

电力系统 综合实验教程

王慧 主编

Dianli Xitong
Zonghe Shiyan
Jiaocheng

山东大学出版社

电力系统综合实验教程

王 慧 主编

山东大学出版社

内容提要

《电力系统综合实验教程》是“电力系统工程基础”“电力系统自动控制技术”“电力系统分析”“综合实验”等理论课程的实验配套教材。

全书共分13章,主要介绍了电力系统的基础知识,电力系统的实验设备,同步发电机励磁控制实验,同步发电机准同期并列实验,一机一无穷大系统稳态运行方式实验,电力系统功率特性和功率极限实验,电力系统暂态稳定实验,单机带负荷实验,复杂电力系统运行方式实验以及智能电网分析与设计实验等内容。

本书不仅可以作为高等学校电力工程类师生的参考用书,也可以作为继续教育的培训教材,还可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统综合实验教程/王慧主编. — 济南: 山东大学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5607-6041-4

I. ①电… II. ①王… III. ①电力系统—实验—教材
IV. ①TM7-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 051070 号

责任策划: 刘旭东

责任编辑: 宋亚卿

封面设计: 牛 钧

出版发行: 山东大学出版社

社 址 山东省济南市山大南路 20 号

邮 编 250100

电 话 市场部(0531)88364466

经 销: 山东省新华书店

印 刷: 泰安金彩印务有限公司

规 格: 787 毫米×1092 毫米 1/16

11 印张 251 千字

版 次: 2018 年 3 月第 1 版

印 次: 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

版权所有, 盗印必究

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社营销部负责调换

《电力系统综合实验教程》

编委会

主 编 王 慧

副主编 于 静 易长松

编 委 王 慧 于 静 易长松

邓强强 董 庆

主 审 张 文

前 言

本书是配合“电力系统工程基础”“电力系统自动控制技术”“电力系统分析”“综合实验”等课程的实验教学而编写的。在内容的编写上,本书力求理论联系实际,突出针对性和实用性,便于学生创新能力的培养。本书既可以作为以上课程理论教学的配套教材,也可以作为相应课程的参考书。

本书共分为13章。第1章主要介绍了实验在教学中的重要性和电力系统的研究方法;第2章介绍了电力系统的基础知识;第3章介绍了电力系统的实验设备;第4章介绍了电力系统的微机监控实验系统;第5~12章是基本实验,分别介绍了同步发电机励磁控制实验,同步发电机准同期并列实验,单机—无穷大系统稳态运行方式实验,电力系统功率特性和功率极限实验,电力系统暂态稳定实验,单机带负荷实验,复杂电力系统运行方式实验,电力系统调度自动化实验;第13章介绍了智能电网分析与设计实验。实验部分融汇了电力系统自动化基础知识,通过实验给出了解决电力系统相关问题的基本思路。为加深对课程内容的理解,书中附有复习思考题。附录部分给出了阅读正文的有关章节时所需的参考资料。

本书由山东大学的王慧担任主编,由山东大学的于静、武汉华大电力自动技术有限责任公司的易长松担任副主编,武汉华大电力自动技术有限责任公司的邓强强、董庆参加了编写。全书由王慧统稿,山东大学的张文教授审阅。本书在编写过程中不仅得到了张文教授的帮助和指导,还得到了电气工程学院领导和实验中心领导的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中错误及不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2017年12月于山东大学

目 录

第 1 章 概 述	(1)
1.1 实验在教学中的重要性	(1)
1.2 电力系统的研究方法	(3)
第 2 章 电力系统基础知识	(5)
2.1 电网的等值电路	(5)
2.2 简单电力系统的潮流分析方法	(12)
2.3 同步发电机励磁控制原理	(15)
2.4 发电机的并列	(20)
2.5 电力系统的静态稳定性分析	(25)
2.6 电力系统的暂态稳定性分析	(28)
2.7 电力系统的运行与控制	(32)
2.8 电力系统调度的自动化	(42)
2.9 电力系统动态模拟	(46)
第 3 章 电力系统实验设备	(50)
3.1 电力系统综合实验装置概述	(50)
3.2 无穷大系统	(51)
3.3 原动机及其调速系统	(51)
3.4 同步发电机励磁系统	(55)
3.5 同步发电机的准同期并列	(57)
3.6 同步发电机的解列与停机	(63)
3.7 模拟输电线路	(64)
3.8 微机线路保护的整定	(66)
3.9 短路故障的模拟	(68)



