

第1章 工业企业供电概论



【课程内容及要求】

- 内容: (1) 说明工厂供电的意义及对从业人员的要求;
(2) 介绍各类典型的工厂供电系统及电力负荷的基本知识;
(3) 讲解电力系统的电压和电力系统的中性点运行方式。
- 要求: (1) 使学生理解工厂供电的意义, 牢记对从业人员的要求;
(2) 使学生理解工厂供电系统中相关的概念和中性点运行方式的意义。

1.1 工厂供电的意义及要求

工厂供电, 就是指工厂所需电能的供应和分配, 也称工厂配电。电能是现代工业生产的主要能源和动力, 也是最清洁的能源之一。电能的输送和分配既简单经济, 又便于控制、调节和测量; 既有利于实现生产过程自动化, 更有利于环境保护。高新技术的应用, 更依赖于可靠、优质的电力供应。因此, 电能在现代工业生产及整个国民经济生活中极为重要且应用十分广泛。

工业生产应用电能和实现电气化以后, 能大大提高生产效率, 提高产品质量。但是, 工厂的电能供应如果突然中断, 将对工业生产造成严重的后果, 甚至可能发生重大的设备损坏或人身伤亡事故。由此可见, 搞好工厂供电工作对于保证工业生产的正常进行和实现工业现代化具有十分重大的意义。

工厂供电工作要很好地为工业生产服务, 切实保证工厂生产和生活用电的需要, 并要做好节能工作, 所以必须满足以下几点基本要求。

(1) 安全。电力运行中安全永远是第一位的, 因此在电能的供应、分配和使用中, 不能发生人身和设备事故。

(2) 可靠。应满足电能用户对供电可靠性的要求。

(3) 优质。应满足电能用户对电压频率和波形等的质量要求。

(4) 经济。供电系统的投资要少, 运行费用要低, 并应尽可能地节约电能和减少有色金属的消耗量。

供电工作的从业人员应该具有高度的“安全”意识, “安全运行”是发展生产的基本保证, 从业人员自身必须要模范执行国家颁布的电力安全工作规程及相关的安全技术操作规定。供配电从业人员对企业电力系统能否安全运行负有一定的责任, 维护、检修人员必须按规定对企业的各类电气设备进行及时、定期的维护和检查, 保证设备工作状态良好, 不允许以各种理由耽误设备的检修, 使设备处于“带病”运行状态; 运行、值班人员必须按规定认真记录仪表数据, 填写各类报表, 及时向主管部门报告电力运行情况, 保证电力系统处于经济运行状态, 不允许电力系统长期超负荷运行。

供电工作的从业人员还应该具有强烈的“节能”意识。“节能减排”将是我国长期执行的

经济政策,为使我国可持续发展,开发新能源、合理地使用现有能源,是我们需要遵守的“法则”。供电工作应合理地处理局部和全局、当前和长远等关系,应具有全局观点,统筹兼顾,长远发展。

本课程是以中小型机械类工厂内部的电能供应和分配问题为典型,讲述供配电系统相关的基础理论和岗位技能,使学生初步掌握中小型工厂供电系统运行维护所必需的基础理论和基本技能,为今后从事工厂供电技术工作奠定一定的基础。本课程实践性较强,学习时应注重理论联系实际,培养实际应用能力。

1.2 工厂供电系统及其电源和负荷

1.2.1 工厂供电系统

工厂供电系统是指工厂所需的电力电源从进厂起到所有用电设备电源入端止的整个电路。

大部分中小型工厂^①的电源进线电压为 10 kV (或 6 kV),某些大中型工厂的电源进线电压可为 35 kV 及以上,某些小型工厂可以直接采用低压进线。所谓“低压”是指低于 1 kV 的电压,一般来说 1 kV 以上的电压称为“高压”^②。下面介绍几种典型的工厂供电系统。

1. 具有高压配电所的工厂供电系统

图 1.1 是一个典型的中型工厂供电系统图^③,图 1.2 是其平面布线图。为了使图形简明,系统图、布线图及后面课程中涉及的主电路图,一般都只用一根线来表示三相线路,即绘成“单线图”的形式,此处绘出的系统图未绘出其中的开关电器,但示意性地绘出了高、低压母线上和低压联络线上装设的开关。

从图 1.1 可以看出,该厂的高压配电所有两条 10 kV (或 6 kV) 的电源进线,分别接在高压配电所的两段母线上。所谓“母线”就是用来汇集和分配电能的导体,又称“汇流排”。这种利用一台开关分隔开的单母线接线形式,称为“单母线分段制”。当一条电源进线发生故障或进行检修而被切除时,可以闭合分段开关而由另一条电源进线来对整个配电所的负荷供电。这种具有双电源的高压配电所最常见的运行方式是:分段开关正常工作情况下是闭合的,整个配电所由一条电源进线进行供电,通常来自公共高压配电网;而另一条电源进线则作为备用,通常是从邻近单位取得备用电源。

该高压配电所有四条高压配电线,供电给三个车间变电所。车间变电所装有电力变压器,将 10 kV (或 6 kV) 高压降为低压用电设备所需的 220/380 V 电压^④,这里的 2 号车间变电所中的两台电力变压器分别由配电所的两段母线供电,而其低压侧也采用单母线分段制,从而使供电可靠性大大提高。各车间变电所的低压侧,都设有低压联络线,它们相互连接,以提高供电系统运行的可靠性和灵活性。此外,该配电所有一条高压配电线,直接供电给一组高

① 从供电的角度来说,凡总供电容量小于 1000 kV·A 的工厂可视为小型工厂;大于 1000 kV·A 而小于 10 000 kV·A 的工厂可视为中型工厂;10 000 kV·A 以上的工厂可视为大型工厂。

② 这里所谓的“低压”、“高压”是从设计制造的角度来划分的。如果从电气安全的角度,则按我国电力行业标准 DL 408—91 规定:“低压”为设备对地电压低于 250 V 者;“高压”为设备对地电压高于 250 V 以上者。

③ 按 GB 6988—86《电气制图》定义:“系统图”是用符号或带注释的框概略表示系统或分系统的基本组成、相互关系及其主要特征的一种简图;而“电路图”是用图形符号并按工作顺序详细表示电路、设备或成套装置的全部基本组成和连接关系,而不考虑其实际位置的一种简图。

④ 按 GB 156—93《标准电压》规定:电压“220/380 V”中的 220 V 为三相交流系统的相电压,380 V 为线电压。

压电动机，另有一条高压配电线直接连接一组高压并联电容器。3号车间变电所的低压母线上也连接一组低压并联电容器，这些并联电容器都是用来补偿系统的无功功率和提高功率因数的。

