

第一章 水电站及电力系统概述

第一节 电力工业发展简述

一、我国电力工业发展概况

电力工业属于能源工业。能源分为一次能源和二次能源。直接从自然界取得的能源称为一次能源，如煤、石油、天然气、水能等。二次能源是一次能源经过加工、转变后得到的产品，如电能等。电能具有便于输送、分配、使用以及极易转变成其他形式的能量等特点，现已作为现代社会生产的动力被广泛使用。同时，由于现代电力科学的发展，在生产过程现代化以及人民生活水平提高方面，电能的应用已达到相当高的水平。可以说在现代生活的一切领域，电能已经成为不可缺少的二次能源。电力是工业的先行，是衡量一个国家国民经济发展水平的重要标志。为了加快我国社会主义经济建设，实现跨世纪的宏伟目标，电力工业必须有一个较高的发展速度。

解放前，旧中国的电力工业非常落后，全国电力总装机容量仅 185 万 kW，年发电量只有 43.1 亿 kW·h。发电厂大多数集中在东北和沿海的几个大城市，设备陈旧，类型庞杂，效率低，电能的规格也不能统一。

中华人民共和国成立以来，随着国民经济的恢复和发展，特别是改革开放以来，我国的电力工业得到了迅速的发展。到 1996 年底，全国电力装机总容量已达 23654 万 kW，到 1997 年底，年发电量已达 11132.86 亿 kW·h，均跃居世界第二位。

我国目前已能制造 60 万 kW 的汽轮发电机组和 32 万 kW 的水轮发电机组，最高输送电压等级为 500kV，750kV 超高压直流输电线路正在研制和设计中。除了继续兴建大型的坑口火电站外，我国正在兴建目前世界上最大的水电站——长江三峡水电站；除已建成的大亚湾核电站和秦山核电站一期外，我国还在兴建秦山核电站二期和广东岭澳核电站。我国电力工业正以前所未有的发展速度向前发展，成为国民经济发展的强大动力。

我国是能源丰富的国家，仅水电资源可开发的就有 3.78 亿 kW，居世界首位。此外，我国的煤、石油、天然气等资源的蕴藏量也很丰富。虽然我国的年发电量在世界排位较前，但人均用电量还是比较低。而且，能源开发在结构上还不是很合理，开发和利用的效益还有待提高。这些都是摆在电力工作者面前的光荣而艰巨的任务。

二、我国小水电发展概况

1986 年 4 月在我国杭州召开的国际小水电会议上对小水电作了如下的定义。小水电的含义包含着两个方面的内容：一是小水电的范畴，这是就有利于加强小水电的管理而言的；二是水电站装机容量的划分，这是就有利于加快小水电的建设而言的。

中国小水电的范畴，是指在一个县的范围内，其发电、供电和用电的统一，小水电的建设和管理的统一，电站、线路、负荷的同步发展，构成了中国小水电范畴的具体含义。小水电装机容量的划分，目前系指单机容量 6000kW 及以下，电站装机容量 1.2 万 kW 及以下。以小水电供电为主要电源的地方电力网，电压等级主要为 35、10kV 及 0.38kV。电站

和配套的小电网构成了小水电的具体含义。

我国小水电资源十分丰富，据普查，全国小水电资源理论蕴藏量为 1.5 亿 kW 其中可开发的为 0.7 亿 kW。自中华人民共和国成立以来，小水电及地方电网的发展速度快、规模大，其数量和容量均居世界首位。每年平均新增小水电装机容量 50 万 kW 以上，到 2000 年，小水电总装机将达到 2400 万 kW。小水电作为一种较有效和较实际的地方能源，在实现地方现代化尤其是农村电气化的进程中起到重要作用，特别是山区电气化，多数是以小水电为主要电源的。

我国一贯重视和支持小水电建设，制定了相应的一整套发展小水电的政策，并不断完善。近年来，又推行了“三自”政策，即“自建、自发、自用”，明确规定地方政府、企业或当地居民投资建造小水电站后有权管理电站，自用所发电量。这一政策使得小水电的发展充满活力，与之相适应的设备制造部门也得到发展。目前，生产小型水轮发电机组的厂家有 100 个左右，年生产容量达 100 万 kW 以上。在人才培养方面，全国现有二十多所中等专业学校和数十所技工学校开设小水电专业。所有这一切，必将使我国小水电事业进入一个蓬勃发展的新时期。

第二节 发电厂的类型及其生产过程

一、发电厂类型

发电厂是将自然界蕴藏的各种一次能源转换为电能（二次能源）的工厂。

发电厂按它所利用的能源不同，可分为水力发电厂、火力发电厂、核能发电厂以及风力发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂、潮汐发电厂、沼气发电厂等类型。目前，电力系统主要由火力发电厂、水力发电厂以及核能发电厂等组成。

二、水力发电厂及其生产过程

水力发电厂是利用水流的位能来生产电能。当控制水流的闸门打开时，水流沿着压力管道进入水轮机蜗壳室，冲动水轮机，带动发电机发电。其能量转换过程是：水流位能→机械能→电能。由于水电站的发电容量与水电站所在地上下游的水位差（即落差，也称水头）和流过水电站水轮机的水量（即流量）的乘积成正比，所以建设水电站，必须用人工的办法来提高水位。最常用的办法，就是在河流上建筑一个很高的拦河坝，形成水库，提高上游水位，使坝的上下游形成尽可能大的落差，电站就建在堤坝的后面。这种水电站叫做堤坝式水电站，我国一些大型水电站属于这种类型。另一种提高水位的办法，是在具有相当坡度的弯曲河段上游筑一低坝，拦住河水，然后利用沟渠或隧道，将水直接引至建在河段末端的水电站。这种电站称为引水式水电站。还有一种电站，由高坝和引水渠道分别提高一部分水位，是上述两种电站的综合，称为混合式水电站。上述水电站的分类是按集中落差的方式来划分的。按主厂房的位置和结构来划分，可分为坝后式、坝内式、河床式、地下式等数种。按运行方式划分，还可分为有调节水电站、无调节（径流式）水电站和抽水蓄能电站。抽水蓄能电站是利用夜间用电低谷或丰水期的剩余电力，使水轮机以水泵方式工作，将下游的水抽回到水库内积蓄，以便峰荷或枯水时发电。

