

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 工厂供电技术

高 宇 孙成普 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 工厂供电技术

---

编著 高 宇 孙成普  
主审 张 莹



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

全书共分八章，主要内容包括电力系统概述，配电系统常用的电气设备，工厂电力负荷计算，短路电流计算，变配电所结构及电气设备选择，工厂供电网结构及导线选择，供配电系统的继电保护和供配电系统的防雷接地保护等内容。本书注重学生的职业能力培养，加入了先进技术应用方面知识。为方便学习，每章都有内容提要、小结、习题与思考题。

本书可作为高职高专院校及技师培训学院电力技术类各相关专业的专业课程教材，也可作为工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工厂供电技术/高宇，孙成普编著. —北京：中国电力出版社，2009

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8563 - 1

I. 工… II. ①高…②孙… III. 工厂-供电-高等学校：技术学校-教材 IV. TM727.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 031171 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http: //jc. cepp. com. cn](http://jc.cepp.com.cn))

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 321 千字

定价 21.20 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
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

# 高职高专电气自动化技术专业规划教材

## 编 委 会

主 任 吕景泉

副主任 狄建雄 凌艺春 谭有广 周乐挺 郁汉琪

秘书长 李兆春

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁学恭 马伯华 王 燕 王 薇 王永红

刘玉娟 刘玉梅 刘保录 孙成普 孙忠献

何 颖 何首贤 张 池 张永飞 张学亮

张跃东 李方园 陆锦军 陈 赵 姚永刚

姚庆文 郭 健 钱金法 常文平 韩 莉

# 前言

---

本书是根据国家电力高等职业教育教学的要求,结合现代供配电技术教学培养目标而编写。本书编写中注重职业技能培养,内容新颖,实践性和应用性强,既有理论分析又有例题验证,利于培养和训练学生分析问题和解决问题的能力,且便于自学。建议授课时数为80学时。授课内容可根据不同专业要求和教学进行取舍。

本书共分八章,主要内容包括电力系统概述,配电系统常用的电气设备,工厂电力负荷计算,短路电流计算;变配电所结构及电气设备选择;工厂供电网结构及导线选择,供配电系统的继电保护以及供配电系统的防雷接地保护等。

本书是编者结合长期的教学实践和总结多年来讲授本课程教学经验基础上编写的。在编写过程中,编者充分考虑现代供配电系统科学技术的发展和新知识应用,深入浅出地讲述了供配电系统每个环节内容,注重内容的精选。书中图文并茂,适时增加了先进技术的新内容,力求与现代供配电技术相结合,突出实用技术和实际应用问题。

本书第一、三、四、七章由沈阳职业技术学院高宇副教授编写,第二、五、六、八章由沈阳职业技术学院孙成普教授编写。全书由沈阳职业技术学院孙成普教授统稿。

本书由湖南铁道职业技术学院张莹主审。

由于编者业务水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年8月

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| <b>第一章 电力系统概述</b> .....              | 1  |
| 第一节 电力系统的基本知识 .....                  | 1  |
| 第二节 发电厂及电力系统简介 .....                 | 2  |
| 第三节 电力系统的额定电压和频率 .....               | 5  |
| 第四节 电力系统的中性点运行方式 .....               | 7  |
| 本章小结 .....                           | 13 |
| 习题与思考题 .....                         | 13 |
| <b>第二章 配电系统常用的电气设备</b> .....         | 14 |
| 第一节 开关电器 .....                       | 14 |
| 第二节 常用的高低压开关电器 .....                 | 15 |
| 第三节 互感器 .....                        | 27 |
| 第四节 电力变压器 .....                      | 35 |
| 本章小结 .....                           | 39 |
| 习题与思考题 .....                         | 39 |
| <b>第三章 工厂电力负荷计算</b> .....            | 40 |
| 第一节 工厂电力负荷及负荷曲线 .....                | 40 |
| 第二节 用电设备组计算负荷的确定 .....               | 44 |
| 第三节 工厂计算负荷的确定 .....                  | 50 |
| 第四节 供配电系统功率及电能损耗 .....               | 52 |
| 第五节 工厂功率因数及无功功率补偿 .....              | 55 |
| 本章小结 .....                           | 58 |
| 习题与思考题 .....                         | 58 |
| <b>第四章 短路电流计算</b> .....              | 59 |
| 第一节 短路的基本概念 .....                    | 59 |
| 第二节 无限大容量电力系统发生三相短路的物理过程及有关物理量 ..... | 61 |
| 第三节 三相短路电流计算的基本条件 .....              | 64 |
| 第四节 三相短路电流计算 .....                   | 66 |
| 第五节 三相短路电流的效应 .....                  | 79 |
| 本章小结 .....                           | 84 |
| 习题与思考题 .....                         | 84 |
| <b>第五章 变配电所结构及电气设备选择</b> .....       | 85 |
| 第一节 变配电所的基本知识 .....                  | 85 |
| 第二节 变配电所电气主接线 .....                  | 87 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第三节 变配电所的总体结构 .....           | 92  |
| 第四节 箱式变电所 .....               | 97  |
| 第五节 电气设备的选择及校验 .....          | 98  |
| 本章小结 .....                    | 109 |
| 习题与思考题 .....                  | 109 |
| <b>第六章 工厂供电网结构及导线选择</b> ..... | 110 |
| 第一节 工厂供配电网结构 .....            | 110 |
| 第二节 供配电网的基本接线方式 .....         | 113 |
| 第三节 电力电缆的结构与敷设 .....          | 118 |
| 第四节 导线及电缆截面的选择与校验 .....       | 121 |
| 第五节 母线的选择及校验 .....            | 130 |
| 本章小结 .....                    | 132 |
| 习题与思考题 .....                  | 133 |
| <b>第七章 供配电系统的继电保护</b> .....   | 134 |
| 第一节 继电保护装置的基本知识 .....         | 134 |
| 第二节 继电器结构原理及接线方式 .....        | 136 |
| 第三节 电力线路的继电保护 .....           | 147 |
| 第四节 电力变压器的保护 .....            | 157 |
| 本章小结 .....                    | 164 |
| 习题与思考题 .....                  | 164 |
| <b>第八章 供配电系统的防雷接地保护</b> ..... | 166 |
| 第一节 供配电系统接地基本知识 .....         | 166 |
| 第二节 电力线路的防雷保护 .....           | 170 |
| 第三节 变电所的防雷保护 .....            | 174 |
| 第四节 变电所的防雷保护设备 .....          | 178 |
| 本章小结 .....                    | 187 |
| 习题与思考题 .....                  | 188 |
| <b>附录</b> .....               | 189 |
| <b>参考文献</b> .....             | 204 |

