



用电管理培训教材

# 电气 设备

水利电力部电力生产司 组编

水利电力出版社

YONGDIAN GUANLI PEIXUN JIAOCAI

用电管理培训教材

# 电 气 设 备

水利电力部电力生产司 组编

水利电力出版社

用电管理培训教材

**电气设备**

水利电力部电力生产司 组编

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路8号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 21印张 475千字

1985年2月第一版 1990年3月北京第三次印刷

印数46961—57310册

ISBN 7-120-01125-1/TM·322

定价9.00元

# 目 录

## 前 言

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 电力系统概述 .....                 | 1   |
| 第一节 电力系统的组成 .....                | 1   |
| 第二节 电力系统的额定电压和频率 .....           | 3   |
| 第三节 电力系统的中性点接地方式 .....           | 7   |
| 第二章 短路电流计算 .....                 | 14  |
| 第一节 基本概念 .....                   | 14  |
| 第二节 无限大容量电源供电系统三相短路的过渡过程 .....   | 15  |
| 第三节 标么值和元件阻抗的换算 .....            | 20  |
| 第四节 无限大容量电源供电系统三相短路电流的实用计算 ..... | 24  |
| 第五节 发电机供电电路内的三相短路 .....          | 34  |
| 第六节 利用运算曲线计算三相短路电流的周期分量 .....    | 40  |
| 第七节 短路电流的电动力效应和热效应 .....         | 51  |
| 第八节 限制短路电流的措施 .....              | 56  |
| 第三章 电弧及触头的基本知识 .....             | 60  |
| 第一节 电弧现象 .....                   | 60  |
| 第二节 电弧的形成 .....                  | 60  |
| 第三节 电弧的物理特性和熄弧的因素 .....          | 61  |
| 第四节 直流电弧的燃烧和熄灭 .....             | 63  |
| 第五节 交流电弧的燃烧和熄灭 .....             | 65  |
| 第六节 熄弧的方法和开关触头的形式 .....          | 69  |
| 第四章 高低压电器 .....                  | 72  |
| 第一节 低压电器 .....                   | 72  |
| 第二节 熔断器 .....                    | 84  |
| 第三节 隔离开关 .....                   | 90  |
| 第四节 高压断路器 .....                  | 94  |
| 第五节 高压负荷开关 .....                 | 117 |
| 第六节 绝缘子、母线和电缆 .....              | 119 |
| 第七节 互感器 .....                    | 128 |
| 第八节 蓄电池 .....                    | 138 |
| 第五章 电气设备的选择 .....                | 146 |
| 第一节 电气设备选择的原则 .....              | 146 |
| 第二节 高压电气设备的选择 .....              | 147 |
| 第三节 蓄电池组的选择 .....                | 153 |

|     |                     |     |
|-----|---------------------|-----|
| 第四节 | 蓄电池组的充电和浮充电设备 ..... | 156 |
| 第六章 | 电力变压器 .....         | 157 |
| 第一节 | 概述 .....            | 157 |
| 第二节 | 变压器的极性和接线组别 .....   | 168 |
| 第三节 | 变压器的运行管理 .....      | 175 |
| 第四节 | 变压器的过负荷 .....       | 185 |
| 第五节 | 变压器油的运行管理 .....     | 187 |
| 第七章 | 高低压配电网 .....        | 191 |
| 第一节 | 概述 .....            | 191 |
| 第二节 | 高压配电网的布局及结线方式 ..... | 193 |
| 第三节 | 电网的电压计算及电压调整 .....  | 197 |
| 第四节 | 架空线路及电缆线路 .....     | 206 |
| 第五节 | 低压配电网 .....         | 217 |
| 第六节 | 高压配电网的运行管理 .....    | 222 |
| 第八章 | 工厂变电所 .....         | 230 |
| 第一节 | 概述 .....            | 230 |
| 第二节 | 变电所容量和台数的确定 .....   | 233 |
| 第三节 | 变电所主结线 .....        | 234 |
| 第四节 | 变电所的结构和布置 .....     | 239 |
| 第九章 | 用电设备 .....          | 265 |
| 第一节 | 电力拖动 .....          | 265 |
| 第二节 | 电炉设备 .....          | 298 |
| 第三节 | 变流设备与电解电镀 .....     | 307 |
| 第四节 | 电焊装置 .....          | 317 |
| 第五节 | 电气照明 .....          | 324 |

# 第一章 电力系统概述

电气设备是电力系统的组成元件，电气设备的构造和性能与电力系统的组成和有关参数密切相关。在分别介绍各种电气设备之前，本章先对电力系统的组成、电压和频率、中性点接地方式等作一简单介绍。

## 第一节 电力系统的组成

### 一、电力系统

电力系统是由发电厂、变电所、输配电线路和用户的电气装置连接而成的一个整体，包括发电机、变压器、断路器、母线、架空线、电缆、配电装置、电动机和照明装置等，如图1-1所示。该图的电力系统只画出系统的主要设备（发电机、变压器、输电线路及电能用户），没有画出次要设备，并将三相三线用单线表示。