水力发电有如下特点：

(1) 综合利用、梯级开发。开发水电可使发电、防洪、灌溉、航运、给水、渔业等方面的任务得到合理解决，综合利用。还可以因地制宜，将整条河流分成若干河段，分别修建水力枢纽，施行梯级开发。

(2) 生产效率高、发电成本低。中小型水电厂的发电效率约为 80%~90%，而火电厂的发电效率仅 30%左右，故水力发电能做到高效率地使用一次能源。水电站使用的是河流中年复一年、再生不竭的水资源，不需要消耗燃料，从而节省开采和运输燃料的资金和劳力。

(3) 机组启动快，宜担任调峰、备用任务。水电机组从静止状态启动到满负荷运行，正常情况下只需 4~5min，特殊情况下还可以缩短到 1min 左右；而火电机组则往往需要数小时，而且机组参数越高，容量越大，所需时间越长。故水电机组能适应负荷的急剧变化，宜承担电网的尖峰负荷，承担调峰任务。

(4) 有利于环境保护。水电站生产用水可以回收，对环境不会造成化学污染和热污染。合理设计的水电站还可以美化环境，改善生态。

(5) 投资大、工期长。修建水电站的施工工程量大，需修建高坝等建筑物，而且常常要淹没大片土地，需进行移民、搬迁企业、改建道路及砍伐森林等代价昂贵的工作。因此，开发水电与火电相比，投资大，建设周期长。

(6) 受自然条件影响大。水电站生产、建设都受自然条件的限制。河流的水文、地理、地质条件各不相同，水电开发必须因地制宜。随季节和气象条件的改变，水电站发电所依靠的降雨量也是变化的。因此，水电厂的发电量受自然条件影响较大。

三、火力发电厂及其生产过程

火力发电厂是利用燃料的化学能来生产电能。我国的火电厂以燃煤为主。为了提高燃料的效率，现代火电厂都把煤块粉碎成煤粉燃烧。煤粉在锅炉的炉膛内充分燃烧，将锅炉内的水加热成高温高压的水蒸气，推动汽轮机转动，使与它联轴的发电机旋转发电。其能量转换过程是：燃料的化学能→热能→机械能→电能。现代火电厂一般都考虑了“三废”（废渣、废水、废汽）的综合利用，不仅发电，而且供热。这种兼供热能的火电厂，称为热电厂或热电站。

四、原子能（核电）发电简介

原子能发电厂又称核能发电厂，简称为核电厂。它主要是利用原子核的裂变能来生产电能。它的生产过程与火电基本相似，只是以核反应堆（俗称原子锅炉）代替了燃煤锅炉，以少量的核燃料代替大量的煤炭。其能量转换过程是：核裂变能→热能→机械能→电能。由于核能是极其巨大的能源，而且核电站的建设具有重要的经济价值，所以世界上很多国家都很重视核电站的建设，核电发电量的比重正在逐年增长。我国也确定要适当发展核电的政策，并已兴建了广东大亚湾核电站（180万 kW）和浙江海盐秦山核电站（30万 kW）。还有一些核电站正在建设中，如 1996 年 6 月已开工的秦山核电站二期工程，计划建成两台 60 万 kW 的机组；1997 年 5 月开工的广东岭澳核电站，计划建成两台 100 万 kW 的机组等。

第三节 电力系统简介

为了充分利用动力资源，在有水力资源的地方建造水电站，在有燃料资源的地方建造

火电厂，以减少燃料运输，降低发电成本。但是这些有动力资源的地方，往往离用电中心较远，所以必须用高压输电线路进行远距离输电，如图 1-1 所示。

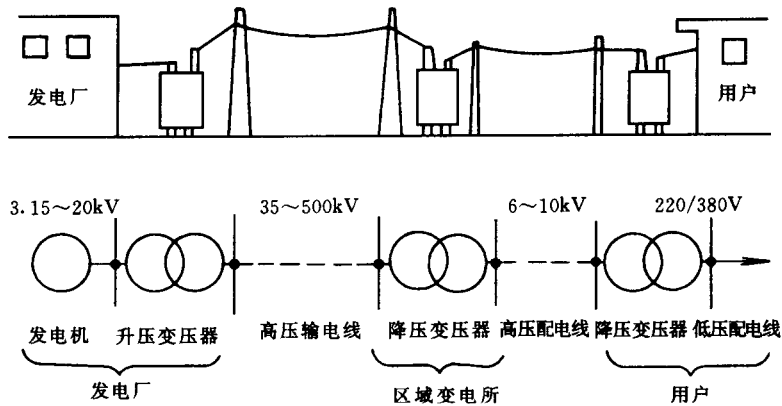


图 1-1 从发电厂到用户的送电过程示意图

由各种电压的电力线路将一些发电厂、变电所和电力用户联系起来的一个发电、输电、变电、配电和用电的整体，叫做电力系统。图 1-2 是一个电力系统原理性电路图。图中核电

