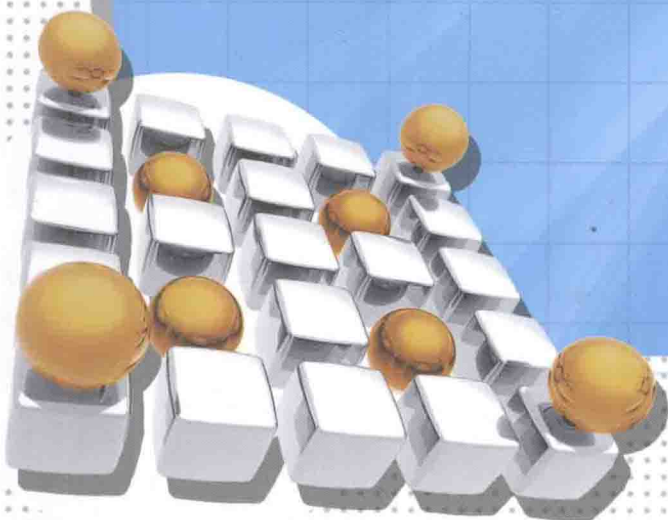




高职高专制造大类系列规划教材
电 气 自 动 化 系 列



供配电应用技术

张祥军 关大陆 主 编



科学出版社

高职高专制造大类系列规划教材

电气自动化系列

供配电应用技术

张祥军 关大陆 主编

孙玉芳 王志军 陈亚丽 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为满足我国高等职业教育的电气自动化技术专业的教学要求而编写,全书共13章,分别介绍了电力系统概论,企业供电系统,企业电力电路,电力变压器,供配电系统主要电气设备,短路电流及其计算,供配电系统的继电保护,供电系统的二次回路和自动装置,变电所综合自动化系统简介,电气安全、防雷与接地,电气照明,节约电能,实验与实训。内容针对性强,涉及面广且重点突出。每章都配有思考与练习,对提高学生实践能力和知识掌握能力起到积极的作用。

本书适合作为高职电气自动化技术专业及其他相关专业的教材,也可供从事供配电运行、管理和工程技术相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

供配电应用技术/张祥军,关大陆主编. —北京:科学出版社,2011
(高职高专制造大类系列规划教材)

ISBN 978-7-03-031371-3

I. ①供… II. ①张… ②关… III. ①供电 ②配电系统 IV. ①TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第104830号

责任编辑:卢 岩 /责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—3000 字数:400 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8212

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

本书从高职高专学生实际出发,在保证知识体系完整的前提下,简化教材内容,突出对供配电应用技术的基本概念、基本理论和基本分析方法的介绍。

本书强调理论的实际应用,突出基本概念的理解和掌握,简化公式推导过程,前后知识衔接紧密,表述深入浅出,通俗易懂,易于教学和自学。在实践性很强的章节中,尽量穿插图片和视图,帮助学生理解。此外,本书简化课程内容,增加了新设备、新技术的内容,精简例题和习题,每节前有教学目标,每章后有本章小结,使教材易学、易懂,便于自学。

本书的最后一章内容安排了实验和实训内容,考虑到很多高职院校实验和实训环境、条件、设备的差异,因此实验和实训只是提纲性质,各学校可根据提纲和本校实际情况编写适合自己使用的实验和实训指导书或任务书。

本书由成都电子机械高等专科学校教授张祥军、辽宁科技学院副教授关大陆担任主编,成都电子机械高等专科学校副教授孙玉芳、漯河职业技术学院讲师王志军、陈亚丽担任副主编。张祥军负责全书的统稿,并编写第7和9章;关大陆编写第6、8、10和12章;孙玉芳编写第1、2和13章;王志军编写第3和5章;陈亚丽编写第4和11章。

