

中等专业学校教材

发电厂变电所电气设备

湖南省电力学校主编

电力工业出版社

内 容 提 要

本书为中等专业学校发电厂及电力系统专业发电厂电气设备及高压技术课程的教材，上册为“发电厂变电所电气设备”自第一章至二十二章；下册为“高电压技术”自第二十三章至三十章。

“发电厂变电所电气设备”主要介绍电力系统中高低压开关电器的基本理论和工作原理，电气主接线的分析和运用，短路电流计算及电器选择，发电厂变电所的测量、控制、信号和同期回路等内容。

本书亦可作为中等专业学校“电力系统继电保护”专业的教材，并可供电力工人和技术人员以及电力技工学校教学参考。

中等专业学校教材

发电厂变电所电气设备

湖南省电力学校主编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 25.5印张 580千字

1980年7月第一版 1981年8月北京第二次印刷

印数 58651—91650 册 定价2.10元

书号 15036·4065

目 录

前言

第一篇 发电厂变电所电气设备

第一章 发电厂变电所及电力系统概述	1
第一节 我国电力工业的发展	1
第二节 发电厂变电所电气设备概述	1
第三节 电力系统概述	5
第二章 电力系统中性点的运行方式	7
第一节 中性点不接地系统	7
第二节 中性点经消弧线圈接地系统	11
第三节 中性点直接接地系统	13
第三章 电弧及触头的基本理论	14
第一节 电弧现象	14
第二节 电弧的形成	16
第三节 电弧的熄灭	18
第四节 直流电弧的熄灭	21
第五节 交流电弧的燃烧和熄灭	24
第六节 电气触头	30
第四章 熔断器	34
第一节 熔断器的作用及技术特性	34
第二节 低压熔断器	37
第三节 高压熔断器	39
第五章 低压开关	42
第一节 闸刀开关	42
第二节 接触器	43
第三节 磁力起动器	45
第四节 自动空气开关	48
第六章 隔离开关及操作机构	53
第一节 隔离开关的用途和类型	53
第二节 户内式隔离开关	54
第三节 户外式隔离开关	55
第四节 隔离开关的操作机构	59
第七章 高压断路器及操作机构	62
第一节 高压断路器的基本知识	62
第二节 多油式断路器	64
第三节 少油式断路器	67
第四节 压缩空气断路器	80
第五节 六氟化硫断路器	87
第六节 断路器的操作机构	91

第八章 绝缘子、母线及电缆	102
第一节 绝缘子	102
第二节 母线	107
第三节 电缆	112
第九章 互感器	117
第一节 互感器的作用	117
第二节 电流互感器	118
第三节 电压互感器	128
第十章 电气主接线	136
第一节 概述	136
第二节 单母线接线	138
第三节 双母线接线	141
第四节 桥式接线	146
第五节 多角形接线	147
第六节 单元接线	148
第七节 发电厂的电气主接线	150
第八节 降压变电所的电气主接线	156
第十一章 发电厂和变电所的自用电	159
第一节 概述	159
第二节 发电厂的厂用电接线	161
第三节 厂用电机的供电接线	168
第四节 变电所的所用电	169
第五节 发电厂和变电所的照明	170
第十二章 短路电流计算	171
第一节 短路的一般概念	171
第二节 标么值	174
第三节 电力系统中各元件的电抗	176
第四节 短路电流的计算程序	177
第五节 无限大容量电力系统供电的电路内三相短路	183
第六节 发电机供电电路内三相短路	189
第七节 用运算曲线法计算短路电流	194
第八节 已知电力系统不同数据时短路电流的计算	207
第九节 考虑异步电动机时短路电流的计算	214
第十节 对称分量法在不对称短路计算中的应用	215
第十一节 序阻抗和序网络图的拟制	219
第十二节 不对称短路时短路点的电流和电压	223
第十三节 不对称短路时短路电流和电压的计算	229
第十四节 断相	242
第十三章 电气设备选择及短路电流限制	249
第一节 短路电流的电动力及发热计算	249
第二节 电气设备选择	257
第三节 短路电流限制及电抗器的应用	271
第十四章 配电装置	278
第一节 配电装置的类型及基本要求	278
第二节 屋内配电装置	279

第三节	屋外配电装置	286
第十五章	接地装置	297
第一节	接地的基本概念	297
第二节	电气装置中必须接地和不需接地的部分	301
第三节	对接地装置接地电阻值的要求	302
第四节	接地装置的敷设	303
第十六章	发电厂和变电所的操作电源	305
第一节	操作电源的分类及要求	305
第二节	铅酸蓄电池的构造及工作原理	306
第三节	蓄电池组直流系统	313
第四节	硅整流电容储能装置直流系统	322
第五节	复式整流装置直流系统	325

第二篇 发电厂和变电所的测量、控制、信号回路

第十七章	发电厂和变电所的测量监察回路	327
第一节	二次回路的基本概念	327
第二节	测量监察系统	330
第三节	绝缘监视	333
第十八章	安装接线图	335
第一节	主控制室平面布置	336
第二节	二次回路的编号	338
第三节	安装接线图	339
第十九章	断路器控制	344
第一节	具有灯光监察的采用电磁操作机构的断路器控制电路	344
第二节	具有灯光监察采用液压及弹簧操作机构的断路器控制电路	350
第三节	具有音响监察的断路器控制电路	352
第四节	灭磁开关控制电路	356
第二十章	信号回路	357
第一节	直流供电系统及其信号	357
第二节	中央信号回路	360
第三节	发电机指挥信号	365
第二十一章	同期回路	367
第一节	全厂同期点及同期方式的设置	368
第二节	同期交流电压回路	369
第三节	手动准同期装置	371
第二十二章	晶体管弱电选线逻辑控制	374
第一节	弱电化和选线化	374
第二节	逻辑元件	375
第三节	断路器控制信号回路	389
第四节	中央信号回路	397