# 第一章

## 电力系统概述

### 内 容 提 要

本章主要介绍工厂供电系统的基本知识。首先论述电力系统发电厂的类型,简介电能的生产过程、电力系统的基本概况及组成电力系统的意义;重点论述电力系统的中性点运行方式,工厂供电系统的 220/380V 电压等级的接地运行方式,电力系统的额定电压和频率标准等内容。

### 第一节 电力系统的基本知识

#### 一、电能的重要意义

电能广泛应用于国民经济的各个方面,成为现代化工农业生产、国防建设、交通运输及人民日常生活中不可缺少的动力源泉,是改进和提高生产率的技术基础。电能采用不同的电压等级,通过电力线路将电能输送到枢纽变电所,再用配电网将电能分配到各用户使用。电能可以转变为其他类型的能量,例如机械能、光能、热能和化学能等,可以用来实现生产过程机械化及自动化等。

我国电力工业的迅速发展已成为国家综合国力和现代化建设水平的重要标志。由此可见,搞好供电工作对工农业生产和人民生活的安定具有十分重要的意义。

#### 二、电力负荷的基本要求

发电厂在任何时刻生产的电能必须等于该时刻用户所消耗的电能,电力系统的功率是准确的,每时每刻都是平衡的。电能的生产、输送、分配和使用是在同一时刻完成的,且电能不能被储存。正是由于这一特点,电力系统各元件都是密切地相互联系、相互影响的。任何一个元件的故障都可能导致不同程度的供电中断。电能用户对输配电系统的要求是不间断供电,即供电要满足一定的可靠性。

为了保证连续可靠地供电,对供电可靠性要求不同的电能用户是有所区别的。为了便于区别对待各级用户,一般把电能用户按照用电单位的重要程度和对供电可靠性要求的高低,以及中断供电所造成的损失或影响程度不同,将用电负荷分为三级。

##### 1. 一级负荷

一级负荷是指中断供电将造成人身伤亡,或者中断供电将在政治、经济上造成重大损失的电力负荷。例如造成重大设备的损坏、产品报废,生产秩序长期不能恢复以及造成重点企业的连续生产过程被打乱需要长时间才能恢复的用户负荷。

一级负荷中断供电的后果将十分严重,因此要求对这类用户负荷使用两个独立电源供电,当工作电源发生故障停电检修时,由另一电源继续供电。

##### 2. 二级负荷

二级负荷是指中断供电将在政治、经济上造成较大损失的电力负荷。例如中断供电,仅

造成大量产品减产,大量产品报废,连续生产过程被打乱,需较长时间才能恢复供电,但不会危害人身和设备的安全等。二级负荷也属于重要负荷,宜采用双回路电源供电。

### 3. 三级负荷

三级负荷属于一般的电力负荷,中断供电将给用户造成不便,不会造成重大损失或损失不明显,因而对供电没有特殊的要求,可采用一个电源供电。

系统运行的可靠性和经济性都必须从整体上考虑,即局部服从整体。因此在系统运行时,应有一个机构来统一指挥供电工作,编制系统负荷分配计划,向用户经济合理地分配电能,这个机构称为调度所。调度所在系统正常工作时,规定和调度系统的负荷,检查负荷分配和检修完成情况,主持系统调频调压,进行计划检修工作前后的转接等;在系统发生故障时,负责排除故障,及时发出适当的操作命令。

