

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力系统分析要点与习题

韦 钢 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力系统分析要点与习题

主 编 韦 钢

编 写 符 杨 曹 炜

阎晓霞

主 审 陆敏政



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

972139

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书共 11 章, 主要内容包括电力系统的等值电路、电力系统潮流分布的计算、电力系统有功功率平衡及频率调整、电力系统无功功率平衡及电压调整、电力系统的经济运行、同步发电机基本方程及三相短路分析计算、电力系统三相短路故障实用计算、电力系统不对称故障分析计算、电力系统的电磁功率特性、电力系统的静态稳定性、电力系统的瞬态稳定性等。

本书主要作为普通高等学校电气工程及其自动化专业的本科辅导教材, 也可作为高职高专相关专业的辅导教材。还可作为考研学生和从事电力系统及其自动化工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析要点与习题/韦钢主编. —北京: 中国电力出版社, 2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2574-4

I. 电... II. 韦... III. 电力系统—分析—高等学校—习题 IV. TM711-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 094355 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 20.5 印张 475 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.80 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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

前 言

本书是普通高等学校电气工程及其自动化专业主干课程“电力系统分析”的辅助教材。全书共分十一章：电力系统的等值电路、电力系统潮流分布的计算、电力系统有功功率平衡及频率调整、电力系统无功功率平衡及电压调整、电力系统的经济运行、同步发电机基本方程及三相短路分析计算、电力系统三相短路故障实用计算、电力系统不对称故障分析计算、电力系统的电磁功率特性、电力系统的静态稳定性、电力系统的瞬态稳定性，包括了本课程教学要求的所有内容。每一章的内容均由三部分构成。①内容要点：总结归纳本章节的主要知识点、分析计算方法和步骤，并阐述了易于困惑的难点。②例题分析：规范的详解本章内容的典型例题（即有局部性的小型例题，又有一定深度的综合例题），帮助学生提高解题能力，更好地掌握工程计算方法。③思考题与习题：汇编了一定数量的思考题，引导学生领会和思考本章内容的物理概念，丰富的习题供学生操练和巩固所学的知识，并附有习题的参考答案。

本书由上海电力学院韦钢担任主编。参加编写工作的有：上海电力学院的韦钢教授（第一、七、八章），符杨副教授（第九、十、十一章），曹炜副教授（第二、六章）、山西大学工程学院的阎晓霞副教授（第三、四、五章）。上海电力学院的陆敏政教授担任本书的主审。

在本书的编写过程中参考了许多同类教材和相关书目，在此向本书所引用参考书目的作者表示衷心感谢。本书的编写和验算还得到段建明、张美霞等老师，以及贺静、张子阳等研究生的帮助，在此也一并表示感谢。

由于编者水平有限，以及大量习题的验算工作，因此书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2004年5月

目 录

序

前言

第一章 电力系统的等值电路	1
内容要点	1
例题分析	6
思考题与习题	21
第二章 电力系统潮流分布计算	27
内容要点	27
例题分析	37
思考题与习题	57
第三章 电力系统有功功率平衡及频率调整	77
内容要点	77
例题分析	84
思考题与习题	93
第四章 电力系统的无功功率平衡和电压调整	97
内容要点	97
例题分析	107
思考题与习题	120
第五章 电力系统的经济运行	125
内容要点	125
例题分析	135
思考题与习题	150
第六章 同步发电机的基本方程及三相短路分析计算	155
内容要点	155
例题分析	165
思考题与习题	183
第七章 电力系统三相短路的实用计算	191
内容要点	191
例题分析	196
思考题与习题	213
第八章 电力系统不对称故障的分析计算	221
内容要点	221
例题分析	230

思考题与习题	256
第九章 电力系统的电磁功率特性	263
内容要点	263
例题分析	267
思考题与习题	276
第十章 电力系统静态稳定	281
内容要点	281
例题分析	287
思考题与习题	293
第十一章 电力系统瞬态稳定	300
内容要点	300
例题分析	304
思考题与习题	312
参考书目	318

