正常工作频率所对应的波长相比较而言，如果工作频率较高，一般电路中所用连接导线的尺寸与工作波长相差不多。若导线的每一个长度元可以认为是无穷小时，导线就被看作是由一系列集中元件所构成的一种极限，这时应采用集中参数电路模型表示。反之，则需要考虑实际导线长度对沿线电压、电流等电气量的影响，即采用分布参数电路模型表示。

在工程计算中，既要保证必要的精度，又要尽可能地简化计算过程。

### 1.1.1 集中参数电路模型

当架空线路长度不超过 300km（中等及以下长度线路）或电缆长度不超过 100km 时，可以选用集中参数表示的  $\pi$  形等值电路，如图 1.1 所示。当线路长度  $l$  不超过 100km（短线路），且线路电压不高时，对地支路的参数对计算分析结果的影响不大，可在等值电路中略去。

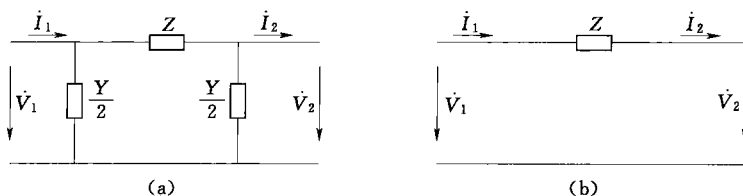


图 1.1 输电线路的集中参数等值电路

(a) 中长线路的  $\pi$  形等值电路；(b) 短线路的等值电路

图 1.1 中， $Z$ 、 $Y$  分别为架空线路的阻抗和导纳，即  $Z=(r+jx)l$ ， $Y=(g+jb)l$ ，其中每一单位长度的参数按式 (1.1) 计算。



$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\rho}{S} \quad (\Omega/\text{km}) \\ x &= 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega/\text{km}) \\ g &= 0 \quad (\text{S}/\text{km}) \\ b &= \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (\text{S}/\text{km}) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中  $\rho$ ——导线材料的电阻率,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ , 铝取值为  $31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ , 铜为  $18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ;

$S$ ——导线的额定截面积 (标称面积),  $\text{mm}^2$ ;

$r$ ——导线的几何半径,  $\text{cm}$  或  $\text{mm}$ ;

$D_m$ ——导线的几何均距,  $\text{cm}$  或  $\text{mm}$ , 要求与  $r$  单位相同, 三相三角排列导线的  $D_m = D$  (相间距), 而三相水平排列时,  $D_m = 1.26D$ 。

导线的电阻与导线材料的电阻率有很大关系。在实际应用时, 导线的电阻率要按照线路的实际运行温度进行修正, 修正公式为

$$r_t = r_{20} [1 + \alpha (t - 20)] \quad (1.2)$$

式中  $r_t$ 、 $r_{20}$ ——温度为  $t$ 、 $20^\circ\text{C}$  时的电阻,  $\Omega/\text{km}$ ;

$\alpha$ ——电阻的温度系数, 铝取  $0.0036 (1/^\circ\text{C})$ ; 铜取  $0.00382 (1/^\circ\text{C})$ 。

由于线路的电抗与几何均距、导线半径之间为对数关系, 导线在杆塔上的布置和导线截面积的大小对线路电抗无显著影响。从附表 3~附表 5 可以看出, 架空线路的电抗一般都在  $0.4 \Omega/\text{km}$  左右, 而电缆的电抗就要小很多, 一般在  $0.1 \Omega/\text{km}$  左右。

线路的电导主要是由沿绝缘子串的泄漏现象和导线的电晕现象所决定的, 与导线的材料无关。正常运行时, 沿绝缘子串的泄漏损失很小, 而当电晕临界电压  $V_c$  [按式 (3.8) 计算] 大于线路运行相电压  $V_\phi$  时, 线路不会发生电晕, 此时可认为线路电导  $g=0$ 。

线路的 (容性) 电纳取决于导线周围的电场分布, 与导线是否导磁无关。由式 (1.1) 可见, 线路的电纳与几何均距、导线半径之间也有对数关系 (此关系类同于电抗), 因此架空线路的电纳变化也不大, 约为  $2.85 \times 10^{-6} \text{S}/\text{km}$ 。

