



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

电气设备运行 与维护

吴 靓 主 编
常文平 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

电气设备运行 与维护

主 编	吴 靓		
副主编	常文平		
编 写	吴 倩	齐山成	董 泉
主 审	马 辉		



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书在编写内容方面，主要结合变电运行工、电气值班员等职业岗位能力要求，按照中国南方电网公司岗位技能人员能力考核标准，划分学习情境，确定各项目主要内容，增加了教学要求、岗位技能、操作项目、特别提示、问题讨论、案例分析等环节，帮助学生在学习本课程的知识。

本书可作为高职高专院校培养应用型技术人才的教学用书，也可作为从事电力行业的设计、运行、安装检修以及管理工作的有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电气设备运行与维护/吴靓主编. —北京：中国电力出版社，2012.6

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5123-3204-1

I. ①电… II. ①吴… III. ①电气设备-运行-高等职业教育-教材②电气设备-维修-高等职业教育-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 137275 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 414 千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“电气设备运行与维护”是高职高专院校强电类专业的职业能力核心课程，具有实践性强、应用性广的特点。本书在编写过程中，坚持人才培养目标和职业岗位能力的要求，以适用为度，增加了大量的变电运行、变电检修等相关内容，对一些理论性强、计算复杂的内容进行了删减，增加了许多设备图片、现场实景和案例分析，使教材更具实用性。

全书共6个学习情境，其中学习情境1、学习情境4由河南机电高等专科学校的常文平编写，学习情境2、学习情境6由广东水利电力职业技术学院的吴靓编写，学习情境3由中国南方电网公司广州供电局有限公司的吴倩编写，学习情境5由河南机电高等专科学校的齐山成编写，河南省电力公司信阳供电公司董泉编写了附录。由吴靓对全书进行了统稿，中国南方电网公司生技部马辉担任本书的主审。

由于编者水平和编写的时间有限，书中难免有不妥之处，诚恳希望读者指正。

编 者

2012年2月

目 录

前言

学习情境 1	学习电力系统的基本知识	1
项目 1	认识电力系统	1
项目 2	了解电力系统中性点的运行方式	9
项目 3	计算短路电流	14
项目 4	认识电弧	36
学习情境 2	开关电器的运行与维护	42
项目 1	高压断路器	42
项目 2	隔离开关	58
项目 3	高低压熔断器	64
项目 4	高压负荷开关	71
项目 5	低压开关	75
项目 6	选择开关电器	83
学习情境 3	互感器及载流导体的运行与维护	95
项目 1	电流互感器	95
项目 2	电压互感器	105
项目 3	母线	113
项目 4	电力电缆	122
项目 5	绝缘子	136
学习情境 4	其他电气一次设备的运行与维护	140
项目 1	电容器	140
项目 2	电抗器	157
项目 3	防雷装置	163
项目 4	接地装置	170
学习情境 5	电气主接线的倒闸操作	180
项目 1	认识电气主接线	180
项目 2	确定电气主接线的方案	186
项目 3	电气设备的倒闸操作	208
项目 4	厂用电接线	215
学习情境 6	配电装置的运行与维护	227
项目 1	配电装置的安全净距	227
项目 2	屋内配电装置	232
项目 3	屋外配电装置	243
项目 4	电气总布置	252
附录		258
参考文献		265

学习情境 1 学习电力系统的基本知识

项目 1 认识电力系统

教学要求

- (1) 了解电力系统的构成。
- (2) 能够比较电力系统、电网、动力系统之间的异同之处。

电力是衡量一个国家经济发达程度的重要标志,也是反映人民生活水平的一个重要指标。电力工业是国民经济的一项基础工业和国民经济发展的先行产业,它是一种将煤、石油、天然气、水能、核能、风能等一次能源转换成电能这个二次能源的工业,它为国民经济的其他各部门的快速、稳定发展提供足够的动力,工农业生产、交通运输和人民生活等都离不开电力。

1.1 电力系统的基本组成

为了提高供电的可靠性及经济性,由发电厂、变电所、电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。电能的生产、输送、分配和消费都是同一时间完成的,是同时进行的,即发电厂任何时候生产的电能等于用户消耗的电能加上输送和分配过程中消耗的电能总和。电力系统加上热能动力装置或水能动力装置及其他能源装置,称为动力系统。在电力系统中由各级电压的输配电线路和变电所组成的部分称为电力网络,简称电网。

如图 1-1 所示为动力系统、电力系统和电网之间关系的示意图。

1. 发电厂

发电厂又称发电站,是将一次能源转化为二次能源的工厂,是电力系统的中心环节。发电厂的种类很多,根据利用的能源不同,可以分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风力发电厂以及地热、太阳能、潮汐能发电厂等。到 2008 年底全国发电装机总容量为 7.93 亿 kW,其中火电 6.01 亿 kW,占 75.8%,水电 1.72 亿 kW,占 21.7%。下面重点介绍火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂三种类型的发电厂。

