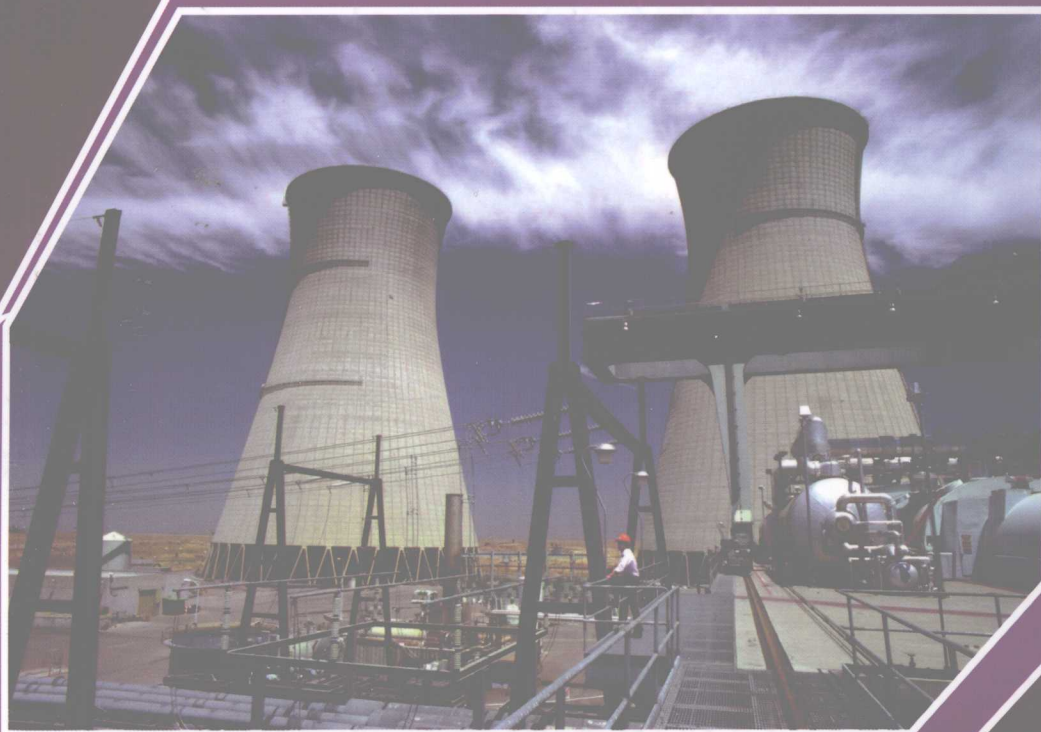


工业企业供电 实用技术 速培指南

孟祥萍 孟晓芳 李策 葛辉 渠莉娜 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工业企业供电实用技术速培指南

孟祥萍 孟晓芳 李策 葛辉 渠莉娜 等编著



机械工业出版社

本书以实际工程应用为主线，特别注意基本理论的系统性，力求将本书与实际应用有机结合。本书共8章，包括绪论、工业企业电力负荷及其计算、功率因数的改善及无功补偿、工业企业的供电系统及其变电所、短路电流计算、电气设备及其选择、工业企业供电系统的保护及接地、工业企业供电系统的二次回路与自动装置。全书本着深入浅出、少而精的原则，注重理论联系实际，并且介绍了新技术在工业企业供电中的应用和供电技术的发展趋势，便于读者掌握工业企业供配电系统的原理及设计。

本书既可作为工矿企业变电所和配电系统运行维护人员、工程技术人员的培训教材，也可作为高等院校工业自动化、电气工程及相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业企业供电实用技术速培指南/孟祥萍等编著. —北京: 机械工业出版社, 2009.6

ISBN 978-7-111-26795-9

I. 工… II. 孟… III. 工业用电—供电—指南 IV. TM727.3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 052453 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 朱 林

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈立辉

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京双青印刷厂印刷

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 437 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26795-9

定价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书作者根据多年来对工矿企业供配电设计的实际经验,针对工矿企业供配电所涉及的有关技术,并结合教学经验,在参阅大量相关书籍和文献的基础上,编写了本书。在编写过程中,以实际工程应用为主线,特别注意基本理论的系统性,力求将本书与实际应用有机结合。本书内容层次清晰,循序渐进,既可作为工矿企业变电所和配电系统运行维护人员、工程技术人员的培训教材,也可作为高等院校工业自动化、电气工程及相关专业的教材或教学参考书;全书教学内容模块化,可根据专业需要进行选择或删减;在知识点的分布上,力求覆盖工业企业供电所要求的全部重点内容。

本书共8章,第1章为绪论,主要阐述了电力系统的组成、工厂供电的特点及有关概念。第2章为工业企业电力负荷及其计算,主要讲述了按需用系数法及二项式系数法确定计算负荷、工业企业计算负荷的确定以及工业企业供电系统的功率损耗和电能损耗的计算等相关内容。第3章为功率因数的改善及无功补偿,系统地讲解了提高功率因数和无功补偿的意义和方法、无功电源结构和最佳补偿容量的确定以及智能型动态无功补偿滤波成套装置等。第4章为工业企业的供电系统及其变电所,重点分析了供配电系统的接线、变压器容量和台数的选择以及变压器的经济运行。第5章为短路电流计算,详细地阐述了短路电流的基本概念以及短路电流的计算。第6章为电气设备及其选择,介绍了供电系统的设计与计算,强调理论教学与工程实际的联系。第7章为工业企业供电系统的保护及接地,重点讲述了继电保护、过电压保护的原理、整定及应用,而且阐述了微机保护和接地装置。第8章为工业企业供电系统的二次回路与自动装置,阐述了断路器控制和信号系统、中央信号系统、供配电系统常用的自动装置。

本书由沈阳光机研究所的孟祥萍、沈阳农业大学的孟晓芳、沈阳铝镁设计研究院的李策和葛辉、北京航空航天大学渠莉娜、沈阳市供电公司的王英男、沈阳农业大学的罗海燕和王珏共同编写。另外,参与本书部分章节编写工作的还有沈阳铝镁设计研究院的戈广金、沈阳农业大学的李娜和周云成、北京航空航天大学的王志强和张博。全书由东北电力大学的任先文教授主审,这里对他的辛勤劳动表示衷心的感谢!