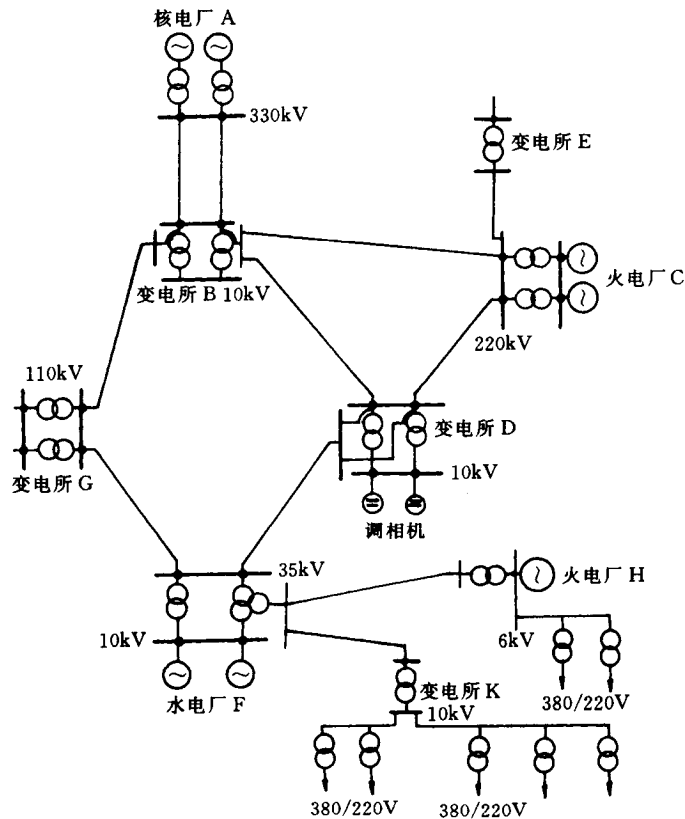


图 1-2 电力系统原理性电路图

站 A 大量的电能经过 330kV 超高压输电线路送到枢纽变电所 B。变电所 B 装设两台自耦变压器，与 220kV 及 110kV 系统联系，并用 10kV 电压给变电所附近用户供电。220kV 系统中包含有变电所 B、火力发电厂 C 和变电所 D，220kV 输电线路构成一环形电网以提高供电可靠性。变电所 D 可以从核电厂 A 及火电厂 C 取得电源。火电厂 C 还给变电所 E 供电。变电所 D 与水电厂 F、变电所 B 之间用 110kV 输电线路连接，110kV 输电线路也构成一环形电网。变电所 D 的 10kV 母线上还装有两台调相机，供给本地区的无功负荷，可以减小从发电厂 A 及 C 送来的无功功率，从而降低了线路损耗。

水电厂 F 是地方性电厂，周围有集中的工业负荷，该电厂可满足附近工业负荷的需求。火电厂 H 是地方性小厂，主要用 6kV 电压给附近用户供电，并用 35kV 输电线路与水电厂 F 联系。水电厂 F 还用 35kV 输电线路送电给地区变电所 K。

10kV 及以下的配电线路（图中仅画出一部分），送电给各用户，用户再用配电变压器将电压降为 380/220V 供动力和照明用电。

建立统一电力系统的作用：

(1) 可以充分利用动力资源和充分发挥各类电厂的作用。各类型电厂只有并入系统才能实现经济运行；夏季丰水期可以让水电厂担任基本负荷尽量多发电，冬季枯水期让水电厂担任系统的尖峰负荷，而让容量大、效率高的火电厂担任基本负荷。这样可以提高整个系统运行的经济性，充分利用水利资源，减小火电厂煤耗。

(2) 可以减小备用容量。例如孤立运行的发电厂为了代替损坏或检修机组的工作，必须装设各自的备用机组，因而所需要的总备用容量很大。建立系统后，就不必在每个发电厂中都装备用机组，只需在系统中有公用的备用机组（备用容量）就可满足各电厂的要求，因而减小了设备的投资。

(3) 可以大大提高供电的可靠性。因为当一个电厂发生故障时，其所带负荷可以分配给其他发电厂。

电力系统运行的基本要求：

(1) 保证完成国家的生产计划，满足最大负荷需要。

(2) 保证供电的可靠性。

(3) 保证供电质量。即保证电力系统的频率和电压不超出规定的容许变动范围（频率不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，电压不得超过 $\pm 5\%$ ）。

(4) 保证运行经济合理。

(5) 保证运行人员和设备的安全。

电力系统是一个十分复杂的系统，其中任何一个环节出现不正常运行情况或发生故障，都会影响整个系统的正常工作，为此必须设置统一的中心调度机构进行指挥，以保证满足电力系统基本要求。

第四节 水电站电气设备概述

为了便于学习本书以后章节，下面对发电厂和变电所的电气设备及其一些基本概念作一简单介绍。

一、主要电气设备分类及其用途

水电站一次系统的主要工作是生产、输送和分配电能。运行人员必须根据水库管理和负荷变化等方面的要求，启动、调整和停止机组；完成改变运行方式所必须的各种切换操作；不间断地监视主要设备的工作，及时地发现事故、故障以及工作中的错误并采取相应的措施加以解决；周期性地检查和维护主要设备，定期检修设备，以确保设备运行时安全可靠。根据生产上的要求，水电站一次系统装设有下列主要电气设备。