## 第二节 发电厂及电力系统简介

### 一、发电厂

电能是由一次能源转变而成的二次能源。我国自然界蕴藏着丰富的一次能源资源,例如煤炭、石油、天然气、风能、太阳能及水能等自然能源,发电厂将这些自然能源转换为人们所需要的二次能源。

为了充分利用自然界蕴藏的各种资源,通常在一次能源资源丰富的地方建立发电厂,而发电厂往往距离电能用户很远。为保证供电可靠、经济合理,一般发电厂都将低电压电能升至高电压后,经输电线路送至电网的枢纽变电所,再直接或间接地经枢纽变电所将高电压逐级降为低电压,然后再分配给工矿企业或民用住宅区的降压变电所。采用这种供电方式,可以减少网络电能损耗,保证供应高质量的电能。

将一次能源转化为电能的工厂,称为发电厂。按发电厂利用能源的不同,可分为火力发电厂、水力发电厂(站)、热电厂、核能发电厂、风力发电厂、地热发电厂和太阳能发电厂等。目前,我国发电主要以火力发电和水力发电为主,正在朝着核能发电方向发展。

#### 1. 火力发电厂

利用煤、石油、天然气等燃料生产电能的发电厂,称为火力发电厂(简称火电厂),又称为火电站。火力发电厂由燃料分厂、锅炉分厂、汽轮机分厂、热工分厂、电气分厂和机修分厂等组成,如图1-1所示。

由于发电机的出口电压较低(为 $10.5\sim 26\text{kV}$ ),不能远距离输送,因此必须将发电机的出口电压经升压变压器升高电压后,再将电能输送到电力网并网运行。发电厂到电能用户送变电过程示意图如图1-2所示。

#### 2. 热电厂

热电厂的生产过程与火力发电厂的生产过程基本相同,除生产供给外界用户电能外,还供给外界用户热能(在热电厂中装有供热式机组)。热电厂与火力发电厂的区别就是火力发电厂采用凝汽式机组。

#### 3. 水力发电厂

将水流的位能转换成电能的发电厂,称为水力发电厂(简称水电厂),又称为水电站。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,冲打水轮机叶片,并带动发电机发电。

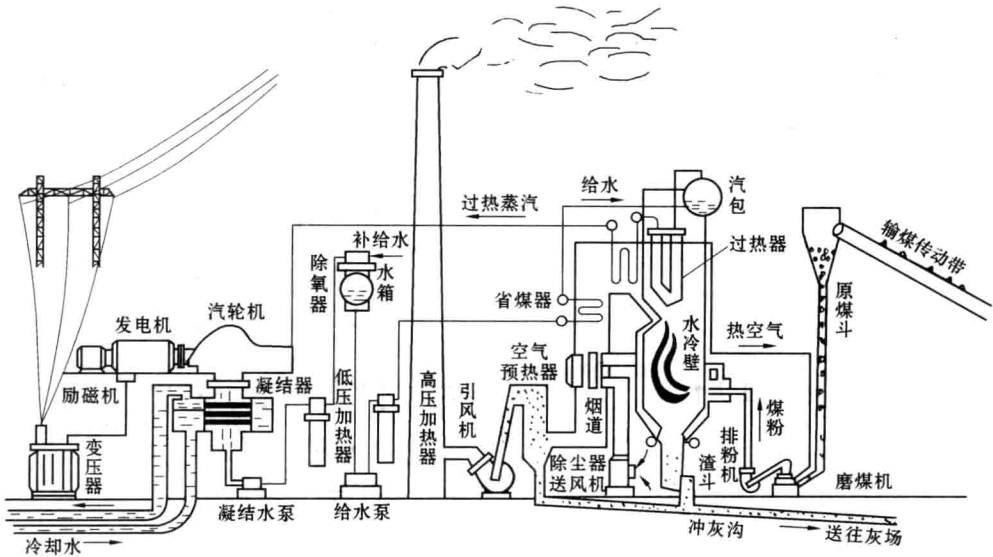


图 1-1 火力发电厂示意图

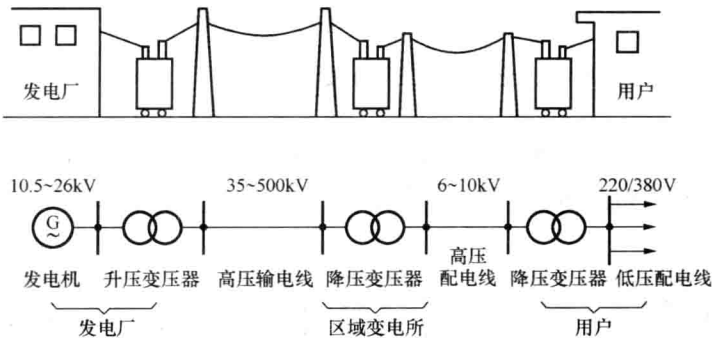


图 1-2 发电厂到电能用户送变电过程示意图

4. 核能发电厂

核能发电厂又称核电站，是利用原子核的裂变能来生产电能的发电工厂。核能发电原理与火力发电原理类似，其能量转化为核裂变能→(核反应堆) 热能→(汽轮机) 机械能→(发电机) 电能。