(1) 火力发电厂(简称火电厂)。它是利用自然界中的煤、石油、天然气为燃料,利用燃料的化学能来产生热能,再利用汽轮机等热力机械将热能转化为机械能,发电机将机械能转化为电能。我国火电厂以燃煤为主,为了提高燃料的效率,现代火电厂都将煤块粉碎成煤粉燃烧,煤粉在锅炉的炉膛内充分燃烧,将锅炉的水烧成高温高压的蒸汽,推动汽轮机转动,使与之联轴的发电机旋转发电,即将机械能转换为电能。在汽轮机内做完功的蒸汽经凝汽器放出汽化热而凝结成水后,再送回锅炉,如此重复,循环使用。

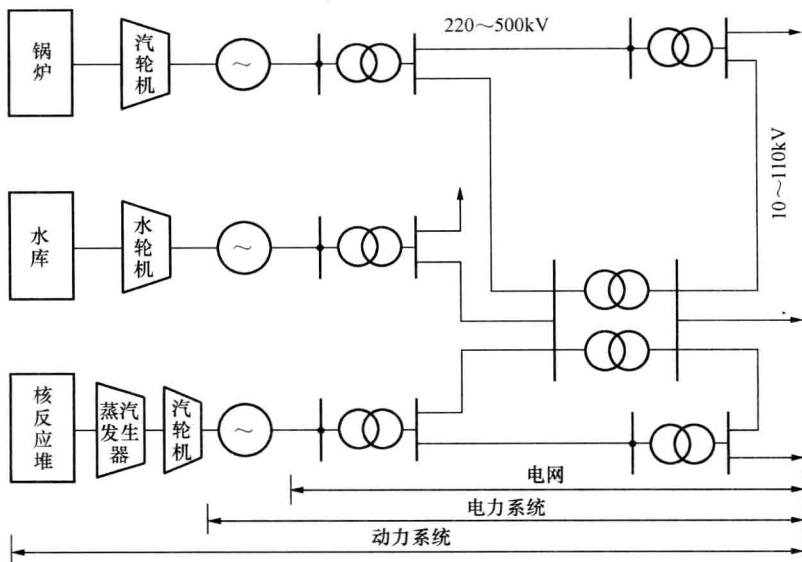


图 1-1 动力系统、电力系统、电网的示意图

火电厂又分为凝汽式电厂和热电厂两种类型。

凝汽式电厂仅向用户供出电能。我国大多数凝汽式电厂一般建在一次能源比较丰富的地方，比如煤矿、煤炭基地及附近，或建在铁路交通便利的地方，这类火电厂往往远离用电中心，必须将发出来的电能，通过高压输电线路送到负荷中心，其生产过程如图 1-2 所示。

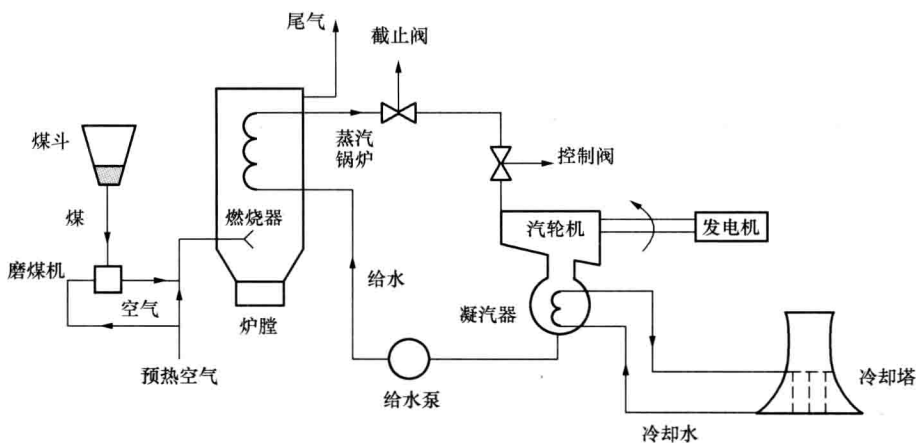


图 1-2 火电厂生产过程示意图

热电厂不仅向用户供电，同时还向用户供蒸汽或热水。由于供热距离不宜太远，所以热电厂多建在城市和用户附近。热电机组的发电出力与热力用户的用热有关，用热量多时热电机组发出的电能相应增加，用热少时热电机组发出的电能相应减少。热电厂的建立能减少烟尘的排放，有利于城市的环境保护。

(2) 水力发电厂（简称水电站）。它是利用江河水流的水能生产电能的工厂。它的基本

生产过程是：从河流较高处或水库内引水，利用水的压力或流速冲动水轮机旋转，将水能转变为机械能，然后水轮机带动发电机旋转，将机械能转变为电能。

水电站的装机容量与水头、流量及水库容积有关。按集中落差的方式，水电站一般分为堤坝式、引水式和混合式三种；按主厂房的位置和结构又可分为坝后式、坝内式、河床式、地下式等数种；按运行方式则分为有调节水电站、无调节（径流式）水电站和抽水蓄能电站。

