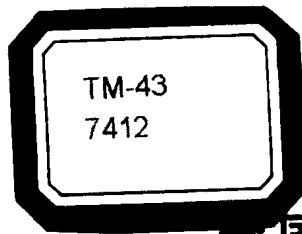


178215



全国电工培训考核电教片教材

電工技术与安全

史大楨

内 容 提 要

本书为《电工技术与安全》电教片的同名配套文字教材，由电力工业部史大桢部长亲笔题名。本书为全国电力部门对进网作业电工进行技术与安全培训和考核的统一教材。

本书从我国电力工业发展的实际需要，从专业技术、实践操作、安全理论和措施、技术管理等四方面系统地介绍了电工作业人员在独立工作时应了解和掌握的专业知识和安全技术。

全书分四篇二十章，主要内容有：电力系统知识、电工操作工艺、电气新标准识图、10~35 kV 一、二次电气设备及运行、400 V 低压电气设备及运行，以及电气技术安全和管理等。书中电气图形符号全部采用国家新标准；有关规程、规范的内容完全符合部颁规程和国家标准的规定；介绍的电气设备都是目前国家新生产的节能和改进型设备。

本书内容深入浅出，文字通俗易懂，是全国电力部门和劳动部门对电力职工和全国城乡社会电工进行专业技术、安全培训、年审考核以及进厂新工人岗前培训的理想教材；也可作为初、中级电工自学教材以及电力类中专、技校、职业学校的辅导教材。

全国电工培训考核电教片教材

电工技术与安全

江苏省电力工业局

水利电力出版社出版、发行

(现中国电力出版社)

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.5印张 677千字

1994年6月第一版 1996年1月北京第二次印刷

印数 12641—17690册

ISBN 7-120-02265-2/TM·564

定价 28.40元

前 言

随着我国电力工业的发展,电力设备的不断更新和新技术的应用,对电业职工及社会电工队伍的安全技术素质要求越来越高。为此,国家劳动部和原能源部分别制定了《电工作业人员安全技术考核标准》、《进网作业电工管理办法》。为了使这两个法规性文件能够在基层得到很好的贯彻落实,江苏省电力工业局在电力部人教司、电力司和部电教中心的指导下,认真总结了多年来对进网电工进行技术、安全培训和年审考核的经验,按照新规程、规范、标准的要求,在摄制《电工技术与安全》电教片的同时,组织南通供电局有关人员编写了与电教片配套的同名文字教材,以满足全国城乡社会电工及进网作业电工技术、安全培训和年审考核的需要,从而达到提高电工作业人员的技术与安全素质的目的。

《电工技术与安全》教材由陈云发同志主编。书中第五、六、七、八章由曹杏甫同志编写;第十三、十四、十五、十七章及第十六章一至五节由王德同志编写;第十八、十九、二十章由朱良同志编写;其余章节由陈云发同志编写。本教材编写大纲由吴刚、陈云发同志负责编制。全书由蒋渊如、朱德林同志审稿,江苏省电力工业局谢杰、陈其祥、汪闻涛、王榆青、王书保、汤之申、谈光明、巢大同对有关章节进行了审稿,最后由江苏省电力工业局冯文秀、吴刚同志负责主审。1993年5月,电力工业部、电力部电教中心、水利电力出版社、华东电管局、江苏省电力局、江苏省劳动局、南通供电局、南京电力高等专科学校、江苏省电机工程学会、南通市电机工程学会等60多位代表,在南京召开了《电工技术与安全》电教片和配套教材审定会。会上,各位代表提出了许多宝贵意见。会后,编写和摄制人员又对电教片和配套教材进行了认真修改,使其更加符合我国电力生产的实际,真正成为一部深入浅出、通俗易懂、适合全国电力职工和城乡社会电工进行专业技术、安全培训和考核的理想教材。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,该教材的缺点、错误在所难免,希望全国电力部门、工矿企业在进行培训和考核工作过程中提出宝贵意见,以便再版时修改。

江苏省电力工业局

一九九三年十月

序

电力工业是国家的先行工业。

随着电力工业和现代科学技术的日益发展，电力用户的变配电装置和用电设备容量的不断增加，对用户电工在电气设备的运行、维护 and 安全管理方面，相应地提出了更高的要求。

为了帮助广大用户电工提高技术及安全管理水平，本书结合我国电力工业发展的实际情况，从电工基础理论知识，电气设备的检修、试验、运行维护、管理，以及电气安全技术管理和措施等内容进行了有重点的系统的叙述。

本书密切结合生产实践，符合国家现行规程、规范的要求，内容由浅入深，通俗易懂，是一部适用于各地劳动部门和供电部门对电工进行安全技术年审考核的培训教材，也可作为初、中级电工的自学教材。