第一章 电力系统的等值电路

内 容 要 点

电力系统运行状态的分析研究,主要有两种方法。一种是物理模拟方法,即通过实测或等效模拟系统的实验来进行分析研究。另一种是数学模拟方法,其主要步骤为:①建立描述电力系统各种运行状态的数学模型(即数学方程);②用数学方法和计算工具求解所建立的数学模型,求得在各种状态下的运行参数;③对求得的结果进行验证分析。随着计算机技术的发展,用数学模拟的方法进行电力系统分析研究,已越来越精确和全面。本课程主要介绍的是采用数学模拟的方法来分析和研究电力系统。

不论是根据电路理论的基本关系来推算电力系统的运行参数(通常指的“手算”方法),还是使用计算机来进行电力系统的分析计算,电力系统各元件及其连接方式,都必须用“等值电路”来表示。因此,在进行电力系统分析研究时,首先要研究电力系统各元件的电气参数和等值电路,以及整个电力系统的等值电路。

本章内容主要针对电力系统稳态(正常运行状态)时的等值电路(序参数及其等值电路将在后述)。电力系统在正常运行状态(稳态)时,可以认为三相是对称的。因此,在分析计算时只需要采用一相等值电路。

在进行电力系统各元件参数计算时,认为系统的频率保持恒定,即不计参数的频率特性。

一、输电线路的参数及等值电路

1. 单位长度的线路参数

(1) 电阻

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

式中 ρ ——导线电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$;

S ——导线载流部分截面积, mm^2 。

(2) 电抗

$$X_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega/\text{km}), \quad (1-2)$$

分裂导线

$$X_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_e} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega/\text{km})$$

式中 D_m ——三相导线重心几何均距, m;

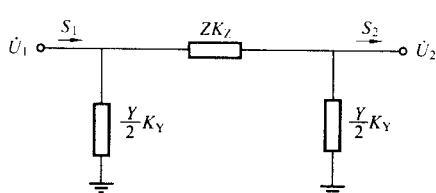
r ——导线半径;

r_e ——等效半径, m, $r_e = \sqrt[n]{r \cdot d^{n-1}}$ 。

(3) 电纳

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg(D_m/r)} \times 10^{-6} \quad (\text{s/km}) \quad (1-3)$$

(4) 电导



$$g_1 = \frac{\Delta P_g}{U_L^2} \quad (\text{S/km}), \quad (1-4)$$

式中 ΔP_g ——三相线路单位长度电晕损耗；

U_L ——线路运行电压。

工程计算中常忽略电导，即 $g_1 = 0$ 。

2. 输电线路参数及等值电路

各种电压等级的输电线路，可以采用集中参

图 1-1 输电线路等值电路

数表示的 π 型等值电路，如图 1-1 所示。

$$Z = (r_1 + jx_1) l = R + jx \quad (\Omega)$$

$$Y = (g_1 + jb_1) l = G + jB \quad (\text{S})$$

K_Z 、 K_Y 称为阻抗、导纳修正系数。在工程计算中，可以根据输电线路的电压等级和长度，选取不同的修正系数。

(1) 750km 以上架空线（通常 330kV 以上电压等级）或 300km 以上的电缆线路

$$K_Z = \frac{\text{sh} \sqrt{Z \cdot Y}}{\sqrt{Z \cdot Y}}$$

$$K_Y = \frac{2(\text{ch} \sqrt{Z \cdot Y} - 1)}{\sqrt{ZY} \cdot \text{sh} \sqrt{Z \cdot Y}}$$

(2) 300 ~ 750km 的架空线（通常 220kV 以上电压等级）或 100 ~ 300km 的电缆线路。

图 1-1 中， $K_Z Z = K_r R + jK_x X$ ； $K_Y \frac{Y}{2} = K_g \frac{G}{2} + jK_b \frac{B}{2}$ 。此时取

$$K_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1$$

$$K_x = 1 - \frac{l^2}{6} \left(x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right)$$