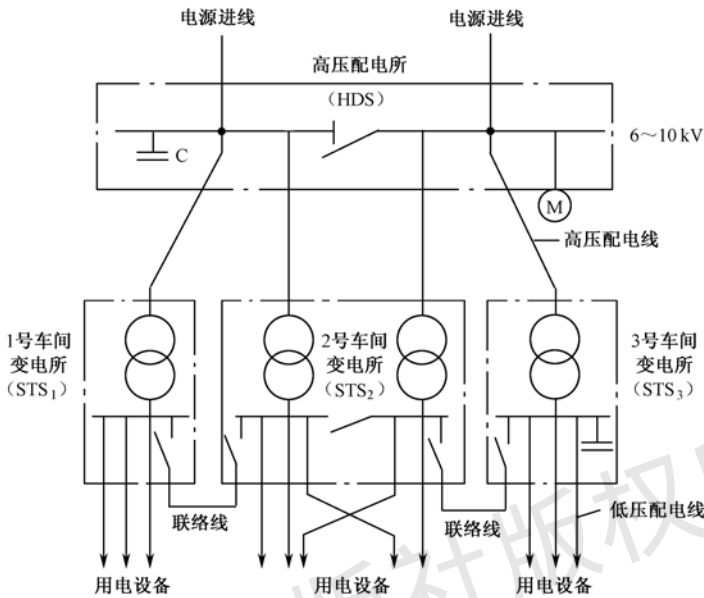


图 1.1 具有高压配电所的工厂供电系统图

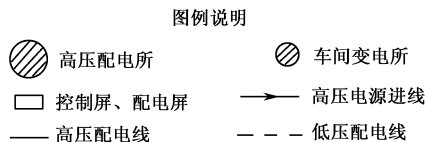
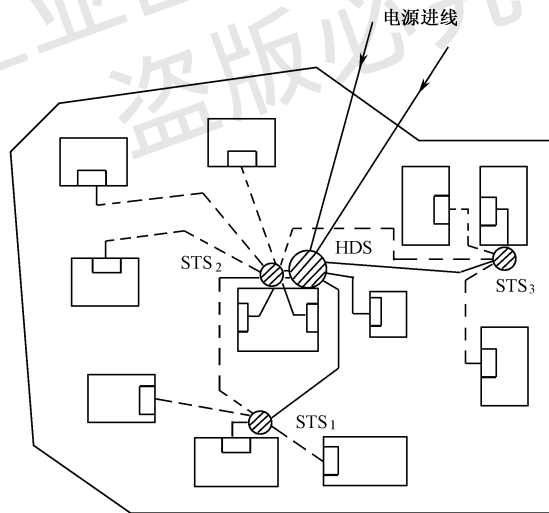


图 1.2 图 1.1 工厂供电系统的平面布线图

2. 具有总降压变电所的工厂供电系统

图1.3 是一个比较典型的具有总降压变电所的大中型工厂供电系统的系统图。总降压变电所

有两条 35 kV 以上的电压经该所的电力变压器降为 10 kV（或 6 kV）的电压，然后通过高压配电线路将电能送到各车间变电所，电能又在车间变电所又经电力变压器降为一般低压用电设备所需的 220/380 V 的电压。为了补偿系统的无功功率和提高功率因数，通常在 10 kV（或 6 kV）的高压母线上或 380 V 的低压母线上接入并联电容器。

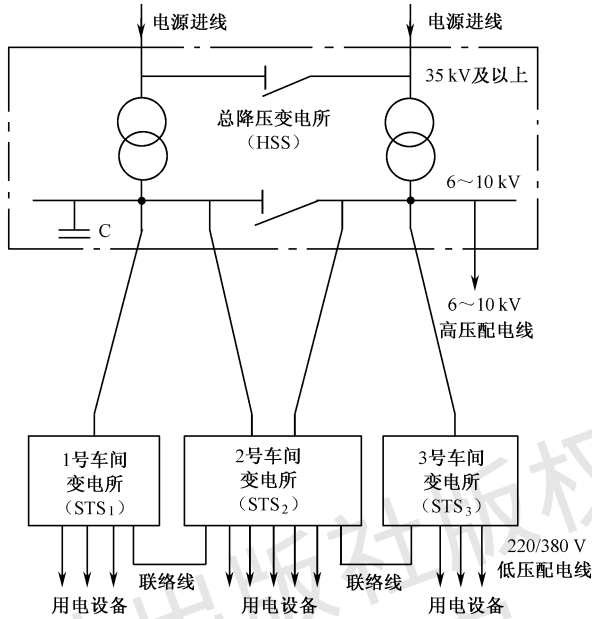


图 1.3 具有总降压变电所的工厂供电系统图

3. 高压引入负荷中心的工厂供电系统

如果当地的电源电压为 35 kV，而厂区环境条件和设备条件又允许采用 35 kV 架空线路和较经济的电气设备时，则可考虑采用 35 kV 作为高压配电电压，通过 35 kV 线路直接引入靠近负荷中心的车间变电所，然后经电力变压器直接降为低压用电设备所需的电压，如图 1.4 所示。这种高压引入负荷中心的直配方式，可以节省一级中间变压过程，从而简化了供电系统，节省了设备费用，降低了电能损耗和电压损耗，提高了供电质量。但此类供电系统对安全条件要求得很严格，为确保安全供电，要求厂区必须有满足 35 kV 架空线路的“安全走廊”，对厂区建筑密度、堆积物等也有要求。这种供电系统比较适用于远离城市中心、厂区建筑分散的大型工厂。

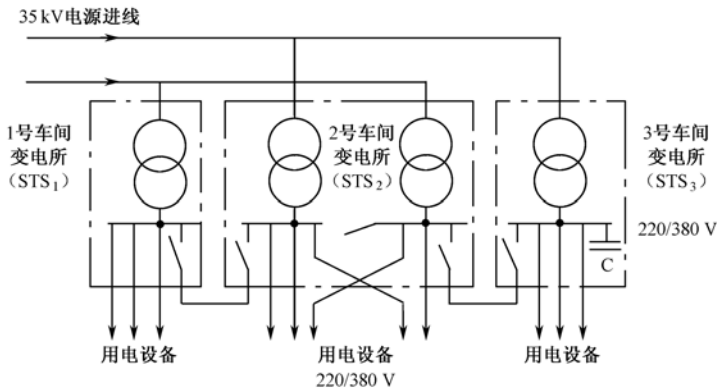


图 1.4 高压引入负荷中心的工厂供电系统图

4. 只有一个变电所或配电所的工厂供电系统

对于小型工厂，由于所需容量一般不大于 $1000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 或稍多一些，因此通常只设一个降压变电所，将 $6 \sim 10 \text{ kV}$ 电压降为低压用电设备所需的电压，如图 1.5 所示。

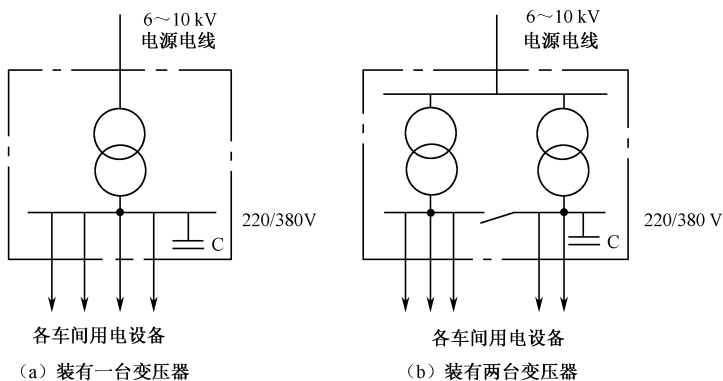


图 1.5 只有一个降压变电所的工厂供电系统图

在工厂所需容量不大于 $160 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 时，一般采用低压电源进线，因此工厂只需设一个低压配电间，如图 1.6 所示。

