

FUNDAMENTAL
OF ELECTRICAL
POWER ENGINEERING

电力工程基础

FUNDAMENTAL OF ELECTRICAL
POWER ENGINEERING

李 慧 主编

河北出版传媒集团
河北科学技术出版社



电力工程基础

DIANLI GONGCHENG JICHU

李 慧 主编

河北出版传媒集团
河北科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程基础 / 李慧主编. — 石家庄 : 河北科学技术出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5375-8695-5

I. ①电… II. ①李… 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 (2017) 第 021392 号

电力工程基础

主 编 李 慧

参 编 祁 鲲 厉 虹 张 利

出版发行 河北出版传媒集团 河北科学技术出版社

地 址 石家庄市友谊北大街 330 号(邮编:050061)

印 刷 石家庄宝丽彩色印刷有限公司

经 销 新华书店

开 本 787 × 1082 1/16

印 张 20.75

字 数 250 千字

版 次 2017 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

内 容 简 介

本书系高等学校“电气工程及其自动化”专业的专业课教材。

该教材分为十一部分。第一部分介绍电力系统的组成特点、电压等级和负荷的构成及变化规律等；第二部分介绍电力网的接线形式、发电厂和变电站的电气主接线形式，以及电力系统中性点的运行方式等；第三部分介绍输电线路和变压器的参数，以及输电线路、变压器和电力网的等值电路；第四部分介绍辐射形和环形网的潮流计算方法，以及电力系统潮流的计算机算法；第五部分介绍有功功率平衡和频率调整，以及无功功率平衡和电压调整；第六部分介绍电力系统短路故障概述、无限大功率电源的三相短路电流分析；第七部分介绍同步发电机突然发生三相短路的物理过程分析，同步发电机的基本方程和等值电路，以及应用拉氏运算形式分析同步发电机突然三相短路；第八部分介绍分别应用运算曲线和转移阻抗法求任意时刻短路点的短路电流；第九部分介绍对称分量法，电力系统元件的零序和负序参数，以及发生短路故障时的等值电路；第十部分介绍发生不对称短路故障时故障处及非故障处的电压和电流计算；第十一部分介绍电力系统的稳定性概念、机电特性，以及静态稳定和动态稳定分析等。

本书特色是面向应用型人才培养，将原理、方法、经验和技術融为一体，给予读者的既有理论知识，又有实践经验，使读者学以致用。另外，三级标题采用提问式，更加清楚地引导读者把握章节的重点；并将电力系统仿真软件 EDSA 融入教材中，利用 EDSA 进行辅助教学，提高学生工程应用能力。本书附录中还提供了电力专业术语中英文对照，方便学生学习使用。

本书既可供高等学校电气工程类专业师生使用，也可供从事电力设备制造、设计、运行及管理等相关专业工作的工程技术人员参考。

目 录

1 电力系统基本概念	(1)
1.1 电力系统的组成和特点	(1)
1.1.1 我国电力工业的发展现状如何?	(1)
1.1.2 电力系统由哪几部分组成?	(3)
1.1.3 电力系统有哪些特点?	(4)
1.1.4 电力系统运行的基本要求是什么?	(5)
1.2 电力系统的电压等级	(6)
1.2.1 电力系统包括哪些额定电压等级?	(6)
1.2.2 如何选择电压等级?	(9)
1.3 电力系统的负荷	(10)
1.3.1 电力负荷由哪几部分构成?	(10)
1.3.2 如何描述电力负荷的变化规律?	(10)
1.3.3 电力负荷分哪几个等级?	(13)
小结	(14)
思考题与习题	(14)
2 电力系统接线方式	(15)
2.1 电力网的接线形式	(15)
2.1.1 输电网有哪些接线方式?	(15)
2.1.2 配电网有哪些接线方式?	(17)
2.2 发电厂和变电所的电气主接线形式	(24)
2.2.1 有汇流母线的接线形式有哪些?	(27)
2.2.2 无汇流母线的接线形式有哪些?	(35)
2.3 电力系统中性点的运行方式	(38)
2.3.1 什么是中性点不接地系统?	(38)
2.3.2 什么是中性点经消弧线圈接地系统?	(41)
2.3.3 什么是中性点直接接地系统?	(42)
2.4 电力系统接线形式的 EDSA 建模	(43)
小结	(45)
思考题与习题	(46)