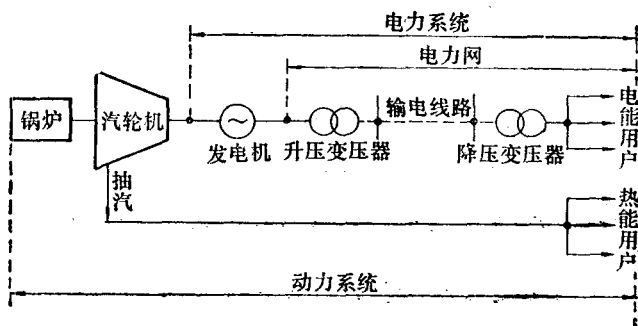


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

### 二、电力网

电力网是将各电压等级的输电线路和各种类型的变电所连接而成的网络。从图 1-1 可知电力网比电力系统只少发电设备。

### 三、动力系统

动力系统是由电力系统和动力装置，如锅炉、汽轮机等共同组成的，整个动力系统包括电力系统、热能、水能或其他能源的动力设备和热能用户等。

图 1-2 所示是一个较大电力系统的单线图。在这个系统内有四个发电厂，其中有两个是火力发电厂（火力发电厂-1、火力发电厂-2），一个热电厂，一个水力发电厂。大型水力发电厂的发电机不经过发电电压的母线而直接与升压变压器连接，升压到220千伏，再用双回路 220 千伏高电压远距离输电。一个热电厂建立在热能用户的中心，对附近用

户，用发电机电压10千伏供电，同时还通过一台升压变压器和一条110千伏线路与大电网相联。火力发电厂-1的10千伏母线电压通过升压变压器升压到110千伏，与电网相联，同时用10千伏线路向附近用户和配电变压器（变电所-6）供电，配电变压器将电压降低到380/220伏，供电给低压电网。火力发电厂-2直接将发电机出口电压升压到110千伏，再与电网相联。从图1-2可知，一个较大的电力系统往往包括火力发电厂、水力发电厂和热电厂等各种类型的发电厂。

图1-2中，变电所-1和变电所-2是电力系统中各发电厂相互联系的枢纽，叫做枢纽变电所，也叫区域变电所。变电所-1有两台自耦变压器将220千伏电压降低到110千伏，并且还有二台三线圈变压器，除联络110千伏及35千伏两种电压等级的电网外，低压绕组采用10千伏电压供电给二台同步补偿机，以满足电网中无功功率的需要。变电所-3称为穿越变电所，有二台双线圈变压器，平时有110千伏的功率穿越变电所。变电所-4和5叫做地区变电所。变电所-4由110千伏线路输入电能，降压后，供电给35千伏用户和地区变电所-5。变电所-5将电压从35千伏降低到10千伏，然后用10千伏配电线路供电给10千伏受电的用户和配电变压器，配电变压器将10千伏电压降低到380/220伏，给低压用户供电。

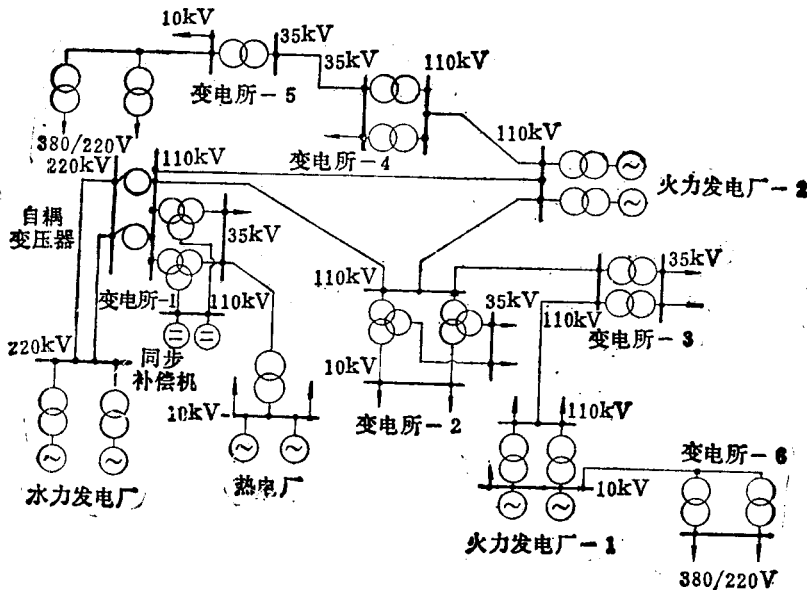


图 1-2 电力系统示意图

像这样由好几个大型发电厂、变电所以及输配电线路联接起来的大电力系统，具有不少优点，主要如下：

#### 1. 提高供电可靠性

孤立发电厂一有故障，要使许多用户停电，但在一个较大的电力系统中，即使有任何一个发电厂发生故障，用户仍然可以从系统中其他发电厂取得电能，一个变电所发生故障，用户仍然可以从系统中其它变电所取得电能。这样就大大提高了供电的可靠性。

#### 2. 减少机组的备用容量

为了替代故障或检修机组，孤立发电厂需要装设备用发电机组。若几个发电厂组成电

力系统后，不需要每一个发电厂都装设备用机组，只要在整个系统中具有足够的备用机组容量即可。这样，可以大大减少备用机组的容量，节约投资。

3. 合理利用各种动力资源，提高运行的经济性

在一个大电力系统中，有水力发电厂、火力发电厂、原子能发电厂。在丰水时期水电厂可以多发电、火电厂少发电，可以节约燃煤和燃料油；在枯水时期，由水力发电厂担负尖峰负荷而由大型火电厂担负基本负荷，水、火电厂相互配合、调剂，以发挥各类发电厂的特点，提高经济效益，合理使用能源。

