



“十三五”普通高等教育本科重点规划教材

普通高等教育“十五”国家级规划教材

Power System Analysis

电力系统分析

(第二版)

陈 怡 蒋 平 万秋兰 高 山 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电力系统分析

(第二版)

陈 怡 蒋 平 万秋兰 高 山 编著
洪佩荪 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科重点规划教材。

本书是介绍电力系统的一本具有新体系和新特色的高等学校电力类专业教材，共分三篇：第一篇电力系统的基础知识；第二篇电力系统的基本计算；第三篇电力系统的运行分析。

本教材以电力系统的潮流、故障、稳定三项常规计算和对电力系统运行的安全、可靠、优质、经济四个基本要求为框架形成新的体系，内容简明扼要，讲述深入浅出，强调基本概念、基本理论和基本技能，注重分析问题解决问题方法的培养和训练，着力于介绍计算机在电力系统分析中的应用，并注意介绍国内外本学科新的发展动向和新的研究成果。

本书列有丰富的例题、思考题和习题，章末或节末做了归纳和小结，可作为高等院校电气类专业的本科教材，也可供从事电力系统运行、设计和研究的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/陈怡等编著. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2018. 6

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材

ISBN 978-7-5198-1137-2

I. ①电… II. ①陈… 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 (2017) 第 220589 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 雷 锦 (010-63412530) 贾丹丹

责任校对: 马 宁

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2005 年 7 月第一版 2018 年 6 月第二版

印 次: 2018 年 6 月北京第七次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 23.25

字 数: 570 千字

定 价: 59.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

自本书出版以来，转眼间过去了 10 年有余。现对书中的有关问题进行了修订。修订的内容，除了对一些印刷错误做了改正外，还增添了相应的部分新内容。另外，相应于原版，书中的第四章有较多的修改，本来是应该早就改正的。

陈怡老师统筹本次修订，蒋平老师修订第四章和第七章，万秋兰老师修订第五章、第六章和第九章，高山老师修订其余章节。

衷心感谢广大读者的使用和意见反馈，衷心感谢出版社的大力支持。

作 者

2018 年 1 月

第一版前言

随着电力系统的快速发展和教学改革的深入,原有的电力系统分析教材已难以满足教学的要求。作为国家“十五”规划的教材建设项目之一,在我校多年电力系统分析课程教学实践和改革的基础上,广泛吸取国内外同类教材的长处,结合我们的体会,编写了这本新的电力系统分析教材。

现代电力系统是由大量发电、输电、配电和控制设备组成的复杂系统。电力系统的形成要经历规划、设计、建设、运行和改造等一系列阶段,而且处于不断发展中,控制技术也在不断更新。《电力系统分析》是这个行业和领域的理论基础。作为一门专业基础课程的新教材,本书既保留了原有教材的主要内容,而且增加了很多电力系统运行、控制和管理方面的新内容,同时在体系结构上作了新的探索。全书由三篇组成。第一篇为电力系统的基础知识,包括第一章和第二章。第一章介绍电力系统的基本概念,第二章介绍电力系统各元件的特性、参数和等值电路。这两章是分析电力系统的基础。第二篇为电力系统的基本计算,包括第三章、第四章和第五章。第三章介绍电力系统的潮流计算,第四章介绍电力系统故障的分析和计算,第五章介绍电力系统的稳定计算,称为电力系统的三大常规计算,是电力系统规划、运行、改造和发展中都要用到的重要内容。第三篇为电力系统的运行分析和优化,包括第六章、第七章、第八章和第九章,针对电力系统运行时的三个基本要求——安全、优质和经济进行讨论。第六章介绍电力系统的安全分析,第七章介绍电力系统的质量控制,第八章介绍电力系统的经济调度,第九章对能量管理系统进行了简单介绍。

全书内容能满足原《电力系统稳态分析》和《电力系统暂态分析》两门课程的基本要求,也能较灵活地进行适当组合,满足不同层次的要求。本书可供高等学校电力类专业的师生使用,也可供从事电力系统规划、设计、运行和研究的广大工程技术人员参考。

本书是在集体讨论的基础上分工编写,然后统稿而成。本书第四章、第七章由蒋平教授编写;第五章、第六章和第九章由万秋兰教授编写;第八章由高山副教授编写;郭伟副教授编写了第六章第一节电力系统状态估计的内容;其余部分由陈怡教授编写。

本书在编写过程中,得到了东南大学教务处、电气工程系和中国电力出版社的大力支持。初稿完成后,蒙河海大学洪佩荪教授仔细审阅,提出了不少宝贵意见。电力自动化研究院薛禹胜院士对电力系统的安全分析部分提出了宝贵意见。谨在此表示衷心感谢。限于水平,书中不妥乃至错误之处,敬请批评指正。