$$K_g = 0$$

$$K_b = 1 + \frac{l^2}{12} x_1 b_1$$

(3) 一般 35 ~ 220kV 的架空线，或 100km 以下的电缆线路

$$K_Z = 1$$

$$K_Y = 1$$

(4) 35kV 以下的架空线，可以近似略去导纳支路

$$K_Z = 1$$

$$K_Y = \infty$$

二、变压器参数及等值电路

(1) 双绕组变压器。

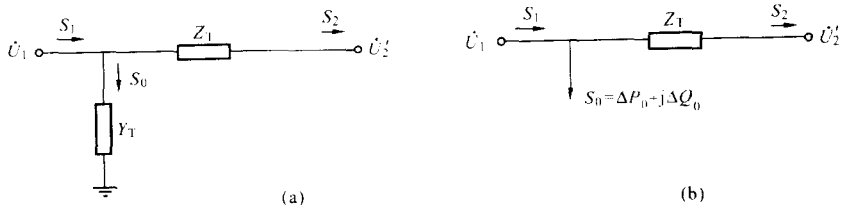


图 1-2 双绕组变压器等值电路

(a) 励磁支路以导纳表示；(b) 励磁支路以功率表示

1) 归算到一个电压等级的等值电路，如图 1-2 所示。

$$Z_T = R_T + jX_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_N^2}{1000 \cdot S_N^2} + j \frac{U_k \% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} \quad (\Omega) \quad (1-5)$$

$$Y_T = G_T - jB_T = \frac{\Delta P_0}{1000 \cdot U_N^2} - j \frac{I_0 \% \cdot S_N}{100 \cdot U_N^2} \quad (S) \quad (1-6)$$

式中单位为：\$U_N\$—kV，\$S_N\$—MVA，\$\Delta P_k\$ 和 \$\Delta P_0\$—kW。

2) 多电压等级（保留原电压等级）的等值电路，如图 1-3 所示。\$K\$ 为理想变压器变比。

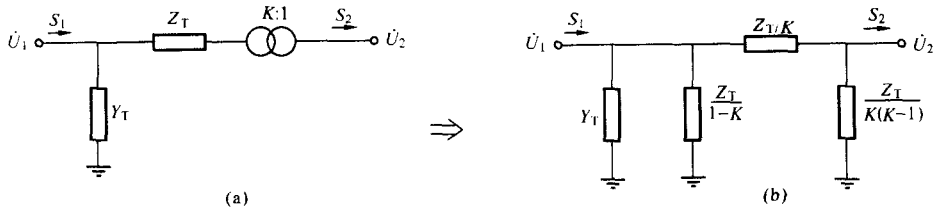


图 1-3 双绕组变压器多电压级表示等值电路

(a) 用接入理想变压器表示的多电压级等值电路；(b) 用阻抗表示的多电压级变压器等值电路

(2) 三绕组变压器：

1) 归算到一个电压等级的等值电路，如图 1-4 所示。

$$Z_{Ti} = R_{Ti} + jX_{Ti} = \frac{\Delta P_{ki} \cdot U_N^2}{1000 \cdot S_N^2} + j \frac{U_{ki} \% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} \quad (\Omega) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1-7)$$

$$Y_T = G_T - jB_T = \frac{\Delta P_0}{1000 \cdot U_N^2} - j \frac{I_0 \% \cdot S_N}{100 \cdot U_N^2} \quad (S) \quad (1-8)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta P_{k1} = \frac{1}{2} [\Delta P_{k(1-2)} + \Delta P_{k(3-1)} - \Delta P_{(2-3)}] \\ \Delta P_{k2} = \frac{1}{2} [\Delta P_{k(1-2)} + \Delta P_{k(2-3)} - \Delta P_{(3-1)}] \\ \Delta P_{k3} = \frac{1}{2} [\Delta P_{k(3-1)} + \Delta P_{k(2-3)} - \Delta P_{(1-2)}] \end{cases}$$

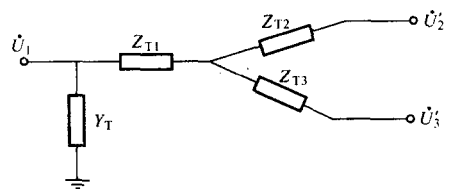


图 1-4 三绕组变压器等值电路

$$\begin{cases} U_{k1} \% = \frac{1}{2} [U_{k(1-2)} \% + U_{k(3-1)} \% - U_{k(2-3)} \%] \\ U_{k2} \% = \frac{1}{2} [U_{k(1-2)} \% + U_{k(2-3)} \% - U_{k(3-1)} \%] \\ U_{k3} \% = \frac{1}{2} [U_{k(3-1)} \% + U_{k(2-3)} \% - U_{k(1-2)} \%] \end{cases}$$