抽水蓄能电站是一种特殊形式的水力发电厂，由高落差的上下水库和水轮机—发电机—抽水机的可逆机组构成，可实现对电能的调节，利用夜间用电低谷时或丰水期的剩余电力，将下水库的水抽回到上水库内储存能量，此时机组按电动机—水泵的方式工作，待峰荷或枯水时，上水库放水释放能量发电，此时机组按水轮机—发电机的方式工作。抽水蓄能电站可以作为调频、调相和作为系统的备用容量，一般可与发电出力稳定的核电厂配合使用。

（3）核能发电厂（简称核电站）。它是利用核能发电的工厂，它的核燃料是铀-235，其发电过程与火力发电过程相似，不同的是以核反应堆和蒸汽发生器代替了锅炉设备。在核反应堆中，铀在慢中子的撞击下产生链式反应，使原子核分裂，放出巨大的能量，核能转变为热能后将水变为高温高压蒸汽，进入蒸汽发生器内推动汽轮发电机组发电。

核电厂能取得较大的经济效益，所需原料极少，如一个百万千瓦电厂，火力发电厂一年约需 300 万吨燃料，而核电厂仅需 30t 燃料，有利于减少二氧化碳和灰尘等有害物质。

2. 变电所

变电所又称变电站，它是联系发电厂和电能用户的桥梁，它的任务是接收电能、变换电压和分配电能，即受电—变压—配电。

按变电所的性质和任务不同，可以将变电所分为升压变电所和降压变电所两大类。按变电所在电网中的地位 and 作用不同又分为枢纽变电所、中间变电所、地区变电所和终端变电所。

升压变电所一般建在发电厂附近，主要任务是将低电压变换为高电压；降压变电所一般建在靠近负荷中心的地点，主要任务是将高电压变换到一个合理的电压等级。

枢纽变电所位于大用电区域或大城市附近，从 220~1000kV 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。枢纽变电所对电力系统运行的稳定和可靠性起着重要作用，它联系多个电源，出线回路多，变电容量大，全所停电后将造成大面积停电或系统瓦解。

中间变电所起交换功率或分段长距离高压输电线路的作用。一般汇集多个电源，高压侧电压等级为 220~330kV，同时少量电能供给当地用户。全所停电后将引起区域电网的解列。

地区变电所高压侧电压一般为 110~220kV，从枢纽变电所受电，经变压器把电压降到 10~110kV，对市区或地区供电。全所停电后将造成该地区或城市供电的紊乱。

终端变电所位于输电线路末端，接近负荷中心，高压侧电压为 35~110kV，降压后直接向用户供电。

3. 电网

电网是由变电所和不同电压等级的输电线路所组成，其作用是输送、控制和分配电能。

按其用途分，电网分为输电网和配电网，其中 10kV 及以下的电网一般称为配电网；按

照电压高低可分为低压网（1kV 以下）、中压网（1~10kV）、高压网（35~220kV）、超高压网（330~750kV）和特高压网（1000kV 以上）。

电网按结构特征又分开式和闭式电网两种。凡用户只能从单方向得到供电的叫开式电网；用户可从两个或两个以上方向得到供电的叫闭式电网。

4. 电能用户

电能用户又称电力负荷。在电力系统中，一切消费电能的用电设备均称为电能用户。

用电设备按电流不同可分为直流设备与交流设备两类，而大多数设备为交流设备；按电压高低可分为低压设备与高压设备，1kV 及以下的属低压设备，高于 1kV 的属高压设备；按频率高低可分为低频（50Hz 以下）、工频（50Hz）及中、高频（50Hz 以上）设备，绝大部分设备采用工频；按用途不同可分为动力用电设备（如电动机）、电热用电设备（如电炉、空调等）、照明用电设备、试验用电设备、工艺用电设备（如电解、电镀、热处理等）。

电力负荷按重要性可将用户分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类。Ⅰ类用户是指对这类负荷停止供电，会带来人身危险，设备损坏，产生大量废品，长期破坏生产秩序，给国民经济带来巨大的损失或造成重大的政治影响。Ⅱ类用户是指对这类负荷停止供电，会造成大量减产，城市公用事业和人民生活受到影响等。Ⅲ类用户是指短时停电不会造成严重后果的用户，如工厂附属车间、小城镇、小加工厂等。

1.2 电力系统运行的特点及运行要求

1. 电力系统运行的特点

由于电能的生产、输送和使用本身所固有的特点，以及连接成电力系统后出现的新问题，决定了电力系统的运行与其他工业生产过程相比具有许多不同的特点。

（1）电能难以储存。电能的生产、分配、输送、再分配直至使用必须在同一时刻完成，即在任一时刻，在系统中必须保持电能的生产、输送和使用处于一种动态的平衡状态。如果在系统运行中发生了供电与用电的不平衡，系统运行的稳定性就会遭到破坏，甚至发生事故，使电力系统及国民经济造成严重损失。

（2）正常输电过程和故障过程都非常迅速。由于电能是以电磁波的形式传播的，其传播速度为光速（300000km/s），因此不论是正常输电过程还是发生故障过程都非常迅速，这就要求有一系列能对系统进行灵敏而迅速的监测、控制和保护的装置，将操作或故障引起的系统变化限制在尽可能小的范围之内。