在编写过程中,作者们参阅了大量的相关资料,这些资料已经在参考文献中列出。由于有些资料已经无法找到出处,因此未能在参考文献中列出,这里深表歉意的同时对原作者表示敬意和感谢!本书的编写得到了有关领导、专业人士和同仁的支持,在此一并致谢。

由于作者水平和时间有限,疏漏与不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2009年6月

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 工厂供电的意义和要求 1

1.2 电力系统的基本概念 1

1.2.1 发电厂 2

1.2.2 变电站 3

1.2.3 电力网 3

1.2.4 电能用户 4

1.2.5 电力系统的辅助系统 4

1.3 电力系统的额定电压 4

1.4 电能质量的主要指标 6

1.4.1 频率 6

1.4.2 电压 6

1.4.3 波形 7

1.5 电力系统中性点的运行方式 7

1.6 工厂供电工程设计与施工的原则及主要内容 11

思考题与习题 14

第2章 工业企业电力负荷及其计算 15

2.1 电力负荷及负荷曲线 15

2.1.1 电力负荷及其分类 15

2.1.2 负荷曲线 16

2.2 用电设备的工作制及其设备容量的确定 18

2.3 计算负荷的确定 19

2.3.1 计算负荷 19

2.3.2 按需用系数法确定计算负荷 19

2.3.3 按二项式系数法确定计算负荷 24

2.3.4 单相用电设备组计算负荷的确定 27

2.4 工业企业供电系统的功率损耗和电能损耗 30

2.4.1 供电系统的功率损耗 30

2.4.2 供电系统的电能损耗 32

2.5 工业企业计算负荷的确定 33

2.6 尖峰电流的计算 34

思考题与习题 35

第3章 功率因数的改善及无功补偿 37

3.1 提高功率因数的意义和方法 37

3.1.1 提高功率因数的意义 37

3.1.2 用电设备自然功率因数的提高 37

3.1.3 企业功率因数的确定 37

3.2 无功补偿的意义和方法 38

3.2.1 无功电源结构的选择 38

3.2.2 并联电容器补偿容量的确定 40

3.2.3 并联电容器最佳补偿容量的确定 40

3.2.4 并联电容器补偿容量的最优分布 46

3.2.5 并联电容器的装设地点及投切方式 49

3.3 谐波对电容器的影响及抑制措施 50

3.3.1 谐波对并联电容器的影响 50

3.3.2 抑制措施 50

3.3.3 智能型动态无功补偿滤波成套装置 51

思考题与习题 56

第4章 工业企业的供电系统及其变电所 58

4.1 概述 58

4.1.1 变电所发展过程与趋势 58

4.1.2 变电所的类型 59

4.1.3 变电所位置的选择	60	4.9.1 变电所的布置	95
4.1.4 变电所的运行与维护	60	4.9.2 变电所的结构	96
4.2 变电所电源电压和配电电压 的确定	61	思考题与习题	99
4.3 企业供配电系统的接线	63	第5章 短路电流计算	100
4.3.1 变电所主接线的要求	63	5.1 短路电流的基本概念	100
4.3.2 总降压变电所的主接线	64	5.1.1 产生短路电流的原因	100
4.3.3 配电所的主接线	67	5.1.2 短路的种类	100
4.3.4 车间变电所的主接线	67	5.1.3 短路的危害	101
4.3.5 配电线路的主接线	68	5.1.4 计算短路电流的目的	101
4.4 变电所电力变压器容量和台 数的选择	71	5.2 短路电流暂态过程分析	101
4.4.1 变压器的型号	71	5.2.1 无限大容量电源供电系统 短路电流暂态过程分析	102
4.4.2 变压器的额定参数	72	5.2.2 有限容量电源供电系统短 路电流暂态过程分析	104
4.4.3 电力变压器类型的选择	74	5.2.3 与电路有关的物理量	105
4.4.4 主变压器的选择	76	5.3 三相短路电流的实用计算	106
4.4.5 变压器的过负荷	77	5.3.1 标幺制	106
4.5 变压器的经济运行	79	5.3.2 三相短路电流的计算	111
4.5.1 概述	79	5.3.3 应用运算曲线求任意时刻 短路点的短路电流（交流 分量有效值）	114
4.5.2 双绕组变压器的经济负 荷系数	79	5.3.4 短路电流计算结果表	119
4.5.3 变压器经济运行区	81	5.4 不对称故障分析	124
4.5.4 双绕组变压器间技术特性 的优劣判定	82	5.4.1 对称分量的概念	124
4.6 变压器的并列运行	84	5.4.2 序阻抗	125
4.6.1 变压器的并列运行条件	85	5.4.3 序网络图	127
4.6.2 变压器并列运行的经济运 行方式	86	5.4.4 不对称短路电流的计算	127
4.6.3 变压器经济运行方式优化方 法小结	91	5.4.5 两相短路电流的估算	131
4.7 变压器分列运行	91	思考题与习题	131
4.8 三绕组变压器的经济运行与并 列运行	92	第6章 电气设备及其选择	133
4.8.1 三绕组变压器的功率 损耗	92	6.1 导体的发热和散热	133
4.8.2 变压器间的技术特性 分析	93	6.1.1 导体的长期发热	133
4.8.3 三绕组变压器并列运行	94	6.1.2 导体的短时发热	135
4.9 企业变电所的布置与结构	95	6.2 短路电流的电动力计算	139
		6.3 母线的选择	141
		6.3.1 母线材料和截面形状的 选择	141
		6.3.2 母线截面积的选择及 校验	142