本书在编写过程中得到了有关单位、部门及有关专业技术人员的大力协助，在此，一并表示谢意。

顾明略

1993年6月

目 录

序 前 言

第一篇 电 气 基 础 知 识

第一章 电力系统概述	(1)
第一节 发电厂	(1)
第二节 电力系统	(2)
第三节 电力系统中性点的运行方式	(5)
第四节 工厂企业配电系统	(9)
第五节 用电管理知识	(12)
第六节 计划用电、节约用电	(14)
第二章 电工操作工艺基础	(25)
第一节 常用电工工具	(25)
第二节 电工基本操作工艺	(30)
第三节 登高工艺	(37)
第三章 新国标电工识图	(41)
第一节 新国标电气识图的基本知识	(41)
第二节 电力系统电气识图	(63)
第三节 电力系统二次回路识图	(67)
第四节 工厂的电力拖动电气识图	(91)
第五节 工厂的动力及照明电气识图	(95)

第二篇 10~35 kV 电气设备及运行

第四章 电力变压器	(110)
第一节 变压器的用途和结构原理	(110)
第二节 变压器的运行	(119)
第三节 变压器的维护和试验	(127)
第五章 互感器	(131)
第一节 电压互感器	(131)
第二节 电流互感器	(136)
第六章 配电设备及运行	(142)
第一节 高压断路器	(142)

第二节 高压隔离开关	(152)
第三节 高压负荷开关和高压熔断器	(154)
第四节 母线与绝缘子	(156)
第五节 高压成套配电装置	(158)
第六节 电气主接线	(161)
第七章 电力线路的运行及检修	(164)
第一节 架空电力线路	(164)
第二节 电力电缆线路	(178)
第三节 导线和电缆截面的选择计算	(180)
第八章 电气设备的防雷及接地装置	(186)
第一节 电气设备的防雷	(186)
第二节 接地装置	(196)
第九章 10~35 kV 电力设备的保护装置	(202)
第一节 继电保护基本知识	(202)
第二节 输电线路的继电保护	(211)
第三节 电力变压器的继电保护	(220)
第四节 高压异步电动机的保护	(227)
第五节 电力补偿电容器的保护	(230)
第六节 工厂变电所的自动装置	(233)
第七节 交流不停电电源装置	(237)
第十章 断路器的控制和信号回路	(239)
第一节 断路器的控制回路	(239)
第二节 变电所的中央信号装置	(247)
第三节 保护装置和自动重合闸的动作信号	(252)
第十一章 变电所的操作电源	(254)
第一节 铅酸蓄电池	(254)
第二节 碱性蓄电池	(262)
第三节 硅整流电容储能的直流系统	(264)
第四节 直流系统的绝缘监察和电压监察装置	(268)
第十二章 电工仪表和测量	(273)
第一节 仪表的基本知识	(273)
第二节 电流和电压的测量	(277)
第三节 功率和功率因数的测量	(283)
第四节 电能计量	(287)

第三篇 400 V 低压电气设备及运行

第十三章 低压架空线路	(297)
--------------------------	-------

第一节	低压架空线路的组成	(297)
第二节	低压架空线路的架设和验收	(303)
第三节	低压架空线路的运行管理	(304)
第十四章	低压电器设备和配电屏	(307)
第一节	低压电器	(307)
第二节	低压配电屏	(320)
第三节	功率因数补偿装置	(323)
第十五章	内线装置	(329)
第一节	接户线、进户线	(329)
第二节	室内配线	(332)
第三节	内线的运行维护	(342)
第十六章	电动机及其控制	(344)
第一节	三相交流异步电动机	(344)
第二节	鼠笼式异步电动机的基本控制线路	(348)
第三节	交流电动机的运行维护及故障分析	(358)
第四节	交流电动机常见故障及处理	(360)
第五节	直流电动机	(365)
第六节	其它交流电动机	(370)
第十七章	照明及其它常用电气设备	(375)
第一节	照明设备	(375)
第二节	工业电热设备的电气安全技术	(381)
第三节	电焊机的电气安全要求	(384)
第四节	直流电化学设备的电气安全要求	(386)
第五节	常用家用电器的安全技术要求	(387)

第四篇 电气安全技术和 管理

第十八章	电气事故与触电急救	(389)
第一节	电气事故及其防范	(389)
第二节	安全电压	(391)
第三节	漏电保护装置	(392)
第四节	现场触电急救	(396)
第十九章	变(配)电设备的运行管理	(401)
第一节	变(配)电所的倒闸操作	(401)
第二节	变(配)电设备的异常运行和事故处理	(405)
第三节	变电所的运行管理	(408)
第二十章	电工作业安全措施	(413)
第一节	保证安全的组织措施	(413)

第二节	保证安全的技术措施	(415)
第三节	电气安全用具	(418)
第四节	低压电气工作的安全措施	(420)
第五节	静电危害及其防范措施	(421)
第六节	电气装置的防火、灭火与防爆	(423)
第七节	双电源和自发电装置的安全措施	(425)
附录		(427)
附表 A	用电设备组的需要系数、二项式系数及功率因数	(427)
附表 B	各类工厂的全厂需要系数及功率因数	(428)
附表 C	第一种工作票	(429)
附表 D	第二种工作票	(430)
附表 E	标示牌式样	(431)
附表 F	常用电气绝缘工具试验一览表	(431)
附表 G	登高安全工具试验标准表	(432)