第二节 电力系统的额定电压和频率

一、额定电压

我国国家标准GB156-59规定了各种电气设备的额定电压。额定电压共分三类，这三类额定电压对于发、供、用电设备都有用途。

1. 第一类额定电压

100伏及以下的额定电压称为第一类额定电压。第一类额定电压主要用于安全照明、蓄电池及开关设备的直流操作电压。直流有6、12、24、48伏；交流单相有12、36伏，三相（线电压）有36伏。

2. 第二类额定电压

超过100伏而不满1000伏的额定电压称为第二类额定电压。具体数值见表1-1，主要用于动力和照明设备。

表 1-1 第 二 类 额 定 电 压 （ 伏 ）

| 用 电 设 备 |         |       | 发 电 机 |               | 变 压 器   |         |         |         | 备 注 |
|---------|---------|-------|-------|---------------|---------|---------|---------|---------|-----|
| 直 流     | 三 相 交 流 |       | 直 流   | 三相交流<br>(线电压) | 三 相 交 流 |         | 单 相 交 流 |         |     |
|         | 线 电 压   | 相 电 压 |       |               | 一 次 线 圈 | 二 次 线 圈 | 一 次 线 圈 | 二 次 线 圈 |     |
| 110     |         |       | 115   |               |         |         |         |         |     |
|         | (127)   |       |       | (133)         | (127)   | (133)   | (127)   | (133)   |     |
| 220     | 220     | 127   | 230   | 230           | 220     | 230     | 220     | 230     |     |
|         | 380     | 220   |       | 400           | 380     | 400     | 380     | —       |     |
| 440     |         |       | 460   |               |         |         |         |         |     |

括号内电压用于矿井或保安条件要求较高的场所

实际工作中常用的额定电压是400/230或380/220伏。

3. 第三类额定电压

1000伏以上的额定电压称为第三类额定电压。第三类额定电压主要用于发电机、变压器、送电线路及用电设备，具体数值见表1-2。

表 1-2

第 三 类 额 定 电 压 （ 千 伏 ）

| 用电设备额定电压 | 发 电 机 线 间 电 压 | 变 压 器 线 间 电 压、交 流 |            |
|----------|---------------|-------------------|------------|
|          |               | 一 次 线 圈           | 二 次 线 圈    |
| 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  |
| —        | 15.75         | 15.75             | —          |
| 35       |               | 35                | 38.5       |
| 60       |               | 60                | 66         |
| 110      |               | 110               | 121        |
| 154      |               | 154               | 169        |
| 220      |               | 220               | 242        |
| 330      |               | 330               | 363        |

从表1-2可以看出下列规律:

- ( 1 ) 发电机的额定电压比用电设备的额定电压高出5%。
- ( 2 ) 变压器的一次线圈在接受电能时,可以看作用电设备,额定电压与用电设备的额定电压相等,直接与发电机连接的升压变压器,一次线圈电压与发电机电压相等。
- ( 3 ) 变压器的二次线圈相当于供电电源,它的空载额定电压要比用电设备的额定电压高出10%,但与 3、6、10 千伏电压相应的配电线路可能不长,故二次线圈额定电压有时可以高出用电设备的额定电压5%。

按上述规律,选定额定电压的理由大体如下:

电压质量指标规定,用户受电端的电压变动幅度一般不超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。当线路

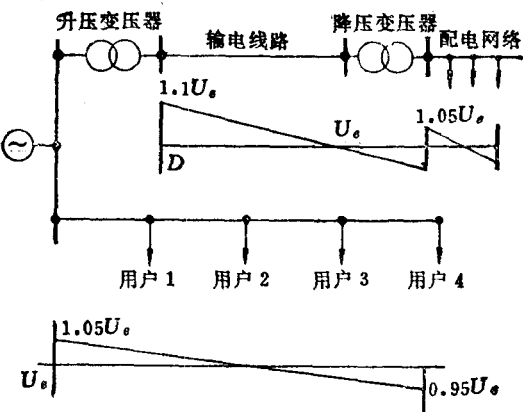


图 1-3 电力网各部分电压分布示意图

《电力工业技术管理法规(试行)》规定:用户受电端的电压变动幅度,应不超过下列额定电压的百分数:

- 1 ) 以10~35 千伏及以上电压供电的和对电压质量有特殊要求的用户为 $\pm 5\%$ ;
- 2 ) 低压照明用户为 $+5\%$ 、 $-10\%$ 。

各地电力网对城镇大中型工厂企业的供电电压一般采用 6 或 10 千伏，对小型工厂企业以及照明用户常用 380/220 伏供电，电灯接于 220 伏相电压，电动机接于 380 伏线电压，对于特大的工厂企业，有采用 35 千伏、110 千伏甚至 220 千伏供电的。

