

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

# 电气工程基础

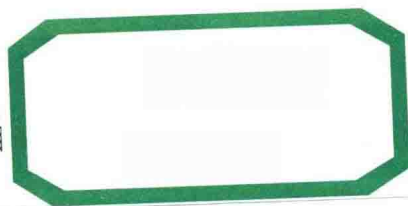
张菁 编 著

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电气工程及自



才

# 电气工程基础

张菁 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共分为五章, 主要内容包括: 绪论、负荷计算及功率因数的提高、电气主接线、载流导体的发热和电动力、电气设备的选择。本书每章均附有思考题; 书末附录有供授课、解题及课程设计用的导体及电气技术数据。本书层次分明、重点突出, 逻辑性、实用性强, 便于自学、记忆和讲授。本书引用较多实例来说明相关设计及计算, 可增强学生对本课程的全面理解。

本书主要作为普通高等学校电气工程及其自动化专业、电力系统及其自动化专业或其他相关专业的教材, 也可作为高职高专及函授教材, 还可作为工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电气工程基础/张菁编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2017.7

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4514 - 8

I. ①电… II. ①张… III. ①电气工程—高等学校—教材 IV. ①TM

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 137985 号

策划编辑 马乐惠

责任编辑 杨 璠 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 10.5

字 数 243千字

印 数 1~3000册

定 价 20.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4514 - 8/TM

**XDUP 4806001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

西安电子科技大学出版社

应用型本科 电气与自动化专业“十三五”规划教材

## 编审专家委员会名单

**主任:**汪志锋(上海第二工业大学电子与电气工程学院 院长/教授)

**副主任:**罗印升(江苏理工学院 电气信息工程学院 院长/教授)

刘 燕(常熟理工学院 电气与自动化工程学院 教授)

**成 员:**(按姓氏拼音排列)

陈 桂(南京工程学院 自动化学院 副院长/副教授)

杜逸鸣(三江学院 电气与自动化工程学院 副院长/副教授)

邓 琛(上海工程技术大学 电子电气工程学院 副院长/教授)

高 亮(上海电力学院 电气工程学院 副院长/教授)

胡国文(盐城工学院 电气工程学院 院长/教授)

姜 平(南通大学 电气工程学院 副院长/教授)

王志萍(上海电力学院 自动化工程学院 副院长/副教授)

杨亚萍(浙江万里学院 电子信息学院 副院长/副教授)

邹一琴(常州工学院 电子信息与电气工程学院 副院长/副教授)

张宇林(淮阴工学院 电子与电气工程学院 副院长/教授)

郁有文(南通理工学院 机电系 教授)

周渊深(淮海工学院 电子工程学院 副院长/教授)

# 前言

本书是根据培养应用型本科人才的需要,针对我国电力工业发展的实际,在总结教学经验、吸收以往教材长处及有关工程技术人员意见的基础上编写的。本书编写的思想是:①采用符合教学规律和实际应用的体系;②在内容上尽量覆盖电气部分的有关方面,对学生通过自学就能学懂的内容指定为“以自学为主”,这样既解决了课时限制的问题,又能让学生掌握较完整的知识;③考虑到课时限制及有关内容不宜割裂和重复,部分内容不安排在本课程讲授,其中“主接线可靠性的定量分析”宜另开选修课,大电机方面的内容宜在“电机学”中讲授,变压器方面仅讲授在“电机学”中未涉及的部分,以便配合课程设计;④注意到新技术和新设备在电力系统中的应用。作为教材,每章末均附有思考题;书末附录有供授课、解题及课件设计用的导体及电气技术数据;书中引用较多实例来说明相关设计及计算,可增强学生对本课程的全面理解。

本书重点突出、逻辑性强、层次分明、便于自学、便于记忆、易于讲授、实用性强,亦可供其他专业作教学用书或供从事电力工作的工程技术人员参考。

本书由上海工程技术大学电气工程系张菁老师编写。全书经上海电力设计院邢洁高级工程师仔细审阅,她结合电力系统实际提出了许多宝贵意见,在此编者表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,不足之处在所难免,恳请广大师生批评指正。

编者

2017年6月

# 目录

MULU

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 电力系统概述 .....	1
1.2 发电厂 .....	13
1.3 变电所类型 .....	20
1.4 发电厂和变电所电气设备简述 .....	21
思考题 .....	26
<b>第 2 章 负荷计算及功率因数的提高</b> .....	27
2.1 负荷计算 .....	27
2.2 供电系统的功率损耗和电能损耗 .....	43
2.3 工厂的计算负荷和年电能消耗量 .....	46
思考题 .....	51
<b>第 3 章 电气主接线</b> .....	52
3.1 对电气主接线的基本要求 .....	52
3.2 电气主接线的基本形式 .....	54
3.3 发电厂和变电所主变压器的选择 .....	70
3.4 限制短路电流的措施 .....	75
3.5 各类发电厂和变电所主接线的特点及实例 .....	80
3.6 主接线的设计原则和步骤 .....	86
思考题 .....	91
<b>第 4 章 载流导体的发热和电动力</b> .....	93
4.1 载流导体的发热 .....	93
4.2 载流导体短路时的电动力 .....	99
4.3 导体振动时的动态应力 .....	105
思考题 .....	108