在本书的编写过程中,参考了许多相关文献,在此向相关作者表示诚挚的感谢!同时,由于编者水平有限,书中难免有错漏的地方,诚望广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 电力系统的基本概念	2
1.2 电力系统的电压	5
1.3 电力系统的中性点运行方式	7
本章小结	11
思考题与习题	11
第 2 章 企业供电系统	13
2.1 概述	14
2.2 企业变电所的作用和类型	14
2.3 企业变配电所的主接线	16
2.4 电力负荷及其计算	21
本章小结	32
思考题与习题	33
第 3 章 企业电力电路	35
3.1 电力电路的接线方式	36
3.2 电力电路的结构和技术要求	37
3.3 导线和电缆截面的选择	44
3.4 电力电路的运行与维护	52
本章小结	54
思考题与习题	55
第 4 章 电力变压器	56
4.1 变压器的分类与型号	57
4.2 变压器的构成及主要技术参数	59
4.3 变压器的选择	63
4.4 变压器运行中的检查与维护	65
本章小结	68
思考题与习题	68



第5章 供配电系统主要电气设备	69
5.1 概述	70
5.2 电气设备中的电弧问题	70
5.3 高压一次设备	74
5.4 低压一次设备	80
5.5 互感器	84
5.6 电气设备的选择	89
5.7 新设备简介	92
5.8 电气设备的运行与维护	95
本章小结	97
思考题与习题	98
第6章 短路电流及其计算	99
6.1 短路的基本知识	100
6.2 无限大容量电力系统的三相短路	102
6.3 短路电流的计算	105
6.4 短路电流的效应和稳定度校验	114
本章小结	120
思考题与习题	120
第7章 供配电系统的继电保护	122
7.1 继电保护基本知识	123
7.2 常用的保护继电器	124
7.3 高压电力电路继电保护	131
7.4 变压器继电保护	137
7.5 低压配电系统的保护	142
本章小结	144
思考题与习题	145
第8章 供电系统的二次回路和自动装置	147
8.1 概述	148
8.2 操作电源	150
8.3 高压断路器的控制和信号回路	152
8.4 自动装置简介	156
本章小结	161
思考题与习题	162



第 9 章 变电所综合自动化系统简介	163
9.1 概述	164
9.2 变电所综合自动化系统的基本功能	164
9.3 变电所综合自动化系统的结构	166
本章小结	168
思考题与习题	168
第 10 章 电气安全、防雷与接地	169
10.1 电气安全	170
10.2 过电压与防雷	174
10.3 电气装置的接地	185
本章小结	194
思考题与习题	194
第 11 章 电气照明	196
11.1 照明基本知识	197
11.2 常用的电光源和灯具	200
11.3 照度标准与计算	212
11.4 照明供电系统	215
本章小结	218
思考题与习题	218
第 12 章 节约电能	220
12.1 节约用电的意义和措施	221
12.2 电动机与变压器的节能	222
12.3 提高供电系统的功率因数	227
本章小结	231
思考题与习题	231
第 13 章 实验与实训	233
13.1 供配电系统常用继电器特性实验	234
13.2 供电电路的定时限过电流保护实验	235
13.3 供电电路的反时限过电流保护实验	236
13.4 电力变压器定时限过电流保护实验	236
13.5 断路器控制及二次回路实验	237
13.6 6~35kV 系统的绝缘监视实验	237
13.7 供配电系统一次重合闸实验	238



13.8	备用电源自动投入实验	238
13.9	供电电路的电流速断保护实训	239
13.10	电力变压器的电流速断保护实训	240
13.11	供配电系统的倒闸操作实训	240
13.12	电气主接线图认知实训	241
13.13	实训台电气主接线模拟图的认知实训	242
13.14	电压互感器与电流互感器的接线实训	242
13.15	变压器有载调压实训	243
13.16	模拟系统正常、最大和最小运行方式实训	243
13.17	模拟系统短路实训	244
13.18	电秒表操作实训	245
附录	附表	246
参考文献		270