第一篇 发电厂变电所电气设备

第一章 发电厂变电所及电力系统概述

第一节 我国电力工业的发展

电力是输送和取用都很方便的动力能，所以现代工农业、交通运输业、科学技术、国防建设和人民生活等方面，都广泛使用电力。电气化是机械化和自动化的技术基础，在实现四个现代化中，要求电力工业有较高的发展速度。

解放前，我国电力工业极端落后，装机容量仅 185 万千瓦、年发电量仅 43.1 亿度。发电厂大部分集中在东北和沿海几个大城市，设备陈旧、效率低，而且类型庞杂，电能的规格也不统一。

新中国成立以后，随着整个国民经济的恢复和发展，除对原有电力工业进行恢复和改造外，并在许多地区建设了新的电厂和电力系统，采用了新的设备和技术，改变了我国电力工业极端落后的面貌。到 1978 年底装机容量为解放时的 40 余倍，平均每年增长 14%。年发电量为解放时的 59.5 倍，平均每年增长 15.7%，由世界第二十三位跃居到第七位。各省、区都建立了一定规模的电网，容量在一百万千瓦以上的电网有 16 个。110 千伏及以上的输电线已达七万余公里，330 千伏超高压输电系统已投入运行。我国自己设计制造的 30 万千瓦机组，已取得运行经验。更大的机组正在研究试制中，更高的超高压系统即将出现。

随着电力工业的大发展，将有力的支援工农业生产，加速我国社会主义建设，使我国更快的实现四个现代化。

第二节 发电厂变电所电气设备概述

为了便于学习本书以后各章节，下面对发电厂和变电所的电气设备及一些基本概念，作一简单介绍。

一、主要电气设备

发电厂与变电所的主要工作是生产和输送分配电能；根据负荷变化的要求，起动、调整和停止机组；对电路进行必要的切换；不断的监视主要设备的工作；周期性的检查和维护主要设备；定期检修设备以及迅速消除发生的故障等。根据上述要求，在发电厂变电所中装设有列主要电气设备。

(1) 一次设备 直接生产和输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、自动空气开关、接触器、闸刀开关、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。

(2) 二次设备 对一次设备的工作进行监察测量和控制保护的辅助设备称为二次设备。包括仪表、继电器、自动控制设备、信号设备及控制电缆等。

二、电气主接线

在发电厂和变电所中,各种电气设备根据工作的要求和它们的作用,依一定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(主电路),二次设备连成的电路称为二次电路(副电路)。

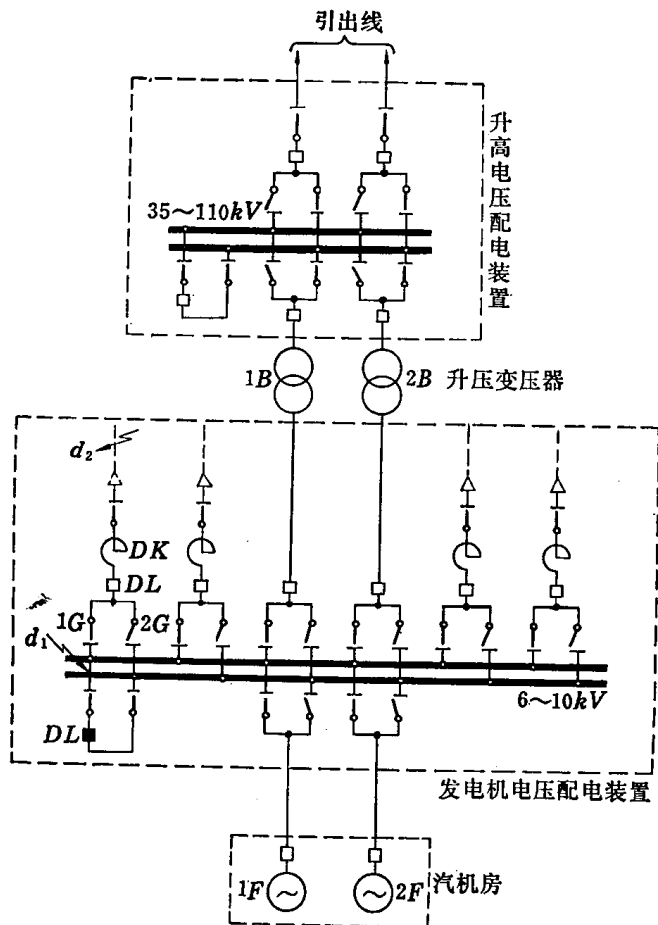


图 1-1 火电厂主接线图

电路图是用一定的图形符号描绘成三线图或单线图,主接线图通常画成单线图形式。下面以一个火电厂的主接线如图 1-1 所示为例,说明各种主要电器(一次设备)的连接情况。

电能从并列的发电机 $1F$ 、 $2F$ 先送到 $6\sim 10$ 千伏母线,再由此将一部分电能经电抗器及电力电缆送到附近用户。另一部分电能通过升压变压器 $1B$ 、 $2B$ 送到 $35\sim 110$ 千伏电压母线上,然后通过高压架空线向远距离用户送电,并与系统耦合。母线是接受和分配电能的装置,每种电压的母线都有两组(即双母线),正常运行时,一组母线工作,另一组母线备用。如工作母线检修或发生故障(d_1 点短路),其它电路可切换至备用母线上工作。

