



普通高等教育“十二五”规划教材

电气工程及其自动化专业

现代电力工程与技术基础 (下册)

唐 忠 主 编
杨俊杰 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013070393

TM7
88
V2



普通高等教育“十二五”规划教材

主要内容

现代电力工程与技术基础 (下册)

主 编 唐 忠
副主编 杨俊杰
编 写 江友华 朱 武 曹渝昆
黄 青 谢 涛 陈 琳
主 审 李卫国



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1678872

TM7
88
V2

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书分为上、下两册，是一套全面系统地介绍现代电力工程与技术基础知识的书籍。上册包括电力发展概论和现代电力工程概论，作为电力工程基础理论，从发、输、变、配、用等环节出发，紧密结合技术发展和工程实际情况，使读者对电力工程知识建立起完整的知识体系；下册包括电力系统的现代控制技术和信息技术，作为现代电力技术基础理论，使读者充分了解现代控制技术、计算机技术、通信技术、管理与信息化技术等电力系统中的广泛应用及其所形成的电力新技术。本书将凸显环节与系统相结合、通俗与专业相结合、强电与弱电相结合、传统与现代相结合的编写理念。

本书主要作为电气信息类相关专业的教材和参考书，还可作为电力生产、运行、管理等人员的技术参考书，同时还可供与电能相关的各行各业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力工程与技术基础. 下册 / 唐忠主编. —北京: 中国电力出版社, 2013.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4755-7

I. ①现… II. ①唐… III. ①电力工程—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 173949 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 429 千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

前言

在整个能源体系中,电能之所以成为最重要的能源,是因为其他许多形式的能源都可以转化为电能,而电能又是最方便传输和应用的能源。因此,自1875年世界上最早的发电厂诞生以来,电力技术的不断发展,电能生产的日益增长,迅速改变了社会生产面貌,深刻影响了社会经济发展和人们的生活方式。以至于在当今社会,行行离不开电,人人少不了电。既然如此,那么了解电、认识电、用好电就成为现代生活和工作不可缺少的必备知识和能力,尤其对于高等学校各工科专业的学生更为需要。

要真正了解、学习好现代电力技术知识,除了学习传统经典电力技术外,还必须前后延伸。向前延伸看历史,了解电力技术的学科基础,了解电力技术发展的历程;向后延伸看时代,了解当今电力技术的时代特征和发展趋势。只有通过这种前瞻后顾,对电力技术的了解才具有系统性、全貌性和时代性。

然而,目前的教材和专著都比较专业化、专一化、专注化,缺少系统性、全貌性、通俗性。为此,作者在编写本书时进行了一些新的尝试。本书对接现代电力的发展及时代要求,分为上、下两册。上册由电力发展概论和现代电力工程概论两大模块构成,让读者对电力工程知识建立起完整的知识体系。与传统教材比较,在电力工程基础上,增加了电力学科和技术发展的内容,以电力学科知识和技术发展认知为铺垫,让读者理清知识脉络、了解技术发展历程、建立起完整的知识体系,很好地解决向前延伸的问题;下册由电力系统的现代控制技术和信息技术组成,作为现代电力技术基础,重点让读者充分了解现代控制技术、计算机技术、通信技术、管理与信息化技术等电力系统中的广泛应用,及其所形成的电力新技术。当今社会是信息社会,以计算机、电子、通信、信息为依托的信息技术促进了工业结构优化升级。以信息化带动工业化、以工业化促进信息化,深化二者的融合,走新型工业发展道路已成为我国经济改革的大方向。智能电网就是信息化与工业化深度融合在电力工业上的结晶。但目前还没有比较全面完整的有关电力信息技术的教材。我们根据现代电力技术的时代特征,在下册的传统的电力系统控制技术的基础上,增加了电力信息技术,从而解决了向后延伸展示时代特征的问题。本书通过这种前后延伸的组合,体现了“环节与系统相结合,通俗与专业相结合,强电与弱电相结合,传统与现代相结合”的教材特色,希望对读者建立系统完整的知识体系有一定帮助。