第 1 章

概 论

知识点

1. 发电厂及主要特征。
2. 电力系统概念及基本要求。
3. 企业电力负荷分级及对供电的要求。
4. 电力系统的额定电压。
5. 电力系统中性点运行方式。



1.1 电力系统的基本概念

教学目标

通过本节的介绍,使读者初步了解电能及其应用。掌握发电厂、电力系统、动力系统等相关概念。掌握电力负荷的概念、电力负荷的分级以及对供电电源的要求。理解对电力系统的基本要求。

电能是当今人们生产和生活中使用的重要能源,很容易由其他形式的能源转换而来。电能的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,电能工业、农业、国防、军事、科技、交通以及人们生活等领域被广泛应用。

电能的生产、输送、分配和使用的全过程,是在同一瞬间实现的,为了保证企业供电的安全与可靠,首先要了解发电厂和电力系统的一些基本概念。

1.1.1 发电厂简介

发电厂,是将自然界蕴藏的各种一次能源转换为电能(二次能源)的工厂。常见的有水力发电厂、火力发电厂、核能发电厂、风力发电厂、地热发电厂和太阳能发电厂等。其中,兼供热能的火电厂,通常称为热电厂,表 1-1 介绍了几种常见的发电厂类型及主要特征。

表 1-1 几种常见的发电厂类型及主要特征

类型	能量来源	工作原理	能量转换过程	优点	缺点
水力发电厂	水流的上下水位差(落差),即水流的位能	当控制水流的闸门打开时,水流沿进水管进入水轮机蜗壳室,冲动水轮机,带动发电机发电	水流位能→机械能→电能	清洁,环保,发电效率高成本低,综合价值高	建设初期投资大,建设周期长
火力发电厂	燃料燃烧产生的化学能	将锅炉内的水烧成高温高压的蒸汽,推动汽轮机转动,使与它连轴的发电机旋转发电	燃料的化学能→热能→机械能→电能	建设周期短,工程造价低,投资回收快	发电成本高,污染环境
核能发电厂	原子核的裂变能	与火电厂基本相同,只是以核反应堆代替了燃煤锅炉,以少量的核燃料代替了大量的煤炭	核裂变能→热能→机械能→电能	安全,清洁,经济,燃料费用所占的比例较低	投资成本大,会产生放射性废料,不适宜作尖峰、离峰随载运转



续表

类型	能量来源	工作原理	能量转换过程	优点	缺点
风力发电厂	风力的动能	是利用风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电	风力的动能→机械能→电能	清洁，廉价，可再生，取之不尽	需有蓄电装置，造价高
地热发电厂	地球内部蕴藏的大量地热能	基本上与火力发电的原理一样，不同的是利用的能源是地热能（天然蒸汽和热水）	地下热能→机械能→电能	无需消耗燃料，运行费用低	热效率不高，需要对所排热水环保处理
太阳能发电厂	太阳光能或太阳热能	通过太阳能电池板等，直接将太阳的辐射能转换为电能	太阳的辐射能→电能	安全，经济，环保，取之不尽	效率低，成本高，稳定性差

1.1.2 电力系统简介

由发电厂、电力网和电能用户组成的一个发电、输电、变电、配电和用电的整体，称为电力系统，如图 1-1 所示。

电力系统中的各级电压的电力电路及其联系的变电所，称为电力网或电网。习惯上，电网或系统往往以电压等级来区分，如 10kV 电网或 10kV 系统、110kV 电网或 110kV 系统等。这里所说的电网或系统，实际上指某一电压等级的相互联系的整体电力电路。

电力系统加上发电厂的动力部分及其热能系统的热能用户，就称为动力系统。

现在各国建立的电力系统越来越大，甚至建立跨国的电力系统或联合电网。我国规划，到 2020 年，要在水电、火电、核电和新能源合理利用和开发的基础上，加强风能和太阳能的开发和建设，并形成全国联合电网，实现电力资源在全国范围内的合理配置和可持续发展。

1.1.3 企业电力负荷简介

电力负荷又称电力负载。它有两种含义：一是指耗用电能的用电设备或用电单位，如重要负荷、不重要负荷、动力负荷、照明负荷等。二是指用电设备或用电单位所耗用的电功率或电流的大小，如说轻负荷、重负荷、空负荷、满负荷等。电力负荷的具体含义视具体情况而定。