6.4 导线和电缆的选择	148	地保护	210
6.4.1 供电网络导线和电缆的选 择原则	148	7.4.4 高压电动机的低电压 保护	210
6.4.2 导线和电缆截面积的 选择	150	7.5 微机保护	211
6.5 高压电器及其选择与校验	158	7.5.1 微机保护的硬件及软件 结构	212
6.5.1 常用高压电器简介	158	7.5.2 企业微机保护的网路拓 扑结构	214
6.5.2 选择的一般原则	166	7.6 低压供电系统的保护	215
6.5.3 气体绝缘金属封闭开 关设备	170	7.7 工业企业供电系统的过电 压保护	217
6.6 低压设备及其选择	174	7.7.1 概述	217
6.6.1 常用低压电气设备简介	174	7.7.2 防雷保护装置	219
6.6.2 低压电气设备的选择	177	7.7.3 电气设备的防雷保护	225
思考题与习题	177	7.8 接地装置	227
第7章 工业企业供电系统的保护 及接地	179	思考题与习题	229
7.1 继电保护装置概述	179	第8章 工业企业供电系统的二次回 路与自动装置	231
7.2 工业企业高压配电网的继 电保护	188	8.1 概述	231
7.2.1 过电流保护	188	8.1.1 二次回路的基本概念	231
7.2.2 电流速断保护	194	8.1.2 二次回路的操作电源	231
7.2.3 单相接地保护	197	8.2 断路器控制和信号系统	241
7.2.4 过负荷保护	200	8.2.1 三极联动式断路器的控 制回路	241
7.3 电力变压器的继电保护	200	8.2.2 分相操作断路器控制 回路	250
7.3.1 概述	200	8.3 中央信号系统	251
7.3.2 变压器的过电流保护、电 流速断保护和过负荷保护	201	8.3.1 中央事故信号	252
7.3.3 变压器的气体保护	203	8.3.2 中央预告信号	254
7.3.4 变压器的差动保护	205	8.4 供配电系统常用的自动装置	257
7.3.5 变压器低压侧的单相接 地保护	207	8.4.1 备用电源自动投入装置	257
7.4 高压电动机的继电保护	208	8.4.2 供配电线路自动重合闸 装置	259
7.4.1 概述	208	思考题与习题	261
7.4.2 高压电动机的相间短路保 护和过负荷保护	209	附录	263
7.4.3 高压电动机的单相接		参考文献	276

第 1 章 绪 论

1.1 工厂供电的意义和要求

工厂供电就是指工厂所需电能的供应和分配，也称工厂配电。

众所周知，电能是现代工业生产的主要能源和动力。电能既易于由其他形式的能量转换而来，又易于转换为其他形式的能量以供应用；电能输送和分配既简单经济，又便于控制、调节和测量，有利于实现生产过程自动化。因此，电能在现代工业生产及整个国民经济生活中应用极为广泛。

电能工业生产中的重要性，在于许多生产部门利用电进行控制，可以大大增加产量，提高产品质量，提高劳动生产率，降低生产成本，减轻工人的劳动强度，改善工人的劳动条件，有利于实现生产过程自动化。但从另一方面来说，如果工厂的电能供应突然中断，会引起设备损坏，可能发生人身事故，对工业生产将会造成严重的后果。

因此，做好工厂供电工作对于发展工业生产，实现工业现代化，具有十分重要的意义。由于能源节约是工厂供电工作的一个重要方面，而能源节约对于国家经济建设具有十分重要的战略意义，因此做好工厂供电工作，对于节约能源、支援国家经济建设，也具有重大的作用。

工厂供电工作要很好地为工业生产服务，切实保证工厂生产和生活用电的需要，并做好节能工作，就必须达到以下基本要求：

- 1) 安全。在电能的供应、分配和使用中，不应发生人身事故和设备事故。
- 2) 可靠。应满足电能用户对供电可靠性的要求。
- 3) 优质。应满足电能用户对电压和频率等质量的要求。

4) 经济。供电系统的投资要少，运行费用要低，并尽可能地节约电能和减少有色金属的消耗量。

1.2 电力系统的基本概念

电力系统是由发电、变电、输电、配电、用电等设备和相应的辅助系统，按规定的技术和经济要求组成的，将一次能源转换为电能并输送和分配到用户的一个统一系统。如图 1-1 所示，发电厂将一次能源转换为电能，经过输电网和配电网将电能输送和分配至电力用户的用电设备，从而完成电能从生产到使用的整个过程。电力系统还包括为保证其安全可靠运行的继电保护和自动装置、调度自动化和通信等相应的辅助系统。电力系统的根本任务是向用户提供充足、可靠、合格和廉价的电能。可以简单地说，电力系统是由发电厂、变电站、电力网、用户和电力系统的辅助系统组成的。

发电机生产的电能，受发电机制造电压的限制，不能远距离输送。发电机的电压一般多为 6.3kV、10.5kV、13.8kV、15.75kV，少数大容量的发电机也有采用 18kV 或 20kV 的。这