本书参考了目前国内外有关电力工程技术的多部专著、论文以及研究文献,并在编者多年实际工作经验的基础上,整合了近年来的部分科研成果。全书由上海电力学院唐忠教授任主编,杨俊杰教授任副主编,上海电力学院江友华副教授、朱武教授、曹渝昆博士参加编写和修改整理工作,并指导研究生黄青、谢涛、陈琳对本书稿的整理、校对付出了大量时间和精力。崔昊杨博士、魏春娟博士和研究生王路鹏、高巍也参与了资料收集、编写和校对工作。感谢华北电力大学的李卫国教授、长沙理工大学的李景禄教授对本书提出的宝贵意见。在编写过程中还得到了湖南、湖北、广东、上海、浙江、江西、安徽电力部门许多相关专业技术人员的帮助和支持,在此一并致以诚挚的感谢。

由于编者水平有限，加上成书时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请选用本书的教师、学生、工程技术人员和读者批评指正。请将您宝贵意见发至 tangzhong64@163.com 邮箱。

编者

2013年5月于上海电力学院

目 录

前言

第1篇 电力系统运行分析与控制技术概论

第1章 电力系统计算分析	2
1.1 电力系统数学模型	2
1.2 电力系统网络方程及其求解	16
1.3 电力系统潮流计算	22
1.4 电力系统模拟与数字仿真	43
思考题	49
第2章 电力系统稳定性分析	51
2.1 电力系统稳定性概论	51
2.2 电力系统静态稳定性分析	60
2.3 电力系统暂态稳定性分析	64
2.4 提高稳定性的方法	71
思考题	77
第3章 电力系统频率与电压控制技术	79
3.1 电力系统频率指标及其影响	79
3.2 电力系统频率调整控制	83
3.3 电力系统电压指标及其影响	88
3.4 电力系统电压调整控制	93
思考题	99
第4章 电力系统优化调度与经济运行	100
4.1 电力系统调度自动化	100
4.2 电网调度自动化系统分层控制	101
4.3 电力系统调度自动化攻略	109
4.4 电厂发电成本与经济特性	122
4.5 输电线路损耗分析	126
4.6 电力系统经济运行	129
思考题	132
第5章 电力电子技术及其应用	133
5.1 电力电子技术基础	133
5.2 整流技术	136
5.3 逆变技术	150
5.4 滤波与补偿技术	160

5.5 新能源发电并网技术	166
5.6 储能技术	170
思考题	173

第2篇 电力信息技术

第6章 电力信息技术概述	176
6.1 电力信息技术基础	176
6.2 电力信息技术的分类与作用	179
6.3 我国电力信息技术的现状与发展趋势	182
思考题	185
第7章 电力信息采集系统	186
7.1 信息采集技术基础	186
7.2 电力信息采集系统构成	187
7.3 电厂 DCS 系统	192
7.4 电网 SCADA 系统	196
7.5 电力信息可视技术	200
思考题	204
第8章 电力通信技术	205
8.1 电力通信综述	205
8.2 电力载波通信	207
8.3 电力系统光纤通信	211
8.4 电力系统无线通信	216
8.5 电力系统数据通信	223
思考题	226
第9章 电力信息集成与智能决策	227
9.1 中国电力企业信息化的现状	227
9.2 电力系统信息集成技术	231
9.3 电力系统综合数据平台	235
9.4 电力系统数据挖掘与智能决策	237
思考题	239
第10章 电力管理信息化与信息安全	240
10.1 发电企业管理信息化	240
10.2 输配电生产管理信息化	250
10.3 变电站信息化	258
10.4 用户侧管理信息化	264
10.5 电力信息安全	267
思考题	271
参考文献	272

电力系统运行分析与控制技术概论

第1章 电力系统计算分析

1.1 电力系统数学模型

电力系统的数学模型是对电力系统运行状态的一种数学描述。通过数学模型可以把电力系统中物理现象的分析归结为某种形式的数学问题。按照电力系统的组成部分, 电力系统的数学模型主要包括发电机的模型、变压器的模型、电力线路的模型以及负荷的模型。其中由变压器和电力线路构成的电力网络数学模型是电力系统网络方程的基础。

1.1.1 发电机组的运行特性和数学模型

1. 隐极式发电机的相量图和功角特性

设发电机以滞后功率因数运行, 其端电压相量为 $\dot{U}$ 、定子电流相量为 $\dot{I}$ 。由于隐极式同步电机正、交轴同步电抗相等, 即 $x_d = x_q$, 在不计发电机定子绕组电阻的简化条件下, 其稳态运行时的相量图如图 1-1 所示。图中, 空载电动势相量 $\dot{E}_q$ 的正方向就是电压、电流的交轴 (q 轴) 正方向, 而滞后其 $\frac{\pi}{2}$ 的就是相应的正轴 (d 轴) 正方向; $\dot{E}_q$ 超前 $\dot{U}$ 的角度就是功率角 δ 。

