

供用电工人技师培训教材

孙成宝 主编

用电检查

孙方汉 李永臣 袁晓峰 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

供用电工人技师培训教材

孙成宝 主编

用电检查

孙方汉 李永臣 袁晓峰 编



中国电力出版社

www.cpepp.com.cn

内 容 提 要

《供用电工人技师培训教材》是根据国家标准、电力行业标准、国家职业技能鉴定规范(电力行业)等标准规范中对职业技师(高级技师)人员的要求而编制的岗位技能培训、职业技能鉴定的成套教材,是严格紧扣和结合国家职业技师人员应具备的必备知识、技能要求和鉴定内容进行编写的,同时与《全国供用电工人技能培训教材(初、中、高)》相衔接的,强调以技能为核心,知识为技能服务、满足技能需要的原则,叙述技能要求时多采用范例说明的形式,宗旨在为全国供用电企业生产人员提供一套技师岗位技能培训和职业技能鉴定的教材。

本分册是《供用电工人技师培训教材》之一,共十章,主要内容有电力系统的功率平衡与运行稳定性、电力系统中性点运行方式和防止事故措施、短路电流计算基本知识、高低压开关设备、电力变压器运行与绝缘油维护、电力电容器和谐波电流、电力线路、用电单位变电所主要设备、继电保护、电气试验、电压保护以及电力营销管理和相关法律法规知识。

本套教材是全国供用电企业生产人员、技师人员岗位技能培训和职业技能鉴定的指定教材,本分册是用电检查培训教材,也可作为用电检查高级工、高级技师、技术人员和管理干部等参考教材。



图书在版编目(CIP)数据

用电检查/孙成宝主编;孙方汉,李永臣,袁晓峰编.
北京:中国电力出版社,2003

供用电工人技师培训教材

ISBN 7-5083-1621-5

I. 用... II. ①孙...②孙...③李...④袁...
III. 用电管理-技术培训-教材 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 041268 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 7 月第一版 2003 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 253 千字

印数 0001—3000 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



《供用电工人技师培训教材》

前言

99A02/05

大力开展职工岗位技能培训和职业技能鉴定,提高供用电人员的岗位能力和生产技能,是当前电力企业教育培训的重点,也是提高劳动生产率和工作效率的重要手段。而岗位培训和技能考核的教材建设,是搞好培训、做好鉴定、提高素质、直接为生产人员服务的一项重要基础工作。

随着电力事业的发展,电力系统容量的增加,高压甚至超高压供电不断增多,新型供用电技术和设备不断涌现,对供用电人员提出更高要求。为了适应电力生产安全经济运行,提高供用电人员的技术素质和管理水平,由中国电力出版社组织、孙成宝主编的《供用电工人技师培训教材》,是供用电人员培训工作中的一件大事。

《供用电工人技师培训教材》具有的特点是:首先,本套教材的编写依据,是部颁《国家职业技能鉴定规范》、《电力工人技术等级标准》、《关于电力工人培训教材建设意见》以及有关电力生产岗位规范和新颁国家标准、电力行业标准。其二,严格与《全国供用电工人技能培训教材》(初级工、中级工、高级工)相衔接,内容两相呼应。其三,强调以技能为核心,知识为技能服务、满足技能需要的原则,叙述技能要求时多采用范例说明的形式,因此不仅适用于具有高中及以上文化程度的供用电工人高级工、技师或高级技师人员的培训,而且对现场工程技术人员也有参考价值。其四,本套教材编写、出版力量强,组织全国供电企业 30 多位专家和技术人员,他们有相当丰富的工作经验和专业理论水平。另外,作为全国首批认定的 15 家全国优秀出版社之一的中国电力出版社,领导亲自挂帅,组织 20 位编辑班子,精心策划,统一指导,精雕细刻,质量一流。

本套教材突出电力行业岗位培训和职业技能考核特点,针对性、适应性强,是全国供用电人员岗位技能培训和职业技能鉴定的理想教材。它的出版发行,必将对我国供用电人员培训与鉴定工作的有效开展和素质提高,产生积极的影响。

