

中小型水电站运行与管理 技术丛书

# 中小型水电站

# 电气设备

毛慧和 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

中小型水电厂运行与管理技术丛书

# 中小型水电站 电气设备

---

毛慧和 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内容提要

本书是《中小型水电站运行与管理技术丛书》的第三分册。书中详细介绍了中小型水轮发电机、变压器、高压开关电器、主接线及厂用电接线、直流系统、继电保护以及自动装置的原理、结构、特性、运行、维护等。

本书适合从事中小型水电站电气设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读，或作为电厂生产人员的培训教材，也可供有关专业人员以及高等院校相关专业师生参考。



### 图书在版编目 (CIP) 数据

中小型水电站电气设备/毛慧和主编. —北京:  
中国电力出版社, 2006

(中小型水电站运行与管理技术丛书)

ISBN 7-5083-4477-4

I. 中... II. 毛... III. 水力发电站-电  
气设备 IV. TV734

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 071562 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 11 月第一版 2006 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 331 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

中小型水电站运行与管理技术丛书

## 编 委 会

主 任：余卫国

副主任：谭少华 蔡维由 王贞伟 刘克兴

委 员：(以姓氏笔划为序)

王贞伟 毛慧和 付国锋 江小兵 刘克兴

刘金生 刘国刚 刘柄文 陈启卷 陈 涛

李学超 肖志怀 肖惠民 余卫国 张天明

张成平 罗仁彩 姬巧玲 职小前 程远楚

谭少华 蔡天富 蔡维由



## 前 言

随着能源需求的持续增长,中小型水电站的建设在我国越来越受到重视。为满足广大中小型水电站电气设备各从业人员的需要,特编写了本书,该书同时也可供大中专院校相关专业学生参考使用。

本书坚持理论与实际相结合的原则,相关实际部分取材于现场经验,以帮助解决实际问题。本书较系统地介绍了中小型水电站电气设备的运行、维护及故障处理方法。

全书共分八章,首先简要地介绍了电力系统的基本概念、额定电压等级和中性点运行方式,然后系统地介绍了水轮发电机的基本结构和各种运行方式、水轮发电机的运行监视和维护以及常见故障及处理方式。第三章介绍了变压器的基本原理、额定参数、基本结构及主要附件,并着重介绍了变压器的检查、试验及运行维护和变压器的故障诊断方法。高压电器部分则主要介绍了高压断路器、互感器和隔离开关三部分。第五、六两章介绍了中小型水电站的电气接线和直流系统。第七章介绍了中小型水电站的继电保护问题,第八章介绍了中小型水电站的自动并列装置、自动电压调节器、综合重合闸装置以及厂用电快切装置。

本书由武汉大学蔡维由教授主审,在审阅过程中提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2005年10月



# 目 录

## 前言

<b>第一章 电力系统概述</b> .....	1
第一节 电力系统的基本概念 .....	1
第二节 电力系统的额定电压 .....	3
第三节 电力系统的中性点运行方式 .....	5
<b>第二章 水轮发电机的运行及维护</b> .....	14
第一节 水轮发电机的结构特点及性能 .....	14
第二节 水轮发电机的运行 .....	19
第三节 水轮发电机的运行特性 .....	28
第四节 水轮发电机的特殊运行 .....	36
第五节 水轮发电机的运行监视与维护 .....	43
第六节 水轮发电机运行中常见故障及处理 .....	47
<b>第三章 变压器及其运行</b> .....	54
第一节 变压器的基本原理 .....	54
第二节 变压器型号及其技术数据 .....	55
第三节 变压器的结构 .....	58
第四节 分裂绕组变压器 .....	68
第五节 变压器的主要附件 .....	70
第六节 变压器的检查、试验及运行维护 .....	74
第七节 变压器的故障及诊断 .....	84
<b>第四章 高压电器设备</b> .....	98
第一节 高压断路器 .....	98
第二节 互感器 .....	112
第三节 隔离开关 .....	119
<b>第五章 电气主接线</b> .....	123
第一节 电气主接线概述 .....	123

第二节	单元及扩大单元接线 .....	124
第三节	有主母线的接线 .....	126
第四节	桥形和环形接线 .....	129
第五节	特殊变压器在水电站接线中的应用 .....	131
第六节	水电站的自用电及其接线 .....	132
<b>第六章</b>	<b>中小型水电厂直流系统 .....</b>	<b>137</b>
第一节	概述 .....	137
第二节	蓄电池的基础知识 .....	138
第三节	直流系统及其接线 .....	146
第四节	直流系统的异常运行及事故处理 .....	150
<b>第七章</b>	<b>继电保护装置 .....</b>	<b>153</b>
第一节	继电保护基本知识及构成 .....	153
第二节	输电线路保护 .....	157
第三节	水轮发电机保护 .....	165
第四节	电力变压器保护 .....	178
第五节	发电机-变压器组保护特点 .....	186
<b>第八章</b>	<b>中小型水电厂自动装置 .....</b>	<b>189</b>
第一节	同步发电机的自动并列装置 .....	189
第二节	数字式自动电压调节器 .....	194
第三节	综合重合闸 .....	197
第四节	厂用电切换装置 .....	203
参考文献	.....	211