电缆电力线路与架空电力线路的结构是截然不同的。三相电力电缆的三相导线间的距离很近, 导线截面是圆形或扇形, 导线的绝缘介质不是空气, 绝缘层外有铝包或铅包, 最外层还有钢铠, 这使电力电缆的参数计算十分复杂, 一般是从手册中查取或从实验中确定, 而不是通过计算获得<sup>[8]</sup>。

在潮流计算中, 线路的等值电路常表示为对地导纳用充电功率代替的等值电路模型, 如图 1.2 所示。图 1.2 中, 线路首、末端的充电功率 (对地电容注入无功功率) 均由式 (1.3) 确定。

$$\Delta Q_L = \frac{1}{2} BV^2 = \frac{1}{2} b l V^2 (\text{Mvar}) \quad (1.3)$$

式中  $V$ ——线路的首端或末端电压, 近似计算时可取为线路的额定电压,  $\text{kV}$ 。

### 1.1.2 分布参数电路模型

当架空线路长度  $l$  超过  $300 \text{km}$  (长线路) 时, 需考虑其分布参数特性, 用分布参数简化  $\pi$  形等值电路表示, 如图 1.3 所示。



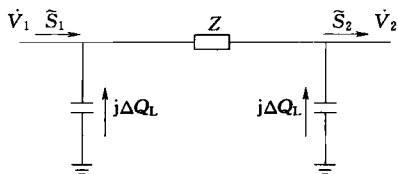


图 1.2 潮流计算用输电线路等值电路

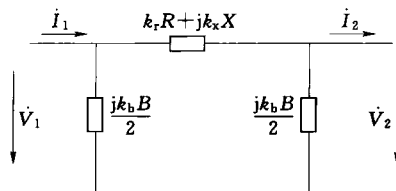


图 1.3 长线路的简化π形等值电路

图 1.3 中, 参数  $R$ 、 $X$ 、 $B$  分别为长线路的电阻 ( $\Omega$ )、电抗 ( $\Omega$ ) 和电纳 (S), 即  $R=r_1l$ ,  $X=x_1l$ ,  $B=b_1l$ ; 修正系数  $k_r$ 、 $k_x$ 、 $k_b$  按式 (1.4) 计算

$$\left. \begin{aligned} k_r &= 1 - x_1 b_1 \frac{l^2}{3} \\ k_x &= 1 - \left( x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right) \frac{l^2}{6} \\ k_b &= 1 + x_1 b_1 \frac{l^2}{12} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中, 各变量的下标 1 表示正序参数。

## 1.2 变压器模型分析与讨论

电力系统分析中, 变压器模型主要是  $\Gamma$  形、 $\pi$  形等值电路。这两种等值电路的应用场合不同,  $\Gamma$  形等值电路主要应用于手算潮流分析, 而  $\pi$  形等值电路通常应用在计算机潮流分析中。在对变压器参数和运行情况进行分析前, 首先要根据变压器的安装位置、安装台数以及负荷情况等信息, 选取合适的变压器型式和容量。

### 1.2.1 变压器容量选取原则

#### 1.2.1.1 接于发电机电压母线上的主变压器

接于发电机电压母线上的主变压器按以下三种条件中的最大容量情况进行选取。

(1) 主变压器台数不应少于 2 台, 其总容量至少应考虑 5 年负荷的逐年发展需要, 按式 (1.5) 计算

$$P_M \geq K_1 (1 + K_{LD})^5 P_y \quad (1.5)$$

$$P_y = K_1 \sum_{i=1}^n P_{\max, i} \text{ 或 } P_y = K_1 \sum_{i=1}^n A_i / T_{\max, i} \quad (1.6)$$

式中  $P_M$ ——发电厂最大负荷, MW;

$K_1$ ——同时率, 其值与电力用户的多少、各用户的用电特点等因素有关, 一般应根据实际统计资料确定, 当无实际资料时, 可参考表 1.1 中所提供的数据;

$K_{LD}$ ——负荷年平均增长率, 一般取 5%~10%;

$P_y$ ——按负荷等级计算的综合用电负荷, 按式 (1.6) 计算;

$A_i$ ——某行业计划年用电量, kWh;