作为陈珩先生的弟子,我们谨以此书向先生表示我们的深切感谢和纪念。

作 者

2005年2月

目 录

前言

第一版前言

第一篇 电力系统的基础知识

第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统的组成和接线方式	1
第二节 电力系统的运行特点和对电力系统运行的基本要求	3
第三节 电力系统的额定频率和额定电压	5
第四节 电力系统的运行状态的中性点接地方式	7
第五节 正弦交流电路的基本关系和标幺制	9
小结	13
思考题和习题 1	14
第二章 电力系统各元件的特性和等值电路	16
第一节 负荷	16
第二节 电力线路	21
第三节 变压器	38
第四节 发电机	50
第五节 电力系统的等值电路	62
小结	70
思考题和习题 2	70

第二篇 电力系统的基本计算

第三章 电力系统的潮流计算	74
第一节 潮流计算的数学模型——潮流方程	75
第二节 潮流方程的迭代求解	80
第三节 潮流计算中的有关技术	90
小结	98
思考题和习题 3	99
第四章 电力系统故障分析及计算	101
第一节 电力系统故障计算的基本知识	101
第二节 电力系统对称故障的分析计算	109
第三节 电力系统不对称故障的分析计算	132

小结·····	159
思考题和习题 4·····	159
第五章 电力系统的稳定计算 ·····	165
第一节 电力系统元件的机电特性·····	166
第二节 电力系统的暂态稳定性·····	183
第三节 电力系统的静态稳定性·····	215
小结·····	236
思考题和习题 5·····	237

第三篇 电力系统的运行分析

第六章 电力系统的安全分析 ·····	242
第一节 电力系统状态估计·····	243
第二节 电力系统静态安全分析·····	260
第三节 电力系统暂态安全分析·····	271
小结·····	275
思考题和习题 6·····	276
第七章 电力系统的质量控制 ·····	277
第一节 电力系统的电压质量控制——电压调整·····	277
第二节 电力系统的频率质量控制——频率调整·····	299
第三节 灵活交流输电系统的介绍·····	312
小结·····	316
思考题和习题 7·····	317
第八章 电力系统的经济调度 ·····	321
第一节 电力系统的有功优化调度·····	321
第二节 电力系统的无功优化·····	335
第三节 减少网损的其他技术措施·····	337
第四节 电力市场及其对电力系统经济运行的影响·····	340
小结·····	348
思考题和习题 8·····	349
第九章 能量管理系统简介 ·····	351
思考题和习题 9·····	361
参考文献 ·····	363

第一篇 电力系统的基础知识

要对电力系统进行分析,首先必须掌握电力系统的基础知识,然后才能进行电力系统的基本计算和对电力系统的运行进行分析。

本篇内容由两章组成,第一章介绍电力系统的基本概念,第二章介绍电力系统各元件的特性和等值电路。本篇是电力系统分析的基础,应认真掌握,否则将会给后续内容的学习带来困难。虽然其中不少内容已在先修课程中学习过,但此处往往既是复习,又是深化和提高,同时应注意其在电力系统中的特点。

第一章 电力系统的基本概念

本章阐述电力系统的组成和接线方式、电力系统的运行特点和要求、电力系统的额定频率和额定电压、电力系统的运行状态和中性点接地方式、交流电路的基本关系和标幺制。前四节属电力系统的基本概念,第五节是对交流电路的简要复习,同时介绍了标幺制。

第一节 电力系统的组成和接线方式

电能是现代社会的主要能源,它在国民经济和人民生活起着极其重要的作用。

现代社会中,电能是从电力系统得到的。在电力系统中的各种发电厂(火电厂、水电厂、核电厂等)里发电设备将其他形式的能量(煤或油的化学能、水的动能、核能等)转换成电能,电能经升压变压器和高压输电线路传输至负荷中心,再由降压变压器和配电线路分配至用户,然后通过各种用电设备(电动机、电灯、电炉等)将电能转换成其他形式的能量进行消费。各种用电设备消耗的功率(包括有功功率和无功功率)统称为电力系统的负荷。所谓电力系统就是由大量发电机、变压器、电力线路和负荷组成的,旨在生产、传输、分配和消费电能的各种电气设备按一定方式连成的整体。这种一定的连接方式称为电力系统的接线。由上述定义可见,电力系统是一个由大量各种元件组成的复杂系统,发电机、变压器、电力线路和负荷是电力系统的四大主要元件。这四大元件构成了电力系统的躯干,称为一次系统。此外,为了保证其安全正常运行,电力系统还装备有相当于其神经的继电保护、通信和调度控制系统等,称为二次系统。