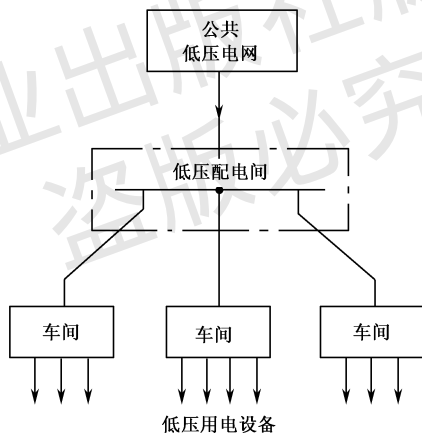


图 1.6 低压进线的小型工厂供电系统

由以上分析可知，配电所的任务是接收电能和分配电能；而变电所的任务是接收电能、变换电压和分配电能。两者的区别在于变电所是否装有电力变压器。

1.2.2 工厂的电力负荷

电力负荷有两个含义：一个是指用电设备或用电单位（用户）；另一个是指用电设备或用电单位（用户）所消耗的电功率或电流。下面所讲的电力负荷指的是前者。

1. 电力负荷的分级

电力负荷根据其供电可靠性的要求及中断供电在政治上、经济上所造成的损失或影响的程度分为三级：

(1) 一级负荷。符合下列情况之一时，应为一级负荷。

① 中断供电将造成人身伤亡时。

② 中断供电将在政治上、经济上造成重大损失时，如重大设备损坏，大量产品报废，用重要原料生产的产品大量报废，以及国民经济中重点企业的连续生产过程被打乱需要长时间才能恢复时。

③ 中断供电将影响有重大政治、经济意义的用电单位的正常工作时，如重要交通枢纽、重要通信枢纽、重要宾馆、大型体育场馆，以及经常用于国际活动的大量人员集中的公共场所，如港口、车站、机场等用电单位中的重要电力负荷。

在一级负荷中，当中断供电时将发生中毒、爆炸或火灾等情况的负荷，以及特别重要场所不允许中断供电的负荷，应视为特别重要的负荷。

(2) 二级负荷。符合下列情况之一时，应为二级负荷。

① 中断供电将在政治、经济上造成较大损失时，如主要设备损坏、大量产品报废、连续生产过程被打乱需较长时间才能恢复、重点企业大量减产时。

② 中断供电将影响重要用电单位的正常工作时，如交通枢纽、通信枢纽等用电单位中的重要电力负荷，以及中断供电将造成大型影剧院、大型商场等较多人员集中的重要的公共场所秩序混乱时。

(3) 三级负荷。不属于一级和二级负荷者应为三级负荷。

2. 各级电力负荷对供电电源的要求

(1) 一级负荷对供电电源的要求：一级负荷属重要负荷，应由两个独立电源供电。当一个电源发生故障时，另一个电源不应同时受到损坏。一级负荷中特别重要的负荷，除有两个独立电源外，还应增设应急电源，并严禁将其他负荷接入应急供电系统。可作为应急电源的电源有如下几种。

① 独立于正常电源的发电机组。

② 供电网络中独立于正常电源的专用的馈电线路。

③ 蓄电池。

④ 干电池。

(2) 二级负荷对供电电源的要求：二级负荷也属重要负荷，但其重要程度次于一级负荷。二级负荷宜由两个回路供电，供电变压器也应有两台。在其中一个回路或一台变压器发生常见故障时，二级负荷不致中断供电，或中断后能迅速恢复供电。只有当负荷较小或者当地供电条件困难时，二级负荷才可由一个回路6kV及以上的专用架空线路供电。这是考虑当架空线路发生故障时，比电缆线路发生故障时易于发现且易于检查和修复。当采用电缆线路时，必须采用两根电缆并列供电，每根电缆应能承担全部二级负荷。

(3) 三级负荷对供电电源的要求：由于三级负荷是不重要的一般负荷，因此它对供电电源无特殊要求。

1.3 电力系统的电压

1.3.1 简述

由发电厂中的电气部分、各类变电所和输电/配电线路，以及各种类型的用电设备组成的统一整体称为电力系统。电力系统中各种类型的变电所及输电/配电线路组成的统一体称为电力网。我国电力网基本上分为以下几种类型：

(1) 额定电压在 1 kV 以下的电力网称为“低压网”，主要用于低压用户的供配电，又称为低压配电网。

(2) 额定电压在 1~20 kV 的电力网称为“中压网”，中压网作为城市和农村供电的主网，同时也担负着向广大中小型工厂供电的任务。中压网又称为中压配电网，以 10 kV 为主，3 kV 和 6 kV 中压配电网已趋于淘汰，20 kV 的网目前仅限于局部地区使用。

(3) 额定电压在 35~220 kV 的电力网称为“高压网”，又称为高压配电网。该网目前以 35~110 kV 为主，许多大型工厂采用 35 kV 供电，66 kV 和 110 kV 主要用于城市配电网中，220 kV 则主要用于特大型城市的高压配电网中。

(4) 额定电压在 330 kV 以上的电网通常称为“超高压网”，主要用于跨地区、大功率远距离输电。

电力系统中的所有电气设备都是在一定的电压和频率下工作的。电气设备在其额定电压和频率下工作时，其综合经济效益最好。频率和电压是衡量电能质量的两个基本参数。

我国采用的工业频率（简称工频）为 50 Hz，频率偏差范围一般规定为 ± 0.5 Hz。如果电力系统容量达 3000 MW 及以上时，则频率偏差范围为 ± 0.2 Hz。频率的调整主要是通过发电厂调节发电机的转速来完成的。对于工厂供电系统来说，提高电能质量主要是指提高电压质量和供电可靠性的问题。电压质量不仅是指对额定电压来说电压偏高或偏低，即电压偏差的问题，而且包括电压波动及电压波形是否畸变，即是否含有过多的高次谐波成分的问题。

1.3.2 三相交流电网和电力设备的额定电压

按照 GB 156—93《标准电压》规定，我国三相交流电网和发电机的额定电压如表 1.1 所示。

表 1.1 我国三相交流电网和电力设备的额定电压（按 GB 156—93）

分 类	电网和用电设备的额定电压 (kV)	发电机的额定电压 (kV)	电力变压器的额定电压 (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, 3.3
	6	6.3	6, 6.3	6.3, 6.6
	10	10.5	10, 10.5	10.5, 11
	—	13.8, 15.75, 18, 20, 22, 24, 26	13.8, 15.75, 18, 20, 22, 24, 26	—
	35	—	35	38.5
	66	—	66	72.6
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
500	—	500	550	

(1) 电网（线路）的额定电压。电网的额定电压等级是国家根据国民经济发展的需要和电力工业的水平，经全面经济分析后确定的。它是确定各类电力设备额定电压的基本依据。

(2) 用电设备的额定电压。线路运行时要产生电压降，即电压损耗，所以线路上各点的电压都略有不同，如图 1.7 中的虚线所示。成批生产的用电设备，只能按线路的额定电压来制造，而不用考虑线路上的电压损耗，因此用电设备的额定电压规定与同级电网的额定电压相同。

(3) 发电机的额定电压。由于电力线路允许的电压偏差一般为 $\pm 5\%$ ，即整个线路允许有 10% 的电压损耗值，线路首端（电源端）的电压可较线路额定电压高 5% ，而线路末端则可较线路额定电压低 5% ，如图 1.7 所示。所以发电机的额定电压规定高于同级电网的额定电压 5% 。

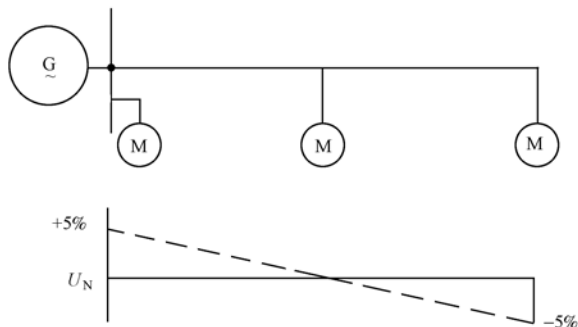


图 1.7 用电设备和发电机的额定电压说明

(4) 电力变压器的额定电压。

① 电力变压器一次绕组的额定电压。分两种情况：

- 当变压器直接与发电机相连时，如图 1.8 所示的变压器 T_1 ，其一次绕组的额定电压应与发电机的额定电压相同，即高于同级电网的额定电压 5% 。
- 当变压器不与发电机相连，而是连接在线路上时，如图 1.8 所示的 T_2 ，则可看做线路的用电设备，因此其一次绕组的额定电压应与同级电网的额定电压相同。

