



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力系统分析

王晓茹 高仕斌 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力系统分析

Dianli Xitong Fenxi

王晓茹 高仕斌 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书分为10章：第1章主要介绍电力系统电功率以及电力系统的接线方式、电压等级、运行基本要求和电能质量指标等基本概念；第2章阐述电力系统元件和电网的数学模型；第3、4章分别阐述简单电力系统正常运行分析和复杂电力系统潮流计算；第5章介绍电气化铁道牵引供电系统的组成、接线方式和正常运行分析；第6章论述无穷大功率电源供电系统三相短路和同步电机三相短路的短路电流分析，以及电力系统三相短路的实用计算方法；第7章阐述对称分量法和电力系统元件各序分量等值电路及参数；第8章阐述不对称故障分析和计算；第9章阐述电气化铁道牵引供电系统故障分析和计算；第10章阐述电力系统谐波源模型、元件谐波模型和谐波潮流分析和计算。

本书可作为高等学校“电气工程及其自动化”、“电力系统及其自动化”、“铁道电气化”专业或专业方向的“电力系统分析”课程教材，还可作为相关工程技术和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/王晓茹, 高仕斌主编. —北京: 高等教育出版社, 2011.6

ISBN 978-7-04-031787-9

I. ①电… II. ①王… ②高… 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083955号

策划编辑 金春英
插图绘制 尹 莉

责任编辑 王耀锋
责任校对 胡晓琪

封面设计 于文燕
责任印制 田 甜

版式设计 范晓红

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 廊坊市科通印业有限公司
开 本 787×1092 1/16
印 张 15.25
字 数 370 000
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2011年6月第1版
印 次 2011年6月第1次印刷
定 价 24.20元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 31787-00

前 言

电力系统分析主要涉及电力系统元件数学模型、稳态运行潮流计算、短路故障计算以及稳定性分析,是电力系统规划、设计、运行、控制等的基础。本书阐述了主要由同步电机、变压器、电力线路和电力负荷组成的电力系统的分析,包括元件数学模型、潮流计算和短路故障计算的基本理论和方法。

电力系统中大量非线性电力电子元件的应用,导致电压电流波形畸变,成为现代电力系统运行必须关注的问题。本书谐波潮流一章,阐述了电力系统谐波源模型、元件谐波模型和谐波潮流计算的基本方法。

随着中国电气化铁道,尤其是高速铁路的快速发展,电气化铁道牵引供电系统容量大幅增长,系统接线方式和运行工况复杂,对供电能力和供电可靠性有更高的要求。本书阐述了电力系统与电气化铁道牵引供电系统的关系以及牵引供电系统分析的基本方法。

电力系统分析是电力系统基础理论,除此之外,希望本书还能为电气化铁道牵引供电系统工程相关课程的学习起到承前启后的作用。

参加本书编写的有:王晓茹(第1、6、7、8、10章、附录I—III)、高仕斌(第5.1、5.2和第9章)、黄彦全(第5.3和2、3、4章)。电气化铁道牵引供电系统分析部分(第5、9章)由高仕斌主编,其余部分由王晓茹主编。研究生王睿、魏星参加了第1、6、7、8、10章全部算例的编写以及图表、公式和部分文字的录入。

本书承蒙西安交通大学杜正春教授审阅,提出了不少宝贵意见和建议。在谐波源模型编写过程中,得到了西安交通大学夏道止教授、西南交通大学王远波副教授和郭育华副教授的帮助。对此我们表示衷心的感谢。

由于编者的水平和教学经验有限,书中错误和不妥之处请读者批评指正。

编者

2011年4月

目 录

1 电力系统概述	1
1.1 电力系统基本概念	1
1.2 电功率	3
1.2.1 单相正弦交流电路的功率	3
1.2.2 对称三相正弦电路中的功率	4
1.2.3 非正弦单相交流电路的功率	4
1.3 发电厂以及各种形式的能源	5
1.4 电力系统电压等级和额定电压	5
1.5 电力网结构和接线方式	7
1.6 电力系统运行的基本要求和电能质量指标	9
2 电力网元件数学模型	12
2.1 电力线路参数和等值电路	12
2.1.1 电力线路的电阻	13
2.1.2 电力线路的电抗	13
2.1.3 电力线路的电纳	15
2.1.4 电力线路的电导	16
2.1.5 电力线路的稳态方程和等值模型	17
2.2 变压器参数和等值电路	22
2.2.1 三相双绕组变压器	22
2.2.2 三相三绕组变压器	24
2.2.3 自耦变压器	28
2.3 多电压等级电力网数学模型	28
2.3.1 标幺制	28
2.3.2 多电压等级电力网等值电路	29
2.3.3 具有非标变比变压器的多电压等级电力网的等值电路	33
3 简单电网潮流计算和分析	34
3.1 电力系统稳态运行分析概述	34
3.2 简单电力系统稳态运行分析	35
3.2.1 简单电力系统稳态运行分析的计算依据	35