<b>第 5 章 电气设备的选择</b> .....	109
5.1 电气设备选择的一般条件 .....	109
5.2 母线和电缆的选择 .....	112
5.3 高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择 .....	122
5.4 限流电抗器的选择 .....	125
5.5 互感器的选择 .....	128
思考题 .....	135
<b>附录 1 负荷的需要系数及功率因数值</b> .....	136
<b>附录 2 导体及电气技术数据</b> .....	140
<b>参考文献</b> .....	159

# 第1章 绪论

本章先简要概述电力系统的构成，再分别介绍各类型发电厂及变电所，最后简述发电厂和变电所的电气设备。希望通过本章能使学生对电力系统建立初步认识，掌握发电厂和变电所一次设备的原理、电气主系统的设计方法及二次回路的构成和动作原理，树立工程观点。

## 1.1 电力系统概述

### 1.1.1 电力工业的起源

19 世纪上半叶电磁学的蓬勃发展为电气技术的兴起奠定了理论基础，而电能的应用则促进了工业化国家生产力的飞速发展。1820 年奥斯特通过实验证实了电流的磁效应，1831 年法拉第发现了电磁感应定律，这些发现很快促成了电动机与发电机的发明。电机制造与电力输送技术的发展首先是从直流开始的。为了照明的目的，原始的直流发电机连接到电力线路上采用 110~220 V 直流电供给串联的弧光路灯，供电距离为 1~2 km。1882 年法国人德波里首先实现了较高电压的直流输电。德波里将密士巴赫小水电站 3 马力(1 马力 = 735.5 瓦)直流发电机的电能经过长 57 km、直径为 4.5 mm 的钢线敷设的架空线送至慕尼黑国际博览会，用以驱动水泵运转。其中，送端电压为 1300 V，受端电压约为 850 V，输送功率 1.5 kW，效率为 60%。

随着生产的发展，要求增大输送功率与输电距离，提高输电效率，这就要求提高输电电压，但为了避免出现电晕所以发电机电压不可能提得很高，且直流高压输电与用户低电压用电之间存在着难以克服的矛盾，使得当时的直流输电制遇到很大挑战。法国工程师芳建与瑞典工程师塞雷提出的直流电机串联制使得输送电压有所提高，但终因价格昂贵及运行复杂难以为继。而交流制却可使用变压器，从而简单、经济、可靠地解决了提高输电电压的问题，使得塞雷制的直流输电系统(见图 1-1)逐渐被新兴的三相交流输电制所代替。

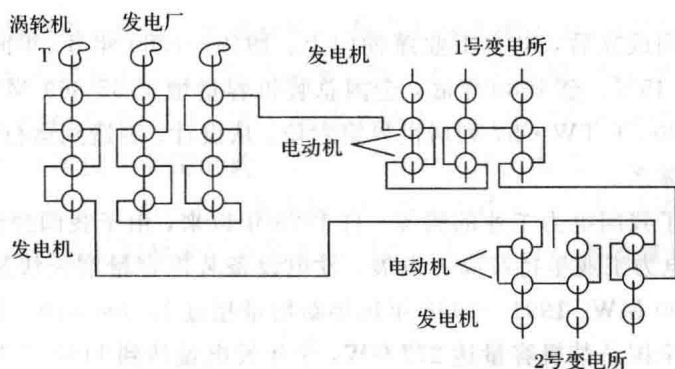


图 1-1 塞雷制的直流输电系统



1885年匈牙利工程师吉里等研究出封闭磁路的单相变压器，由此实现了单相交流输电。但由于单相交流电动机启动困难，不能保证增加发电厂的容量和扩大电网的伸展长度。1889年俄国工程师多里沃·多勃罗沃耳斯基先后发明了三相异步电动机、三相变压器和三相交流制。1891年德国工程师奥斯卡拉·冯·密勒主持建立了最早三相交流输电系统（见图1-2），它由鲁芬镇输电至法兰克福，输送距离是175 km，输送功率约为130 kW，输送效率为75.2%。其中，设在鲁芬镇的水轮发电机组转速为150 r/min，频率为40 Hz，电压为95 V，功率为230 kV·A。经升压变压器将电压升高至15 200 V，然后用直径为4 mm的裸铜线进行输电。再在法兰克福设降压站，用两台变压器将电压降至112 V，其中一台供给白炽灯，另一台供电给异步电动机用以驱动一台75 kW的水泵。上述工程的建成标志着历史上输电技术的重大突破，由此奠定了现代电力系统的输电模式。