为了正常运行和发生故障时进行操作,装有断路器和隔离开关。

断路器用来接通和断开电路;故障时,继电保护动作能自动断开电路。隔离开关不能用来接通和断开有负荷电流的电路(因为没有灭弧装置),它的作用是在电路中的一次设备需要停电检修或更换时,使这些设备与带电部分可靠地隔开,以保证工作人员的安全。因此,电路接通或断开时,只有在断开断路器之后,才可接通和断开隔离开关。

发电机电压的电缆供电线路串联电抗器,是用来限制短路电流和维持母线残压(d_2 点短路时)。发电机及其附属设备安装在汽轮机车间内,发电机电压的电器一般装在发电机电压配电装置中(发电机的出口断路器装在汽轮机车间中的发电机出线小间内);升压变压器和各种高压电器通常露天布置,称为户外配电装置;如图 1-1 中虚线所示布置。

电气运行人员对所有电气设备的监视和控制,则有专门的主控制室,主控制室内装有

测量、监察、保护、信号和控制等二次设备。

三、额定电压

发电机、变压器和用电设备的额定电压,是按长期正常工作时有最大经济效果所规定的电压。国家根据国民经济发展的需要、技术经济的合理性以及电机电器制造工业的水平等因素,规定了电力设备的统一额定电压等级。现将额定电压列表1-1,并以图1-2为例说明。

表 1-1 额 定 电 压

用电设备的额定电压 (伏)			发电机的额定电压 (伏)		变 压 器 的 额 定 电 压 (伏)			
直 流	三 相 交 流		直 流	三相交流 线 电 压	交 流			
	线 电 压	相 电 压			三 相		单 相	
					原 边 绕 组	副 边 绕 组	原 边 绕 组	副 边 绕 组
110	—	—	115	—	—	—	—	—
	127	127	—	(133)	(127)	(133)	(127)	(133)
220	220	220	230	230	220	(230)	220	230
	380	—	—	400	380	400	380	—
440	—	—	460	—	—	—	—	—
	3000	—	—	3150	3000及3150*	3150及3300	—	—
	6000	—	—	6300	6000及6300*	6300及6600	—	—
	10000	—	—	10500	10000及10500*	10500及11000	—	—
	—	—	—	13800	13800*	—	—	—
	(15000)	—	—	15750	15150	—	—	—
	—	—	—	18000	—	—	—	—
	(20000)	—	—	—	—	—	—	—
	35000	—	—	—	35000	38500	—	—
	60000	—	—	—	60000	66000	—	—
	110000	—	—	—	110000	121000	—	—
	154000	—	—	—	154000	169000	—	—
	220000	—	—	—	220000	242000	—	—
	330000	—	—	—	330000	363000	—	—

注 1. 括号中电压用于保安条件较高场所;
2. 标*号电压用于接于发电机电压的变压器。

(一) 电力网及用电设备的额定电压

如图 1-2, 设发电机在额定电压下运行, 供电给电力网 AB 部分。由于线路有电压损失, 负荷 1~4 点将接受到不同的电压, 线路首端电压 U_A 大于末端电压 U_B 。如果负荷分布均匀, 则线路上的电压变化大致如斜直线 AB 所示。设备生产必须标准化, 设备的额定电压不可能按上述斜直线的变化电压来制造, 而且电力网中各点电压也不可能是恒定不变的。所以用电设备的额定电压, 只能力求接近于实际的工作电压, 通常, 采用该直线首端和末端电压的算术平均值 $\frac{1}{2}(U_A + U_B)$ 作为用电设备的额定电压, 这个电压也就是电力网的额定电压, 故用电设备额定电压等于电力网的额定电压。我国电力网额定电压有: 0.22、0.38、3、6、10、35、60、110、220、330 千伏等。

一般对城市和大工业企业的供电, 采用 6 千伏或 10 千伏电压等级的网络。35、110、220、330 千伏及更高电压等级则用于远距离输电。大功率电动机的额定电压用 3 千伏或 6 千伏,

10千伏电压一般用于供电给1600~6300千瓦的电动机，小功率电动机的额定电压用380伏和220伏。照明采用380/220伏电压等级的三相四线制网络，电灯接在相线和地线（中性线）之间的220伏相电压上。

电压为110伏和220伏电压等级的直流网络，广泛用于发电厂和大、中型变电所的自用电源中，供电给继电保护、自动装置、事故照明和信号设备等。

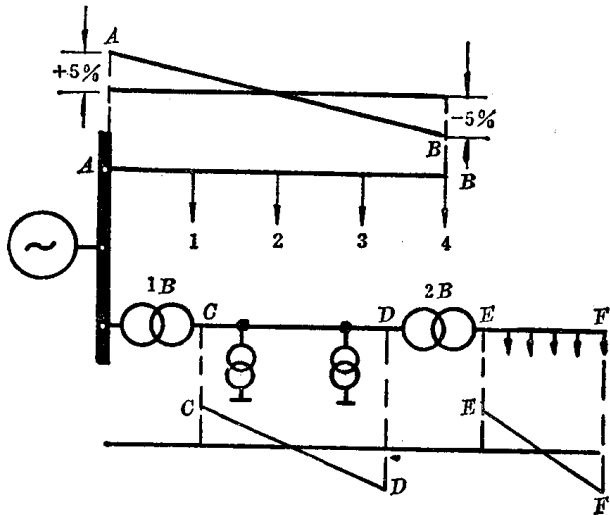


图 1-2 电网额定电压的解说

（二）发电机额定电压

发电机额定电压比电力网额定电压高5%（见表1-1），这是因为考虑到一般电力网的电压损失为10%，如果首端的电压比电力网额定电压高5%，则末端电压比电力网额定电压低5%，从而保证用电设备的工作电压偏移均不会超出允许范围。允许的电压偏移程度与用电设备的特性有关，一般为 $\pm 5\%$ 。