3.2.2	简单电力系统稳态运行分析的计算方法	36
4	复杂电力系统潮流计算	44
4.1	潮流方程和节点分类	44
4.1.1	节点导纳矩阵	44
4.1.2	潮流方程及节点分类	46
4.2	潮流问题及求解	47
4.3	高斯-塞德尔法潮流计算	47
4.4	牛顿-拉夫逊法潮流计算	49
4.4.1	牛顿-拉夫逊法基础	49
4.4.2	节点电压为极坐标形式的牛顿-拉夫逊法潮流计算	51
4.4.3	节点电压为直角坐标形式的牛顿-拉夫逊法潮流计算	54
4.5	P-Q 分解法潮流计算	55
4.6	直流法潮流计算	57
4.7	关于潮流计算的讨论	61
5	电气化铁道牵引供电系统	62
5.1	牵引供电系统简介	62
5.2	电力系统与电气化铁道牵引供电系统的关系	63
5.3	电气化铁道牵引供电系统组成	65
5.3.1	牵引变压器的接线方式	65
5.3.2	牵引变电所主接线	72
5.3.3	牵引网接线方式	75
5.3.4	电气化铁路牵引负荷	77
5.4	牵引供电系统潮流计算	80
6	电力系统三相短路故障分析和计算	83
6.1	短路故障的基本概念	83
6.2	无穷大功率电源供电系统三相短路	85
6.3	同步发电机三相短路	89
6.3.1	同步电机基本方程	89
6.3.2	同步发电机三相短路	99
6.3.3	短路电流周期分量起始值和冲击电流计算	102
6.4	电力系统三相短路实用计算	105
6.4.1	三相短路电流周期分量起始值计算	106
6.4.2	应用计算曲线计算三相短路电流周期分量	116
6.4.3	三相短路电流周期分量的近似计算	121
7	三相电力系统序网等值电路和参数	123
7.1	对称分量法及其在不对称短路计算中的应用	123
7.2	电力系统元件的序等值电路和序参数	127

7.2.1	同步电机负序和零序阻抗	127
7.2.2	异步电动机和综合负荷的负序和零序阻抗	128
7.2.3	三相变压器的零序等值电路和参数	128
7.2.4	三相电力线路的零序阻抗	131
7.3	电力系统序网等值电路制订	134
8	电力系统不对称故障分析和计算	137
8.1	各种不对称短路的故障点电流和电压	137
8.2	各序电压和电流经变压器后的相位变换	146
8.3	不对称短路时电力系统中电流和电压的分布	147
8.4	电力系统非全相运行	151
9	牵引供电系统短路故障分析和计算	157
9.1	牵引供电系统短路故障概述	157
9.2	牵引变压器的等值电路模型与母线短路电流	157
9.2.1	V/v 接线牵引变压器	157
9.2.2	V/x 接线牵引变压器	159
9.2.3	三相 Y/Δ - 11 接线牵引变压器	161
9.2.4	平衡接线牵引变压器	162
9.3	牵引网短路故障分析和计算	166
9.3.1	AT 供电系统短路故障分析	166
9.3.2	带回流线的直接供电系统短路阻抗计算	182
9.3.3	牵引网短路电流计算	184
10	谐波潮流计算	190
10.1	谐波及谐波潮流计算的一般概念	190
10.2	谐波源模型	192
10.2.1	单相整流器	193
10.2.2	电力机车	194
10.2.3	高压直流输电三相电力变流器	200
10.3	元件谐波模型和负荷谐波模型	203
10.3.1	发电机	203
10.3.2	变压器	203
10.3.3	电力线路	204
10.3.4	负荷	205
10.4	谐波潮流计算	208
10.5	三相谐波潮流计算	209
10.5.1	三相电力线路相参数	210
10.5.2	变压器相参数	212
10.5.3	发电机和负荷相参数	215