取正、交轴正方向分别与实、虚轴正方向相一致, 则由 $\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ$ 可得

$$\tilde{S} = (U_d + jU_q)(I_d + jI_q) = (U_d I_d + U_q I_q) + j(U_q I_q - U_d I_q)$$

从而

$$P = U_d I_d + U_q I_q, \quad Q = U_q I_d - U_d I_q \quad (1-1)$$

而由图 1-1 可见

$$U_d = U \sin \delta, \quad U_q = U \cos \delta$$

$$I_d = \frac{E_q - U_q}{x_d}, \quad I_q = \frac{U_q}{x_d}$$

以此代入式 (1-1), 可得

$$P = \frac{E_q U_d}{x_d} = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta \quad (1-2)$$

$$Q = \frac{E_q U_q}{x_d} - \frac{U_d^2 + U_q^2}{x_d} = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (1-3)$$

式 (1-2)、式 (1-3) 所示为隐极式发电机的功角关系——功率与功率角 δ 的关系。而按式 (1-2)、式 (1-3) 所作的如图 1-2 所示的曲线则称为功角特性曲线。

式 (1-2) 和式 (1-3) 中, 如电动势、电压取线电动势、线电压的有效值, 以 kV 为单位, 则功率为三相功率的有效值, 以 MVA 为单位; 式中的同步电抗 x_d 则总以 Ω 为单位; 本书公

式均采用这两点约定。

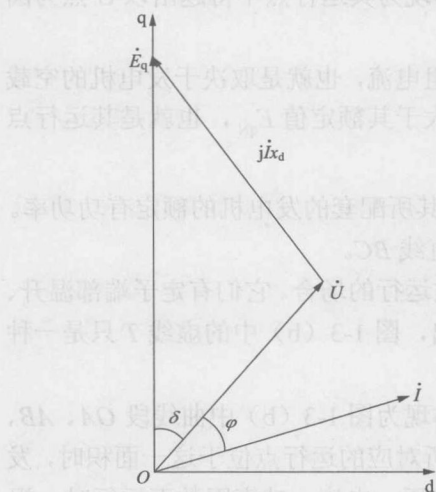


图 1-1 隐极式发电机的相量图

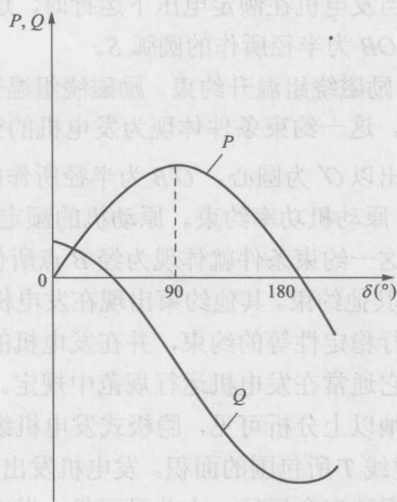


图 1-2 隐极式发电机的功角特性曲线

2. 隐极式发电机组的运行限额和数学模型

(1) 发电机组的运行限额。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。下面，将介绍如何以图解法按这些约束条件确定发电机组的运行限额。

先重作图 1-1 如图 1-3 (a) 所示，并认为这一相量图是按发电机组的额定运行条件绘制的。然后设想图中所有相量都乘以 U_N / X_d ，图中 OB 的长度就代表发电机的额定视在功率 S_N ，从而 $OC = OB \cos \varphi_N$ ， $Ob = OB \sin \varphi_N$ 就分别代表发电机的额定有功、无功功率；或 $OC = bB = O'B \sin \delta_N$ 代表 $E_{qN} U_N \sin \delta_N / x_d = P_N$ ， $Ob = O'b - O'O = O'B \sin \delta_N - O'O$ 代表 $E_{qN} U_N \cos \delta_N / x_d - U_N^2 / x_d = Q_N$ 。据此，就可在图 1-3 (b) 所示纵、横轴分别代表发电机组所发有功、无功功率的平面上确定它的运行极限。