目前，1千伏以下的电压等级仅用于小容量发电机；3.15千伏用于6000千瓦及以下容量的发电机；6.3千伏广泛用于750~50000千瓦各种容量的发电机；10.5千伏用于12000~100000千瓦的发电机；13.8千伏用于72500~100000千瓦的水轮发电机及125000千瓦的汽轮发电机；15.75千伏用于110000~225000千瓦的水轮发电机及200000千瓦的汽轮发电机；18千伏用于300000千瓦的水轮及汽轮发电机。

（三）变压器额定电压

在图1-2中，1B是升压变压器，2B是降压变压器。升压变压器1B副边高压侧额定电压（我国制造的变压器副边额定电压是指空载而言），比电力网额定电压高10%。带满负荷时，1B副边绕组本身损失约5%，故线路CD首端电压比电力网额定电压约高5%。降压变压器2B副边低压侧额定电压，在电压级较低时比电力网额定电压高5%，在电压级较高时比电力网额定电压高10%。降压变压器2B原边高压侧额定电压等于电力网额定电压。升压变压器1B原边低压侧额定电压等于发电机额定电压，即比电力网额定电压高5%。

发电厂的厂用变压器（降压变压器），其原边和副边都比所接电力网的额定电压高5%。

此外，习惯上把电气装置和设备分为高压和低压两类，即1千伏以上者为高压设备，1千伏以下者为低压设备。这样的区分是由于这两种电压等级的设备结构及其装置在制造和使用规则上均不相同，当然，这样的区分绝不表明它们对人身安全的危害程度的不同。

四、额定电流及额定容量

发电机、变压器、电动机和其他电器的额定电流，是指在一定的周围媒质计算温度下，允许长期通过的最大电流值，而此时电器的绝缘和载流部分的长期发热温度不超过允

许的规定值。

我国所采用的周围媒质计算温度如下：

电力变压器和电器（周围空气温度）	40℃
发电机（利用空气冷却时进入机内空气温度）	35~40℃
放置于空气中的裸线、绝缘线、母线和电力电缆	25℃
埋入地下的电力电缆（泥土温度）	15℃

电机、变压器和电器各部分的长期容许发热温度是与绝缘种类、计算使用年限和触头的容许发热温度等有关的，国家对此在相应的技术规范中都有规定。

发电机、变压器和各种电器均规定有额定容量，其规定的条件和额定电流相同。发电机的额定容量用有功功率（千瓦）或视在功率（千伏安）和功率因数表示。变压器额定容量规定为视在功率（千伏安）。

第三节 电力系统概述

为了提高供电的可靠性和经济性，目前广泛地将许多发电厂用电力网连接起来并联工作。这些由发电机、配电装置、升压和降压变电所、电力线路及电能用户所组成的统一整体，称为电力系统。电力系统加上热能动力装置和水能动力装置及其他能源动力装置，称为动力系统。电力系统中由各级电压的输配电线路和变电所组成的部分称为电力网。

发电厂是电力系统的中心环节，它是将其他形式的能源（如热能、水能等）转换成为电能的一种工厂。根据能源取得的形式不同，电厂可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、风力发电厂、太阳能发电厂、地热发电厂、潮汐发电厂等。根据电厂的容量大小及其供电范围又可分为区域性发电厂、地方性发电厂及自备专用电厂等。

目前，我国的发电厂主要是火力发电厂和水力发电厂，火力发电厂一般是以煤为燃料的凝汽式发电厂。

区域性发电厂多兴建在动力资源附近，如具有大量水力资源或煤矿蕴藏的地方。这种电厂发出的大量电力，可以通过超高压输电线路远距离输送，向大片区域供电。兴建大容量区域性发电厂，可以经济合理并充分地利用国家的动力资源，因为输送电能要比输送燃料既方便又经济。地方性发电厂一般为中小型电厂，多建设在用户附近，直接供本地区用电。

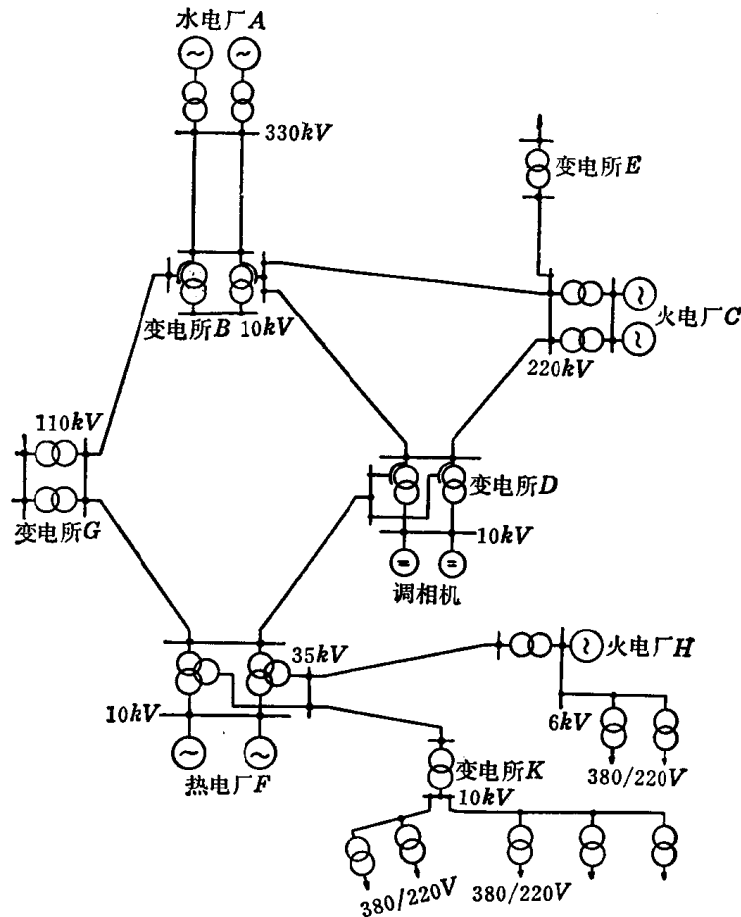
凝汽式发电厂（即使是超高温超高压）的效率只有30~40%，因此在工业中心可建造热电厂。热电厂除发电外，还向用户供热，这种热电联合生产的电厂，其效率可高达60~70%。