$T_{\max, i}$ ——某行业的最大负荷利用小时数, h, 与行业用电特征有关, 一般可从相关手



册中查取；

$P_{\max, i}$ ——某行业最大有功功率，MW。

表 1.1 同时率  $K_1$  参考值

用户及系统情况	用户较少	用户很多	地区与系统之间
同时率 $K_1$	0.95~1.00	0.70~0.85	0.90~0.95

(2) 发电机电压母线负荷为最小时，能将发电机发出的剩余功率送入电力系统。

(3) 发电机电压母线的最大一台发电机停运，应能从系统受电，以满足发电机电压母线最大负荷的需求。

### 1.2.1.2 发电机变压器组单元接线中的主变压器

单机容量在 200MW 及以上的发电机，在与主变压器成单元接线时，主变压器容量可按下列两种条件中的较大者选择。

(1) 发电机的额定容量扣除本机组厂用最小负荷后，尚留有 10% 的充裕度。

变压器额定容量计算公式为

$$S_e \geq 1.1 S_{GN} (1 - K_3) \quad (1.7)$$

式中  $S_e$ ——变压器的额定容量，MVA；

$S_{GN}$ ——发电机的额定容量，MVA；

$K_3$ ——厂用电率，以本厂发电负荷的百分数表示，计算中用到的厂用电率可在表 1.2 中选取。

(2) 发电机最大连续发出功率扣除本机组厂用负荷后的功率。

表 1.2 发电厂厂用电率  $K_3$

电厂类型	热电厂	凝汽式电厂	小凝汽式电厂	大中型水电厂	小型水电厂	核电厂
厂用电率 (%)	10~15	8~10	5~6	0.3~0.5	1.0	4~5

### 1.2.1.3 变电站（所）主变压器

#### 1. 变压器相数选择

对于 220~330kV 主变压器，若不受运输条件限制，应选用三相式。500kV 主变压器选用三相还是单相，应根据变电站（所）在系统中的地位、作用、可靠性要求和制造条件、运输条件等选择，并经过技术经济比较确定。当选用单相变压器时，可根据系统和设备情况确定是否需装备用相。

#### 2. 变压器容量选择

凡装有两台（组）及以上主变压器的变电站（所），其中一台（组）事故停运后，其余主变压器的容量应保证该站（所）全部负荷的 60%~70%；在计及变压器过负荷能力后的允许时间内（表 1.3），应保证用户的一级负荷和二级负荷。一般，在最小运行情况下，变压器的过负荷系数取为 1.15。

全变电站（所）装设两台变压器的总安装容量  $S_{e\Sigma}$  为

$$S_{e\Sigma} \geq 1.4 S_M \quad (1.8)$$

式中  $S_M$ ——变电站（所）的最大负荷，MVA。



表 1.3 变压器过载允许时间

过电流 (%)	允许运行时间 (min)	过电流 (%)	允许运行时间 (min)
20	480	60	45
30	120	75	20
45	60	100	10

若变电所只装设一台变压器，其额定容量可按式 (1.9) 选择。

$$S_{e\Sigma} \geq (0.75 \sim 0.8) S_M \quad (1.9)$$

若已知变电所用户的安装容量  $P_{yz}$  及其功率因数  $\cos\varphi$ ，则变电所最大负荷为

$$S_M \geq K_C \frac{P_{yz}}{\cos\varphi} \quad (1.10)$$

式中  $P_{yz}$ ——用户的安装容量，kVA；

$K_C$ ——修正系数，一般取 0.5~0.8。

### 3. 变压器型式选择

在 220~330kV 具有三种电压等级的变电站（所）中，如通过主变压器各侧绕组的功率均已达到该变压器额定容量的 15% 以上，或者第三绕组需要装设无功补偿设备时，均宜采用三绕组变压器。对 500kV 变电站（所），如与 220kV 及以下系统之间有功率联系时，可装设一台联络变压器。

#### 1.2.1.4 设计示例

##### 1. 各变电所运算负荷的计算

各 110kV 变电所的负荷情况见表 1.4。下面以变电所 1 的最大负荷情况为例进行计算。

因变电所 1 的一级负荷和二级负荷所占比例较大，为保证其供电可靠性，需选用两台主变压器并列运行，变电所 1 最大运算负荷（补偿前）为  $S_{M1} = \frac{45}{0.95} = 47.37(\text{MVA})$ 。读者可以仿照以上计算方法，计算出各变电所的最大、最小运算负荷。计算结束后，可将这些数据填入表 1.5 中。