表 1-3 架空线路的输送能力

| 额定电压<br>(千伏) | 输送功率<br>(千伏安)  | 输送距离<br>(千米) |
|--------------|----------------|--------------|
| 0.22         | <50            | 0.15         |
| 0.32         | <100           | 0.25         |
| 6            | <2000          | 5~10         |
| 10           | <3000          | 8~15         |
| 35           | 2000~10000     | 20~50        |
| 110          | 10000~50000    | 50~150       |
| 220          | 100000~500000  | 100~300      |
| 330          | 200000~1000000 | 200~600      |

表 1-4 电缆线路的输送能力

| 额定电压<br>(千伏) | 输出功率<br>(千瓦) | 输送距离<br>(千米) |
|--------------|--------------|--------------|
| 0.22         | <100         | <0.2         |
| 0.38         | <175         | <0.35        |
| 6            | <3000        | <8           |
| 10           | <5000        | <10          |

电压与输配电距离、输送的功率有关系。根据技术经济比较及多年运行经验表明，架空线路和电缆线路的各级额定电压、输送功率和输送距离的关系，大体如表 1-3 及表 1-4 所列。

发电机的额定电压可根据其容量进行选择，一般规律如下：

1 千伏以下的电压用于小容量发电机；3.15 千伏用于 3000 千瓦及以下的发电机；6.3 千伏用于 1500~50000 千瓦的发电机；10.5 千伏用于 12000~100000 千瓦的发电机；15.75 千伏用于 125000~200000 千瓦的发电机；18 千伏用于 300000 千瓦及以上的发电机；20 千伏用于 600000 千瓦的发电机。

## 二、电压变化对用电设备的影响

用电设备的受电电压与铭牌额定电压有出入时，设备的特性和使用寿命都会受到影响，影响的大小取决于用电设备的特性和受电电压对额定电压偏差的大小。对于要求电压特别精确的地方，供电电力网难于满足要求时，需要使用较精确的电压调节设备，如调压变压器、稳压器等。

### 1. 感应电动机

电压变化对感应电动机特性的影响可参见表 1-5。当电动机受电电压低于铭牌额定电压时，将引起起动转矩的减少和满负荷温升的增高；电动机受电电压高于铭牌额定电压时，会使起动转矩增加、起动电流增加和功率因数的降低。一般情况下，电压比额定值稍高要比电压低于额定值对电动机性能的不利影响小一些。表 1-5 中列出了 90% 额定电压及 110% 额定电压时，感应电动机的起动转矩、最大转矩、满负荷温升等的变化情况。

### 2. 白炽灯

受电电压对白炽灯的光通量输出和寿命的影响很显著。白炽灯的光通量和寿命与端电压的关系，见表 1-6。

### 3. 荧光灯

荧光灯与白炽灯不同，荧光灯可以在镇流器铭牌额定电压的  $\pm 10\%$  的范围内满意地工

表 1-5

电压变化对感应电动机特性的影响

| 特 性          | 与电压的函数关系          | 90% 额 定 电 压 时 | 110% 额 定 电 压 时 |
|--------------|-------------------|---------------|----------------|
| 起动转矩和最大转矩    | $(\text{电压})^2$   | 减少19%         | 增加21%          |
| 同步速度         | 恒 定               | 不 变           | 不 变            |
| 转 差 率        | $1/(\text{电压})^2$ | 增加20~30%      | 减少15~20%       |
| 满负荷速率        | 同步速度转差率           | 减少1.5%左右      | 增加1%左右         |
| 效 率          |                   |               |                |
| 满 负 荷        |                   | 降低2%          | 增加0.5~1%       |
| 3/4负 荷       |                   | 基本不变          | 基本不变           |
| 1/2负 荷       |                   | 增加1~2%        | 降低1~2%         |
| 功率因数         |                   |               |                |
| 满 负 荷        |                   | 增加1%          | 降低3%           |
| 3/4负 荷       |                   | 增加2~3%        | 降低4%           |
| 1/2负 荷       |                   | 增加4~5%        | 降低5~6%         |
| 满负荷电流        |                   | 增加11%         | 降低7%           |
| 起动电流         | 电 压               | 降低10~12%      | 增加10~12%       |
| 满负荷温升        |                   | 增加6~7°C       | 减少1~2°C        |
| 最大过负荷能力      | $(\text{电压})^2$   | 减少19%         | 增加21%          |
| 电磁噪音——特别在空载时 |                   | 轻微减少          | 轻微增加           |

表 1-6

白炽灯的光通量和寿命与端电压的关系

| 受电电压<br>额定电压 (%)     | 110 | 105 | 100 | 95  | 90  |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 实际光通量<br>额定光通量 (%)   | 135 | 120 | 100 | 82  | 68  |
| 实际使用时间<br>额定使用时间 (%) | 30  | 55  | 100 | 150 | 360 |

作。光通量输出的变化与受电电压近似成正比，如受电电压增加1%，光通量输出也增加1%；反之，电压减少1%，光通量输出也减少1%。电压变化对荧光灯寿命的影响比对白炽灯的要小。

荧光灯装置的镇流器是电压敏感元件，是一个小电抗器，镇流器可对荧光灯提供必要的起动和运行电压，并限制灯的电流，使之不超过设计值。当受电电压高于额定值和工作温度高于正常时，镇流器可能过热。