（3）电力系统的地区性特点较强，组成情况不尽相同，因此在系统规划设计与运行管理时应从实际出发，针对各个系统的特点来分别进行。

（4）电能生产与国民经济、人民生活的关系密切，电能供应的中断或不足，不仅将直接影响生产，造成人民生活秩序的紊乱，在某些情况下，甚至会酿成极其严重的社会性灾难。

2. 电力系统运行的基本要求

（1）保证供电的可靠性。保证供电的可靠性是对电力系统运行的基本要求。所谓电力系统的可靠性是指确保用户能够随时得到供电。

对Ⅰ类用户，通常应设置两路以上相互独立的电源供电，其中每一路电源的容量均应保证在此电源单独供电的情况下就能满足用户的用电要求，确保当任何一路电源发生故障或检

修时,都不会中断对用户的供电。

对Ⅱ类用户应设置专用供电线路,条件许可时也可采用双回路供电,并在电力供应出现不足时优先保证其电力供应。当系统发生事故,出现供电不足的情况时,应首先切除Ⅲ类用户的用电负荷,以保证Ⅰ、Ⅱ类用户的用电。

为了保证供电的可靠性,从发电到输电以及配电,每个环节都必须保证安全可靠,不发生故障,以保证连续不断地为用户提供电能。为此,要保证电力系统中各元件的质量,及时搞好设备的正常维护及定期的检修与试验,加强和完善各项安全技术措施,提高电力系统的运行和管理水平,杜绝可能发生的直接或间接的人员责任事故。

(2) 保证电能的良好质量。衡量电能质量的指标是频率、电压和波形。当系统的频率、电压和波形不符合电气设备的额定值要求时,往往会影响设备的正常工作,造成振动、损耗增加,使设备的绝缘加速老化甚至损坏,危及设备和人身安全,影响用户的产品质量等。因此要求系统所提供电能的频率、电压和波形必须符合其额定值的规定。

在电力系统正常工作情况下,我国电能频率的允许偏差规定为:电网装机容量在3000MW以上时,为0.2Hz,3000MW以下时,为0.5Hz;在电力系统非正常情况下,供电频率允许偏差不超过1.0Hz。在正常情况下,供电企业供到用户受电端的供电电压允许偏差如下:35kV及35kV以上,允许电压偏差小于10%;10kV以下的高压供电和低压电力用户为 $\pm 7\%$,照明用户为 $+7\% \sim -10\%$ 。电力系统的频率主要取决于有功功率的平衡,电压主要取决于无功功率的平衡,可通过调频、调压和无功补偿等措施来保证频率和电压的稳定。

通常,要求电力系统的供电电压(或电流)的波形为严格的正弦形,发电机和变压器的设计制造部门已考虑了这一要求,但在电能输送和分配过程中也要不使波形发生畸变,应注意避免或消除电力系统中可能出现的其他谐波源(如整流装置,输电线路的电晕等)。

(3) 保证电力系统运行的稳定性。电力系统在运行过程中不可避免地会发生短路事故,如果电力系统的稳定性较差,局部事故的干扰有可能导致整个系统的全面瓦解,而且需要长时间才能恢复,严重时会造成大面积、长时间停电。因此,必须保证电力系统运行的稳定性,做到合理地配置系统参数,自动装置灵敏可靠,合理调度,快速果断地处理事故。

(4) 保证电力系统运行的经济性。要使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小、成本低,必须降低一次能源消耗率、厂用电率和线损率,使这三个指标达到最小。电能成本的降低不仅节省了能源,还将有助于用户生产成本的降低,因而给整个国民经济带来效益。要实现经济运行,除进行合理规划设计之外,还须对整个系统实施最佳经济调度。

综上所述,保证对用户不间断地供给充足、优质而又经济的电力,是电力系统的基本任务。



【岗位技能】

电能质量的提高方法

(1) 合理选择变压器的电压分接头或采用有载调压变压器,使之在负荷变动的情况下,有效地调节电压,保证用电设备端电压的稳定。

(2) 合理减少供配电系统的阻抗,以降低电压损耗,从而缩小电压偏移范围。

(3) 尽量使系统的三相负荷均衡,以减小电压偏移。

(4) 合理地改变供配电系统的运行方式,以调整电压偏移。

(5) 采用无功功率补偿装置, 提高功率因数, 降低电压损耗, 缩小电压偏移范围。

目前, 随着先进的电子技术、自动控制技术、网络技术的应用与发展, 利用计算机实现对供电系统的实时监控, 在计算机上就可以自动显示电压波动信息、波动幅度和频率等。

1.3 电力系统的额定电压

额定电压就是发电机、变压器、线路和用电设备等在正常运行时具有最大经济效益时的电压。它由一个国家根据自己的国情和技术条件确定, 规定了标准电压等级系列, 有利于电器制造业的生产标准化和系列化, 有利于设计的标准化和选型, 有利于电器的互相连接和更换, 有利于备件的生产和维修等。我国电力系统的额定电压有 220/380V, 3、6、10、35、60、110、220、330、500、750、1000kV 等。