10.5.4 三相谐波潮流计算 215

附录 I 同步电机基准值 220

附录 II 同步电机三相短路电流的推导 222

附录 III 常用网络变换的基本公式 233

参考文献 234

1 电力系统概述

1.1 电力系统基本概念

现代社会最广泛使用的能源是电能。电力系统最根本的任务就是生产电能,即将其他形式的能源转换成电能,并将电能提供给用户使用。同时,提高社会的电气化程度,以电能代替其他形式的能量,也是节能的一个重要途径。

发电机把机械能转换为电能,电能经变压器、电力线路等电力设备输送并分配到用户,用户的电动机、电炉、电灯等用电设备又将电能转换为需要的机械能、热能和光能等。这些发电、输电、配电、用电的所有装置和设备一起组成了电力系统。迄今为止,电力系统经历了 130 多年发展的历史。电力系统中除发电机和用电设备外的部分称为电力网或电网。需要说明的是,在实际应用中,“电力网”和“电力系统”有时不加区分,指的是相同的意思。

电力系统是并网运行的。这指的是在一个电力系统中的所有发电机和用户的用电设备是通过电力网连接在一起的。目前,我国电网已基本上全国联网,形成四个同步运行电网:东北电网、三华电网(华北电网、华东电网、华中电网)、西北电网和南方电网。其中:东北电网与华北电网直流互联;西北电网与华中电网、华北电网直流互联;华中电网与南方电网直流互联。西藏电网将与西北电网直流互联。

电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的。不考虑储能时,发电厂任何时刻生产的电功率必须等于该时刻用电设备消耗的电功率和电力网损耗的电功率之和。电力系统中用电设备主要有电动机、电热装置、整流装置和照明设备等。所有用电设备所消耗的电功率总和称为电力系统综合用电负荷。综合用电负荷加上电力网的功率损耗就是发电厂应该供给的功率,称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂厂用电消耗的功率,就是各发电厂应该发出的功率,称为电力系统的发电负荷。随时间随机变化是电力系统负荷的一个重要特点。

描述电力系统的部分技术术语有:

总装机容量:电力系统的总装机容量指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和,以 kW(千瓦)、MW(兆瓦)和 GW(吉瓦)等计。

年发电量:指该系统所有发电机组全年实际发出电能的总和,以 kW·h(千瓦时或度)、

MW·h(兆瓦时)和 GW·h(吉瓦时)等计。

最大负荷:指规定时间,如一天、一月或一年内,电力系统总有功功率负荷的最大值,以 kW、MW、GW 等计。

标称频率:标称频率是指系统设计选定的频率。我国交流电力系统的标称频率为 50 Hz,简称工频。

系统标称电压*:用以标志或识别系统电压的给定值。

电压等级:电压等级是在电力系统中使用的标称电压值系列。按照我国国家标准《GB/T 156—2007 标准电压》:6 kV 及以上三相交流系统的标称电压值有 6、10、20、35、66、110、220、330、500、750、1 000,其均为线电压,以 kV 计;交流单相牵引系统标称电压为 25 kV。同一电力系统中往往有几种不同电压等级。最高电压等级,是指该系统中最高的标称电压值。

地理接线图:电力系统的地理接线图主要显示系统中发电厂、变电所的地理位置,电力线路的路径,及它们相互间的连接。

电气接线图:电力系统的电气接线图主要显示该系统中发电机、变压器、母线、断路器、电力线路之间的电气接线。三相对称电力系统的电气接线图通常用单线图表示。图 1-1 示出一简单电力系统的电气接线图。