第4章 电力系统微机监控实验系统	(69)
4.1 一次系统的构成	(69)
4.2 实验操作台和无穷大系统	(71)
4.3 电力网的监测	(73)
4.4 微机监控系统	(77)
第5章 同步发电机励磁控制实验	(84)
5.1 同步发电机励磁系统的基本知识	(84)
5.2 不同 α 角对应的励磁电压波形观测	(85)
5.3 同步发电机起励实验	(87)
5.4 同步发电机励磁控制方式及其相互切换实验	(89)
5.5 逆变灭磁和跳开灭磁开关灭磁实验	(93)
5.6 伏赫限制实验	(94)
5.7 同步发电机强励实验	(95)
5.8 欠励限制实验	(96)
5.9 调差实验	(97)
5.10 过励限制实验	(98)
5.11 PSS 实验	(99)
第6章 同步发电机准同期并列实验	(101)
6.1 同步发电机准同期并列的基本知识	(101)
6.2 机组启动与建压实验	(101)
6.3 手动准同期实验	(103)
6.4 半自动准同期实验	(105)
6.5 全自动准同期实验	(106)
6.6 准同期条件的整定实验	(107)
第7章 单机一无穷大系统稳态运行方式实验	(109)
7.1 单机一无穷大系统的基本知识	(109)
7.2 单回路稳态对称运行实验	(110)
7.3 双回路对称运行与单回路对称运行比较实验	(111)
7.4 单回路稳态非全相运行实验	(111)
第8章 电力系统功率特性和功率极限实验	(113)
8.1 电力系统功率特性的基本知识	(113)
8.2 无调节励磁时功率特性和功率极限的测定实验	(114)
8.3 手动调节励磁时功率特性和功率极限的测定实验	(116)
8.4 自动调节励磁时功率特性和功率极限的测定实验	(117)



第 9 章 电力系统暂态稳定实验	(120)
9.1 电力系统暂态稳定的基本知识	(120)
9.2 短路对电力系统暂态稳定的影响实验	(121)
9.3 研究提高暂态稳定的措施实验	(123)
第 10 章 单机带负荷实验	(126)
10.1 单机带负荷实验的基本知识	(126)
10.2 测定不同性质的负荷对发电机的电压、频率的影响实验	(127)
第 11 章 复杂电力系统运行方式实验	(129)
11.1 复杂电力系统运行方式的基本知识	(129)
11.2 网络结构变化对系统潮流的影响实验	(130)
11.3 投、切负荷对系统潮流的影响实验	(131)
第 12 章 电力系统调度自动化实验	(132)
12.1 电力系统调度自动化的基本知识	(132)
12.2 电力系统调度自动化实验	(132)
第 13 章 智能电网分析与设计实验	(134)
13.1 智能电网介绍	(134)
13.2 一次系统搭建实验	(136)
13.3 发电机的励磁调节实验	(138)
13.4 模拟风力发电的风机调速实验	(142)
附录 A 模拟风力发电的风机调速的程序及指令说明	(146)
A.1 部分程序案例	(146)
A.2 风机调速及无线测量 PLC 梯形图指令说明	(147)
附录 B PLC 基本指令简介及练习	(150)
B.1 PLC 基本指令	(150)
B.2 PLC 基本指令的意义	(151)
B.3 PLC 基本指令的编程及练习	(153)
附录 C 微机励磁调节器的显示量的意义	(162)
参考文献	(163)