1. 额定电压的分类

根据电压的高低, 我国把电力设备的额定电压分为以下三类。

(1) 第一类额定电压: 指低于 100V 的额定电压, 主要用于安全照明、蓄电池及用电设备的操作电源。常用电压等级有 1.5、3、6、12、24、36、48V 等。

(2) 第二类额定电压: 指 100~1000V 之间的额定电压, 主要用于日常生活、低压电器设备。常用电压等级有 110、220、380、440、660V (用于矿井) 等。

(3) 第三类额定电压: 指 1000V 以上的额定电压。对于第三类额定电压, 我国三相交流电网、发电机和电力变压器的额定电压见表 1-1。

表 1-1 第三类额定电压

电网和用电设备 额定电压 (kV)	发电机额定 电压 (kV)	电力变压器额定电压 (kV)	
		一次绕组	二次绕组
0.22	0.23	0.22 及 0.23	0.23
0.38	0.40	0.38 及 0.40	0.40
3	3.15	3 及 3.15	3 及 3.15
6	6.3	6 及 6.3	6 及 6.3
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
35	—	35	38.5
60	—	60	66
110	—	110	121
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	550
750	—	750	825
1000	—	1000	1100

2. 电气设备额定电压的确定

由于用电设备运行时, 电力线路上要有负荷电流流过, 因而在电力线路上就会引起电压的损耗, 造成电力线路上各点电压略有不同, 首端的电压高, 末端的电压低。为了保证电气

设备的安全运行,需要确定合理的额定电压。

【问题讨论】 如何确定电气设备的额定电压?

(1) 确定电力线路的额定电压。我们把线路首末两端电压的平均值作为电力线路的额定电压。电力线路(或电网)的额定电压等级是国家根据国民经济发展的需要及电力工业的水平,经全面技术经济分析后确定的,如图1-3所示。

(2) 确定用电设备的额定电压。由于用电设备在 $\pm 5\%$ 的电压偏差内可以正常工作,所以取用电设备的额定电压与同级电力线路的额定电压相同。

(3) 确定发电机的额定电压。发电机位于线路的首端,为了保证电力线路的电压损耗不超过 10% ,发电机的额定电压应比线路额定电压高 5% 。

(4) 确定电力变压器的额定电压。电力变压器一次绕组的额定电压的确定方法如下。

如果电力变压器直接与发电机相连,则其一次绕组的额定电压应与发电机额定电压相同,高于同级线路额定电压的 5% ,如图1-4中变压器T1所示。当变压器不与发电机相连,而是连接在线路上,可以将电力变压器看作是线路上的用电负荷,因此其一次绕组的额定电压应与同级线路的额定电压相同,如图1-4中变压器T2所示。

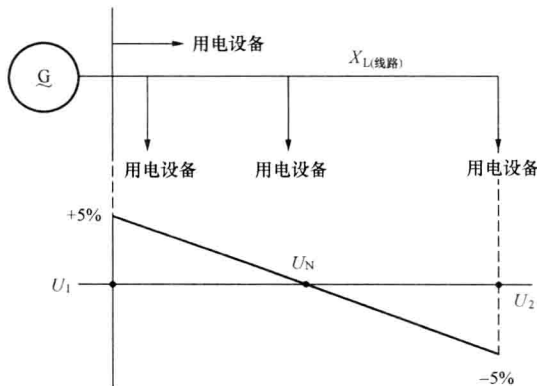


图1-3 电力线路电压变化及用电设备、发电机的额定电压说明

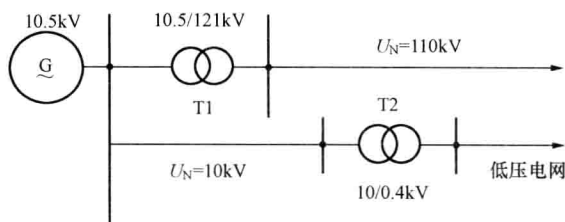


图1-4 电力变压器额定电压示意图

电力变压器二次绕组的额定电压的确定方法如下。

如果变压器二次侧供电线路很长,则变压器二次绕组额定电压,一方面要考虑补偿变压器本身二次绕组 5% 的阻抗电压降,另一方面还要考虑变压器满载时输出的二次电压要满足线路首端电压高于线路额定电压的 5% ,以补偿线路上的电压损耗。所以,变压器二次绕组的额定电压要比线路额定电压高 10% 。

如果变压器二次侧供电线路不长时,只需考虑补偿变压器内部 5% 的阻抗电压降,只要高于其所接线路额定电压 5% 即可。

【例1-1】 试确定图1-5中电力变压器T1和T2的一次、二次绕组的额定电压。

解 (1) 对T1变压器。

一次绕组: 其一次绕组直接和发电机相连,额定电压应与发电机额定电压相同,确定为 10.5kV 。

二次绕组: 变压器二次侧供电线路很

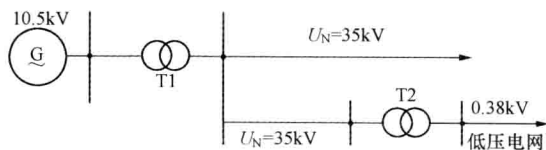


图1-5 电力变压器T1和T2系统接线图

长,二次绕组额定电压不仅考虑本身二次绕组 5% 的阻抗电压降,还需考虑二次电压要满足线路首端高于线路额定电压的 5%,在此题中由于线路的额定电压是 35kV,所以确定额定电压为 $35\text{kV} \times 110\% = 38.5\text{kV}$ 。