(一) 一次电气设备

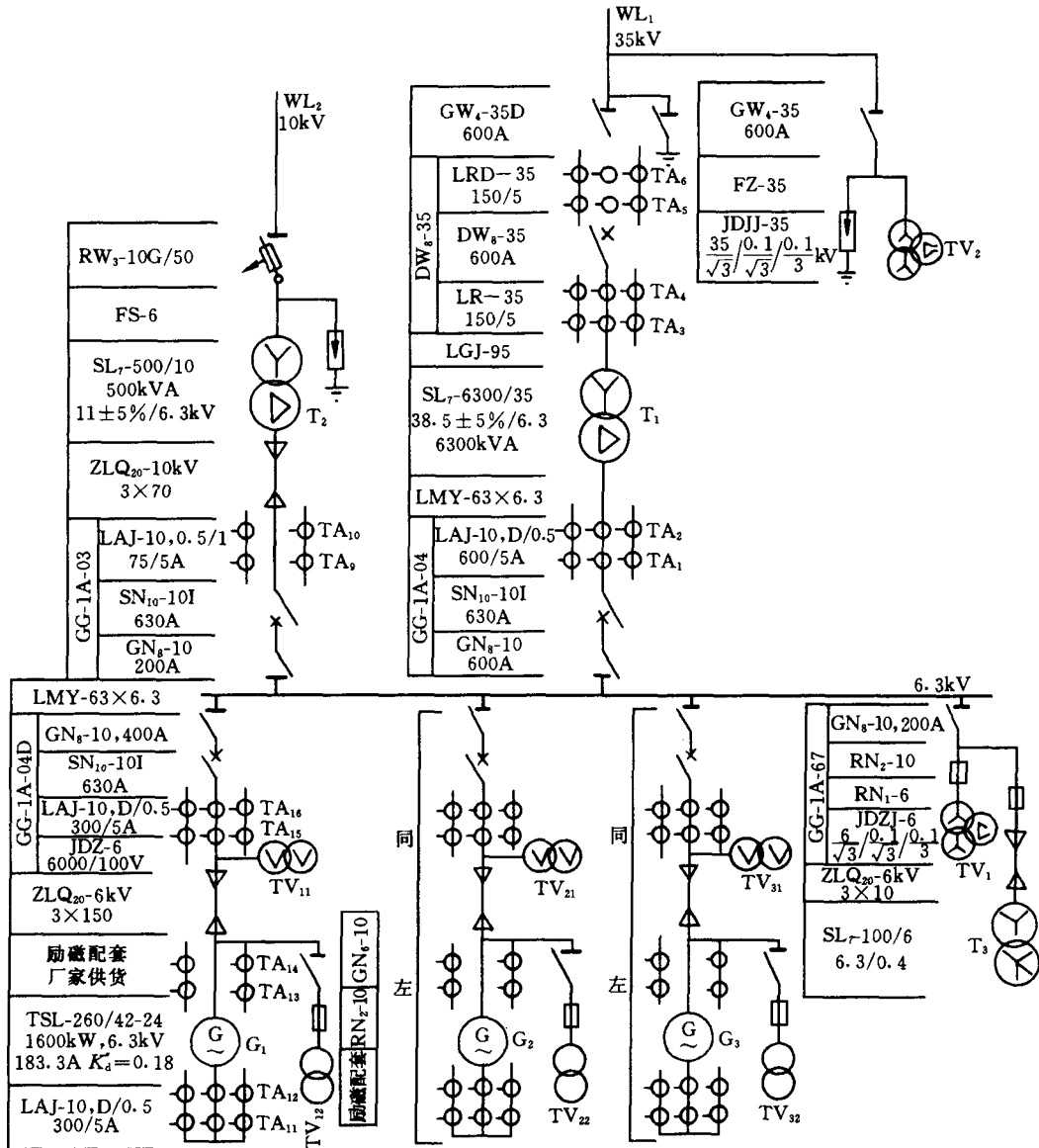


图 1-3 水电站电气主接线全图

用于生产、转换、传输和分配电能的设备称为一次设备。包括发电机、变压器、断路器、隔离开关、低压开关、母线、电力电缆、电抗器、避雷器、熔断器、电流互感器、电压互感器等。

(二) 二次电气设备

凡是对一次设备的工作进行监察、测量和控制保护的设备都属于二次设备的范围。例如仪表、继电器、自动控制设备、信号设备及控制电缆等都属于二次设备。













二、电路图的分类及其举例

水电站一次系统中，各种电气设备根据工作的需要和它们的作用，依一定的次序用导线连成的电路称为电气接线图或电路图。其中一次设备连成的电路称为电气主接线或一次电路，它大体上能表示电能的生产、汇集和分配的电气全过程，构成发电站的主体。二次设备连成的电路称为二次电路。



















电路图用一定的图形符号描绘成三线图或单线图，主接线通常画成单线图形式。下面以某水电站主接线图为例，说明各种主要电气设备的连接情况，如图 1-3 所示。

图 1-3 所示为一座装有三台发电机的水电站，电能通过主变送入 35kV 电网，近区变用 10kV 电压等级向近区供电。在水电站中，发电机 6.3kV 电压配电装置、厂用变压器、低压厂用配电装置，一般安装在副厂房内，有的则装在主厂房内发电机附近。升压变压器、高压配电装置通常在户外安装，称为户外配电装置。而电气主接线上要求的二次系统设备，通常装在专门的主控室内。图中一些内容将在后续的章节中逐步地学习到，主要一次设备的图形符号和文字符号见表 1-1。

表 1-1 主要一次设备的圈形符号和文字符号

序号	设备名称	图形符号	文字符号	序号	设备名称	图形符号	文字符号
1	交流发电机		G 或 GA	7	自耦变压器		T 或 TA
2	直流发电机		G 或 GD	8	电抗器		L
3	交流电动机		M 或 MA	9	分裂电抗器		L
4	直流电动机		M 或 MD	10	避雷器		F
5	双绕组变压器		T 或 TM	11	火花间隙		F
6	三绕组变压器		T 或 TM	12	电力电容器		C

续表

序号	设备名称	图形符号	文字符号	序号	设备名称	图形符号	文字符号
13	整流器		U	22	断路器		Q 或 QF
14	电流互感器		TA	23	负荷开关		Q
15	双绕组电压互感器		TV	24	具有自动释放的负荷开关		Q
16	三绕组电压互感器		TV	25	接触器		K 或 KM
17	输电线路		W	26	具有自动释放的接触器		K 或 KM
18	母线		W	27	低压断路器		QF
19	电缆终端头		W	28	熔断器		F 或 FU
20	隔离开关		Q 或 QS	29	跌落式熔断器		FU
21	隔离插头和插座		Q 或 QS	30	接地		

思 考 题

1. 发电厂有哪些类型？
2. 水电站按水头聚集方式划分有哪些基本类型？
3. 试述水电站的生产过程。
4. 为什么要建立统一的电力系统？
5. 电力系统运行必须满足哪些基本要求？
6. 何谓一次电气设备、二次电气设备？
7. 熟悉并掌握主要一次设备的图形符号和文字符号。

第二章 电力系统中性点运行方式

电力系统中性点是指三相绕组作星形连接的发电机或变压器的中性点。我国电力系统中性点运行方式主要有：中性点不接地、经消弧线圈接地、直接接地等。前两种由于发生单相接地时接地电流小，称为小接地电流系统；后一种由于单相接地时（单相短路）接地电流很大，故称为大接地电流系统。

电力系统中性点的运行方式不同，系统的技术特性也不同。因而，它对供电的可靠性、系统的过电压和绝缘配合、继电保护和自动装置的正确动作、通信的干扰等均有很大的影响。下面我们分别讨论这三种电力系统中性点的运行方式。