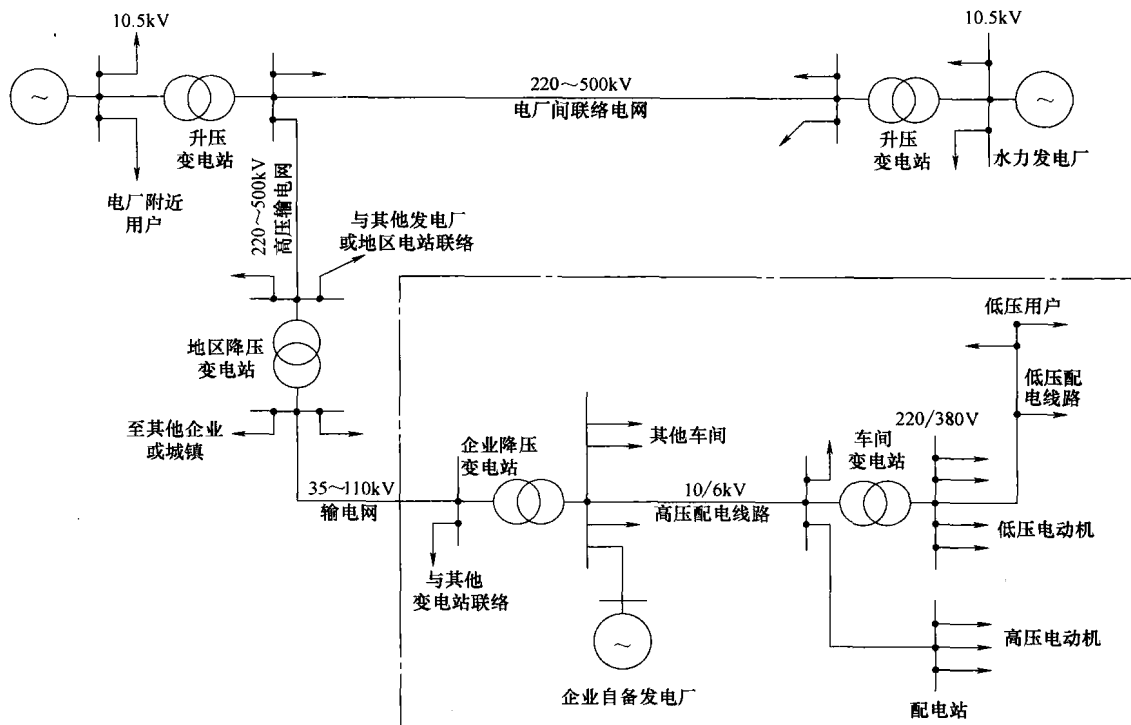


图 1-1 电力系统示意图

样低的电压级只能满足自用电和给附近的电能用户直接供电。要想长距离输送大容量的电能，就必须把电能电压升高，因为输送一定的容量，输电电压越高，电流越小，线路的电压损失和功率损失也都越小。因此，通常使发电机的电压经过升压达 $330 \sim 500\text{kV}$ ，再通过超高压远距离输电网送往远离发电厂的城镇或工业集中地区，再通过那里的地区降压变电站将电压降到 $35 \sim 110\text{kV}$ ，然后再用 $35 \sim 110\text{kV}$ 的高压输电线路将电能送至终端变电站或企业降压变电站。

下面简要介绍一下发电厂、变电站、电力网和用户的基本概念。

1.2.1 发电厂

发电厂是生产电能的工厂，又称发电站。它把其他形式的一次能源，如煤炭、石油、天然气、水能、原子核能、风能、太阳能、地热、潮汐能等，通过发电设备转换为电能。由于所利用一次能源的形式不同，发电厂可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、潮汐发电厂、地热发电厂、风力发电厂和太阳能发电厂等。我国电能的获得当前主要是火电，其次是水电和原子能发电，至于其他形式的发电，所占比例都较小。

1. 火力发电厂

火力发电厂是指用煤、油、天然气等为燃料的发电厂。其中的原动机多为汽轮机，个别的也有用柴油机和燃气轮机的。火力发电厂又可分为凝汽式火电厂和热电厂。

2. 水力发电厂

水力发电厂是把水的位能和动能转变成电能的发电厂。主要可分为堤坝式和引水式承力

发电厂。如正在建设中的三峡水电站即为堤坝式水力发电厂，建成后坝高 185m，水位为 175m，总装机容量为 1768 万 kW，年发电量可达 840 亿 kW·h，居世界首位。

3. 原子能发电厂

原子能发电厂又称核电站，如我国秦山、大亚湾核电站，是利用核裂变能量转化为热能，再按火力发电厂方式发电的，只是它的“锅炉”为原子核反应堆。

1.2.2 变电站

变电站又称变电所，是变换电能电压和接受电能与分配电能的场所，是联系发电厂和用户的中间枢纽。它主要由电力变压器、母线和开关控制设备等组成。如果只有配电设备等而无电力变压器，仅用以接受和分配电能，则称为配电站。凡是担负把交流电能变换成直流电能的统称为变流站。

变电站有升压和降压之分。升压变电站多建立在发电厂内，把电能电压升高后，再进行长距离输送。降压变电站多设在用电区域，将高压电能适当降低电压后，对某地区或用户供电。降压变电站就其所处的地位和作用又可分为以下 5 种。

1. 枢纽变电站

位于电力系统的枢纽点，连接电力系统高压和中压的几个部分，汇集多个电源，电压为 330 ~ 500kV 的变电站，称为枢纽变电站。全站停电后，将引起系统解列，甚至出现瘫痪。

2. 中间变电站

高压侧以交换潮流为主，起系统交换功率的作用，或使长距离输电线路分段，一般汇集 2 ~ 3 个电源，电压为 220 ~ 330kV，同时又降压供给当地用电，这样的变电站主要起中间环节的作用，所以称为中间变电站。全站停电后，将引起区域电网解列。

3. 地区降压变电站

地区降压变电站又称为一次变电站，位于一个大用电区或一个大城市附近，从 220 ~ 500kV 的超高压输电网或发电厂直接受电，通过变压器把电压降为 35 ~ 110kV，供给该区域的用户或大型工业企业用电。其供电范围较大，若全地区降压变电站停电，将使该地区中断供电。

