

第3章



配电网架结构及装置

本章介绍配电网接线方式和主要配电设备,介绍典型城市的配电网架结构,使读者对配电网及其设备有个基本的认识,这是配用电的技术基础。同时在插图中配有大量的实物照片,方便读者阅读理解。

3.1 中压配电系统网架结构

3.1.1 接线方式

根据供电可靠性和应用场合的不同,中压配电网有多种接线方式。目前,我国中压配电网实际采用的接线方式种类比较多、标准化程度不高。从便于管理的角度出发,在满足供电可靠性要求的前提下,中压配电网的接线方式应尽量简化并标准化。

1. 放射式接线

1) 架空线路的放射式接线

在负荷密度不高、用户分布较分散或供电用户属一般用户的地区,例如一般的居民区、小型城市近郊、农村地区,采用单射式接线,如图 3-1(a)所示。为减少故障停电范围,常常在线路中间或分支线上安装分段开关。放射式接线的优点是可根据用户的发展随时扩展,就近接电,但存在供电可靠性和电压质量不高等问题。对重要用户可采用双射式接线以提高供电可靠性,如图 3-1(b)所示。

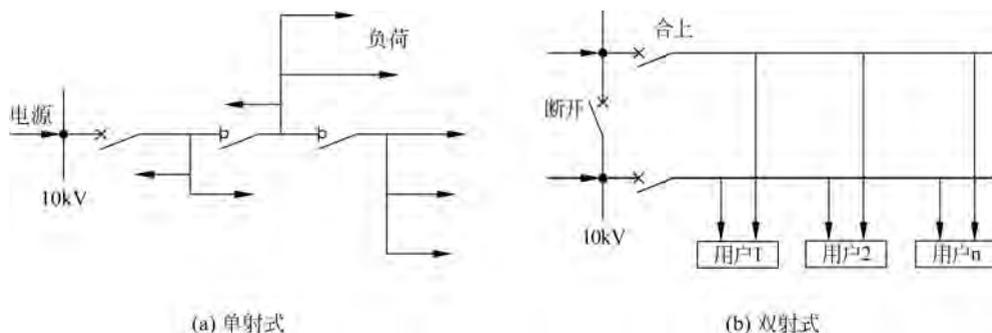


图 3-1 放射式中压配电网接线

2) 电缆线路的双射式与对射式接线

双射式即双辐射式接线方式,2条线路的电源分别取自一个变电站的不同母线,如图3-2所示。用于负荷密度高、需双电源供电的重要用户多的大城市中心区,不足之处是容量利用率只有50%。

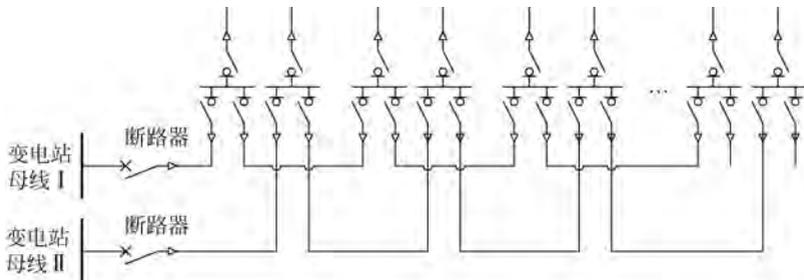


图 3-2 电缆双射式接线

对射式接线与双射式接线类似,不同之处是2个电源取自不同的变电站,如图3-3所示。它有着更高的供电可靠性。

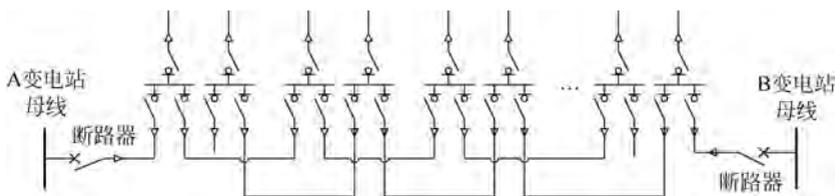


图 3-3 电缆对射式接线

2. 环式接线

1) 架空线路的环式接线

由同一变电站的不同母线或不同的变电站母线的2条或多条馈线连接形成配电环网,给沿线用户供电,中间采用分段开关将环网分成若干个供电区段。正常运行时,适当选择其中的一个分段开关作为联络开关(正常处于断开状态),环网呈开环运行状态。在环路中某区段发生故障或检修时,利用分段开关将该区段隔离,其他区段可继续供电。环式接线的供电可靠性高,适用于对供电质量要求较高的城市地区。

图3-4(a)给出一个典型的架空线路“手拉手”单环网接线图,中间采用负荷开关分段。当线路发生故障时,通过人工或遥控操作,打开故障点两侧的开关隔离故障区段,合上联络开关,恢复其他非故障区段的正常供电。

单环网接线方式的电源一般取自不同变电站母线或同一变电站的不同母线。没有条件时,电源亦可取自同一条母线,但这样在母线停运时要造成停电,供电可靠性相应地降低。

单环网接线方式的结构简单清晰、可靠性高,但线路载流量要按能够为环网中所有负荷安全供电进行设计,预留1/2的容量为备用容量,容量利用率只有50%。

为提高线路容量利用率,可采用多联络的接线方式。如图3-4(b)所示的三分段三联络的接线方式。正常运行时,线路负荷为3个线路区段的负荷之和;在其他线路故障时,只需要转供其中一个非故障区段的负荷,因此,线路预留1/4的备用容量,容量利用率达75%。

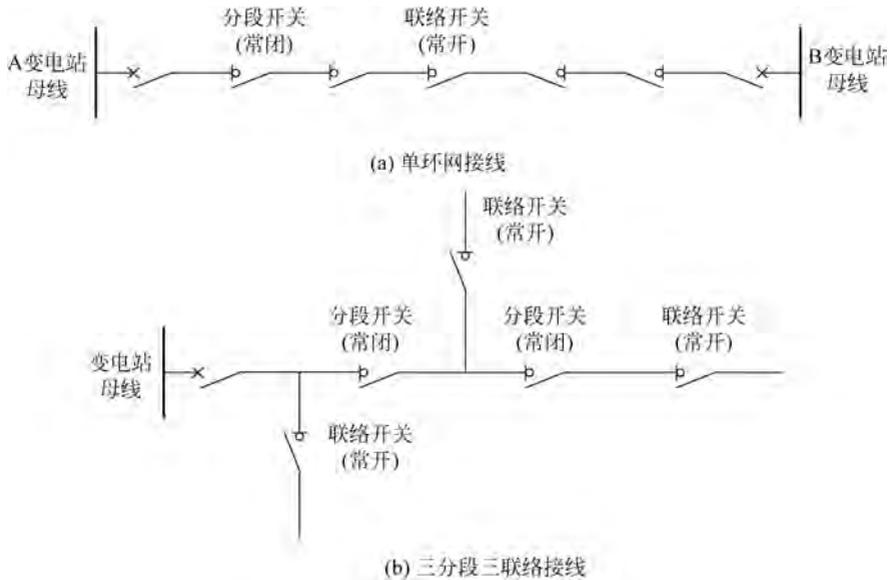


图 3-4 架空线环式中压配电网接线

2) 电缆线路的环式接线

电缆线路故障率低、供电可靠性高、不占用地面空间、不影响环境美观,广泛用于城市配电网中。

(1) 单环网。电缆单环网接线图如图 3-5 所示,中间采用环网开关分段。当线路中发生故障时,打开故障点两侧的开关,将带有故障的电缆区段退出运行,而环路上所有的环网柜可继续由非故障电缆正常供电,达到“ $N-1$ ”的供电可靠性效果。

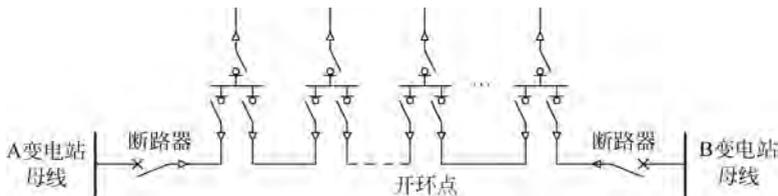


图 3-5 电缆单环网接线

电缆单环网络结构简单,在电缆网络中有着大量的应用;其不足之处是电缆容量利用率较低。

(2) 双环网。电缆双环网结构如图 3-6 所示。它可以为每个用户提供 2 路电源,并且每路电源都有 2 路进线,因此有着更高的供电可靠性;但其设备利用率很低、造价很高。

(3) 多电源环网。对一些要求有双电源或多电源的配电所,可采用“ N 供一备”形式的多电源环式接线。图 3-7 给出了一个“三供一备”的环网接线,图中备用电源柜的负荷开关正常运行时为常开状态。

“三供一备”接线方式采用一条线路作为备用线路,电缆容量利用率可达 67%,可靠性也满足“ $N-1$ ”的要求,而且网络结构相对也比较简单,因此应是设计电缆网络时优先考虑的结构。

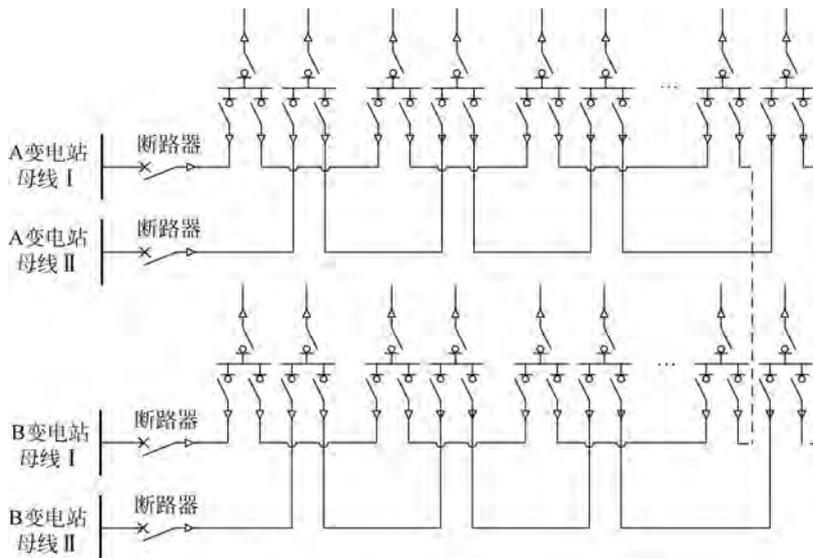


图 3-6 电缆双环网接线

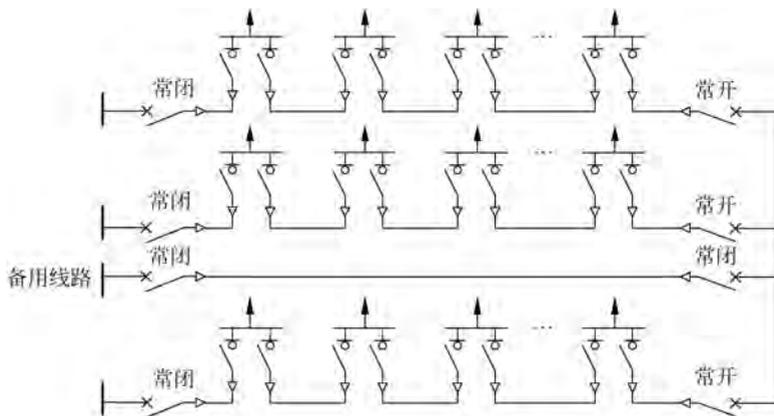


图 3-7 电缆三供一备网络接线

中压配电网也可以接成 $1/4$ 环网接线。 $1/4$ 环网的线路负载率可达 75%，而预留线路容量的 $1/4$ 为备用，如图 3-8 所示。这种接线适用于地区负荷比较稳定且接近饱和，最终规模一次建成的配电网。缺点是适应地区负荷变化的能力较差，且调度操作相对复杂。

3. 闭环运行网络

环网接线一般采用开环运行方式，即在正常运行时联络开关处于分位，呈放射式供电运行状态。这样，在线路发生故障时尽管可以通过自动倒闸操作恢复对负荷的供电，但仍然会出现数分钟的短时停电，给敏感负荷带来危害，而采用闭环运行方式则可以解决这一问题。

闭环运行网络简称闭环网络，正常运行时联络开关处于合位，线路开关采用能够遮断故障电流的断路器，配置纵联保护（电流差动保护），在线路故障时直接跳开故障区段两侧断路器隔离故障，做到非故障区段用户供电不中断。为防止出现环流，环网两侧电源一般取自同