由于编写时间紧迫,编写人员水平有限,对本套教材疏误之处,恳请广大读者批评指正。

主 编

2003 年 5 月



《供用电工人技师培训教材》

编者的话

《用电检查》技师培训教材是根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范、用电监察员》用电监察技师鉴定内容的要求编写的。考虑到用电监察技师应知应会中的许多基础知识，在《用电检查》初、中、高级工培训教材中已有介绍，因此不再重复。读者如需要这些内容可从上述书籍中查找。

用电检查工作是供电企业电力营销中的一个服务窗口，由于其工作内容不单涉及用电营业方面，而且常常要协助高压客户解决变电运行方面的技术问题，甚至审查继电保护整定方案和研究预防过电压的保护措施，因此用电检查员应具备广泛的电气专业知识。特别是用电检查技师更应具有相当水平的电气专业知识。因此在编写本教材时，结合《职业技能鉴定规范》的要求，对一些电气专业知识作了较多的阐述。

本书由孙方汉、李永臣、袁晓峰三人共同编写。限于编者的水平，难免存在错误和不妥之处，敬请使用单位和读者提出宝贵意见，以便再版时改正。

编者

2003年5月



《供用电工人技师培训教材》

目 录

前言

编者的话

第一章 电力系统的功率平衡与运行稳定性	1
第一节 电力系统的有功功率平衡与频率调整.....	1
第二节 电力系统的无功功率平衡与电压调整.....	2
第三节 电力系统运行的稳定性.....	4
复习题	5
第二章 电力系统中性点运行方式和防止事故措施	7
第一节 中性点不接地系统中的单相接地故障.....	7
第二节 中性点经消弧线圈接地系统中消弧线圈的配置原则及运行维护.....	9
复习题	12
第三章 短路电流计算基本知识	13
第一节 概述	13
第二节 短路电流变化过程	14
第三节 短路电流计算基本方法	16
复习题	22
第四章 高、低压开关设备	24
第一节 电气触头的灭弧	24
第二节 断路器的选择	28
第三节 断路器的运行与维护	35
第四节 熔断器	41
复习题	43

第五章 电力变压器运行与绝缘油维护	44
第一节 变压器的相量图	44
第二节 变压器的技术参数	46
第三节 变压器的并列运行	57
第四节 变压器的经济运行	61
第五节 变压器油的运行维护	63
复习题	70
第六章 电力电容器和谐波电流	71
第一节 并联电容器的接线方式比较	71
第二节 并联电容器的合闸涌流	72
第三节 电容器谐波电压下的运行	74
复习题	78
第七章 电力线路	79
第一节 架空电力线路	79
第二节 电力电缆	89
复习题	96
第八章 用电单位变电所主要设备继电保护	97
第一节 变压器继电保护	97
第二节 电动机继电保护	103
第三节 继电保护的灵敏度校验	106
第四节 微机保护整定计算的特点	116
复习题	118
第九章 电气试验及过电压保护	120
第一节 电气绝缘基础知识	120
第二节 交直流耐压试验	124
第三节 过电压及保护	128
复习题	131
第十章 电力营销管理与相关法律法规知识	133
第一节 电力营销的受理环节——业务扩充	133
第二节 电力营销的重要环节——电能计量	140
第三节 电力营销的综合服务窗口——用电检查工作	146
第四节 供用电合同	150
第五节 电力营销法律法规知识	157
复习题	161

电力系统的功率平衡与运行稳定性

第一节 电力系统的有功功率平衡与频率调整

一、电力系统的有功功率平衡及备用容量

(一) 电力系统的有功功率平衡

电力系统的有功功率消耗除了考虑用户的有功功率负荷外，还应考虑网络损耗和发电厂的厂用电负荷。也就是说系统发电机的总容量应不小于用户负荷、网络损耗和发电厂厂用电三部分之和。

网络损耗由两部分组成，一部分称为不变损耗，主要是系统中变压器的冷载损耗；另一部分称为可变损耗，与负荷的平方成正比。上述两部分之和构成网络总损耗，约为系统总负荷的 6%~10%。发电厂的厂用电消耗则与发电厂的类型有关。水电厂的厂用电很小，仅为最大负荷的 0.1%~1%；火电厂的用电负荷则大得多，一般为 5%~8%；核能电厂则为 4%~5%。