3	电力系统元件参数和等值电路	(47)
3.1	输电线路的参数和等值电路	(47)
3.1.1	输电线路的电气参数如何表示?	(48)
3.1.2	输电线路的等值电路如何表示?	(53)
3.2	电力变压器的参数和等值电路	(56)
3.2.1	双绕组变压器的电气参数和等值电路如何表示?	(56)
3.2.2	三绕组变压器的电气参数和等值电路如何表示?	(60)
3.2.3	自耦变压器的电气参数和等值电路是如何表示?	(64)
3.3	电力网的等值电路	(65)
3.3.1	什么是电力网的有名值等值电路?	(65)
3.3.2	什么是标么制?	(67)
3.3.3	如何建立电力网的标么值等值电路?	(71)
3.3.4	电力网等值电路如何使用和简化?	(74)
3.3.5	如何定义频率、角速度和时间的基准值?	(75)
	小结	(75)
	思考题与习题	(76)
4	电力系统的潮流计算	(78)
4.1	电力线路和变压器运行状况的计算	(78)
4.1.1	如何计算电力线路上电压降落和功率损耗?	(78)
4.1.2	如何计算变压器中电压降落和功率损耗?	(81)
4.2	辐射形和环形网络的潮流计算	(83)
4.2.1	如何进行辐射网的潮流计算?	(83)
4.2.2	如何进行环形网络的潮流计算?	(90)
4.3	电力系统潮流的计算机算法	(97)
4.3.1	什么是电力网络方程?	(98)
4.3.2	如何得到功率方程及其迭代解法?	(99)
4.4	EDSA 在电力系统潮流计算中的应用	(109)
	小结	(116)
	思考题与习题	(117)
5	电力系统的功率平衡	(119)
5.1	电力系统的有功功率平衡及频率调整	(119)
5.1.1	什么是电力系统的有功功率平衡?	(120)
5.1.2	什么是电力系统的频率特性?	(121)
5.1.3	电力系统如何进行频率调整?	(125)
5.2	电力系统的无功功率平衡及电压调整	(126)
5.2.1	什么是电力系统的无功功率平衡?	(126)

5.2.2	什么是电力系统综合负荷的无功电压特性?	(126)
5.2.3	什么是无功电源的无功电压特性?	(128)
5.2.4	电力系统如何进行电压调整?	(131)
小结	.....	(137)
思考题与习题	.....	(138)
6	电力系统短路故障的基本知识	(139)
6.1	短路故障概述	(140)
6.2	无限大功率电源供电的三相短路分析	(142)
6.2.1	如何进行暂态过程分析?	(143)
6.2.2	什么是短路冲击电流和最大有效值电流?	(146)
小结	.....	(148)
思考题与习题	.....	(148)
7	同步发电机三相短路分析	(150)
7.1	同步发电机突然三相短路的近似分析	(150)
7.1.1	如何分析空载情况下三相短路的电流波形?	(150)
7.1.2	如何分析定子的三相短路电流?	(151)
7.1.3	如何进行短路计算?	(155)
7.2	同步发电机的基本方程、参数和等值电路	(157)
7.2.1	什么是基本方程?	(157)
7.2.2	如何获得同步发电机稳态运行方程、相量图和等值电路?	(164)
7.2.3	什么是基本方程的拉氏运算形式和运算电抗?	(166)
7.3	应用拉氏运算形式分析同步发电机突然三相短路	(171)
7.3.1	如何计算不计阻尼绕组时的短路电流?	(173)
7.3.2	如何计算计及阻尼绕组时的短路电流?	(182)
7.4	自动调节励磁装置对短路电流的影响	(188)
小结	.....	(189)
思考题与习题	.....	(193)
8	三相短路的实用计算	(195)
8.1	短路电流周期分量初始值计算	(195)
8.1.1	实用计算中有哪些假定?	(195)
8.1.2	如何计算周期电流起始值?	(196)
8.2	任意时刻短路点的短路电流计算	(200)
8.2.1	任意时刻短路电流计算的基本原理是什么?	(200)
8.2.2	如何制定运算曲线?	(201)
8.2.3	计算任意时刻 $I_r(t)$ 的步骤是什么?	(202)