二、电力系统简介

(一) 电能的输送

1. 输电

由于发电厂规模大，多数发电厂又建在能源丰富的地方，因此不但发电效率高，运行可靠，而且电压和频率稳定。倘若生产的电能不能被附近的用户完全消耗，则需要把大量的电能送到离发电厂较远的地方去，这就是输电。

2. 交流三相输电制

现代的输电和配电主要采用交流三相制，这主要是由发电机和变压器所决定的。从输电线路结构来看，三相输电比单相输电复杂，但由于发电机和绝大多数电气设备是三相

的,所以与之配合的电力网也理应是三相的。采用高压输电可减少电能损耗,因此电能传输过程中,首先要用升压变压器将电压升高。然而用电设备使用的电压是很低的,所以用电时采用逐级降压的办法,将输送来的电能通过降压变电所再降低,用电压一级比一级低的电力网把电能层层分配给用户,完成电能分配的任务。城区供电网电能的输送和分配示意图如图 1-3 所示。

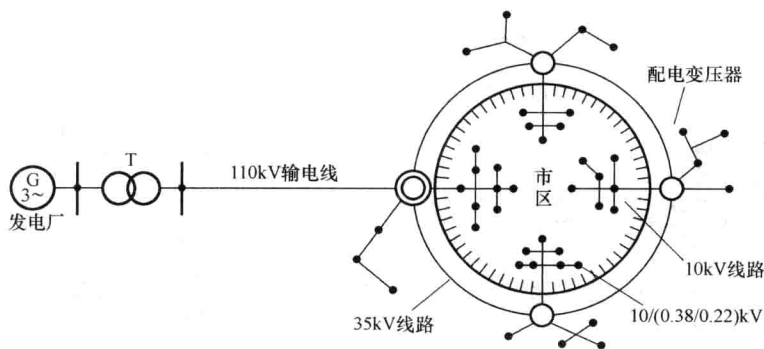


图 1-3 城区供电网电能的输送和分配示意图

◎—110/35kV 区域变电所; ○—35/10kV 地方变电所;

●—10/(0.38/0.22)kV 终端变电所

## (二) 动力系统、电力系统、电力网之间的关系

### 1. 动力系统

动力系统是指发电厂、输电线路、变电所、电能用户及热力网和热能用户所连接成的一个电能和热能生产与消费的系统。动力系统、电力系统、电力网之间的关系如图 1-4 所示。

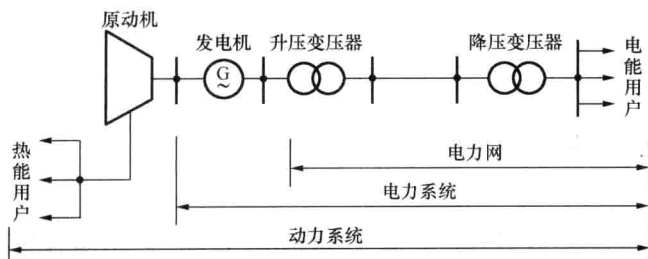


图 1-4 动力系统、电力系统、电力网之间的关系

### 2. 电力系统

由发电机、变电所、输电线路和电能用户连接起来的一个发电、输电、变电、配电和用电的系统,称为电力系统。电力系统与动力系统的区别,就在于电力系统不包括火力发电厂的热力部分和水力发电厂的水力机械部分。

### 3. 电力网

电力系统中各种不同电压等级的变电所及电力线路连接所组成的部分,即输电、变电、配电和用户的系统,称为电力网,简称电网。

习惯上,电力网或系统是按电压等级来划分的,如 10kV 电力网或 10kV 系统通常是指 10kV 的整个电力线路。

### 4. 电力系统与配电系统的区别

配电系统的概念与电力系统有所区别,配电系统是指地方工矿企业或大型民用住宅区等电能用户所需的电力电源。一般电能用户的电源进线电压为 6~10kV,低压用电设备使用的

电压为 220/380V。

(三) 组成电力系统的优点

- (1) 提高系统运行的稳定性；
- (2) 提高系统设备利用率；
- (3) 提高系统运行经济性；
- (4) 便于采用大容量机组；
- (5) 便于充分利用动力资源。

第三节 电力系统的额定电压和频率

一、电力系统的额定电压

综合考虑导线的能耗和投资两方面的因素，对应一定的输电条件，必有一个较合适的电压。考虑到电力设备生产的系列性，发电、输电、变电、配电、用电设备的额定电压不能是任意的数值，国家标准规定了电力网、用电设备、交流发电机以及电力变压器的额定线电压。电气设备的额定电压在我国已经统一标准化，分成了若干标准电压等级。三相交流电力网及用电设备的额定线电压如表 1-1 所示。