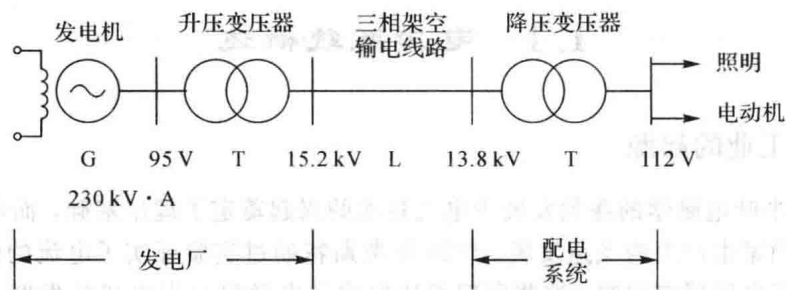


图 1-2 密勒制三相交流输电系统

### 1.1.2 我国电力工业发展概况

电力工业是国民经济的关键部门，它为实现工农业生产、科学技术的现代化和提高人民的生活水平提供动力。电力工业是先行工业，它的发展必须优先于其他工业，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。

我国具有丰富的能源资源。我国水电资源蕴藏量达676 GW，居世界首位。煤、石油、天然气资源也很丰富。煤的预测量约为4500 Mt，可利用的风力资源约为160 GW。这些优良的自然条件为我国电力工业的发展提供了资源基础。但过去中国的电力工业却非常落后，1949年全国的总装机容量仅为1849 MW，年发电量仅有4.3 TW·h，分别居世界第21位和第25位。

中华人民共和国成立后，电力工业蓬勃向上。1949—1980年30年间发电设备的年平均增长速度达到12.45%。至1980年底，全国总装机容量增至65 869 MW，列居世界第八位；年发电量增至300.6 TW·h，列居世界第六位。从设计、制造到运行、管理已初步建成较完整的电力工业体系。

改革开放推动了我国电力工业的腾飞。自1978年以来，由于我国经济体制改革和对外开放政策的实践，电力工业呈持续高速发展，发电设备装机容量增长快速，自1987年，每年新增量超过10 000 MW。1991—1998年每年新增量超过15 000 MW。增长速度居世界首位。至1998年末，全国总装机容量达277 GW，全年发电量达到1157.7 TW·h，均比1980年增长近四倍，并超过了日本和俄罗斯，仅次于美国，跃居世界第二位。2006年末，全国总

装机容量突破 600 GW, 稳居世界第二位。近些年, 中国电力事业发展迅猛, 2012 年装机容量达 10.6 亿千瓦, 居世界第二位, 年发电量达 4.8 万亿千瓦时, 居世界第一位。截至 2013 年底, 全国发电装机容量达到 12.47 亿千瓦, 跃居世界第一位。其中, 火电 8.62 亿千瓦, 占全部装机容量的 69.13%, 35 年来首次降至 70% 以下。同时, 清洁能源占比也首次突破 30%。

2016 年 4 月, 《全球新能源发展报告 2016》在北京发布。报告显示, 从发电角度看, 中国发电装机容量和发电量均居全球第一。太阳能光伏累计装机容量为世界第一。中国晶硅组件产能和产量都占到全球 70% 以上, 在世界范围内仍然保持领先地位。在新能源汽车领域, 2015 年中国销量 33.1 万辆, 同比增长 3.4 倍, 首次超越美国成为全球最大的新能源汽车生产国。并且 2015 年中国新能源产业融资额约为 1105.2 亿美元, 继续位居全球首位。同时, 在光伏新增装机容量、风电市场、新能源汽车等领域, 中国相关指标也都位居世界前列。在各类新能源应用规模方面, 中国、日本和美国分别以 17 GW、13.5 GW、8 GW 的光伏新增装机容量, 继续处于全球光伏发电市场的主导地位。中国累计装机容量达到 50 GW, 首次超过德国, 成为全球光伏累计装机容量最大的国家。同时, 中国继续在风电市场保持增长态势, 26.2 GW 的新增装机容量居全球榜首。《全球新能源发展报告 2016》对未来整个新能源发展作出预测。从前景来看, 2016—2021 年, 太阳能发电在整个新能源份额中将保持主力角色, 其他新能源也将有不同程度增长。