8.3	转移阻抗及其求法	(203)
8.3.1	什么是转移阻抗?	(203)
8.3.2	如何求解转移阻抗?	(204)
	小结	(206)
	思考题与习题	(206)
9	对称分量法及电力系统元件的序参数和等值电路	(208)
9.1	对称分量法	(208)
9.1.1	非故障点电压与电流有什么关系?	(209)
9.1.2	故障点电流与电压有什么关系?	(211)
9.2	电力系统元件的负序和零序参数	(213)
9.2.1	什么是同步发电机的负序和零序电抗?	(213)
9.2.2	什么是异步电动机的负序和零序电抗?	(214)
9.2.3	如何获得变压器的零序电抗和等值电路?	(215)
9.2.4	如何获得输电线路的零序阻抗和等值电路?	(220)
9.3	电力系统发生短路时的等值电路	(226)
9.3.1	如何建立系统短路故障的等值网络?	(226)
9.3.2	如何获得非全相运行的等值网络?	(228)
	小结	(229)
	思考题与习题	(230)
10	不对称短路的分析计算	(232)
10.1	不对称短路时故障处电流和电压的计算	(232)
10.1.1	如何计算单相接地短路 $f^{(1)}$?	(233)
10.1.2	如何计算两相短路 $f^{(2)}$?	(235)
10.1.3	如何计算两相短路接地 $f^{(1,1)}$?	(236)
10.1.4	什么是正序增广网络(正序等效定则)?	(238)
10.2	不对称短路时非故障处电流和电压的计算	(241)
10.2.1	如何计算各序网中任意处电流、电压?	(241)
10.2.2	对称分量经变压器后的相位如何变化?	(243)
10.3	EDSA 在电力系统短路计算的中应用	(244)
10.3.1	如何进行短路故障建模?	(245)
10.3.2	如何实现短路计算?	(247)
	小结	(252)
	思考题与习题	(252)
11	电力系统稳定与控制	(254)
11.1	电力系统稳定性的概念	(254)
11.2	电力系统的机电特性	(255)

11.2.1	如何描述同步发电机转子运动方程?	(255)
11.2.2	如何表示同步发电机功角特性曲线?	(257)
11.3	电力系统静态稳定性分析	(259)
11.3.1	什么是电力系统静态稳定性?	(259)
11.3.2	如何分析简单电力系统静态稳定性?	(259)
11.3.3	提高静态稳定性的措施有哪些?	(262)
11.4	电力系统暂态稳定性分析	(265)
11.4.1	什么是电力系统暂态稳定性?	(265)
11.4.2	如何分析发电机转子的相对运动?	(266)
11.4.3	什么是面积定则?	(268)
11.4.4	提高电力系统暂态稳定性的措施有哪些?	(269)
小结	.....	(274)
思考题与习题	.....	(275)
附录 I	EDSA 使用手册	(276)
附录 II	导线的主要技术参数	(296)
附录 III	变压器的主要技术参数	(303)
附录 IV	短路电流运算曲线	(313)
附录 V	常用专业术语中英对照	(318)
参考文献	.....	(320)