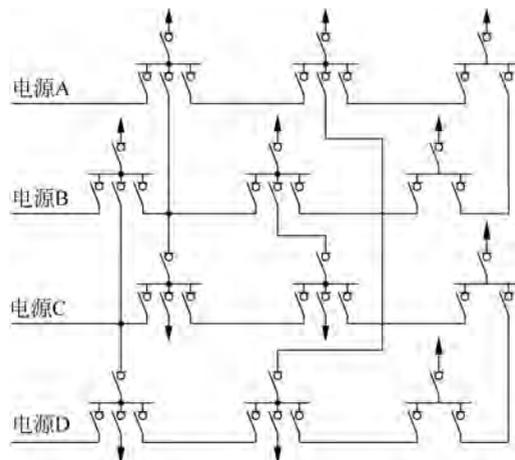


图 3-8 电缆 1/4 环网接线

一变电站的同一段母线。

闭环运行网络在国内还少有应用,在新加坡以及美国的奥兰多等都有应用。图 3-9 给出了新加坡的 22kV 配电网典型接线。66/22kV 每条母线的出线不超过 8 条,与本站另一条母线构成环网,并且通过联络开关与另一变电站的供电环相连,构成如图中所示的花瓣形结构。每一 22kV 供电环上供电开关点不超过 10 个,最大负荷不超过 15MVA。线路开关具有开断故障电流的能力,系统短路水平不超过 25kA,短路切除时间不大于 3s。供电环正常情况下闭环运行,2 个开关点之间采用纵联差动保护,在故障时快速切除故障区段,保证非故障线路的正常供电。

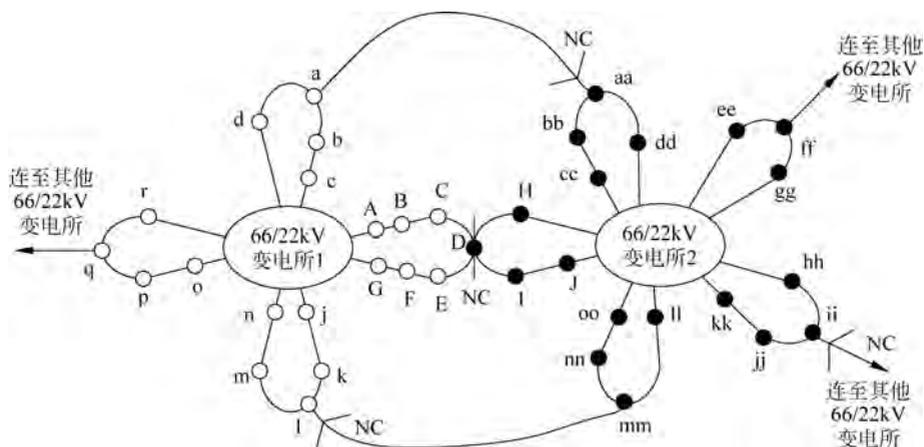


图 3-9 新加坡 22kV 配电网典型接线

NC—常开

图 3-10 给出了香港 11kV 配电网的典型接线图。由 110/11kV 变电站的 11kV 母线上,引出 3~4 回电缆,通过外部的 11/0.4kV 的配电所形成闭环运行环网。每回馈线采用导引线电流差动保护,可快速切除线路故障。

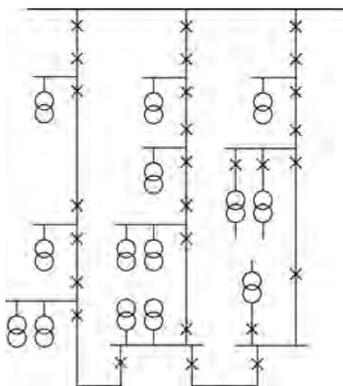


图 3-10 香港 11kV 配电网典型接线

3.1.2 中性点接地方式

配电网中性点接地方式,是指配电网(或配电系统)中性点与大地之间的电气连接方式,又称为配电网中性点运行方式。不同的接地方式均可等效为中性点经一定数值(从 0 到无穷大)阻抗接大地。因不同接地方式系统的零序阻抗不同,使系统单相接地时的故障电流大小不同。我国大陆中压配电网的中性点采用的接地方式主要有不接地、小电阻接地、谐振接地(又称消弧线圈接地)等。

另外一种划分方法将中性点接地方式分为大电流接地方式与小电流接地方式。如果一个系统发生单相接地故障后,故障电流比较大,严重危害配电设备的安全,需要立即用断路器切除故障,则认为该系统中性点采用了大电流接地方式,小电阻接地就是大电流接地方式。不接地、谐振接地就是小电流接地方式。配电网采用小电流接地方式的主要目的,是利用其单相接地故障的电弧能够自行熄灭的特点,减少故障跳闸率,系统可以带接地故障继续运行一段时间,不需要立即切除故障。

1. 小电阻接地方式

中性点经小电阻接地方式,即配电网中性点(一般是母线变压器中性点)经一个电阻与大地连接,如图 3-11 所示。接地电阻的大小应使流经变压器绕组的故障电流不超过每个绕组的额定值。经小电阻接地的配电网发生单相接地故障时,非故障相电压可能达到正常值的 $\sqrt{3}$ 倍,但对配电设备不会造成危害,因为配电网的绝缘水平是根据更高的雷电过电压制定的。

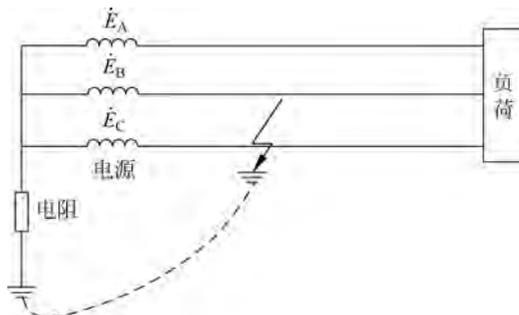


图 3-11 中性点经小电阻接地电网

中性点经小电阻接地的配电网中,接地电阻的选取应参照下列情况:

- (1) 以电缆为主的配电网,单相接地时允许阻性接地电流较大。
- (2) 以架空线路为主的配电网,单相接地时允许阻性接地电流较小。
- (3) 考虑配电网远景规划中可能达到的对地电容电流。
- (4) 考虑对电信设备的干扰和影响以及继电保护、人身安全等因素。

我国部分沿海城市和特大型城市的中压电缆网络也采用了小电阻接地方式,其 10kV 系统中性点的接地电阻一般选择 10Ω 左右。

2. 中性点不接地方式

中性点不接地方式,即配电网不存在中性点或所有中性点对地均绝缘(悬空)的接地方式,如图 3-12(a)所示。

图 3-12(b)给出了中性点不接地配电网 C 相接地的电气相量图,流过接地点的电流 \dot{I}_K 数值上等于正常运行状态下三相对地电容电流的算术和。一般情况下,10kV 架空线路每千米的电容电流约为 30mA,而电缆线路每千米的电容电流为 1~2A。

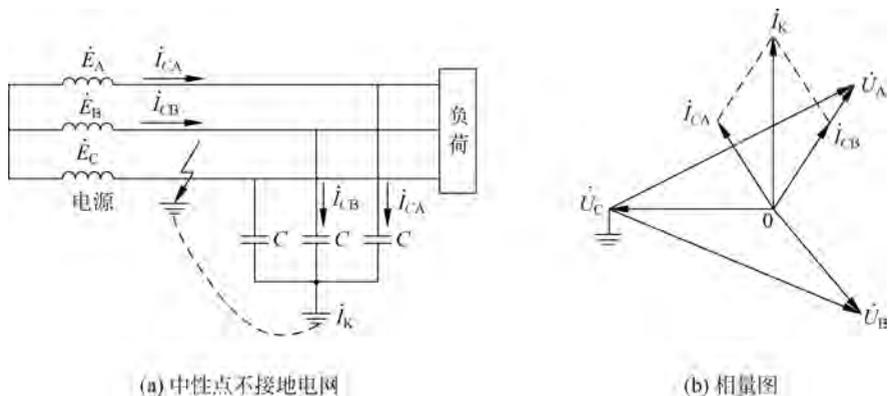


图 3-12 中性点不接地电网及相量图

中性点不接地配电网发生单相接地故障时,虽然三相对地电压会发生变化,但三相之间的线电压基本保持不变,不影响对三相负荷的供电;又由于接地电流数值比较小,对电力设备、通信和人身造成的危害也较小,因此,允许系统在单相接地的情况下继续运行一段时间,运行人员可以在这段时间内采取措施加以处理。可见,配电网采用中性点不接地方式,在发生单相接地故障时不会立即造成停电,能够提高供电可靠性。

配电网中许多单相接地故障是瞬时性的,如雷电过电压引起的绝缘瞬间闪络、大风引起的碰线等。如果配电网中性点不接地,其单相接地故障电流比较小,则接地电弧有可能自行熄灭,使系统恢复正常运行。

配电网采用中性点不接地方式,在发生单相接地故障时,会造成两个非故障相出现过电压现象。由图 3-12 可以看出,对于永久金属性接地故障来说,非故障相对地电压将升至线电压,即升高 1.73 倍;如果接地点出现间歇性拉弧,由于配电网中电感、电容的充放电效应,非故障相电压峰值理论上可能达到额定电压的 3.5 倍。此外,故障电流比较小,也给实现可靠的继电保护、及时检测出故障线路并定位故障点带来了困难。配电网长期带接地点运行,有可能因接地过电压使非故障相绝缘击穿,造成事故扩大,并且会威胁人身安全,干扰

通信系统。

3. 谐振接地方式

根据上面的介绍,配电网采用中性点不接地方式的一个重要优点是可能使单相接地电弧自动熄灭,达到故障自愈的效果。理论分析与实测结果表明,当中压配电网接地电弧电流超过 30A 时,难以自动熄灭。中性点不接地配电网单相接地时,故障点电流等于正常运行时三相线路对地分布电容电流的算术和,实际配电网的电容电流在数安培到数百安培,为此,在配电网电容电流较大时,则需要采用谐振接地方式,将接地电弧电流降低至一个有可能使其自行熄灭的数值。谐振接地方式,又称为经消弧线圈接地方式,是一种在中性点与大地之间安装一个电感消弧线圈的方式,如图 3-13 所示。

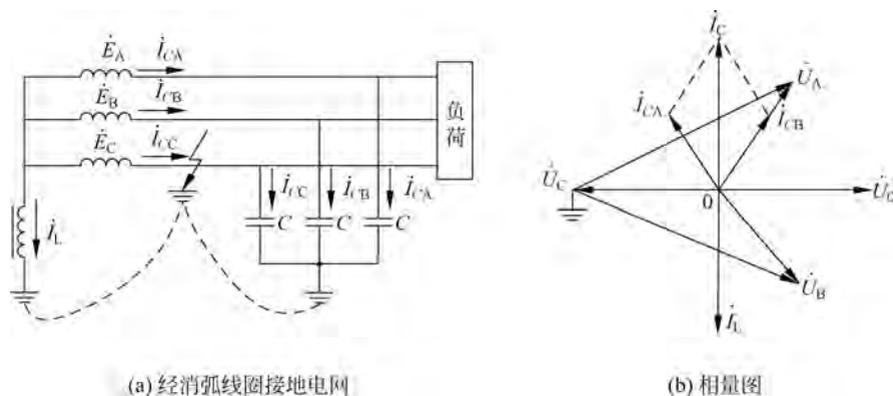


图 3-13 经消弧线圈接地电网及相量图

在中性点不接地的配电系统中,接地电容电流较大且超过一定值时,如果发生单相接地故障,故障点电弧不能自行熄灭。若在中性点上接一个电感线圈,则在发生单相接地故障时,中性点位移电压将在电感线圈中产生一与接地电容电流 \dot{I}_C 相位相反的电感电流 \dot{I}_L ,经大地由故障点流回电源中性点。故障点电流是接地电容电流 \dot{I}_C 与电感线圈电流 \dot{I}_L 的相量和。选择电感线圈的电感值使 I_L 等于 I_C ,则可使流过故障点的电流等于零,电弧因此熄灭,使电网恢复正常。此外,在电弧熄灭后,电感线圈可以限制故障相电压的恢复速度,给故障点绝缘恢复提供时间,从而减小了电弧重燃的可能性,有利于消除故障。这种在中性点接入电感线圈的接地方式就是谐振接地方式,接入的电感线圈称为消弧线圈,其电感量根据配电系统电容电流的大小调整。谐振接地概念最早是由德国电力专家 Peterson 提出的,因此,消弧线圈又叫作 Peterson 线圈。

由于电网的运行方式在不断变化,在某些情况下,电感补偿电流可能远大于电容电流,使故障点仍可能存在较大的电弧电流,达不到应有的灭弧效果,因此,需要根据系统运行方式的变化,及时地调整消弧线圈,避免电网出现较大幅度的脱谐。

谐振接地方式可以大大降低流过故障点的电流,使电弧易于熄灭,提高了接地故障的自愈率。由于消弧线圈多处于过补偿状态,故障时故障点仍然残余部分感性电流,加上系统固有的有功电流和谐波电流,故障点残余电流仍然较大,在一定程度上会影响故障点的自动熄弧,这是传统消弧线圈的不足之处。