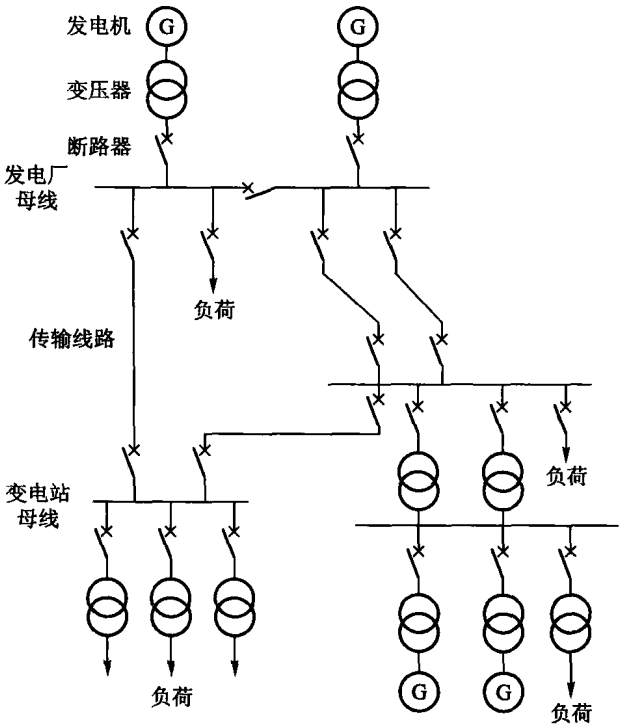


图 1-1 简单电力系统电气接线图

*注:国家标准《GB/T 156—2007 标准电压》中,交流(或直流)系统的标准电压用“标称电压”表示;相关设备的标准电压用“额定电压”表示。本文参考书籍中对两者不加区分,本书也沿用此惯例。在第 2 章及其以后各章节叙述中,对“标称电压”和“额定电压”不作区分,均以“额定电压”表示。类似地,“标称频率”也用“额定频率”表示。

2009 年,我国电力系统总装机容量为 8.74 亿千瓦,年发电量为 36 506 亿千瓦时,交流系统最高电压等级为 1 000 kV。

1.2 电功率

1.2.1 单相正弦交流电路的功率

单相正弦交流电路的电压 u 和电流 i ,在图 1-2 所示参考方向下分别为

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2} U \sin(\omega t) \\ i(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

电路的瞬时功率是电路在任一瞬间吸收或发出的功率,等于瞬时电流和瞬时电压的乘积

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) i(t) = 2UI \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos \varphi \cdot \cos 2\omega t + UI \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中,前两项之和是一个只改变大小而不改变方向的瞬时功率分量,其零值和极大值与电流的零值和极大值一致,对应于表示电能耗能速率的有功分量;后一项在一个周期内的平均值为零,表示电源和电路之间能量往返交换的速率,对应于无功分量。

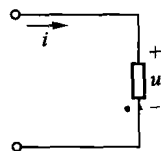


图 1-2 单相正弦交流电路的电压和电流

电路的有功功率定义为电路的平均功率,即

$$\begin{aligned} P &\triangleq \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)] dt \\ &= UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (1-3)$$

其值等于瞬时功率的恒定分量,又等于瞬时功率有功分量的极大值。

电路的无功功率定义为

$$Q \triangleq UI \sin \varphi \quad (1-4)$$

它是瞬时功率无功分量的极大值,反映了电源和电路之间能量往返的大小。

电路电压和电流有效值的乘积,定义为视在功率,即

$$S \triangleq UI \quad (1-5)$$

显然

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1-6)$$

视在功率、有功功率、无功功率,可以用一个复数来表达

$$\tilde{S} \triangleq \dot{U} \dot{I} = P + jQ \quad (1-7)$$

$\tilde{S}$ 称为复数功率。

设任意无源电路输入端的等效阻抗 $Z = R + jX$ 或等效导纳 $Y = G + jB$,则

$$\left. \begin{aligned} S &= \dot{Y} U^2 = Z I^2 \\ P &= G U^2 = R I^2 \\ Q &= -B U^2 = X I^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

1.2.2 对称三相正弦电路中的功率

对称三相电路中,任意两端线的电压称为线电压,每端线对中性点的电压则是相电压。对称三相正弦电路中,无论电源和负载如何连接,三相电路的有功功率恒等于每相有功功率的三倍,三相电路的无功功率恒等于每相无功功率的三倍。

电力系统的输电系统采用3相3线制。对称三相电路相对单相电路具有优势。对称三相电路能产生交流异步电动机需要的旋转磁场,也可以获得单相交流电,而且相同电压时,3相3线制每条线路传输的功率是单相2线制每条线路传输的1.15倍。电力系统的低压配电系统采用3相4线制,标称相电压为220V,标称线电压为380V。