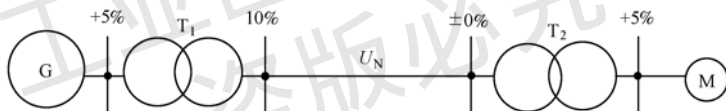


图 1.8 电力变压器的额定电压说明

② 电力变压器二次绕组的额定电压。也分以下两种情况：

- 变压器二次侧供电线路较长（如较大的高压电网）时，如图 1.8 所示的 T_1 ，其二次绕组的额定电压应比相连电网的额定电压高 10% ，其中 5% 是用于补偿变压器满负荷运行时绕组内部约 5% 的电压损耗，这是因为变压器二次绕组的额定电压是指变压器一次绕组加上额定电压时，二次绕组开路的电压，带负载运行时其内部必有电压损耗；此外变压器满负荷运行时输出的二次电压还要高于相连电网的额定电压 5% ，以补偿线路上的电压降。
- 变压器二次侧供电线路不长（如低压电网或直接供电给高、低压用电设备）时，如图 1.8 所示的 T_2 ，其二次绕组的额定电压只需高于相连电网的额定电压 5% 即可，即仅考虑补偿变压器满负荷运行时绕组内部 5% 的电压损耗。

1.3.3 电压偏差和电压调整

1. 电压偏差

用电设备端子处的电压偏差 ΔU 是通过用电设备的端电压 U 与设备的额定电压 U_N 的差值同 U_N 的百分比值来表示的，即

$$\Delta U \% = [(U - U_N) / U_N] \times 100 \%$$

电压偏差对设备的工作性能和使用有很大影响。

对感应电动机和同步电动机来讲，由于转矩与端电压的平方成正比 ($M \propto U^2$)。当端电压比额定电压低 10% 时，其实际转矩只有额定转矩的 81% 左右，而负荷电流将增大 5%~10% 以上，温升将增高 10%~15% 以上，绝缘老化程度将比规定增加 1 倍以上，从而明显地缩短电动机寿命；当端电压偏高时，负荷电流和温升也将增加，绝缘相应受损，对电动机不利。

电压偏差对照明灯具也有影响，端电压偏低将使发光效率降低，照度降低，影响视力；而电压偏高又缩短了灯具的寿命。

GB12325—90《供配电系统设计规范》规定：正常运行情况下，用电设备端子处电压偏差的允许值要符合下列要求。

- ① 电动机为 $\pm 5\%$ 。
- ② 照明：在一般工作场所为 $\pm 5\%$ ；对于远离变电所的小面积的一般工作场所，难以满足要求时，可为 $+5\% \sim -10\%$ ；应急照明、道路照明和警卫照明等均为 $-10\% \sim +5\%$ 。
- ③ 其他用电设备，当无特殊规定时为 $\pm 5\%$ 。

2. 电压调整

为了满足用电设备对电压偏差的要求，供电系统必须采取相应的电压调整措施。

(1) 正确选择无载调压型变压器的电压分接头或采用有载调压型变压器。我国工厂供电系统中应用的 6~10 kV 电力变压器一般为无载调压型，其高压绕组有 $U_{IN} \pm 5\%$ 的电压分接头，并装设有无载调压分接头开关，如图 1.9 所示。如果设备端电压偏高，则应将分接头开关换接到 $U_{IN} + 5\%$ 的分接头，以降低设备端电压。如果设备端电压偏低，则应将分接头开关换接到 $U_{IN} - 5\%$ 的分接头，以升高设备端电压。但是换接电压分接头必须在停电时进行，因此不能频繁操作。如果用电负荷中有的设备对电压要求严格，采用无载调压型变压器满足不了要求，而单独装设调压设备在技术、经济上不合理时，可采用有载调压型变压器，使之在正常运行过程中自动调整电压，保证设备端电压的稳定。

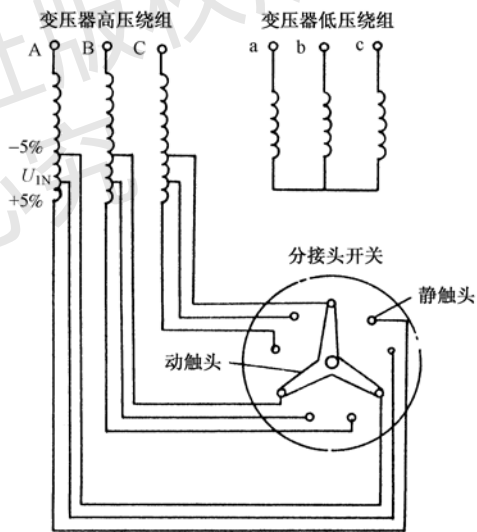


图 1.9 电力变压器的分接头开关

(2) 降低系统阻抗。供电系统中各元件的电压降与各元件的阻抗成正比，因此在技术、经济合理时，减少系统的变压器级数，增大线路截面，以电缆取代架空线，都能降低系统阻抗，减少电压降，从而缩小电压偏差的范围。

(3) 尽量使系统的三相负荷平衡。在有中性线的低压配电系统中，如果三相负荷分布不平衡，将使中性线中的电流增大，使负荷端中性点的电位偏移，造成有的相电压升高，有的相电压降低，从而增大线路的电压偏差。为此，应使三相负荷分布尽可能均衡，以降低电压偏差。

(4) 合理改变系统的运行方式。在生产为一班制或两班制的工厂中，工作班的时间内负荷重，往往电压偏低，需将变压器高压线圈的分接头调在 -5% 的位置上。而到夜间，负荷轻，电压则过高，此时可切除一台变压器，改用低压联络线，这样既降低了变压器的电能损耗，又因为投入低压联络线而增加了线路的电压损耗，从而降低了出现的高电压。对于两台变压器并列

运行的变电所,在负荷轻时切除一台变压器,同样可起到降低过高电压的作用。另外,如果是昼夜用电量相差悬殊的工厂,可以将较大容量的电气设备安排在负荷轻的夜间运行,如用于热处理工艺的电炉,这样可以达到合理调整电压的效果。

(5) 采用无功功率的补偿装置。由于系统中存在大量的感性负荷,因此系统中会出现大量相位滞后的无功功率,降低了功率因数,增大了系统的电压损耗。为了提高功率因数,降低系统的电压损耗,可采用并联电容器或同步补偿机,使之产生相位超前的无功功率,以补偿一部分相位滞后的无功功率。由于采用并联电容器补偿比采用同步补偿机更为简单、经济和便于运行维护,因此并联电容器补偿在工厂供电系统中获得了广泛应用。

*1.3.4 电压波动和闪变及其抑制

1. 电压波动和闪变的有关概念

电压波动是指电网的快速变动或电压包络线的周期性变动。电压波动值用电压波动过程中相继出现的电压有效值的最大值与最小值之差与额定电压的比值的百分数来表示,即

$$\Delta U\% = [(U_{\max} - U_{\min}) / U_N] \times 100\%$$

按 GB 12326—90《电能质量,电压允许波动和闪变》规定,电压波动值应不低于 0.2%/s。

电压波动是由负荷急剧变动的冲击性负荷所引起的。负荷急剧变动,使电网的电压损耗相应变动,从而使用户公共供电点的电压出现波动现象。如电动机的启动,电焊机的工作,特别是大型电弧炉和大型轧钢机等冲击性负荷的工作,均会引起电网电压的波动。