早期消弧线圈采用人工调整方式,即人工估算系统对地电容电流并调节消弧线圈补偿容量,操作起来比较麻烦,并且还难以及时、准确地跟踪电容电流的变化。随着技术的发展,现在一般采用自动跟踪补偿装置,克服了人工调整方式存在的缺点。自动跟踪补偿装置一般由驱动式消弧线圈及配套自动测控单元组成。在电网运行方式变化时,装置便自动跟踪测量系统对地电容电流,并在合适的时机将消弧线圈调至合适的运行状态。

传统消弧线圈仅能补偿工频无功电流,无法补偿有功电流。而故障点除工频无功电流外,残余电流还存在由线路和消弧线圈等产生的工频有功电流;此外,还存在由非线性电源和设备产生的谐波电流。因此,采用基于电力电子器件的有源电流发生装置,接地故障后从配电网中性点注入包括工频无功分量、有功分量以及谐波分量的宽频段电流,实现故障点接地电流全电气量补偿,即中性点有源接地方式。这种有源电流发生装置属于一种柔性配电(DFACTS)设备,又可称为柔性接地方式。为减少电流发生装置的容量,可以采用有源设备与传统消弧线圈配合的接地方式,如图 3-14 所示。

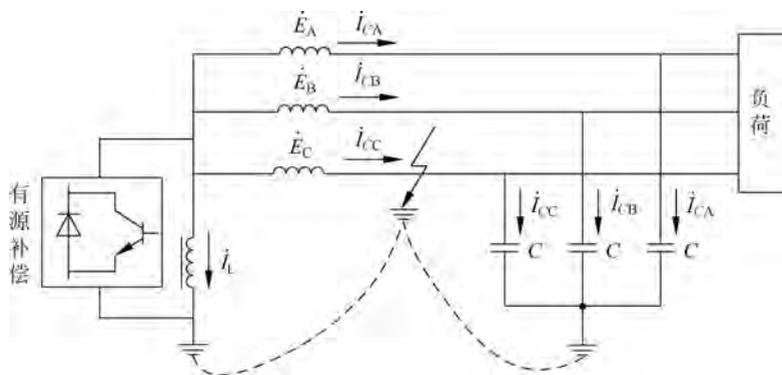


图 3-14 有源接地电网示意图

有源接地技术可以最大限度减少故障点残余电流(使之趋于 0),使故障电弧更容易自熄灭。此外,可以灵活控制熄弧后系统电压的恢复速度,给故障点绝缘提供更充足的恢复时间,最大限度避免电弧重燃。通过上述 2 个措施,促使更多的接地故障自恢复,实现真正意义上的故障自愈,又可以避免间歇性接地故障的发生,从而减少弧光过电压对系统绝缘的危害。

3.1.3 典型城市配电网架介绍

1. 新加坡城市电网结构

新加坡新能源电网公司采用 22kV 梅花状的环形接线方式,变电站的每两回 22kV 馈线构成环网,即花瓣结构;同时,不同电源变电站的每两个环网中间又相互联络,组成花瓣式相切的形式。通常两个环网之间的联络处为该环网的最重要的负荷,如图 3-9 所示。

新加坡城市中压配电网采用典型闭环设计,馈线一律采用 22kV, 300mm² 铜导体 XLPE 电缆,正常运行时按照 50% 负荷设计。新加坡花瓣结构的网络接线图实际上是由变电站单联络和变电站内单联络组合而成。站间联络部分开环运行,站内联络部分闭环运行。正常情况,每个花瓣有自己的特定供电区域,一旦出现问题,只需合上花瓣间的联络开

关,故障花瓣的负荷可以转移到相邻花瓣。新加坡典型花瓣接线关系如图 3-15 所示。

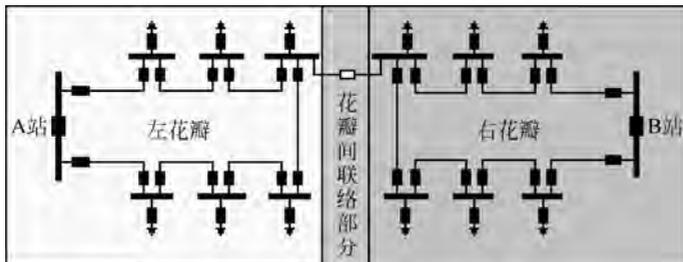


图 3-15 典型花瓣接线关系图

2. 美国部分城市电网结构

在美国,配电系统有 8.3kV、12.7kV、13.6kV、15.5kV、18.8kV、21kV、23kV、25kV、34.5kV 等多种电压等级。若送电距离短、负荷小就采用较低的电压等级,若在地广人少的地区则可采用较高的电压等级。这样就比较灵活地满足了用户的需求,保证电能质量,同时做到经济合理。但电压等级太多,缺乏标准化,不利于配电网建设和运行。

美国的中压配电网广泛采用“4×6”网络,由 4 个节点、6 条线而定名,这是获得美国和加拿大专利的接线方案。其接线图如图 3-16 所示。“4×6”系统是可靠性高、经济效益好的供电网络。正常运行时,每条线的中间断路器断开,每台变压器低压侧分别向 3 条负荷线路送电。如变压器 T1 向 1a、1b 和 1c 三段线路供电,任一条线路故障的影响范围被限制在一个电源供电区内,只占整个网络的 1/12;任一个电源故障时,受其影响的 3 段负荷,可自动闭合线路中间断路器,转由其余 3 台正常变压器供电。此时,每台正常变压器的增加容量为故障变压器容量的 1/3,为全网变压器容量的 1/12。变压器可用率很高,大大减少了系统设备备用容量,节省了建设投资。比如,对 30MVA 负荷,为了保证电源故障时仍 100% 供电,按单电源考虑,需要 60MVA 的电源容量,如果采用“4×6”网络供电,变压器容量仅为 4×10MVA。后者是前者容量的 2/3,经济效益显著。这种效益是通过网内各电源之间的相互支援取得的。

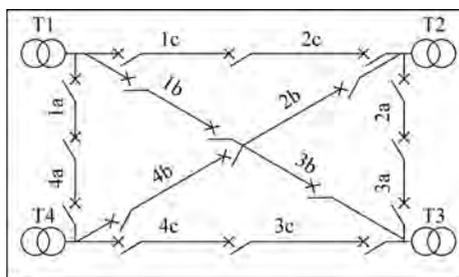


图 3-16 美国“4×6”网络接线

纽约地区中压网络有采用双回线接线模式,每台变压器可以从 2 个独立环取得电源,使供电可靠性更高,且运行灵活,如图 3-17 所示。

3. 法国巴黎城市电网结构

巴黎 225/20kV 变电站形成的外环、中环和内环将巴黎电网分割成 4 个分区,各个变电

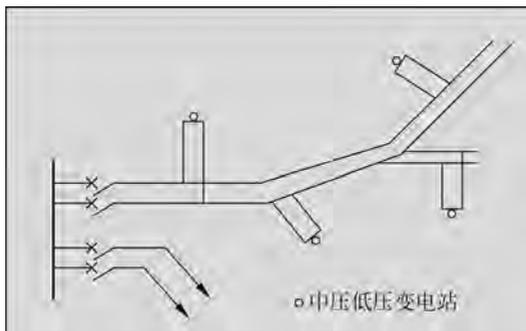


图 3-17 中压双回线接线模式

站就处于分区之间,每个环内的变电站向两侧的分区分电。当负荷增加时,可在分区中增加一 225/20kV 变电站,将分区再一分为二,显示了良好的可扩展结构。巴黎城市电网分区分电的结构如图 3-18 所示。

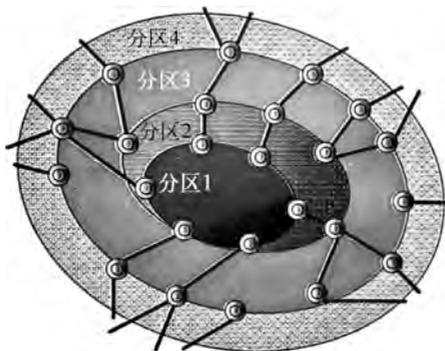


图 3-18 巴黎城市电网分区分电结构示意图

巴黎城区 225/20kV 变电站中压侧均采用单母线分段,每段母线接 1 台变压器,并有 4 条大截面电缆出线,分别向左、右两个方向各出 2 回,每条大截面电缆出线又通过母线和断路器出 6 条馈线和一条大用户专线向外供电,覆盖一条街道,通常在道路两侧人行道各敷设 3 回,分别向道路两边用户供电。因此,一个 225/20kV 变电站 20kV 侧有 8 组干线,其中 4 组与左边的变电站相联,另外 4 组与右边的变电站相联,而一台 225/20kV 变压器有 28 回 20kV 出线,6 条馈线为一组与相邻变电所的另一组出线形成“手拉手”方式,详细接线方式如图 3-19 所示。

4. 德国城市电网结构

德国电网的主网架为 380/220kV 高电压电网,网络采用环网型结构,在城市中心区外围形成了高压环网,由 380/220kV 变电站站点以 110kV 电缆伸入市区中心供电。而城市中压配电网 20kV/10kV 主要采用单、双环网供电的形式、开环运行,开环点设在变电站侧。

德国普遍采用结构简单的标准环式结构,如图 3-20 所示。

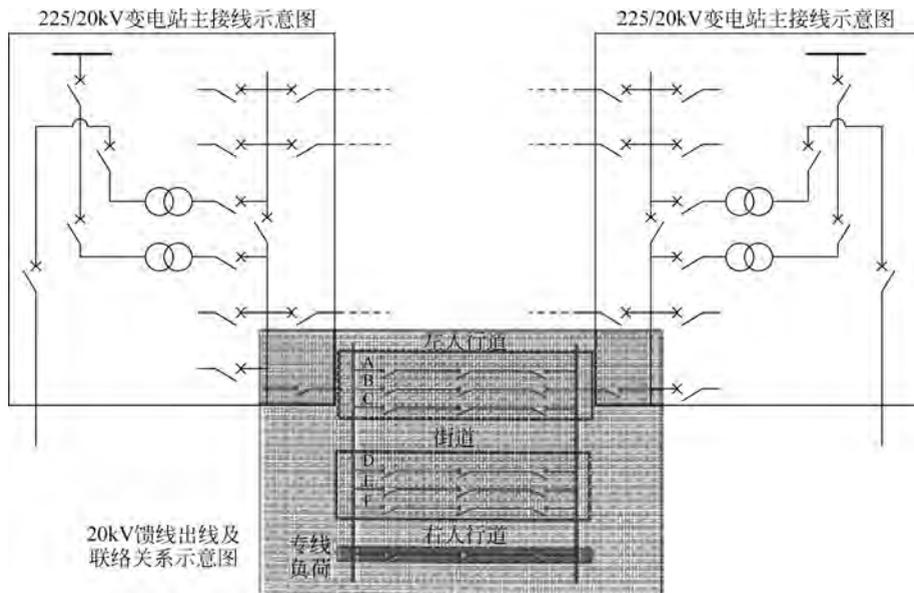


图 3-19 变电站接线方式

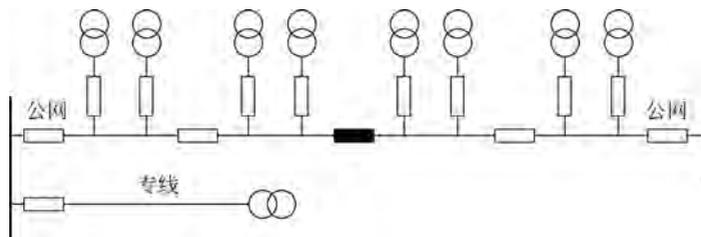


图 3-20 标准环式与直供相结合的供电方式

3.2 低压配电系统网架结构

3.2.1 低压配电系统接线方式

低压配电网是直接给终端用户供电,由 380/220V 架空线路或电缆线路构成的配电网。低压配电网供电的可靠性、供电质量直接关系到用户服务质量,运行费用、线路损耗也是供电部门非常关注的。低压配电网接线主要有辐射型接线、树枝型接线、低压互馈接线。

1. 辐射型接线

采用辐射型接线,引出线发生故障时互不影响,供电可靠性高。但在一般情况下,线损高、开关设备多。适用于设备容量大或负荷性质重要、潮湿及腐蚀性环境的车间内。其接线方式如图 3-21 所示。