4. 终端变电站

终端变电站又称为二次变电站，多位于用电的负荷中心，高压侧从地区降压变电站受电，经变压器降到 6 ~ 10kV，对某个市区或农村城镇用户供电。其供电范围较小，若全终端变电站停电，只是该部分用户中断供电。

5. 企业降压变电站及车间变电站

企业降压变电站又称企业总降压变电站，与终端变电站相似，它是对企业内部输送电能的中心枢纽。而车间变电站是接受企业降压变电站所提供的电能，降为 220/380V，对车间各用电设备直接进行供电。

1.2.3 电力网

电力系统中输送、变换和分配电能的那一部分称为电力网。电力网是把发电厂、变电站和电能用户联系起来的纽带。所以，电力网是电力系统的一个组成部分。电力网包括输电网和配电网。

输电网主要是将远离负荷中心的发电厂所发出的电能经过变压器升高电压并通过高压输电线输送到邻近负荷中心的枢纽变电所。同时，输电线还有联络相邻电力系统和联系相邻枢纽变电所的作用。

配电网是将电能从高压变电所直接分配到用户去的电力网。一从电压的高低可将电力网分为低压网、中压网、高压网和超高压网等。电压在1kV以下的称为低压网；1~10kV的称为中压网；高于10kV低于330kV的称为高压网；330kV及以上的称为超高压网。

输、配电网可按电压等级的高低分层，或按负荷密集的地域分区。不同容量的发电厂和电力用户应分别接入不同电压等级的电力网，较大容量的应接入较高电压的电力网，较小容量的可接入较低电压的电力网。

1.2.4 电能用户

所有的用电单位均称为电能用户，其中主要是工业企业。因此，研究和掌握工业企业供电方面的知识和理论，对提高工业企业供电的可靠性，改善电能品质，做好企业的计划用电、节约用电和安全用电是极其重要的。

1.2.5 电力系统的辅助系统

电力系统的辅助系统（通称二次系统），包括电力系统通信、电力系统安全自动装置、电力系统继电保护和调度自动化系统。

电力系统通信是利用有线电、无线电、光或其他电磁系统，对电力系统运行、经营和管理等活动中需要的各种符号、信号、文字、图像、声音或任何性质的信息进行传输与交换，满足电力系统要求的专用通信。

电力系统安全自动装置是指用于保护电力系统的装置。电力系统安全自动装置用以快速恢复电力系统的完整性，防止发生和中止已开始发生的足以引起电力系统长期大面积停电的重大系统事故，如失去电力系统稳定、频率崩溃或电压崩溃等。

电力系统继电保护就是当电力系统中的电力元件（如发电机、线路等）或电力系统本身发生了故障或发生危及其安全运行的事件时，向运行值班人员及时发出警告信号，或者直接向所控制的断路器发出跳闸命令，以终止这些事件发展的一种自动化措施和设备。实现这种自动化措施的成套硬件设备，用于保护电力元件的，一般通称为继电保护装置。继电保护装置是保证电力元件安全运行的基本装备，任何电力元件不得在无继电保护的状态下运行。

电力系统调度自动化综合利用电子计算机、远动和通信技术，实现电力系统调度管理自动化。调度自动化系统是现代电力系统不可缺少的组成部分，由装在调度中心的主站系统、装在发电厂或变电所的远动终端及远动通道等组成。其主要功能是实时地采集电力系统的运行参数和信息，不间断地进行监视与控制，有效地帮助电力系统调度员执行电力系统的安全经济发供电任务。

1.3 电力系统的额定电压

为使电力工业和电工制造业的生产标准化、系列化和统一化，世界上的许多国家和有关国际组织都制定了有关额定电压等级的标准。

电气设备的额定电压是国家根据国民经济发展的需要、技术经济的合理性以及电机电器制造工业的水平等因素确定的。电力系统的额定电压包括电力系统中各种发电、供电、用电设备的额定电压。

我国国家标准规定的三相交流电网和电力设备的常用额定电压，见表 1-1。

表 1-1 我国三相交流电网和电力设备的额定电压 (单位: kV)

分类	电网和用电设备 额定电压	交流发电机 额定电压	电力变压器额定电压	
			一次绕组	二次绕组
低压	0.22	0.23	0.22	0.23
	0.38	0.40	0.38	0.40
	0.66	0.69	0.66	0.69
高压	3	3.15	3, 3.15	3.15, 3.3
	6	6.3	6, 6.3	6.3, 6.6
	10	10.5	10, 10.5	10.5, 11
	—	13.8, 15.75	13.8, 15.75	—
	—	18, 20	18, 20	—
	35	—	35	38.5
	60	—	60	66
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	525

1. 电网的额定电压

电网的额定电压也就是电力线路以及与之相连的变电所汇流母线的额定电压。确定一级额定电压要根据国民经济发展的需要和电力工业的水平，关系非常重大。

2. 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压规定与同级电网的额定电压相同。但在实际运行中，线路输送功率时，沿线路的电压分布通常是首端高于末端。例如，如图 1-2 所示，沿线段 ab 的电压分布如直线 $U_a - U_b$ 所示。从而，图中用电设备 1-6 的端电压将各不相同。所谓线路的额定电压 U_N 实际就是线路的平均电压 $(U_a + U_b)/2$ ，而各用电设备的额定电压则取与同级线路的额定电压相等，使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