不加说明时,三相对称电力系统中的功率,包括发电机、变压器等电力设备的功率、电网传输的功率和负荷功率等均指三相功率,而电压均指线电压。

1.2.3 非正弦单相交流电路的功率

周期为 T 的非正弦电压 u 和电流 i ,根据傅立叶级数理论,可表示为各次谐波分量之和

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \sum_{n=1}^N \sqrt{2} U_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \\ i(t) &= \sum_{n=1}^N \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \beta_n) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中, $\omega = 2\pi/T$ 为基波角频率, U_n 、 α_n 、 I_n 、 β_n 分别为第 n 次谐波电压和电流的有效值、初相角。 N 为所含谐波的最高次数。一般标准规定考虑到50次谐波,对于大多数应用,考虑2~25次谐波范围就足够了。

电压 u 和电流 i 的有效值为

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2} \\ I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

视在功率为电压有效值和电流有效值的乘积,即

$$S = UI \quad (1-11)$$

有功功率为一个周期内瞬时功率的平均值,即

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) i(\omega t) d(\omega t) \quad (1-12)$$

将式(1-9)代入上式,经化简后得

$$P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos(\alpha_n - \beta_n) \quad (1-13)$$

它表明有功功率为由电压和电流中的直流分量、基波和各次谐波分量形成的有功功率之总和,而不同频率的电压和电流之间并不形成有功功率。

无功功率定义为

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos(\alpha_n - \beta_n) \quad (1-14)$$

可以推出视在功率、有功功率和无功功率之间的关系

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1-15)$$

该关系与一般正弦电压和电流所形成的功率之间的关系不同,由于电压和(或)电流的非正弦性,在视在功率关系式(1-15)中出现了 D^2 项,它的存在是由于电压和(或)电流的波形发生畸变而造成的,所以 D 称为畸变功率。

有功功率 P 和视在功率 S 之比 P/S 仍称为功率因素。电压、电流中谐波分量的存在以及畸变功率的出现,往往使功率因素变得更低。只有当 $u(t)$ 与 $i(t)$ 每一时刻瞬时功率之比保持不变时,功率因素才等于 1。

1.3 发电厂以及各种形式的能源

发电厂利用自然界蕴藏的各种能源来生产电能。按所使用能源的不同,发电厂可以分为火力、水力、原子能、风力、太阳能、生物质、地热和潮汐发电厂等。目前在电力系统中起主导作用的是火力、水力和原子能发电厂。风能、光伏、燃料电池等多种可再生新能源的利用正在世界范围内蓬勃发展。由于在能源和资源消耗、环境保护等方面面临着极其严峻的形势,我国已将节能和可再生能源的开发利用列入国家中长期能源战略规划和环境保护的重要组成部分,这对我国的能源可持续发展和环境保护具有战略性的重要意义。

水力发电厂利用水流的动能和势能来生产电能。水驱动水轮机转动,与水轮机直接相连的发电机将机械能转换成电能。火力发电厂利用煤、石油、天然气或其他燃料所产生的热能,在锅炉中将水变成高温高压蒸汽,推动汽轮机,带动发电机发电。原子能发电厂利用核燃料在反应堆中产生的热能,将水变成高温高压蒸汽,推动汽轮机,带动发电机发电。

根据热力学原理,蒸汽参数越高,热力循环的热效率也越高。随着单机功率的提高,蒸汽温度已高达 650°C ,蒸汽压力已达 352 个大气压。目前世界上最大的汽轮机容量达到 175.5 万千瓦,最大的火力发电厂装机容量 680 万千瓦。

水电的发展是水能开发的结果。目前世界上最大的水电站是我国的三峡水电站,三峡水电站安装 26 台单机容量为 70 万千瓦的水轮发电机组,总装机容量 1820 万千瓦,年均发电量 847 亿千瓦时。

1.4 电力系统电压等级和额定电压

输电技术发展的特点是努力减少线路损失。减少线损的经济合理的方法是提高输电电压。由于电功率是电压和电流的乘积,电力线路输电功率一定时,输电电压愈高,则电流愈小,线损愈小;另一方面,电流愈小,则导线等载流部分的截面积愈小,投资愈小。但电压愈高,对绝缘的要求愈高。提高输电电压,与线路、变压器和断路器等绝缘技术发展水平密切相关。