20 世纪 80 年代我国国民生产总值的年增长率约为 9%, 而我国在这一时期的年发电量的增长率约为 7.5%, 这说明电力供应不足, 影响了工业产值的发展。此外, 输变电设备容量的增长率又低于发电设备容量的增长率, 使有限的发电设备不能充分发挥效益。20 世纪 90 年代上述现象已有所改观。这一时期我国国民生产总值的年增长率为 7.1%~9.0%, 而年发电量的增长率为 8.0%~9.6%。20 世纪 80 年代以来我国年发电量的增长率高于一次能源消耗量的增长, 发电用能源占一次能源总消耗量的比重不断提高, 在 1980 年、1985 年、1990 年和 1995 年的这一比重分别为 18.6%、21.2%、26.5% 和 31.5%。这说明我国国民经济电气化的程度正在不断提高。而相应的能源强度(能源强度指单位产值所消耗的能源, 以每美元产值消耗的标准油重 kg/美元为单位)随着这一比重的提高不断下降, 分别为 14.3 kg 标油/美元、11.0 kg 标油/美元、9.9 kg 标油/美元和 7.1 kg 标油/美元。这说明我国的能源效率有所提高且节能潜力还很大。

随着近年来市场经济的孕育, 我国电力负荷的构成也在发生变化。重工业用电比重在下降, 城乡居民生活用电、商业、交通及建筑业用电在不断上升。2015 年, 全社会用电量 55500 亿千瓦时, 同比增长 0.5%。分产业看, 第一产业用电量 1020 亿千瓦时, 同比增长 2.5%; 第二产业用电量 40046 亿千瓦时, 同比下降 1.4%; 第三产业用电量 7158 亿千瓦时, 同比增长 7.5%; 城乡居民生活用电量 7276 亿千瓦时, 同比增长 5.0%。

自 1980 年以来, 电力工业已有显著发展, 但仍然不能满足国家经济发展和全社会进步的需要。社会人均用电量是衡量现代化的粗略判据。我国全社会用电量近 10 年已有显著进步, 见图 1-3。

数据来源：中国电力企业联合会，中国产业信息网整理

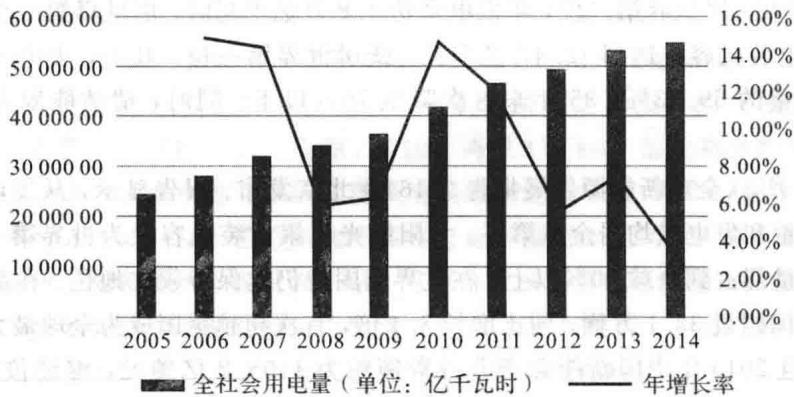


图 1-3 我国 2005—2014 年全社会用电量及年增长率

1996 年平均每个中国人拥有 0.2 kW 的装机容量以及具有 918 kW·h 的电能消耗。其中 94 kW·h 是城乡住宅的份额，约为世界平均消耗定额的 1/3，等值于工业国家消耗定额的 1/7~1/10。进入 21 世纪以来，国家投入大量资金用于农网改造，使得城乡居民生活用电同网同价，大量减轻农民电费负担。全国实施“户户通电”工程，使 22 个省(自治区、直辖市)实现户户通电，全国除西藏、青海和新疆外，行政村通电率达到 99% 以上。

### 1.1.3 电力系统基本概念

#### 一、电能质量及对电力系统的要求

##### 1. 电能的特点

电能的生产、输送、分配和使用具有以下特点：

- (1) 电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的。目前，电能还不能大量、廉价地储存，电能的生产、分配和使用必须同时完成，因此发电厂必须根据用电需要不间断地进行生产。
- (2) 电能的应用范围非常广泛。电能供应不足或供应中断，将直接影响国民经济计划的完成和人民的正常生活，对于某些工业用户甚至会发生产品报废、设备损坏以及危及人身安全等严重后果。
- (3) 自动化程度要求高。电力系统由于运行状态的改变而引起的电磁、机电暂态过程是非常短暂的，人工手动难以进行控制。因此，电力系统运行必须采用自动化程度高且能迅速而准确动作的自动调节、控制装置和监测、保护设备。

##### 2. 电能的质量

对用户的供电除了应满足用户的需要并保证供电的可靠性外，还应保证良好的电能质量。通常衡量供电电能质量的指标是三相交流电的波形、频率质量以及电压质量。为了避免电能质量不高所造成的危害，这三项指标均应保持在一定的允许变动范围内。