2. 树枝型接线

采用树枝型接线,开关设备少,线损低;但当干线发生故障时,影响范围大、供电可靠性差。适用于工厂等小容量车间设备使用。其接线方式如图 3-22 所示。

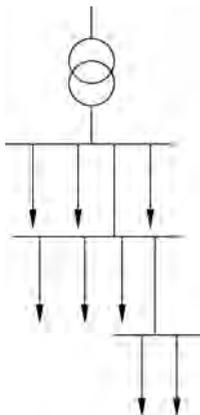


图 3-21 辐射型接线方式示意图

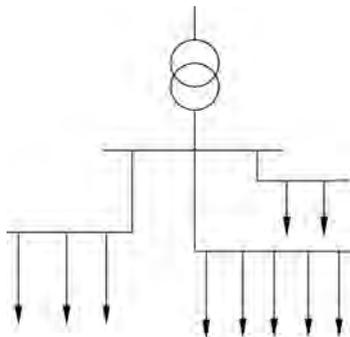


图 3-22 树枝型接线方式示意图

3. 低压互馈接线

不少地区曾采用过低压互馈配电网,目的是避免配电变压器低压侧失电引起停电,低压互馈配电网是将数台邻近的配变低压线路相互连接互馈。为防止因一台配变低压失电使邻近配变低压过载,在两台配电变压器低压线路互馈点装上熔丝(称作平衡熔丝),以限制互馈点转供电流。这种配电网的优点是构建非常容易、电压质量较好;但需要合理配置平衡熔丝,运行比较复杂,在负荷密度高的地区互馈可能较小,故只在一般负荷地区采用这种接线。其接线方式如图 3-23 所示。

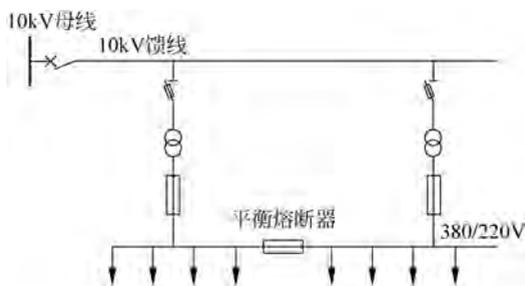


图 3-23 低压互馈配电网示意图

为提高供电可靠性,低压配电网曾采用过网格或数台配电变压器低压互联的供电方式,由于网络结构复杂,设计、运行管理与维护不方便已被逐渐淘汰。

现代低压配电网的趋势是采用尽量短的低压线路直接供应一个或一小片用户,按照“小容量、密布点、短半径”的原则,使配电变压器的安装点尽量在负荷点,配电变压器的低压供电范围尽量紧凑,保证供电质量,降低线损;配电变压器的布点宜多而单台容量宜小,用环形中压配电网保证配变供电可靠性,即使一台配变发生故障,其影响的用户面很小,提高了电网的整体供电可靠性。当然,在负荷密度较低的发展中地区,低压配电网还是实用、经济和有效的。

3.2.2 低压配电系统接地形式

低压配电系统与人类密切接触,其接地方式的选择首先要保证人身安全。国际上低压

配电系统接地方式主要分为两大阵营,即采用欧洲标准 IEC 60364 的国家与采用北美标准 National Electrical Code(NEC)的国家采用的标准。我国制定的低压配电系统接地方式标准 GB13955—2017 参考了 IEC 60364 标准。

根据 IEC60364 与 GB13955—2017,低压配电系统按保护接地的形式可分为 TT 系统、IT 系统和 TN 系统。第一个字母表示电力系统的对地关系:T—直接接地;I—所有带电部分与地绝缘,或一点经阻抗接地。第二个字母表示装置的外露导电部分的对地关系:T—外露导电部分对地直接作电气连接,此接地点与电力系统的接地点无直接关连;N—外露导电部分通过保护线与电力系统的接地点直接作电气连接。如果后面还有字母时,该字母表示中性线与保护线的组合:S—中性线和保护线是分开的;C—中性线和保护线是合一的。

1. TT 系统

TT 系统是带中性线的四线制系统,中性点只在电源侧接地,电气设备外露导电部分(简称外壳)均直接接地,如图 3-24 所示。首先,在电气设备内导体与外壳之间绝缘破坏时,因为外壳接地电阻比较小,可能产生较大的接地电流,使上游断路器跳闸或熔断器熔断,起到很好的保护作用;其次,因为人体电阻远大于外壳接地电阻,人体上分流显著减少,也降低了触电危害。一些情况下,故障电流可能小于负荷电流,上游过流保护不动作,因此,需要装设剩余电流保护器,在电气设备绝缘破坏以及人体接触带电导体时及时切除故障,确保人身安全。

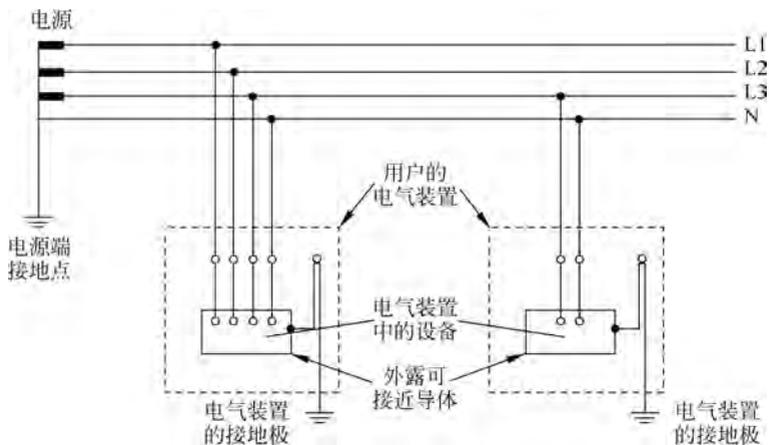


图 3-24 TT 系统接线方式示意图

TT 系统电气设备的外壳接地线与电源端的系统接地是各自独立接地的,正常时各电气装置的外壳部分为地电位,由于不像 TN 系统那样所有电气设备外壳用 PE 线连接在一起,不会发生一个电气设备故障在另一个设备上引起电击的情况,主要应用在一些很难做等电位联结的户外装置,如路灯装置,城郊、农村农业用电等场合。TT 系统在我国有着很长的应用历史。

2. IT 系统

IT 系统的中性点对地绝缘或经高阻接地,电气设备外壳直接接地,如图 3-25 所示。外壳与地之间的电阻很小,在人们接触到绝缘破坏的电气设备外壳时,外壳电位比较低,使流过人体的电流在容许的安全范围内。当系统发生单相接地时,不会引起供电中断。由于没

有中性线,不能对单相设备供电。

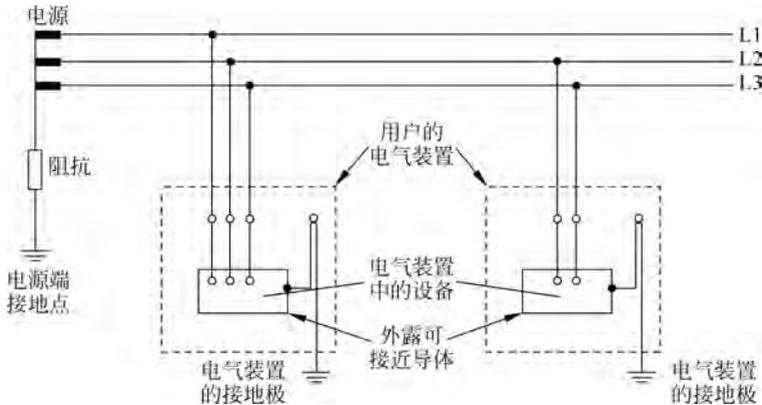


图 3-25 IT 系统接线方式示意图

如果用在供电距离很长时,供电线路对大地的分布电容电流大,电气设备出现漏电时,外壳上电压升高,十分危险。因此,IT 系统主要用户供电距离不是很长、供电的可靠性要求高的场合,例如电力炼钢、大医院的手术室等。地下矿井对供电可靠性要求比较高,通常也使用 IT 系统。在公共的配电系统中没有应用。

3. TN 系统

TN 系统又可分为 TN-C、TN-S 与 TN-C-S 系统。

1) TN-C 系统

TN-C 系统也是带中性线的四线制系统,电源侧中性点直接接地,电气设备保护接地线 PE 和中性线 N 合二为一,使用一根 PEN 线与电源的接地装置直接相连。在 TN-C 系统电气设备绝缘破坏时,将形成幅值很大的短路电流从电源相线经电气设备外壳,通过 PEN 线流向中性点,低压断路器可靠动作,切断电路,避免危害人身安全。

TN-C 系统 PEN 线同时作为电源线以及电气设备保护接地连接线,简单方便,以前在我国有着广泛的应用。这种系统的缺点是,当负荷电流通过保护中性线时,会使 PEN 线带电;PEN 线断线时,可能会使断开部分以外的导体带电。目前,TN-C 系统已很少使用。其接线方式示意图如图 3-26 所示。

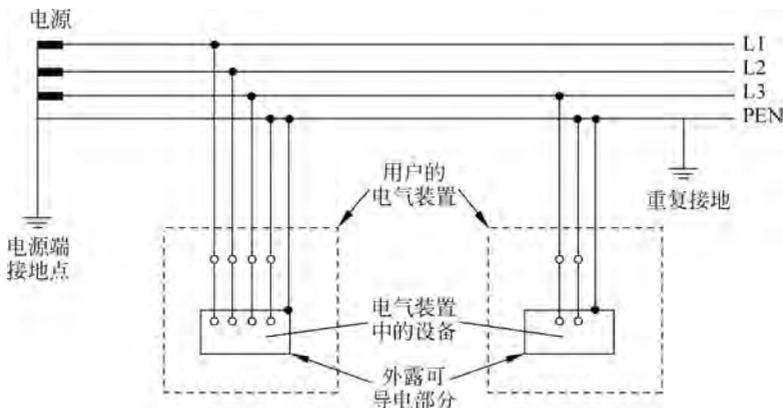


图 3-26 TN-C 系统接线方式示意图

2) TN-S 系统

整个系统的中性线与保护地线是分开的。采用三相五线制供电,用电设备外壳通过专用 PE 线与中性点接地装置连接,避免了 TN-C 系统存在的问题,因此,在城市供电系统中的应用越来越广泛。其接线方式示意图如图 3-27 所示。

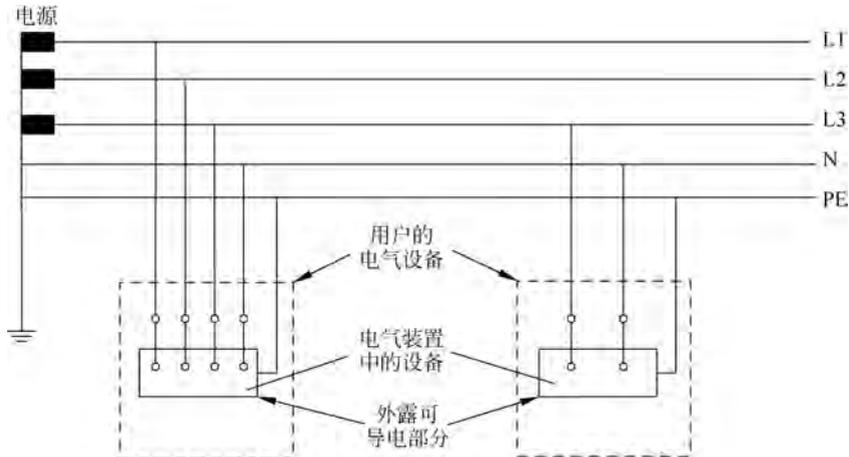


图 3-27 TN-S 系统接线方式示意图

3) TN-C-S 系统

TN-C-S 综合了 TN-C 系统与 TN-S 系统的特点。从变压器台架到终端杆或进户集装表箱采用 TN-C 系统形式,从该处中性线(N)接大地引出一路地线(PE)实现 TN-S 系统供电,如图 3-28 所示。主干线上中性点设置了接地点,避免中性线断线造成用电设备外露导体带电。该方案在用户侧具有 TN-S 系统的优点,省去了电源侧到用户的地线,节约了成本。

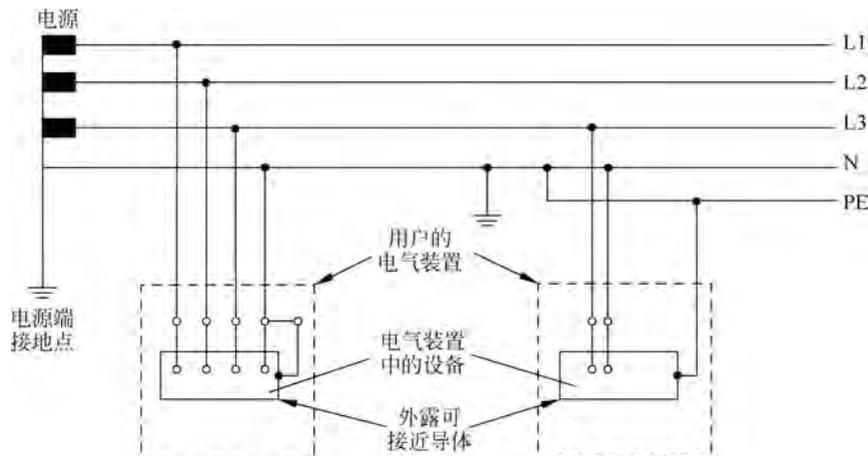


图 3-28 TN-C-S 系统接线方式示意图

4. 低压配电系统接地方式现状

我国最新低压配电系统接地标准推荐使用 TN-S 系统与 TN-C-S 系统。由于历史的原

因,我国公共低压配电系统接地方式多种多样。以福建省为例,城区配电站房、住宅小区的低压配网接地形式以 TN-S 和 TN-C-S 系统为主,架空台区以及乡镇、农村地区以 TT 系统为主。