自备专用电厂建在重要的大厂矿企业作为自备电源（一般为小型汽轮机或内燃机发电厂）。这种发电厂的生产虽不经济，但对重要的大厂矿企业和电力系统起到了后备保安作用。

随着电力工业的发展，更大型的发电厂，如单机容量在二十万千瓦以上、总装机容量在一百万千瓦以上的区域性发电厂将越来越多，这些区域性发电厂用更高电压的输电线路

互相联系起来，组成巨大的电力网及电力系统。

图 1-3 是一个电力系统原理性电路图。图中水电厂 A 为建设在遥远地区的大型区域性电厂，大量电能经过升压到 330 千伏后，利用双回超高压输电线送到枢纽变电所 B。变电所 B 装有两台自耦变压器，一台将电压降为 220 千伏后与 220 千伏系统联系，另一台则降至 110 千伏后与 110 千伏系统联系。两台自耦变压器还降至 10 千伏供给变电所附近地区用户。



220 千伏系统由变电所 B、火电厂 C 和变电所 D 互相连成环形网络。变电所 D 可以从水电厂 A 经过变电所 B 取得电源，也可以从火电厂 C 取得电源。火电厂 C 除供电给环形电网外，并向变电所 E 供电。

变电所 D 有两台自耦变压器，一方面以 110 千伏电压与热电厂 F 联系，另一方面将电压降至 10 千伏供给本地区用电。变电所 D 与热电厂 F、变电所 G 和变电所 B 之间以 110 千伏输电线互相连接，以提高供电的可靠性。变电所 D 的 10 千伏母线上装有两台调相机，供给本地区的无功负荷，这样可以减少从发电厂 A 和 C 送来大量无功功率，减少线路损耗。

热电厂 F 是地方性发电厂，它兴建在工业区附近，除发电外还向附近工矿企业供热。该厂装有两台三绕组变压器，将电压升高至 110 千伏和 35 千伏，110 千伏与系统联系。火电厂 H 是小型地方性电厂，主要向附近 6 千伏网络供电，同时经过升压变压器与 35 千伏系统

耦合。

所有35千伏以下的线路均属于配电线路（图中仅画出一部分）。35千伏线路送电至地区变电所 K ，将电压降至10千伏，然后以10千伏配电线供给各用户。各用户经过配电变压器，将电压降为380/220伏供各个车间及住宅用电。

建立统一的动力系统有许多优点，第一可以充分利用动力资源和充分发挥各类电厂的作用，例如热电厂只有并入系统才能实现经济运行；夏季是丰水期而用户用电较少，可由水电厂担任系统基本负荷，冬季是枯水期而用户用电较多，水电厂则担任系统尖峰负荷，这样既减少火电厂的煤耗又提高了系统运行的经济性。第二可以减少备用容量，例如单独工作（孤立运行）的发电厂，为了代替损坏或检修机组的工作，必须装设备用机组，建立系统后，就不必在每个发电厂中都装设备用机组，只需要系统中有总的备用机组（容量），这便减少了设备的投资。第三可以大大提高供电的可靠性，因为当一个发电厂发生故障时，其所带负荷可以分配给其他发电厂。

电力系统的运行必须满足下列基本要求：

- 1) 保证完成国家的生产计划（发电量和热能供应）满足规定的最大负荷。
- 2) 保证供电的可靠性。
- 3) 保证电能的质量。即保证电力系统的频率和电压在规定的容许变动范围内（频率不得超过 ± 0.5 赫芝、电压不得超过 $\pm 5\%$ ）。
- 4) 保证运行的最大经济性。
- 5) 保证运行人员和设备的安全。

电力系统是一个有机整体，系统中任何一个环节的运行情况发生改变或故障时，都会影响到整个系统的正常工作，因此必须设置统一的调度机构指挥电力系统的运行，以保证完成上述基本要求。

第二章 电力系统中性点的运行方式

电力系统中性点（实际上是发电机和变压器的中性点）的运行方式有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点直接接地三种。中性点不接地和经消弧线圈接地的系统，通常称为小接地短路电流系统；中性点直接接地系统称为大接地短路电流系统。

中性点的运行方式不同，其技术特性和工作条件也不同，因而对运行的可靠性、设备绝缘、及其保护措施的影响和要求也不一样。这是一个影响到经济技术，而由多方面因素决定的综合性问题。下面我们对电力系统中性点的三种接地方式，分别加以讨论。

第一节 中性点不接地系统

电力网的三相导线之间及各相对地之间，沿导线全长都分布有电容，这些电容将引起附加电流。为了便于讨论，可以认为三相系统是对称的，并将相与地之间均匀分布的电容

用集中于线路中央的电容 C 来代替,如图2-1(a)所示。各相之间的电容及由它们所决定的电流数值较小,在发生单相接地时,因为线电压不变,相间电容电流也不会改变,故可不予考虑。