电压波动可以影响电动机的正常启动,可以使同步电动机转子振动,使电子设备特别是计算机无法正常工作,使照明灯发生明显的闪烁现象,其中电压波动对照明的影响最明显。从人眼对灯光的主观感觉上讲,称这种闪烁现象为“闪变”,引起灯光闪变的波动电压叫“闪变电压”,灯光闪变对人眼有刺激作用,甚至可以使人无法正常工作和学习。

2. 电压波动和闪变的抑制

为了降低或抑制冲击性负荷引起的电压波动和电压闪变,宜采取下列措施:

(1) 对负荷变动剧烈的大型电气设备,采用专用线或专用变压器单独供电。这是简便、有效的办法。

(2) 设法增大供电容量,减小系统阻抗,如将单回路线路改为双回路线路,将架空线路改为电缆线路,均可使系统的电压损耗减小,从而减小负荷变动时引起的电压波动。

(3) 在系统出现严重的电压波动时,减少或切除引起电压波动的负荷。

(4) 大功率电弧炉的炉用变压器宜用短路容量较大的电网供电,一般是选用更高电压等级的电网供电。

(5) 对大型冲击型负荷,如采取上述措施达不到要求时,可装设能“吸收”冲击无功功率的静止型无功补偿装置 SVC (Static Var Compensator)。SVC 是一种能吸收随机变化的冲击无功功率和动态谐波电流的无功补偿装置,其类型有多种,而以自饱和电抗器型 (SR 型) 的效果最好,其电子元件少,可靠性高,反应速度快,维修方便经济,比较适合在我国推广应用。

*1.3.5 电网谐波及其抑制

1. 电网谐波的有关概念

谐波是指对周期性非正弦量进行傅里叶级数分解所得到的大于基波频率整数倍的各次分

量,通常称为高次谐波,基波频率就是工频 50 Hz。

向公用电网注入谐波电流或在公用电网中产生谐波电压的电气设备,称为谐波源。

就电力系统中的三相交流发电机发出的电压来说,可以认为其波形基本上正弦量。但是由于电力系统中存在着各种各样的“谐波源”,特别是随着大型变流设备和电弧炉等负荷的广泛应用,使得高次谐波的干扰成了当前电力系统中影响电能质量的一大“公害”,亟待采取对策。

大小“谐波源”主要是指存在于电力系统中的各种非线性元件。如荧光灯和高压汞灯等气体放电灯、感应电机、电焊机、变压器和感应电炉等都要产生谐波电流或电压。大型晶闸管变流设备和大型电弧炉产生的谐波电流最为突出,它们是造成电网谐波的主要因素。

谐波对电气设备的危害很大。谐波电流通过变压器时,会使变压器的铁芯损耗明显增加,使变压器出现过热,缩短其使用寿命。谐波电流通过交流电动机时,不仅会使电动机的铁芯损耗明显增加,而且还会使电动机转子发生振动现象,严重影响机械加工的产品质量。谐波对电容的影响更为突出,谐波电压加在电容的两端时,由于电容器对谐波的阻抗很小,因此电容器很容易发生过负荷甚至烧毁。此外,谐波电流可使电力线路的电能损耗和电压损耗增加;使计量电能的感应式电度表计量不准确;使电力系统发生电压谐振,从而在电路上引起过电压,有可能击穿线路设备的绝缘;可能造成系统的继电保护和自动装置发生误动作或拒动;可对附近的通信设备和通信线路产生信号干扰。

因此,GB/T 14549—93《电能质量·公用电网谐波》规定了公用电网中对谐波电压的限制值和谐波电流的允许值。通常是用谐波总畸变率来衡量,110 kV 谐波总畸变率不超过 2%;35~66 kV 不超过 3%;6~10 kV 不超过 4%;0.38/0.22 kV 不超过 5%。

2. 电网谐波的抑制

抑制电网谐波,可采取下列措施:

(1) 大容量的非线性负荷用短路容量较大的电网供电,电网的短路容量越大,它承受非线性负荷的能力越强。

(2) 三相整流变压器采用 Y, d 或 D, y 的接线。由于 3 次及 3 的整数倍次谐波电流在三角形联结的绕组内形成环流,而使星形联结的绕组内不可能产生 3 次及 3 的整数倍次谐波电流,因此采用 Y, d 或 D, y 接线的三相整流变压器,能使注入电网的谐波电流消除 3 次及 3 的整数倍次谐波电流。由于电力系统中的非正弦交流电压或电流通常是正负半波,对时间轴是对称的,不含直流分量和偶次谐波分量,因此采用 Y, d 或 D, y 接线的整流变压器,注入电网的谐波电流只有 5, 7, 11, … 奇次谐波。这是抑制高次谐波最基本的方法。

在选择配电变压器时,宜选用 D, yn11 联结组别的配电变压器,其抑制高次谐波的原理和上述情况一样。

(3) 增加整流变压器二次侧的相数。整流变压器二次侧的相数越多,整流波形的脉波数越多,其次数较低的谐波被消去的也越多。例如,整流相数为 6 相时,出现的 5 次谐波电流为基波电流的 18.5%,7 次谐波电流为基波电流的 12%。如果整流相数增加到 12 相,则出现的 5 次谐波电流降为基波电流的 4.5%,7 次谐波电流降为基波电流的 3%,都差不多减小为原来的 1/4。由此可见,增加整流相数对高次谐波的抑制效果相当显著。

(4) 装设分流滤波器。分流滤波器又称调谐滤波器,由能对需要消除的各次谐波进行调谐的多组 RLC 串联谐振电路所组成。在大容量静止“谐波源”(如大型晶闸管整流器)与电网连接处装设分流滤波器,如图 1.10 所示。由于串联谐振时支路阻抗很小,因而可使有关

次数的谐波电流被谐振支路分流(吸收)而不注入电网中,图 1.10 中所示的 Q5 控制的支路可吸收 5 次谐波电流, Q7、Q11 控制的支路分别吸收 7 次和 11 次谐波电流。大型电弧炉和硅整流装备,也可装设 SVC 来吸收高次谐波电流,以减少这些用电设备对系统产生的谐波干扰。

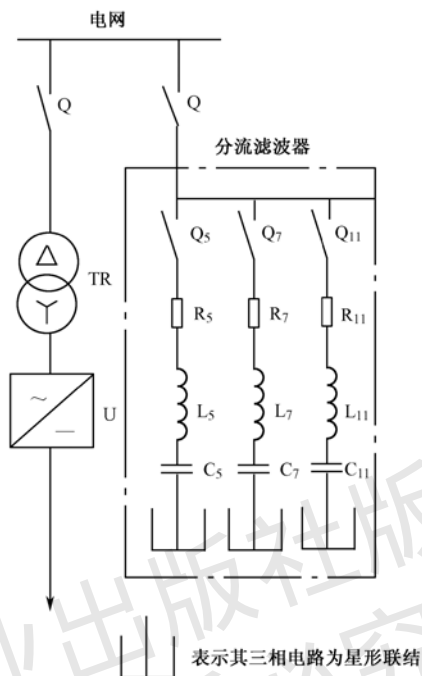


图 1.10 装设分流滤波器以吸收高次谐波

1.3.6 工厂高、低压配电电压的选择

1. 工厂高压配电电压的选择

工厂供电系统的高压配电电压的选择,主要取决于当地供电电源电压及工厂高压用电设备的电压、容量和数量等因素。当工厂供电电源电压为 35 kV 以下时,工厂的高压配电电压一般采用 10 kV;当 6 kV 用电设备的总容量较大,选用 6 kV 经济合理时,宜采用 6 kV;如 6 kV 设备不多,则仍应选用 10 kV 作为工厂的高压配电电压,而对 6 kV 设备通过专用的 10/6.3 kV 变压器单独供电。由于 3 kV 的用电设备很少,3 kV 作为高压配电电压的技术、经济指标很差,基本上不用做高压配电电压。当工厂供电电源为 35 kV,能减少配变电级数,简化接线,并且当技术经济合理时,可采用将 35 kV 作为高压配电电压引入负荷中心的直配电方式,但前提是必须确保安全,且应该有一条合格的“安全走廊”。