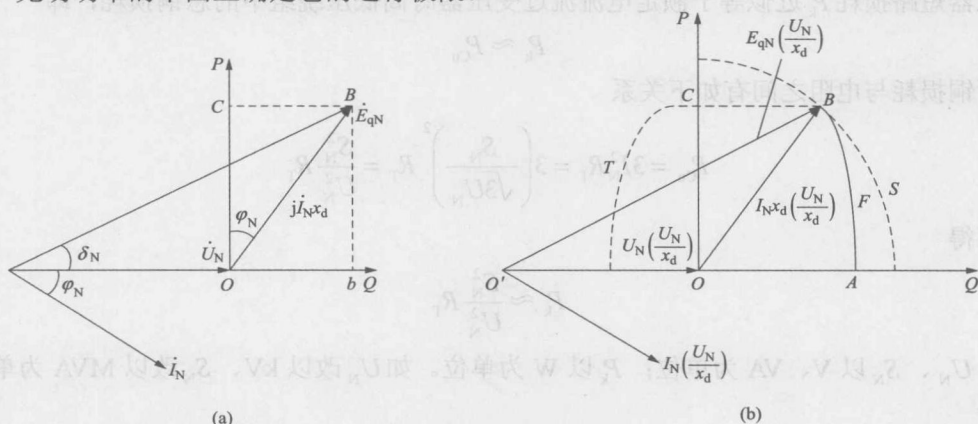


图 1-3 隐极式发电机组的运行极限

(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定子绕组电流,也就是取决于发电机的视在功率。当发电机在额定电压下运行时,这一约束条件就体现为其运行点不得越出以 G 点为圆心,以 OB 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励磁绕组电流,也就是取决于发电机的空载电动势。这一约束条件体现为发电机的空载电动势不得大于其额定值 E_{qN} ,也就是其运行点不得越出以 O' 为圆心, $O'B$ 为半径所作的圆弧 F 。

3) 原动机功率约束。原动机的额定功率往往就等于其所配套的发电机的额定有功功率。因此,这一约束条件就体现为经 B 点所作与横轴平行的直线 BC 。

4) 其他约束。其他约束出现在发电机以超前功率因数运行的场合。它们有定子端部温升、并列运行稳定性等的约束,并在发电机的运行规范中给出,图 1-3 (b) 中的虚线 T 只是一种示意,它通常在发电机运行规范中规定。

归纳以上分析可见,隐极式发电机组的运行极限就体现为图 1-3 (b) 中曲线段 OA 、 AB 、 BC 和虚线 T 所包围的面积。发电机发出有功、无功功率所对应的运行点位于这一面积时,发电机可保证安全运行。由此又可见,发电机只有在额定电压、电流、功率因数下运行时,视在功率才能达到额定值,其容量才能最充分地利用;发电机发出的有功功率小于额定值 P_N 时,它所发出的无功功率允许略大于额定条件下的 Q_N 。

(2) 发电机组的数学模型。作为电力系统中最重要元件,发电机组在稳态运行时的数学模型却极为简单,通常就以两个变量表示,即发出的有功功率 P 和端电压 U 的大小或发出的有功功率 P 和无功功率 Q 的大小。而以第一种方式表示时,往往还需伴随给出相应的无功功率限额,即允许发的最大、最小无功功率 $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 。这两个数值无非是通过与给定 P 相对应的点作直线平行于图 1-3 (b) 中横轴时,该直线与线段 AB 、虚线 T 相交的交点所对应的无功功率。

1.1.2 变压器的参数和数学模型

1. 双绕组变压器的参数和数学模型

(1) 阻抗。在电力系统计算中,求取变压器电阻的方法和电机学课程中介绍的相同。由于变压器短路损耗 P_k 近似等于额定电流流过变压器时高低压绕组中的总铜损耗,即

$$P_k \approx P_{Cu}$$

而铜损耗与电阻之间有如下关系

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

可得

$$P_k \approx \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T$$

式中: U_N 、 S_N 以 V、VA 为单位; P_k 以 W 为单位。如 U_N 改以 kV、 S_N 改以 MVA 为单位,则可得

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} \quad (1-4)$$

式中: R_T 为变压器高低压绕组的总电阻; P_k 为变压器的短路损耗, kW; S_N 为变压器的额定

容量, MVA; U_N 为变压器的额定电压, kV。

在电力系统计算中, 求取变压器电抗的方法和电机学课程中介绍的略有不同。由于大容量变压器的阻抗中以电抗为主, 亦即变压器的电抗和阻抗数值上接近相等, 可近似认为, 变压器的短路电压百分值与变压器的电抗有如下关系

$$U_k \% \approx \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100$$

从而

$$X_T \approx \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{U_k \%}{100} = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} \quad (1-5)$$