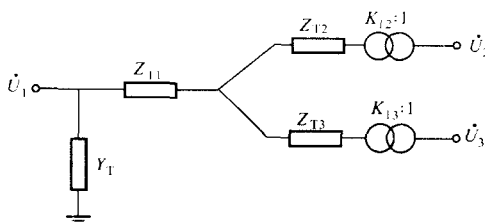


图 1-5 三绕组变压器用理想变压器表示的多电压等级的等值电路

注意：当三绕组变压器容量比不同时，要进行容量换算。

$$\begin{cases} \Delta P_{k(1-2)} = \Delta P'_{k(1-2)} \times \left(\frac{S_{1N}}{S_{2N}} \right)^2 \\ \Delta P_{k(2-3)} = \Delta P'_{k(2-3)} \times \left(\frac{S_{1N}}{\min\{S_{2N}, S_{3N}\}} \right)^2 \\ \Delta P_{k(3-1)} = \Delta P'_{k(3-1)} \times \left(\frac{S_{1N}}{S_{3N}} \right)^2 \end{cases}$$

2) 多电压等级的等值电路，如图 1-5、

图 1-6 所示 (K_{12} , K_{13} 为理想变压器变比)。

三、发电机、负荷的等值电路及参数

1. 发电机

发电机等值电路如图 1-7 (b) 所示。

$$\dot{E}_G = \dot{U}_G + \dot{I}_G \cdot \dot{Z}_G \quad (1-9)$$

2. 负荷

负荷等值电路，稳态计算时常用恒定功率或恒定阻抗表示，如图 1-8 所示。

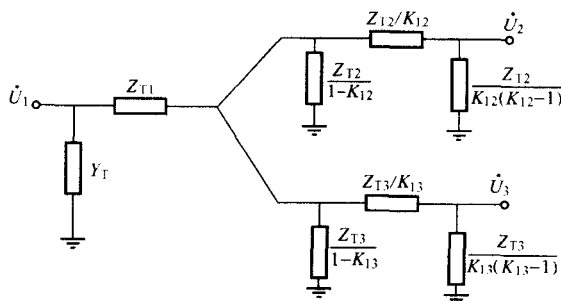


图 1-6 三绕组变压器用阻抗表示的多电压等级等值电路

$$S_L = P_L + jQ_L \quad Z_L = \frac{U_L^2}{S_L^2} \cdot P_L + j \frac{U_L^2}{S_L^2} \cdot Q_L = R_L + jX_L \quad (1-10)$$

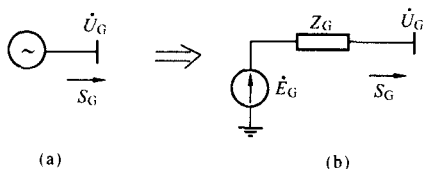


图 1-7 发电机等值电路

(a) 原始电路；(b) 等值电路

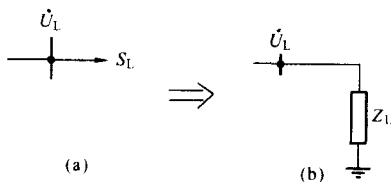


图 1-8 负荷的等值电路

(a) 以恒定功率表示；(b) 以恒定阻抗表示

四、电力系统的等值电路

电力系统是由发电机、变压器、输电线路、负荷等元件连接而成的，并具有多个电压等

级。在电力系统分析计算中,通常可以用两类等值电路表示:一类是对应于一个电压等级的等值电路(“手算”时常采用);另一类是对应于多个电压等级的等值电路(“计算机计算”时常采用)。