1 电力系统基本概念

1.1 电力系统的组成和特点

1.1.1 我国电力工业的发展现状如何？

电力工业（Electric Power Industry）是国民经济的基础性产业，是负责把煤炭、石油、天然气、水能、风能、核能、地热和潮汐等自然界提供的一次能源转换成人们日常生活和生产中广泛使用的二次能源即电能的产业。它既为现代工业、现代农业、现代国防和现代科学技术提供必不可少的动力，又与广大人民群众的日常生活在有着密切的联系。只有电力工业的发展优先于其他的工业部门，整个国民经济才能不断前进。世界各国经济发展的经验表明：国民经济每增长1%，电力工业就要求增长1.3%~1.5%。工业发达国家几乎每7~10年装机容量就要增长一倍。

我国具有极丰富的能源资源。据最新统计，水能资源理论蕴藏量为6.76亿千瓦，技术可开发量为3.785亿千瓦，居世界首位。到目前为止，全国水能资源的开发率还不到25%。此外，煤、石油、天然气等资源也很丰富。煤的预测量约为4500兆吨。风能储量约10亿千瓦，其中陆地上风能储量约为2.5亿千瓦，海上可开发和利用的风能储量约为7.5亿千瓦。这些优越的自然条件为我国电力工业的发展提供了良好的物质基础。

截至2014年底，我国发电总装机容量已达到136 019万千瓦，同比增长8.7%。全国基建新增发电设备容量10 350万千瓦，其中，水电新增2185万千瓦，火电新增4729万千瓦，核电新增547万千瓦，并网风电新增2072万千瓦，并网太阳能发电新增817万千瓦。预计到2020年底，全国发电总装机容量将接近9.5亿千瓦（见表1-1）。纵观2014年，我国发电设备行业在关键设备和核心技术上取得了新突破：全国单机容量110万千瓦最大火电机组投产、国内最大容量超超临界66万千瓦双抽供热汽轮机投运、世界最高参数66万千瓦高效超超临界锅炉投运、世界最大350吨高速动平衡试验台投运、第三代核电技术“华龙一号”落地、我国首座钠冷快中子反应堆——中国实验快堆首次满功率并稳定运行72小时……

表 1-1 2020 (2010) 年我国电力装机容量预测 (万 kW)

年份	总计	煤电	常规水电	抽水蓄能	气电	核电	新能源
2020	95 000	59 200	22 000	2500	5500	3600	2200
	100%	62.3%	23.2%	2.6%	5.8%	3.8%	2.3%
2010	58 450	40 000	13 500	1500	1800	1250	400
	100%	68.4%	23.1%	2.6%	3.1%	2.1%	0.7%

不仅如此,目前我国电力工业已进入“大电网”“大机组”“超高压交、直流输电”“电网调度自动化”等新技术发展的新阶段,一些世界水平先进的高新技术,已在我国电力系统中得到广泛的应用。全国已经形成东北、华北、华中、华东、西北、南方6个大跨省区域电网以及新疆、西藏、海南和台湾4个独立省(自治区)电网,各电力系统覆盖范围如图1-1所示。举世无双的三峡水力发电厂总装机容量2250万千瓦,已于2012年全部建成投产。三峡水电厂是当今世界上最大的发电厂,更是世界十大可再生能源工程之一。三峡电站年发电量相当于每年减排二氧化碳1亿~1.2亿吨。三峡水电厂全部投产进一步促使全国统一电力系统的形成。一大批交流500kV和直流 ± 500 kV的输电线路已经投入运行。截至2014年底,中国已建成投运了3条1000kV特高压交流线路(亚东南—南阳—荆门、淮南—上海、浙北—福州)和4条 ± 800 kV特高压直流线路(向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密南—郑州、溪洛度左岸—浙江金华),在建2条1000kV特高压交流线路(淮南—南京—上海、锡盟—山东)和1条 ± 800 kV特高压直流线路(宁东—浙江)。到2020年,规划建设“五纵五横”特高压三华同步电网,合计27条特高压线路。这些都为国民经济的快速和可持续发展以及人民生活水平的提高起到了积极的推动作用。