为了做到经济运行，在系统中各发电厂的负荷分配上应考虑尽可能节省能源消耗。这是因为各发电厂、甚至同一发电厂的各机组在发出同样多的电能时所消耗的能量并不完全相同。对于发电设备，单位时间内输入能量与输出功率之比称为比耗量，从小到大排列，编出其依次投入的顺序，称为系统发电设备的最优组合顺序。

为了求取各发电机组的最小比耗量，需要画出各发电机组的耗量特性，即发电设备单位时间内消耗的能源与发出的有功功率的关系曲线。如图 1-1 所示，耗量特性曲线上任意一点所对应的纵坐标表示发电设备单位时间内所消耗的能量，即火电厂所消耗的燃料 F ，水电厂所消耗的水量 W 。横坐标则以千瓦或兆瓦为单位表示发电机所发出的功率。

耗量特性曲线上某一点与坐标原点所连直线的斜率就是该点的比耗量。如果输入（纵坐标）和输出采用同样的单位，则比耗量的倒数正好就是发电设备的效率。

耗量特性曲线上某一点切线的斜率表示该点单位时间内输入能量的增量 ΔF ，与该点同一时间内输出功率增量 ΔP 之间的比值，称为该点的耗量微增率 λ ，即 $\lambda = \Delta F / \Delta P$ 。

电力系统中各发电设备的有功功率负荷最优分配遵守一条著名的“等耗量微增率”准则，即当各发电设备的耗量微增率相等时，系统运行最为经济。

(二) 电力系统的备用容量

为了保证可靠供电和良好的电能质量，系统的发电设

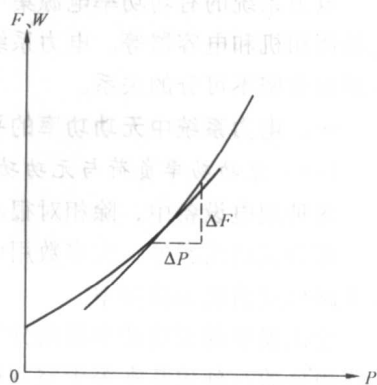


图 1-1 发电设备的耗量特性



备容量应大于系统总发电负荷的部分，其超出部分称为系统的备用容量。

系统的备用容量如按其状态来分，可分为热备用和冷备用；如按其用途可分为负荷备用、事故备用和检修备用。此外，还有一种称为国民经济备用的备用容量。

所谓热备用是指发电机在开机状态下的备用；所谓冷备用是指发电机组在未开机状态下的备用。检修中的设备不属冷备用。

所谓负荷备用是指为了应付负荷短时波动，并且担负计划外的负荷增加而设置的备用。负荷备用容量一般约为最大负荷的 2% ~ 5%，大系统采用较小数值，小系统采用较大数值。

事故备用则是考虑到发电设备可能出现的偶然事故，为了使用户不受严重影响，维持正常供电而设置的备用。检修备用是专为系统中发电设备定期检修而设置的备用。所谓国民经济备用，是指考虑到负荷超计划增长而设置的备用。上述备用容量有的以热备用状态出现，有的处于冷备用状态。

二、电力系统的频率调整

电力系统运行中随时都在经受着有功负荷变化的扰动。当机组负荷增大或减少时，引起转速下降或上升，造成交流电频率偏移正常值。如频率偏移过大，将影响工农业产品的质量和产量，甚至造成设备损坏。严重时，甚至会造成系统频率崩溃，电厂解列，引起大面积停电。因此，电力系统要进行频率调整。

电力系统的频率调整可分为一次、二次调整和三次调整。

频率的一次调整是系统中所有发电设备都要分担的调整任务，由调速器进行。当系统负荷波动时，发电机转速发生波动。通过调速器的作用使机组转速进入新的稳定状态，其转速和原有转速可能不完全相等。

为了使负荷变动后机组转速仍能维持原来转速，有时需要依靠手动或自动调节调频器，亦即要求有二次调频。二次调频由系统中指定的一个或几个容量较大的发电厂实施。

所谓频率的三次调整，其实就是根据各发电厂的比耗量按最优化准则，根据负荷有规律变动的需求责成某些发电厂按事先指定的发电负荷曲线发电。因此，三次调频的名词也不常用。我们通常所说的调频实际仅指频率的二次调整。