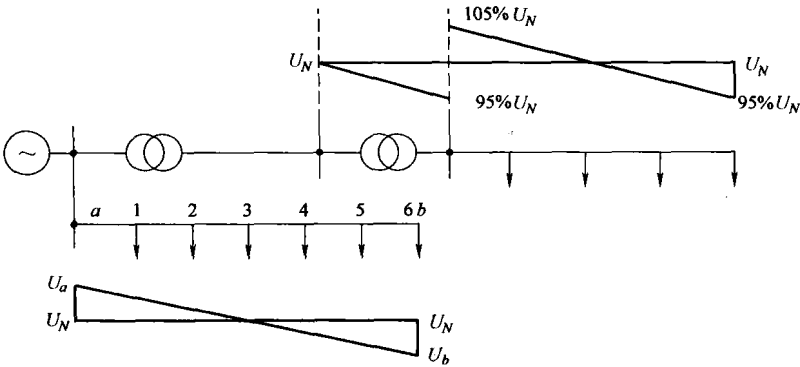


图 1-2 电网中的电压分布

3. 发电机的额定电压

发电机的额定电压为线路额定电压的 105%。这是由于用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$ ，而沿线路的电压降落一般为 10%，这就要求线路首端电压为额定值的 105%，以使其末端电压不低于额定值的 95%，以保证用电设备的工作电压偏移均不会超出允许范围。发电机往往接在线路首端，因此，发电机的额定电压为线路额定电压的 105%。

4. 电力变压器的额定电压

1) 电力变压器一次绕组的额定电压：当变压器直接与发电机相连时，变压器一次绕组的额定电压应当与发电机额定电压相同；当变压器不是与发电机直接相连，而是接于一条电力线路的末端时，则变压器一次绕组的额定电压应当与用电设备相同。

2) 电力变压器二次绕组的额定电压：当变压器二次绕组供电给较长的高压输电线路时，其额定电压比相应电网额定电压高 10%；而当供电给较短的输电线路时，其额定电压可比相应电网额定电压高 5%（表 1-1 中，3.15kV、6.3kV、10.5kV）。

1.4 电能质量的主要指标

决定工业企业供电质量的主要指标为频率、电压和波形。

1.4.1 频率

我国的技术标准规定电力系统的额定频率是 50Hz。

正常运行时，对大型电力系统，允许的频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；对中小电力系统，允许的频率偏差是 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

事故运行时，30min 内允许 $\pm 1\text{Hz}$ 的偏差，15min 内允许 $\pm 1.5\text{Hz}$ 的偏差，偏差绝不允许低于 -4Hz 。

频率偏离正常允许范围时，对用户和电力系统本身都会造成很大危害。当频率高出允许值时，大量的异步电动机转速升高，除使功率损失增加，经济性降低外，还会使某些对转速有严格要求的工业部门产品质量下降，甚至产出废品。当频率低于允许值时，则异步电动机转速下降，使生产率降低，还影响电动机的寿命。也会使某些部门产出次品甚至废品。另外，频率大幅度降低还使发电厂的给水泵、风机等厂用电动机工作出力大为减少，甚至影响了锅炉和汽轮发电机组的出力，导致电力系统有功功率更加不足，频率进一步降低，形成恶性循环，直至发生电力系统“频率崩溃”——一种极其严重的系统性大事故，造成大面积停电的严重后果。

1.4.2 电压

所有用电设备都应当按照其设计的额定电压运行，一般仅允许有 $\pm 5\%$ 的变动范围。电压过高，许多用电设备都会损坏，甚至造成严重事故和巨大损失。电压过低，许多用电设备都不能正常工作。

为使用户用电设备能得到合适的电压，我国目前规定用户处的允许电压变化范围是：

- 1) 由 35kV 及以上电压供电的用户，电压允许变化范围为 $\pm 5\%$ ；
- 2) 由 10kV 及以下电压供电的高压用户和低压电力用户，电压允许变化范围为 $\pm 7\%$ ；

3) 低压照明及农业用户允许变化范围为 $-10\% \sim \pm 5\%$ 。

1.4.3 波形

电力系统供电电压或电流的标准波形应是正弦波。当电源波形不是标准的正弦波时,就包含有各种谐波成分。这些谐波成分的存在不仅会大大影响电动机的效率和正常运行,还可能使电力系统产生谐波共振而危及设备的安全运行。同时还将影响电子设备的正常工作,并对通信产生不良的干扰。变压器铁心饱和或没有三角形联结的绕组,负荷中有大功率整流设备等,都是产生谐波的原因。应注意防止或采取相应措施加以消除。

我国目前对波形的要求:110kV 电网,要求电压总谐波畸变率不超过 2.0%;66kV、35kV 电网不超过 3.0%;10kV、6kV 电网不超过 4.0%;0.38kV 电网不超过 5.0%。

1.5 电力系统中性点的运行方式

电力系统中,发电机三相绕组通常是星形联结的,变压器高压绕组多数也是星形联结的。这些发电机和变压器星形联结绕组的中点统称为电力系统的中性点。

电网中性点接地方式与电网的电压等级、单相接地故障电流、过电压水平以及保护配置等有密切关系。电网中性点接地方式直接影响电网的绝缘水平,电网供电的可靠性、连续性和运行的安全性,以及电网对通信线路及无线电的干扰。

我国电力系统常用的接地方式有中性点有效接地系统、中性点非有效接地系统两大类。

接地种类有中性点直接接地、中性点经消弧线圈(消弧电抗器)接地、中性点经电阻器接地、中性点不接地4种。其中,中性点经电阻器接地,按接地电流大小又分为高阻接地和低阻接地。

1. 中性点直接接地系统

中性点直接接地或经一低值阻抗接地的系统,称为有效接地系统。通常该系统的零序电抗与正序电抗的比值 $X_0/X_1 \leq 3$, 零序电阻与正序电抗的比值 $R_0/X_1 \leq 1$ 。该系统也称为大接地电流系统。

中性点直接接地系统的优点是系统的过电压水平和输变电设备所需的绝缘水平较低。在发生单相接地时,故障相对地电压变为零,非故障相对地电压不升高,仍为相电压,因而各相对地的绝缘水平取决于相电压,大大降低了电网的造价。电网电压等级愈高,其经济效益愈显著。