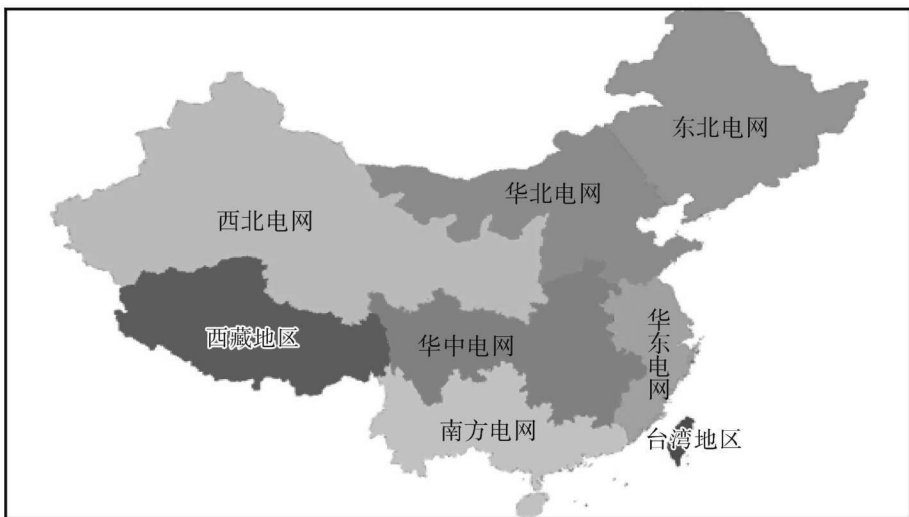


图 1-1 各电力系统覆盖范围图

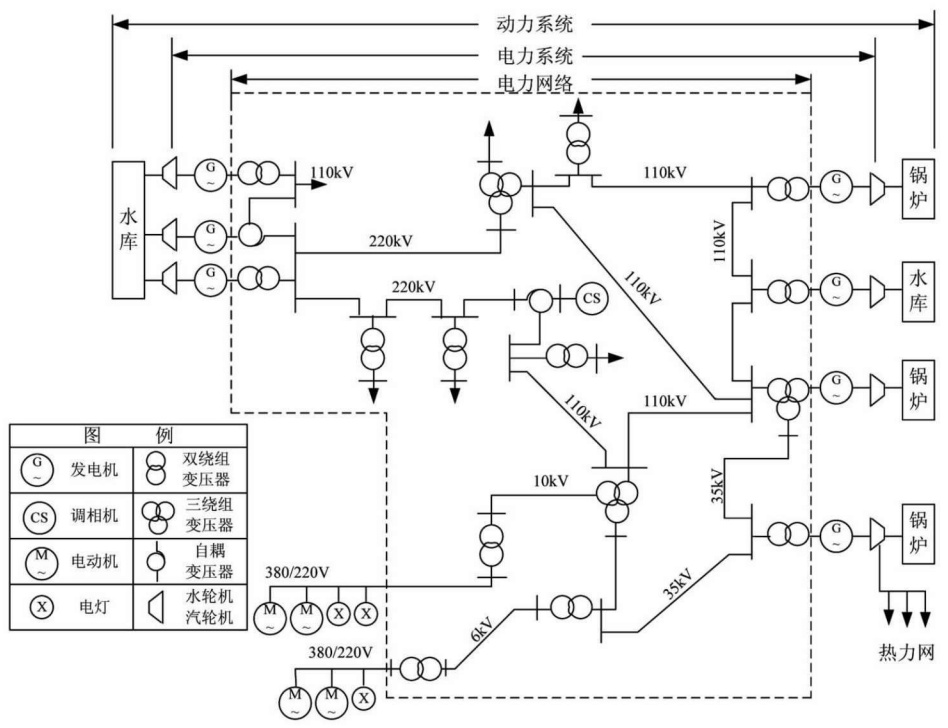
但是，国民经济的发展却远快于电力工业。电力工业的发展仍不能满足整个社会发展的需要，未能很好起到先行的作用。我国电力弹性系数近二十年来一直小于 1（平均 0.88），而世界主要快速发展国家均远大于 1（平均 1.22），发达国家平均也在 1.15。仅以 2011 年冬季的供电负荷高峰期为例，全国最大电力缺口达到 3000 万~4000 万千瓦，有 17 个省区都先后出现了拉闸限电的现象，这样的局面预期还要再过几年才可能得到较好的解决。另外，由于我国人口众多，按社会人均用电量计算，2014 年人均用电量已接近世界平均水平，但仅为部分发达国家的 1/5~1/4。