将表 1.5 中变电所 1 的最大运算负荷  $S_{M1} = 47.37\text{MVA}$  代入式 (1.8) 中，得变电所 1 主变压器的总安装容量为  $S_{e\min} \geq 1.4S_M = 1.4 \times 47.37 = 66.32(\text{MVA})$ ，考虑到变压器过负荷能力不得超过其额定容量 15% 的规定，该变电所一台主变压器容量至少应为 28.84MVA。类似地，可计算得到其余两个变电所的单台变压器计算容量。

表 1.4 各 110kV 变电所负荷情况一览表

项 目	地 点		
	变电所 1	变电所 2	变电所 3
最大负荷/最小负荷 (MW)	45/27	52/35	30/18
功率因数 (补偿前/补偿后)	0.95/0.98	0.96/0.99	0.93/0.97
最大负荷利用小时数 (h)	4000	4800	4500
低压母线电压 (kV)	10	35	10
一级负荷、二级负荷所占比例 (%)	70	73	70



表 1.5 各 110kV 变电所运算负荷一览表

项 目	地 点		
	变电所 1	变电所 2	变电所 3
变电所最大负荷 (MW)	45	52	30
补偿前功率因数	0.95	0.96	0.93
最大运算负荷 $S_M$ (MVA)	47.37	54.17	32.26
单台变压器的计算容量 (MVA)	28.84		
最小运算负荷 (MVA)			

## 2. 各变电所主变压器的选取

由于各变电所负荷中一级负荷和二级负荷比例较大,为满足其供电可靠性,各变电所应分别装设两台三相油浸风冷有载调压变压器。根据表 1.5 中所示的各变电所单台变压器最大计算容量选择变压器型号及容量,选取结果及其技术参数见表 1.6。

表 1.6 各变电所主变压器选择结果及其技术参数表

变电所	运算负荷 (MVA)	变压器计算容量 $S_e$ (MVA)	选用的变压器型号	变压器技术参数					
				短路损耗 (kW)	短路阻抗 (%)	空载损耗 (kW)	空载电流 (%)	额定变比	参考价格 (万元/台)
1	47.37	28.84	SFZL7-31500	148	10.5	42.2	1.1	110±8×1.25% /11	100
2	54.17	32.97	SFZQ7-40000	174	10.5	50.5	1.0		119
3	32.26	19.64	SFZL7-20000	104	10.5	30	1.2		80

1.2.2 变压器  $\Gamma$  形等值电路1.2.2.1 变压器  $\Gamma$  形等值电路及其参数

变压器  $\Gamma$  形等值电路中,通常将励磁支路放在电源侧,其等值电路的两侧端口为同一电压等级,如图 1.4 (b) 所示。等值电路中,表征变压器的参数包括电阻  $R_T$  ( $\Omega$ )、电抗  $X_T$  ( $\Omega$ )、电导  $G_T$  (S) 和电纳  $B_T$  (S),这四个参数的引入分别代表变压器工作时呈现的不同物理现象,因而均具有特定的物理含义。变压器参数的计算需依据变压器短路试验、空载试验测得的数据,即

$$\left. \begin{aligned} R_T &= \frac{\Delta P_k V_{TN}^2}{1000 S_{TN}^2} \\ X_T &= \frac{V_s \% V_{TN}^2}{100 S_{TN}} \\ G_T &= \frac{\Delta P_0}{1000 V_{TN}^2} \\ B_T &= \frac{I_0 \% S_{TN}}{100 V_{TN}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

式中  $\Delta P_k$ 、 $\Delta P_0$ ——变压器的负载损耗和空载损耗, kW;  
 $V_s \%$ 、 $I_0 \%$ ——变压器的短路阻抗和空载电流, %;



$S_{TN}$ ——变压器的额定容量, MVA;