#### 4. 高亮度气体放电灯（水银、钠和金属卤化物灯）

用常规的不调压镇流器的水银灯，端电压减少10%，光通量输出减少约30%。钠和金属卤化物灯与水银灯的特性是相似的，但其起动和运行电压可能有些不同，因而灯管和镇流器不能互换。

#### 5. 电容器

电容器输出的无功功率随所加电压的平方而变化，供电电压降低10%，电容器输出的无功功率几乎要减少19%，也就是说，用户为了改善功率因数而花了相当大的投资去装设电容器时，由于电压降低10%而几乎要失掉20%的投资效益。

## 6. 电磁操作机构

交流电磁铁的吸引力近似地随电压的平方而变化。通常,设计电磁铁的正常操作电压是额定电压的+10%和-15%。

### 三、额定频率

我国电力系统的额定频率为50赫兹(周/秒),正常运行的电力系统的频率应经常保持额定值。其允许偏差规定如下:

300万千瓦及以上的系统其允许偏差不得超过 $\pm 0.2$ 赫兹;在不足300万千瓦的系统其值不得超过 $\pm 0.5$ 赫兹;300万千瓦及以上系统电钟在任何时间的偏差不应大于 $\pm 30$ 秒;不足300万千瓦的系统不应大于 $\pm 1$ 分钟。升高或降低频率运行是不允许的。

频率过高过低,非但影响电钟的准确性、生产产品的产量和质量,频率升降,还引起电网有功负荷和无功负荷的升降,升降的数量,与电网用电负荷的组成有关。一般而论,频率降低1%,系统有功负荷减少1~2%;频率升高1%,系统有功负荷增加1~2%。无功负荷与频率的变化,有反比的关系,频率降低1%,无功负荷增加1~1.5%。

除了电力系统及电力设备的标准频率定为50赫兹之外,我国国家标准又对舰船电气设备、航空电气设备和一般工业电气设备,包括通用电气设备、电热装置、机床电气设备、纺织电机、控制电机和电动工具的频率作了规定,有100、150、200、400、600、800、1000、1500、2500、4000、8000、10000赫兹等一系列数值。

## 第三节 电力系统的中性点接地方式

电力系统的中性点接地方式有:不接地、经电阻接地、经电抗接地、经消弧线圈接地、直接接地等几种。我国电力系统目前所采用的中性点的接地方式主要有三种,即:不接地、经消弧线圈接地和直接接地。下面就这三种接地方式简要介绍如下。

### 一、中性点不接地(绝缘)的三相系统

图1-4所示是一个中性点不接地的三相系统。由于输电线路与大地之间存在着电容,各相对地就有电容电流通过,其大小决定于线路对地的电压和对地的电容。为了便于分析,各相对地的电容用集中电容 $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ 表示,线间电容不予考虑。

#### 1. 中性点不接地系统的正常运行

由于正常运行时各相对地的电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的,其向量图如图1-4(b)所示,各相线路对地电容( $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$ )是相等的,因此各相对地的电容电流也是相等的。各相电流等于负荷电流及对地电容电流之和,以A相为例,其向量关系见图1-4(c),即:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{fA} + \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{fB} + \dot{I}_{CB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{fC} + \dot{I}_{CC}$$

式中  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ ——A、B、C相电流;

$\dot{I}_{fA}$ 、 $\dot{I}_{fB}$ 、 $\dot{I}_{fC}$ ——各相负荷电流;

$\dot{I}_{CA}$ 、 $\dot{I}_{CB}$ 、 $\dot{I}_{CC}$ ——各相对地电容电流。

各相对地电容电流的数值相等而相位相差 $120^\circ$ ，他们的向量和等于零，其向量图见图1-4 (b)，地中没有电容电流通过，中性点对地电位为零 ( $\dot{U}_o = 0$ )，即中性点与地电位一致。这时，中性点接地与否对各相对地电压没有任何影响。

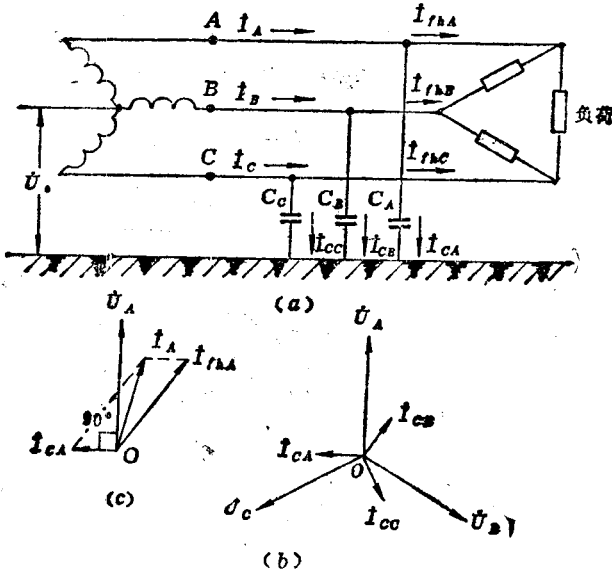


图 1-4 中性点不接地电力系统的正常工作状态  
(a)接线图，(b)向量图，(c)A相向量图

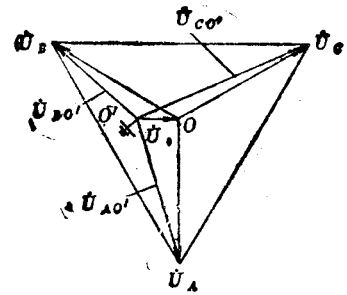


图 1-5 中性点位移的向量图

可是，当中性点不接地系统的各相对地电容不相等时，即使在正常运行状态时，中性点的对地电位便不再是零，通常，这种情况叫做“中性点位移”，即中性点不再是地电位了。这种现象的产生多数是由于架空线路排列不对称而又换位不完全的缘故。中性点位移的向量图，如图1-5所示，图中 $\overline{OO'}$ 即为中性点位移。