(2) 对 T2 变压器。

一次绕组:电力变压器连接在线路上,可以将电力变压器看作是线路上的用电负荷,因此其一次绕组的额定电压应与同级线路的额定电压相同,即 35kV。

二次绕组:变压器二次侧供电线路不长时,只需考虑补偿变压器内部 5% 的阻抗电压降,高于其所接线路额定电压 5% 即可,即 $0.38\text{kV} \times 105\% = 400\text{V}$ 。

3. 选择额定电压考虑的因素

由于三相功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$,所以在输送功率一定时,输电电压越高,输电电流越小,从而可减少线路上的电能损失和电压损失,同时又可减少导线截面,节约有色金属。而对于某一截面的线路,当输电电压越高时,其输送功率越大,输送距离越远;但是电压越高,对设备的绝缘性能要求就高,投资费用也相应增加,配电电压的选择主要取决于用电负荷的大小和供电距离的长短。对某一电压等级,都有一个与之对应最合理的供电容量和供电距离。

各级电压电网的经济距离的参考依据见表 1-2。

表 1-2 各级电压电力线路合理的输送功率和输送距离

线路电压 (kV)	线路结构	输送功率 (kW)	输送距离 (km)
0.38	架空线	≤ 0.1	≤ 0.25
0.38	电缆线	≤ 0.175	≤ 0.35
6	架空线	≤ 1	≤ 10
6	电缆线	≤ 3	≤ 8
10	架空线	≤ 2	5~20
10	电缆线	≤ 5	≤ 10
35	架空线	2~10	20~50
66	架空线	3.5~30	30~100
110	架空线	10~50	50~150
220	架空线	100~500	200~300
330	架空线	200~600	200~600
500	架空线	150~850	150~850

项目2 了解电力系统中性点的运行方式

教学要求

- (1) 了解电力系统中性点接地方式有哪些。
- (2) 了解电力系统中性点每种接地方式的运行特点。
- (3) 能够绘制中性点不接地系统单相接地故障时, 各相电流及电压的变化相量图。
- (4) 了解消弧线圈如何选择及使用。

电力系统的中性点是指星形接线的发电机或变压器的中性点。电力系统中性点的接地方式有两大类: 一类是中性点直接接地或经过小阻抗接地, 称为大接地电流系统; 另一类是中性点不接地, 经过消弧线圈或大阻抗接地, 称为小接地电流系统。

电力系统中性点的运行方式不同, 其技术特性和工作条件也不同, 还与故障分析、继电保护配置、绝缘配合等均密切相关。采用哪一种中性点运行方式, 将直接影响到电网的绝缘水平、系统供电的可靠性和连续性、电网的造价以及对通信线路的干扰程度。

2.1 大接地电流系统

大接地电流系统中采用最多的是中性点直接接地方式, 如图1-6所示。在这种系统中, 当发生单相接地时, 通过大地和中性点构成回路, 将产生很大的短路电流 $I_k^{(1)}$, 为了防止烧坏电气设备, 保护装置应瞬时动作, 使断路器跳闸, 切除短路故障。由于发生单相短路时, 继电保护会自动跳开断路器, 故这种接地方式的可靠性较低, 一般可以配备自动重合闸提高其供电可靠性。

中性点直接接地的主要优点是系统发生单相接地时, 中性点的电位接近零, 非故障相的对地电压接近于相电压, 系统中的供电设备的绝缘只需按相电压设计, 而无需按线电压考虑, 这对110kV以上的系统, 可以明显降低绝缘部分的造价, 具有很高的经济价值。目前, 我国110kV及以上的电网普遍采用中性点直接接地方式。在380/220V低压配电系统采用这种接线方式的目的是不是降低绝缘材料的造价, 而是防止单相接地时非故障相出现超过250V的对地电压, 危及人身的安全。

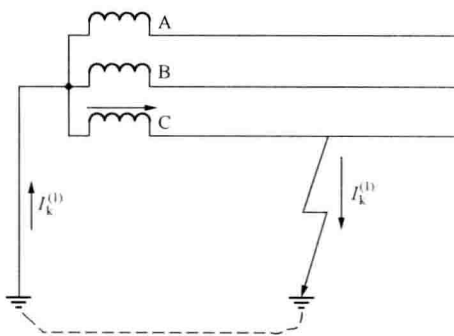


图1-6 大接地电流系统中发生单相接地故障

2.2 小接地电流系统

小接地电流系统采用最多的是中性点不接地方式和经消弧线圈接地的方式。

1. 中性点不接地系统

(1) 正常运行状态。中性点不接地系统正常运行时, 电力系统的三相导线之间及各相对地之间或沿导线全长都分布有电容, 这些电容在电压作用下将有附加的电容电流通过, 为了便于分析, 我们认为系统是对称的, 对地电容电流可用集中线路中的电容来代替, 线间电容电流很小, 可以忽略不计。