- (1) 三相交流电的波形是正弦波，若波形畸变则会影响电动机的转矩，或使测量仪表产生误差等。因此，要求波形畸变系数不得大于 5%。
- (2) 在电力系统正常状况下，供电频率的偏差为：电网装机容量在 3000 MW 及以上的，为  $\pm 0.2$  Hz；电网装机容量在 3000 MW 以下的，为  $\pm 0.5$  Hz。在电力系统非正常状

况下,供电频率允许偏差不应超过 $\pm 1.0$  Hz。

(3)我国目前规定的用户处的容许电压变动范围(摘自《供电营业规则》)如下:在电力系统正常状况下,35 kV及以上电压供电的,电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定值的10%;10 kV及以下三相供电的,为额定值的 $\pm 7\%$ ;220 V单相供电的,为额定值的 $+7\% \sim -10\%$ 。在电力系统非正常状况下,用户受电端的电压最大允许偏差不应超过额定值的 $\pm 10\%$ 。

### 3. 对电力系统的要求

综上所述,电力系统与其他工业部门相比较,有其不同的特点,主要是:电能不易储存;电能生产与国民经济各部门以及人民生活关系密切;过渡过程非常短暂,电力系统的地区性特点较强。对电力系统的要求,正是根据电力系统的这些特点以及电力工业在国民经济中的地位和作用提出来的。基本要求如下:

(1)保证供电的可靠性。电力系统停电不仅会给系统本身带来损失,而且会给国民经济带来更大的损失,甚至会造成人身伤亡和政治影响。为此,电力系统应尽可能对用户做到可靠供电。尤其是对一、二类用户,在任何情况下必须保证为一、二类用户可靠地供电。

(2)保证电能的质量。所谓电能的质量,是指电力系统中各点的电压和频率的偏差应保持在一定的范围内。

(3)保证电力系统运行的经济性。运行的经济性是指生产、输送和分配电能的耗费少、效率高、成本低。

综上所述,电力系统的基本任务就是保证供给用户充足、可靠、优质而且廉价的电能。

## 二、电力系统的连接和电压等级

### 1. 电力系统的连接

电力系统中,发电厂和变电所之间的电气连接方式,是由它们之间的地理位置、负荷大小及其重要程度确定的。常用的几种连接方式如下:

(1)单回路接线。这种供电方式是单端电源供电的,如图1-4(a)所示。当线路发生故障时,负荷将会停电,故不太可靠。这种接线适用于较不重要的负荷。

(2)双回路接线,其供电方式如图1-4(b)所示。虽然双回路接线方式也只有单电源供电,但是当双回路的某一条线路发生故障时,另一条输电线路仍可继续供电,故可靠性较高。同时,这两回接线接在发电厂不同组别的母线上,当某组母线出现故障时,另一组母线经另一输电线路可保持对负荷供电,故可靠性是足够高的。这种接线能担负对一、二类用户的供电。

(3)环形网络接线,其接线方式如图1-4(c)所示。如果一条线路发生故障,发电厂还可以经另外两条线路向负荷供电,故这种接线的可靠性也比较高。

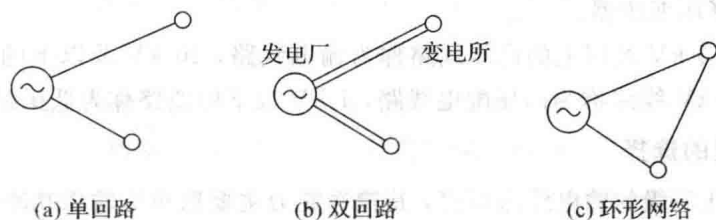


图1-4 电力系统的接线方式

## 2. 电力网的额定电压

为了完成电能的输送和分配，电力网一般设置多种电压等级。所有用电设备、发电机和变压器都规定有额定电压，即正常运行时最经济的电压。电力网的额定电压是根据用电设备的额定电压制定的。目前，我国制定的 1000 V 以上电压的额定电压标准如表 1-1 所示。

表 1-1 额定电压标准(kV)

用电设备 额定电压	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 11.0
—	15.75	15.75	—
35	—	35	38.5
(60)	—	60	66
110	—	110	121
(154)	—	154	169
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	525

对表 1-1 的说明如下：

(1) 发电机的额定电压比用电设备的额定电压高出 5%，这是由于一般电网中电压损耗允许值为 10%，而市用电设备的电压偏差允许值为  $\pm 5\%$ ，且发电机接在电力网送电端，应比额定电压高。

(2) 变压器一次侧相当于用电设备，二次侧是下一级电压线路的送端，所以一次侧电压与用电设备的额定电压相等，而二次侧比用电设备电压高 10% (包括本身电压损耗 5%)。但在 3 kV、6 kV、10 kV 电压时，若采用短路电压小于 7.5% 的配电变压器，则二次绕组的额定电压只高出用电设备电压 5%。