因此，要实现 21 世纪初全面建设小康社会的要求，我国的电力工业必须持续、稳步地大力发展，一方面是要大力加强电源建设，搞好“西电东送”，以确保电力先行，另一方面是要继续深化电力体制改革，实施厂网分开、竞价上网，并建立起符合社会主义市场经济法则的、规范的电力市场。

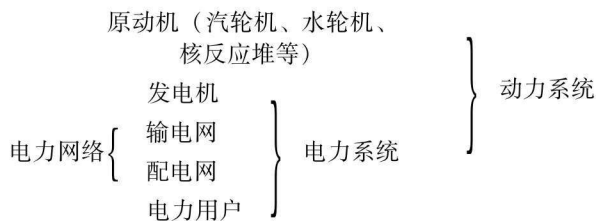
1.1.2 电力系统由哪几部分组成？

由于电能生产是一种能量形态的转换，发电厂宜于建设在动力资源所在地，而蕴藏动力资源的地区与电力用户之间又往往相隔一定距离。例如，水能资源集中在河流落差较大的偏僻地区，热能资源则集中在盛产煤、石油、天然气的矿区；而大城市、大工业中心等用电部门则由于原材料供应、产品协作配套、运输、销售、农副产品供应等原因以及各种地理、历史条件的限制，往往与动力资源所在地相距较远，为此就必须建设升压变电所和架设高压输电线路以实现电能的远距离输送。当电能输送到负荷中心后，必须经过降压变电所降压，再由配电线路向各类用户供电。

电力系统（Power System）是由发电机、输电网、配电网和电力用户组成的整体，是将一次能源转换成电能并输送和分配到用户的一个统一系统，它包括了从发电、输电、配电和用电这样一个全过程。如果把发电厂的动力部分（如热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及核电厂的反应堆等）也包括在内，则称之为**动力系统**。与电力系统相关联的是**电力网络**，它是指电力系统中除发电机和用电设备以外一部分。所以电力网络是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。这三者的关系见图 1-2 所示。



(a)



(b)

图 1-2 动力系统、电力系统、电力网络示意图

1.1.3 电力系统有哪些特点?

其实,电能也是商品,也有其生产、输送和消费环节,但是它又具有明显的特殊性。这种特殊性决定了电力系统与其他工业部门相比有着许多不同的特点,主要表现如下:

1. 电能不能大量储存

电能的生产、输送和消费实际上是同时进行的,即发电设备任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消费与输送中损耗电能之和,而且这一数值还随时间不断变化。

2. 发供用电的连续性

由于电能不能大量储存,必须保持电能生产、输送、消费流程的连续性,其中任一环节出现故障,必将影响电力系统的运行。因此,必须努力提高各环节的可靠性,以保证电力系统的安全、经济、可靠运行和对用户的不间断供电。

3. 暂态过程的短暂性

电力系统中发电机、变压器、电力线路、用电设备的投入或退出都在一瞬间完成,由此而引起的系统电磁暂态、机电暂态过程非常短暂。电能从一处输送到另一处所需的时间以 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 秒计,所以电能生产、输送、消费工况的改变十分迅速。

4. 与国民经济各部门关系密切

随着现代化的进展,各部门中电气化的程度将愈来愈高。尤其是随着信息化社会的发展,各个部门对电力的依赖程度都非常高。因而,电能供应的中断或不足,不仅直接影响国防与工农业生产、交通运输,造成国民经济损失,人民生活紊乱,在某些情况下甚至会酿成极其严重的社会性灾难。历史上一些大停电事故(如莫斯科大停电、东京大停电、美加 8·14 大停电等)的教训都证实了这一点。

1.1.4 电力系统运行的基本要求是什么?