1. 对应于一个电压等级的等值电路

将电力系统各元件的等值电路按其接线的形式连接起来,即得到该系统的等值电路。其参数有两种表示形式:有名值表示和标幺值表示。

(1) 有名值表示的等值电路。首先确定一个基本电压级(等值电路对应的电压级),而后再将所有元件的参数均归算到对应于该电压级(归算时,变压器的变比取基本级与待归算级电压之比)。

$$\begin{cases} Z' = Z \times (K_1 \cdot K_2 \cdots K_n)^2 \\ Y' = Y \times \left(\frac{1}{K_1} \cdot \frac{1}{K_2} \cdots \frac{1}{K_n} \right)^2 \\ U' = U \times (K_1 \cdot K_2 \cdots K_n) \\ I' = I \times \left(\frac{1}{K_1} \cdot \frac{1}{K_2} \cdots \frac{1}{K_n} \right) \end{cases}$$

(2) 标幺值表示的等值电路

$$\text{标幺值} = \frac{\text{实际有名值 (任意单位)}}{\text{基准值 (与有名值同单位)}}。$$

计算用标幺值表示的电力系统等值电路中的参数,可以有两种途径。

1) 将各元件参数的有名值先归算到基本级,再除以对应基本级的基准值。其特点是:有统一的基准值,但众多参数的归算较繁。另外,计算得到各支路电流、各节点电压的标幺值后,还必须回归原电压等级。

2) 在确定了基本级的基准值之后,按变压器的实际变比归算,求出对应于各电压级的基准值,然后再将未经归算的各元件有名值参数除以自身电压级的基准值。其特点是:各电压级的基准值不同,但参数不必归算。计算结果化成有名值时只要将标幺值乘以自身电压级的基准值即可。

2. 对应于多个电压等级的等值电路

此种等值电路在将各元件等值电路连接起来时,只需将变压器等值电路采用多电压级的等值电路表示(即 π 型等值电路)即可。此时,所有电压等级的参数均不必进行归算。

3. 近似计算时电力系统等值电路的简化

电力系统稳态计算时,不论是采用有名值制还是标幺制,在各元件参数计算或电压级的归算中,均是采用各元件的额定电压和变压器的额定变比,由此得到的等值电路称为精确计算的等值电路。

在电力系统的故障计算时,为了简化计算,在满足工程对精度要求的前提下,允许对各元件的参数计算和等值电路作某些简化,即所谓的“近似”计算。近似计算主要指的是:①在元件参数的计算和归算(所有变压器的变比)以及标幺制的基准值选取等,所有用到的电压均可采用对应电压等级的平均额定电压来进行计算。②忽略不计各元件阻抗参数中的电

阻, 以及对地的导纳支路。

例 题 分 析

【例 1-1】 有一长度为 100km 的 110kV 输电线路, 导线型号为 LGJ-185, 导线水平排列, 相间距离为 4m, 求线路参数及输电线路的等值电路。

解 线路单位长度电阻为

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{185} = 0.17 \text{ } (\Omega/\text{km})$$

由手册查得 LGJ-185 的计算直径为 19mm, 三相导线的几何均距为

$$D_m = \sqrt{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} = \sqrt[3]{2 \times 4000^3} = 5040 \text{ (mm)}$$

线路单位长度电抗为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 = 0.1445 \lg \frac{5040}{0.5 \times 1.9} + 0.0157 = 0.409 \text{ } (\Omega/\text{km})$$

线路单位长度电纳为

$$b_1 = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{D_m}{r}} = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{5040}{0.5 \times 19}} = 2.78 \times 10^{-6} \text{ (S/km)}$$

不计电导参数, 全线路的集中参数为

$$Z = (r_1 + jx_1) l = 100 \times (0.17 + j0.409) = 17 + j40.9 \text{ } (\Omega)$$

$$Y = jb_1 l = j2.78 \times 10^{-6} \times 100 = j278 \times 10^{-6} \text{ (S)}$$