## 第一章

中小型水电站运行与管理技术丛书  
中小型水电站电气设备

## 电力系统概述

## 第一节 电力系统的基本概念

## 一、电力系统与电力网

电力工业发展初期,电能是直接为用户附近的发电站(或称发电厂)中生产的,各发电站孤立运行。随着工农业生产和城市的发展,电能的需要量迅速增加,而热能资源(如煤田)和水能资源丰富的地区又往往远离用电比较集中的城市和工业区。为了解决这个矛盾,就需要在动力资源丰富的地区建立大型发电站,然后将电能远距离输送给电力用户。同时,为了提高供电可靠性以及资源利用的综合经济性,又把许多分散的各种形式的发电站,通过送电线路和变电所联系起来。这种由发电机、升压和降压变电所、送电线路以及用电设备有机连接起来的整体,即称为电力系统。

电力系统加上发电机的原动机(如汽轮机、水轮机)、原动机的力能部分(如热力锅炉、水库、原子能电站的反应堆)、供热和用热设备,则称为动力系统。

在电力系统中,由升压、降压变电所和各种不同电压等级的送电线路连接在一起的部分称为电力网。

## 二、电力系统的效益

电力系统在技术和经济上都可以收到很大的效益,主要有:

## 1. 减少系统中的总装机容量

由电力系统供电的各用户的最大负荷并不是同时出现的,因此,系统中综合最大负荷总是小于各用户最大负荷的总和。由于系统综合最大负荷的降低,也就可以相应地减少系统的总装机容量。

为了保证对用户可靠地供电,无论是孤立电站还是电力系统,都需要检修和事故备用容量,在孤立电站中,备用容量不应小于电站最大机组容量(可能达到电站总容量的30%~40%)。而在电力系统中,所有发电站连接在一起并列运行,备用容量只需系统总容量的20%,其中:负荷备用2%~5%,事故备用10%左右,检修备用8%左右。显然,此时电力系统的备用容量比各孤立电站备用容量的总和为少,即总装机容量又可以减少。

## 2. 可以装设大容量机组

组成电力系统后,由于总负荷的增大,因此可以装设大容量机组。大容量机组效率高,每千瓦投资以及维护费用都比多台小机组经济得多。但是,电力系统中所采用的最大机组容量,以不超过总装机容量的15%~20%为宜。



### 3. 能够充分利用动力资源

建成电力系统后, 就可以将发电站建造在动力资源产地, 如在煤矿附近建立巨型坑口电站, 在水能资源集中的地方建立大型水力发电站等。同时, 有些形式的电站, 如热电站、水电站、风力电站、原子能电站等, 如果不与系统并列, 就很难保证持续正常供电以及发挥其最佳经济效益。例如, 热电站的抽汽机组的出力是由热负荷确定的, 而热负荷与电负荷的需要往往不能互相配合。一般在夏季丰水期, 水量多而用电量较少; 冬季枯水期, 水量少而用电量反而多, 因此, 就可能出现由于水库调节库容不够而弃水, 或对电力负荷不能保证供应的情况。如果把水电站连接在电力系统中, 由于有火电站和其他形式电站的互相配合和调节, 水能资源就能得到充分利用, 供电也能得到保证。

### 4. 提高供电可靠性

在电力系统中, 由于是多电源联合供电, 机组的台数较多, 即使个别机组或电源发生故障, 其他机组或电源仍可以在出力允许的情况下多带负荷, 因此可以提高供电可靠性。

### 5. 提高电能质量

电能质量用频率和电压来衡量, 其数值应根据规程要求保持在一定的允许变动范围内。由于电力系统容量大, 因而负荷波动时所引起的频率和电压波动就会减小, 电能质量可以提高。

### 6. 提高运行的经济性

建立电力系统后, 除了充分利用动力资源可以提高运行的经济性外, 在系统中还可以经济合理地分配各发电站或各机组的负荷, 使运行经济、效率高的机组多带负荷, 效率低、发电成本高的机组少带负荷, 从而降低生产电能的成本。

## 三、电力系统的特点

电能的生产与其他工业生产有着显然不同的特点。

### 1. 电能不能大量储藏

电力系统中发电站负荷的多少, 决定于用户的需要, 电能的生产 and 消费时时刻刻都是保持平衡的。电能的生产、分配和消费过程的同时性, 使电力系统的各个环节形成了一个紧密的有机联系的整体, 其中任一发、供、用电设备发生故障, 都将影响电能的生产 and 供应。