2. 工厂低压配电电压的选择

工厂低压配电电压的选择主要取决于低压用电设备的电压。一般采用 220/380 V,其中线电压 380 V 接三相动力设备及 380 V 单相设备,而相电压 220 V 接 220 V 照明灯具及其他 220 V 的单相设备。但某些场合宜采用 660 V 甚至 1140 V 作为低压配电电压,如矿井下,其原因是负荷离变电所较远,为保证远端负荷的电压水平而采用 660 V 或 1140 V 的配电电压。采用较高的



电压配电, 不仅可减少线路的电压损耗, 提高负荷端的电压水平, 而且能减少线路的电能损耗, 降低设备成本, 增大供电半径, 减少变电点, 简化供电系统, 有明显的经济效益, 在世界各国已成为发展趋势。我国也充分注意到了这一点, 在此领域做了一些开发研究工作, 不过目前 660 V 电压尚限于在采矿、石油和化工等少数部门应用。

1.4 电力系统的中性点运行方式

1.4.1 简述

在电力系统中, 中性点是指接成星形的三相变压器绕组或发电机绕组的公共点。目前我国中性点有三种运行方式: 一种中性点不接地, 另一种中性点经阻抗接地, 还有一种中性点直接接地。前两种合称为小接地电流系统, 也称中性点非有效接地系统, 或中性点非直接接地系统。后一种称为大接地电流系统, 也称中性点有效接地系统。

我国的 3~66 kV 系统, 特别是 3~10 kV 系统, 一般采用中性点不接地的运行方式。如单相接地电流大于一定数值, 即 3~10 kV 系统中接地电流大于 30 A, 20 kV 及以上系统中接地电流大于 10 A 时, 则应采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。我国的 110 kV 及以上的系统, 则都采用中性点直接接地的运行方式。

我国的 220/380 V 低压配电系统, 广泛采用中性点直接接地的运行方式, 而且引出有中性线(代号 N)、保护线(代号 PE)或保护中性线(代号 PEN)。

中性线(N线)的功能: 一是用来接额定电压是相电压的单相用电设备; 二是用来传导三相系统中的不平衡电流和单相电流; 三是减小负荷中性点的电位偏移。

保护线(PE线)的功能: 是为保障人身安全, 防止触电事故用的接地线。系统中所有设备的外露可导电部分, 如金属外壳、金属构架等, 通过保护线接地, 可在设备发生接地故障时减少触电危险。

保护中性线(PEN线)兼有中性线和保护线的功能。这种中性线在我国通称为“零线”, 俗称“地线”。

根据我国 GB 9082.2 的规定, 低压配电系统按保护接地形式, 分为 TN 系统、TT 系统、IT 系统三类。其中: 第一个字母表示电力系统的对地关系, T 表示中性点直接接地, I 表示中性点不接地或经高阻抗接地; 第二个字母表示电气装置外露可导电部分(设备金属外壳、金属底座等)的对地关系, T 表示独立于电力系统接地点而直接接地, N 表示与电力系统接地点进行电气连接。

TN 系统中的所有设备的外露可导电部分均接公共保护线(PE线)或公共的保护中性线(PEN线)。这种公共 PE 线或 PEN 线也称“接零”。如果系统中的 N 线与 PE 线全部合为 PEN 线, 则称此系统为 TN-C 系统, 又称三相四线制, 如图 1.11 (a) 所示。如果系统中的 N 线与 PE 线全部分开, 则称此系统为 TN-S 系统, 又称三相五线制, 此系统安全、稳定、可靠, 是当今在工厂供电中积极推广的一种系统, 如图 1.11 (b) 所示。

如果系统前一部分的 N 线与 PE 线合为 PEN 线, 而后一部分线路的 N 线与 PE 线全部或部分分开, 则称此系统为 TN-C-S 系统, 此系统多为老企业将三相四线制改造为三相五线制的一种过渡过程的系统, 应该注意的是: 当 PE 线与 N 线分开后不允许再合上, 否则仅能算做 TN-C 系统, 如图 1.11 (c) 所示。

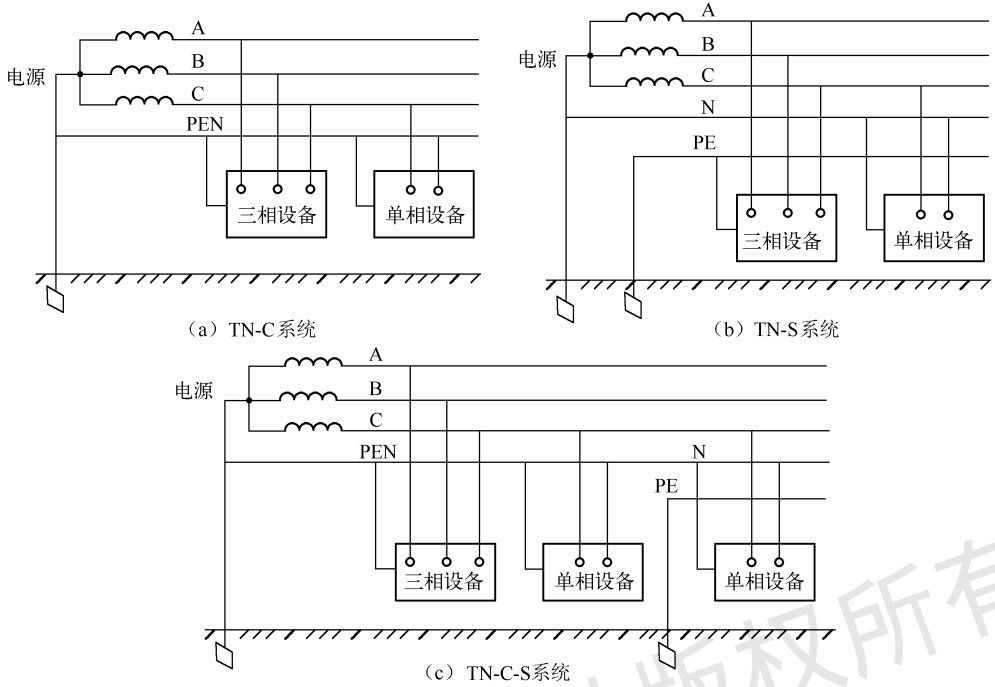


图 1.11 低压配电的 TN 系统

TT 系统中所有设备的外露可导电部分均各自经 PE 线单独接地，如图 1.12 所示。

IT 系统中所有设备的外露可导电部分也都各自经 PE 线单独接地，如图 1.13 所示。它与 TT 系统不同的是，其电源中性点不接地或经 $1000\ \Omega$ 阻抗接地，且通常不引出中性线。