第一节 中性点不接地系统

在三相电力架空线路中，每两相导线之间及各相导线与地之间都存在电容，电容的大小决定于线路的结构及长度。这种电容沿导线全长均匀分布，当线路带电时则在上述分布电容中有电容电流流过。为了便于讨论，假设三相系统是对称的，并将每相导线与地之间沿线路全长均匀分布的电容用连接在线路中央的集中电容 C 代替，如图 2-1 (a) 所示。各相之间的电容及由它所决定的电容电流对我们讨论的结果没有影响，在此不作讨论。图 2-1 (a) 中左侧为电源，它可以是发电机的三相绕组，也可能是变压器的二次侧三相绕组。

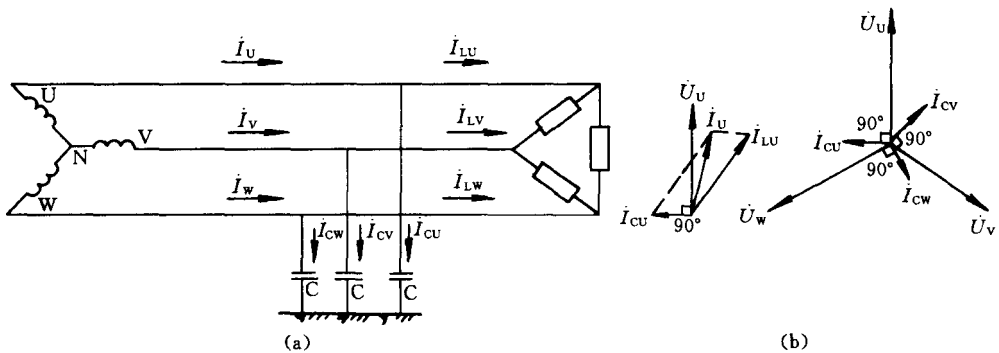


图 2-1 中性点不接地系统的正常工作状态
(a) 电路图；(b) 向量图

一、中性点不接地系统正常运行

正常运行时，各相对地的电压是相电压，相电压 U_u 、 U_v 、 U_w 对称，数值 U_{xg} 。如线路经过完善的换位，三相对地电容是相等的，则各相对地电容电流也是对称的，如图 2-1 (b) 中 I_{cu} 、 I_{cv} 、 I_{cw} 。电源各相电流 I_U 、 I_V 、 I_W 分别等于负荷电流 I_{LU} 、 I_{LV} 、 I_{LW} 与各相对地电容电流的向量和，如图 2-1 (b) 所示，设各相负荷对称，负荷电流相等，又因为三

相对地电容电流对称，故各相负荷电流与电容电流的向量和等于零，地中没有电容电流通过，系统中性点的电位为零。

实际上，由于架空线路的导线排列不对称、换位不完全等原因，各相对地电容是不完全相等的。此外，负荷也很难绝对平衡，所以在正常运行时，中性点的电位可能不为零，会发生中性点位移的现象。但这并不影响我们后面讨论的结论。

二、单相接地故障

某一相导线与地之间的绝缘受到破坏，称为单相接地故障。若接地处相线与地之间的电阻为零，就称为完全接地或金属性接地，否则称为不完全接地。

(一) 单相完全接地（金属性接地）

当一相发生完全接地故障时，如图 2-2 (a) 所示。假设 W 相发生完全接地，这时故障相对地的电压 U_w 变为零，中性点的对地电压变为相电压，非故障两相对地电压值升高到 $\sqrt{3}$ 倍，即变为线电压。

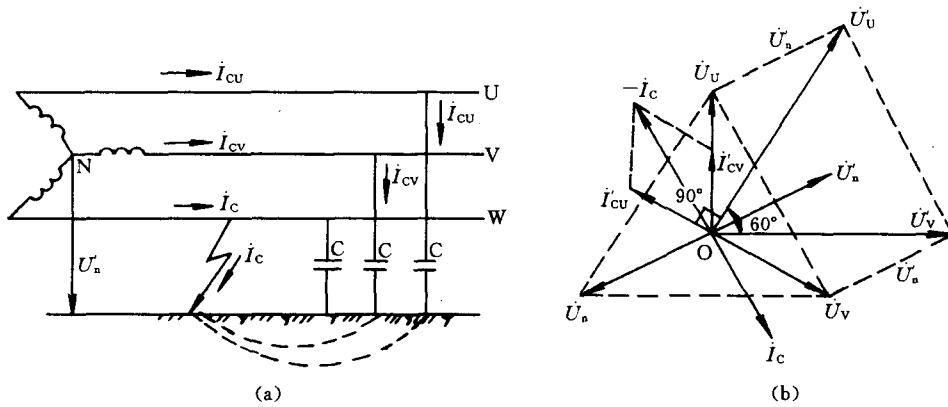


图 2-2 中性点不接地系统的单相接地（未计入负荷电流）

(a) 接线图；(b) 向量图

令中性点对地电压为 U'_n ，则可写出电压方程式

$$U_w + U'_n = 0$$

由此得到

$$U'_n = -U_w$$

此时，U 相对地的电压为 U'_u ，它等于 U 相电压加中性点电压，即

$$U'_u = U_u + U'_n = U_u - U_w$$

V 相对地的电压为 U'_v ，它等于 V 相电压加中性点电压，即

$$U'_v = U_v + U'_n = U_v - U_w$$

图 2-2 (b) 为 W 相发生完全接地时的向量图。由图可见 $U'_u = U'_v = \sqrt{3}U_u$ ， U'_u 与 U'_v 之间的夹角为 60° 。这是中性点不接地的三相系统发生单相接地故障时各相对地电压的变化。

在 W 相发生完全接地时，各相间电压 U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU} 也可由图 2-2 (b) 得到

$$U_{UV} = U_U - U_V = U'_U - U'_V = U'_{UV}$$

$$U_{VW} = U_V - U_W = U'_V - U'_W = U'_{VW}$$

$$U_{WU} = U_W - U_U = U'_W - U'_U = U'_{WU}$$

这说明在中性点不接地的系统中发生一相接地时，线电压不变，三相系统仍然保持对称，可继续运行。

中性点不接地系统发生单相接地时，线电压不变，因而负荷电流没有变化。各相的对地电容电流及故障接地电流 I_C 可由图 2-2 (b) 得出。未接地的 U、V 两相对地电压升高为线电压，即其对地电容电流也由正常运行时的数值加大到 $\sqrt{3}$ 倍，即非故障相的对地电容电流 $I'_{CU} = I'_{CV} = \sqrt{3} I_{CU}$ ，因为 W 相接地，该相对地电容电流被短接，所以 W 相对地电容电流变为零。