欧洲国家现在以及过去二三十年建设的低压配电系统基本上都是采用 TN-C-S 系统。英国早期的配电系统农村地区采用 TT 接地方式,城市采用 TN-S 接地方式。在德国也存在一部分早期建设的 TN-C 系统。北美地区主要采用 TN-C-S 系统。

3.2.3 低压配电系统剩余电流保护

1. 剩余电流的基本概念

剩余电流指低压配电线路中三相导体与中性线电流的相量和。一般使用环形电流互感器获取剩余电流,将三相导体以及中性线从电流互感器中穿过,如图 3-29 所示。

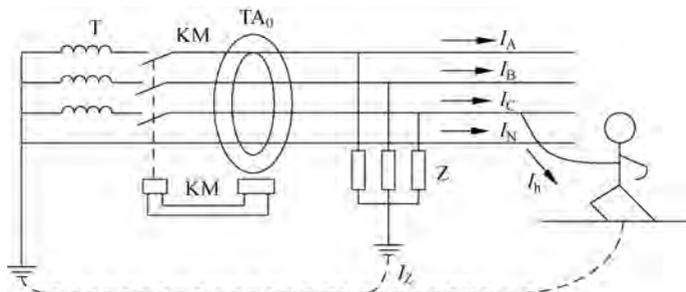


图 3-29 剩余电流示意图

剩余电流来源主要包括以下 3 个部分：①单相接地故障电流,即接地点注入大地的电流；②线路泄漏电流,其又分为两部分,即三相对地电容与对地电导参数不平衡产生的泄漏电流,与三相负荷不平衡等原因引起的三相线路电压不平衡产生的泄漏电流；③TN-C 系统(图 3-26)中,由于 PEN 线上每经过一段距离就要重复接地,三相负荷的不平衡电流(即 PEN 线中的电流)中将有部分电流经大地返回电源,也构成了剩余电流的一部分。

剩余电流与零序电流区别在于：零序电流是三相电流之相量和,剩余电流还包括中性线电流,它是零序电流与中性线电流之相量和。

2. 剩余电流保护配置

剩余电流保护装置,又称剩余电流保护器与漏电保护器,俗称漏保。根据 GB 13955—2017《剩余电流动作保护装置安装与运行》,低压供用电系统中为了避免发生人身触电事故和缩小接地故障切断电源引起的停电范围,剩余电流应采用分级保护。分级保护方式的选择应根据用电负荷和线路具体情况、被保护设备和场所的需要配置,一般分为由总保护、中级保护、末端保护组成两级或三级保护。各级保护应协调配合,动作电流与动作时间优化整定,除末端保护外,各级保护应选用低灵敏度延迟型的保护装置,上下级有动作时间级差,实现具有动作选择性的分级保护。

分级保护是否能正常投运与接地方式有直接关系,根据不同的接地方式,应合理选择分级保护配置方案。

(1) TT 系统。TT 系统中变压器中性点直接接地,用户侧各设备外壳单独接地,电流

由相线流出后流回保护中性点,因此,任意一级保护均可正常投运。现场实际情况一般选用剩余电流保护总保护、中级保护及末级保护,如图 3-30 所示。

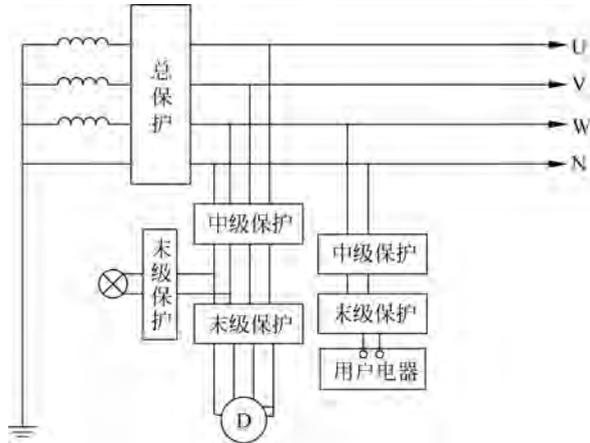


图 3-30 TT 系统保护配置示意图

(2) TN-C-S 系统。对于 TN-C-S 系统,在末端引出 PE 线构成三相五线制接地系统。根据原理,该系统保护装置仅允许使用在 N 线与 PE 线分开的部分,因此,总保无法投运,需在 N 线与 PE 线分开部分分装剩余电流保护装置,如图 3-31 所示。

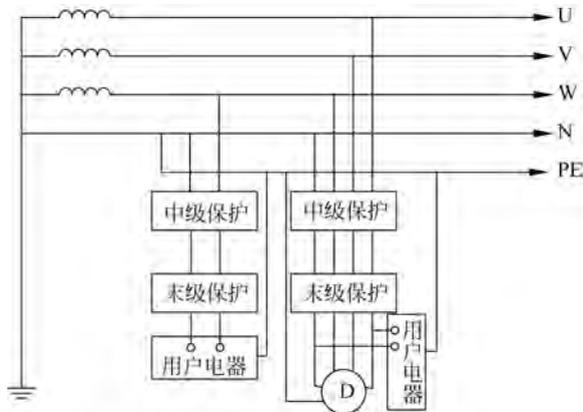


图 3-31 TN-C-S 系统保护配置示意图

(3) TN-C 系统。对于 TN-C 系统,中性线与保护线共用,并在关键节点设置重复接地。因此,正常电流通过重复接地分流导致总保护无法正常投运,应根据具体情况,配备剩余电流中级保护和末级保护,且中保正常投运的必要条件主要有:将电气设备外露壳接近导体独立接地,形成局部 TT 系统;改造成 TN-C-S 系统、TN-S 系统,如图 3-32 所示,将需配备中级保护的用户设备外壳原有接零线取消,改为用户电器直接接地的 TT 系统,如此方可实现保护投入。

(4) TN-S 系统。该接地方式是 N 线与 PE 线分开的,因此可以根据需要配置三级保护,这里就不详述了。

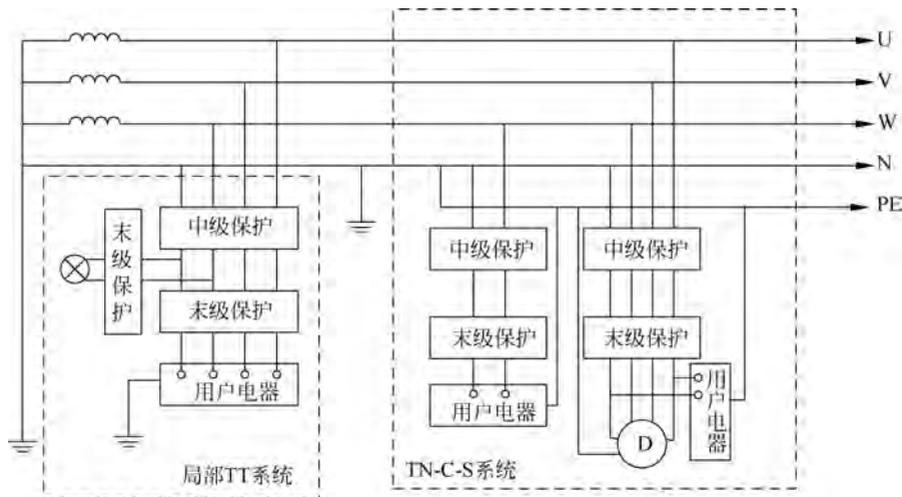


图 3-32 TN-C 系统保护配置示意图

3.3 配电装置

配电装置指将中压电能转换成低压电能并向用户分配的设施,包括配电变压器、配电开关设备、配电所、开闭所与箱式变电站以及现代配电系统逐步推广应用的柔性配电设备等。

3.3.1 配电变压器

配电变压器按相数、冷却方式等特征分类。按相数分为单相变压器和三相变压器;按冷却方式分为油浸变压器和干式变压器;按照调压方式分为有载调压变压器和无载调压变压器。

1. 油浸变压器

普通油浸变压器是将铁芯和绕组组成变压器的器身装在油箱内,油箱内充满变压器油,除此之外,还有散热器、油箱、吸湿器、油标和安全气道,如图 3-33(a)所示。变压器油具有优良的绝缘性能、抗氧化性能和冷却性能,通常按低温性能分为 10 号、25 号、45 号 3 种标号。由于变压器油必须经常跟踪检测油位、酸值、闪点、介质损耗、水分因素,因而维护量较大、耐火性差。

密封型油浸变压器采用真空注油法,在上桶箱盖装有压力释放阀,当变压器内部压力达到一定值时,压力释放阀动作,可排除油箱内的过压。密封型变压器的油箱采用波纹式油箱,可以满足变压器运行中油的热胀冷缩的需要,如图 3-33(b)所示。对于户外使用的配电变压器,全密封型结构能实现少维修,逐步取代普通型的油浸式配电变压器。

2. 干式变压器

干式变压器根据绕组外绝缘形式分为环氧树脂浇注固体绝缘和非包封空气绝缘两种,如图 3-33(c)和(d)所示。

环氧树脂浇注固体绝缘是采用环氧树脂浇注而成的固体包封绕组,具有结构简单、

维护方便、防火阻燃、防尘等优点,可免去日常维护工作,被广泛应用于对消防有较高要求的场合。为保证变压器绕组有良好的散热性能,需要配备自动控制的风机进行强迫风冷却。

非包封空气绝缘是绕组外绝缘介质为空气的非包封结构,具有防火、防爆、无燃烧危险,绝缘性能好,防潮性能好,运行可靠性高,维修简单等优点。为保证变压器绕组有良好的散热性能,一般采用片式散热器进行自然风冷却,并适当增大箱体的散热面积。

干式变压器外壳通常安装不锈钢或铝合金防护罩,如图 3-33(e)所示,用于运行现场的安全防护,能有效地防止小动物进入罩内而引起的短路运行事故,保护人身安全并起一定的电磁屏蔽作用。防护罩应设置观察窗供巡视和测温,检查接头有无发热;柜门有开门报警(或跳闸)和带电磁安全闭锁功能,防止人员碰触带电部位。



图 3-33 典型配电变压器外形图

配电变压器台架,即变台装置,又称变台,是由单台配电变压器及其辅助设备组成的中压/低压配电设施,其接线如图 3-34 所示,高压侧采用跌落式熔断器,低压侧装低压熔断器或断路器。现场照片如图 3-35 所示。

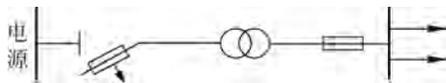


图 3-34 变压器台接线图

变压器台架是城市配电网中最常用的配电设施。变压器台架分为柱上变压器台与落地式变压器台 2 种,柱上变压器台架用于架空配电线路上,落地变压器台在架空线路与电缆线路上都有应用。变压器台的设置要使高压深入负荷中心,尽量避开车辆、行人多的场所;尽可能采用小容量配电变压器,多设配电点。

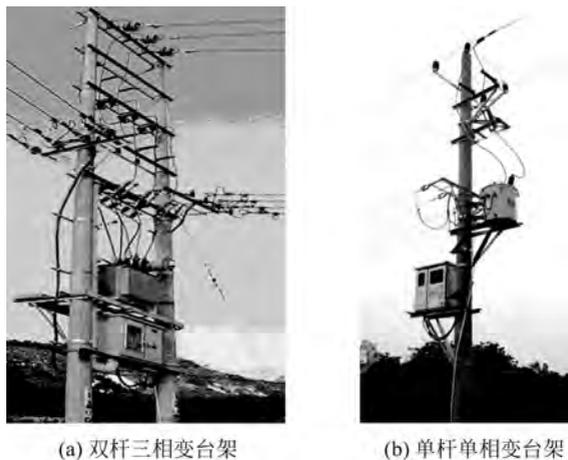


图 3-35 配电变压器台架照片图

3.3.2 柱上开关设备

柱上开关设备有安装在架空线路上的柱上断路器、重合器、柱上负荷开关、自动分段器等。

1. 柱上断路器

柱上断路器能开断、关合短路电流,在中压配电网中有着广泛的应用。它既可用于长距离架空线路,作为短路与过电流保护设备;亦可用作线路分段负荷开关,加装智能控制器或终端装置后,实现配电网自动化。

按照灭弧介质的不同,柱上断路器主要有空气、绝缘油、 SF_6 与真空断路器 4 类。目前,前两类已逐步淘汰,占主导地位的是真空断路器。下面介绍 2 种典型的在国内普遍使用的真空断路器。

ZW32 型柱上真空断路器外形如图 3-36 所示。它采用电动储能、电动分合,同时具有手动储能、手动分合功能。内置过流脱扣器,完成过电流与短路保护功能;当用作分段负荷开关时,需要将过流脱扣器拆除或退出运行。配置弹簧储能操动机构,有的采用永磁操动机构。