1. 企业电力负荷的分级

企业的电力负荷，按《供配电系统设计规范》（GB 50052—2009）中的规定，根据其对于供电可靠性的要求及中断供电造成的损失或影响的程度分为三级。

(1) 一级负荷

若中断供电将造成人身伤亡者；或中断供电将在政治、经济上造成重大损失者；或

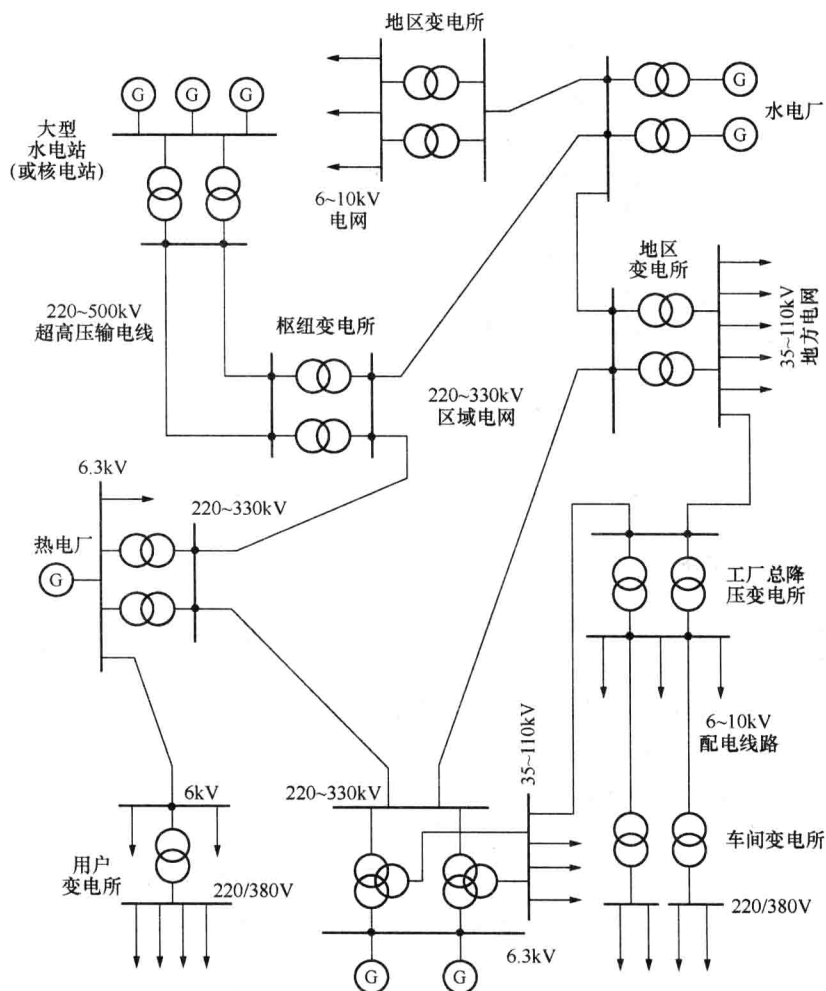


图 1-1 电力系统示意图

中断供电将影响有重大政治、经济意义的用电单位的正常工作者。例如，重大设备损坏、大量产品报废、生产过程紊乱需要长时间才能恢复等。

(2) 二级负荷

若中断供电将在政治、经济上造成较大损失者；或中断供电将影响重要用电单位的正常工作者。例如，主要设备损坏、大量原材料报废、生产过程被打乱需较长时间才能恢复、重点企业大量减产等。

(3) 三级负荷

三级负荷为一般电力负荷，为所有不属于上述一、二级负荷者。

2. 各级电力负荷对供电电源的要求

(1) 一级负荷对供电电源的要求

由于一级负荷属重要负荷，如果突然中断供电，后果将十分严重，因此要求不允许



停电，且由两路独立电源（即两个毫无联系的电源）供电，当其中一路电源发生故障时，则由另一路电源继续供电。

(2) 二级负荷对供电电源的要求

二级负荷也属重要负荷，允许短时间（2h 以内）停电，且要求由两回路供电或由两台变压器供电，但两台变压器不一定在同一变电所。当其中一回路或一台变压器发生故障时，则由另一路电源继续供电。