从电力系统上述特点出发,根据电力工业在国民经济中的地位和作用,决定了对电力系统有下列基本要求。

1. 保证可靠地持续供电

这是电力系统运行中一项极为重要的任务。供电中断给国民经济造成的损失远远超过对电力系统本身造成的停电损失。因此,电力系统运行首先要满足连续可靠的要求;其次要提高运行和管理水平,防止发生误操作和不必要的人为操作失误使事故扩大化;还要加强对设备的安全运行检查;最后要加强和完善电网本身的结构,增加备用容量和采用必要的自动化设备。

2. 保证良好的电能质量

电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。用户受电端供电电压的允许波动范围:35kV 为 $\pm 5\%$, 10kV 为 $\pm 7\%$; 220V 为 $+7\% \sim -10\%$; 频率的允许偏移为 $50 \pm (0.2 \sim 0.5)$ Hz (小系统为 ± 0.5 Hz, 大系统

为 $\pm 0.2\text{Hz}$)；波形应为标准正弦波且谐波应不超过标准。电能质量合格，用电设备正常工作时具有最佳的技术经济效果；相反，电能质量不合格，不仅对用电设备运行产生影响，对电力系统本身也有危害。

3. 保证系统运行的经济性

电力系统运行时，要尽可能地降低发电、变电和输配电过程中的损耗，最大限度地降低电能成本。电能成本的降低不仅意味着能源的节省，还将影响到各用电部门成本的降低，对整个国民经济有很大好处。

1.2 电力系统的电压等级

1.2.1 电力系统包括哪些额定电压等级？

近代电力系统中，各部分电压等级之所以不同，是因为三相功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$ 。当输送功率一定时，输电电压愈高，电流愈小，导线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，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合考虑这些因素，对应于一定的输送功率和输送距离应有一个最合理的线路电压。但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不宜任意确定线路电压。另外，规定的标准电压等级过多也不利于电力工业的发展。考虑到现有的实际情况和进一步的发展，我国国家标准规定的各级标准线电压（又称额定电压）如表1-2所示。电力系统中的电气设备都是按照额定电压和额定频率来设计的，当电气设备在额定电压和额定频率下运行时，其技术经济性能才最好，也才能保证安全可靠运行。

表 1-2 额定电压等级（单位：kV）

电网和用电设备 额定电压	交流发电机	变压器	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	13.8, 15.75, 18, 20, 24	13.8, 15.75, 18, 20, 24	
35		35	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
(154)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	363

(续表)

电网和用电设备 额定电压	交流发电机	变压器	
		一次绕组	二次绕组
500		500	550
750		750	825
1000		1000	1100

由表 1-2 可看出,在同一电压等级下,各种电气设备的额定电压并不完全相等,某一级的额定电压是以用电设备的额定电压为中心而定的。为了满足用电设备对供电电压的要求,电力系统的额定电压应与用电设备的额定电压相一致。下面介绍电力系统主要元件,如发电机、变压器、电力线路、用电设备等额定电压的确定。

1. 用电设备的额定电压

以 U_N 表示用电设备的额定电压(作为其他元件的参考电压)。

2. 输电线路的额定电压

输电线路的首端和末端均可接用电设备,而用电设备的端电压一般容许在额定电压的 $\pm 5\%$ 以内波动。因而在没有调压设备的情况下,输电线路可以容许 10% 的电压损耗。