断路器内置装设二相或三相电流互感器,供过电流或短路保护用或提供电流采集信号。操作电源需要外引交流 220V 电源或直流电源,一般在 10kV 线路上外置电源变压器或电压互感器,以获得交流 220V 电源;有的在底座上加装电容分压互感器,为电动操动机构与配电网终端装置提供电源,以便实现配电网自动化。

ZW20 型柱上真空断路器外形如图 3-37 所示。它采用真空灭弧、 SF_6 绝缘,配置弹簧储能操动机构,具有良好的电气特性与高可靠性。操作电源可以外引交流或直流 220V 电源,一般是在 10kV 线路上外置电源变压器或电压互感器,以获得交流 220V 操作电源。



图 3-36 ZW32 型柱上真空断路器外形

2. 重合器

重合器是一种本身具有控制与保护功能的成套开关设备。它能检测故障电流并按预先设定的分合操作次数自动切断故障电流与重合,并在动作后能自动复位或自锁;其作用相当于安装了保护设备的断路器,具有保护性能完善、体积小、造价低的特点,广泛用于变电站出口处或配电线路上。

常用的重合器主要有真空灭弧与 SF₆ 灭弧 2 种,其外形如图 3-38 所示。



图 3-37 ZW20 型柱上真空断路器外形



(a) 真空型自动重合器



(b) SF₆自动重合器

图 3-38 重合器

重合器具有反时限电流保护特性,并有多种特性曲线可选。早期的重合器采用液压控制,现在的重合器一般采用电子控制器的柱上断路器,控制器留有配电网自动化接口,便于实现遥信、遥控与遥测功能。电子控制的重合器常用电磁铁或电动机作为合闸动力,分闸则通过释放分闸弹簧储能来完成,分闸弹簧在合闸过程中储能。用于线路上的重合器,其操作电源直接取自高压线路,用于变电站内时取自变电站内低压电源。

上面介绍的柱上断路器加装具有自动重合功能的配电网终端,亦可作为一个重合器使用。

3. 柱上负荷开关

柱上负荷开关能够切断负荷电流和关合短路电流,但不能开断短路电流;非常适合用作配电线路分段开关,与智能控制器或终端装置配合,实现配电网自动化。目前,柱上负荷开关常用的灭弧室有 SF₆ 与真空灭弧室,结构有箱式与敞开式两种,如图 3-39 所示。



(a) 箱式



(b) 敞开式

图 3-39 柱上负荷开关结构

柱上负荷开关通常内置三相电流互感器,提供电流采集信号;有的开关内置电阻或电容分压式传感器,提供电压采集信号。一般都具有电动分合与手动分合功能。

4. 自动分段器

自动分段器是一种本身配有控制器的负荷开关,能够关合到故障上,但不能断开短路电流,是一种由重合器发展而来的自动开关设备。它作为分段开关安装在配电线路上,与变电

站出口处的重合器或断路器配合,按顺序动作,隔离线路故障。自动分段器的控制电源由高压线路通过电源变压器或电压互感器提供,为保证开关在故障电流时不分开,通过电流互感器为合闸线圈提供维持电流,以保证开关在大电流时处于合闸状态。

根据检测和控制原理的不同,自动分段器分为电压型与电流型。检测到线路失压后即跳闸、来电后延时重合的称为电压型;检测到短路电流出现次数超过设定值后跳闸的称为电流型。

上面介绍的柱上负荷开关加装具有自动分段功能的配电网终端后,也可作为自动分段器使用。

5. 自动分界开关

近年来,一种俗称为“看门狗”的自动分界开关在国内获得了广泛应用。自动分界开关的构成与自动分段开关类似,只是其安装地点是在用户供电系统与供电企业所管辖的主系统的分界点上。

自动分界开关可采用电流型控制原理隔离用户侧系统的短路故障,亦可配置电流保护直接切除用户侧系统的短路故障;同时,可检测或根据需要自动隔离用户侧系统小电流接地故障。

柱上开关设备在架空线路上的安装示意图如图 3-40 所示。

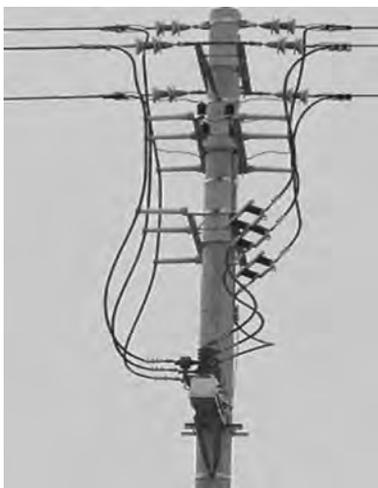


图 3-40 柱上开关安装图

3.3.3 跌落式熔断器与隔离开关

1. 跌落式熔断器

高压跌落式熔断器用于高压配电线路、配电变压器、电压互感器、电力电容器等电气设备的过载及短路保护。跌落式熔断器的作用是当下一级线路设备短路故障或过负荷时,熔丝熔断、跌落式熔断器自动跌落断开电路,确保上一级线路仍能正常供电。熔丝熔断,跌落式熔断器自动跌落后有一个明显的断开点,以便查找故障和检修设备。熔断器具有结构简单、价格便宜、维护方便、体积小等优点,在配电网中广泛应用。

跌落式熔断器由绝缘套管、熔丝管和熔丝元件 3 部分构成,如图 3-41 所示,在熔丝管内装有用桑皮纸或钢纸等制成的消弧管。

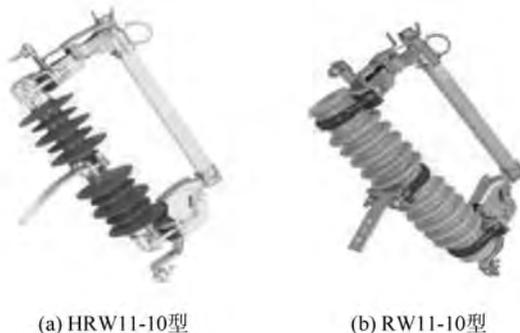


图 3-41 跌落式熔断器

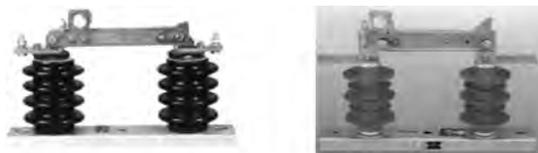
跌落式熔断器在线路上安装时,熔丝管的轴线与垂直轴线成 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 倾斜角,当被保护线路发生故障,故障电流使熔丝熔断时,形成电弧,消弧管在电弧高温作用下分解出大量气体,使管内压力急剧增大,气体向外高速喷出,对电弧形成强有力的纵向吹弧,使电弧迅速拉长熄灭。与此同时,由于熔丝熔断,熔丝的拉力消失,使锁紧机构释放,熔丝管在上静触头的弹力及其自重的作用下,绕下轴翻转跌落,形成有一定距离的明显断开点,故障被隔离。跌落式熔断器安装图如图 3-42 所示。

2. 隔离开关

隔离开关无灭弧能力,不允许带负荷拉开和合上。但它断开时可以形成可见的明显断开点和安全距离,保证停电检修工作的人身安全,主要装在高压配电线路的出线杆、联络点、分段处、不同单位维护的线路的分界点处,因此俗称隔离刀闸。隔离开关的结构由导电部分、绝缘部分、底座部分组成,见图 3-43(a)、(b)。



图 3-42 跌落式熔断器安装图



(a) 瓷绝缘支柱刀闸

(b) 硅橡胶绝缘支柱刀闸

图 3-43 柱上隔离开关

隔离开关应安装在操作方便的位置,并保证断开时刀片不带电、刀口带电,因此静触头安装在电源侧,动触头安装在负荷侧。引线端子应采用设备线夹或铜铝端子,相间距离不小于 500mm 。隔离开关安装时一般固定在横担上,操作动触头水平向下或垂直方向成 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。操作机构、转动部分应调整好,使分合闸操作能正常进行,无卡死现象。

3.3.4 中低压开关柜

开关柜俗称配电盘,是以开关为主的电气设备,将中低压电器(包括控制电器、保护电器、测量电器)以及母线、载流导体、绝缘子等装配在封闭的或敞开的金属柜体内,作为接受和分配电能的配电装置,又称成套开关柜或成套配电装置。

1. 中压开关柜

中压开关柜按断路器安装方式分为移开式(手车式)和固定式;按柜内绝缘介质可分为大气绝缘高压开关柜和气体绝缘高压开关柜;按照功能可分为进线柜、馈线柜、联络柜、PT柜、计量柜等。下面介绍两个常用典型的中压开关柜。

1) KYN 开关柜

KYN 铠装金属封闭开关柜,又称中置式手车柜,由固定的柜体和手车两大部分组成,柜体的外壳和各功能单元的隔板均采用螺栓连接,如图 3-44 所示。开关柜外壳防护等级为 IP4X,断路器室门打开时的防护等级为 IP2X,各单元之间用金属板隔开成为全封闭型的结构,所有操作均在柜门关闭状态下进行;防护等级高,可防止杂物和害虫侵入。

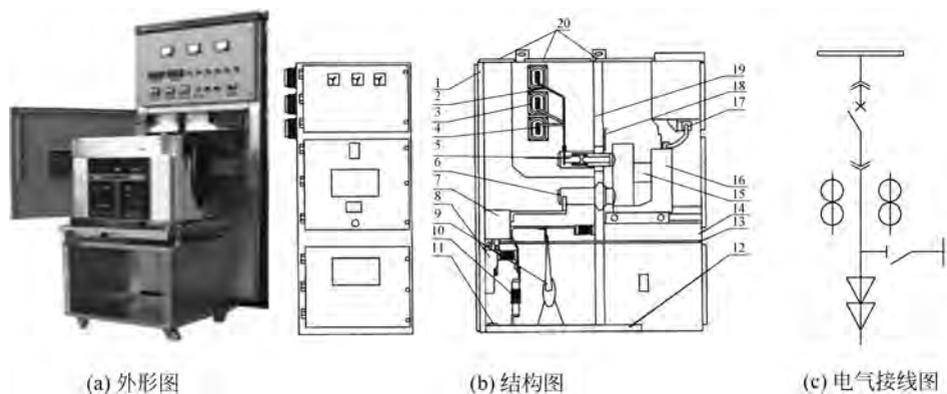


图 3-44 KYN28 馈线柜

1. 外壳; 2. 分支小母线; 3. 穿墙套管; 4. 主母线; 5. 静触头; 6. 静触头盒; 7. 电流互感器; 8. 接地刀闸; 9. 电缆; 10. 避雷器; 11. 接地主母线; 12. 底板; 13. 接地开关操作机械; 14. 可移出式水平隔板; 15. 加热装置; 16. 断路器手车; 17. 二次插头; 18. 活门; 19. 装卸式隔板; 20. 泄压装置

中置式小车装于柜子中部,小车的装卸需要专用装载车。与落地式开关柜相比,中置式开关柜具有更多的优点。由于中置式小车的装卸在装载车上进行,小车在轨道上推拉,这样就避免了地面平整质量对小车推拉的影响。中置式小车的推拉是在柜门封闭的情况下进行的,对操作人员是安全的。中置柜的柜体下部分空间较大,电缆的安装与检修很方便。所以,移开式高压开关柜大都采用中置式小车。

开关设备主要电气元件都有其独立的隔室,即断路器手车室、母线室、电缆室、继电器仪表室;除继电器室外,其他三隔室都分别有其泄压通道。

开关柜具有可靠的联锁装置,为操作人员与维护人员提供可靠的安全保护,主要有:

① 手车从工作位置移至隔离、试验位置后,活动帘板将静触头盒隔开,防止误入带电隔室。检修时,可用挂锁将活动帘板锁定。

② 断路器处于合闸状态时,手车不能从工作位置拉出或从隔离、试验位置推至工作位置;断路器的手车已充分锁定试验位置或工作位置才能被操作。

③ 接地刀闸仅在手车处于隔离、试验位置及柜外时才能被操作,当接地刀闸处于合闸状态时,手车不能从隔离、试验位置退至工作位置。

④ 手车在工作位置时,二次插头被锁定不能拨开。

⑤ 在手车室,母线室和电缆室的上方均设有压力释放装置,当断路器或母线发生内部故障电弧时,顶部装配的压力释放金属板将被自动打开并释放压力和排泄气体,以确保操作人员和开关柜的安全。

⑥ 开关柜上的二次线与手车的二次线的联络是通过二次插头来实现的。二次插头的动触头通过一个尼龙波纹管与手车相连,二次静触头座装设在开关柜断路器隔室的右上方。手车只有在试验、隔离位置时,才能插上和解除二次插头,手车处于工作位置时于机械连锁作用,二次插头被锁定,不能解除。断路器手车在二次插头未接通之前仅能进行分闸,由于断路器手车的合闸机构被电磁锁定,所以无法使其合闸。

2) 气体绝缘开关柜(C-GIS)