该线路等值电路的修正系数应取为: $K_Z = 1$ 、 $K_Y = 1$, 则等值电路如图 1-9 所示。

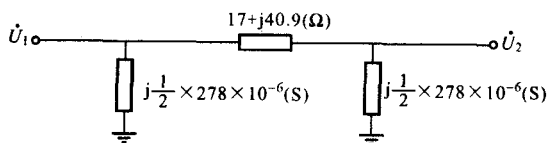


图 1-9 线路等值电路

【例 1-2】 有一台 SF11-20000/110 型降压变压器向 10kV 网络供电。铭牌上给出的试验数据为: $\Delta P_k = 135\text{kW}$, $u_k\% = 10.5$, $\Delta P_0 = 22\text{kW}$, $I_0\% = 0.8$, $K = 110/11$, 试求归算到高压侧的变压器参数, 并作等值电路。

解 归算到高压侧的变压器等值电路如图 1-10 所示。参数为

$$R_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_N^2}{1000 \cdot S_N^2} = \frac{135 \times 110^2}{1000 \times 20^2} = 4.08 \text{ } (\Omega)$$

$$X_T = \frac{u_k\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 20} = 63.52 \text{ } (\Omega)$$

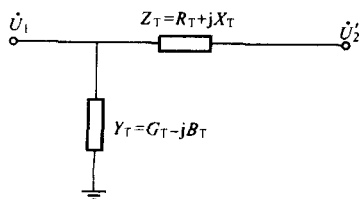


图 1-10 变压器等值电路

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{100 \cdot U_N^2} = \frac{22}{100 \times 110^2} = 1.82 \times 10^{-6} (\text{S})$$

$$B_T = \frac{I_0\% \cdot S_N}{100 \cdot U_N^2} = \frac{0.8 \times 20}{100 \times 110^2} = 13.2 \times 10^{-6} (\text{S})$$

【例 1-3】 有一条长度为 400km 的 330kV 架空输电线路，导线水平排列，相间距离 8m，每相采用 $2 \times \text{LGJQ}-300$ 分裂导线，分裂间距为 400mm，试求线路参数及等值电路。

解 线路单位长度电阻为

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{2 \times 300} = 0.053 \quad (\Omega/\text{km})$$

由手册查得 LGJQ-300 导线的计算直径为 23.5mm，分裂导线三相几何均距为

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} = \sqrt[3]{2 \times 8000^3} = 10079 \quad (\text{mm})$$

每相导线的等值半径为

$$r_e = \sqrt[n]{r \times d_{n-1}} = \sqrt[2]{\frac{23.5}{2} \times 400} = 68.56 \quad (\text{mm})$$

线路单位长度电抗为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_n} + \frac{0.0157}{n} = 0.1445 \lg \frac{10079}{68.56} + \frac{0.0157}{2} = 0.31 \quad (\Omega/\text{km})$$

线路单位长度的电纳为

$$b_1 = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{D_m}{r_e}} = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{10079}{68.56}} = 3.5 \times 10^{-6} \quad (\text{S}/\text{km})$$

不计电导，全线路集中参数为

$$R = r_1 l = 0.053 \times 400 = 21.2 \quad (\Omega)$$

$$X = x_1 l = 0.31 \times 400 = 124 \quad (\Omega)$$

$$B = b_1 l = 3.5 \times 10^{-6} \times 400 = 14 \times 10^{-4} \quad (\text{S})$$

该线路等值电路的修正系数应取为

$$K_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1 = 1 - \frac{400^2}{3} \times 0.31 \times 3.5 \times 10^{-6} = 0.942$$

$$K_x = 1 - \frac{l^2}{6} \left(x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right) = 1 - \frac{400^2}{6} \times \left(0.31 \times 3.5 \times 10^{-6} - \frac{0.053^2 \times 3.5 \times 10^{-6}}{0.31} \right) = 0.972$$

$$K_b = 1 + \frac{l^2}{12} x_1 b_1 = 1 + \frac{400^2}{12} \times 0.31 \times 3.5 \times 10^{-6} = 1.0145$$

则

$$K_r R + j K_x X = 0.942 \times 21.2 + j 0.972 \times 124 = 19.97 + j 120.5 \quad (\Omega)$$

$$j \frac{1}{2} K_b B = j \frac{1}{2} \times 1.0145 \times 14 \times 10^{-4} = j 7.1 \times 10^{-4} \quad (\text{S})$$