由图 2-2 (a) 中的电流方向，则可得

$$I'_{CU} + I'_{CV} + I_C = 0$$

由此得到接地故障电流为

$$I_C = -(I'_{CU} + I'_{CV})$$

I'_{CU} 和 I'_{CV} 分别超前 U'_U 和 U'_V 90° ， I'_{CU} 和 I'_{CV} 两电流之间的夹角为 60° 将它们相加得一 I_C 。W 相接地故障电流 I_C 超前 U_W 90° 。故 I_C 为容性电流，由向量图可得 I_C 的大小为

$$I_C = \sqrt{3} I'_{CU}$$

因为

$$I'_{CU} = \sqrt{3} I_{CU}$$

所以

$$I_C = 3I_{CU}$$

由此可知，当单相接地时流入地中的接地故障电流等于正常时一相对地电容电流的三倍。

若已知每相对地电容为 C ，并设正常运行时的相对地电压 $U_U = U_V = U_W = U_{xg}$ ，则可以得到

$$I_{CU} = \frac{U_{xg}}{X_C}$$

因为 $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ，所以

$$I_C = 3I_{CU} = 3\omega C U_{xg} \quad (2-1)$$

上式说明接地故障电流 I_C 的值与线路的电压、频率和相对地的电容有关，而相对地的电容与线路的结构（电缆或架空线）、线路的长度等有关。

在实际应用中，接地故障电流也可以用下式近似计算。

$$\text{对架空线路} \quad I_c = \frac{UL}{350} \text{ (A)} \quad (2-2)$$

$$\text{对电缆线路} \quad I_c = \frac{UL}{10} \text{ (A)} \quad (2-3)$$

式中 U ——电网的线电压，kV；

L ——电压等级为 U 的具有电联系的线路长度，km。

若某一中性点不接地系统中，具有电联系的同电压等级的线路既有架空线路，又有电缆线路，应分别计算各部分流到故障点的电流，然后把各部分电流相加，即可求出接地故障点的总接地故障电流。

（二）单相不完全接地

某一相发生故障，故障点经过小的电阻接地，称为不完全接地。此时由于接地故障电流在电阻上有压降，故接地相对地电压大于零而小于相电压，非接地相对地电压则高于相电压而低于线电压。接地故障电流也比完全接地时要小。

综上所述，在中性点不接地的三相系统中，发生单相完全接地故障时，接地相对地的电压降低到零，非接地相对地电压升到线电压，线电压则没有改变，三相系统可以继续运行，这就是中性点不接地系统最大的优点。在中性点不接地系统中，线路和电气设备的绝缘水平都是按线电压设计的，虽然非故障相对地电压升高到 $\sqrt{3}$ 倍，对设备的绝缘并不危险。但是，长期带着接地故障点运行可能引起非故障相绝缘薄弱处损坏，造成两相接地短路。所以在中性点不接地系统中，一般都装有绝缘监察装置或继电保护装置，当发生单相接地时，发出接地故障信号，使值班人员尽快采取措施，查找故障点并消除故障。在中性点不接地系统中发生一相接地故障时，允许运行的时间一般不得超过 2h。

接地电流是电容性电流，其大小为正常运行时每相对地电容电流的 3 倍。接地电流将在故障点形成电弧，电弧可能是稳定的或间歇性的。有稳定电弧的单相接地是危险的，因为电弧可能烧坏绝缘或烧坏设备，引起两相甚至三相短路。尤其是在电机或电器内部，一相导体的绝缘损坏，导体与接地的铁芯或外壳之间产生电弧，则电弧烧坏铁芯或外壳就不易修复。而间歇性电弧将导致相与地之间产生弧光过电压，其值可高达 2.5~3 倍相电压峰值。所以电动机或中小容量发电机的接地电流大于 5A 时，应设反映单相接地故障的继电保护，以便在发生单相接地故障时，及时发出信号或使电机跳闸。当单相接地电流为 10A 及以上时，则保护装置一般动作于跳闸。

第二节 中性点经消弧线圈接地系统

一、概述

在中性点不接地系统中，当单相接地电流超过允许值时，电弧就不能自行熄灭，可能出现间歇性的电弧，这就可能使线路发生电压谐振现象。由于电力线路既有电阻和电感，又有电容，因此发生一相弧光接地时，可形成 R—L—C 的串联谐振电路，从而使线路出现过电压（可达相电压 2.5~3 倍），这可能导致线路上绝缘薄弱地点的绝缘被击穿。因此在这种情况下，就必须采取中性点经消弧线圈接地的运行方式来减小接地电流。

二、消弧线圈的工作原理和补偿方式

消弧线圈接地系统如图 2-3 所示。消弧线圈是一个具有铁芯的电感线圈，线圈的电阻很小，电抗很大。铁芯和线圈均浸在变压器油中，外形和单相变压器相似。消弧线圈的铁芯留有间隙，填以绝缘材料，以避免磁饱和。它的线圈有分接头，可以调整匝数，以改变电抗的大小。

中性点经消弧线圈接地的系统，在正常工作时，中性点的电位为零。消弧线圈两端

有电压，所以没有电流通过消弧线圈。当某相（W相）发生金属性接地时，消弧线圈一端与中性点相接，另一端通过大地和接地点与相线接通，两端所受电压正是故障相的电压 U_w 。这时消弧线圈有电感电流 i_L 通过。电流 i_L 经电源的故障相、接地点、大地、消弧线圈、电源中性点形成回路，如图 2-3 (a) 所示。这样，在接地点就同时有接地故障电流 i_L 与 i_c 。 i_L 与 i_c 规定的正方向相同。由上一节内容可知，接地电流 i_c 超前故障相对地电压 U_c 90° ， i_L 滞后 U_c 90° ，两者互相抵消（相互补偿），如图 2-3 (b) 所示。