第一篇 电气基础知识

第一章 电力系统概述

第一节 发电厂

电力是输送和取用都很方便的能源。因此现代化工农业、交通运输业、科学技术、国防建设和人民日常生活等方面，都广泛地使用电力。

一、火力发电厂

在火力发电厂中，一般以煤为燃料，此外也有用重油和天然气等作燃料的。

火力发电厂分为凝汽式发电厂和供热式发电厂（热电厂），前者只生产供给用户的电能，而后者既供给用户电能又供给用户热能。

图 1-1 所示为凝汽式火力发电厂的生产过程。

火力发电厂将煤或重油在锅炉 7 中燃烧，锅炉中的水经加热成为高温、高压的过热蒸汽，使煤或油的化学能转变为热能。

高温、高压的过热蒸汽经由管道引入汽轮机 1，冲动汽轮机转子叶片，使转子以 3000 r/min 高速运转，把热能变为机械能。

汽轮机带动发电机 2 发电，使机械能变为电能。在汽轮机内作完功的蒸汽进入凝汽器 3，通过凝汽器的蒸汽被冷却水冷却后凝结成水，凝结水由凝结水泵 4 打至除氧器 5，经加温脱氧后由给水泵 6 再打入锅炉内，如此反复循环。

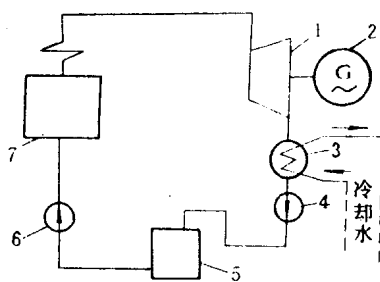


图 1-1 凝汽式火力发电厂的生产过程

1—汽轮机；2—发电机；3—凝汽器；4—凝结水泵；5—除氧器；6—给水泵；7—锅炉

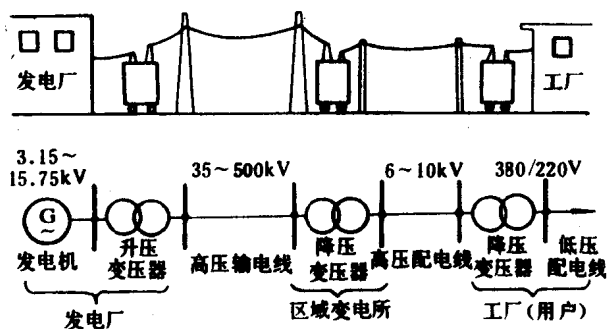


图 1-2 发电厂到用户的输电过程示意图

发电机输出电压较低，需经升压变压器升高电压，再由电厂升压站高压配电装置，将电能进行分配，并经高压输电系统向外作远距离送电，至负荷中心，最后经变电所降压供工农业生产和居民生活用电。从发电厂到用户的输电过程如图 1-2 所示。

二、水力发电厂

除火力发电厂外，在水力资源丰富的地方也可建立水力发电厂。它把上游的水积贮在水库中，用拦河坝将水位提高，利用上、下游水位落差产生的压力和流速，冲动水轮机旋转，将水能变为机械能，通过水轮机带动发电机旋转发电，将机械能变为电能。

火电厂和水电厂是我国目前主要的发电形式。为了解决电力不足，我国已开始在华东、华南及东北地区兴建核电站，利用原子能来发电。

此外，还有潮汐发电、地热发电、风力发电及太阳能发电等。

第二节 电力系统

通常将各类发电厂（动力部分和电气部分）、电力网和用户（用电设备和用热设备）组成一个整体，通称为动力系统，如图 1-3 所示。动力系统中除动力部分外称为电力系统。电力生产的特点是电能生产、输送和使用全过程一次性完成。