## 2. 中性点不接地系统的单相接地

中性点不接地系统任何一相（如C相）接地时，如图1-6所示，此时，接地相对地电压为零 ( $\dot{U}_{co} = 0$ )，接地相对地电容电流也是零 ( $\dot{I}_{co} = 0$ )，此时中性点电位不再是零了，对地产生电位。此时，不接地相（A、B相）对地电压就是对C相的电压，即线电压 ( $\dot{U}_{dA}$ 、 $\dot{U}_{dB}$ )，如图1-6 (b) 所示。

单相（C相）接地故障时，可写出下列电压方程式：

$$\dot{U}_o + \dot{U}_o = -\dot{U}_o + \dot{U}_o = \dot{U}_{co} = 0 \quad (1-1)$$

式中  $\dot{U}_o$ ——中性点对地电压；

$\dot{U}_o$ ——C相电源电压。

故有

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_o \quad (1-2)$$

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是零，而变成了 $-\dot{U}_o$ 。于是A、B相的对地电压相应地为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{dA} &= \dot{U}_o + \dot{U}_A = -\dot{U}_o + \dot{U}_A \\ \dot{U}_{dB} &= \dot{U}_o + \dot{U}_B = -\dot{U}_o + \dot{U}_B \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

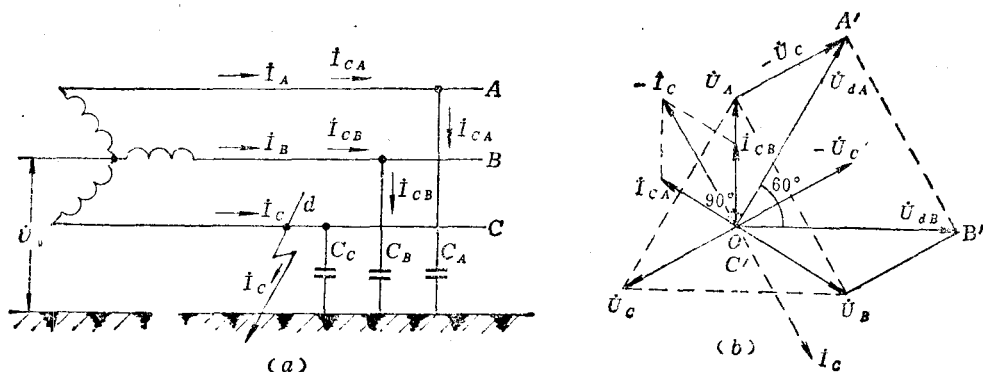


图 1-6 中性点不接地系统的单相接地  
(a)接线图；(b)向量图

上式中各量的向量关系如图1-6(b)所示。未接地的A、B两相对地电压升高到相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即A、B两相的对地电压等于线电压。

在中性点不接地的三相系统中，当一相接地后，各相间的电压大小和相位没有变化，电压的对称性没有变化，因此这样的三相系统，一点接地后，还可继续运行一段时间。

A、B两相对地电压升高到 $\sqrt{3}$ ，这两相的对地电容电流也相应地增大了 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I'_{CA}=I'_{CB}=\sqrt{3}I_{C0}$ ，其中 $I_{C0}=\omega CU_0$ 。因C相接地，故C相对地电容被短接，C相对地电容电流变为零，此时，经过C相接地点流入地中的电容电流（即接地电流）不再是零，而是

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB}) \quad (1-4)$$

如图1-6(b)所示，A相的电容电流 $\dot{I}_{CA}$ 超前 $\dot{U}_{dA} 90^\circ$ ，B相的电容电流 $\dot{I}_{CB}$ 超前 $\dot{U}_{dB} 90^\circ$ 。经过向量相加，可知绝对值为：

$$I_C = 3\omega CU_0 \text{ (安)} \quad (1-5)$$

式中  $U_0$ ——系统的相电压（伏）；

$\omega$ ——角频率（弧度/秒）；

$C$ ——相对地电容（法拉）。

从式(1-5)可知，单相接地时，通过接地点的电容电流为未接地时每一相对地电容电流的3倍。

综上所述，在中性点不接地的三相系统中，当一相发生接地时，结果如下：

(1) 未接地两相对地电压升高到相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即等于线电压，所以，在这种系统中，相对地的绝缘水平应根据线电压来设计。

(2) 各相间的电压大小和相位仍然不变，三相系统的平衡没有遭到破坏，因此可以继续运行一段时间，这便是这种系统的最大优点，但不允许长期带接地运行，尤其是发电机直接供电的电力系统，因为未接地相对地电压升高到线电压，一相接地运行时间过长可能造成两相短路。所以在这种系统中，一般应装设绝缘监视或接地保护装置。当发生单相