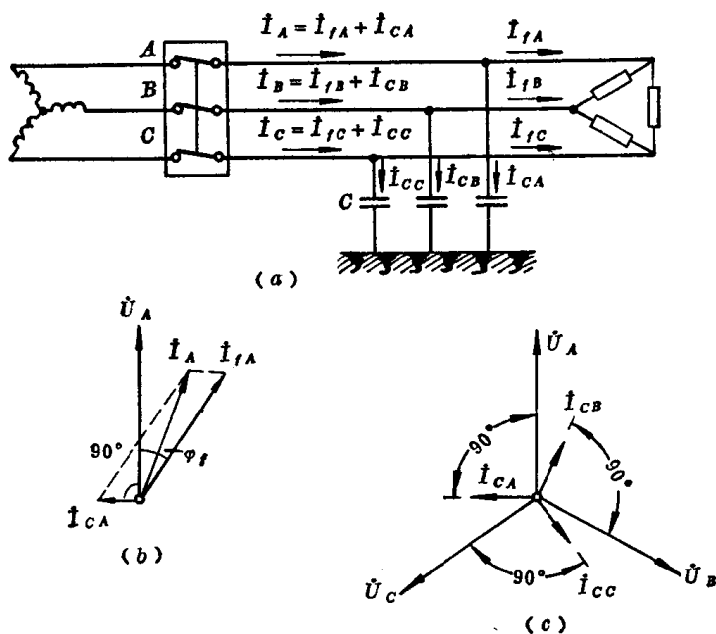


图 2-1 中性点不接地三相系统的正常工作状态

一、正常运行

中性点不接地的三相系统在正常运行时,网络各相对地的电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 和 $\dot{U}_C$ 是对称的,如线路经过完善的换位,三相对地电容是相等的,则各相对地的电容电流也是对称的。电源各相的电流 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 分别等于负荷电流 $\dot{I}_{fA}$ 、 $\dot{I}_{fB}$ 、 $\dot{I}_{fC}$ 及各相对地的电容电流 $\dot{I}_{cA}$ 、 $\dot{I}_{cB}$ 、 $\dot{I}_{cC}$ 的向量和,如图2-1(a)和(b)所示。因为三相对地电容电流的大小相等(用 I_{c0} 表示),相位相差 120° ,故其向量和等于零,所以地中没有电容电流通过,中性点电位为零,如图2-1(c)所示。

二、单相接地故障

当任何一相绝缘受到破坏而接地时,各相对地电压改变,对地的电容电流也发生变化,中性点的电位不再为零,其对地的电压值,视故障点的接地情况而异。

(一) 故障相完全接地

如图2-2(a)所示,当一相为完全接地(亦称金属性接地,即接地电阻为零)时,故障相对地的电压变为零,中性点对地电压值为相电压,未故障两相的对地电压值升高 $\sqrt{3}$ 倍,即变为装置的线电压。以C相发生完全接地为例说明,如图2-2(b)所示。

C相对地电压等于零,故中性点对地电压 $\dot{U}_0$ 等于C相电压反号,即

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_C$$

A相对地电压设为 $\dot{U}'_A$,则 $\dot{U}'_A$ 等于A相电压加中性点对地电压,即

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_0$$

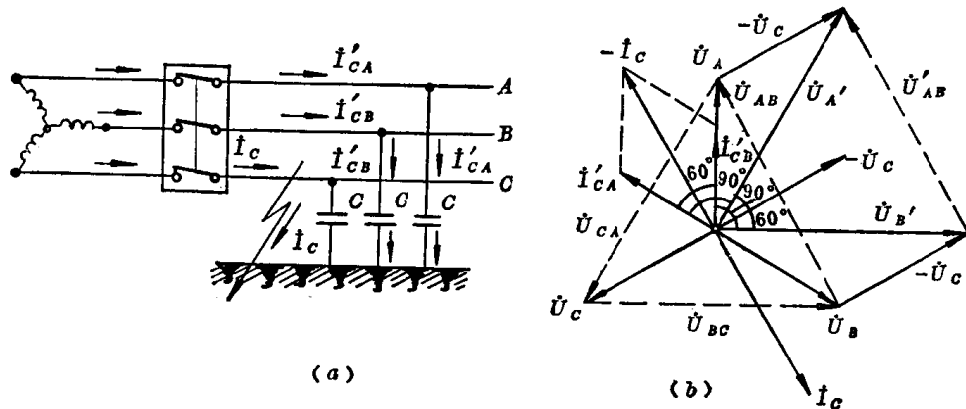


图 2-2 中性点不接地的三相系统 C 相发生接地时的情况

B 相对地电压设为 $\dot{U}'_B$ ，则 $\dot{U}'_B$ 等于 B 相电压加中性点对地电压，即

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_O$$

所以 $U'_A = U'_B = \sqrt{3}U_A$ ， $\dot{U}'_A$ 和 $\dot{U}'_B$ 之间的夹角为 60° 。A、B 两相对地电压升高变为线电压，即其对地电容上所加电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，所以对地电容电流也较正常时的 I_{C0} 升高 $\sqrt{3}$ 倍。在对称三相系统中，发生 C 相接地后，非故障相对地电容电流 $I'_{CA} = I'_{CB} = \sqrt{3}I_{C0}$ 。因为 C 相接地，该相对地电容被短接，所以 C 相对地的电容电流变为零。设电流正方向是由电源到电网，则可得出通过 C 相接地点的电流（简称接地电流）为：