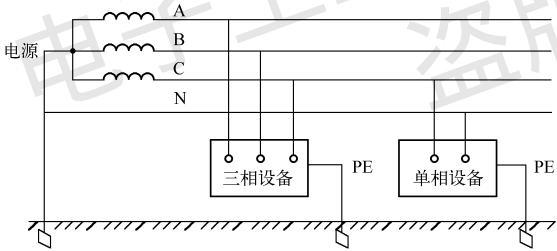


图 1.12 低压配电的 TT 系统

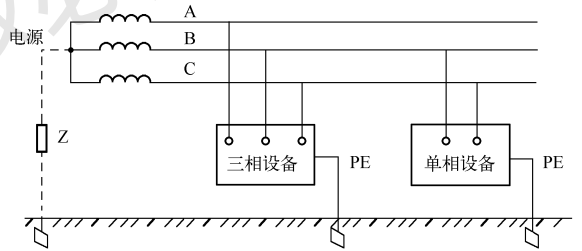


图 1.13 低压配电的 IT 系统

凡引出有中性线的三相系统，包括 TN 系统、TT 系统，属于三相四线制系统。没有中性线的三相系统，包括 IT 系统，属于三相三线制系统。

电力系统电源中性点的不同运行方式，对电力系统的运行特别是在系统发生单相接地故障时有明显的影响，而且将影响系统二次侧的继电保护及监测仪表的选择与运行，因此有必要予以研究。

1.4.2 中性点不接地的电力系统

在三相交流系统的各相之间及相与地之间均存在着分布电容，这里只考虑相与地间的分布电容，而且用集中电容 C 来表示，如图 1.14 所示（图中的接地体是虚拟的）。系统正常运行时，三相交流电是对称平衡的，三个相的对地电流 I_{C0} 也是平衡的，因此三个相的电容电流相量和为零，没有电流在大地中流过。每相对地的电压就是相电压。当系统发生单相接地故障时，如

C相接地(如图1.15所示),这时C相对地的电压为零,而A相对地的电压则成为A相对C相的电压,即 $U'_A = U_{AC}$,B相对地的电压也成为B相对C相的电压,即 $U'_B = U_{BC}$ 。由此可见,C相接地时,完好的A、B两相对地的电压都由原来的相电压升高到了线电压,即升高为原对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

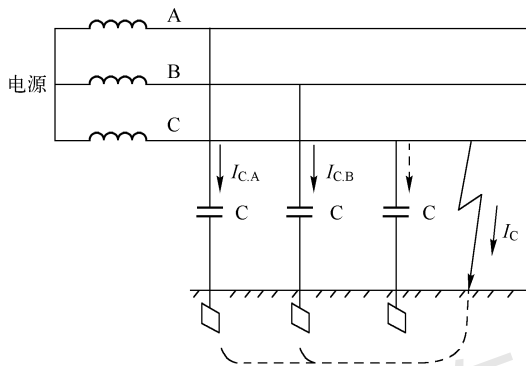
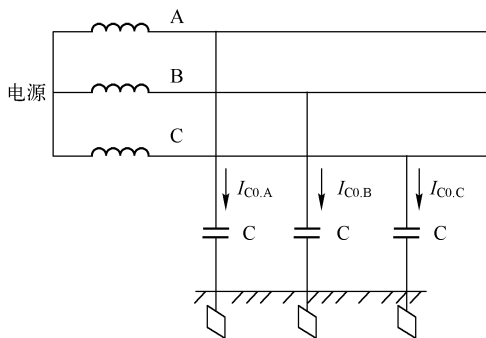


图 1.14 正常运行时的中性点不接地的电力系统

图 1.15 单相接地时的中性点不接地的电力系统

C相接地时,系统的接地电流(电容电流) I_C 应为A、B两相对地的电容电流之和,其量值应为正常运行时每相对地的电容电流的3倍,即 $I_C = 3I_{C0}$ 。

由于线路对地的分布电容C不易计算, I_{C0} 和 I_C 也不易根据C来确定,工程上一般采用经验公式来计算单相接地电容电流,即

$$I_C = U_N(l_{oh} + 35l_{cab})/350 \quad (1-1)$$

式中, I_C 为系统的单相接地电容电流(A); U_N 为系统的额定电压(kV); l_{oh} 为同一电压 U_N 的具有电联系的架空线路总长度(km); l_{cab} 为同一电压 U_N 的具有电联系的电缆线路总长度(km)。

必须指出:当中性点不接地的电力系统中发生一相接地时,系统的三个线电压无论相位和量值均未发生变化,因此系统中的设备,尤其是三相设备仍可照常运行。但是如果另一相又发生接地故障,则形成两相接地短路,将产生很大的短路电流,将损坏线路及其设备。因此我国有关规程规定:中性点不接地的电力系统发生单相接地故障时,可允许暂时继续运行2h,但必须同时通过系统中装设的单相接地保护或绝缘监察装置发出报警信号或指示,以提醒运行值班人员注意采取措施,查找和消除接地故障。若有备用线路,则可将负荷转移到备用线路上去。在经过2h后,若接地故障尚未消除,则应切除故障线路,以防故障扩大。

1.4.3 中性点经消弧线圈接地的电力系统

在上述中性点不接地的电力系统中,如果接地电容电流较大,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。由于线路既有电阻、电感,又有电容,因此发生一相弧光接地时,就形成一个RLC的串联谐振电路,从而使线路上出现危险的过电压(其值可达线路相电压的2.5~3倍),有可能使线路上绝缘薄弱地点的绝缘击穿。为了消除单相接地时接地点出现的断续电弧,按规定在单相接地电容电流大于一定值(如前所述)时,系统的中性点必须采取经消弧线圈接地的运行方式。如图1.16所示为消弧线圈的结构和接线示意图,消弧线圈实际上就是铁芯线圈,其电阻很小,感抗很大,可视做一个电感。当系统发生单相接地时,通过接地点的电流为接地电容电流 I_C 与流过消弧线圈的电感电流 I_L 之和。消弧线圈上有分接开关,可

以调整电感电流 I_L ，由于 I_C 比 U_C 超前 90° ，而 I_L 比 U_C 滞后 90° ，因此 I_L 与 I_C 在接地点相互补偿。如果接地点的电流补偿到小于最小生弧电流时，接地点就不会产生电弧，从而也不会出现上述的电压谐振现象了。

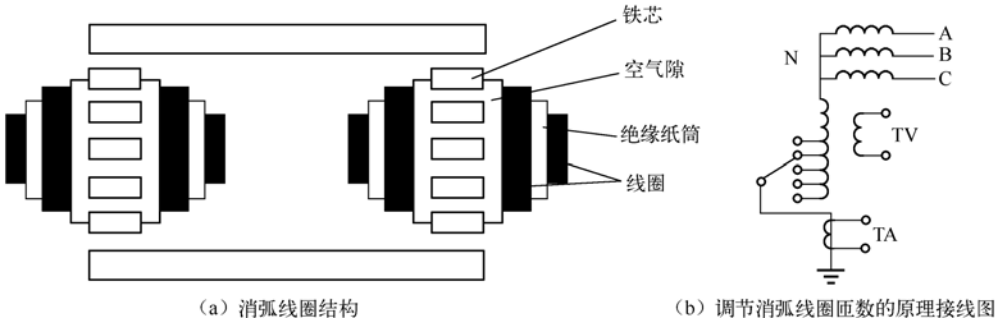


图 1.16 消弧线圈的结构及接线示意图

图 1.17 是中性点经消弧线圈接地的示意图，在中性点经消弧线圈接地的电力系统中，与中性点不接地的电力系统一样，在发生单相接地故障时，三个线电压不变，因此可允许暂时继续运行 2h，但必须发出指示信号，以便采取措施，查找和消除故障，或将故障线路的负荷转移到备用线路上去。而且这种系统在一相接地时，另两相的对地电压也会升高到线电压，即升高为原对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