表 1-1 三相交流电力网及用电设备的额定线电压

| 电压等级 | 电力网及用电设备<br>(kV) | 交流发电机<br>(kV)                      | 电力变压器 (kV)                         |            |
|------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|
|      |                  |                                    | 一次绕组                               | 二次绕组       |
| 低 压  | 0.38             | 0.40                               | 0.38                               | 0.40       |
|      | 0.66             | 0.69                               | 0.66                               | 0.69       |
| 高 压  | 3                | 3.15                               | 3, 3.15                            | 3.15 及 3.3 |
|      | 6                | 6.3                                | 6, 6.3                             | 6.3 及 6.6  |
|      | 10               | 10.5                               | 10, 10.5                           | 10.5 及 11  |
|      | —                | 13.8, 15.75, 18,<br>20, 22, 24, 26 | 13.8, 15.75, 18,<br>20, 22, 24, 26 | —          |
|      | 35               |                                    | 35                                 | 38.5       |
|      | 66               |                                    | 66                                 | 72.6       |
|      | 110              |                                    | 110                                | 121        |
|      | 220              |                                    | 220                                | 242        |
|      | 330              |                                    | 330                                | 363        |
|      | 500              |                                    | 500                                | 550        |
|      | ±500 (直流)        |                                    | ±500 (直流)                          | ±550 (直流)  |
|      | 750              |                                    | 750                                | 825        |
|      | ±800 (直流)        |                                    | ±800 (直流)                          | 880        |
|      | 1000             |                                    | 1000                               | 1100       |

国家标准规定的电压称为额定电压。选择电力网的额定电压时，必须采用国家标准规定的额定电压。

1. 电力网的额定电压

电力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，经全面技术分析后确定的。电力网运行时，在线路中有电压降，因此线路各点的电压不相等，如图 1-5 所示。一般是首端电压高，末端电压低，既用电设备 M1~M3 的端电压是不同的，线路始端

的电压  $U_1$  比末端的电压  $U_2$  高一些。为了使所有用电设备的电压最接近于它的额定电压, 应该使电力网的平均电压等于用电设备的额定电压。这个电压就称为电力网的额定电压。

由于用电设备的允许电压偏移约为  $\pm 5\%$ , 所以电力网中的电压损耗约为  $\pm 10\%$ 。因此, 要求电力网首端的电压较额定电压高  $5\%$ 。

## 2. 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压应与同级电力网的额定电压相同, 如图 1-5 所示。

## 3. 发电机的额定电压

发电机一般连接于电力网的首端, 所以发电机的额定电压应高于同级电力网额定电压的  $5\%$ , 如图 1-5 所示。

## 4. 电力变压器额定电压

电力变压器具有发电机和用电设备的双重作用。变压器的一次绕组接受来自系统的电能, 相当于用电设备; 变压器的二次绕组输出电能, 相当于发电机发电。因此, 应按两种情况分析变压器的额定电压, 如图 1-6 所示。

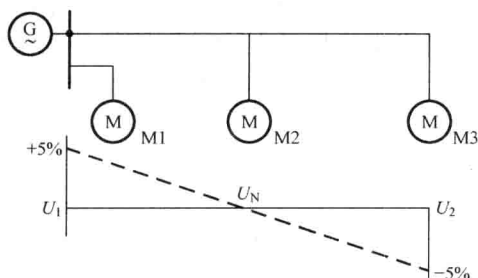


图 1-5 用电设备和发电机的额定电压

能, 相当于用电设备; 变压器的二次绕组输出电能, 相当于发电机发电。因此, 应按两种情况分析变压器的额定电压, 如图 1-6 所示。

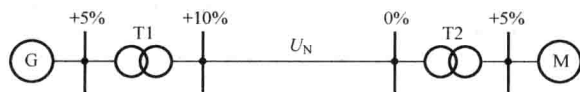


图 1-6 电力变压器的额定电压

直接与发电机相连接的升压变压器 T1, 其一次绕组的额定电压等于发电机的额定出口电压。变压器二次绕组输出的额定电压应高于同级电力网额定电压的  $10\%$ , 这是由于电力网首端的额定电压高于电力网末端额定电压的  $5\%$ , 而变压器二次绕组的额定电压是指空载时的电压。当变压器在额定负荷下运行时, 变压器内部大约有  $5\%$  的阻抗压降损耗。所以, 为了保证变压器在正常工作时二次绕组输出额定电压的数值, 规定直接与发电机相连接的变压器二次绕组的额定电压应高于同级电力网额定电压的  $10\%$ 。

不直接与发电机相连接的变压器 T2, 其一次绕组直接与电力网连接, 相当于电力网的用电设备接受电能, 其一次绕组的额定电压应等于同级电力网的额定电压。变压器二次绕组是输出电能的, 相当于发电机发电。变压器二次绕组输出的额定电压应该分为两种情况: 一种情况是采用高电压继续远距离输电, 应高于同级电力网额定电压的  $10\%$ ; 另一种情况是近距离输电或直接接在低压用电设备上, 则应高于同级电力网额定电压的  $5\%$ 。