第二节 电力系统的无功功率平衡与电压调整

电力系统的有功功率电源集中在各类发电厂中的发电机；无功功率电源除发电机外，还包括调相机和电容器等。电力系统的无功功率电源也有最优分布的问题。无功功率调整与电压调整有密不可分的关系。

一、电力系统中无功功率的平衡及备用

(一) 无功功率负荷与无功功率损耗

各种用电设备中，除相对很小的照明负荷只消耗有功功率，为数不多的同步电动机可发出一部分无功功率外，大多数用电设备都要消耗无功功率。此外，电力系统中的变压器和电力线路也要消耗无功功率。

变压器中的无功功率损耗分为两部分：励磁支路损耗和绕组漏抗中的损耗。其中，励磁支路损耗的百分数基本等于空载电流 I_0 的百分数。绕组中漏抗损耗，在变压器满载时，基本等于短路电压 U_d 的百分数。虽然一台变压器的无功功率损耗仅为变压器容量的百分之几



到百分之十几，但是，电力系统中的电压是多级的，经过多级升降压，变压器中的无功功率损耗就相当可观。例如，对于五级变压的电网，根据典型计算表明，当变压器全都处于半载时的无功功率损耗总和相当于变压器负荷的 30% 以上。如果所有变压器都满载，则变压器的无功损耗相当于变压器负荷的 50% 以上。由此可见，变压器的无功损耗较有功损耗大得多。

电力线路与变压器不同。线路的串联电抗呈感性，即消耗无功功率；而并联电纳，则呈容性，亦即作为无功功率电源出现。因此，电力线路究竟是消耗无功功率还是补偿无功功率，就不能肯定。

（二）无功功率电源

同步发电机既能发出有功，也能发出无功。只有在电压、电流、功率因数都为额定值时，视在功率才能达到额定值。提高功率因数，无功功率容量减少，而有功功率由于受到原动机出力的限制不能多发，于是，视在功率减少。如果降低功率因数运行，有功功率减少，无功功率可以增加，但是无功功率的增加应以励磁电流不超过额定值作为限制条件，因此，视在功率有可能低于额定出力。

除了同步发电机外，可作为无功功率电源的还有调相机和电容器。

调相机实质上就是只能发无功功率的发电机。它在过激运行时向系统供应感性无功功率；欠激运行时从系统吸取感性无功功率。

并联电容器只能向系统供应感性无功功率。电容器的优点是静止电器，损耗小，可以分散安装，随意拆迁，投资比调相机少，因此被广泛采用。

（三）无功功率平衡及备用

与有功功率平衡相似，系统中电源供应的无功功率（发电机供应的和补偿设备供应的）应等于负荷消费的无功功率和电网中损耗的无功功率之和。

在进行无功功率平衡时，要根据潮流分布情况，计算出系统中的无功电源出力、网络的无功功率损耗和无功负荷估计数值，比较数据，检查能否平衡。如无法平衡，则应变更无功功率电源配置方案。同时，系统中要配备一定数量的无功功率备用容量，以适应无功负荷变化的需要。

优化无功功率电源的分布可以减少无功电流在电网中的流动，从而减少电网中的有功功率损耗，同时也降低了电网中的电压损耗。和有功功率最优分布准则相似，无功功率电源的最优分布遵循等网损微增率准则。

二、电力系统的电压管理及调压方法

（一）电压波动和电压管理

有功、无功负荷变动时，会引起系统电压偏离正常值。这种电压偏移可分为两类：一类是冲击性的或间隙性的电压偏移；另一类是周期长、波及面大的电压偏移。

引起冲击性电压偏移的设备主要有电弧炉、卷扬机、往复式泵、通风设备等。另一类电压偏移，其周期较长，波及面较大，是由于生产、生活、气候变化带来的，或者是由于个别设备退出运行或系统接线方式的变化引起的。

为了监视电压变化，通常选择系统中具有代表性的几个中枢点加以控制，并在若干有代表性的用电负荷受电端设置电压自动监测仪表，定时记录电压值，以便考核电压偏移是否超过允许范围。