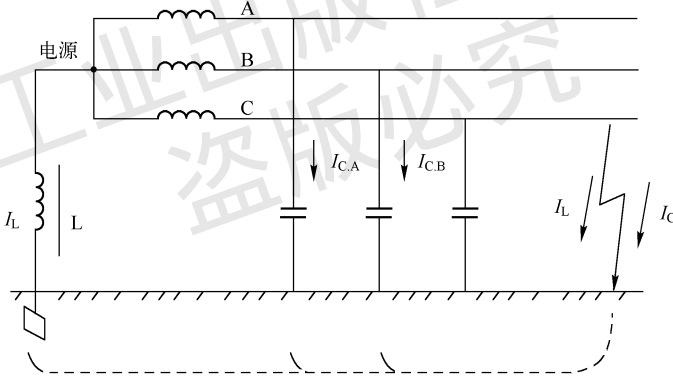


图 1.17 单相接地时的中性点经消弧线圈接地的电力系统

1.4.4 中性点直接接地的电力系统

电源中性点直接接地的电力系统发生单相接地时，如图 1.18 所示，通过接地中性点形成单相短路，用符号 $k^{(1)}$ 表示。单相短路电流 $I_k^{(1)}$ 比线路的正常负荷电流大得多，因此在系统发生单相短路时保护装置应动作于跳闸，切除短路故障，使系统的其他部分恢复正常运行。

中性点直接接地的电力系统发生单相接地时，其他两相的对地电压不会升高，因此系统中供用电设备的绝缘只需按相电压考虑，而无须按线电压考虑，这对 110kV 及以上的超高压系统是很有经济价值的。因为高压电器特别是超高压电器，其绝缘问题是影响电器设计和制造的关键问题。电器绝缘要求的降低，将直接降低电器的造价，同时改善电器的性能。因此我国的 110kV 及以上的超高压系统的电源中性点通常都采取直接接地的运行方式。在低压配电系统中，我国广泛采用的 TN 系统及国外较广泛采用的 TT 系统，均为中性点直接接地的系统，而且引出有

中性线或保护中性线，这除了便于接用单相负荷外，还考虑到了安全保护的要求，一旦发生单相接地故障，即形成单相短路，快速切除故障，有利于保障员工的人身安全。

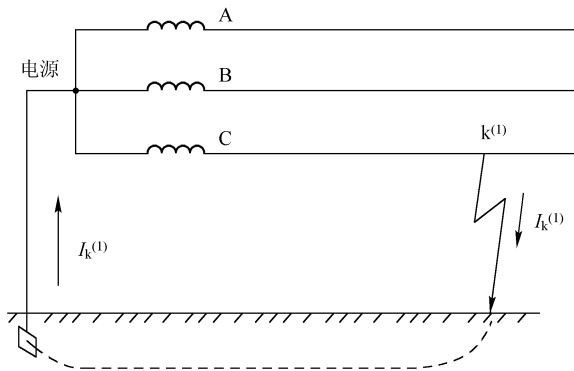


图 1.18 单相接地时的中性点直接接地的电力系统

电力系统的运行经验表明，系统中发生单相接地故障的概率很大，约占总故障的 65% 左右。当大电流接地系统中发生单相接地故障时，接地相的电源将被短接，形成很大的单相接地电流。此时断路器必须动作跳闸切除故障，从而造成系统停电事故。而当小电流接地系统中发生单相接地故障时，不会发生电源被短接的现象，系统可以继续带负荷运行一段时间（一般允许运行 2 h），从而给运行人员留有充足的时间转移负荷及做好故障处理的准备工作，然后再进行停电操作排除故障。由此可见，采用小电流接地运行方式可以大大提高系统的供电可靠性。



思考题与习题

1. 填空

- (1) 工厂供电工作必须达到_____、_____、_____和_____这几点基本要求。
- (2) 供电工作的从业人员应该具有高度的_____意识，从业人员自身必须要模范执行国家颁布的_____及相关的_____。
- (3) 电力负荷有两个含义：一个是指_____或_____；另一个是指_____或_____所消耗的_____。
- (4) 对于工厂供电系统来说，提高电能质量主要是指_____和_____问题。电压质量不仅是指对_____来说电压_____，即_____的问题，而且包括_____及_____波形是否_____，即是否含有过多的_____成分的问题。
- (5) 在电力系统中，作为供电电源的发电机和变压器的_____有三种运行方式：一种是电源_____，另一种是_____，还有一种是_____。

2. 判断（正确用√，错误用×表示）

- (1) 供电工作的从业人员还应该具有强烈的“节能”意识。合理地使用能源，无论是现在还是将来都是需要人们遵守的“法则”。 ()
- (2) 电流和电压是衡量电能质量的两个基本参数。 ()
- (3) 频率的调整主要是通过调节电力负荷的大小和种类来完成的。 ()

- (4) 电网的额定电压是确定各类电力设备额定电压的基本依据。 ()
- (5) 工厂供电系统的高压配电电压的选择, 主要取决于工厂高压用电设备的电压、容量和数量等因素。 ()
- (6) TN-S 系统, 又称三相五线制, 此系统安全、稳定、可靠, 是当前在工厂供电中积极推广的一种系统。 ()

3. 问答

- (1) 工厂供电系统包括哪些范围? 变电所和配电所各自的任务是什么?
- (2) 表征电能质量的基本指标是什么? 我国采用的工频是多少? 一般要求的频率偏差为多少? 电压质量包括哪些内容?
- (3) 我国 GB 156—93《标准电压》规定的三相交流电网的额定电压等级有哪些?
- (4) 发电机的额定电压为什么规定要高于同级电网的额定电压 5%?
- (5) 什么叫电压偏差? 电压偏差对电气设备的运行有什么影响? 如何进行电压调整?
- (6) 电力系统中的高次谐波是如何产生的? 有什么危害? 有哪些抑制谐波的措施?
- (7) 三相交流电力系统的电源中性点有哪些运行方式? 中性点不直接接地的电力系统与中性点直接接地的电力系统在发生单相接地时各有什么不同特点?

4. 综合

- (1) 试确定如图 1.19 所示供电系统中变压器 T_1 和线路 WL_1 、 WL_2 的额定电压。



图 1.19 习题 4 (1) 的供电系统

- (2) 试确定如图 1.20 所示供电系统中发电机和所有变压器的额定电压。

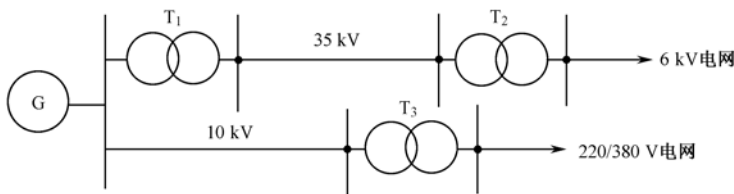


图 1.20 习题 4 (2) 的供电系统

- (3) 某 10 kV 电网, 架空线路总长度为 50 km, 电缆线路总长度为 15 km, 试求此中性点不接地的电力系统发生单相接地时的接地电容电流, 并判断此系统的中性点是否需要改为经消弧线圈接地。