如将火电厂的汽轮机和锅炉、水电厂的水轮机和水库、核电厂的汽轮机和核反应堆等动力设备包括进来,与电力系统一起,则称为动力系统。电力系统中传输和分配电能的部分称为电力网,它由变压器和电力线路组成。电力网按其职能分为输电网和配电网。前者将发电厂发出的电能传输至负荷中心,是电力网的主干部分;后者将电能分配给用

电力系统的接线图反映了电力系统的接线方式。由于电力系统大小不一,而且处在不断发展中,因而接线方式也多种多样。一般可将其分为简单接线方式和复杂接线方式两大类。简单接线方式又分放射式、干线式、链式、环形和两端供电方式,如图 1-4 所示。其中前三种接线方式:放射式、干线式和链式,称为开式网络,其特点是每个负荷只能从一个方向取得电能;后两种方式:环形和两端供电方式,称为闭式网络,其特点是每一个负荷可以从两个方向取得电能。

复杂接线方式可由上述各种接线方式组成。实际电力系统的接线方式均属复杂接线方式。电力线路还可采用双回路方式,以增大传输能力和提高供电的安全性及可靠性。

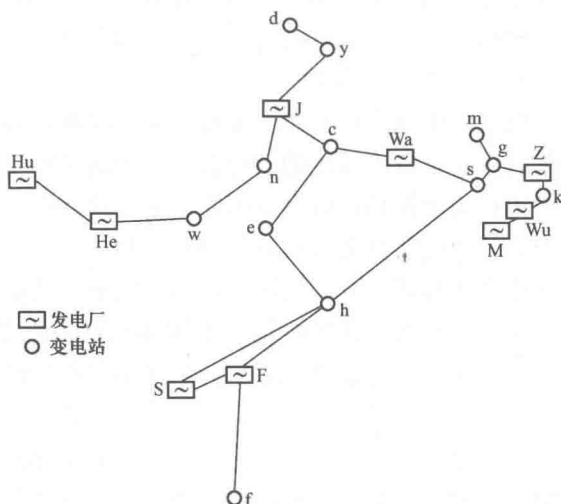


图 1-3 某一简单电力系统的地理接线图

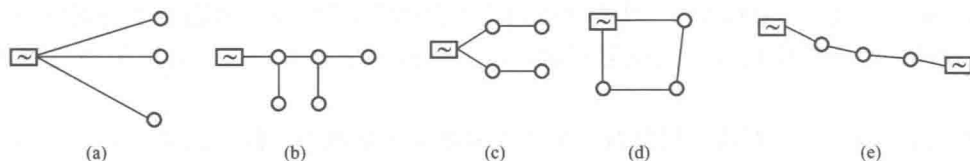


图 1-4 电力系统的简单接线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式; (d) 环形; (e) 两端供电方式

各种不同接线方式都有自己的优点和缺点。选择接线方式时,应根据负荷的性质和要求对多种方案进行技术经济比较后择优选定。

第二节 电力系统的运行特点和对电力系统运行的基本要求

与其他工业产品相比,电能的生产、传输、分配和消费具有以下三个特点:

(1) 重要性。如前所述,电能国民经济和人民生活起着极其重要的作用,电能供应的中断或减少将影响国民经济的各个部门,造成巨大的损失。

(2) 快速性。由于电能的传播速度接近光速,因而它从一处传至另一处所需的时间极短,电力系统从一种运行方式转变到另一种运行方式的过渡过程非常快,电力系统事故的发生到引起严重后果所经历的时间常以秒甚至毫秒计,以至人们往往来不及做出反应。

(3) 同时性。由于电能不能大量储存,因而电能的生产、传输、分配和消费实际上是同时进行的,即所有发电厂任何时刻生产的电能必须与该时刻所有负荷所需的电能与传输分配中损耗的电能之和相平衡。这代表电力系统运行时必须满足的一类约束条件为

$$\text{有功功率平衡 } P_{G\Sigma} = P_{D\Sigma} + \Delta P_L$$

$$\text{无功功率平衡 } Q_{G\Sigma} = Q_{D\Sigma} + \Delta Q_L$$

式中: $P_{G\Sigma}$ 、 $Q_{G\Sigma}$ 分别为电源发出的总有功率和无功功率; $P_{D\Sigma}$ 、 $Q_{D\Sigma}$ 分别为负荷取用的总有

有功功率和无功功率; ΔP_L 、 ΔQ_L 分别为系统总的有功功率损耗和无功功率损耗。

根据以上特点,对电力系统的运行提出了三个基本要求:

1. 安全可靠持续供电

供电的中断将造成生产停顿、生活混乱,甚至危及设备和人身的安全,引起十分严重的后果。因此,电力系统的运行首先必须满足安全可靠持续供电的要求。

值得指出的是,电力系统的安全性和可靠性是有着不同含义的两个概念。安全性是要求电力系统中的所有电气设备必须在不超过它们所允许的电压、电流和频率的条件下运行,不仅在正常运行情况下应该如此,而且在事故情况下也应该如此。因此电力系统的安全性表征电力系统短时间内在事故情况下维持持续供电的能力,属电力系统实时运行中要考虑的问题。可靠性指电力系统向用户长时间不间断持续供电的概率指标,属电力系统规划设计的范畴。电力系统的可靠性是一专门课题,一般不列在电力系统分析课程内。

虽然保证安全可靠持续供电是对电力系统的首要要求,但在实际中停电总是难以绝对避免的,只能尽量减少停电的概率和停电造成的损失。为此,根据负荷的重要程度将其分类,并针对不同级别的负荷采用相应的措施保障供电,是合理而可行的。电力系统中一般将负荷分为三级:

(1) 第一级负荷。对这类负荷中断供电将造成极其严重的后果,如危及人身安全、造成重要设备损坏、生产秩序长期不能恢复正常、国民经济产生重大损失、人民生活发生严重混乱等。

(2) 第二级负荷。对这一类负荷中断供电将造成大量减产,使人民生活受到影响。

(3) 第三级负荷。不属于以上两类负荷者。对其停电不会造成重大损失。

对第一级负荷要保证不间断供电,对第二级负荷也应尽量保证不间断供电。此外,还有极少数特殊重要的负荷要求绝对可靠地不间断供电。对各级负荷可根据具体情况采用适当技术措施保障对其供电的安全可靠,如对第一、二级负荷采用有备用的接线方式等。

2. 优质

电能的质量指标包括电压质量、频率质量、波形质量和三相对称性等。良好的电能质量指:

(1) 电压正常,偏移不超过一定范围,如额定电压的 $\pm 5\%$ 。

(2) 频率正常,偏差超过规定值,如 $\pm 0.05 \sim 0.2 \text{ Hz}$ 。这代表了电力系统运行时必须满足的一类不等约束条件,即

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}, f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$$

式中: $U_{i \min}$ 、 $U_{i \max}$ 分别为系统中 i 点允许的最低电压和最高电压; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为系统允许的最低频率和最高频率。

(3) 电压、电流波形为正弦波,不应产生大的畸变。

(4) 三相电压、电流对称。

电能质量差会引起不良后果,如电压、频率偏移过大会使工厂的产量减少、废品增加、设备寿命缩短,严重时还会造成人身伤亡和设备损坏。

3. 经济

电能生产的规模很大,如我国现在的年发电量达数万亿千瓦时,因此提高电能生产的经济性具有十分重要的意义。这包括尽量降低每千瓦时电所消耗的能源(即设法降低煤耗率、

水耗率、厂用电率等)、尽量降低传输和分配过程中的损耗(其指标为网损率,定义为整个电力网传输过程中损耗的电能与电源发出的总电能之比)、尽量提高用电设备的效率等。

应该指出,上述三个方面的要求是相互联系又相互制约的。一个供电不安全的电力系统谈不上电能的质量和运行的经济性,电能质量低下的系统往往既不安全又不经济,片面追求经济可能会影响电能的质量和运行的安全。因此,对于具体的电力系统和负荷的具体性质,在考虑上述三个方面的要求时应全面衡量、统筹兼顾。合理的提法是在安全可靠的前提下保证质量,力求经济。

为了满足上述三个基本条件,现代电力系统正在向着大和高的方向发展,即采用大容量、高效率的发电机组,形成规模越来越大、电压越来越高的联合电力系统,系统运行的稳定性和自动化水平也越来越高。

第三节 电力系统的额定频率和额定电压

所有电气设备都是按指定的频率和电压设计制造的,在此频率和电压下运行电气设备将具有最佳的技术经济指标。这个指定的频率和电压称为电气设备的额定频率和额定电压。

目前,世界上的电网的额定频率有 60Hz 和 50Hz 两种。北美采用 60Hz,欧洲、亚洲等多数地区采用 50Hz。一个实际正常运行的电力系统,其运行频率是一样的,处处相同(交直流混合电力系统除外);但额定电压随电气设备而不同,即使在同一电压等级范围内,各处的电压也不完全相同。这是电力系统的频率和电压所具有的不同特点。