(3) 三级负荷对供电电源的要求

由于三级负荷为不重要的一般负荷，允许长时间停电，因此对供电电源无特殊要求。

1.1.4 对电力系统的基本要求

为了很好地为企业生产服务，切实保证企业生产和人民群众生活用电的需要，并做好节能工作，对电力系统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消耗量。

1.2 电力系统的电压

教学目标

通过本节介绍，使读者掌握什么是额定电压；了解目前我国都有哪些电压等级；了解电力网、电气设备、发电机以及变压器额定电压的概念；尤其要理解和掌握变压器的额定电压的定义和确定方法。

电力系统中的所有电气设备，都是在一定的电压下工作的。能够使电气设备正常工作的电压就是它的额定电压，各种电气设备在额定电压下运行时，其技术性能和经济效果最佳。我国一般交流电力设备的额定频率为 50Hz，此频率通称为“工频”。而电压和频率是衡量电能质量的两个重要指标。

按照国家标准的规定，我国三相交流电网和发电机的额定电压，如表 1-2 所示。表 1-2 中的变压器一、二次绕组额定电压，是依据我国生产的电力变压器标准产品规格



确定的。

表 1-2 我国三相交流电网和电力设备的额定电压

分类	电网用电设备额定电压/kV	发电机额定电压/kV	电力变压器额定电压/kV	
			一次侧绕组	二次侧绕组
低压	0.38	0.40	0.38	0.40
	0.66	0.69	0.66	0.69
高压	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	—
	35	—	35	38.5
	66	—	66	72.6
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	550
	750	—	750	825 (800)
	1000	—	1000	1000

1. 电网（电路）的额定电压

电网的额定电压是国家根据国民经济发展的需要和电力工业的水平，经全面的技术经济分析后确定的。它是确定各类电力设备额定电压的基本依据。

由于电路运行时（有电流通过时）要产生电压降，所以电路上各点的电压都略有不同，如图 1-2 中虚线所示。

2. 用电设备的额定电压

由于电路上各点的电压都略有不同，如图 1-2 中虚线所示。但是成批生产的用电设备，其额定电压不可能按使用处电路的实际电压来制造，而只能按电路首端与末端的平均电压，即电网的额定电压 U_N 来制造。因此用电设备的额定电压规定与同级电网的额定电压相同。

3. 发电机的额定电压

由于电力电路允许的电压偏差一般为 $\pm 5\%$ ，即整个电路允许有 10% 的电压损耗值，因此为了维持电路的平均电压在额定值，电路首端（电源端）的电压可较电路额定



电压高 5%，而电路末端则可较电路额定电压低 5%，如图 1-2 所示。所以发电机额定电压规定高于同级电网额定电压 5%。

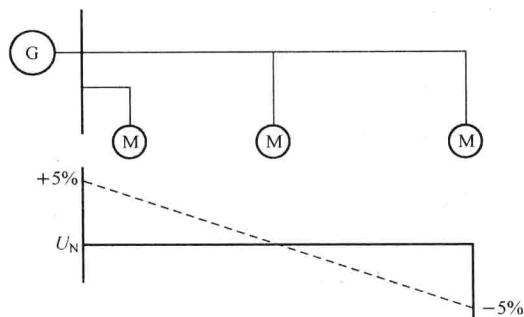


图 1-2 用电设备和发电机的额定电压说明

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，如图 1-3 中的变压器 T1，其一次绕组额定电压应与发电机额定电压相同，即高于同级电网额定电压 5%。