## 二、电力系统的频率

三相交流电频率是电能生产的一项重要指标, 是电力系统统一规定的标准参数。频率的变化对电力系统运行的稳定性影响很大。为了保证电力系统正常工作, 要求系统频率保持恒定不变。按电力行业标准规定, 频率偏差不得超过  $\pm 0.5\text{Hz}$ ; 对大容量的电力系统, 频率偏差不得超过  $\pm 0.2\text{Hz}$ 。频率调整主要依靠发电厂的发电机。

我国工业用三相交流电标准频率是  $50\text{Hz}$ , 有的国家采用  $60\text{Hz}$  等。 $50\text{Hz}$  频率在工业用电上广泛使用, 所以称之为工业频率, 简称工频  $50\text{Hz}$ 。

## 第四节 电力系统的中性点运行方式

电力系统的中性点是指三相系统作星形连接的发电机或电力变压器的中性点。发电机的三相绕组通常都是接成星形的，变压器的高压绕组也往往采用星形的接线方式。如图 1-7 所示，发电机和变压器接成星形三相绕组的接点 N，称为电力系统的中性点。由于发电机和变压器是电力系统的主要设备，所以发电机或变压器的中性点为电力系统的中性点。

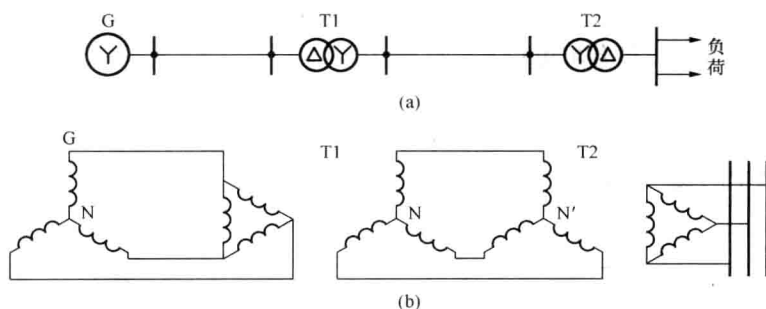


图 1-7 电力系统的中性点示意图

(a) 电路图；(b) 三线图

电力系统中性点的运行方式分为中性点不接地运行方式、中性点经消弧线圈接地运行方式和中性点直接接地运行方式三种。中性点的运行方式选择正确与否，对保证电力系统的安全运行有着很重要的意义。

### 一、中性点不接地系统

#### 1. 系统正常工作时

中性点不接地系统的正常运行状态示意图和相量图如图 1-8 所示。

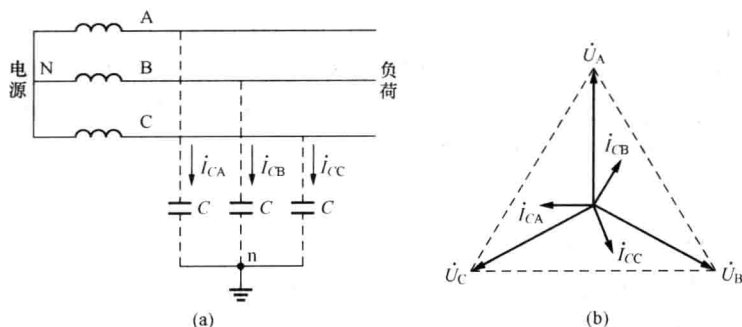


图 1-8 中性点不接地系统正常运行状态的示意图和相量图

(a) 电路示意图；(b) 相量图

在对称三相系统中，由于任何两个互相绝缘导体之间都存在着一定的电容，因此，三相导线之间和各相导线对地之间，沿线路全长都均匀地分布着电容。在线路电压的作用下将有附加电容电流流过。各相对地分布电容  $C$  是相等的。为简便起见，三相对地电容可用集中

于线路中部的电容  $C$  代替。

中性点不接地系统正常运行时,各相的对地电压  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  是对称的,各相对地电容  $C_A=C_B=C_C=C$ ,三相对地电容电流  $I_{CA}$ 、 $I_{CB}$ 、 $I_{CC}$  也是平衡的,有效值  $I_{CA}=I_{CB}=I_{CC}=U_x\omega C$ ,因此三相电容电流相量之和为零,没有电流在地中流过。

各相对地电压为相电压,且三相电压对称,所以各相电容电流也对称,并分别超前相电压  $90^\circ$ ,如图 1-8 (b) 所示。此时流经大地的电流为零,即

$$I_{CA} + I_{CB} + I_{CC} = 0 \quad (1-1)$$

由电工学可知,当电源和负荷都完全对称时,电源的中性点  $N$  和负荷的中性点之间就没有电位差,如图 1-8 (a) 所示。所以  $N$  点也是地电位。也就是说,中性点不接地系统正常运行时,系统的中性点具有地电位。