迄今为止,输电技术的发展史就是持续不断地提高电压等级的历史,同时提高输送功率和输送距离,并解决线路走廊问题。1898 年,美国研制出 33 kV 电力线针式绝缘子;1910—1914 年,

美国和前苏联科学家发现电晕临界电压与导线直径成比例,促使了铝线、钢芯铝绞线、扩径或分裂导线的使用;1906 年美国发明 11 ~ 500 kV 电力线悬式绝缘子,并于 1908 年和 1923 年分别建成 110 kV 和 220 kV 输变电工程;1959 年前苏联建成 500 kV 输变电工程;1965 年加拿大建成 760 kV 输变电工程;1985 年前苏联建成 1 150 kV 输变电工程;2010 年中国建成晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 输变电工程。

电压愈高,对绝缘的要求愈高,杆塔、变压器、断路器等投资也愈大。综合考虑这些因素,对应一定的输送功率和输送距离有一最合理的电压等级。从设备制造角度考虑,为保证生产的系列性,应规定标准电压,用以确定元件、器件或设备的额定工作条件的电压。我国国家标准《GB/T 156—2007 标准电压》规定了电力系统以及相关设备标准电压。其中,交流(或直流)系统的标准电压用“标称电压”表示;相关设备标准电压用“额定电压”表示。该标准给出了 6 kV 及以上三相交流系统的标称电压值以及发电机额定电压(不限于此)。

同一电压等级下,电力线路和用电设备的额定电压与系统标称电压相等。用电设备都是按照额定电压来进行设计和制造的,在额定工况下运行时,具有最好的技术经济性能。而发电机、变压器与系统标称电压大部分情况下是不相等的。如表 1-1 所示,其中额定电压均指线电压。

表 1-1 电力线路及设备的额定电压

线路及用电设备额定电压/kV	交流发电机额定电压/kV	变压器额定电压/kV	
		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
35		35	37 及 38.5
60		60	63 及 66
110		110	115 及 121
220		220	231 及 242
330		330	363
500		500	550
750		750	788 及 825

注:变压器一次绕组栏内 3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV 电压适用于与发电机端点直接连接的升压变压器和降压变压器。

线路输送电功率时,会产生电压损失,沿线的电压分布往往是始端高于末端,沿线路的电压降落一般为 10%。由于实际供电电压与系统标称电压正、负偏差绝对值之和不能超过标称电压的 10% (35 kV 及以上),所以如果线路始端电压为标称值的 105%,可以使其末端电压不低于标称值的 95% 即可。发电机往往接在线路始端,所以发电机的额定电压通常为标称电压的 105%。

变压器一次侧接电源,相当于用电设备,二次侧向负荷供电,又相当于发电机,因此变压器一次侧额定电压应等于系统标称电压(直接和发电机相连的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压)。升压变压器二次侧额定电压定为较系统标称电压高 10%;降压变压器二次侧额定电压则有较系统标称电压高 10% 和 5% 两种。

各级电压线路输送能力(输送功率和输送距离)的大致范围如表 1-2 所示。从表中可见,线路电压等级越高,能够输送的电功率越大,能够传送电功率的距离也越远。大功率长距离输电通

常采用超高压或特高压线路。

表 1-2 架空线路不同电压等级下输送功率和输送距离的大致范围

线路电压 /kV	输送功率 /MW	输送距离 /km	线路电压 /kV	输送功率 /MW	输送距离 /km
3	0.1 ~ 1	1 ~ 3	220	100 ~ 500	100 ~ 300
6	0.1 ~ 1.2	4 ~ 15	330	200 ~ 800	200 ~ 600
10	0.2 ~ 2	6 ~ 20	500	1 000 ~ 1 500	150 ~ 850
35	2 ~ 10	20 ~ 50	750	2 000 ~ 2 500	500 以上
110	10 ~ 50	50 ~ 160			

1.5 电力网结构和接线方式

一、电力网结构

电力网主要是由变压器和不同电压等级的电力线路组成。通常一个大的电力网是由许多子电力网互联而成。电力网采用分层结构,一般可划分为一级输电网、二级输电网、高压配电网和低压配电网,如图 1-3 所示。