式中: X_T 为变压器高低压绕组的总电抗; $U_k \%$ 为变压器的短路电压百分值; S_N 、 U_N 的代表意义与式 (1-4) 同。

(2) 导纳。变压器的励磁支路有两种表示方式, 即以阻抗表示和以导纳表示。前者在电机学课程中常用, 后者则在电力系统计算中常用。它们分别示于图 1-4 (a)、(b) 中。而与之对应的空载运行时的电压、电流相量图则示于图 1-5 (a)、(b) 中。

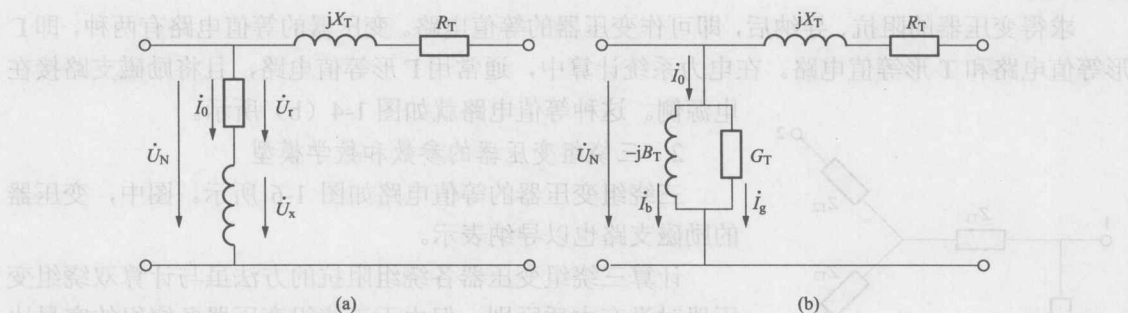


图 1-4 双绕组变压器的等值电路

(a) 励磁支路以阻抗表示; (b) 励磁支路以导纳表示

当变压器励磁支路以导纳表示时, 其电导对应的是变压器的铁损耗 P_{Fe} 。因变压器的铁损耗近似相等变压器的空载损耗 P_0 , 因此, 电导的功率损耗近似等于空载损耗。而由图 1-4 (b) 可见, 两者之间有如下关系

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} \quad (1-6)$$

式中: G_T 为变压器的电导, S; P_0 为变压器的空载损耗, kW; U_N 为变压器的额定电压, kV。

由图 1-5 (b) 可见, 变压器空载电流中流经电纳的部分 I_b 占很大比重, 从而, 它和空载电流 I_0 在数值上接近相等, 可以 I_b 代替 I_0 求取变压器的电纳。亦即, 由于

$$I_b = \frac{U_N}{\sqrt{3}} B_T$$

而

$$I_0 = \frac{I_0 \%}{100} I_N \approx I_b$$

可得

$$\frac{I_0 \%}{100} I_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}} B_T$$

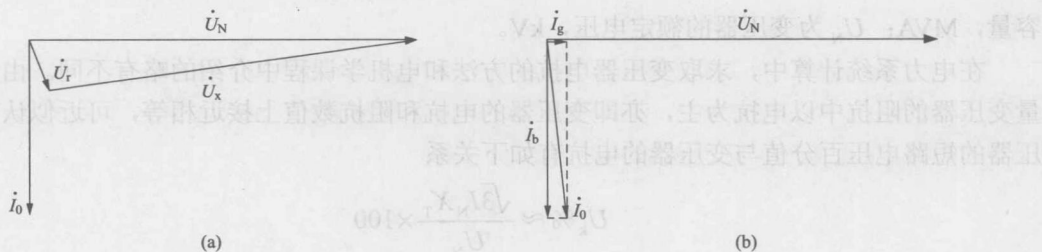


图 1-5 双绕组变压器空载运行时的相量图

(a) 励磁支路以阻抗表示; (b) 励磁支路以导纳表示

将 $I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}$ 代入, 最后得

$$B_T = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_N^2} \quad (1-7)$$

式中: B_T 为变压器的电纳, S; $I_0\%$ 为变压器的空载电流百分值; S_N 、 U_N 的代表意义与式 (1-4) 同。

求得变压器的阻抗、导纳后, 即可作变压器的等值电路。变压器的等值电路有两种, 即 Γ 形等值电路和 T 形等值电路。在电力系统计算中, 通常用 Γ 形等值电路, 且将励磁支路接在电源侧。这种等值电路就如图 1-4 (b) 所示。