缺点是这种系统发生单相接地时,故障相便经过地而形成单相短路。由于短路电流很大,继电保护装置立即动作,引起断路器跳闸,将接地的线路切除,降低了供电连续性,因而供电可靠性较差。此外,单相接地电流有时会超过三相短路电流,影响断路器遮断能力的选择,并有对通信线路产生干扰的危险。图1-3所示是发生单相接地时的中性点直接接地系统。

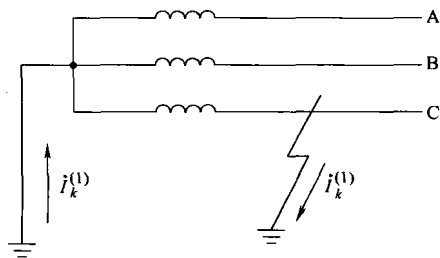


图 1-3 发生单相接地时的中性点直接接地系统

我国 110kV 及以上系统,都采用中性点直

接接地方式。

2. 中性点不接地系统

电力网的三相导线之间及各相对地之间，沿导线全长都分布有电容，这些电容将引起附加电流。为了便于讨论，可以认为三相系统是对称的，并将相与地之间均匀分布的电容用集中于线路中央的电容 C 来代替，如图 1-4a 所示。各相之间的电容及由它们所决定的电流数值较小，在发生单相接地时，因为线电压不变，相间电容电流也不会改变，故可不予考虑。

(1) 正常运行

中性点不接地系统在正常运行时，各相对地的电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的，就等于其相电压。如线路经过完全换位，三相对地电容是相等的，则各相对地的电容电流 $i_{C,A}$ 、 $i_{C,B}$ 、 $i_{C,C}$ 也是对称的（其大小用 $i_{C,0}$ 表示），其相量和等于零，所以大地中没有电容电流流过，中性点电位为零，如图 1-4b 所示。

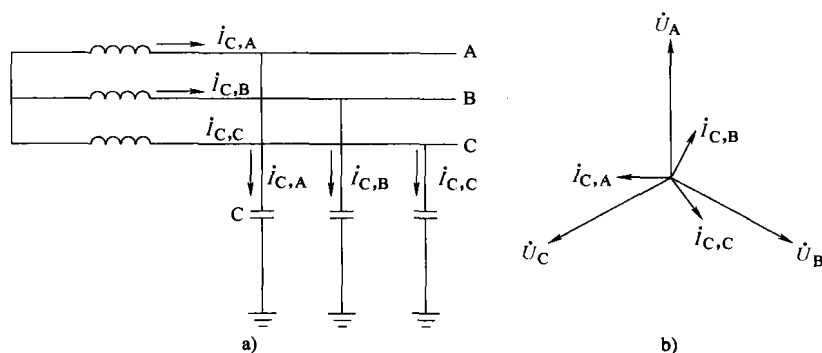


图 1-4 中性点不接地系统在正常运行状态

a) 电路图 b) 相量图

(2) 单相接地故障

当系统发生单相接地故障时，各相对地电压改变，对地电容电流也发生变化，中性点电位不再为零，其对地电压值，视故障点的接地情况而异。

如图 1-5 所示，当为一相完全接地（亦称金属性接地，其接地电阻为零）时，故障相对地电压变为零，中性点对地电压值为相电压，非故障相的对地电压升高万倍，即变为线电压。

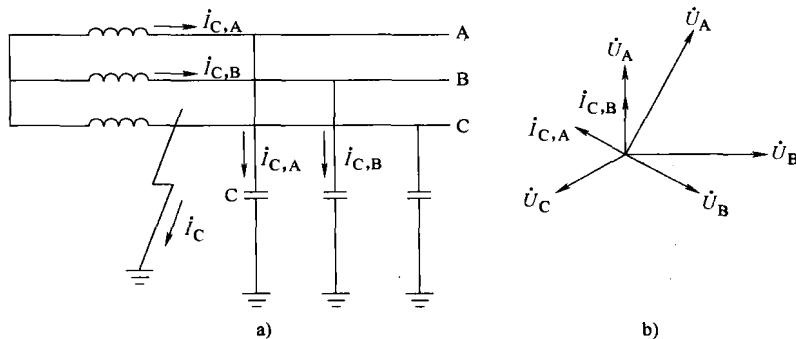


图 1-5 中性点不接地系统 C 相接地时的情况

以 C 相发生完全接地为例说明。C 相对地电压 $\dot{U}'_C = 0$ ，故中性点对地电压 $\dot{U}_0 = -\dot{U}_C$ ，A 相对地电压 $\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{AC}$ ，B 相对地电压 $\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$ ，所以 $\dot{U}'_A = \dot{U}'_B = \sqrt{3}\dot{U}_A$ 。

网络的线电压为

$$\dot{U}'_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_{AB}$$

$$\dot{U}'_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$$

$$\dot{U}'_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_{CA}$$

故在中性点不接地的系统中，发生单相接地时，网络线电压的大小和相位差仍维持不变。

A、B 两相对地电压升高变为线电压，即其对地电容上所加电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，所以对地电容电流也较正常时的 I_{C0} 升高 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I'_{C,A} = I'_{C,B} = \sqrt{3}I_{C0}$ 。因为 C 相接地，该相对地电容被短接，所以 C 相对地电容电流 $I'_{C,C} = 0$ 。设电流正方向是由电源到电网，则可得出通过 C 相接地点的电流（简称接地电流）为

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}_{C,A} + \dot{I}_{C,B})$$

因此， $I_C = 3I_{C0}$ ，即单相接地的电容电流为正常运行时每相对地电容电流的 3 倍， $\dot{I}_C$ 在相位上正好超前 $\dot{U}_C 90^\circ$ 。