第1章 概述

1.1 实验在教学中的重要性

时代的特征直接反映了所需人才的特征。我们的时代是科技时代,科学技术不仅仅是知识,还必须要转化为生产力,这种转化就要理论联系实际,应用知识;我们的时代又是激烈竞争的时代,不断创新才有活力,才有发展,才能立于不败之地;我们的时代也是多变的时代,国际形势风云变幻,市场经济瞬息万变,适应变化、准备变化、驾驭变化是时代对人才的特殊要求。因此,新时期人才应具备以下特征:实践性特征,即善于理论联系实际,长于应用;创造性特征,即不断开拓,勇于创新;适应性特征。随着世界科学技术的进步和发展,科学实验教育将成为教育的一部分。今天,在人们极力寻求适应社会需要的教育新途径时,重新认识科学实验教育的作用和地位有着重要的现实意义。

1.1.1 科学实验教育的特点

科学实验是科学研究的一种方法,其本质是人们能动地、理性地认识自然、改造自然的实践活动。它具有如下特点:

1.1.1.1 以客观事实为唯一准绳

这是有别于其他科学方法的根本点。科学实验的目的是获取大自然中关于物质运动的第一手资料,以揭示物质运动的规律、特性,及各种自然现象之间的相互联系。其基本手段是观察、测量。

1.1.1.2 理论与实践密切结合

科学实验的实现过程是通过对科学仪器的操作和人的感知活动来完成的,这些操作和感知活动一刻也离不开理论的指导。理性的观察可以获得难以注意到的蛛丝马迹,而盲目的观察却常常视而不见,这在科学史上屡见不鲜。观察和测量为人们提供了认识世界的新资料,但事实本身不能构成科学,科学实验的重要组成部分是分析实验结果使之上升为理论。因此,科学实验本身就是理论和实践的结合体。



1.1.1.3 对实验者的个性品质有特殊要求

由于科学实验与其他科学方法不同,因此,对于实验者的个性品质有如下特殊要求:

①应变能力。因为实验者直接接触自然现象,这是纷纭变化的自然现象对实验者的必然要求。②直觉能力。在科学实验中,对某一现象的敏锐捕捉,或对某一结果的正确解释,常常依赖于实验者的大胆直觉,这种直觉基于实验者深厚的理论功底和大量经验事实的积累。③灵巧的动手能力。这不仅体现在仪器的操作方面,还体现在仪器的设计和制作方面。历史上典型的成功实验,几乎都伴随着新仪器的诞生。④协作能力。科学实验,尤其是现代科学实验,绝对不是靠某个人的力量完成的,因而良好的协作是实验成功的必要因素。

1.1.2 科学实验教育的功能

科学实验教育的功能是指由科学实验教育直接导致的有关学生基本身心发育的作用。它主要有以下几点:

1.1.2.1 能促进学生手和脑的协调发展

手和脑发展的结合点是实践活动,它们的发展是相互促进的。合理的操作要有思维来指导,在思维指导下的熟练操作往往是产生新思想的源泉,所谓“熟能生巧”就是这个道理。

科学实验是能动的实践活动,是手和脑并用的过程。科学实验教育是通过学生亲自进行科学实验来完成的。实验的对象是自然现象,因而信息源是开放的,这与一般的书本知识不同,因为课本上的题通常是封闭的,有确定答案的,而且给出了所有必要的信息。开放的信息源需要人们去获取、筛选,学生利用科学仪器去获取信息,并通过归纳、演绎、类比、分析、综合、抽象等方法选择、提炼信息,从而不仅锻炼了手的技能,也锻炼了思维。所以科学实验教育具有协调发展学生手和脑的特殊功能,是一般的课堂教学难以代替的。考虑到我国传统的思维方式以直观思辨为特点,忽略了实验的地位,以及传统的学习重视读书,轻视动手等给社会和人们造成的影响,科学实验教育的这一功能便显得更有重要的现实意义。

1.1.2.2 能促使学生建立良好的认知结构

所谓认知结构,即学生头脑中的知识结构。教学的首要任务,是使学生建立良好的认知结构。良好的认知结构表现在以下两个方面:一要有利于向更深层次进行转化,即适应新的建构;二要能够在实际中应用。科学实验教育对学生建立良好的认知结构有特殊的功能。

1.1.2.3 能发展学生各方面的能力

科学实验教育对发展学生的能力有着无可估量的作用,它主要可以发展学生以下几个方面的能力:

1. 协作能力

协作能力涉及学生的社交能力、工作能力、组织能力等,是现代社会对人才的一个重要要求,但是现行的学校教学体制很难培养学生的协作精神,科学实验教育则不然。从实



验课来看,一般的学生实验都是分小组进行的,由于实验会涉及多方面的知识和能力,这会促使小组内的同学相互协助,相互争论,共同提高,齐心完成共同的题目。

2. 创造能力

有所发明,有所创造是国家振兴迫切需要的。科学实验教育在培养学生的创造能力上主要表现为:在传授知识和技能的同时,教授学生科学的思想方法及对待科学的态度等。教学用的科学实验常常是历史上著名的科学实验,这些实验不仅展现了科学发现的全过程,蕴藏着深刻的科学思想,而且体现了科学家对待科学的态度以及创造的光辉。

1.2 电力系统的研究方法

同其他科技领域的研究方法一样,电力系统的研究方法可以概括为理论分析和科学实践两种途径。理论分析无疑是极端重要的,它不仅能够阐明电力系统的基本规律,而且能够用于探索新原理和新方法。但是由于电力系统的组成复杂,元件的种类与数量很多,其暂态过程较为复杂,仅靠理论分析往往难以得到全面的知识。因此,需要与科学实验相结合才能获得较全面的知识。同时,有些新的原理和规律,也往往是在科学实验的启发下总结出来的。

电力系统的实验可以在实际电力系统中进行,也可以在模拟的电力系统中进行。显然,在实际电力系统中进行的实验可以得到最真实的结果,但是想要在实际的系统上实验往往受到很多条件的限制,如时间、经济性、安全性等多方面因素的制约。对于一些会造成严重后果的实验项目,如短路、振荡、失步等,由于系统运行条件的限制,不一定都能够进行,更不能进行多次重复性试验。特别是对于一些发展规划中的工程项目,则更难以在现有的电力系统中进行。因此,模拟实验在电力系统的研究工作中具有十分重要的意义。

电力系统的模型实验方法有数字仿真和物理模拟两种。国内一般将采用数学方法进行实验研究的方式习惯称为“数字仿真”,将采用物理方法进行实验研究的方式习惯称为“物理模拟”。

1.2.1 电力系统的数字仿真

数字仿真是建立在数学方程式基础上的一种对原型系统进行仿真研究的方法。对于各种物理现象,在一定条件下写出其运动过程中的数学方程式,借助专门的数学求解工具进行求解,以得出所需要的结果。历史上曾经出现过的电力系统数字仿真研究有以下几种:直流计算台、交流计算台、模拟式电子计算机等。直流计算台以电阻来模拟系统中的各元件。交流计算台以电阻、电感、电容、变压器、移相装置模拟系统中的各元件,以直流电压或中频交流电压为电源,用以计算系统中的功率分布、短路电流和系统的稳定性。这些功能目前已完全由数字式电子计算机代替。模拟式电子计算机及其运算放大器组成系统中各元件的模型,用以分析系统的暂态过程。但由于这种计算机可供使用的元件数量有限,所能研究的系统规模不可能大,因此,这类数字仿真始终未能得到广泛的应用。

目前,通用数字式电子计算机已被广泛地应用于电力系统的运行、设计和科学研究各



个方面。自 1956 年成功地运用它计算潮流分布以来,几乎所有主要的电力系统计算都已使用这种计算机。目前,复杂系统的潮流分布、故障分析、稳定性分析等常规计算或暂态过程仿真、谐波分析、继电保护整定等专业性更强的计算,都已有商品化软件包可供选用。而这些计算对硬件条件的要求也较过去大为降低,几乎各种型号的微型计算机都可用作此类计算。