### 2. 电力系统的电磁变化过程非常迅速

电力系统中, 电磁波的变化过程只有千分之几秒, 甚至百万分之几秒; 而短路过程、发电机运行稳定性的丧失则在十分之几秒或几秒内即可形成。为了防止某些短暂的过渡过程对系统运行和电气设备造成危害, 要求能进行非常迅速和灵敏的调整及切换操作。这些调整和切换, 靠手动操作不能获得满意的效果, 甚至是不可能的, 因此必须采用各种自动装置。

### 3. 电力工业和国民经济各部门之间有着极其密切的关系

电能供应不足或中断, 将直接影响国民经济各个部门的生产, 也将影响人们的正常生活, 因此要求电力工业必须保证安全生产和成为国民经济中的先行工业, 必须有足够的负荷后备容量, 以满足日益增长的负荷需要。

## 四、电力系统运行的基本要求

根据以上电能生产的特点, 电力系统的运行必须满足下列基本要求。

### 1. 保证对用户供电的可靠性

在任何情况下都应该尽可能的保证电力系统运行的可靠性。系统运行可靠性的破坏, 将

引起系统设备损坏或供电中断,以致造成国民经济各部门生产停顿和人民生活秩序的破坏,甚至发生设备和人身事故。

电力用户对供电可靠性的要求并不一样,即使一个企业中各个部门或车间,对供电持续性的要求也有所差别。根据对供电持续性的要求,可把用户分为三级。

一级负荷:如停止供电,将会危害生命、损坏设备、产生废品或使生产过程混乱,给国民经济带来重大损失,或者使市政生活发生重大混乱。

二级负荷:如停止供电,将造成大量减产,城市大量居民的正常活动受到影响。

三级负荷:指所有不属于一级及二级的负荷,如非连续生产的车间及辅助车间和小城镇用电等。

对于一级负荷,至少要由两个独立电源供电,其中每一电源的容量,都应在另一电源发生故障时仍能完全保证一级负荷的用电;对于三级负荷,不需要备用电源;对于二级负荷是否需要备用电源,要进行技术经济比较后才能确定。

### 2. 保证电能的良好质量

保证电能的良好质量即要求供电电压(或电流)的波形为较严格的正弦波,保证系统中的频率和电压在一定的允许变动范围以内。我国规程规定:10~35kV及以上电压供电的用户和对电压质量有特殊要求的低压用户电压允许偏移为 $\pm 5\%$ ,频率允许偏移为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

### 3. 保证运行的最大经济性

电力系统运行有三个主要经济指标,即生产每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电的能源消耗(煤耗率、油耗率、水耗率等),生产每度电的自用电(自用电率),以及供配每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电在电力网中的电能损耗(线损率)。提高运行经济性,就是在生产和供配某一定数量的电能时,使上述三个指标达到最小。为了实现电力系统的经济运行,必须对整个系统实施最佳经济调度。

## 第二节 电力系统的额定电压

### 一、额定电压等级

为了便于电器制造业的生产标准化和系列化,国家规定了标准电压等级系列。在设计时,应选择最合适的额定电压等级。所谓额定电压,就是某一受电器(电动机、电灯等)、发电机和变压器等在正常运行时具有最大经济效益的电压。

我国规定了电力设备的统一电压等级标准,见表1-1。

电力网中各点的电压是不同的,其变化情况如图1-1所示。

设供电给电力网的发电机G是在电压 $U_1$ 下运行的,由于线路中有电压降落,对于由发电机直接配电的部分,线路始端电压 $U_1$ 大于末端电压 $U_2$ 。为便于讨论,设直线 $U_1$ 、

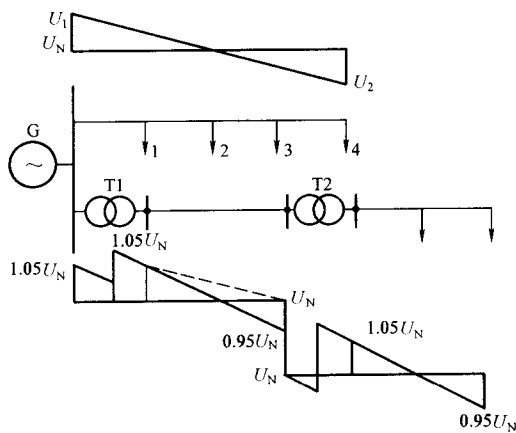


图1-1 电力网中电压的变化

$U_2$  (实际应为折线) 代表电压的变化规律, 受电器 1~4 将受到不同的电压。而受电器是按标准化生产的, 不可能按照图示各点的不同电压来制造电器, 而且电力网中各点的电压, 也并不是恒定的。为了使所有受电器的实际端电压与它的额定电压之差最小, 显然应该采取一个中间值, 即取  $U_N = (U_1 + U_2)/2$  来作为受电器的额定电压。该电压也就规定为电力网的额定电压。