(3) 变压器一次绕组栏内的 3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV、15.75 kV 电压适用于发电机端直接连接的升压变压器；二次绕组栏内的 3.3 kV、6.6 kV、11.0 kV 电压适用于阻抗值在 7.5% 以上的降压变压器。

(4) 一般将 35 kV 及以上的高压线路称为输电线路，10 kV 及以下的线路称为配电线路。其中，3~10 kV 线路称为高压配电线路，1 kV 以下的线路称为低压配电线路。

## 3. 电压等级的选择

对于某一电压等级的输电线路而言，其输送能力主要取决于输送功率的大小和输送距离的远近。由于各输电线路电压等级的选择，是关系到电力系统建设费用的高低、运行是否方便、设备制造是否经济合理的一个综合性问题，因此要经过复杂的计算和技术比较才

能确定。据一般的经验, 仅将各种电压等级的输送距离和输送功率的大致关系列于表 1-2 中。

表 1-2 各种电压等级的输送距离和输送功率的大致关系

电压等级/kV	输送功率/kW	输送距离/km
6	100~1200	4~15
10	200~2000	15~20
35	2000~10000	20~50

### 三、电力系统的中性点运行方式

在三相交流电力系统中, 三相绕组作星形连接的发电机和变压器, 其中性点有三种运行方式: 中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点直接接地。其中, 中性点不接地和中性点经消弧线圈接地称为中性点非有效接地, 或称为小电流接地; 中性点直接接地称为中性点有效接地, 或称为大电流接地。

不同的中性点运行方式, 对电力系统运行的可靠性、电气设备的过电压与绝缘配合、继电保护装置的配置以及对通信的干扰等, 都有很大的影响。

#### 1. 中性点不接地的电力系统

图 1-5 所示为正常运行时中性点不接地的电力系统示意图。

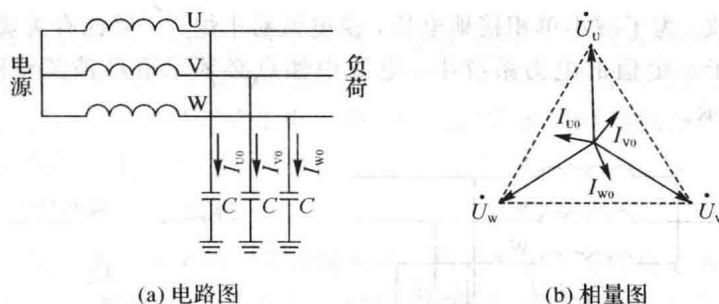


图 1-5 正常运行时的中性点不接地系统

在三相输电系统中, 相与相之间及相与地之间都存在着一一定的电容。为讨论方便, 以集中电容  $C$  来表示相与地之间的分布电容。同时认为相间无相互影响, 故不予考虑。

正常运行时, 三相电容电流  $\dot{I}_{U0}$ 、 $\dot{I}_{V0}$ 、 $\dot{I}_{W0}$  是对称的, 即  $\dot{I}_{U0} + \dot{I}_{V0} + \dot{I}_{W0} = 0$ , 没有电容电流流入大地, 每相对地的电压, 就等于其相电压。

当系统发生单相接地(设 W 相接地), 如图 1-6 所示, 由相量图可见, W 相对地电压为零, 而 U 相对地电压  $\dot{U}'_U = \dot{U}_U - \dot{U}_W = \dot{U}_{UW}$ , V 相对地电压  $\dot{U}'_V = \dot{U}_V - \dot{U}_W = \dot{U}_{VW}$ 。由此可知, W 相接地时, U、V 两相对地电压由原来的相电压升高到线电压, 即增大到正常时的  $\sqrt{3}$  倍。

因此, 在中性点不接地系统中, 各电气设备的绝缘应按线电压考虑, 增大了设备造价。此外, U、V 相对地电压升高为正常时的  $\sqrt{3}$  倍, 其电容电流也增大为正常时的  $\sqrt{3}$  倍, 而接地电流  $I_C$  是 U、V 两相电容电流的相量和, 为正常运行时一相电容电流的 3 倍。注意, 接地电流的大小与电压高低及线路长短有关, 一般为几安到几十安。

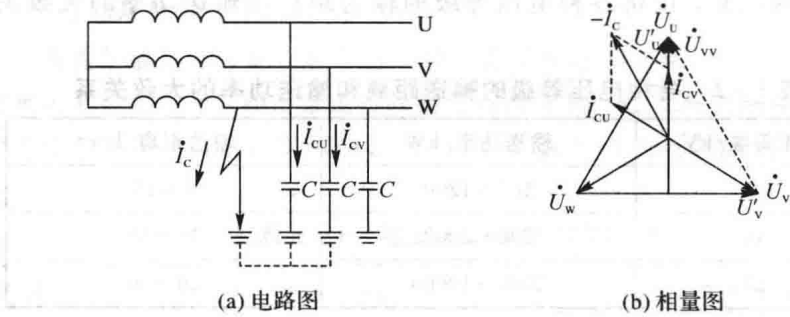


图 1-6 中性点不接地系统 W 相发生接地时的情况

必须指出，当电源中性点不接地的电力系统中发生一相接地时，三相用电设备的正常工作不会受到影响，因为线路的线电压无论相位和量值均未发生变化，所以三相用电设备仍然照常运行。但不允许系统在单相接地情况下长期运行，因为当另外任何一相再发生接地时，就会形成两相短路，造成停电。此外，单相接地电流还会产生电弧。所以必须设有监视和保护装置，以便及时发现单相接地故障，并尽快排除。