1.2.2 电力系统的物理模拟

电力系统动态模拟属于电力系统的物理模拟,是采用了与原型系统具有相同物理性质且参数标幺值一致的模拟元件,根据相似原理建立起来的电力系统物理模拟。该模型是基于相似原理把实际电力系统按一定的模拟比例关系缩小并保留其物理特性的电力系统复制品。通俗地说,电力系统的物理模拟就是把真实的电力系统缩小到实验室中,是真实电力系统的缩影。电力系统动态模拟主要由模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷和有关调节、控制、测量、保护等模拟装置组成。因为有做旋转运动的模拟发电机组、模拟负荷机组,故可以模拟电力系统的各种实时运行状态,反映电力系统的动态特性,如原动机的调速特性、发电机的励磁特性、负荷随电压频率变化的动态特性等,所以称为电力系统动态模拟。在模拟系统中,如果没有做旋转运动的模拟发电机组、模拟负荷机组,则该模型就不能反映电力系统动态特性,称之为电力系统静态模拟。

电力系统动态模拟的主要特点是能够直接观察到各种现象的物理过程,便于获得明确的物理概念。特别是对于某些新问题和物理现象,由于认识上的局限性,不能或不完全能用数学方程式表示时,利用物理模型可以探索到现象的本质及其变化的基本规律。物理模拟的实验结果,还可以用来校验电力系统的理论和计算公式以及在建立数学方程式时各种假设的合理性,并为理论的简化指出方向,进而使得理论得到进一步的完善和发展。

电力系统动态模拟的另一个显著特点就是,可以将新型的继电保护和自动控制装置直接接入动态模拟系统中,进行各种工况和短路故障实验,考核各种装置的各种性能。

电力系统动态模拟的缺点是待研究的系统规模不能过大,而且对模拟装置的参数调整范围有一定的限制,实验前模拟参数的配置和改变运行方式的调整比较复杂。

第2章 电力系统基础知识

2.1 电网的等值电路

电力系统是由各种电器元件组成的有机整体。要对电力系统进行分析和计算,首先要掌握各元件的电气特性,建立等值电路与数学模型。本节将着重讨论输电线路和变压器的等效电路及其数学模型。在电力系统正常运行的情况下,可以近似地认为系统的三相结构完全对称。在这种情况下,系统各处的电压、电流都是三相对称且只含正序分量的正弦量。在系统不对称运行或发生不对称故障时,系统中还有可能出现负序分量和零序分量。本节将只介绍有关正序分量的参数和等值电路。

2.1.1 电力线路的数学模型

2.1.1.1 电力线路的参数

电力线路按作用分类,可分为输电线路和配电线路;按线路结构的不同,可以分为架空线路和电缆线路。由于架空线路的建设成本低,且便于施工、维护和检修,因此在电力系统中,绝大多数的线路都采用架空线路。这里着重介绍架空线路的参数,电缆线路可以根据厂家的数据或者实测求得。

当架空线路传输电能时,将伴随一系列的电气现象。第一,电流流过导线时会因电阻的损耗而产生热量。第二,当交流电流流过电力线路时,在三相导线内部和三相导线周围都要产生交变的电磁场,而交变磁通匝链导线后,将在导线中产生感应电动势。第三,当交流电压加在电力线路上时,在三相导线周围会产生交变的电场,在它的作用下,不同相的导线之间和导线与大地之间就会产生位移电流,从而形成电容电流与容性功率。第四,在高电压的作用下,输电线周围的空气会游离放电,而且由于绝缘的不完善,可能引起少量的电流泄漏。在电力系统中,将用一些电气参数来反映这些基本的物理现象:用电阻来反映线路的发热,用电抗来反映线路的磁场效应,用电纳来反映线路的电场效应,用电导来反映线路的电晕现象和泄漏现象。



1. 线路的电阻

由中学物理知识可知,有色金属导线的直流电阻可以按下式计算:

$$r_1 = \frac{\rho}{S} \quad (2-1)$$

式中, r_1 为导线单位长度的电阻(Ω/km); ρ 为导线材料的电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$); S 为导线载流部分的截面积(mm^2)。

在实际计算中,导线材料的电阻率采用的数值是:铝为 $31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$,铜为 $18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ 。它们略大于这些材料的直流电阻率,这是因为需要考虑集肤效应,而且采用的额定截面积又多半略大于实际截面积。

实际上,各种型号的电阻值都可以在《电力工程手册》中查到。但应注意的是,手册中所列出的电阻值,都是指温度为 20°C 时的数值。当计算精度要求较高时,可以根据实际温度按照下式修正:

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

式中, r_t 、 r_{20} 分别为 $t^\circ\text{C}$ 和 20°C 时的单位长度电阻(Ω/km); α 为电阻温度系数,对于铜为 $0.00382/^\circ\text{C}$,对于铝为 $0.0036/^\circ\text{C}$ 。

2. 线路的电抗

当三相导线中流过交流电流时,在导线及其周围空间中将产生交变磁场,从而在导线中产生感应电动势。在电力系统稳态分析中,这一感应电动势将用电流流过电抗所产生的电压降落来代替。电流的电抗与导线的截面积及导线在杆塔上的布置有关。由电磁场理论可知,当三相导线的距离不相等时,三相线路各相的电感不相等。在实际的电力系统中,为了使线路的电抗对称,应每隔一段距离将三相导线进行换位,使每相导线均匀地处在三个不同位置上,如图 2-1 所示。

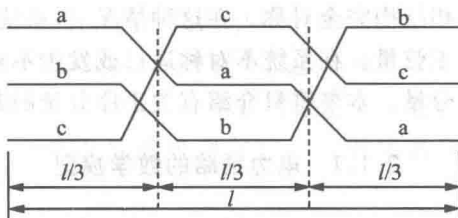


图 2-1 输电线路换位示意图

在均匀换位的情况下,三相导线单位长度的电感相等,每相单位长度的等效电抗数值可以表示为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \mu_r = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r'} \quad (2-3)$$

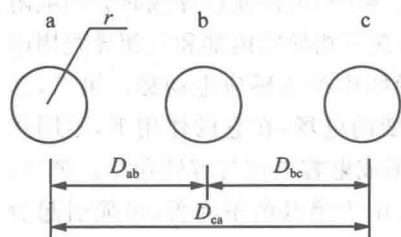


图 2-2 三相线路示意图

式中, x_1 为导线单位长度的电抗(Ω/km); r 为导线半径,如图 2-2 所示; D_m 为三相导线的几何均距, $D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$; μ_r 为导线材料的磁导率,对于铝、铜等, $\mu_r = 1$; r' 为导线的几何半径, $r' = 0.779r$ 。

由于电抗与几何均距、导线半径直接为对数关系,导线在杆塔上的布置和导线截面积的大小对线路的电抗没有显著影响,所以架空线路的电抗一般都在 $0.4 \Omega/\text{km}$ 左右。



在高压和超高压电力系统中,为了防止在高压作用下由于导线周围空气的游离而发生电晕,往往采用分裂导线,即每相用几根型号相同的导线并联成复导线,各个导线的轴心对称地布置在半径为 R 的圆周上,导线之间用支架支撑。图 2-3 是采用四分裂导线的三相电路示意图。分裂导线等效于增大了导线半径,从而可以减小导线表面的电场强度,避免在正常运行情况下发生电晕。

分裂导线每相的等效电抗数值可表示为

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \mu_r \quad (2-4)$$

式中, n 为每相的分裂导线数,图 2-3 中, $n=4$; r_{eq} 为分裂导线的等效半径,其计算公式为

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13}\cdots d_{1n})} = \sqrt[n]{rd_m^{(n-1)}} \quad (2-5)$$

式中, r 为单根导线的半径; $d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}$ 为一相中一根导线与其余 $(n-1)$ 根导线之间的距离; d_m 为一相中导体之间的几何均距。

分裂导线线路由于每相导线的等效半径增大,使每相导线的电抗减小,一般比单根导线线路的电抗减小 20% 以上。例如,当分裂导线的根数分别为 2、3、4 时,每千米导线的电抗分别为 0.33Ω 、 0.30Ω 、 0.28Ω 左右。当分裂导线的根数增多时,电抗的下降已不明显。

3. 线路的电纳

当三相导线上施加交流电压后,在导线周围将产生交变电场,其分布不但与各个导线上的电荷变换情况相关,而且大地的存在对它也有影响。由于相间及相与地之间均存在电位差,而它们之间靠空气等绝缘介质隔开,因而相间和相与地之间必有一定的电容存在,如图 2-4 所示。在电力系统稳态分析中,用一相等效电容来反映导线上的电荷与本导线上的电压以及另外两相导线上的电压对它的影响,如图 2-5 所示。