2. 三绕组变压器的参数和数学模型

三绕组变压器的等值电路如图 1-6 所示。图中, 变压器的励磁支路也以导纳表示。

计算三绕组变压器各绕组阻抗的方法虽与计算双绕组变压器时没有本质区别, 但由于三绕组变压器各绕组的容量比有不同组合, 而各绕组在铁芯上的排列又有不同方式, 计算时需注意。

(1) 电阻。三绕组变压器按三个绕组容量比的不同有三种不同类型。第 I 种为 100/100/100, 即三个绕组的容量都等于变压器额定容量; 第 II 种为 100/50/100, 即第二绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%; 第 III 种为 100/100/50, 即第三绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%。

目前已在系统中使用的三绕组变压器, 从制造厂收集到的往往是它的三个绕组两两短路试验时测得的短路损耗。如该变压器属第 I 种类型, 可由提供的短路损耗 $P_{k(1-2)}$ 、 $P_{k(2-3)}$ 、 $P_{k(3-1)}$ 直接按下式求取各绕组的短路损耗

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(3-1)} - P_{k(2-3)}] \\ P_{k2} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(3-1)}] \\ P_{k3} &= \frac{1}{2} [P_{k(2-3)} + P_{k(3-1)} - P_{k(1-2)}] \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

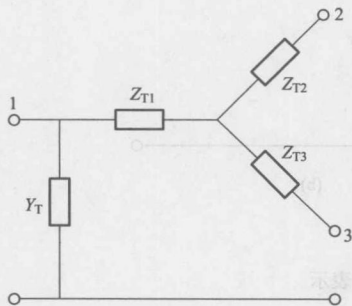


图 1-6 三绕组变压器的等值电路

然后按与双绕组变压器相似的公式计算各绕组电阻, 即

$$\left. \begin{aligned} R_{T1} &= \frac{P_{k1} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T2} &= \frac{P_{k2} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T3} &= \frac{P_{k3} U_N^2}{1000 S_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

如该变压器属第Ⅱ、第Ⅲ种类型, 则制造厂提供的短路损耗数据是一对绕组中容量较小的一方达到它本身的额定电流, 即 $I_N/2$ 时的值。这时, 应首先将各绕组间的短路损耗数据归算为额定电流下的值, 再运用上述公式求取各绕组的短路损耗和电阻。例如, 对 100/50/100 类型变压器, 制造厂提供的短路损耗 $P'_{k(1-2)}$ 、 $P'_{k(2-3)}$ 都是第二绕组中流过它本身的额定电流, 即二分之一变压器额定电流时测得的数据。因此, 应首先将它们归算到对应于变压器的额定电流

$$\left. \begin{aligned} P_{k(1-2)} &= P'_{k(1-2)} \left(\frac{I_N}{I_N^2} \right)^2 = 4P'_{k(1-2)} \\ P_{k(2-3)} &= P'_{k(1-2)} \left(\frac{I_N}{I_N^2} \right)^2 = 4P'_{k(2-3)} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

然后再按式 (1-8)、式 (1-9) 计算。

但按新颁布的标准, 制造厂对三绕组变压器只给出一个短路损耗——最大短路损耗。所谓最大短路损耗, 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。由此可求得两个 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 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两倍。换言之, 这时的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} R_{T(100\%)} &= \frac{P_{k \cdot \max} U_N^2}{2000 S_N^2} \\ R_{T(50\%)} &= 2R_{T(100\%)} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

(2) 电抗。三绕组变压器按其三个绕组排列方式的不同, 有两种不同的结构——升压结构和降压结构。升压结构变压器的中压绕组最靠近铁芯, 低压绕组居中, 高压绕组在最外层。降压结构变压器的低压绕组最靠近铁芯, 中压绕组居中, 高压绕组仍在最外层。

绕组排列方式不同, 绕组间漏抗不同, 从而短路电压也就不同。如设高压、中压、低压绕组分别为一、二、三次绕组, 则因升压结构变压器的高、中压绕组相隔最远, 两者间漏抗最大, 从而短路电压 $U_{k(1-2)}$ 最大, 而 $U_{k(2-3)}$ 、 $U_{k(3-1)}$ 就较小。降压结构变压器高、低压绕组相隔最远, $U_{k(3-1)}$ 最大, 而 $U_{k(1-2)}$ 、 $U_{k(2-3)}$ 则较小。