非有效接地系统的优点是发生单相接地故障时，不形成短路回路，通过接地点的电流仅为接地电容电流的 3 倍，当单相接地故障电流很小时，只使三相对地电位发生变化，故障点电弧可以自熄，熄弧后绝缘可自行恢复，能自动地清除单相接地故障，而无需使线路断开，可以带故障运行一段时间，以便查找故障线路，因而大大提高了供电可靠性。另外电网的单相接地电流很小，对临近通信线路干扰也小。

缺点是发生单相接地故障时，会产生弧光重燃过电压。这种过电压现象会造成电气设备的绝缘损坏或开关柜绝缘子闪络，电缆绝缘击穿，所以要求系统绝缘水平较高。

对于 3 ~ 35kV 系统的终端变电所，应着重考虑供电可靠性和故障影响范围，通常都采用中性点不接地方式，当单相接地时的电容电流不大时，都采用中性点不接地（绝缘）方式，具体的规定如下：

3 ~ 6kV 电网单相接地电容电流不大于 30A；

10kV 电网单相接地电容电流不大于 20A；

35kV 电网单相接地电容电流不大于 10A。

3. 中性点经消弧线圈接地系统

在上述的中性点不接地系统中，当接地电流 I_C 超过上述规定的数值时，电弧将不能自行熄灭。在变压器的中性点与大地之间接入消弧线圈，是消除电网因雷击或其他原因而发生瞬时单相接地故障的有效措施之一。

消弧线圈是一个具有铁心的电感线圈，其电抗很大，电阻很小可忽略不计。消弧线圈有许多分接头，用以调整线圈的匝数，改变电抗的大小，从而调节消弧线圈的电感电流。图 1-6 所示是中性点经消弧线圈接地的三相系统的电路图和相量图。

当中性点经消弧线圈接地系统发生 C 相接地时，作用在消弧线圈两端的电压正是地对

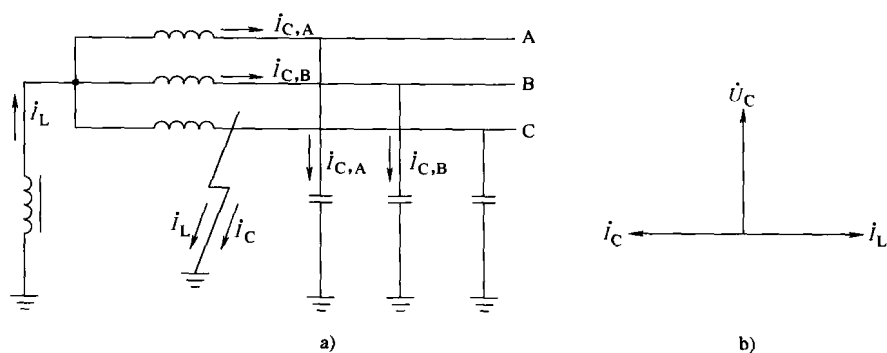


图 1-6 中性点经消弧线圈接地的三相系统

a) 电路图 b) 相量图

中性点电压 $\dot{U}_C$ ，并有电感电流 $\dot{I}_L$ 通过消弧线圈和接地点， $\dot{I}_L$ 滞后于 $\dot{U}_C$ 90° 。接地点电流是接地电容电流 $\dot{I}_C$ 与电感电流 $\dot{I}_L$ 的相量和，由于和 $\dot{I}_L$ 两者相差 180° ，所以 $\dot{I}_L$ 对 $\dot{I}_C$ 起补偿作用。如果适当选择消弧线圈电感（匝数），可使接地点的电流变得很小或等于零，在接地点就不致产生电弧以及由电弧引起的危害。

消弧线圈对接地电容电流的补偿有 3 种方式：全补偿 $\dot{I}_L = \dot{I}_C$ ；欠补偿 $\dot{I}_L < \dot{I}_C$ ；过补偿 $\dot{I}_L > \dot{I}_C$ 。全补偿方式将引起串联谐振过电压，欠补偿方式由于部分线路切除造成全补偿，也会出现串联谐振过电压。因此，在实际应用时都采取过补偿方式。

中性点经消弧线圈接地的系统和中性点不接地的系统一样，当发生单相接地时，故障相对地电压变为零，非故障相对地电压升高万倍。因此，这种系统各相对地的绝缘水平也按线电压考虑，在单相接地时可继续运行 2h，也要通知运行人员采取措施，查出故障点，在最短时间内消除故障，保证系统安全运行。

4. 中性点经电阻器接地

该系统中至少有一根导线或一点（通常是变压器或发电机的中性线或中性点）经过电阻器接地。

1) 中性点经高电阻接地。高电阻接地方式以限制单相接地故障电流为目的，电阻阻值一般在数百 ~ 数千 Ω 。采用高电阻接地的系统可以消除大部分谐振过电压，对单相间歇弧光接地过电压具有一定的限制作用。单相接地故障电流小于 10A，系统可在接地故障条件下持续运行不中断供电。缺点是系统绝缘水平要求较高。

主要用于发电机回路。

2) 中性点经低电阻接地。6 ~ 35kV 主要由电缆线路构成的送、配电网，单相接地故障电容电流较大时，可采用低电阻接地方式，电阻阻值一般在 10 ~ 20 Ω ，单相接地故障电流为 100 ~ 1000A。低电阻接地的优点是快速切除故障，过电压水平低，可采用绝缘水平较低的电缆和设备。但应考虑供电可靠性要求、故障时瞬态电压、瞬态电流对电气设备的影响，对通信的影响和继电保护技术要求。

这种接地方式适用于电缆线路为主，不容易发生瞬时性单相接地故障且系统电容电流比较大的城市配电网、发电厂厂用电系统及工矿企业配电系统。