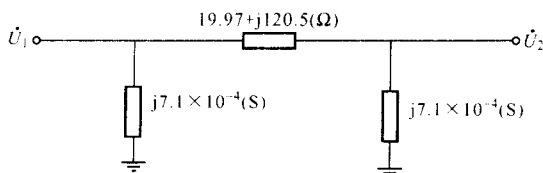
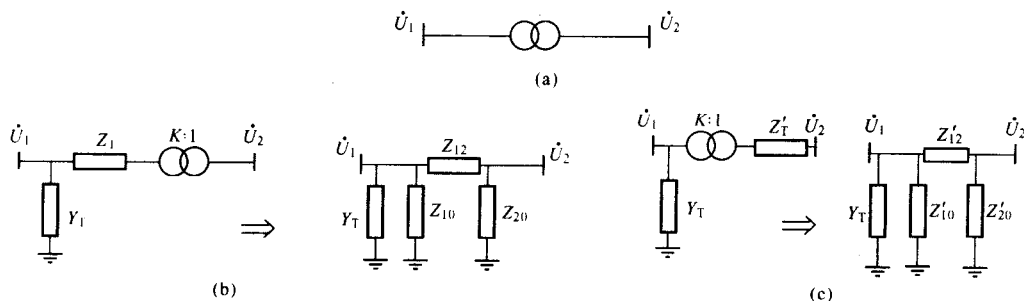


图 1-11 等值电路

因此本例题的输电线路可以用如图 1-11 所示等值电路表示。

【例 1-4】如图 1-12 (a) 所示双绕组变压器，铭牌上给出的试验数据为： $\Delta P_k = 135\text{kW}$ ， $u_k\% = 10.5$ ， $\Delta P_0 = 22\text{kW}$ ， $I_0\% = 0.8$ ， $K = 110/11$ ， $S_N = 20\text{MVA}$ 。试作：①变压器阻抗 Z_T 归算到高压侧时的 π 型等值电路；②变压器阻抗 Z_T 归算到低压侧时的 π 型等值电路。

图 1-12 变压器 π 型等值电路

解 (1) 作图 1-12 (a) 变压器的等值电路如图 1-12 (b) 所示。可以计算得到

$$Z_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_N^2}{1000 \cdot S_N^2} + j \frac{u_k\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = 4.08 + j63.52 \quad (\Omega)$$

$$Y_T = \frac{\Delta P_0}{1000 \cdot U_N^2} - j \frac{I_0\% \cdot S_N}{100 \cdot U_N^2} = (1.82 - j13.2) \times 10^{-6} \quad (\text{S})$$

$$Z_{12} = Z_T / K = (4.08 + j63.52) / 10 = 0.408 + j6.352 \quad (\Omega)$$

$$Z_{10} = Z_T / (1 - K) = (4.08 + j63.52) / (1 - 10) = -0.45 - j7.06 \quad (\Omega)$$

$$Z_{20} = Z_T / [K(K - 1)] = (4.08 + j63.52) / [10 \times (10 - 1)] = 0.045 + j0.706 \quad (\Omega)$$

(2) 作图 1-12 (a) 变压器等值电路如图 1-12 (c) 所示，可以计算得到

$$Z'_T = Z_T / K^2 = 0.0408 + j0.6352 \quad (\Omega)$$

$$Z'_{12} = K Z'_T = K \times Z_T / K^2 = Z_T / K = 0.408 + j6.352 \quad (\Omega)$$

$$Z'_{10} = \frac{K^2 Z'_T}{1 - K} = \frac{K^2 \times Z_T / K^2}{1 - K} = Z_T / (1 - K) = -0.45 - j7.06 \quad (\Omega)$$

$$Z'_{20} = \frac{K Z'_T}{K - 1} = \frac{K \times Z_T / K^2}{K - 1} = Z_T / [K(K - 1)] = 0.045 + j0.706 \quad (\Omega)$$

可见 (1) 和 (2) 的计算结果完全相同。

【例 1-5】三相变压器型号为 SFSL-20000，变比为 110/38.5/10.5，容量比为 100/100/50。 $\Delta P_{k\max} = 185\text{kW}$ ， $\Delta P_0 = 52.6\text{kW}$ ， $I_0\% = 3.6$ ， $u_{k(1-2)}\% = 10.5$ ， $u_{k(1-3)}\% = 17.5$ ，