当变压器不与发电机相连而是连接在电路上时，如图 1-3 中的变压器 T2，则可看作是电路的用电设备，因此其一次绕组额定电压应与电网额定电压相同。

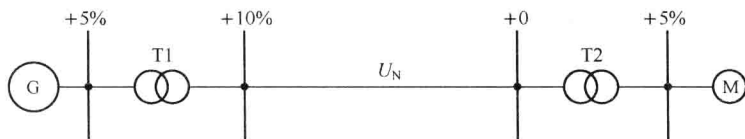


图 1-3 电力变压器的额定电压说明

(2) 电力变压器二次绕组的额定电压

变压器二次侧供电电路较长（如为较大的高压电网）时，如图 1-3 所示的变压器 T1，其二次绕组额定电压应比相连电网额定电压高 10%，其中有 5%是用于补偿变压器满负荷运行时绕组内部约 5%的电压降，因为变压器二次绕组的额定电压是指变压器一次绕组加上额定电压时二次绕组开路的电压；此外，变压器满负荷时输出的二次电压还要高于所连电网额定电压 5%，以补偿电路上的电压降。

变压器二次侧供电电路不长（如为低压电网，或直接供电给高低压用电设备）时，如图 1-3 所示的变压器 T2，其二次绕组额定电压只需高于所连电网额定电压 5%，仅考虑补偿变压器满负荷运行时绕组内部 5%的电压降。

1.3 电力系统的中性点运行方式

教学目标

通过本节介绍，使读者了解电力系统接地方式的种类及特点；重点掌握中性点不接地的电力系统在正常和发生单相接地时的电流、电压变化情况；对中性点经消弧线圈接地的运行方式和中性点直接接地的运行方式也要了解。

在三相交流电力系统中，作为供电电源的发电机和变压器的中性点有三种运行方



式：第一种是电源中性点不接地，第二种是中性点经阻抗接地，第三种是中性点直接接地。前两种合称为小接地电流系统。后一种称为大接地电流系统。

在我国 3~66kV 系统，特别是 3~10kV 系统，一般采用中性点不接地的运行方式。如单相接地电流大于一定数值时（3~10kV 系统中接地电流大于 30A、20kV 及以上系统中接地电流大于 10A 时），则应采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。我国 110kV 及以上的系统，则都采用中性点直接接地的运行方式。

1.3.1 中性点不接地的电力系统

图 1-4 所示是电源中性点不接地的电力系统在正常运行时的电路图和相量图。

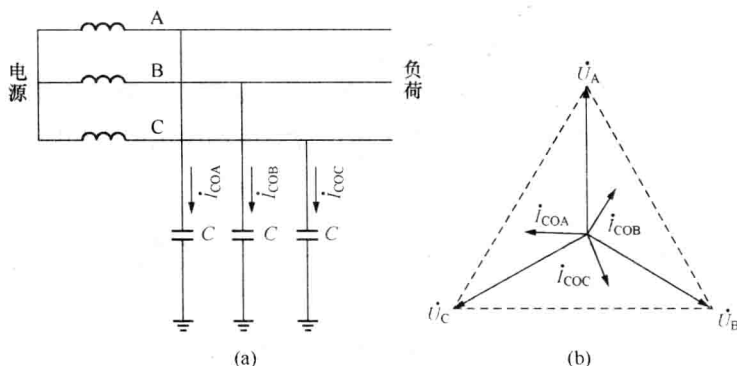


图 1-4 正常运行时的中性点不接地的电力系统

(a) 电路图；(b) 相量图

为了讨论问题简化起见，假设如图 1-4 (a) 所示三相系统的电源电压和电路参数（指其 R 、 L 、 C ）都是对称的，而且将相与地之间存在的分布电容用一个集中电容 C 来表示；由于相间存在的电容对所讨论的问题无影响而予以略去。

系统正常运行时，三个相的相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的，三个相的对地电容电流 $\dot{I}_{CO}$ 也是平衡的，因此三个相的电容电流的相量和为零，没有电流在地中流动。各相对地的电压，就等于各相的相电压。