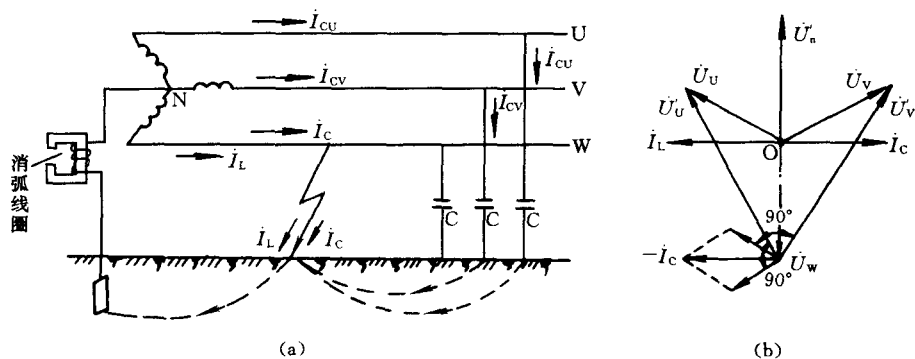


图 2-3 中性点经消弧线圈接地（图中未计入负荷电流）

(a) 接线图；(b) 向量图

如果适当选择消弧线圈匝数，使消弧线圈的电感电流与单相接地故障的接地电流大致相等，可使流过接地点的接地故障电流变得很小，从而减小电弧的危害。

中性点经消弧线圈接地的系统，在发生单相接地时，其电压的变化和中性点不接地系统完全一样，即故障相对地电压为零，非故障相电压升高到 $\sqrt{3}$ 倍。中性点经消弧线圈接地系统各相对地的绝缘水平也是按线电压考虑的。接地前后线电压之间的关系无变化，系统可以继续运行 1~2h。

在单相接地故障时，根据消弧线圈产生的电感电流对容性的接地故障电流补偿程度，可分为三种补偿方式，即完全补偿、欠补偿和过补偿方式。

完全补偿是消弧线圈产生的电感电流刚好等于容性的接地电容电流，在接地故障处的电流等于零，不产生电弧。由上一节可知接地故障电流 $I = 3\omega C U_{xg}$ ，而消弧线圈在系统发生单相完全接地故障时承受的电压为相电压 U_w 。设消弧线圈为纯电感，则此时产生的电流 I_L 的数值为

$$I_L = \frac{U_{xg}}{X_L} = \frac{U_{xg}}{\omega L} \quad (\text{A})$$

式中 U_{xg} ——相电压，V；

L ——消弧线圈电感，H/m；

X_L ——消弧线圈电抗， Ω 。

在完全补偿时， $I_L = I_c$ ，即

$$3\omega C U_{xg} = \frac{U_{xg}}{\omega L}, \quad 3\omega^2 C L = 1$$

所以在完全补偿时，消弧线圈的电感应为

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (2-4)$$

完全补偿的条件，是单相接地时容抗与感抗相等，这样正好满足非故障相回路及消弧线圈部分形成串联谐振的条件。串联谐振的过电压危及电网的安全。因此，系统不仅不采用而且还要避免。

欠补偿是消弧线圈产生的电感电流 I_L 小于接地故障处流过的容性接地故障电流，即 $I_L < I_C$ 。在接地处仍有未被补偿完的容性接地故障电流流过，产生电弧的情况视“ $I_C - I_L$ ”的大小而定。补偿程度到不产生电弧为止。

系统在实际运行中，如运行方式改变，切除部分线路，或发生断线，都可能使得电容电流减小，进而使欠补偿变为全补偿，出现串联谐振过电压。故这种补偿方式在实际中也不采用。

过补偿是消弧线圈的电感电流 I_L 大于接地故障电流 I_C ，即 $I_L > I_C$ 。补偿的程度是使多余的电感电流不致产生电弧。

过补偿可以避免谐振过电压，因此被广泛采用。

第三节 中性点直接接地系统

对于 35kV 及以下电压等级的高压系统，由于绝缘材料费用占总投资的比例较小，相对地的绝缘按线电压考虑，对总投资的影响不是很大，而发生单相接地后还能继续运行的优点显得很突出，所以我国绝大多数都采用小接地电流系统。在 110kV 及以上的电力网中，变

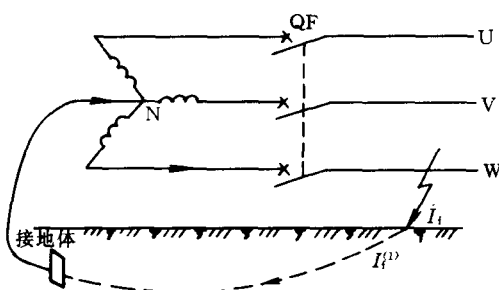


图 2-4 中性点直接接地系统

压器等电器的造价大约与其绝缘水平成正比，降低绝缘水平具有重大的经济意义。所以 110kV 及以上的电力网都把中性点直接接地，称为中性点直接接地系统，如图 2-4 所示。这种系统的中性点的电位因是地电位，某一相与地间的绝缘损坏，该相的电源经过损坏处与地短接，形成单相短路。由于中性点的电位固定为零，单相短路时，非故障相对地电压不升高，因而各相对地的绝缘水平决定于相电压，这就大大降低了电力网的造价，网络的电压等级愈

高，其经济效益愈显著。

当中性点直接接地系统发生单相短路时，短路电流 $I_t^{(1)}$ 很大，危害严重，事故线路不能继续运行，在继电保护作用下，必须迅速切除，导致用户供电中断。因此，在中性点直接接地的电网中，在输电线路路上装设自动重合闸装置来提高线路的供电可靠性。当发生单相短路事故时，继电保护使断路器自动断开，自动重合闸装置又使断路器经过 0.5s 左右自动重新合闸。如果故障为瞬时的，则线路接通后继续正常运行；如果故障为永久性的，则继电保护再次使断路器跳闸中断供电。

在我国，110kV 及以上的系统中性点都是采用直接接地运行方式。

第四节 中性点运行方式的比较和应用范围

一、中性点运行方式的比较

中性点运行方式是电力系统中的一个综合性的问题。中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统、中性点直接接地系统可从以下三个方面加以比较。