排列方式虽有不同, 但求取两种结构变压器电抗的方法并无不同, 即由各绕组两两之间的短路电压 $U_{k(1-2)}$ 、 $U_{k(2-3)}$ 、 $U_{k(3-1)}$ 求出各绕组的短路电压

$$\left. \begin{aligned} U_{k1} &= \frac{1}{2}(U_{k(1-2)} + U_{k(3-1)} - U_{k(2-3)}) \\ U_{k2} &= \frac{1}{2}(U_{k(1-2)} + U_{k(2-3)} - U_{k(3-1)}) \\ U_{k3} &= \frac{1}{2}(U_{k(2-3)} + U_{k(3-1)} - U_{k(1-2)}) \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

再按与双绕组变压器相似的计算公式求各绕组的电抗

$$\left. \begin{aligned} X_{T1} &= \frac{U_{k1} \% U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T2} &= \frac{U_{k2} \% U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T3} &= \frac{U_{k3} \% U_N^2}{100 S_N} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

应该指出,求电抗和求电阻时不同,无论按新旧标准,制造厂提供的短路电压总是归算到各绕组中通过变压器额定电流时的数值。因此,计算电抗时,对第 II、III 类变压器,其短路电压不需再归算。

求取三绕组变压器导纳的方法和求取双绕组变压器导纳的方法相同。

1.1.3 电力线路的数学模型

在电力系统分析中的电力线路数学模型就是以电阻、电抗、电纳、电导表示的它们的等值电路。

按《现代电力工程与技术基础》上册求得单位长度导线的电阻、电抗、电纳、电导后,就可作最原始的电力线路等值电路,如图 1-7 所示。这是单相等值电路。之所以可用单相等值电路代表三相,一方面由于本书中讨论的是三相对称运行方式,另一方面也因设架空线路都已经整循环换位。

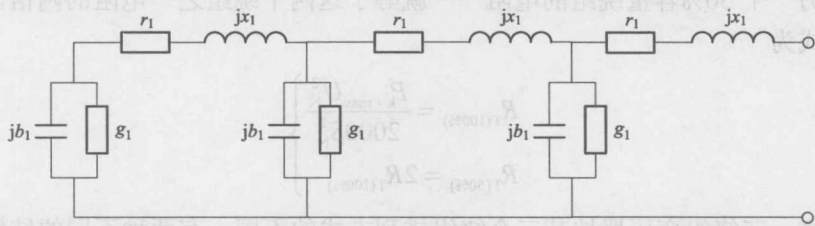


图 1-7 电力系统的单相等值电路

以单相等值电路代表三相虽已简化了不少计算,但由于电力线路的长度往往有数十乃至数百公里,如将每公里的电阻、电抗、电纳、电导都一一绘于图上,所得的等值电路仍十分复杂。何况,严格说来,电力线路的参数是均匀分布的,即使是极短的一段线段,都有相应大小的电阻、电抗、电纳、电导。换言之,即使是如此复杂的等值电路,也不能认为精确。但好在电力线路一般不长,需分析的又往往只是它们的端点状况——两端电压、电流、功率,通常可不考虑线路的这种分布参数特性,只是在个别情况下采用双曲函数研究具有均匀分布参数的线路。下面,先讨论一般线路的等值电路。

1. 一般线路的等值电路

所谓一般线路,是指中等及中等以下长度线路。对架空线路,这个长度大约为 300km;对电缆线路,大约为 100km。线路长度不超过这些数值时,可不考虑它们的分布参数特性,而只用将线路参数简单地集中起来的电路来表示。

在以下的讨论中,以、 $R(\Omega)$ 、 $X(\Omega)$ 、 $G(S)$ 、 $B(S)$ 分别表示全线路每相的总电阻、电抗、电导、电纳。显然,线路长度为 l (km) 时,有

$$\left. \begin{aligned} R &= r_1 l, \quad X = x_1 l \\ G &= g_1 l, \quad B = b_1 l \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

通常,由于线路导线截面积的选择,如前所述,以晴朗天气不发生电晕为前提,而沿绝缘子的泄露又很小,可设 $G=0$ 。

一般线路中,又有短线路和中等长度线路之分。

所谓短线路,是指长度不超过 100km 的架空线路。线路电压不高时,这种线路电纳 B 的影响一般不大,可略去。从而这种线路的等值电路最简单,只有一串联的总阻抗 $Z=R+jX$, 如图 1-8 所示。

显然,如果对电缆线路进行补偿,电纳的影响不大时,也可采用这种等值电路。

由图 1-8 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

将式 (1-15) 与电路理论课程中介绍过的两端口或四端口网络方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