若输电线路的首端电压较用电设备的额定电压高 5%,即为 $U_1 = U_N(1 + 5\%)$,输电线路的末端电压较用电设备的额定电压低 5%,即为 $U_2 = U_N(1 - 5\%)$,则输电线路的额定电压为: $(U_1 + U_2)/2 = U_N$ 。其电压分布如图 1-3 所示。

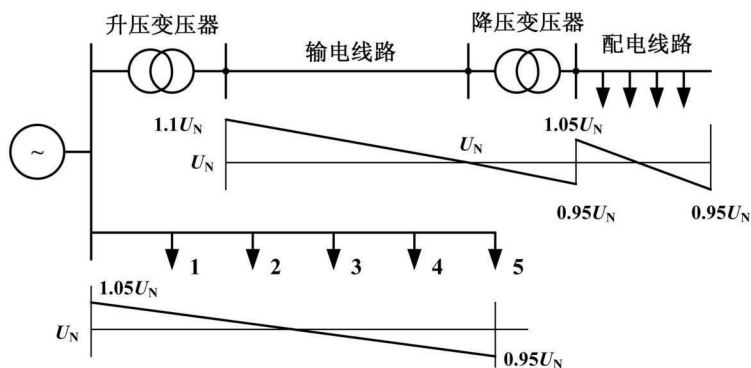


图 1-3 电网各元件额定电压示意图

3. 发电机的额定电压

发电机做为直接配电的电源，总是接在线路的首端，它的额定电压应较输电线路的额定电压高 5%，所以发电机的额定电压为： $U_{GN} = U_N(1 + 5\%)$ 。

4. 变压器的额定电压

变压器的额定电压即为变压器两侧的额定电压，以变比表示为： $k = U_{1N}/U_{2N}$ 。

变压器具有发电机和负荷的双重地位，它的一次侧是接受电能的，相当于用电设备，它的二次侧是送出电能的，相当于发电机。所以变压器一次侧的额定电压等于用电设备的额定电压，即 $U_{1N} = U_N$ 。对于直接与发电机相联的变压器，其一次侧的额定电压等于发电机的额定电压，即 $U_{1N} = U_{GN} = U_N(1 + 5\%)$ 。

考虑变压器二次侧接长线路时存在电压降落的情况，为保持正常工作时变压器在二次侧的输出电压较后面线路的额定电压高 5%，所以变压器二次侧空载电压为 $U_{2N} = U_N(1 + 5\%)$ 。考虑变压器负载运行时，又将在变压器内部约有 5% 的压降，则变压器二次侧的电压应较线路额定电压高出 10%，即 $U_{2N} = U_N(1 + 10\%)$ 。

变压器两侧的额定电压总结为：

$$\begin{cases} \text{一次侧额定电压} \begin{cases} U_{1N} = U_N & (\text{降压变压器或中间联络变压器}) \\ U_{1N} = U_{GN} & (\text{直接与发电机相联的变压器}) \end{cases} \\ \text{二次侧额定电压} \begin{cases} U_{2N} = U_N(1 + 5\%) & (\text{线路空载或直接接负载}) \\ U_{2N} = U_N(1 + 10\%) & (\text{线路 + 负载}) \end{cases} \end{cases}$$

【例 1-1】 标出例 1-4a 图电力系统中各元件的额定电压。

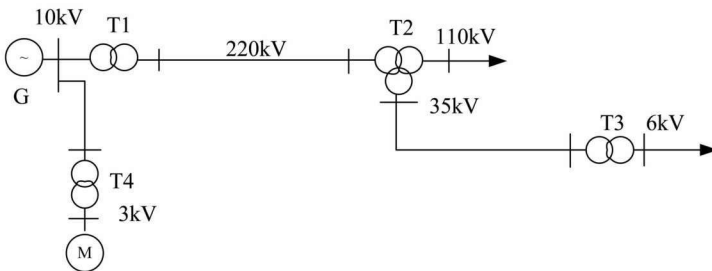


图 1-4a

解：各元件的额定电压标于例 1-4b 图中：