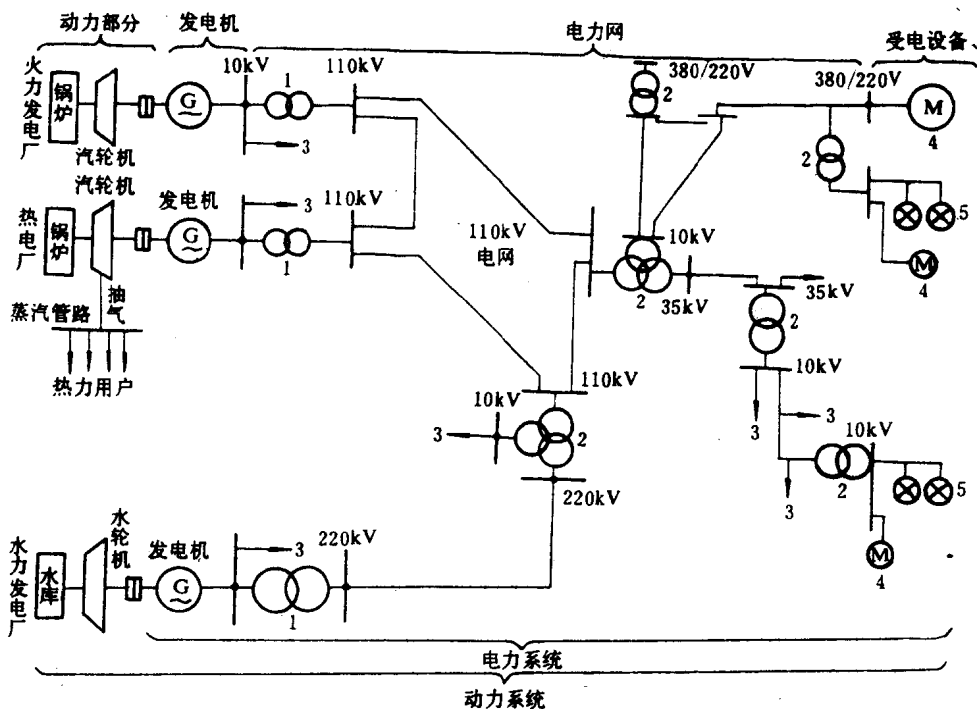


图 1-3 动力系统、电力系统、电力网示意图

1—升压变压器；2—降压变压器；3—负荷（泛指）；4—电动机；5—电灯

一、变电所

变电所的作用主要是变换电压，此外还有集中电力和分配电力、控制电力的流向和调整电压的作用。它主要由电力变压器与一些配电设备构成。如果只有配电设备而无电力变压器，仅用以接受电能和分配电能，则称为配电站或开关站。

变电所有升压变电所和降压变电所之分。升压变电所一般都是和发电厂结合在一起，把发电机电压升高，并与高压输电网连接起来；降压变电所设在受电侧，将高压的电能降压后

对某地区或某用户进行供电。就供电的范围的不同，变电所可分为区域变电所和地方变电所；在工业企业中，又可分为总降压变电所和车间变电所。

我们通常以变压器高压侧电压来表示变电所的电压，例如 110 kV 变电所或 220 kV 变电所。

电力系统输送电压较高，如 110、220、500 kV 等。所以要经过各级变电所的变压器把电压逐级降低后，才能供电给额定电压低的用电设备使用。

二、电力网

各种电压等级的输电线路和变电所组成了电力网（简称电网），电力网是发电厂和用户之间的中间环节。

我国目前有 35、110、220、330、500 kV 等电压等级的电力网，其中 220、330、500 kV 为主网架。

35 kV 以下的线路均属配电线路，由于大工业的发展，用户用电量的增加，不少用户用 10 kV 电压已不能满足需要。因此，现在在工业发达地区，已有很大一部分 35 kV 电压等级的配电线路。

我国根据经济技术比较及多年来的运行经验，总结出各级额定电压与输送功率及输送距离的关系，如表 1-1 所示。

三、电力系统作用

随着发电厂和电力网的不断扩大，电力系统之间通过联络线并网形成联合电力系统，其作用如下：

(1) 降低最高负荷和峰谷差。因不同地区的最高负荷出现的时间不同，电力系统的最高负荷比各地区的最高负荷之总和要小，从而可以减少装机容量。

(2) 减少备用容量。各电厂组织检修时，可以错开时间；机组故障时，可以利用系统中的备用机组互相支援，不必每个电厂都装备用机组，这样就减少了总的备用容量。

(3) 便于安装大机组。

(4) 便于利用大型动力资源。

(5) 提高供电可靠性，提高电能质量。由于系统容量大，个别机组故障时，对系统的影响较小，因而提高了供电的可靠性和电能质量。

(6) 提高运行经济性。可安排水电厂在电力系统中进行调峰，这样，高效率的大机组就可得到充分的利用。

四、电力系统的电能质量

电力系统的电能质量对电网稳定及电力设备的安全运行、降低消耗、保证工农业生产和提高产品质量都有直接影响。考核电能质量，主要是对频率、电压和波形提出标准要求。

表 1-1 架空线路的输送能力表

额 定 电 压 (kV)	输 送 功 率 (kW)	输 送 距 离 (km)
0.22	<5	0.15
0.4	<100	0.25
6	<2000	5~10
10	<3000	8~15
35	2000~10000	20~50
110	10000~50000	50~150
220	100000~150000	200~300
330	200000~800000	200~600
500	1000000~1500000	150~850

1. 频率标准

我国规定标准频率为 50 Hz，规定频率偏差允许值为：①电网容量在 3000 MW 及以上者为 ± 0.2 Hz；②电网容量在 3000 MW 以下者为 ± 0.5 Hz。若超出上述范围就需采取措施随时调整，使发电厂发出的有功功率和用户的有功负荷平衡，否则当用电负荷超过或低于电厂的出力时，系统的频率就要降低或升高。调整频率偏差的措施，一般为动用系统的备用容量和按频率的降低，自动切除一部分次要负荷，以保证重要负荷的正常用电。