$V_{TN}$ ——变压器的额定电压, kV。

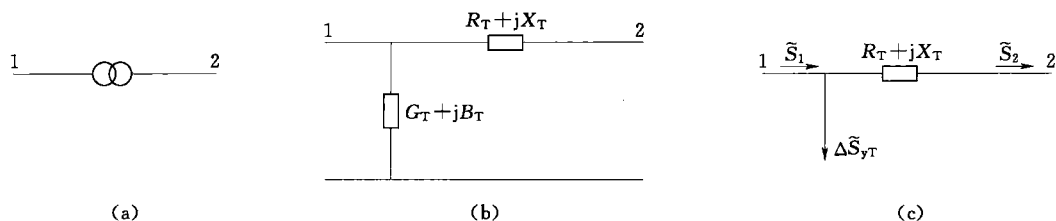


图 1.4 双绕组变压器示意图及其等值电路

(a) 变压器示意图; (b) 变压器  $\Gamma$  形等值电路; (c) 潮流计算用变压器等值电路

当需要把变压器参数归算到其中一侧(基本侧)时,式(1.11)中就要代入基本侧的额定电压。通常,变压器的四个参数均需归算到同一侧。

潮流计算中,变压器对地励磁支路常可用其对应的功率损耗表示,如图 1.4 (c) 所示。变压器励磁支路功率损耗(空载损耗)  $\Delta \tilde{S}_{yT}$  近似计算为

$$\Delta \tilde{S}_{yT} = \Delta P_{yT} + j\Delta Q_{yT} = \frac{\Delta P_0}{1000} + j \frac{I_0 \%}{100} S_{TN} \text{ (MVA)} \quad (1.12)$$

式中  $\Delta P_{yT}$ ——变压器对地支路的有功功率损耗, MW;

$\Delta Q_{yT}$ ——变压器对地支路的无功功率损耗, Mvar。

需要注意的是,图 1.4 (b) 所示为变压器不完全等值电路,因而它不反映变压器变比  $k$  这一参数。为解决这个问题,可在此模型的基础上进一步完善,使其变为完全模型,即表示为  $\Gamma$  形+理想变压器的等值电路。变压器完全等值电路如图 1.5 所示,图中参数均归算到 1 侧,  $k_T$  为变压器 1 次侧与 2 次侧变压器分接头电压之比(简称为实际变比)。

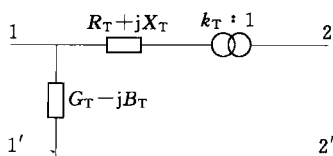


图 1.5 变压器完全等值电路  
(参数归算到 1 侧)

### 1.2.2.2 示例

下面以表 1.6 中变电所 1 为例,分析两台变压器并列运行时变压器参数计算方法。变压器参数要求归算到 110kV 侧,利用式(1.11),合并后的变压器参数为

$$\text{电阻} \quad R_T = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta P_k V_{TN}^2}{1000 S_{TN}^2} = \frac{1}{2} \times \frac{148 \times 110^2}{1000 \times 31.5^2} = 0.9 (\Omega)$$

$$\text{电抗} \quad X_T = \frac{1}{2} \times \frac{V_s \% V_{TN}^2}{100 S_{TN}} = \frac{1}{2} \times \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 31.5} = 20.17 (\Omega)$$

$$\text{电导} \quad G_T = 2 \times \frac{\Delta P_0}{1000 V_{TN}^2} = 2 \times \frac{42.2}{1000 \times 110^2} = 6.98 \times 10^{-6} (\text{S})$$

$$\text{电纳} \quad B_T = 2 \times \frac{I_0 \% S_{TN}}{100 V_{TN}^2} = 2 \times \frac{1.1 \times 31.5}{100 \times 110^2} = 57.27 \times 10^{-6} (\text{S})$$

### 1.2.3 变压器 $\pi$ 形等值电路

变压器  $\pi$  形等值电路是在变压器  $\Gamma$  形完全等值电路(图 1.5)基础上构建的,因而它本身可以反映变压器的全部物理现象,包括变换电流、变换电压的功能。变压器  $\pi$  形等值

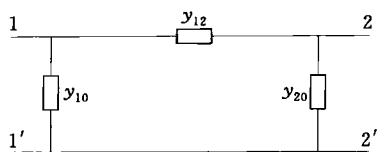


图 1.6 变压器  $\pi$  形等值电路

电路, 如图 1.6 所示。

变压器  $\pi$  形等值电路中, 三条支路的参数可按式 (1.13) 计算。与  $\Gamma$  形等值电路不同, 这些参数是由两个端口的电压、电流方程推导而来的, 故没有特定的物理含义。需要注意的是, 变压器  $\pi$  形等值电路中两侧端口的电压等级是不同的。

$$\left. \begin{aligned} y_{10} &= \frac{1-k_T}{Z_T k_T^2} \\ y_{12} &= \frac{1}{Z_T k_T} \\ y_{20} &= \frac{k_T-1}{Z_T k_T} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