系统发生单相接地时，例如 C 相接地，如图 1-5 (a) 所示，这时 C 相对地电压为零，而 A 相对地电压 $\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{AC}$ ，B 相对地电压 $\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{BC}$ ，如图 1-5 (b) 所示。由相量图可见，C 相接地时，完好的 A、B 两相对地电压都由原来的相电压升高到线电压，即升高为原对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

C 相接地时，系统的接地电流（电容电流） $\dot{I}_C$ 应为 A、B 两相对地电容电流之和。由于一般习惯将从电源到负荷的方向及从相线到大地方向取为电流的正方向，因此有

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB}) \quad (1-1)$$

由图 1-5 (b) 的相量图可知， $\dot{I}_C$ 在相位上正好超前 $\dot{U}_C$ 90° ，而在量值上，由于 $I_C = \sqrt{3}I_{CA}$ ，而 $I_{CA} = \frac{U'_A}{X_C} = \frac{\sqrt{3}U_A}{X_C} = \sqrt{3}I_{CO}$ ，因此有

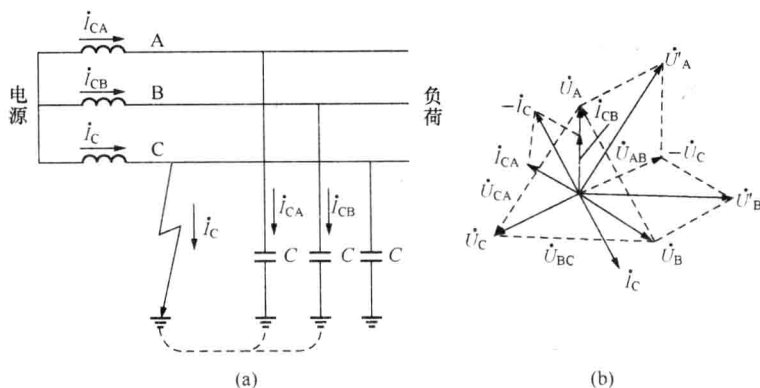


图 1-5 单相接地时的中性点不接地的电力系统

(a) 电路图; (b) 相量图

$$I_C = 3I_{CO} \quad (1-2)$$

即一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。

I_C 通常采用经验公式来确定, 需要时可查阅有关资料, 这里就不赘述了。

当系统发生不完全接地(即经过一些接触电阻接地)时, 故障相的对地电压值将大于零而小于相电压, 而其他完好相的对地电压值则大于相电压而小于线电压, 接地电容电流 I_C 值也略小。

必须指出, 当电源中性点不接地的电力系统中发生单相接地时, 三相用电设备的正常工作并未受到影响, 因为电路的线电压无论其相位和量值均未发生变化, 这从图 1-5 (b) 的相量图可以看出, 因此三相用电设备仍能照常运行。但是这种电路不允许在单相接地故障情况下长期运行, 因为如果再有一相又发生接地故障时, 就形成两相接地短路, 短路电流很大, 这是不允许的。因此在中性点不接地的系统中, 应该装设专门的单相接地保护或绝缘监视装置, 在系统发生单相接地故障时, 给予报警信号, 提醒供电值班人员注意, 及时处理; 当危及人身和设备安全时, 单相接地保护则应动进行跳闸保护动作。

1.3.2 中性点经消弧线圈接地的电力系统

在上述中性点不接地的电力系统中, 有一种情况是比较危险的, 即在发生单相接地时如果接地电流较大, 将出现断续电弧, 这就可能使电路发生电压谐振现象。由于电力电路, 既有电阻和电感, 又有电容, 因此在电路发生单相弧光接地时, 可形成一个 $R-L-C$ 的串联谐振电路, 从而使电路上出现危险的过电压(可达相电压的 2.5~3 倍), 这可能导致电路上绝缘薄弱地点的绝缘击穿。为了防止单相接地时接地点出现断续电弧, 引起过电压, 在单相接地电容电流大于一定值(如前面所述)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。

图 1-6 所示是电源中性点经消弧线圈接地的电力系统单相接地时的电路图和相量图。