表 1-1

交流额定电压等级 (线电压)

kV

受 电 器	发 电 机	变 压 器		受 电 器	发 电 机	变 压 器	
		一次绕组	二次绕组			一次绕组	二次绕组
0.22	0.23	0.22	0.23	35	—	35	38.5
0.38	0.40	0.38	0.40	(60)	—	(60)	(66)
3	3.15	3 及 3.5	3.15 及 3.3	110	—	110	121
6	6.3	6 及 6.5	6.3 及 6.6	(154)	—	(154)	(169)
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11	220	—	220	242
—	13.8	13.8	—	330	—	330	363
—	15.75	15.75	—	500	—	500	525

- 注 1. 在技术经济比较中, 证明有显著的优越性时, 允许水轮发电机的额定电压采用非标准电压。  
 2. 对于 330kV 以上的超高压等级, 我国尚未作出正式规定, 但在有关领导部门的指示文件中, 已明确采用 500kV 和 750kV。  
 3. 变压器一次绕组栏内 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75kV 电压, 适用于发电机出线段 (或母线) 的升压及降压变压器。  
 4. 变压器二次绕组栏内 3.3、6.6、11kV 电压, 适用于阻抗压降为 7.5% 及以上的降压变压器。

如果认为用电设备一般允许电压偏移  $\pm 5\%$ , 而沿线的电压降一般为 10%, 这就要求线路始端电压为额定值的 105%, 以使其末端电压不低于额定值的 95%。发电机接于线路始端, 因此, 发电机的额定电压取为电力网额定电压 105%。

## 二、变压器额定电压的确定

接到电力网始端即发电机电压母线的变压器 (如图 1-1 中的 T1), 由于发电机电压一般比电力网额定电压高 5%, 且发电机至该变压器间的连线压降较小, 为使变压器一次绕组电压与发电机额定电压相配合, 可以采用高出电力网额定电压 5% 的电压作为该变压器一次绕组的额定电压。接到电力网受端的变压器 (如图 1-1 中的 T2), 其一次绕组可以当做受电器看待, 因而其额定电压取与受电器的额定电压即电力网额定电压相等。

由于变压器二次绕组的额定电压, 是指变压器空载情况下的额定电压。当变压器带负载运行时其一、二次绕组均有电压降, 二次绕组的端电压将低于其额定电压, 如按变压器满载时一、二次绕组压降为 5% 考虑, 为使满载时二次绕组端电压仍高出电力网额定电压 5%, 则必须选择变压器二次绕组 (如图 1-1 中的 T1、T2) 的额定电压比电力网额定电压高出 10%。

当电力网受电端变压器供电的线路很短时, 如排灌站专用变压器, 其线路压降很小, 也可采用高出电力网额定电压的 5% (如: 3.15kV, 6.3kV, 10.5kV), 作为该变压器二次绕组的额定电压。

由于电力网中各点电压是不同的, 而且随着负荷及运行方式的变化, 电力网各点的电压

也要变化。为了保证电力网各点的电压在各种情况下均符合要求, 变压器均有用以改变变压比的若干分接头的绕组(一般为高、中压绕组), 适当地选择变压器的分接头, 可调整变压器的出口电压, 使用电设备处的电压能够接近它的额定值。无激磁调压变压器高压(或中压)绕组的分接头为  $U_N \pm 5\%$  或  $U_N \pm 2 \times 2.5\%$ 。有载调压变压器高压绕组的分接头为  $U_N \pm 3 \times 2.5\%$  或  $U_N \pm 4 \times 2\%$ 。

### 第三节 电力系统的中性点运行方式

电力系统的中性点(实际上是指电力系统中发电机、变压器的中性点)接地或不接地是一个综合性的问题, 中性点接地方式对于电力系统的运行, 特别是对发生故障后的系统运行, 有多方面的影响, 所以在选择中性点接地方式时, 必须考虑许多因素。

电力系统中性点接地方式有两大类: 一类是中性点直接接地或经过低阻抗接地, 称为大接地电流系统; 另一类是中性点不接地、经过消弧线圈或高阻抗接地, 称为小接地电流系统。其中采用最广泛的是中性点不接地、中性点经过消弧线圈接地和中性点直接接地等三种方式。

#### 一、中性点不接地系统

电力系统的每一相对地都有电容, 它们分布在输电线路全长上和电气设备中, 为了使讨论简化, 设三相系统是完全对称的, 并将分布的相对地电容用集中在线路中央的电容  $C$  来代替, 如图 1-2 所示。因为在中性点不接地系统中发生一相接地时, 电力系统相间电压并不改变, 因而相间电容所引起的电容电流也不会改变, 所以可以不予讨论。