### 1.2.4 变压器模型讨论

电力系统是由多个电压等级的电气设备组成的, 在制作其等值电路时, 变压器采用何种模型将直接影响到系统元件参数的计算及潮流分析方法。手算潮流时, 变压器模型可以根据需要, 选择  $\Gamma$  形等值电路或  $\Gamma$  形+理想变压器等值电路。

若变压器采用  $\Gamma$  形等值电路, 则表示多电压等级的等值电路中不包含变压器的变比, 因而等值电路中所有参数均要求归算到同一个电压等级下。若变压器采用  $\Gamma$  形+理想变压器等值电路, 不同电压等级已由变压器变比表示出来, 因而等值电路中各元件参数可以根据元件所处电压等级的不同有选择性地归算。

变压器的  $\pi$  形等值电路可以体现电压变化, 在多电压等级网络计算中采用这种变压器模型后, 就不必进行参数和变量的归算, 因而常在利用计算机进行电力系统分析时采用。

## 1.3 多电压等级电力网元件参数归算

凡涉及多电压等级电力网的计算, 必须将网络中所有参数和变量归算到同一电压等级下。多电压等级电力网元件的参数归算分为有名制归算、标么值归算两种。

### 1.3.1 有名制归算

电力系统分析中, 常用的参数和变量的归算可按式 (1.14) 进行。

$$\left\{ \begin{aligned} R' &= R(k_1 k_2 \cdots k_n)^2, & X' &= X(k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \\ G' &= G \left( \frac{1}{k_1 k_2 \cdots k_n} \right)^2, & B' &= B \left( \frac{1}{k_1 k_2 \cdots k_n} \right)^2 \\ V' &= V(k_1 k_2 \cdots k_n), & I' &= I \left( \frac{1}{k_1 k_2 \cdots k_n} \right) \end{aligned} \right. \quad (1.14)$$

式 (1.14) 中, 不带“'”为归算前参数, 加“'”为归算后参数,  $k_i$  为参数归算时所用到的归算变比, 其值按式 (1.15) 确定。

$$k_i = \frac{\text{靠近基本侧的变压器分接头电压}}{\text{靠近被归算侧的变压器分接头电压}} \quad (1.15)$$



由式 (1.15) 可见, 当选取不同电压等级的基本侧时, 在参数归算中所用到的变比  $k_i$  可能大于 1, 也可能小于 1。显然, 这里的  $k_i$  与变压器变比有所不同, 被称为归算变比。

### 1.3.2 标幺值归算

元件参数标幺值归算方法有两种: 一种是把系统中所有元件都放在同一个基准电压下进行归算; 另一种是各元件在各自所处的电压等级下进行归算。

#### 1.3.2.1 同一基准电压下元件参数标幺值归算

选取系统的基准容量为  $S_B$  (MVA) 后, 将所有元件参数归算到选定的归算侧 (基本侧) 基准电压  $V_B$  (kV) 下, 再把归算后的元件电抗  $X'$  ( $\Omega$ ) 除以基本侧的基准阻抗  $Z_B$  ( $\Omega$ ), 即可得到归算到同一电压基准下的元件电抗标幺值  $X_*$ , 其计算公式可表示为

$$X_* = \frac{X'}{Z_B} = X' \frac{S_B}{V_B^2} \quad (1.16)$$

式中  $X'$ ——元件电抗归算到基本侧所在电压等级时的有名值,  $\Omega$ 。

#### 1.3.2.2 元件在各自所处电压等级下参数标幺值归算

首先, 将选定的基本侧基准电压  $V_B$  (kV) 归算到电力网中其他各电压等级下, 而元件参数本身保留原电压等级下的数值不变, 然后, 按元件所处电压等级的基准电压计算出归算后的元件参数标幺值。仍以元件电抗标幺值的计算为例, 其电抗标幺值  $X_*$  的计算式为

$$\left. \begin{aligned} X_* &= \frac{X}{Z_{Bi}} \\ Z_{Bi} &= \frac{V_{Bi}^2}{S_B} \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