### 2. 中性点经消弧线圈接地的电力系统

在中性点不接地系统中，如发生单相接地故障，则当接地电流不大时，电弧可在电流过零瞬间自动熄灭；当接地电流较大时，可能产生间歇性电弧，引起相对地的过电压，损坏绝缘，并导致两相接地短路；当接地电流更大时，将会形成持续性电弧，造成设备烧坏并导致相间短路等事故。为了减小单相接地电流，使电弧易于熄灭，因此有关规程规定：在单相接地电容电流大于一定值的电力系统中，电源中性点必须采取经消弧线圈接地的运行方式，如图 1-7 所示。

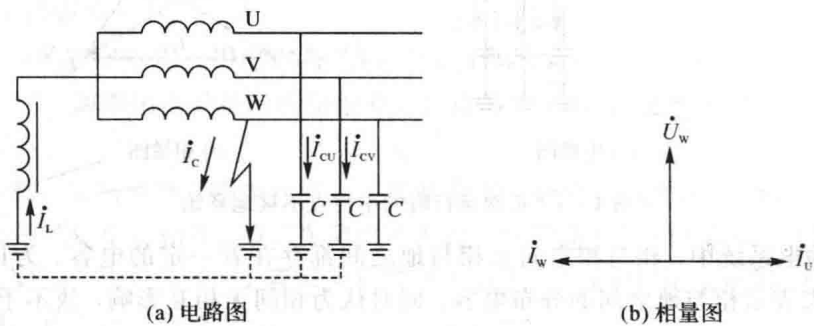


图 1-7 中性点经消弧线圈接地

消弧线圈实际上是一个带铁芯的电感线圈，其电阻很小，感抗很大。当系统发生一相接地时，流过接地点的电流是接地电容电流  $\dot{I}_C$  与流过消弧线圈的电感电流  $\dot{I}_L$  之和。由于  $\dot{I}_C$  超前  $\dot{U}_C$   $90^\circ$ ，而  $\dot{I}_L$  滞后  $\dot{U}_C$   $90^\circ$ ，所以  $\dot{I}_L$  与  $\dot{I}_C$  在接地点互相补偿。当  $\dot{I}_L$  与  $\dot{I}_C$  的量值差小于发生电弧的最小电流（一般称为最小生弧电流）时，电弧就不会发生，也就不会出现谐振过电压现象。

中性点经消弧线圈接地方式与中性点不接地方式一样，允许在单相接地故障的情况下短时运行，但应及时发现并排除故障。实际上，高压架空输电线路的单相接地故障大多是瞬时性的，在接地电弧熄灭后线路就恢复正常了。所以高压架空输电线路常采用中性点经

消弧线圈接地的方式连接。

电源中性点经消弧线圈接地的系统，在一相接地时，其他两相对地电压也要升高到线电压。即升高为原对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

### 3. 中性点直接接地系统

防止单相接地时产生间歇性电弧过电压的另一方法是将系统的中性点直接接地，如图1-8所示。

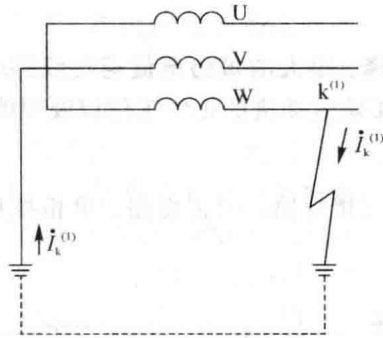


图1-8 中性点直接接地系统

如果中性点直接接地系统的一相接地，就会造成单相短路。单相短路时电流很大，通过继电保护装置，可使线路开关自动跳闸，将短路故障部分切除，让系统的其他部分恢复正常运行。

中性点直接接地系统的主要优点是：在发生单相接地时，非故障相对地电压不会升高，使电气设备对地绝缘水平的要求降低（按相电压考虑），因而设备造价低。其主要缺点是：单相接地故障时线路跳闸，造成用户供电中断，巨大的接地短路电流会产生较强的单相磁场，对附近的通信线路产生干扰。