设电源三相电压分别为 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$, 各相对地电容相等且大小为 C , 对地电容电流也是对称的, 每相电容电流为 $\dot{I}_{C0} = \omega C U_P$, 三相电容电流相量和等于零, 中性点没有电流流过, 中性点的电位为零。

(2) 单相接地。当中性点不接地系统由于绝缘损坏发生单相接地时, 各相对地电压和电容电流的情况将发生明显变化。下面以 C 相金属性单相接地故障为例进行分析, 如图 1-7 所示。

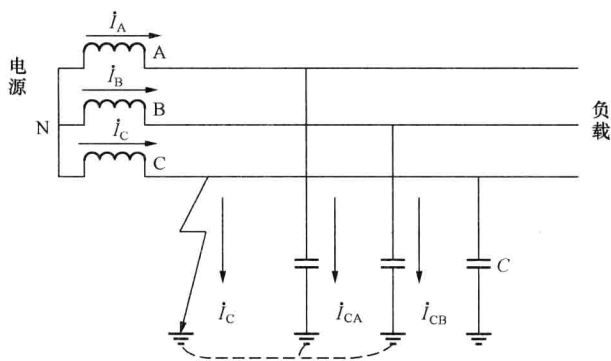


图 1-7 中性点不接地系统中发生单相接地故障

由图 1-7 可知, 此时 C 相对地电压为零, 中性点和非故障相对地电压也将发生大的变化, 即

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_A + \dot{U}_N = \dot{U}_A - \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{KB} = \dot{U}_B + \dot{U}_N = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

显然, 非故障相对地电压升高到相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 由相电压上升为线电压。所以, 这种系统中的供电设备的绝缘必须按线电压设计。

在中性点不接地三相系统中, 当出现单相接地时, 各相间的电压大小和相位没有变化, 电压的对称性没有破坏, 因此, 单相接地后, 还可以继续运行一段时间, 这种接地方式的供电可靠性较高。但是, 为了防止故障进一步发展, 一般运行时间不能超过 2h。

非故障相对地电压的升高, 会造成对地电容电流相应增大到原来的 $\sqrt{3}$ 倍, 因此经 C 相流入大地的电容电流不再是零, 而是

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

由图 1-8 所示的相量图可知, I_C

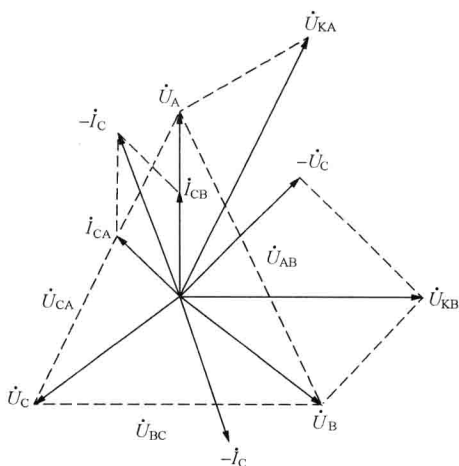


图 1-8 中性点不接地系统中发生单相接地故障后的相量图

在相位上正好超前 U_C 90° ；而在数值上，由于 $\dot{I}_C = \sqrt{3}\dot{I}_{CA}$ ，而 $\dot{I}_{CA} = \omega C \dot{U}_{KA} = 3\dot{I}_{C0}$ ，即单相接地时通过接地点的电容电流是正常运行的单相对地电容电流的 3 倍。

当系统某一相发生故障，而故障相通过一定的阻抗接地时，称为不完全接地。此时，接地相电压大于零而小于相电压，非故障相对地电压则大于相电压而小于线电压。接地电流也比完全接地时小。其具体的电压、电流值与故障相接地电阻值有关。

中性点不接地系统必须装设单相接地保护或绝缘监视装置，当系统发生单相接地故障时，发出报警信号或指示，以提醒运行值班人员注意，及时采取措施，查找和消除接地故障；如有备用线路，则可将重要负荷转移到备用线路上，当危及人身和设备安全时，单相接地保护应动作于跳闸。

2. 中性点经消弧线圈接地

中性点不接地系统的主要优点是发生单相接地时仍可继续向用户供电，但有一种情况相当危险，即在发生单相接地时，如果接地电流较大，将在接地点产生间歇性的电弧，这就可能使线路发生谐振过电压现象，引起弧光过电压，因此必须采用中性点经消弧线圈接地的措施来减小接地电流，熄灭电弧。

一般情况下，在中性点不接地系统中，当接地电流超过规定值时（3~10kV 系统接地电流大于或等于 30A 时、20~35kV 系统接地电流大于或等于 10A 时），通常采用中性点经消弧线圈接地的方式。