式中  $X$ ——元件在其原电压等级下的电抗有名值 (额定值),  $\Omega$ ;

$Z_{Bi}$ ——元件所处电压等级下的阻抗基准值,  $\Omega$ ;

$V_{Bi}$ ——由基本侧  $V_B$  归算到元件所处电压等级下的电压归算值, kV;

$S_B$ ——系统的基准容量, MVA。

### 1.3.3 多电压等级电力系统等值电路制作

多电压等级的电力系统等值电路有两种, 分别是不含磁耦合关系的等值电路和含磁耦合关系的等值电路。

若系统中的变压器采用不含变压器变比  $k_T$  的  $\Gamma$  形等值电路模型, 则形成不含磁耦合关系的系统等值电路, 因而该等值电路中各元件参数均需归算到同一电压等级下。不含磁耦合关系的系统等值电路中, 线路和变压器参数的归算都是在相关变压器的某一变比下进行的, 因而当变压器变比  $k_T$  发生变化时, 与该变比  $k_T$  有关的所有参数都需要重新归算。显然, 不含磁耦合关系的系统等值电路存在明显的局限性。

含磁耦合关系的系统等值电路中, 变压器采用的是  $\Gamma$  形等值电路+理想变压器模型。由于该种变压器模型中含有变比  $k_T$ , 因而构成的系统等值电路中包含多电压等级, 而其中的参数对应着各自所处的电压等级, 元件参数计算不受变比  $k_T$  变化的影响。

含磁耦合关系的系统等值电路在应用时还可能出现另外一种情况, 需对其进行特殊处



理。在制作系统标么值等值电路时，若遇到变压器两侧分接头电压比不等于两侧基准电压之比时，该变压器变比需要改为非标准变比（变压器分接头电压比与变压器两侧基准电压比的比值），即此时虽然变压器变比的计算有所变化，但其作用与有名值模型中类似。

## 1.4 设计示例

### 1.4.1 设计任务

#### 1.4.1.1 设计内容及要求

计算如图 1.7 所示电力网中变压器、线路的额定参数（有名值）；选取变压器的不同模型，制作多电压等级的电力网等值电路。

#### 1.4.1.2 原始数据

图 1.7 所示的示例 110kV 电力网，其线路和变压器技术参数见表 1.7 和表 1.8。

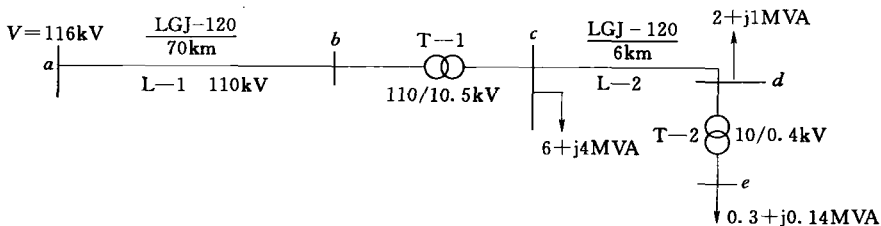


图 1.7 电力网接线示意图

表 1.7 示例 110kV 电力网中各线路技术参数表

线路	型号	电阻 $r(\Omega/\text{km})$	电抗 $x(\Omega/\text{km})$	充电功率 $Q(\text{Mvar}/100\text{km})$
L-1 (110kV)	LGJ-120	0.223	0.421	3.572
L-2 (10kV)	LGJ-120	0.223	0.348	0

表 1.8 示例 110kV 电力网中各变压器技术参数表

变压器	变压器型号	变压器分接头运行电压 (kV)	空载试验参数		短路试验参数	
			空载电流 $I_0\%$	空载损耗 $\Delta P_0$ (kW)	短路阻抗 $V_s\%$	负载损耗 $\Delta P_k$ (kW)
T-1	SFL7-20000/110	110+1×2.5%/10.5	0.9	27.5	10.5	104
T-2	S9-M-315	10-1×5%/0.4	1.1	0.67	4	3.65

### 1.4.2 设计步骤及分析

本节分析主要针对辐射型电网（如图 1.7 示例电力网），重点介绍采用不同变压器模型时，元件参数的归算方法，以使学生理解变压器模型及其在等值电路中的作用。若电力网中含有电磁环网，则变压器需采用  $\pi$  形等值电路较为合适，这时进行电力系统分析通常需要借助计算机完成，有关内容参见 2.2 节，这里不做详细分析。