为保证电气设备生产的系列化和标准化,各国都制定有标准的额定电压等级。我国制定的标准额定电压分为三类:第一类为 100V 以下,适用于蓄电池和安全照明用具等电气设备的额定电压;第二类为 500V 以下,适用于一般工业和民用电气设备的额定电压;第三类为 1000V 以上高压电气设备的额定电压,也是电力系统的额定电压,列于表 1-1 中。

表 1-1

我国制定的 1kV 以上的标准额定电压

(kV)

用电设备 额定线电压	交流发电机 额定线电压	变压器额定线电压	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
—	13.8、15.75、18、20、22、24、26	13.8、15.75、18、20、 22、24、26	—
—	—	20	21 及 22
(20)	—	35	38.5
35	—	66	72.5
66	—	110	121
110	—	220	242
220	—	330	363
330	—	500	550
500	—	750	—
750	—	1000	—
1000	—		

注 电力系统的额定电压如无特殊声明均为线电压。

从表中可看出,在同一电压级中,用电设备、发电机和变压器的额定电压不相一致,这是由它们在电力系统中所处的地位不同而引起的,因而需相互配合。下面分别予以说明。

负荷是用电设备,其额定电压就是标准中的用电设备额定电压。

电力线路的额定电压(也称电力网的额定电压)与用电设备的额定电压相同,因此选用电力线路额定电压时只能选用国家规定的电压级。沿电力线路传输电能时,会产生能量损耗和电压损耗,因而电力线路上各点的运行电压不同。电压损耗的大小随多种因素变化,如电压的高低、电力线路的长度、导线截面积的大小及排列方式等,但一般应控制在 5% 以内,从而正常运行时电力线路首端的运行电压常为用电设备额定电压的 105%,末端电压为额定电压。

发电机的额定电压比电力网的额定电压高 5%,因发电机接在电力线路的首端,通常还带有一定的地方负荷。现代发电机的额定电压范围为 10.5~31kV (旧式小容量发电机有 6.3kV 的),这是由于发电机定子的空间较小,电压太高时绝缘困难。为了实现电能的高压传输,需用变压器升压。

变压器的一次绕组(即接受功率的绕组)接电源,相当于用电设备,其额定电压与电力线路的额定电压相同。但直接与发电机相连的升压变压器的额定电压与发电机的额定电压相同,即为该电压级额定电压的 105%。变压器的二次绕组(即输出功率的绕组)经电力线路向负荷供电,相当于电源,其输出的电压应较电力线路的额定电压高 5%,但因变压器本身漏抗的电压损耗在额定负荷时约为 5%,所以变压器二次侧的额定电压规定比电网的额定电压高 10%,如果漏抗较小(短路电压的百分值小于 7.5)或二次侧直接与用电设备相连的变压器,其二次侧额定电压为电网额定电压的 105%。应指出,变压器二次绕组额定电压是指其二次侧空载时的电压,带负荷时二次侧电压将低于其额定值,且随负荷的大小而变化,带额定负荷时约为电网额定电压的 105%,满足电力线路首端的电压要求。两绕组变压器有两个额定电压:一次额定电压和二次额定电压。三绕组变压器有三个额定电压:一个一次额定电压和两个二次额定电压。

上述规则的核心是为了保证负荷的运行电压为额定电压,从而使用电设备取得最佳的技术经济指标,因为用户是电力系统的服务对象。

根据上述规则可以确定电力系统中各元件的额定电压。下面举例说明之。

【例 1-1】 确定图 1-5 所示电力系统各元件的额定电压。各级电网的额定电压已标注于图中。

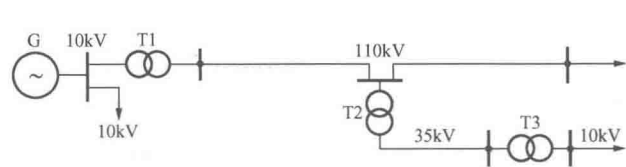


图 1-5 [例 1-1] 图

解 根据上述电力系统元件额定电压的选取规则,此简单电力系统中发电机和各变压器的额定电压分别为:
发电机 G 的额定电压为 10.5kV;
变压器 T1 的额定电压为 10.5/121kV;

变压器 T2 的额定电压为 110/38.5kV;

变压器 T3 的额定电压为 35/11kV;

电力线路的额定电压与图中所示各级电网的额定电压相同。

除了表 1-1 所列的额定电压外，在一些国家，如中国和苏联等，电力系统的计算中还采用另一类额定电压——平均额定电压 U_{avN} ，其值大约为额定电压 U_N 的 1.05 倍，见表 1-2。

表 1-2 和额定电压对应的平均额定电压 (kV)								
额定电压 U_N	3	6	10	35	110	220	330	500
平均额定电压 U_{avN}	3.15	6.3	10.5	37	115	230	345	525