2. 电压质量

我国的额定供电电压有：①低压单相为 220 V，三相为 380 V；②高压为 10、35、60、110 (154)、220、330、500 kV。

电压质量是以从供电端到用户变电端的电压偏移幅度来衡量的。目前，还提出了对电压波动的要求。

电压偏移幅度是以实际电压 U_E 和额定电压 U_n 之差的相对值的百分数表示

$$u\% = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100\% = \frac{U_E - U_n}{U_n} \times 100\%$$

式中 ΔU —— 实际电压与额定电压的差值；

U_n —— 额定电压；

U_E —— 实际工作电压。

用户变电端电压偏移幅度规定范围如下：①35 kV 及以上电力用户为额定电压的 $\pm 5\%$ ；②10 kV 电力用户为额定电压的 $\pm 7\%$ ；③低压照明用户为额定电压的 $+5\% \sim -10\%$ 。

电压偏低的主要原因除电网结构不合理外，还有由于无功功率的不足造成的影响。因此解决用户电压偏低的主要措施是合理调整电网结构，改善潮流分布，各级电网提高功率因数，按无功就地补偿原则，安装无功补偿设备和带负载调压变压器。

3. 波形质量

电力系统的电压波形应是正弦波形，但是随着电网中冶金、化工、电气化铁路等整流设备和非线性设备的投入不断增加，致使大量的高次谐波电流注入电网，造成电压正弦波形发生畸变。

电网电压波形畸变必须满足 SD126《电力系统谐波管理暂行规定》的要求，电网中任何一点的电压正弦波形畸变率均不得超过表 1-2 中的极限值。

表 1-2 电网电压正弦波形畸变

用户供电电压 (kV)	总电压正弦波形 畸变率 DFV 的极限值 (%)	各奇、偶次谐波电压正弦波形 畸变率 DFV_i 的极限值 (%)	
		奇次谐波	偶次谐波
0.38	5	4	2
6 或 10	4	3	1.75
36 或 63	3	2	1
110	1.5	1	0.5

表 1-2 中第 i 次谐波电压正弦波形畸变率 DFV_i 为第 i 次高次谐波电压有效值 U_i 与基波电压有效值 U_1 的百分比

$$DFV_i = \frac{U_i}{U_1} \times 100\%$$

总电压正弦波形畸变率 DFV 为各次谐波电压有效值的平方之和与基波电压有效值之比的开方值, 即

$$DFV = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (U_i)^2}{U_1^2}}$$

对整流和非线性用电设备应进行消谐措施, 以限制其注入电网的高次谐波电流, 否则供电部门可不予供电。

五、电力系统调度

为满足用户用电需要和协调电力系统发供电设备的运行和检修, 使整个系统达到安全、经济运行, 并保证电能质量和便于及时事故处理, 电力系统设置了专门的调度机构。

我国电力调度按系统复杂程度进行分级管理, 一般分网调、省调、地(市)调、县调四级。网调负责跨省之间电力系统的调度, 省调负责一个省内的电力系统调度, 地(市)、县调负责一个地(市)、县所管辖的电力系统的调度。

第三节 电力系统中性点的运行方式

电力系统中性点(即发电机和主变压器的中性点)的运行方式, 有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点直接接地三种。中性点不接地和经消弧线圈接地系统, 称为小电流接地系统, 中性点直接接地的系统称为大电流接地系统。我国 3~10 kV 系统, 大多采取中性点不接地的运行方式。一般规定: 3~10 kV 系统, 当单相接地电流大于 30 A 时, 或者 20 kV 及以上系统, 当接地电流大于 10 A 时, 采取中性点经消弧线圈接地的运行方式。110 kV 及以上的系统, 一般采取中性点直接接地的运行方式。对 380/220 V 低压配电网络, 为得到两个不同的电压, 也采取中性点直接接地的三相四线制。

中性点的运行方式不同, 其技术特性和工作条件也不同, 因而对运行的可靠性、设备的绝缘及其保护措施的影响和要求也不同。这是关系到经济和技术等方面并由各种因素决定的综合性问题, 下面分别予以讨论。

一、中性点不接地系统

我国 3~10 kV 系统, 大多采用中性点不接地的运行方式。由于任意两个导体隔以绝缘介质就形成电容, 所以电网的三相导线之间及各相导线对地之间, 沿导线全长都分布有电容, 这些电容将引起附加电流。

正常运行时, 三相系统是对称的, 因而可以把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, 同时不考虑相间电容, 如图 1-4(a) 所示。图 1-4(b) 为 U 相的电流相量图, 图 1-4(c) 为电容电流相量图。

1. 系统正常运行

系统正常运行时, 由于三相电压 $\dot{U}_u, \dot{U}_v, \dot{U}_w$ 是对称的, 各相对地的电容电流 $\dot{I}_{C0}$ 也是对称