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}'_{CA} + \dot{I}'_{CB})$$

从图 2-2 (b) 可见， $\dot{I}'_{CA}$ 和 $\dot{I}'_{CB}$ 分别超前 $\dot{U}'_A$ 和 $\dot{U}'_B$ 90° ， $\dot{I}'_{CA}$ 、 $\dot{I}'_{CB}$ 两电流之间的夹角也是 60° ，将它们相加即得 $-\dot{I}_C$ 。C 相接地电流 $\dot{I}_C$ 为电容电流，故 $\dot{I}_C$ 超前电压 $\dot{U}_C$ 90° 。由向量图可得：

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

因为

$$I'_{CA} = \sqrt{3}I_{C0}$$

所以

$$I_C = 3I_{C0}$$

由上式可知，单相接地时的接地电流等于正常（未接地）时一相对地电容电流的三倍。

若已知每相对地电容 C，正常运行时相对地电压 U_{xg} ，可得到：

$$I_{C0} = \frac{U_{xg}}{X_C}$$

因为

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

所以

$$I_C = 3I_{C0} = 3U_{xg}\omega C$$

式中 U_{xg} ——装置的相电压（千伏）；

ω ——角频率（弧度/秒）；

C——相对地电容（法拉）。

因此，接地电流 I_C 的值与网络的电压、频率和相对地的电容有关，而相对地的电容与电网的结构（电缆或架空线）和线路的长度等有关。在实用中，接地电流也可以近似地用下

式计算:

对架空线路

$$I_c = \frac{Ul}{350}$$

对电缆线路

$$I_c = \frac{Ul}{10}$$

式中 U ——电网的线电压(千伏);

l ——电压为 U 的具有电联系的线路长度(公里)。

(二) 故障相不完全接地

在发生不完全接地(经过一定电阻接地)时, 接地相对地的电压大于零而小于相电压, 非接地相对地的电压则大于相电压而小于线电压。此时, 接地电流也比完全接地时小些。

综上所述, 并由图2-2(b)可得到:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_{AB} &= \dot{U}'_A - \dot{U}'_B = \dot{U}_{AB} \\ \dot{U}'_{BC} &= \dot{U}'_B - \dot{U}'_C = \dot{U}_{BC} \\ \dot{U}'_{CA} &= \dot{U}'_C - \dot{U}'_A = -\dot{U}'_A = \dot{U}_{CA}\end{aligned}$$

故在中性点不接地的系统中, 发生一相接地时, 网络线电压的大小和相位差仍维持不变。从而接在线电压上的受电器的工作, 并不因为某一相接地而受到破坏。同时, 这种系统中相对地的绝缘水平是根据线电压设计的, 虽然未故障相对地的电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 对设备的绝缘并不危险。根据上述理由, 中性点不接地系统在发生单相接地时可以继续工作。但是, 不允许长期工作, 因为长期运行时可能引起未故障相绝缘薄弱的地方损坏而造成相间短路。为此, 在这种系统中, 一般应装设专门的绝缘监察装置或继电保护装置, 当发生单相接地时, 发出信号通知工作人员, 工作人员得到信号后, 应采取措施, 尽快地找出故障点, 并在最短时间内将故障消除。中性点不接地系统中发生单相接地时, 一般允许继续工作至多不超过两小时。

接地电流将在故障点形成电弧, 电弧可能是稳定性的或间歇性的。有稳定电弧的单相接地是比较危险的, 因为电弧可能烧坏设备或引起两相甚至三相短路, 尤其是电机或电器内部单相接地(绝缘损坏时一相导体与设备的接地外壳接触)时出现电弧最危险。所以在接地电流大于5安时, 发电机和高压电动机都应装设动作于跳闸的继电保护。

在一定的条件下, 单相接地可能出现周期性地熄灭和重燃的间歇电弧。因为电网具有电容和电感, 可以形成一个振荡回路, 间歇电弧将导致相与地之间产生过电压, 其值可能达到2.5~3倍相电压峰值。

在接地电流大于5~10安时, 最容易引起间歇电弧。电网的电压越高, 间歇电弧引起的过电压的危险性就越大。

6~10千伏电网中, 间歇电弧所引起的过电压, 对电气设备绝缘的危险性不大。但此种电网的接地电流 I_c 不得大于30安, 因为当 I_c 较大时, 单相接地将产生稳定电弧, 电弧不易熄灭, 容易烧坏电器或造成相间短路。

20千伏以上的电网中, 间歇电弧所引起的过电压, 对电气设备的绝缘是危险的。因

此, 这种电压的电网, 接地电流 I_o 不得超过10安, 因为当 I_o 大于10安时, 单相接地容易出现间歇电弧。

综上所述, 通常只在电压为20~60千伏, 接地电流 $I_o \leq 10$ 安或电压为6~10千伏, 接地电流 $I_o \leq 30$ 安的高压电网和1000伏以下的三相三线制电网中采用中性点不接地方式。

供照明用电的380/220伏系统则例外, 采用中性点直接接地的三相四线制。

第二节 中性点经消弧线圈接地系统

目前, 在35~60千伏的高压电网中, 多采用中性点经消弧线圈接地的方式。如果消弧线圈能够正确运行, 则是消除电网因雷击或其他原因而发生瞬时单相接地故障的有效措施之一。

一、消弧线圈的工作原理

在中性点不接地系统中, 单相接地电容电流超过上述的规定数值时, 电弧将不能自行熄灭。为了要造成故障点的自行灭弧条件, 就应采取减小接地电流的措施。在变压器中性点与大地之间接入消弧线圈就可以减小接地电流, 如图2-3(a)所示。