## 2. 系统发生单相接地故障

在中性点不接地系统中,发生单相接地故障并不破坏相负荷的正常供电。下面以  $C$  相接地为例说明这个问题,如图 1-9 (a) 所示。

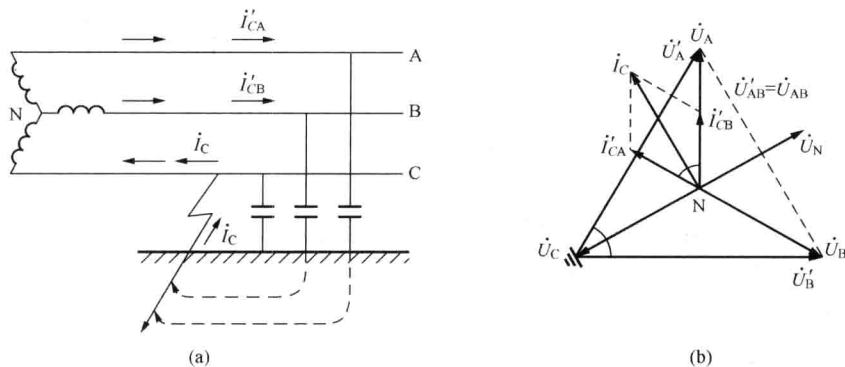


图 1-9 中性点不接地系统  $C$  相接地的情况

(a) 电路图; (b) 相量图

$C$  相接地,相当于  $C$  相对地电容  $C_C$  被短路,而当作负荷看待的三个电容就不再是对称的,此时中性点和大地电位也就不再相同,即中性点  $N$  和大地之间不再是等电位,称此现象为中性点发生了电位移。如图 1-9 (b) 所示,此时  $C$  相导线的对地电压为零,中性点对地电压  $U_0$  等于  $C$  相电压,但方向相反,即

$$U_0 = -U_C \quad (1-2)$$

式中  $U_0$ ——中性点  $N$  对地电压,  $kV$ 。

由式 (1-3) 可见,中性点  $N$  对地电压不再为零,而是一  $U_C$ 。也就是说,中性点对地电压的绝对值相当于相电压的数值。同理,可以求出  $A$  相和  $B$  相的对地电压。设各相对地电压为  $\dot{U}'_A$ 、 $\dot{U}'_B$ 、 $\dot{U}'_C$ ,利用  $A_{Nd}$  支路的电压方程

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{AC} \quad (1-3)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC} \quad (1-4)$$

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

对上式分析表明：在中性点不接地系统中，发生单相接地故障时，故障相相对地的电压为零。由图 1-9 (b) 相量图可知，A、B 两相的对地电压  $\dot{U}'_A$ 、 $\dot{U}'_B$  之间的相位角为  $60^\circ$ ，有效值  $\dot{U}'_A = \dot{U}'_B = \sqrt{3}U_A$ ，此时故障相的对地电压较正常运行时升高  $\sqrt{3}$  倍，即升高到线电压的数值。而三相线电压数值并未受到影响，其量值不变，仍保持  $120^\circ$  相位差。因此在这种系统中各种电气设备的绝缘都是按线电压考虑的，既不破坏用电设备的正常运行，又不危害设备的绝缘，所以不要求立即切除故障线路，而允许在带故障条件下继续运行 2h。若是永久性故障即可切断电源，停电检修。

### 3. 系统发生单相接地时的电流

系统发生接地时的电流，即为电容电流  $I_C$ ，较正常运行时电容电流增加  $\sqrt{3}$  倍， $I_C$  为 A、B 两相对地电容电流之和，即  $I_C = I'_{CA} + I'_{CB} = \sqrt{3}I_{CC}$ 。由于习惯将从电源到负荷的方向取为电流的正方向，因此得

$$I_C = -(I'_{CA} + I'_{CB}) \quad (1-5)$$

由图 1-9 (b) 的相量图可知， $\dot{I}_C$  在相位上正好超前  $\dot{U}_C 90^\circ$ ，而在量值上，由于  $I_C = \sqrt{3}I'_{CA}$ ， $I'_{CA} = \sqrt{3}I_{CC}$ ，因此有

$$I_C = 3I_{CC} \quad (1-6)$$

式中  $I_C$ ——系统单相接地点的接地电容电流，A；

$I_{CC}$ ——三相对地电容电流，A。

单相接地的电容电流与相电压、频率及相对地间的电容有关，而电容与电力网结构及长度有关。由于线路对地的电容  $C$  不能准确确定，因此， $I_{CC}$  和  $I_C$  也不能根据电容  $C$  来精确计算。通常在计算中采用经验公式，即