接地时，应及时发出信号，使值班人员迅速采取措施，尽快消除故障。一相接地系统允许继续运行的时间，最多不得超过 2 小时。

(3) 接地点通过的电流为电容性的，其大小为原来相对地电容电流的 3 倍，这种电容电流不易熄灭，可能在接地点引起“弧光接地”，周期性地熄灭和重新发生电弧。“弧光接地”的持续间歇电弧较危险，可能引起线路的谐振现象而产生过电压，损坏电气设备或发展成为相间短路。在这种系统中，接地电流大于 5 安培时，发电机、变压器和电动机都应装设动作于跳闸的接地保护装置。

## 二、中性点经消弧线圈接地的三相系统

前面所讲的中性点不接地的三相系统，发生单相接地故障时，虽然可以继续供电，但在单相接地故障电流较大，如 35 千伏系统大于 10 安，10 千伏系统大于 30 安时，却不能继续供电。为了克服这个缺点，出现了经消弧线圈接地的方式。在 35 千伏三相系统中，广泛采用中性点经消弧线圈接地的方式。

消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感线圈，装设在变压器或发电机的中性点。当发生单相接地故障时，可形成一个与接地电容电流大小接近相等而方向相反的电感电流，这个滞后电压  $90^\circ$  的电感电流与超前电压  $90^\circ$  的电容电流相互补偿，最后使流经接地处的电流变得很小以至等于零，从而消除了接地处的电弧以及由它所产生的危害。消弧线圈的名称就是这样来的。

图 1-7 表示中性点经消弧线圈接地的三相系统中发生单相接地时的电流路径和向量

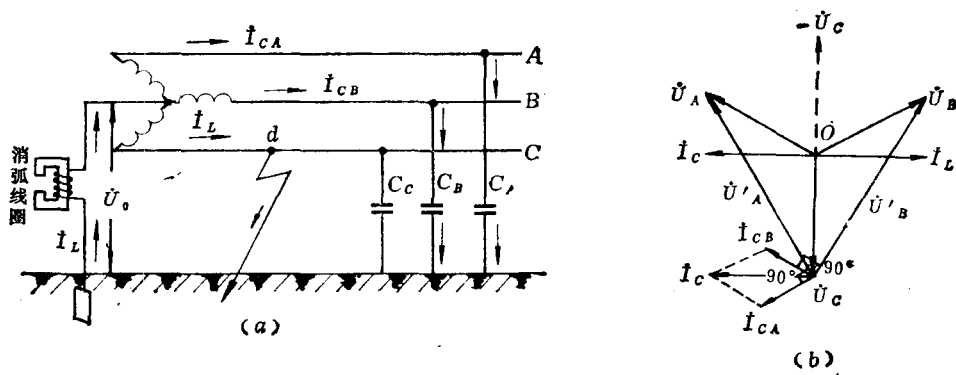


图 1-7 中性点经消弧线圈接地  
(a) 接线图，(b) 向量图

图。当发生单相（如 C 相 d 点）接地时，中性点电压  $\dot{U}_0$  将变为  $-\dot{U}_C$ ，这时消弧线圈处于相电压之下，忽略线圈电阻，消弧线圈内有一感性电流（滞后于  $\dot{U}_0$   $90^\circ$ ），其数值为：

$$I_L = \frac{U_C}{X_h} = \frac{U_C}{\omega L_h} \quad (1-6)$$

式中  $L_h$  和  $X_h$ ——消弧线圈的电感和电抗。

如图 1-7(b) 的向量图所示，当 C 相接地时，健全相 A 和 B 的电压升高到线电压，而 A 相和 B 相的对地电容电流  $\dot{I}_{CA}$  和  $\dot{I}_{CB}$  分别超前  $\dot{U}'_A$  和  $\dot{U}'_B$   $90^\circ$ 。从向量图中可以看出， $\dot{I}_{CA}$  和

$\dot{I}_{CB}$ 所组成的总电容电流 $\dot{I}_0$ 将超前 $\dot{U}_0$  (即图中的 $-\dot{U}_0$ )  $90^\circ$ 。电感电流 $\dot{I}_L$ 与电容电流 $\dot{I}_0$ 正好相位相反, 而且 $I_L$ 也流经故障点, 从而对单相接地所产生的电容电流实现了补偿。由于接地电流的减小, 电弧将自行熄灭, 故障即消失。

单相接地时的电容电流为 $I_0 = 3\omega CU_0$ , 如果使 $I_L = I_0$ , 即 $3\omega CU_0 = \frac{U_0}{\omega L}$ , 则有 $3\omega^2 CL = 1$ , 即

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (1-7)$$

上式表示当所选择的消弧线圈的电感值满足此条件时, 电感电流等于电容电流, 接地电容电流将全部被补偿, 接地处的电流为零, 这种情况叫做完全补偿。如果消弧线圈的电感值大于这一数值, 电感电流小于电容电流, 这种情况叫做欠补偿; 反之, 电感电流大于电容电流时, 叫做过补偿。初看起来, 采用完全补偿使接地电流为零, 是很理想的, 但实际上这样做是有问题的。因为采用完全补偿时, 容抗等于感抗, 系统发生串联谐振, 串联谐振电路内产生很大的电流, 这个大电流将在消弧线圈的阻抗上形成很大的电压降, 使中性点对地电位大大升高, 可能使设备的绝缘损坏。因此, 一般系统都不采用完全补偿的方式, 而采取不完全补偿的方式。