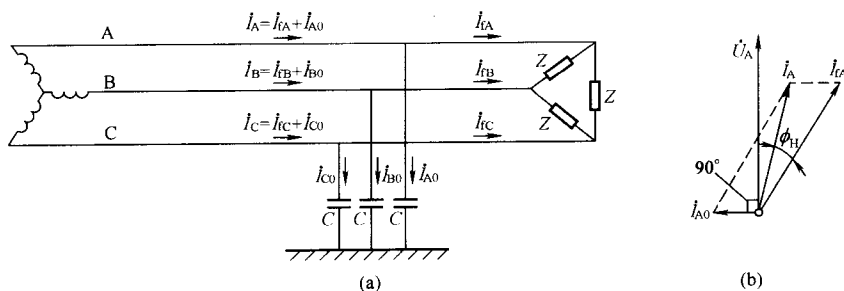


图 1-2 中性点不接地的三相系统(正常工作状态)

(a) 电流分布; (b) A 相电流、电压相量关系

在正常工作状态下, 电网各相对地的电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  是对称的, 并且在数值上等于电网的相电压, 电源各相中的电流  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$  分别等于负荷电流  $\dot{I}_{IA}$ 、 $\dot{I}_{IB}$ 、 $\dot{I}_{IC}$  和各相对地的电容电流  $\dot{I}_{A0}$ 、 $\dot{I}_{B0}$ 、 $\dot{I}_{C0}$  的相量和, 见图 1-2 (a)、(b)。此时三相电容电流  $\dot{I}_{A0}$ 、 $\dot{I}_{B0}$ 、 $\dot{I}_{C0}$  的相量和等于零, 流经地中的电流为零。中性点对地电压  $\dot{U}_0 = 0$ 。因此, 这种电网, 在正常运行时, 中性点接地与否, 对系统运行无任何影响。但如果发生一相接地, 情况将发生明显的变化。

图 1-3 表示当 C 相在  $d$  点发生金属性接地时的情况。接地后故障点  $d$  的电压为零，即  $\dot{U}_{cd} = 0$ 。这时，按故障相条件，可以写出电压方程式

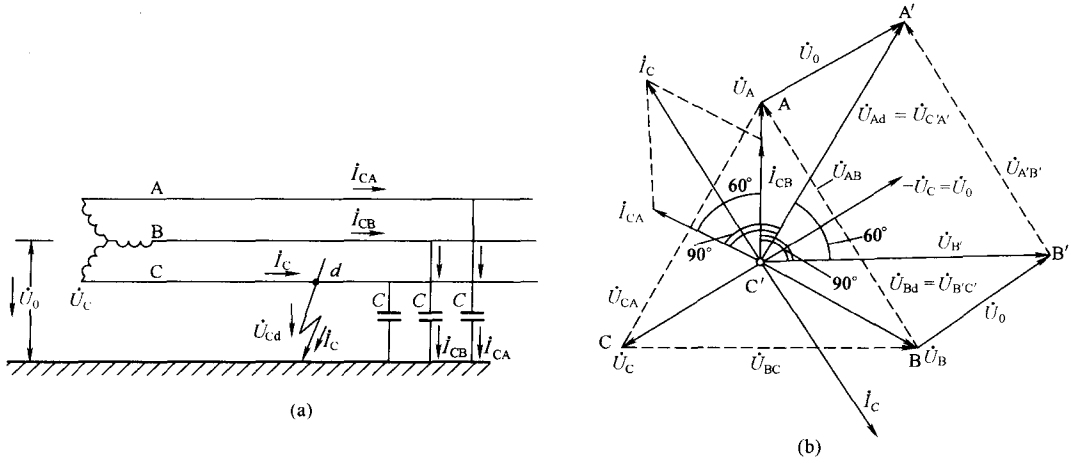


图 1-3 中性点不接地的三相系统 (C 相接地)  
(a) 电流分布; (b) 相量关系

$$\dot{U}_C + \dot{U}_0 = \dot{U}_{cd} = 0 \tag{1-1}$$

式中  $\dot{U}_C$ ——C 相电源电压;  
 $\dot{U}_0$ ——中性点对地电压。

所以 
$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_C \tag{1-2}$$

上式表明，当发生 C 相金属性接地时，中性点的对地电位不再为零，而是  $-\dot{U}_C$ 。于是 A、B 相的对地电压相应地为

$$\dot{U}_{AD} = \dot{U}_A + \dot{U}_0 = \dot{U}_A - \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{BD} = \dot{U}_B + \dot{U}_0 = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

而且

$$\dot{U}_{C'A'} = \dot{U}_{AD} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j150^\circ}$$

$$\dot{U}_{B'C'} = \dot{U}_{BD} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j150^\circ}$$