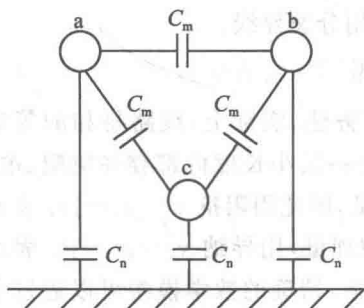


图 2-4 输电线路的电容分布

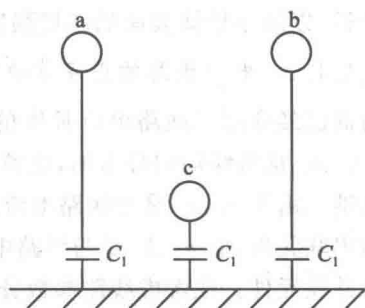


图 2-5 输电线路的等效电容

三相输电线路每相对地的等效电容数值可以表示为

$$c_1 = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (2-6)$$

式中, c_1 为单位长度等效对地电容 (F/km); D_m 和 r 的含义与式 (2-3) 中的相同。在工频 50 Hz 下,架空线路单位长度的等效电纳数值 (S/km) 为



$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad (2-7)$$

与电抗相似,架空线路电纳的变化范围也不大。例如,在 110 kV 网络中,普通架空线路单位长度的电纳约为 2.85×10^{-6} S/km。将式(2-7)中的 r 用式(2-5)中的 r_{eq} 代替,即可计算出分裂导线的等效电纳。由于分裂导线改变了导线周围的电场分布,等效增大了导线的半径,因而增大了每相导线的电纳。

4. 线路的电导

如前所述,线路的电导是反映当导线上施加电压后的电晕现象和绝缘子中所产生的泄漏电流的参数。对于 110 kV 以下的架空线路,与电压有关的有功功率损耗主要是由绝缘子泄漏电流所引起的,但在一般情况下线路的绝缘良好,其泄漏电流很小而可以忽略不计。对于 110 kV 及以上的架空线路,与电压有关的有功功率损耗主要是由电晕放电所造成的。其物理现象是:当导体表面的电场强度超过空气的击穿强度时,空气中原有的离子将具备足够的动能,并撞击其他分子使其发生电离,从而使线路产生有功功率损耗。在这个过程中,在导线表面的某些部分可以看到蓝色的光环,并听到“刺刺”的放电声和闻到臭氧味。由于这一功率损耗只与线路的电压有关,而与线路中流过的电流无关,因此用电导参数来反映。在三相电压对称的情况下,如果已知三相线路每千米的电晕有功功率损耗 ΔP_0 ,则可以用式(2-8)近似计算一相的对地等值电导值。

$$g_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \times 10^{-3} \quad (2-8)$$

式中, g_1 为单位长度的电导(S/km); ΔP_0 为线路每千米的电晕有功功率损耗(kW); U 为线路的线电压(V)。

由于线路的电晕放电不仅会产生有功损耗,而且还会对无线电通信产生干扰,因此,在设计时一般规定在正常气候下必须避免发生电晕。防止电晕的一种有效方法是增大导线的半径,以减小导体表面的电场强度;另一种是采用分裂导线。

2.1.1.2 电力线路的正序等效电路及数学模型

前面已经介绍了线路单位长度的参数及其计算方法,实际上,线路每相的等值参数 r_1 、 x_1 、 g_1 、 b_1 是沿线均匀分布的,也就是说,在线路任一微小长度内都存在电阻、电抗、电导和电纳。由于 r_1 、 x_1 是与线路电流相联系的物理量,因此用阻抗 $z_1 = r_1 + jx_1$ 表示并将它作为串联元件;而 g_1 、 b_1 是与线路电压相联系的物理量,用导纳 $y_1 = g_1 + jb_1$ 表示并将它作为并联元件。在考虑线路参数分布特性的情况下,精确的数学模型可以通过方程式的求解,得出沿线各点用相量表示的电压和电流分布,以及线路两端电压、电流相量之间的关系式。如果将线路用集中参数元件来代替,则可以由两端电压、电流相量之间的关系式导出相应的等值电路。下面将针对线路的正序参数导出线路的正序方程和等值电路。显然,线路的负序方程和等值电路与正序的相同。