为了讨论补偿问题的方便, 常把 $k = \frac{I_L}{I_0}$ 叫做补偿度, 而把 $\nu = 1 - k = \frac{I_0 - I_L}{I_0}$ 叫做脱谐度。当采用完全补偿时,  $k = 1$ , 而 $\nu = 0$ , 即容抗与感抗相等, 系统处于谐振状态。

在不完全补偿的方式中, 有欠补偿与过补偿之分。

如果消弧线圈的感抗大于系统的总对地电容的容抗, 则 $I_L < I_0$ , 这种情况便是欠补偿, 这时,  $k < 1$ ,  $\nu > 0$ , 在接地处有残余的电容性的欠补偿电流。

反之, 如果消弧线圈的感抗小于系统的对地容抗, 则 $I_L > I_0$ , 这种情况叫做过补偿, 这时,  $k > 1$ ,  $\nu < 0$ , 在接地处有残余的电感性过补偿电流。

不论欠补偿或过补偿, 都可以减少故障电流而达到减小中性点位移过电压的目的。但是, 在实际上都采用过补偿的方式, 因为当过补偿时 $I_L > I_0$ , 消弧线圈保留有一定的裕度, 即使将来电力网发展, 对地电容增加, 原有消弧线圈还可以使用。如果采用欠补偿方式, 则在运行方式变更而切除部分线路时, 整个网络的容抗减少, 便可能变得接近完全补偿的方式, 从而出现不容许的谐振过电压。按规定, 只有当消弧线圈容量不足时, 才允许短时间以欠补偿方式运行, 并脱谐度一般不宜超过10%。

在选择消弧线圈的容量时, 应根据上述原则并考虑电力网五年左右的发展远景, 按照下式进行计算:

$$W_k = 1.35 I_0 \frac{U_0}{\sqrt{3}} \quad (1-8)$$

式中  $W_k$ ——消弧线圈的容量 (千伏安);

$I_0$ ——接地电容电流 (安);

$U_0$ ——电力网的额定电压 (千伏)。

接地电容电流 $I_c$ 还可近似地按下式估计:

架空线网络: 
$$I_c = \frac{UL}{350} \quad (1-9)$$

电缆网络: 
$$I_c = \frac{UL}{10} \quad (1-10)$$

式中  $U$ ——线电压(千伏);

$L$ ——电压 $U$ 下的电网总长度(公里)。

当架空线路上装设有架空地线时,  $I_c$ 值约增大20%左右。

为了调节补偿度, 一般的消弧线圈制造成最大补偿电流和最小补偿电流之比为2:1或2.5:1, 通常在这个范围内装有5~9个分接头供调节用。

### 三、中性点直接接地的三相系统

中性点直接接地的三相系统, 也叫大电流接地系统, 如图1-8所示。系统单相一点(如图中 $d$ 点)接地时, 通过接地点的短路电流 $I_d^{(1)}$ 很大, 要烧坏电气设备。因此, 发生接地故障后, 电力网不能再继续运行供电, 此时继电保护应瞬时动作, 使开关跳闸, 切除故障。

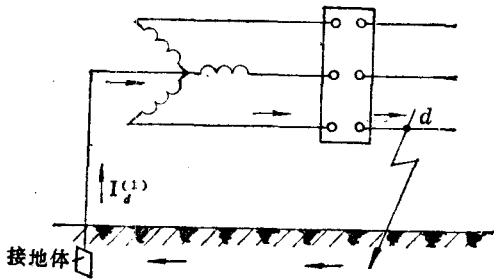


图 1-8 中性点直接接地系统

中性点直接接地电力网的主要优点是单相接地时中性点的电位接近于零, 非故障相的对地电压接近于相电压, 可以使电力网的绝缘水平和造价降低。目前, 我国对110千伏及以上的电力网都采用中性点直接接地。

### 四、各种中性点接地方式的比较与选择

中性点接地方式是电力系统中的一个综合性问题。在选择中性点接地方式时,

主要考虑以下几个方面。

#### 1. 电气设备和线路的绝缘水平

中性点接地方式对于电力网的过电压及电气设备和线路的绝缘水平有很大影响。电气设备和线路的绝缘水平, 除与最大工作电压有关以外, 主要决定于各种过电压的大小。对小接地电流电力网如中性点不接地系统而言, 最大长期工作电压或可能遭受的过电压均较中性点直接接地的系统要大。所以, 从过电压与绝缘水平的观点来看, 中性点直接接地的系统较好。降低绝缘水平具有的经济意义, 随额定电压的不同而异。在110千伏以上的高压电力网中, 变压器等电气设备的造价大约与其绝缘水平成比例增加。在采用中性点直接接地时, 设备造价大约可降低20%左右。但是, 在3~10千伏的电力网中, 绝缘经费占总费用的比例较小, 采用中性点直接接地方式的意义不大。

#### 2. 继电保护工作的可靠性

在中性点不接地或经消弧线圈接地的电力网中, 单相接地电流往往比正常负荷电流小