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j90^\circ} \tag{1-3}$$

其相量关系如图 1-3 (b) 所示，相当于原有的线电压三角形  $ABC$  平移到了  $A'B'C'$  的位置。即三相间线电压仍保持对称和大小不变，故对电力用户的继续供电并无影响。但是，从式 (1-3) 及图 1-3 (b) 中均可看出，两个非故障相 A 和 B 的对地电压却升高至  $\sqrt{3}$  倍，所以在中性点不接地的电力网中，各种设备的对地绝缘应按线电压设计，才能承受在一相接地时，非故障相对地电压的升高影响。

假定各相对地电容  $C$  均相等。在正常情况下，各相对地电容电流的大小也相等，即

$$I_{C0} = \frac{U_x}{X_C} = \omega C U_x \quad (1-4)$$

在 C 相接地时, C 相对地电容被短接, 其对地电容电流为零。非故障相对地电压分别升高为  $\dot{U}_{Ad}$ 、 $\dot{U}_{Bd}$ , 其对地电容电流分别为

$$\dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{Ad}}{-jx_C} = j\sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{-j150^\circ} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{-j60^\circ}$$

$$\dot{i}_{CB} = \frac{\dot{U}_{Bd}}{-jx_C} = j\sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{j150^\circ} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{-j120^\circ}$$

经过 C 相接地点  $d$ , 流入地中的电容电流 (即接地电流) 为

$$\dot{i}_C = -(\dot{i}_{CA} + \dot{i}_{CB}) = -\sqrt{3}\omega C \dot{U}_C (e^{-j60^\circ} + e^{-j120^\circ}) = j3\omega C \dot{U}_C \quad (1-5)$$

一相接地时, 接地点的接地电容电流绝对值

$$I_C = 3\omega C U_x = 3I_{C0} \quad (A) \quad (1-6)$$

式中  $U_x$ ——相电压, V;

$\omega$ ——角频率, rad/s;

$C$ ——相对地电容, F/相。

式 (1-6) 表明, 在中性点不接地的电力网中, 一相接地时接地点的接地电流等于正常时相对地电容电流  $I_{C0}$  的三倍, 其数值与电网的电压、频率和一相对地电容有关。

系统对地电容则与电网类别 (电缆电网或架空电网)、长度和大容量电机的容量及台数有关。

线路一相接地电容电流可近似地用下列公式估计。

对于架空电网

$$I_C = (2.7 \sim 3.3) U_{x-x} l \times 10^{-3} \quad (A) \quad (1-7)$$

式中的系数, 没有架空地线时取 2.7, 有架空地线时取 3.3。对于同杆架设的双回路, 电容电流为单回路的 1.3~1.6 倍。

对于电缆电网

$$I_C = 0.1 U_{x-x} l \quad (A) \quad (1-8)$$

式中  $U_{x-x}$ ——电网线电压, kV;

$l$ ——有直接电连接的这一电压级电网送电线路的长度, km。

由变电所配电装置及变压器绕组增加的一相接地电容电流, 用电网一相接地电容电流的附加比例估算, 见表 1-2。

表 1-2 由变电所增加的一相接地电容电流附加值

电网额定电压 (kV)	6	10	15	35	60	110	154	220
电容电流附加值 (%)	18	16	15	13	11~12	9~10	8	7

发电机一相对地电容由制造厂提供或通过试验取得, 亦可用下式估算

$$C_F = \frac{KS^{3/4}}{3(U_N + 3.6)n^{1/3}} \quad (\mu F/\text{相}) \quad (1-9)$$

式中  $K$ ——系数, B级绝缘的发电机, 取 0.04;

$S$ ——发电机容量, kVA;

$U$ ——发电机额定线电压, kV;

$n$ ——转速, r/min。

发电机一相接地电容电流

$$I_C = 3 \frac{U_N}{\sqrt{3}} \omega C_F \times 10^{-3} = 2\sqrt{3}\pi f U_N C_F \times 10^{-3} = 0.544 U_N C_F$$

发电机电压母线一相接地电容电流可取 0.05 ~ 0.1A/100m, 升压变压器低压绕组一相接地电容电流可取 0.1 ~ 0.2A。

如上所述, 当中性点不接地的系统中发生一相接地时, 接在相间电压上的受电器的供电并未遭到破坏, 它们可以继续运行。但是这种电网长期在一相接地的状态下运行, 也是不允许的, 因为这时非故障相电压升高, 绝缘薄弱点很可能被击穿, 而引起两相接地短路, 将严重地损坏电气设备。所以, 在中性点不接地电网中, 必须设专门的监察装置, 以便使运行人员及时地发现一相接地故障, 从而切除电网中的故障部分。

在中性点不接地系统中, 当接地的电容电流较大时, 在接地处引起的电弧就很难自行熄灭。在接地处还可能出现所谓间隙电弧, 即周期地熄灭与重燃的电弧。由于电网是一个具有电感和电容的振荡回路, 间歇电弧将引起相对地的过电压, 其数值可达 (2.5 ~ 3)  $U$ , 这种过电压会传输到与接地点有直接电连接的整个电网上, 更容易引起另一相对地击穿, 而形成两相接地短路。