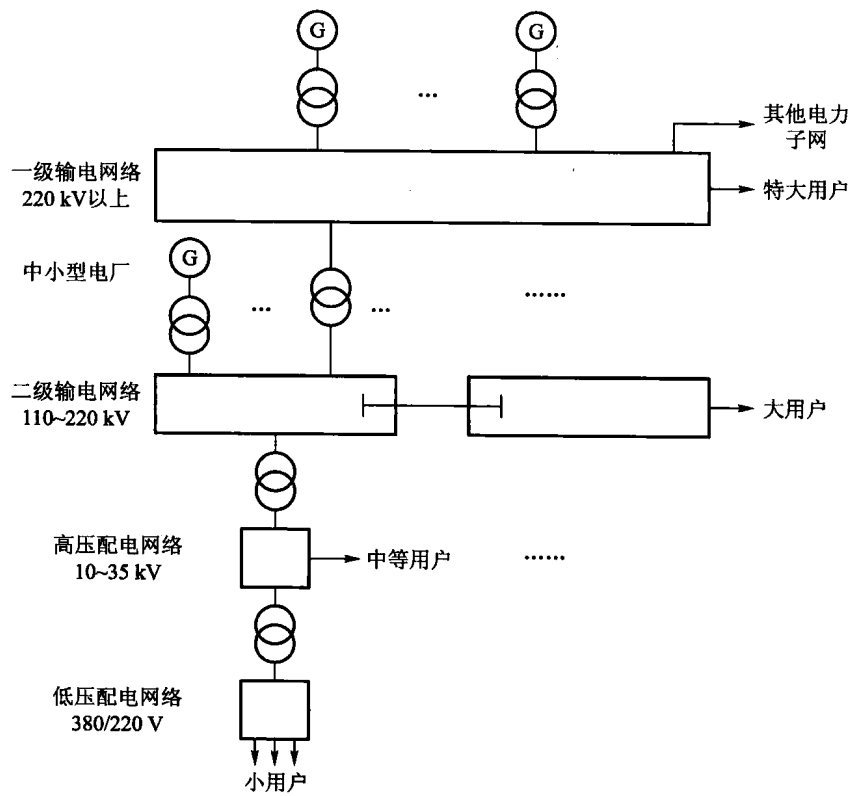


图 1-3 电力网结构示意图

一级输电网一般是由电压为 220 kV 以上的主干电力线路组成,它连接大型发电厂、大容量用户以及相邻电力子网。二级输电网的电压一般为 110 ~ 220 kV,它上接一级输电网,下连高压配电网,并连接较大型的发电厂和向较大容量用户供电。配电网是向中等用户和小用户供电的网络,电压为 10 ~ 35 kV 的称高压配电网,35 kV 配电网既用于城市和农村,也用于大工业企业的内部电网。10 kV 配电网是最常用的较低一级的高压配电网;只有负荷中高压电动机的比重很大时,才考虑 6 kV 的配电方案(高压电动机的额定电压一般为 6 kV);3 kV 配电网只限于工业企业内部使用,且正在被 6 kV 所代替。电压为 380/220 V 以下的称低压配电网。

显然,这种划分不是绝对的,也不是一成不变的,随着系统的扩大,更高一级电压出现,原电压等级有可能退居到次一级电网中使用。

二、电力网的接线方式

电力网的接线方式大致可分无备用和有备用两类。无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络,如图 1-4 所示。有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络,如图 1-5 所示。

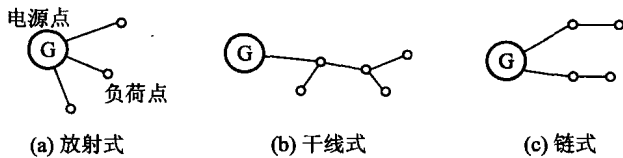


图 1-4 几种常见的无备用接线方式

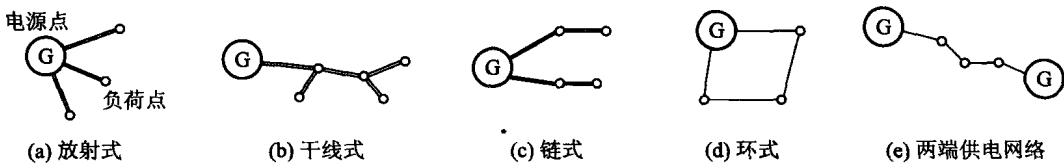


图 1-5 几种常见的有备用接线方式

无备用接线简单、经济、运行方便,但供电可靠性差。有备用接线供电可靠性高,一条线路的故障或检修一般不会影响对用户的供电,但投资大,且操作较复杂。其中,环式供电和两端供电方式较为常用。