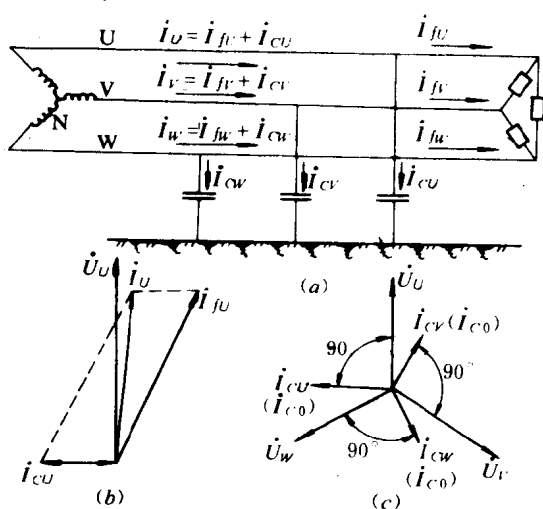


图 1-4 正常运行时, 中性点不接地的三相系统
(a) 电路图; (b) U 相的电流相量图;
(c) 电容电流相量图

的(各相对地的电容是相等的), 即 $i_{cU} = i_{cV} = i_{cW} = i_{c0}$, 因此三相电容电流的相量和为零。此时, 地中没有电容电流通过, 中性点的电位为零。

2. 系统发生单相接地故障

中性点不接地的三相系统, 当任何一相(例如 W 相)绝缘受到破坏而完全接地时, 其电路图, 如图 1-5 (a) 所示。此时, W 相对地的电压变为零, 中性点对地的电压为相电压 $-\dot{U}_w$, 未故障两相对地的电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 即变为线电压。W 相发生完全接地时的相量图, 如图 1-5 (b) 所示。由图看出, W 相接地时, 各相对地的电压 $\dot{U}'_U, \dot{U}'_V, \dot{U}'_W$ 应分别为原来正常时各相对地电压 $\dot{U}_U, \dot{U}_V, \dot{U}_W$

与 $-\dot{U}_w$ 的相量和, 即

$$\dot{U}'_U = \dot{U}_U + (-\dot{U}_w) = \dot{U}_U - \dot{U}_w = \dot{U}_{cU}$$

$$\dot{U}'_V = \dot{U}_V + (-\dot{U}_w) = \dot{U}_V - \dot{U}_w = \dot{U}_{cV}$$

$$\dot{U}'_W = \dot{U}_W + (-\dot{U}_w) = 0$$

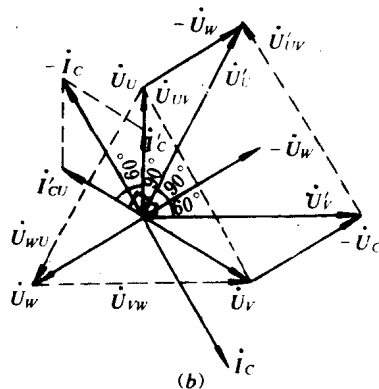
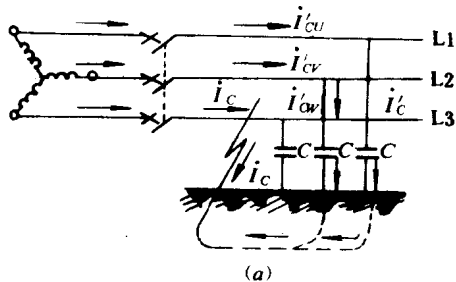


图 1-5 W 相发生接地时, 中性点不接地的三相系统图

(a) 电路图; (b) 相量图

从图 1-5 (b) 也可看出, $|\dot{U}'_U| = |\dot{U}'_V| = \sqrt{3} |\dot{U}_U|$, $\dot{U}'_U$ 和 $\dot{U}'_V$ 之间的夹角为 60° 。U、W 两相对地电压 $\dot{U}'_U, \dot{U}'_V$ 的绝对值升高 $\sqrt{3}$ 倍, 即其对地电容上所加的电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 所以, 对地电容电流 i'_{cU}, i'_{cV} 也较正常时的电容电流 i_{cU}, i_{cV}, i_{cW} 即 i_{c0} 值升高 $\sqrt{3}$ 倍。也就是说, 在对称三相系统中, 发生 W 相接地后, 非故障相对地的电容电流 $i'_{cU} = i'_{cV} = \sqrt{3} i_{cU} = \sqrt{3} i_{cV} = \sqrt{3} i_{c0}$, 而 W 相对地的电容电流为零, 因 W 相对地的电容被短路了。

设电流的正方向是由电源到电网，则可得出通过 W 相接地点的电流（简称接地电流） $\dot{I}_c = -(\dot{I}'_{cu} + \dot{I}'_{cv})$ ，由于 $\dot{I}'_{cu}$ 和 $\dot{I}'_{cv}$ 分别超前 $\dot{U}'_u$ 和 $\dot{U}'_v$ 90° ，因而 $\dot{I}'_{cu}$ 、 $\dot{I}'_{cv}$ 两电流之间的夹角也是 60° ，将它们相加即得 $-\dot{I}_c$ 。W 相接地电流 $\dot{I}_c$ 为电容电流，故 $\dot{I}_c$ 超前电压 $\dot{U}_w$ 90° 。由相量图可得

$$\dot{I}_c = \sqrt{3}\dot{I}'_{cu} = \sqrt{3}\dot{I}'_{cv}$$

因为

$$\dot{I}'_{cu} = \dot{I}'_{cv} = \sqrt{3}\dot{I}_{c0}$$

所以

$$\dot{I}_c = 3\dot{I}_{c0} \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 可知，单相接地电流等于正常时一相对地电容电流的三倍。