在电压为 3 ~ 10kV 的电力网中, 一相接地时的电容电流不允许大于 30A, 否则, 电弧便不能自行熄灭, 而且由于 3 ~ 10kV 的电力网中使用电缆较多, 其绝缘比较薄弱, 一相接地转变为相间短路的可能性将大大增加。

在 20 ~ 60kV 电压级的电力网中, 间歇电弧所引起的过电压, 数值更大, 对于设备绝缘更为危险, 而且由于电压较高, 电弧更难自行熄灭。因此, 在这些电网中, 规定一相接地电流不得大于 10A。

在与发电机或调相机有直接电气连接的 6 ~ 20kV 回路中, 为防止单相接地时烧坏电机铁芯, 允许的一相接地电容电流更小, 可参见表 1-3。

表 1-3 电机回路一相接地电容电流的允许值

电机额定电压 (kV)	6.3	10.5	13.8	15.75	18	20
额定电压下一相接地 电流允许范围 (A)	< 5.0	3.00 ~ 5.00	2.27 ~ 3.38	2.00 ~ 3.20	1.75 ~ 2.90	1.57 ~ 2.60

## 二、中性点经消弧线圈接地系统

当一相接地电容电流超过了上述允许值时, 可以用中性点经消弧线圈接地的方法来解决, 该系统即称为中性点经消弧线圈接地系统。

消弧线圈主要由带气隙的铁芯和套在铁芯上的绕组组成, 它们被放在充满变压器油的油箱内。绕组的电阻很小, 电抗很大。消弧线圈的电感, 可用改变接入绕组的匝数加以调节。显然, 在正常运行状态下, 由于系统中性点的电压是三相不对称电压, 数值很小, 所以通过消弧线圈的电流也很小。

当发生一相完全接地时，消弧线圈处在相电压之下，通过接地处的电流是接地电容电流  $i_C$  和线圈电感电流  $i_L$  的相量和，如图 1-4 所示。这时消弧线圈的电感电流

$$I_L = \frac{U_C}{X_h} = \frac{U_C}{\omega L_h} \quad (1-10)$$

式中  $L_h$  和  $X_h$ ——消弧线圈的电感和电抗。

从图 1-4 (b) 可见，因为电感电流和电容电流有  $180^\circ$  的相位差，所以在接地处它们互相补偿。如果  $I_L = I_C$ ，就没有电流在接地处通过，实际上，这种完全补偿的情况是不允许的，因为可能引起谐振。

在电力网中，一般都采用过补偿方式，即单相接地时消弧线圈的电感电流略大于系统一相接地电容电流，使补偿后的剩余电流较小。采用过补偿方式，即使系统的电容电流突然减少（如某回线路切除）也不会引起谐振，而是离谐振点更远。

选择消弧线圈的容量，应考虑电网五年左右的发展规划，并按过补偿方式考虑，其容量按下式计算

$$S = 1.35 I_C U_x \quad (\text{kVA})$$

式中  $I_C$ ——电网一相接地电容电流，A；  
 $U_x$ ——电网相电压，kV。

在中性点经消弧线圈接地的系统中，一相接地时和中性点不接地系统一样，故障相对地电压为零，非故障相对地电压升高至  $\sqrt{3}$  倍，三相线电压仍保持对称和大小不变，所以也允许暂时运行，但不得超过两小时。消弧线圈的作用对于瞬时性接地故障尤为重要，因为它使接地处的电流大大减小，电弧可能自动熄灭。接地电流小，还可减轻对附近弱电线路的干扰。

在中性点经消弧线圈接地的系统中，各相对地绝缘和中性点不接地系统一样，也必须按线电压设计。

消弧线圈通过隔离开关接在相应电网的发电机、变压器或专用接地变压器的中性点上，其原理接线见图 1-5。

### 三、中性点直接接地系统

另一种常用的系统中性点的运行方式是将中性点直接接地。这样，中性点的电位在电网的任何工作状态下均保持为零。在这种系统中，当发生一相接地时，这一相直接经过接地点和接地的中性点短路，一相接地短路电流的数值很大，因而立即使继电保护动作，将故障部分切除，如图 1-6 所示。