## 四、电力系统短路的基本概念

短路是电力系统中出现最多的一种故障形式。所谓短路，是指电力系统正常运行之外的相与相或相与地之间的“短接”。在正常运行的电力系统中，除中性点之外，相与相之间、相与地之间都是绝缘的。

### 1. 短路的原因

电力系统发生短路的原因一般可分为以下几种情况：

- (1) 载流部分的绝缘被破坏，这通常是电力系统发生短路的主要原因。
- (2) 设备缺陷未被发现或未及时消除。
- (3) 输电线路断线或倒杆，使导线接地或相碰。
- (4) 工作人员误操作。
- (5) 各种动物跨接到裸露的载流导体上。
- (6) 大风、冰雹、地震、雷击等自然灾害。

### 2. 短路的后果

短路对电力系统造成的影响主要有以下几个方面：

(1) 短路电流的热效应。短路电流通常是正常工作电流的十几倍到几十倍甚至更高，这将使电气设备过热，从而使绝缘受到损伤，甚至可能烧毁电气设备。



(2) 短路电流的电动力效应。巨大的短路电流将在电气设备中产生很大的电动力，可引起电气设备的机械变形、扭曲，甚至损坏。

(3) 短路电流的磁效应。当交流电流通过线路时，会在线路周围的空间建立起交变电磁场，而交变电磁场将在邻近的导体回路中产生感应电动势。当系统正常运行时，三相电流是对称的，它在线路周围空间各点所造成的磁场均彼此抵消，故在邻近导体回路中不会产生感应电势。当系统发生不对称短路时，不对称电流产生不平衡的交变电磁场，对送电线路附近的通信线路、铁路信号集中闭塞系统、可控硅触发系统及其他自动控制系统就可能产生干扰。

(4) 短路电流产生的电压降。很大的短路电流通过线路时，会在线路上产生很大的电压降，使用户处电压突然下降，影响电动机的正常工作以及照明负荷的正常工作。

### 3. 短路的形式

在电力系统中，可能发生三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路，如图 1-9 所示。

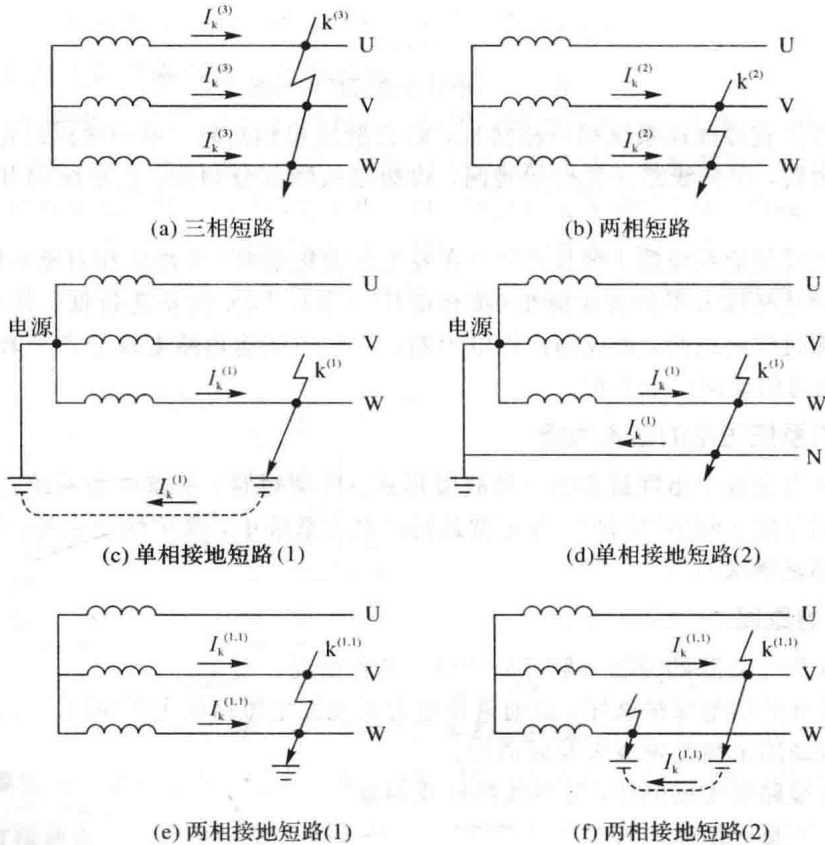


图 1-9 短路的类型

当三相短路时，由于短路回路的三相阻抗相等，因此三相电流和电压仍是对称的，故称为对称短路。但在发生其他类型的短路时，不仅每相电路中的电流和电压数值不相等，而且相角也不相同，所以这些短路被称为不对称短路。

电力系统中，发生单相接地短路的可能性最大，但三相短路的短路电流最大，造成的危害也最严重。为了使电力系统中的电气设备在最严重的短路状态下也能可靠地工作，在