$u_{k(2-3)}\% = 6.5$ 。计算变压器参数，并作等值电路。

解 已知三绕组变压器的最大短路损耗 ΔP_{kmax} ，是指两个 100% 容量绕组中流过额定电流，另一个 100% 或 50% 容量绕组空载时的损耗。由这个 ΔP_{kmax} 可以求得两个 100% 容量绕组的电阻。然后根据“按同一电流密度选择各绕组导线截面积”的变压器设计原则，可得另一个 100% 容量绕组的电阻——就等于这两个绕组之一的电阻，或另一个 50% 容量绕组的电阻——就等于这两个绕组之一电阻的二倍，即

$$R_{T(100\%)} = \frac{\Delta P_{kmax} \cdot U_N^2}{2000 \cdot S_N^2}$$

$$R_{T(50\%)} = 2R_{T(100\%)}$$

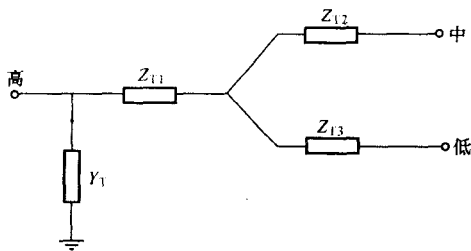


图 1-13 变压器等值电路

因此，作变压器的等值电路如图 1-13 所示。

变压器参数为

$$\begin{aligned} Y_T &= G_T - jB_T = \frac{\Delta P_0}{1000 \cdot U_N^2} - j \frac{I_0\% \cdot S_N}{100 \cdot U_N^2} \\ &= \frac{52.6}{1000 \times 110^2} - j \frac{3.6 \times 20}{100 \times 110^2} = (4.3 - j59.5) \times 10^{-6} \quad (\text{S}) \end{aligned}$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_{kmax} \cdot U_N^2}{2000 \cdot S_N^2} = \frac{185 \times 110^2}{2000 \times 20^2} = 2.8 \quad (\Omega)$$

$$R_{T2} = R_{T1} = 2.8 \quad (\Omega)$$

$$R_{T3} = 2R_{T1} = 5.6 \quad (\Omega)$$

$$u_{k1}\% = \frac{1}{2} [u_{k(1-2)}\% + u_{k(1-3)}\% - u_{k(2-3)}\%] = \frac{1}{2} [10.5 + 17.5 - 6.5] = 10.75$$

$$u_{k2}\% = \frac{1}{2} [u_{k(1-2)}\% + u_{k(2-3)}\% - u_{k(1-3)}\%] = \frac{1}{2} [10.5 + 6.5 - 17.5] = -0.25$$

$$u_{k3}\% = \frac{1}{2} [u_{k(2-3)}\% + u_{k(1-3)}\% - u_{k(1-2)}\%] = \frac{1}{2} [17.5 + 6.5 - 10.5] = 6.75$$

$$X_{T1} = \frac{u_{k1}\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{10.75 \times 110^2}{100 \times 20} = 65.04 \quad (\Omega)$$

$$X_{T2} = \frac{u_{k2}\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{-0.25 \times 110^2}{100 \times 20} = -1.51 \quad (\Omega)$$

$$X_{T3} = \frac{u_{k3}\% \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{6.75 \times 110^2}{100 \times 20} = 40.8 \quad (\Omega)$$

$$Z_{T1} = R_{T1} + jX_{T1} = 2.8 + j65.04 \quad (\Omega)$$

$$Z_{T2} = R_{T2} + jX_{T2} = 2.8 - j1.51 \quad (\Omega)$$

$$Z_{T3} = R_{T3} + jX_{T3} = 5.6 + j40.8 \quad (\Omega)$$

【例 1-6】 已知某三绕组变压器铭牌上的参数有：额定容量 120MVA，容量比为 100/100/50，变比为 220/121/10.5kV， $I_0\% = 0.9$ ， $\Delta P_0 = 123.1\text{kW}$ ， $\Delta P_{k(1-2)} = 660\text{kW}$ ， $\Delta P'_{k(3-1)}$