1. 分布参数模型

考虑参数沿线路均匀分布时,线路的一相电路如图 2-6 所示,其中任一微小长度 dx 内都具有串联阻抗 $z_1 dx$ 和并联导纳 $y_1 dx$ 。

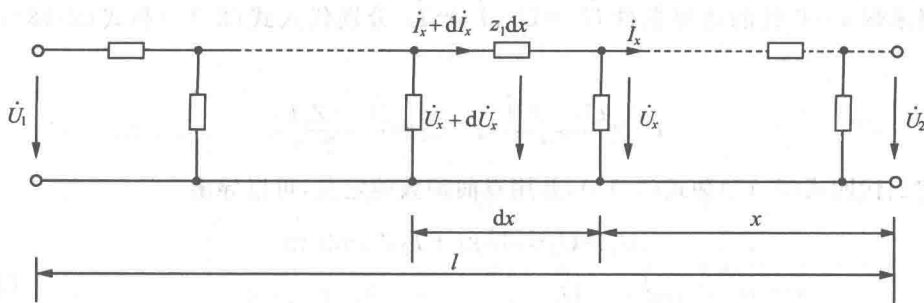


图 2-6 均匀分布参数线路的一相电路

设线路末端 x 处的电压和电流向量分别为 $\dot{U}_x$ 和 $\dot{I}_x$, $x+dx$ 处分别为 $\dot{U}_x + d\dot{U}_x$ 和 $\dot{I}_x + d\dot{I}_x$, 则 dx 段的电压降 $d\dot{U}_x$ 和电流增量 $d\dot{I}_x$ 可分别表示为

$$d\dot{I}_x = \dot{U}_x y_1 dx \quad (2-9)$$

$$d\dot{U}_x = \dot{I}_x z_1 dx \quad (2-10)$$

即

$$\frac{d\dot{U}_x}{dx} = \dot{I}_x z_1 \quad (2-11)$$

$$\frac{d\dot{I}_x}{dx} = \dot{U}_x y_1 \quad (2-12)$$

以上两式分别对 x 求导数, 得

$$\frac{d^2 \dot{U}_x}{dx^2} = z_1 \frac{d\dot{I}_x}{dx} = z_1 y_1 \dot{U}_x \quad (2-13)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}_x}{dx^2} = y_1 \frac{d\dot{U}_x}{dx} = z_1 y_1 \dot{I}_x \quad (2-14)$$

对于上面的二阶微分方程, 首先求出式(2-13)的通解为

$$\dot{U}_x = C_1 e^{\sqrt{z_1 y_1} x} + C_2 e^{-\sqrt{z_1 y_1} x} \quad (2-15)$$

再对其微分后将其代入式(2-14), 得

$$\dot{I}_x = \frac{C_1}{\sqrt{z_1 / y_1}} e^{\sqrt{z_1 y_1} x} - \frac{C_2}{\sqrt{z_1 / y_1}} e^{-\sqrt{z_1 y_1} x} \quad (2-16)$$

式中, C_1 、 C_2 为积分常数; $\sqrt{z_1 / y_1} = Z_c$, 称为线路的特征阻抗或波阻抗(Ω); $\sqrt{z_1 y_1} = \alpha + j\beta = \gamma$, 称为线路的传播系数, 传播系数的实部反映电压和电流行波振幅的衰减特性, 虚部反映行波相位的变化特性, γ 的量纲为 $1/\text{km}$ 。

Z_c 和 γ 都是只与线路的参数和频率有关而与电压和电流无关的物理量。将 Z_c 和 γ 分别代入式(2-15)和式(2-16), 可以将式(2-15)和式(2-16)分别改写为

$$\dot{U}_x = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (2-17)$$

$$\dot{I}_x = \frac{C_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{C_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \quad (2-18)$$