若已知每相的对地电容 C ，则可得到

$$I_{c0} = \frac{U_\varphi}{X_c}$$

因为

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

所以

$$I_c = 3I_{c0} = 3U_\varphi\omega C \quad (1-2)$$

式中 U_φ —— 正常运行时的相电压 (kV)；

ω —— 角频率 (rad/s)；

C —— 相对地的电容 (F)。

因此，接地电流 $\dot{I}_c$ 的值与网络的电压、频率和每相对地的电容有关，而每相对地的电容与电网的结构（电缆、架空线）和线路的长度等有关。在实用中，接地电流可近似地用下式计算

$$\text{架空线路} \quad I_c = \frac{U l}{350} \quad (1-3)$$

$$\text{电缆线路} \quad I_c = \frac{U l}{10} \quad (1-4)$$

式中 U —— 电网的线电压 (kV)；

l —— 电压为 U 具有电联系的线路长度 (km)。

在发生不完全接地（经过一定电阻接地）时，接地相对地的电压大于零而小于相电压，非接地相对地的电压则大于相电压而小于线电压。因此，接地电流也比完全接地时小些。

由上可知，在中性点不接地的系统中发生一相接地时，网络线电压的大小和相位差仍维持不变，三相用电设备的工作也不会受到破坏。同时，在这种系统中相对地的绝缘水平是根据线电压设计的，虽然未故障相的相电压会升高 $\sqrt{3}$ 倍，但对设备的绝缘没有多大影响。因而中性点不接地系统在发生单相接地时，可以继续运行。但是，不允许长期运行，因为长期运行时可能引起未故障相绝缘薄弱的地方损坏而造成相间短路。为此，在这种系统中，一般都装设专门的绝缘监察装置，以监视有无接地故障发生。中性点不接地系统中发生单相接地时，按规定一般允许暂时继续运行不超过 2 h。

二、中性点经消弧线圈接地系统

在中性点不接地系统中，单相接地电容电流超过上节所述的规定数值时，电弧将不能自行熄灭。为了减小接地点的单相接地电流，一般将变压器中性点经消弧线圈后再与大地连接。

图 1-6 即为中性点经消弧线圈接地的三相系统图。

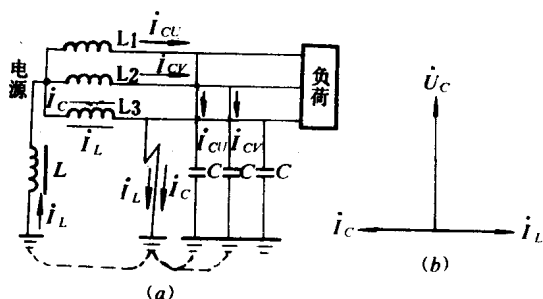


图 1-6 中性点经消弧线圈接地的三相系统图

(a) 电路图; (b) 相量图

正常工作时, 中性点的电位为零, 没有电流通过消弧线圈。当 W 相发生金属性接地时, 作用在消弧线圈两端的电压即升高为相电压 $\dot{U}_w$, 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 $\dot{U}_w$ 90° 。由于电感电流 $\dot{I}_L$ 和电容电流 $\dot{I}_C$ 两者相位差 180° , 所以在接地点 $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_C$ 起互相抵消的作用(或叫补偿作用), 其相量图如图 1-6(b) 所示。如果适当选择消弧线圈的电感(匝数), 可使接地点的

电流等于零, 在接地点不致产生电弧。并可避免由电弧所引起的危害。

根据消弧线圈电感电流对接地点电容电流补偿程度的不同, 可分以下三种补偿方式。

(1) 全补偿。若 $\dot{I}_L = \dot{I}_C$, 即 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$ (式中: L 为消弧线圈电感, H; C 为导线的电容, F) 时, 接地点处的电流为零, 称为全补偿。因为正常运行时, 电网三相的对地电容并不完全相等; 断路器操作时, 三相触头也不可能完全同时闭合, 所以在未发生接地故障时, 中性点与地之间会出现一定的电压, 称之为不对称电压。此电压将引起串联谐振过电压, 可危及电网的绝缘。故全补偿方法是不能采用的。