$$I_C = \frac{U_N(L_{oh} + 35L_{cab})}{350} \quad (1-7)$$

式中  $U_N$ ——线路额定线电压，kV；

$L_{oh}$ ——架空线路长度，km；

$L_{cab}$ ——电缆线路长度，km。

由式 (1-7) 可知，在中性点不接地系统中单相接地电容电流的大小与线路长度和电压成正比，线路越长，电压越高，接地电容电流就越大。

### 二、中性点经消弧线圈接地系统

在中性点不接地的电力系统中，接地电容电流过大，瞬时接地故障就不能自动消除，若接地电容电流较大，将在接地点产生断续电弧，这就可能使线路发生电压谐振现象。接地电容电流之所以产生，是因为在线路发生单相弧光接地时，可形成一个  $RLC$  的串联谐振电路，从而使线路上出现危险的过电压，可能导致线路上绝缘薄弱点被击穿。因此，在单相接地电容电流  $I_C$  大于一定数值时 ( $3 \sim 10$  kV 系统  $I_C \geq 30$  A，20 kV 及以上系统  $I_C \geq 10$  A 时)，电力系统中性点就应改为经消弧线圈接地的运行方式。

如果能在线路上加进一些元件，其电流的性质正好和电容  $C$  中电流方向相反，就能减少甚至完全抵消接地电容电流。中性点经消弧线圈接地系统电路图如图 1-10 所示。

图 1-10 中  $L$  为消弧线圈电感。消弧线圈实际上就是一种带有铁心的电感线圈，其电阻

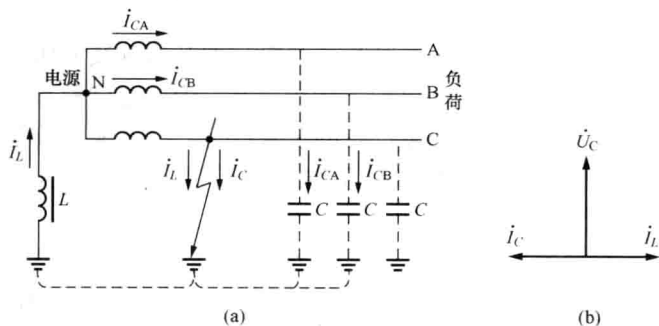


图 1-10 中性点经消弧线圈接地系统电路图

(a) 电路图; (b) 相量图

很小，感抗很大，可以调节。消弧线圈的作用就在于在接地点造成一个与原接地电容电流大小接近相等、方向相反的电感电流，它与电容电流相互补偿，使接地点的总电流变得很小，甚至接近于零，从而使瞬时接地故障能自动消除。这种带有消弧线圈的接地方式称为中性点经消弧线圈接地方式。

由于  $i_C$  比  $\dot{U}_C$  超前  $90^\circ$ ， $i_L$

比  $\dot{U}_C$  滞后  $90^\circ$ ，因此  $i_L$  与  $i_C$  在

接地点相互补偿。如要接地点的电流补偿到小于最小生弧电流时，就不会产生电弧，也就不会出现电压谐振现象了。

中性点经消弧线圈接地系统在发生单相接地故障时，与中性点不接地系统的相同，即三线的电压不变，因此，可允许暂时继续运行 2h，但要发出指示信号，以便采取措施，查找故障原因和消除故障，或将故障线路的负荷转移到备用线路上。而且这种系统，在一相接地时，另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。

### 三、中性点直接接地系统

把电力系统的中性点直接和大地连接起来的运行方式，称为中性点直接接地方式，如图 1-11 所示。

中性点直接接地系统发生单相短路接地时，其单相短路电流比线路的正常负荷电流要大得多，所以瞬时接地不能自动消除，只能立即把故障线路切除。在这种系统中没有因为间歇电弧不能消除而产生的过电压问题，但是只要发生单相短路接地故障就必须切除故障，而在中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统中是可以避免的。为了弥补这一缺点，在中性点直接接地系统中，广泛采用自动重合闸装置。

自动重合闸装置就是装在开关上的自动合闸机构，必须与继电保护装置控制的跳闸机构相配合。当发生单相接地故障时，继电保护动作迅速将开关断开，把故障线路切除，开关断开后自动重合闸机构随后动作，并使开关重新合上。由于这一过程所用时间很短，在重合闸成功后并不影响用户用电。

运行经验表明在单相接地故障中，永久性接地故障很少，绝大多数是瞬时性接地故障。在开关打开的瞬间，瞬时性接地故障能自动消除，例如雷击、闪络、鸟害都属这类情况。如果是永久性接地故障，重合闸后继电保护继续动作，再将开关断开不再做第二次重合，待检修人员排除故障后再送电。

通常发生单相永久性接地故障要使线路上的断路器自动跳闸或者使熔断器熔断，将线路

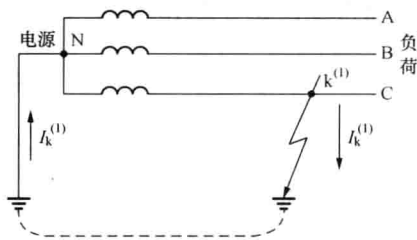


图 1-11 中性点直接接地系统电路图