(一) 供电的可靠性和故障的影响

小接地电流系统中，当发生单相完全接地故障时，接地相对地的电压降低到零，非接地相对地电压升到线电压，线电压则没有改变，三相系统平衡也没有破坏，可以继续运行 1~2h 通过消弧线圈可将接地电流控制在较小范围内不致于造成危害。相反，中性点直接接地系统单相接地时产生很大的单相短路电流，任何部分发生单相接地，必须迅速将该部分切除，因而引起供电的中断。短路电流可能造成故障范围内的设备损坏，甚至因短路时电压的急剧下降而造成系统稳定的破坏。

因此，从供电可靠性和故障的影响来看，小接地电流系统，特别是经消弧线圈接地的系统具有明显的优越性。

(二) 对系统绝缘水平的要求

从前面分析可知，小接地电流系统，最大长期工作电压或可能遭受的过电压均比中性点直接接地系统要高。所以对系统绝缘水平要求来看，显然大接地电流系统要优于小接地电流系统。随着电压等级升高这种优越性将更加明显。

(三) 对通讯及信号系统的干扰

当发生单相接地故障时，小接地电流系统，特别是经消弧线圈接地系统，接地电流较小，因此对通信及信号系统的影响较小。而中性点直接接地系统的单相短路电流，将形成一个较大干扰源，短路电流愈大，干扰愈严重。因此，从抗干扰角度而言，小接地电流系统优于大接地电流系统。

从上述分析可知，中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统、中性点直接接地系统，不能一概而论地说其优劣，而应根据具体的条件加以分析比较，权衡利弊加以应用。

二、中性点运行方式的应用范围

(1) 我国 110kV 及以上电压电网，系统绝缘造价的影响是主要的，所以采用中性点直接接地方式。

(2) 下列情况：电压 20~60kV，接地故障电流 $I_c \leq 10A$ ；电压为 6~10kV，接地故障电流 $I_c \leq 30A$ 的系统。从供电的可靠性出发，采用中性点不接地方式。

(3) 下列情况：电压 20~60kV，接地故障电流 $I_c > 10A$ ；电压为 6~10kV，接地故障电流 $I_c > 30A$ 的系统；6~10kV 的发电机，接地故障电流 $I_c > 5A$ 。从供电可靠性出发，同时考虑到在接地故障点可能形成间歇电弧或稳定电弧的因素，采用中性点经消弧线圈接地方式。

(4) 供动力和照明用电的 380/220V 系统，则采用中性点直接接地的三相四线制。

思 考 题

1. 什么是电力系统的中性点？它有哪些运行方式？各有什么优缺点？说明各自适用范围。
2. 在中性点不接地的三相系统中，当发生单相接地时，故障相对地电压、中性点对地电压、非故障相对地电压和线电压有什么变化？接地电流是什么性质？
3. 消弧线圈如何消除接地电容电流？一般采取什么补偿方式？为什么？
4. 某 10kV 电网，架空线路总长度 20km，电缆线路总长度 10km。试求此中性点不接地系统发生单相接地时的电容电流，并判断此系统的中性点需不需要改为经消弧线圈接地。
5. 中性点直接接地系统有何优缺点？为了提高供电可靠性一般采取哪些措施？

第三章 水电站电气主接线及厂用电接线

第一节 概 述

一、电气主接线的类型及其应用

如第一章第四节所述，电气主接线是由电气装置各元件（发电机、变压器、断路器、隔离开关、互感器、电抗器、母线和电力电缆等）组成，按其作用和相互连接顺序，表示生产、汇集和分配电能的电路。绘制成的电路图称为电气主接线图。按绘图的方法可分为单线图和三线图，一般以单线图表示。

单线图是简化的电气主接线电路，只表示电气装置一相的连接情况。局部图面（如电流互感器）由于三相不尽相同，应以三线表示。若有中性线时，在图上用实线表示，使画出的电气主接线图清晰易看。在电气主接线图中，所有电器均应根据国家标准电气符号和标号并按它们所在的电路无电压存在及无任何外力作用的正常状态画出，即断路器和隔离开关应画出它们的断开位置。假如违反这个原则，应在图上注明。在电气主接线图上还应标出主要设备的型号和技术参数，如图 1-3 和图 3-1 所示。

电气主接线图广泛地用在电气装置的设计和运行操作过程中。通常将整个电气装置的实际运行情况作成模拟单线图称为操作图，也叫模拟图。在操作图中仅表示出主接线图中的主要电气设备。图中断路器和隔离开关的开合状态是对应于实际运行的断通位置。当变换主电路的运行方式时，运行值班人员应依据操作电路图准确地进行电气装置的倒闸操作，操作后应及时在图上相应改正，使其符合现场实际运行情况。这样便于运行值班人员及时全面掌握和分析现场情况，迅速准确处理运行问题，也可以在操作实际设备之前先在模拟图上作模拟操作演示。当设备检修需要挂接地线时，应在操作图上按实际挂接地线的位置放置接地线的标志，如图 3-2 所示为相应图 1-3 的主接线模拟图。主接线模拟图一般放在电站中央控制室的墙上，便于观察和操作。

二、对电气主接线的基本要求

电气主接线是水电站电气部分的主体。它与电力系统、枢纽条件、电站动能参数以及电站运行的可靠性、经济性等密切相关，同时对设备选择、电气布置、继电保护和控制方式等都有较大的影响。要正确处理它们之间的关系，通过技术经济比较，合理地选定电气主接线方案。

对电气主接线的基本要求，有以下几个方面：

(1) 满足用户或电力系统的供电可靠性和电能质量的要求。水电站一般距负荷中心较远，小型水电站的单机容量较小，一般在电力系统中的地位无足轻重，但在本地电网中可能是骨干电站。属于主力电站的电气主接线，在供电可靠性和电能质量方面，应有较高的要求。同时也应考虑到小型水电站容量有限，装机台数大都不超过 4 台，相应的出线回路数较少，近区负荷多为小工业、农业以及小城镇用电，对供电的可靠性要求相对不高。即使与地方电网相连，升高电压等级最高不超过 110kV，主变压器台数也不多，因此小型水