应指出，平均额定电压 U_{avN} 并不严格等于额定电压 U_N 的 1.05 倍，而是取如表 1-2 中规定的平均额定电压值。采用平均额定电压有一定的优越性，如发电机的额定电压即为该级的平均额定电压。对变压器，比如连接 110kV 和 10kV 两个电压级，当为升压变压器时，其高压侧的额定电压为 $1.1 \times 110 = 121\text{kV}$ ，当为降压变压器时，高压侧的额定电压则为 $1 \times 110 = 110\text{kV}$ ，出现了同一电压级有两个不同额定电压的现象，因而在一定场合认为该变压器的额定电压为平均额定电压 $U_{avN} \approx (121 + 110) / 2 \approx 115\text{kV}$ ，会较为方便，又不至带来太大的误差。关于平均额定电压的应用将在后续章节中介绍。

电力线路的电压等级越高，可传输的电容量越大，传输的距离也越远。表 1-3 列出了它们之间的关系。

表 1-3 电力线路的电压与输送容量和输送距离的关系					
线路电压 (kV)	输送容量 (MVA)	输送距离 (km)	线路电压 (kV)	输送容量 (MVA)	输送距离 (km)
3	0.1~1.0	1~3	110	10~50	50~150
6	0.1~1.2	4~15	220	100~500	100~300
10	0.2~2.0	6~20	330	200~800	200~600
35	2~10	20~50	500	1000~1500	250~850
60	3.5~30	30~100	750	2000~2500	500 以上

第四节 电力系统的运行状态和中性点接地方式

一、电力系统的运行状态

电力系统的运行状态由电压、电流、功率、频率等一些运行参数表征。

电力系统的运行状态有多种，也有不同的分类方法。

一种常用的分类方法是 将电力系统的运行状态分为稳态和暂态。所谓电力系统的稳态，是指电力系统正常的、变化相对较慢、较小以至可以忽略的运行状态；所谓电力系统的暂态，是指电力系统非正常的、变化较大以至引起系统从一个稳定运行状态向另一个稳定运行状态过渡的变化过程。二者的本质差别在于：稳态的运行变量与时间无关，描述其特性的是代数方程；暂态的运行变量与时间有关，描述其特性的是微分方程。这种分类方法常用在一般的电力系统分析中，分别称为电力系统稳态分析和电力系统暂态分析。

另一种分类方法是 将电力系统的运行状态分为正常安全状态、正常不安全状态（也称告警状态）、紧急状态和待恢复状态。这四种状态之间的关系如图 1-6 所示。图中的等号“=”代表满足等约束条件 $P_{G\Sigma} = P_{D\Sigma} + \Delta P_L$ 、 $Q_{G\Sigma} = Q_{D\Sigma} + \Delta Q_L$ ；不等号“≠”代表不满足等

约束条件; 符号 “ $>$ ”, 代表满足不等约束条件, 如 $P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$, $Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}$, $U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}$, $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$; “ $\nless$ ” 代表不满足不等约束条件。

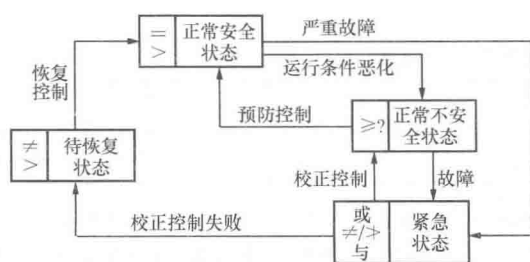


图 1-6 电力系统的运行状态

电力系统在绝大多数时间里处于正常安全状态。此时等约束条件和不等约束条件均满足, 而且还有一定的裕度, 从而系统具有在事故情况下持续供电的能力, 即具有安全性。如果运行条件恶化, 如负荷迅速增长或某些发电机组退出运行时, 系统便进入正常不安全状态, 也称告警状态。此时等约束条件和不等约束条件虽仍满足, 但系统已无安全性可言, 如出现故障系统将无法继续维持

向用户供电, 必须采取预防控制措施使系统恢复到正常安全状态。如此时再发生故障, 系统便进入紧急状态。

系统在紧急状态时, 等约束条件或/与不等约束条件不再满足, 此时必须及时采取校正控制措施使系统恢复到正常不安全状态, 进而恢复到正常安全状态。如果控制失败, 则事故进一步扩大, 导致系统解列, 进入待恢复状态。解列后的系统无法满足等约束条件, 产生大面积停电现象, 此时只有采取恢复控制措施才能使系统重新回到正常安全状态。电力系统从正常状态到紧急状态乃至待恢复状态的过程非常短, 通常只有几秒钟或几分钟, 但系统解列以后再从待恢复状态回到正常安全状态, 则要经历相当长的时间。这种分类方法用于电力系统的安全分析中。