在正常工作时, 中性点的电位为零(假设电源对称, 三相对地电容值相等), 所以没有电流通过线圈。当某相(如C相)发生金属性接地时, 则作用在消弧线圈两端的电压正是地对中性点电压 $\dot{U}_o$, 并有电感电流 $\dot{I}_L$ 通过消弧线圈和接地点, $\dot{I}_L$ 滞后于 $\dot{U}_o 90^\circ$ 。接地点通过的电流是单相接地电容电流 $\dot{I}_o$ (超前于 $\dot{U}_o 90^\circ$) 和消弧线圈的电感电流 $\dot{I}_L$ 的向量和。由于 $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_o$ 两者相差 180° , 所以在接地点 $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_o$ 起互相抵消作用(或叫补偿作用),

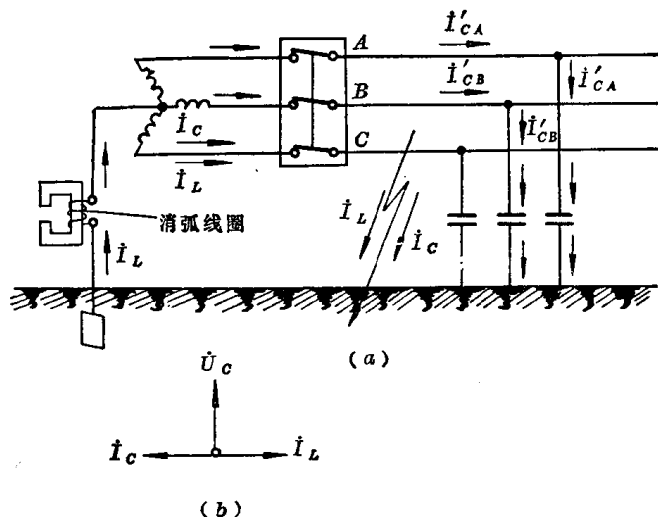


图 2-3 中性点经消弧线圈接地的三相系统

其向量图如图2-3(b)所示。如果适当选择消弧线圈电感(匝数), 可使接地点的电流变得很小或等于零, 在接地点就不致产生电弧以及由电弧所引起的危害。

中性点经消弧线圈接地的系统和中性点不接地的系统一样, 发生一相完全接地时, 接地相对地的电压变为零, 未故障相对地的电压值升高 $\sqrt{3}$ 倍。因此, 这种系统各相对地的绝缘水平也按线电压考虑。

根据消弧线圈的电感电流对接地电容电流补偿程度的不同, 可有三种补偿方式:

(1) 全补偿 使得 $I_L = I_o$ ($\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$), 接地点电流为零称为全补偿。从消弧

的观点来看,全补偿应为最好,但实际上并不采用这种补偿方式。这是因为在正常运行时,由于电网三相对地电容并不完全相等或断路器操作时三相触头不能同时闭合等原因,致使在未发生接地故障情况下,中性点对地之间出现一定的电压(称为不对称电压)。此电压将引起串联谐振过电压,危及电网的绝缘。关于产生串联谐振过电压的原因,在本书第三篇高压技术有关内部过电压一章将叙述。

(2) 欠补偿 使得 $I_L < I_C \left(\frac{1}{\omega L} < 3\omega C \right)$, 接地点尚有未补偿的电容性电流称为欠补偿,欠补偿方式一般也较少采用。因为在欠补偿运行的情况下,如果切除部分线路(对地电容减小),或系统频率降低(致使 $\frac{1}{\omega L}$ 增大而 $3\omega C$ 减小),或者线路发生一相断线(若送电端一相断线,则该相电容为零)等等,均可能使系统接近或者达到全补偿,以致出现串联谐振过电压。

(3) 过补偿 使得 $I_L > I_C \left(\frac{1}{\omega L} > 3\omega C \right)$, 接地处具有多余的电感性电流称为过补偿。过补偿方式可避免上述谐振过电压的产生,因此得到广泛采用。但必须指出,在过补偿方式下,接地处将流过某一数值的电感性电流,这一电流值不能超过规定值,否则故障点的电弧便不能可靠地自动熄灭。

由于中性点经消弧线圈接地的系统,可使接地处的电流减小,这也就减小了单相接地时产生的电弧和由它发展为多相短路的可能性。尤其在瞬时性接地时,因为电弧可以很快地熄灭,线路可不被断开。运行经验证明,这种系统在单相接地时可继续运行一段时间(一般不超过2小时),以便运行人员采取措施,查出故障点,在最短时间内消除故障,保证系统安全运行。

二、消弧线圈的构造和接线

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,但其铁芯的构造与一般变压器的铁芯不同,消弧线圈的铁芯柱有很多间隙,间隙中填着绝缘纸板,如图2-4(a)所示。采用带间隙铁芯,主要是为了避免磁饱和,这样可以得到一个比较稳定的电抗值,使补偿电流与电压成比例关系,因而消弧线圈能保持有效的消弧作用。

由于系统中的电容电流随运行方式变化,因此要求消弧线圈的电抗值也应作相应的调节,才能达到补偿的目的。如图2-4(b)所示,消弧线圈有许多分接头,用以调整线圈的匝数,改变电抗的大小,从而调节消弧线圈的电感电流,以补偿接地电容电流,达到消弧目的。

消弧线圈的接线如图2-5所示。为了测量系统单相接地时消弧线圈的端电压和补偿电流,消弧线圈XQ内部还装有电压互感器YH和电流互感器LH。电压互感器二次线圈的电压为110伏、额定电流为10安。电流互感器装于接地端,其二次额定电流为5安。在电压互感器和电流互感器的二次侧分别接有电压表和电流表。图中的电压继电器动作后,使中间继电器触点闭合,一方面中央警告信号装置动作,另一方面消弧线圈盘上的信号灯亮,使值班人员及时注意有接地情况发生。此时,消弧线圈的隔离开关旁边的信号灯亦亮,指