C-GIS 是柜式气体绝缘金属封闭开关设备,简称 C-GIS,俗称充气柜。它把 GIS 的 SF_6 的绝缘技术、密封技术与空气绝缘的金属封闭开关设备制造技术有机地相结合,将各高压元件设置在箱形密封容器内,充入较低压力的绝缘气体。

充气式全绝缘高压开关柜三相共箱式用 SF_6 气体绝缘,如图 3-45 所示,将母线、隔离开关、断路器以及 PT 等一次带电设备密封在低压的 SF_6 气室内,而二次及开关操作控制机构设置于气室外,电缆进出线采用全绝缘全密封式终端头,从而构成了充气式全绝缘高压开关柜。开关柜由母线室气箱、断路器室气箱、控制间隔和进出电缆间隔组成,断路器气箱在上,母线室气箱在下。母线气箱包括母线和三工位的隔离开关,断路器室气箱包括断路器、CT、PT,把高压部件密封在气箱内,不与外界接触。操动机构在气室外部、柜前部,极柱与机构间的拉杆通过复合密封管连接,与三工位隔离开关配合可实现接地功能。三工位隔离开关与断路器串联连接,具有合闸、断开、接地 3 种位置状态的转换功能,与断路器实现相互锁,防止误操作。作为二次控制和保护单元,采用多功能综合保护及控制单元,还可以对断路器及三工位隔离开关进行程序操作,满足现代智能配电网的需要,是实现控制、保护、测量、监视、通信等功能的新型开关设备。

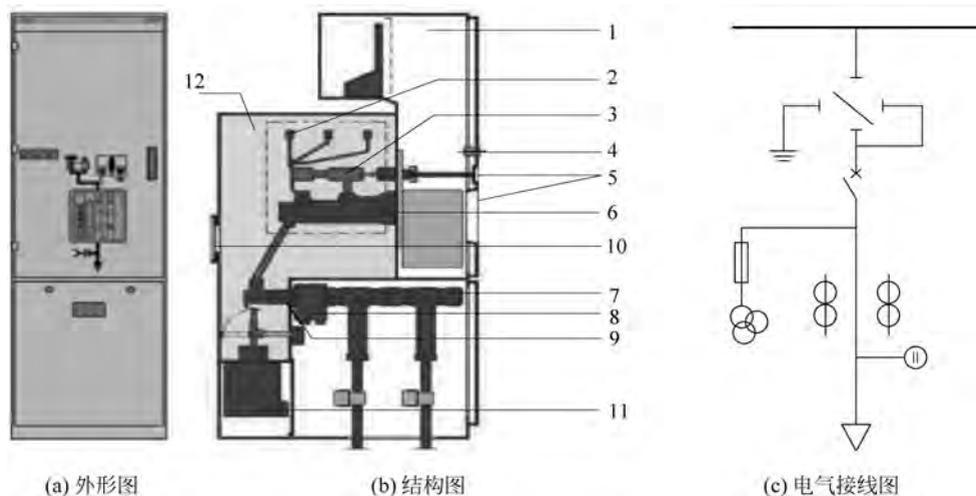


图 3-45 充气式绝缘高压开关柜

1. 二次室; 2. 母线; 3. 三工位隔离开关; 4. 电容式带电显示器; 5. 控制机构; 6. 断路器; 7. 电缆终端设备; 8. 电流互感器; 9. 锥形电缆插座; 10. 压力释放板; 11. 带隔离开关的电压互感器; 12. SF_6 气室

2. 低压开关柜

低压开关柜是由刀开关、自动空气断路器(或称自动空气开关)、熔断器、接触器、避雷器和监测用各种交流电表及控制电路等组成,并根据需求数量组合装配在箱式配电柜体内的配电装置。

低压开关柜按照结构的不同,分为固定式低压开关柜和抽屉式低压开关柜两种。按开关柜的功能来分有进线开关柜、馈线开关柜、联络开关柜、计量柜、无功补偿柜等。常用的有GGD型固定式低压开关柜、GCK型低压抽屉式开关柜、GCS型低压抽屉式开关柜、MNS型低压抽屉式开关柜、MCS智能型低压抽屉式开关柜,示意图如图3-46所示。



图 3-46 低压开关柜示意图

总体而言,抽屉式柜较省空间,维护方便,出线回路多,但造价贵;而固定式的相对出线回路少,占地较多。

GGD 为固定柜,具有机构合理、安装维护方便、防护性能好、分断能力高等优点。缺点是回路少、单元之间不能任意组合且占地面积大,智能化程度低。采用 GGD 柜是对供电可靠性要求不高场所的理想选择。

GCK 型低压抽屉式开关柜且具有分断能力高、动热稳定性好、结构先进合理、电气连接方案灵活,系列性、通用性强,各种方案单元任意组合,一台柜体,容纳的回路数较多,节省占地面积,防护等级高,安全可靠,维修方便等优点。缺点是水平母线设在柜顶垂直母线没有阻燃型塑料功能板,智能程度低。

GCS 型低压抽屉式开关柜具有较高技术性能指标,根据安全、经济、合理、可靠的原则

设计的新型低压抽屉式开关柜,还具有分断接通能力高、动热稳定性好、电气连接方案灵活、组合方便、系列性实用性强、防护等级高等优点。

MNS 系列设计紧凑,以较小的空间能容纳较多的功能单元;结构通用性强,组装灵活,防护等级高;采用标准模块设计,可根据需要任意选用组装。

MCS 型抽屉开关柜互换性好,可容纳更多的功能单元,柜内元件可根据不同需求配置各种型号的开关。缺点是造价高。

总之,低压开关柜的结构件模块化、标准化的结构设计配合专业化生产模式是该行业的发展方向,现场总线及工业以太网技术的应用给低压开关设备带来了革命性的变化,低压配电成套装置的智能化、高防护、紧凑型、高可靠性、模块化等是技术发展方向。

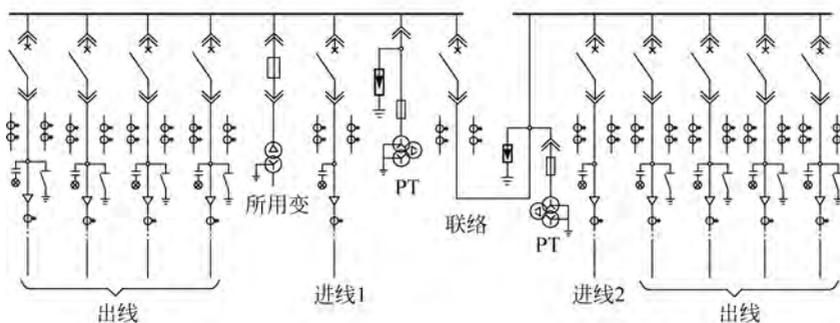
3.3.5 开闭所与配电站

开闭所是变电所 10kV(20kV)母线的延伸,担负着接受和重新分配出线,减少高压变电所的出线间隔和出线走廊的作用,还可以为重要客户提供双电源。而配电站则起着变换电压和分配电能并直接就近向低压用户供电的作用。

开闭所由高压开关柜、母线、控制和保护装置等电气设备及其辅助设施按一定的接线方案组合排列而成的,如图 3-47 所示。通常为户内布置,但也有采用户外型开关设备组成为户外箱式结构。开闭所也称作开关站。



(a) 外观排列图



(b) 开闭所电气接线图

图 3-47 开闭所示意图

配电站,又称配电室或配电房,由变压器、高压开关柜、低压开关柜、母线及其辅助设备按一定的接线方案组合排列而成,它起着变换电压和分配电能并直接就近向低压用户供电的作用,如图 3-48 所示。为了节约占地,可将配电站(室)与开闭所合建。

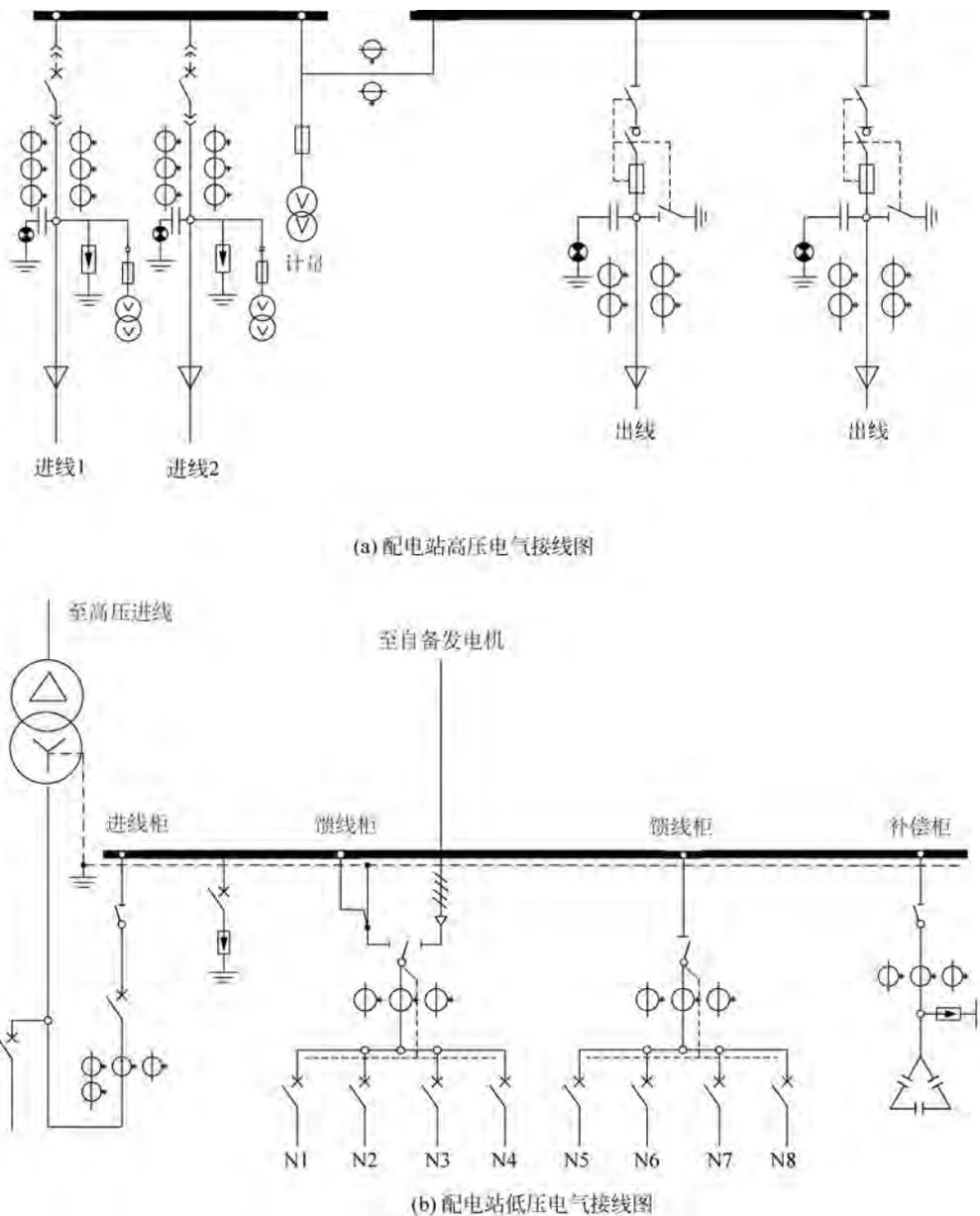


图 3-48 配电站电气接线图

随着城市配电网负荷密度的增加,要求配电点“小容量、多布点”,配电所或开闭所的应用逐步减少,有被环网供电方式的环网柜或箱式变电站所取代的趋势。

3.3.6 户外箱式配电装置

户外环网单元、电缆分支箱和箱式变电站,布置在户外且占用空间小,在城市配电网中得到广泛的应用。

1. 户外环网单元

户外环网单元,又称环网站,它是由两路以上的开关共箱组成的预装式组合电力设备。它由3~5路的负荷开关、负荷开关与熔断器组合电器、断路器组合,与硬母线密闭在同一个不锈钢金属外壳内,采用SF₆作为灭弧介质和绝缘介质,开关的出线套管及终端头采用也全绝缘、全密封。由于这种特殊的排列和构造,图3-49(a)、(b)给出了一典型的4间隔户外箱式环网柜外观图与接线图,2个接入电缆环网的进线采用负荷开关柜,2条对外供电的出线采用负荷开关-熔断器组合电器柜。也有用断路器代替进线负荷开关与出线负荷开关-熔断器组合的情况。