二、电力系统的中性点接地方式

电力系统的中性点指发电机和星形接线变压器的中性点。电力系统中性点的接地方式主要分直接接地和不接地两类。两种方式各有优缺点: 直接接地系统供电安全性低, 因在这种系统中发生单相接地故障时, 接地点和中性点会形成回路, 从而接地相的短路电流很大。此时为了防止损坏电气设备必须迅速切除接地相。不接地系统单相接地时无上述现象, 从而供电安全性提高, 但非接地相的电压将升高至原相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 如图 1-7 (b) 所示, 从而要求电气设备的绝缘水平提高。在电压高的系统中, 绝缘水平的提高将使设备费用大为增加, 所以电压高的系统一般采用中性点直接接地方式。我国目前对 110kV 及以上电压级的系统均采用中性点直接接地方式, 35kV 及以下电压级系统则采用中性点不接地方式。此外, 有些大城市中以电缆为主的 10kV 和 20kV 配电网的中性点也有采用经小电阻接地方式的。

从属于中性点不接地方式的还有中性点经消弧线圈接地方式。所谓消弧线圈, 实质上即电抗线圈, 其外形和单相变压器相似, 但内部为一分段带间隙的铁芯。消弧线圈由美国学者 W·Peterson 于 1916 年首先倡议并被采用。他不但对电力系统中与短路有关的各种问题进行了全面分析, 提出了解决途径, 而且还为分析运行中可能出现的各种问题提供了完备的理论基础, 因此消弧线圈又称 Peterson 线圈。下面用图 1-7 和图 1-8 的示意图说明消弧线圈的作用。

由图 1-7 可见, 由于导线对地电容的存在, 中性点不接地系统中单相 (如 a 相) 接地时, 短路电流呈容性。当线路很长时, 此电流很大, 会使接地点电弧不能自行熄灭, 引起弧光接地过电压, 进而形成严重的系统事故。为避免上述情况的发生, 可将系统中的某些中性

点经消弧线圈接地,以构成另一回路,从而接地相中的接地电流增加了一个感性电流分量 $\dot{I}'_a$,如图 1-8 所示。它和原来的容性电流 $\dot{I}_a$ 合成后使总的接地电流减小,电弧易于消除。若感性电流 I'_a 等于容性电流 I_a ,称为全补偿;若 I'_a 小于 I_a 称为欠补偿;若 I'_a 大于 I_a ,称为过补偿。实用中一般采用过补偿以考虑系统的进一步发展和避免谐振的发生。根据我国有关规程规定,35、66kV 系统和不直接连接发电机、由架空线路构成的 6~20kV 系统,当单相接地故障容性电流大于 10A 又需在接地故障条件下运行时,中性点应装设消弧线圈;不直接连接发电机,由电缆线路构成的 6~20kV 系统,当单相接地故障容性电流大于 10A 又需在接地故障条件下运行时,中性点宜装设消弧线圈。

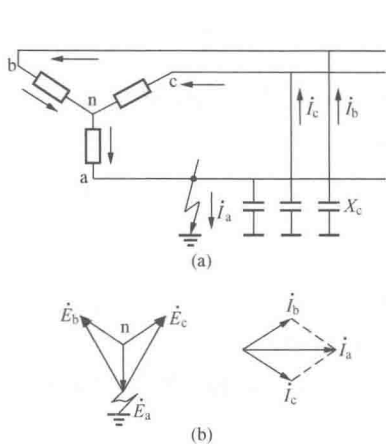


图 1-7 中性点不接地系统的单相接地

(a) 电流分布; (b) 电动势、电流的相量关系

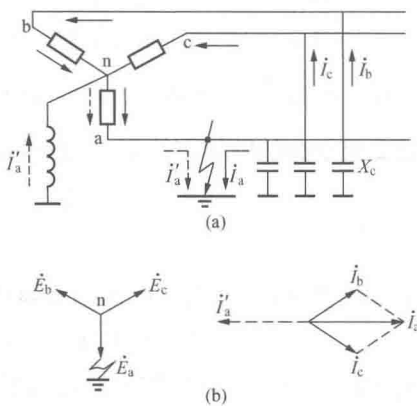


图 1-8 中性点经消弧线圈接地系统的单相接地

(a) 电流分布; (b) 电动势、电流的相量关系

除经消弧线圈接地方式外,有些大型发电机的中性点采用经高电阻接地方式,以提高运行的稳定性。其原理将在第五章介绍。

中性点不接地、经消弧线圈接地和经高电阻接地也统称为非直接接地。

电力系统的中性点接地方式是一个复杂的问题,关系到绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线等诸多方面,有关课程中将进一步讨论。