三、电力系统中性点接地方式

电力系统中性点接地方式是指电力系统中的变压器和发电机的中性点与大地之间的连接方式。中性点接地方式有:不接地(绝缘)、经电阻接地、经电抗接地、经消弧线圈接地(谐振接地)、直接接地等。就主要运行特征而言,可将它们归纳为两大类:① 中性点直接接地或经小阻抗接地,采用这种中性点接地方式的电力系统称为有效接地系统或大接地电流系统;② 中性点不接地或经消弧线圈接地,或者中性点经高阻抗接地,从而使接地电流被控制到较小数值的中性点接地方式,采用这种中性点接地方式的电力系统称为非有效接地系统或小接地电流系统。

接地阻抗或接地电流的大小是相对的,因而有必要采用确切的指标来加以区分。相当多的

国家(包括中国)都规定:凡是系统的零序电抗(x_0)和正序电抗(x_1)的比值 $x_0/x_1 \leq 3$ 的系统,属于有效接地系统;反之,属非有效接地系统。

现代电力系统中采用得较多的中性点接地方式是:直接接地、不接地和经消弧线圈接地。在对绝缘水平的考虑占首要地位的 110kV 及以上的高压电力系统中,均采用直接接地方式。在绝缘投资所占比重不太大的 35kV 及以下中低压系统中,出于供电可靠性等方面的考虑,大都采用不接地或经消弧线圈接地的方式。不过,当城市配电系统中电缆线路的总长度增大到一定程度时,它会给消弧线圈的灭弧带来困难,系统单相接地易引发多相短路。所以,近几年来,有些大城市的配电系统改用中性点经低值(不大于 10Ω)或中值($11 \sim 100\Omega$)电阻接地,它们也属于有效接地系统。

1.6 电力系统运行的基本要求和电能质量指标

电力系统运行的基本要求是:向用户提供供电可靠并符合电能质量指标的电能;保证电力系统自身运行的安全性和提高其运行的经济性。

电力系统的负荷功率是随机并随时间变化的,而系统中任何时刻发电机生产的电功率与用户使用和电网损耗的功率要达到平衡。电力系统中发生故障时暂态过程非常短暂,如不及时切除故障可能导致电力设备损坏,甚至危及整个系统运行的安全稳定性。电力系统是机网耦合的大规模复杂系统,受到扰动时可能出现系统不稳定,从而导致大面积停电甚至系统崩溃,给国民经济和人民生活带来巨大损失和灾难。电力系统这些运行特点决定了电力系统运行的复杂性和对电力系统自动化水平的高要求。

频率和电压是电能质量的两个基本指标。此外,电能质量还包括谐波、三相电压不平衡、电压的波动和闪变、暂时过电压和瞬时过电压等。电能质量的有关国家标准,简述如下:

(1) 电力系统的频率

我国电力系统的标称频率为 50Hz。国家标准《GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差》规定,电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 $\pm 0.2\text{ Hz}$,当系统容量较小时,偏差限值可以放宽到 $\pm 0.5\text{ Hz}$ 。

(2) 供电电压

国家标准《GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差》规定:35kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%(如供电电压上下偏差同号时,按照较大的偏差绝对值作为衡量依据);20kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$;220V 单相供电电压偏差为标称电压的 $+7\%$, -10% 。

(3) 谐波

电力系统的发电机在正常稳态运行条件下,产生的电动势波形可以视为正弦波。如果电力系统中的所有元件都是线性的,电力系统中电压和电流波形也都是正弦波。如果电力系统中的元件含有非线性元件,那么即使这些非线性元件上施加的电压是正弦的,但由于其非线性伏安特性,其电流也会发生波形畸变。由于阻抗的存在,这些畸变电流产生畸变的电压降,电网的电压波形也发生畸变,从而含有谐波。因此电力系统的非线性元件是电力系统的谐波源。

现代电力系统富含非线性元件,大功率电力电子设备的应用,大量家用电器普遍采用晶体管以及其他非线性负荷的增加,特别是化工、冶金、煤炭和电气化铁道大量电力电子非线性负荷增