(2) 欠补偿。若 $\dot{I}_L < \dot{I}_C$, 即 $\frac{1}{\omega L} < 3\omega C$ 时, 接地点尚有未补偿的电容性电流, 称为欠补偿。欠补偿方式一般也较少采用。因为在欠补偿运行情况下, 如果切除部分线路(对地电容减小), 或系统频率降低(致使 $\frac{1}{\omega L}$ 增大而 $3\omega C$ 减小), 或线路发生一相断线(若送电端一相断线, 则该相电容为零)等, 均可能使系统接近或者达到全补偿, 以致出现串联谐振过电压的可能。

(3) 过补偿。若 $\dot{I}_L > \dot{I}_C$, 即 $\frac{1}{\omega L} > 3\omega C$ 时, 接地处具有多余的电感性电流, 称为过补偿。过补偿方式可避免产生串联谐振过电压, 因此得到广泛采用。但必须指出, 在过补偿运行方式下, 接地处将流过一定数值的电感性电流, 这一电流值不能超过规定值。否则, 故障点的电弧将不能可靠地自动熄灭。

运行经验证明, 中性点经消弧线圈接地系统在单相接地时也可继续运行, 但一般不超过 2 h。运行人员应及时采取措施, 查出接地点, 在最短时间内消除。若接地点暂时无法消除时, 应设法将负荷转移到备用线路上去, 以保证系统正常运行。中性点经消弧线圈接地的系统发生一相接地时, 其它两相对地的电压也要升高 $\sqrt{3}$ 倍, 即升高到线电压; 故障相的电压为零。这与中性点不接地的系统情况相同。

三、中性点直接接地系统

防止单相接地时产生间歇电弧过电压的第二种方法, 是将系统的中性点直接接地, 如图 1-7 所示。在这种系统中当发生单相接地时, 故障相便直接经过地面形成单相短路。由于单相短路电流很大, 因而继电保护装置可立即动作, 将接地的线路切除, 使系统的其他部分恢复正常运行。由此可见, 中性点直接接地的系统在发生单相接地时, 不会产生间歇电弧。同时, 因中性点电位被接地体固定, 在发生单相接地时, 非故障相对地的电压不升高, 因而各

相对地的绝缘水平只需按相电压考虑,这就大大降低了电网的造价。网络的电压等级愈高,其经济效益愈显著。因为高压电气的绝缘问题,是影响其设计和制造的关键问题,绝缘要求降低,实际就降低了高压电器的造价,同时也改善了高压电器的性能。所以 110 kV 及以上的超高压系统,一般采取中性点直接接地的方式。

中性点直接接地系统的缺点如下:

(1) 单相接地时,短路电流值很大,将引起电压降低,以致影响系统的稳定。另外,由于强大的短路电流在导体周围形成较强的单相磁场,使邻近的通信线路受到干扰。因此,在大容量的电力系统中,为了减小单相短路电流,也有采用中性点经电抗器接地的(这样可限制单相短路电流值),或者只将系统中一部分变压器的中性点直接接地。

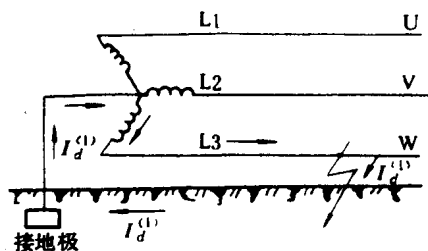


图 1-7 中性点直接接地系统图

(2) 在发生单相接地时,由于必须断开故障线路,因而将导致用户供电中断。为了克服这一缺点,提高供电的可靠性,目前在中性点直接接地系统的线路上,广泛地装设了自动重合闸装置(ZCH)。当发生单相接地故障时,在继电保护的作用下断路器自动断开,经一定时间后再自动重合。若故障消除,用户供电即可得到恢复;如果单相接地为永久性的,则继电保护将再次断开断路器。对极重要的用户,为了保证不间断供电,则应另装设备用电源。

第四节 工厂企业配电系统

一、用电负荷的分类

用户供电系统的接线方式,在很大程度上取决于用户对供电可靠性的要求。用电负荷按其重要性及中断供电在政治上和经济上所造成的损失或影响的程度,分为下列三级。

1. 一级负荷

(1) 中断供电将造成人身伤亡者。

(2) 中断供电将在政治上或经济上造成重大损失者,如重大设备损坏、重大产品报废、用重要原料生产的产品大量报废、国民经济中重点企业的连续生产过程被打乱,需要长时间才能恢复等。

(3) 中断供电会影响有重大政治、经济意义的用电单位的正常工作者,如重要交通枢纽、重要通信枢纽、重要宾馆、经常用于国际活动的大量人员集中的公共场所等用电单位的重要电力负荷。

2. 二级负荷

(1) 中断供电将在政治、经济上造成较大损失者,如主要设备损坏、大量产品报废、连续生产过程被打乱需长时间才能恢复、重点企业大量减产等。

(2) 中断供电将影响重要用电单位的正常工作者,如交通枢纽、通信枢纽等用电单位中的主要电力负荷;中断供电将造成大量人员集中的大型影剧院、大型体育馆、大型商店等重要公共场所秩序混乱者。

3. 三级负荷

一般电力负荷,不属于一级、二级负荷者。