第五节 正弦交流电路的基本关系和标幺制

现代电力系统主要由三相正弦交流电路组成。在电力系统分析中,电压、电流、阻抗、导纳和功率是最常用的物理量。在电力系统计算中广泛采用标幺制,本节先做一简单介绍,具体应用将在以后的有关章节中说明。

一、交流电路的基本关系

设在图 1-9 所示简单单相交流电路中有

$$\begin{cases} u(t) = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ i(t) = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中: $u(t)$ 为交流电压瞬时值, V; $i(t)$ 为交流电流瞬时值, A; U 为交流电压有效值, V; I 为交流电流有效值, A; ω 为交流电的角频率, rad/s, 角频率 ω 与频率 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$

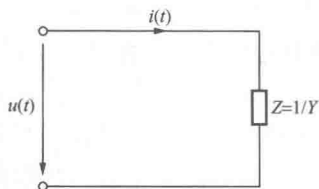


图 1-9 简单单相交流电路

Z —电路的阻抗(Ω),它由电阻和电纳组成, $Z=R+jX$; Y —电路的导纳(S),它由电导和电纳组成, $Y=G+jB$

$=2\pi f$; φ 为电压和电流间的初始相位差, rad; t 为时间, s; $\omega t - \varphi$ 为 t 时刻的相位角, rad, 手算时常将角度的单位化为 ($^\circ$)。

根据定义, 电功率 (简称功率) 是单位时间的电能, 瞬时功率等于电路中同一点电压和电流瞬时值的乘积, 即

$$p(t) = dw/dt = u(t)i(t) = 2UI \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - UI \sin \varphi \sin 2\omega t \quad (1-2)$$

式中: ω 为角频率, rad/s; J ; $p(t)$ 为瞬时功率, W; $\cos \varphi$ 为功率因数。

定义 $S=UI$ 称为视在功率 (VA), $P=S \cos \varphi$ 称为有功功率 (W), $Q=S \sin \varphi$ 称为无功功率 (var), 定义 $\dot{S}=P+jQ=UIe^{j\varphi}=\dot{U}\dot{I}^*$, 称为复功率 (VA), $\dot{I}^*$ 为电流相量 $\dot{I}$ 的共轭值, 利用正弦交流电路的欧姆定律 $\dot{U}=\dot{Z}\dot{I}$ 和关系式 $Z=1/Y$, 有

$$\begin{cases} \dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = ZI^2 = \dot{Y}U^2 \\ S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI \end{cases} \quad (1-3)$$

于是, 由式 (1-2), 图 1-9 中电路消耗的瞬时功率为

$$p(t) = P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t = p_R + p_X \quad (1-4)$$

式中: $p_R = P(1 - \cos 2\omega t)$ 称为瞬时功率的有功分量; $p_X = -Q \sin 2\omega t$ 称为瞬时功率的无功分量。

瞬时功率在一个周期内的平均值为

$$\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t] dt = P \quad (1-5)$$

可见, 交流电路的有功功率 P 正是它的平均功率, 更准确地说, 是瞬时功率的有功分量 p_R 在一个周期内的平均值, 它反映了电路中电阻元件消耗电能的速率。瞬时功率无功分量 p_X 在一个周期内的平均值为零, 表明不消耗电能而仅与电源交换能量, 无功功率 Q 就反映了电路中电抗 (电容) 元件与电源交换能量的速率。

综上, 单相交流电路的基本关系可归纳为

$$\begin{cases} \dot{U} = Z\dot{I} (\dot{I} = Y\dot{U}) \\ \dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ (S = UI, P = UI \cos \varphi, Q = UI \sin \varphi) \end{cases} \quad (1-6)$$

值得指出的是, 图 1-9 中元件的阻抗 Z 为感性, $Z=R+jX$ ($X>0$), 此时无功功率 $Q=UI \sin \varphi>0$, 习惯中称为“消耗”无功功率, 是无功负荷。如元件的阻抗 Z 为容性, 则 $\varphi<0$, 此时无功功率 $Q<0$, 称为“发出”无功, 是无功电源。另需注意, 计算功率时电压和电流必须取自同一点。

二、三相交流电路的基本关系

现代电力系统均为三相正弦交流电路。虽然三相接线有 Y 和 Δ 两种方式, 但为了简化分析, 均以 Y 连接作为标准连接方式。若为 Δ 连接, 则将其化为等值的 Y 连接。于是, 在对称三相交流系统中, 存在如下关系: 线电压为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 线电流与相电流相等, 三相功率为一相功率的 3 倍, 即