【问题讨论】消弧线圈在结构上有什么特点？

消弧线圈实际上是一种具有铁心的可调电感线圈，其电阻很小，感抗很大，其铁心柱有很多间隙，以避免磁饱和，使消弧线圈有一个稳定的电抗值。

消弧线圈装设在发电机或变压器的中性点，系统正常运行时，中性点电位为零，没有电流流过消弧线圈。当系统发生单相接地时，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° ，而 $\dot{I}_L$ 滞后 $\dot{U}_C$ 90° ，所以 $\dot{I}_C$ 与 $\dot{I}_L$ 在接地点互相补偿。如果消弧线圈电感选用合适，会使接地电流减到小于发生电弧的最小生弧电流时，电弧就不会发生，从而也就不会产生过电压。图 1-9 所示为相应的电路图。

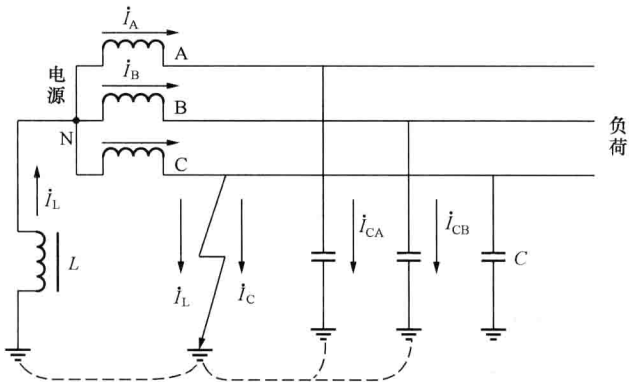


图 1-9 中性点经消弧线圈接地系统中发生单相接地故障

消弧线圈容量的计算公式为

$$W = 1.35 I_C \frac{U_N}{\sqrt{3}} (\text{kVA}) \quad (1-1)$$

式中 I_C ——接地电容电流，A；

U_N ——电网的额定电压，kV。

中性点经消弧线圈接地的系统发生单相接地故障时,与中性点不接地的系统中发生单相接地故障时一样,接地相对地电压为零,非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍。由于相间电压没有改变,因此三相设备仍可以照常运行。但也不能长期运行,必须装设单相接地保护或绝缘监视装置,在单相接地时给予报警信号或指示,运行值班人员应及时采取措施,查找和消除故障,如可能时将重要负荷转移到备用线路上。

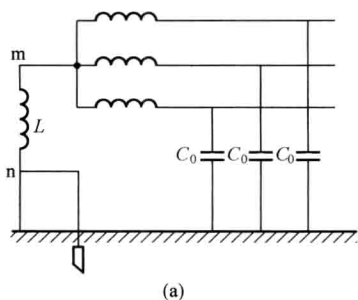
消弧线圈接地方式在技术上不仅拥有了中性点不接地系统的所有优点,而且还避免了单相故障可能发展为两相或多相故障、产生过电压损坏电气设备绝缘和烧毁电压互感器等危险。



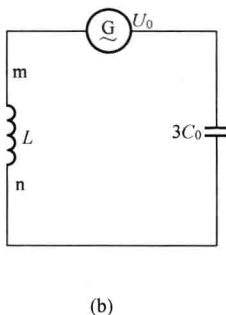
【问题讨论】 消弧线圈补偿多少感性电流合适呢?

根据消弧线圈的电感电流对接地电容电流补偿程度不同,有三种补偿方式。

(1) 全补偿 $I_L = I_C$, 接地点电流为零。从消弧观点来看,全补偿最好,但实际上并不采用这种补偿方式。因为在正常运行时, $I_L = I_C$ 意味着 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$, 如图 1-10 (a) 所示,对于正常运行的电网,若忽略电源及线路的感抗,且线路空载,从 mn 端向右看,利用戴维南定理可将其简化为图 1-10 (b) 所示电路,其中 C_0 是各相对地电容, U_0 是电源中性点对地电压。在理想情况下, $U_0 = 0$, 但实际上由于三相对地电容不完全相等或断路器三相触头闭合不同时或出现一相断路,会导致 $U_0 \neq 0$, 这正好是一个串联谐振电路,其结果可能导致消弧线圈或电容两端出现过电压,危及电网的绝缘。可见, I_L 和 I_C 差值为零,会形成谐振,导致过电压。



(a)



(b)

图 1-10 中性点经消弧线圈接地系统正常情况下的等值图

(a) 系统图; (b) 等值图

(2) 欠补偿 $I_L < I_C$, 接地点尚有未补偿的电容性电流。欠补偿方式也较少采用,原因是在检修、事故切除部分线路或系统频率降低等情况下,可能使系统接近或达到全补偿,以致出现串联谐振过电压。例如,当电网切除部分运行线路时,会导致 C_0 减小,导致 I_C 减小,从而可能形成 $I_L = I_C$, 使电网出现谐振。

(3) 过补偿 $I_L > I_C$, 接地点处尚有多余的电感性电流。过补偿可避免谐振过电压的产生,因此得到广泛应用。过补偿接地处的电感电流也不能超过规定值,否则电弧也不能可靠地熄灭。因此,消弧线圈设有分接头,用以调整线圈的匝数,改变电感值的大小,从而调节消弧线圈的补偿电流,以适应系统运行方式的变化,达到消弧的目的。

2.3 中性点运行方式的应用范围

小接地电流系统主要优点是供电可靠性高,无通信干扰问题,主要缺点是绝缘水平要求