### 1.4.2.1 计算网络各元件参数有名值

在计算示例电力网中各元件（包括变压器和线路）参数有名值时，先不考虑参数的归算，而是直接采用元件各自的额定电压来计算，此参数被称为原始参数或未归算参数，用该参数的下标可表示出参数所对应的电压等级。

#### 1. 变压器参数计算

以变压器 T—1（单台）参数有名值计算为例。设变压器 T—1 参数在其低压 10kV 侧，此时，只需将变压器参数计算式中 [式 (1.11)] 电压  $V_{TN}$  取为变压器 T—1 的低压额定电压 10.5kV 即可，有

$$\text{电阻} \quad R_{T1(10)} = \frac{\Delta P_k V_{TN}^2}{1000 S_{TN}^2} = \frac{104 \times 10.5^2}{1000 \times 20^2} = 0.029(\Omega)$$

$$\text{电抗} \quad X_{T1(10)} = \frac{V_s \% V_{TN}^2}{100 S_{TN}} = \frac{10.5 \times 10.5^2}{100 \times 20} = 0.58(\Omega)$$

$$\text{电导} \quad G_{T1(10)} = \frac{\Delta P_0}{1000 V_{TN}^2} = \frac{27.5}{1000 \times 10.5^2} = 2.5 \times 10^{-4}(\text{S})$$

$$\text{电纳} \quad B_{T1(10)} = \frac{I_0 \% S_{TN}}{100 V_{TN}^2} = \frac{0.9 \times 20}{100 \times 10.5^2} = 1.6 \times 10^{-3}(\text{S})$$

利用式 (1.12)，变压器 T—1 对地励磁支路也可以用励磁功率损耗表示，即

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{yT1} &= \Delta P_{yT1} + j \Delta Q_{yT1} = \frac{\Delta P_0}{1000} + j \frac{I_0 \%}{100} S_{TN} = \frac{27.5}{1000} + j \frac{0.9}{100} \times 20 \\ &= 0.0275 + j0.18(\text{MVA}) \end{aligned}$$

用同样的方法，可以计算出变压器 T—1 在 110kV 电压等级下的阻抗有名值（视为高压侧参数）为

$$Z_{T1(110)} = \frac{104 \times 110^2}{1000 \times 20^2} + j \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 20} = 3.15 + j63.53(\Omega)$$

而变压器 T—1 对地励磁功率损耗不变。

$$\text{读者不难证明, } Z_{T1(10)} = \frac{Z_{T1(110)}}{k_{T1}^2} = (3.15 + j63.53) \times \left(\frac{10.5}{110}\right)^2.$$

同理，变压器 T—2 在 0.4kV 电压等级下的阻抗有名值为  $Z_{T2(0.4)} = 0.0059 + j0.02(\Omega)$ ，其对地励磁功率可忽略不计，即  $\Delta \tilde{S}_{yT2} = \frac{0.67}{1000} + j \frac{1.1}{100} \times 0.315 \approx 0$ 。

#### 2. 线路参数计算

如表 1.7 中所示，线路的单位长度阻抗和充电功率均已知，只需将其与线路长度相乘即可得到线路参数有名值。以 110kV 线路 L—1 参数有名值计算为例，线路阻抗为

$$Z_{L1(110)} = R_{L1(110)} + jX_{L1(110)} = r l_1 + jx l_1 = 0.223 \times 70 + j0.421 \times 70 = 15.61 + j29.47(\Omega)$$

利用式 (1.3)，线路 L—1 两侧的电纳可以用其对应  $B/2$  的充电功率表示，即

$$-j \Delta Q_{L1} = -j \frac{1}{2} \times B V^2 = -j \frac{\Delta Q}{100} l_1 = -j \frac{1}{2} \times \frac{3.572}{100} \times 70 = -j1.25(\text{Mvar})$$

同样方法可得线路 L—2 的阻抗为  $Z_{L2(110)} = 1.34 + j2.09(\Omega)$ ，其对应的电压等级为 10kV。由于 L—2 对应的电压等级低，充电功率很小，因此计算时可忽略其对地支路。