相比较,可得这种等值电路的通用常数 A 、 B 、 C 、 D

$$\left. \begin{aligned} A &= 1, \quad B = Z \\ C &= 0, \quad D = 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

所谓中等长度线路,是指长度在 100~300km 之间的架空线路和不超过 100km 的电缆线路。这种线路的电纳 B 一般不能略去。这种线路的等值电路有两种—— Π 形等值电路和 T 形等值电路,分别如图 1-9 (a)、(b) 所示。其中,常用的是 Π 形等值电路。

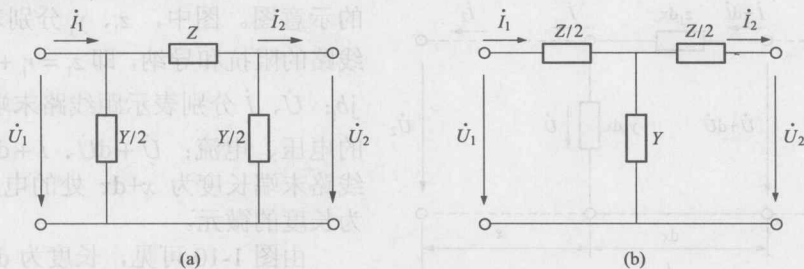


图 1-9 中等长度线路的等值电路

(a) Π 形等值电路; (b) T形等值电路

在Π形等值电路中,除串联的线路总阻抗 $Z=R+jX$ 外,还将线路的总导纳分为两半,分别并联在线路的始末端。在T形等值电路中,线路的总导纳集中在中间,而线路的总阻抗则分为两半,分别串联在它的两侧。因此,这两种电路都是近似的等值电路,而且,相互间并不等值,即它们不能用星—三角变换公式相互变换。

由图 1-9 (a) 可得,流过串联阻抗 Z 的电流为 $I_2 + \frac{Y}{2}\dot{U}_2$, 从而

$$\dot{U}_1 = \left(I_2 + \frac{Y}{2}\dot{U}_2 \right) Z + \dot{U}_2$$

流入始端导纳 $\frac{Y}{2}$ 的电流为 $\frac{Y}{2}\dot{U}_1$, 从而

$$I_1 = \frac{Y}{2}\dot{U}_1 + \frac{Y}{2}\dot{U}_2 + I_2$$

由此又可得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y\left(\frac{ZY}{4} + 1\right) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 与式 (1-16) 相比较,可得这种等值电路的通用常数,即

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{ZY}{2} + 1, \quad B = Z \\ C &= Y\left(\frac{ZY}{4} + 1\right), \quad D = \frac{ZY}{2} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

相似地,可得图 1-9 (b) 所示等值电路的通用常数

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{ZY}{2} + 1, \quad B = Y\left(\frac{ZY}{4} + 1\right) \\ C &= Z, \quad D = \frac{ZY}{2} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

2. 长线路的等值电路

长线路指长度超过 300km 的架空线路和超过 100km 的电缆线路。对这种线路,不能不考虑它们的分布参数特性。

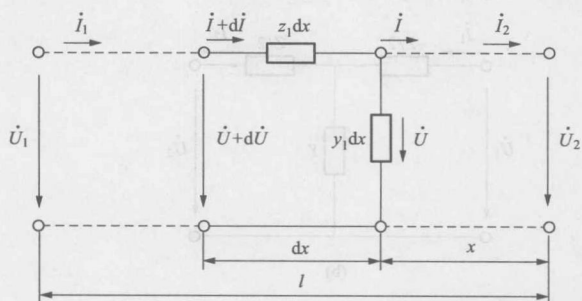


图 1-10 参数均匀分布的长线路

图 1-10 所示为参数均匀分布的长线路的示意图。图中, z_1 、 y_1 分别表示单位长度线路的阻抗和导纳,即 $z_1 = r_1 + jx_1$, $y_1 = g_1 + jb_1$; $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 分别表示距线路末端长度为 x 处的电压、电流; $\dot{U} + d\dot{U}$ 、 $\dot{I} + d\dot{I}$ 分别表示距线路末端长度为 $x+dx$ 处的电压、电流; dx 为长度的微元。

由图 1-10 可见,长度为 dx 的线路,串联阻抗中的电压降落为 $\dot{I}z_1 dx$, 并联导纳中的分支电流为 $\dot{U}y_1 dx$ 。从而可列出