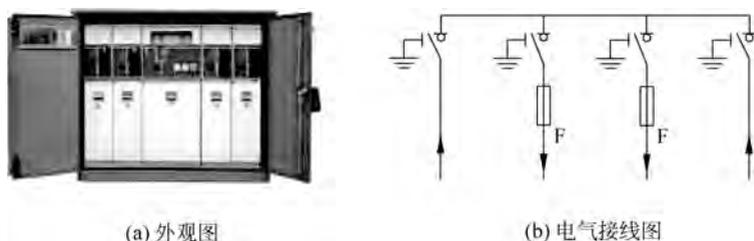


图 3-49 环网开关柜

环网柜进线与出线配置三相电流互感器,提供电流采集信号;在母线上安装电压互感器提供电压采集信号,并为电动操作机构与配电网自动化终端装置提供电源。

环网柜具有结构紧凑、造价低、体积小、安装方便的优点,可以根据需要扩展,不受外部环境的影响,在城市电网中获得了广泛应用。在我国,环网柜除用作环网供电单元外,还越来越多地用作开闭所多回路开关设备与用户终端配电设备。

2. 电缆分支箱

电缆分支箱用于连接两个以上电缆终端的封闭箱,以分配电缆线路的分支路的电力设备的,终端头采用封闭式的肘形头或T形头,如图3-50所示。它常用于电缆分支线,不宜用于主干线。它由2~8路的进出线及其连接母线、电缆终端接头组成,能满足多种接线要求。其连接方式简单、扩展性强,具有耐腐蚀、免维护、安全可靠等特点,适应户内外各种运行环境。



图 3-50 电缆分支箱

3. 箱式变压器

箱式变电站简称箱变,是一种将配电变压器、中压环网开关、低压开关按照一定的结构和接线方式组合起来的预装式配电装置。其优点是占地面积小,可以工厂化生产,现场安装施工快,不需再建配电所等土建,投资节约,外形美观且与环境相协调,因此已被广泛采用。

美式箱式变电站外观如图 3-51(a)所示。它有一到两路电源进线,采用单台变压器,4~6路低压馈出线;采用全密闭、全绝缘结构,将高低压开关的结构进行简化并与变压器浸入统一油箱中,具有体积小、结构紧凑、造价低、便于安装的优点。其缺点是开关与变压器共用油箱,散热不好,过电流能力差;此外,其中一相熔断器熔断后负荷开关不分闸,会导致设备缺相运行。

欧式箱式变电站外观如图 3-51(b)所示。它由常规的环网开关柜与配电变压器构成,多路低压馈出线,有的还附设了电容器小室。目前已由早期的普通型(占地 $5\sim 6\text{m}^2$),发展为广泛采用的紧凑型(占地约为 3.4m^2),10kV侧进线采用环网开关柜,配电变压器一般采用干式变压器。欧式箱式变电站的体积比美式箱式变电站略大,但操作和运行更符合我国的习惯要求。



图 3-51 箱式变电站

箱式变电站主接线如图 3-52 所示。高压进线通常采用开关与熔断器组合式保护,负荷开关采用真空断路器或 SF₆ 负荷开关。

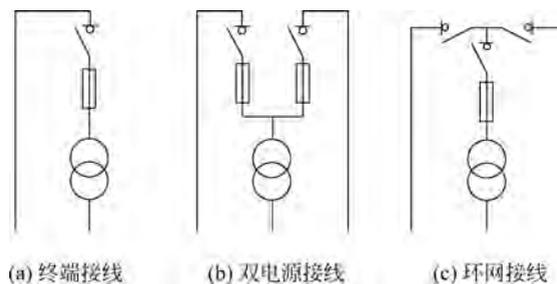


图 3-52 箱式变电站主接线图

3.3.7 柔性配电设备

柔性配电设备包括动态电压恢复器、静止同步补偿器、静态无功补偿装置、固态开关和故障电流限制器等,这些是现代新型配电设备,仅在配电网中少量应用,其技术处于不断发展成熟中。

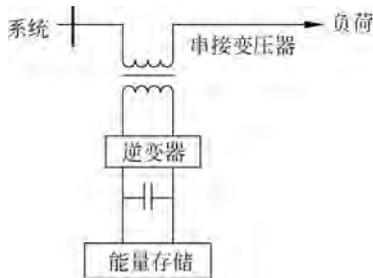


图 3-53 DVR 构成原理图

1. 动态电压恢复器

动态电压恢复器是由直流储能电路、功率逆变器和串接在供电线路中的变压器组成,英文缩写为 DVR,如图 3-53 所示。DVR 在测出电压瞬时降低后,立即由直流电源逆变出交流电压信号,与系统电源电压相加(串联),使负载上的电压维持在合格的范围内,直至系统电压恢复到正常值。DVR 输出波形能够维持一段时间,可以补偿系统电压的瞬时下降,防止电压骤降给一些敏感负荷带来危害。这种补偿方式仅补偿电压的差值,需要的补偿容量小,且具有补偿效果与系统阻抗、负荷功率因数无关等优点。

2. 静止同步补偿器

静止同步补偿器又称静止无功发生装置,它是一个基于脉宽调制技术的无功功率发生器,通过自动调节注入到系统中去的无功电流,实现对瞬时无功功率控制,从而达到抑制电压波动、闪变与谐波的目的,其英文缩写 STATCOM。STATCOM 特别适用于冲击性负荷的无功补偿;用于风电场的无功补偿时,能够很好抑制风力发电机并网或切机瞬间引起的电压波动,并且在系统故障时,能够提高机端电压恢复速度,维持风机在故障期间继续平稳运行,为系统提供功率支撑。

STATCOM 在国内外都有一定的应用。我国已开发出 $\pm 50\text{Mvar}$ 的 STATCOM 并投入实际系统运行。不足之处是控制复杂,造价较高,在一定程度上限制了它的推广应用。

3. 静态无功补偿装置

静态无功补偿装置包括晶闸管控制的电抗器与电容器两种装置,其英文缩写 SVC。实际应用中,也可将两者结合使用,称为混合式 SVC。SVC 通过控制晶闸管的导通时刻来改变流过电抗器或电容器的电流,从而调节从系统中吸取或向系统注入的无功电流。常规的无功功率补偿装置采用机械开关投切电容器,响应速度慢,且不能满足对波动较频繁的无功负荷进行连续补偿的要求,而 SVC 可以平滑、无级地调节容性或感性无功功率,且具有较好的动态响应特性。

SVC 广泛用于抑制轧钢机、电弧炉等冲击性负荷引起的电压闪变;用于电气化铁路等场合,补偿不对称负载引起的电压不平衡;用于自动消弧线圈接地装置,动态补偿中性点非有效接地系统的接地电容电流;用于风力发电并网控制,为风电场提供快速、连续的无功补偿。

4. 固态开关

固态开关是应用电力电子器件构成的开关设备,分为固态转换开关(SSTS)与固态断路器(SSCB)两种。它们利用电力电子器件导通与截止速度快的特点,解决传统机械开关动作时间长(达数个周波)带来的问题。

SSTS 是由晶闸管构成的负荷开关,可在接到控制命令后数个微秒内接(导)通,在半个周波内关断(截止)。用于双电源供电回路的切换,可避免采用机械开关倒闸操作引起的较长时间供电中断,使敏感负荷的供电不受影响。如图 3-54 所示的双电源供电回路,正常运

行时, 固态转换开关 A 接通, 开关 B 关断, 敏感负荷由电源 A 供电, 电源 B 处于备用状态。在控制系统检测到电源 A 停电时, 在半个周波内将开关 A 关断, 开关 B 接通, 负荷在一个周波内转为电源 B 供电, 实现供电回路的“无缝”转换。

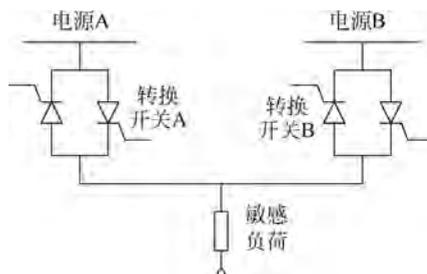


图 3-54 SSTS 的双电源供电回路图

SSCB 由门极可关断晶闸管 (GTO) 回路和晶闸管 (SCR) 加限流电抗器 (或电阻器) 回路两部分并联而成, 如图 3-55 所示。正常运行时, 电流流经 GTO 支路。电力系统故障时, 流经 GTO 支路的电流迅速超过限额, GTO 在半个周波之内关断, 故障随之流经 SCR 和限流电抗器支路, 达到限制故障电流的目的。然后 SCR 关断, 完全切断故障电流。目前, SSTS 已有商业化的产品。而 SSCB 还处在低压、小电流断路器的试用阶段。

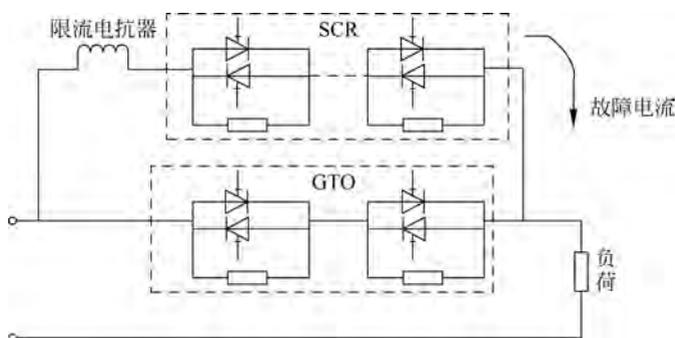


图 3-55 固态断路器构成原理图

5. 故障电流限制器

故障电流限制器 (FCL) 是一种串接在线路中的电气设备, 分为被动型与主动型两种。被动型 FCL 在正常运行与故障状态下, 均增加系统阻抗; 而主动型 FCL 只是在故障状态下快速增加系统阻抗。被动型 FCL 构成简单, 易于实现, 但在正常运行状态下会产生电压降, 增加系统损耗。目前在系统中获得广泛应用的 FCL 是串联电抗器。它是一种传统的被动型 FCL。主动型 FCL 既有限流作用, 又不影响系统的正常运行, 是理想的限流设备。目前应用或正在研发的主动型 FCL 有高压限流熔丝、可控串补装置、超导型故障电流限制器等。受原理、造价或其他一些因素等原因限制了其应用。随着电力电子技术与新材料技术的发展, 主动型 FCL 技术会更加成熟、性能进一步改进、成本也会逐渐降低, 将成为主流的 FCL。下面介绍几种主要的 FCL 及其在配电网中的应用。

(1) 谐振 FCL。谐振 FCL 分串联谐振与并联谐振两种类型。串联谐振 FCL 利用电力电子器件使正常工作时处于串联谐振 (阻抗接近 0) 状态下的电路在出现短路故障时脱谐, 使阻抗增大而达到限制短路电流的目的。图 3-56 给出了串联谐振 FCL 构成原理图, 正常运行时 SCR 不导通, 电感 L 与电容 C 发生串联谐振, 装置阻抗为零。在系统出现短路时, SCR 导通, 电抗器串入电路起到限流作用。串联谐振 FCL 简单、可靠, 已在中压配电网中获得应用。

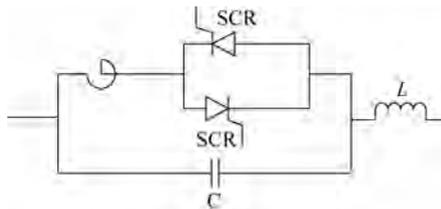


图 3-56 串联谐振 FCL 构成原理图

并联谐振 FCL 在电力电子器件控制下正常工作时处于非谐振状态,阻抗较小,而在系统出现短路故障时进入并联谐振(阻抗)状态,使线路阻抗增大而限制短路电流。这种 FCL 容量有限,实际系统中应用较少。

(2) 热敏电阻 FCL。热敏电阻(PTC)是一种非线性电阻,室温时电阻值非常低,当故障电流流过时,材料发热升温,在温度升高到一定值时,电阻值在微秒时间内提高 8~10 个数量级,从而起到限制故障电流的作用。热敏电阻 FCL 已在低压(380V)系统中获得应用。由于单个 PTC 元件的电压与电流额定值不高,且存在电阻受外界因素影响大、电阻恢复时间长等缺陷,限制了其在高压系统中的应用。

(3) 固态 FCL。固态 FCL 由半导体器件构成,能够在峰值电流到达之前的电流上升阶段就中断故障电流。图 3-57 给出了一种固态 FCL 的结构。正常工作时,半导体开关(GTO1 与 GTO2)导通过过负荷电流,对系统运行无影响。当检测到故障电流后,半导体开关被关断,电流转移到电抗器上,从而限制了故障电流。

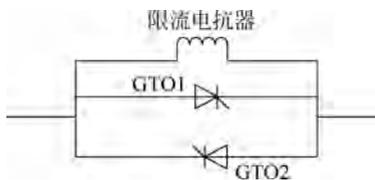


图 3-57 固态限流器原理图

固态 FCL 已在中低压配电设备中获得应用,随着电力电子技术的发展,固态 FCL 技术将愈来愈成熟。

思考题与习题

- (1) 中压配电网中性点接地方式一般有哪几种? 并简要介绍各种接地方式的特点。
- (2) 低压配电网的接地形式及各自的特点是什么?
- (3) 技术上分析 TN-C、TN-C-S 的低压配电网正常运行时综保难于投入运行的原因?