在中性点直接接地的大电力系统内，为了减小一相接地短路电流，也可以将中性点经过电抗器接地，如图 1-7 所示。这时一相接地短路电流，

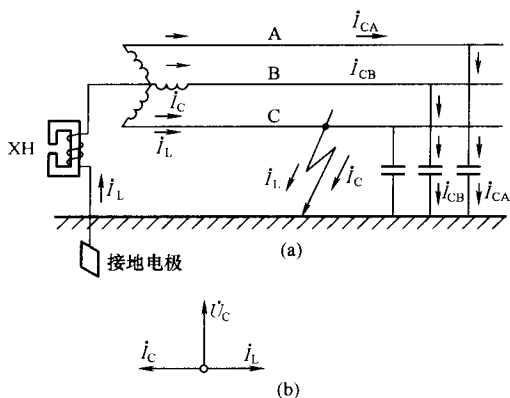


图 1-4 中性点经消弧线圈接地的三相系统 (C 相接地的情况)  
(a) 电路原理图；(b) 相量图

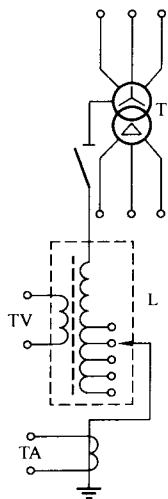


图 1-5 消弧线圈的原理接线  
L—消弧线圈；TV—电压互感器；TA—电流互感器



因受到电抗器的限制而大大减小, 即  $I_d^{(1)'} < I_d^{(1)}$ 。但通常采用的限制一相接地短路电流的方法是不将全部变压器的中性点都直接接地, 而只将其中的一部分直接接地, 这样, 也可以将一相接地短路电流, 减小到不超过可能的最大三相短路电流。

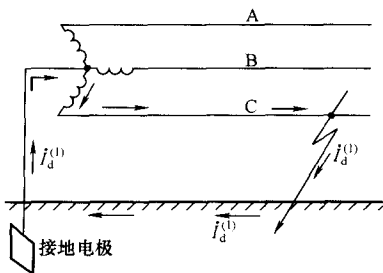


图 1-6 中性点直接接地的三相系统

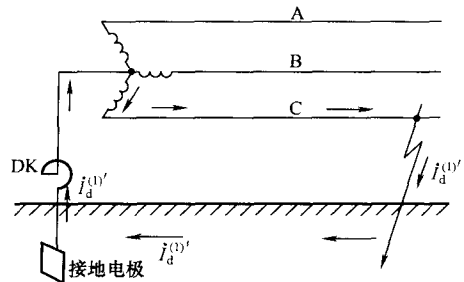


图 1-7 中性点经过电抗器接地的三相系统

中性点直接接地或经过电抗器接地系统, 在发生一相接地故障时, 故障的送电线路被切断, 因而使用户的供电中断。运行经验表明, 在 1000V 以上的电网中, 大多数的一相接地故障, 尤其是架空送电线路的一相接地故障, 大都具有瞬时的性质, 在故障部分切除以后, 接地处的绝缘可能迅速恢复, 而送电线可以立即恢复工作。目前在中性点直接接地的电网内, 为了提高供电可靠性, 均装设自动重合闸装置, 在系统一相接地线路切除后, 立即自动重合, 再试送一次, 如为瞬时故障, 送电即可恢复。

中性点直接接地的主要优点是它在发生一相接地故障时, 非故障相的对地电压不会增高, 因而各相对地绝缘即可按相对地电压考虑; 在高电压级时将大大降低电气设备和电网的建设费用。电网的电压愈高, 经济效果愈大。而且在中性点不接地或经消弧线圈接地的系统中, 单相接地电流往往比正常负荷电流小得多, 因而要实现有选择性的接地保护就比较困难, 但在中性点直接接地系统中, 实现就比较容易。由于接地电流较大, 继电保护一般都能迅速而准确地切除故障线路, 且保护装置简单, 工作可靠。

一相接地是电力网中最常见的一种故障。如上所述, 这种大接地电流系统在一相接地时将产生很大的一相接地短路电流, 任何部分发生一相接地时都必须将其切除。即使采用自动重合闸装置, 在发生永久性故障时, 供电也将中断, 有时甚至可能导致系统动态稳定破坏。而且在这种大接地电流系统中, 一相接地在线路与地之间流过很大的一相接地短路电流, 将产生一个很强的磁场, 而在附近的弱电线路(如通信线路或铁路信号线路等)上感应出相当大的电势, 轻则引起噪声, 妨害通信, 重则可能引起弱电设备的损坏, 并危及通信人员安全或引起铁路信号的误动作。因此, 大接地电流系统的送电线路, 应与弱电线路保持一定的距离, 或在弱电线路上采取有效的保安措施。

#### 四、中性点经电阻接地系统

过去我国电厂中压系统和城市、农村电网一律采用不接地或经消弧线圈接地的方式。这种对于单相接地故障不立即跳闸的接地方式, 有利于提高供电连续性和可靠性。这种接地方式在我国的配电网以架空线路为主, 电源容量严重不足, 负荷过重, 供需矛盾尖锐的时期发挥了重要作用。这种方式特别适用于故障几率高, 绝缘可自行恢复的以架空线路为主的配电网, 例如农村配电网和中小城市城区电网以及中小型发电厂的中压厂用电系统。