(二) 调压方法

电力系统调压主要通过保持各中枢点的电压变动不超出一定范围来实现,主要有以下几种方法:

- (1) 改变发电机的端电压。
- (2) 改变变压器的变比。如果要想实现经常性的电压调整,就必须采用有载调压变压器。
- (3) 改变网络中无功功率的分布。

在电网中流过无功电流时,会引起线路压降。根据电工基础的常用公式可以推导出输配电线路中的电压降公式

$$\Delta \dot{U} = \frac{PR + Q_L x_L}{\dot{U}_1} + j \frac{Px_L - Q_L R}{\dot{U}_1} \quad (1-1)$$

式中 U_1 ——输配电线路始端电压, V;

P ——线路传输的有功功率, W;

Q_L ——线路传输的电感性无功功率, var;

R ——线路的电阻值, Ω ;

x_L ——线路的电感电抗值, Ω ;

ΔU ——线路末端的电压降, V。

如果线路末端电压用 $\dot{U}_2$ 表示, 则 $\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}$ 。如用相量图表示, 则如图 1-2 所示。

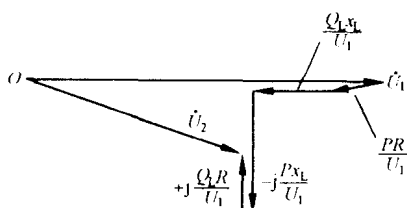


图 1-2 线路电压降相量图

由于高压输电线路的电抗值要比电阻值大得多, 因此, 电压降 $\frac{Q_L x_L}{U_1}$ 的分量要比 $\frac{PR}{U_1}$ 的分量大得多。同样, 电压降的 $\frac{Px_L}{U_1}$ 的分量也比 $\frac{Q_L R}{U_1}$ 的分量大得多。由此可见, 无功电流对电压降的数值有重大影响, 而有功电流主要对电压的相位偏移有影响。因此, 通过改变输电线路中的无功电感电流的分布可以达到调压的目的。实际上, 在对电力系统进行无功功率平衡时, 其先决条件必须保证电压水平正常。就像进行有功功率平衡时, 其先决条件必须保证频率正常一样。

第三节 电力系统运行的稳定性

一、电力系统的静态稳定性

电力系统的静态稳定性是指电力系统在微小扰动下的稳定性。静态稳定的判据是: 同步发电机的功率角 (即发电机转子的相对电磁位置角) 增加时, 输出有功功率也增加, 由于原动机的输入机械功小于发电机输出的电功, 机组转速减慢, 功率角又降回到原来的数值。满足这一条件, 就符合静态稳定性的要求。反之, 如果功率角增加, 而输出电功率反而减少, 则由于原动机输入的机械功不变, 机组又进一步加速运转, 功率角进一步增加, 这样就难于使转子恢复到原来的旋转状态, 导致发电机失步。这就是静态不稳定。

二、电力系统的动态稳定性

电力系统的动态稳定性也称暂态稳定性, 是指在一定大小的扰动下的稳定性。这类扰动



可能是由于系统元件的切除或投入。例如发电机、变压器、线路、负荷的切除或投入引起的扰动，也可能是由于发生短路或断线等事故引起的扰动。动态稳定性的分析方法与静态稳定性相似，也是从分析功一角特性入手。

三、提高电力系统稳定性的措施

(一) 提高电力系统静态稳定性

一般可在提高发电机电动势、减小系统电抗（缩短电气距离）、稳定系统电压等几方面想办法。

(1) 提高发电机电动势，也就提高功率极限，改善功角关系曲线，从而提高稳定性。

(2) 减少系统阻抗，也就缩短各发电机之间的电气距离，增强了各机组之间电的联系，这是提高稳定性的一个根本性措施。

(3) 稳定系统电压，可以先稳定发电机的输出功率，确保无功功率平衡，这对系统保持稳定运行有很大好处。

(二) 提高电力系统动态稳定性

发电机在承受大的扰动后，其机械功率和电磁功率出现不平衡，这是引起动态稳定破坏的主要原因。常用的提高动态稳定的措施有以下几种：

1. 快速切除故障

由于快速切除故障，大大缩短了扰动的周期和幅度，因此提高了系统的稳定性。

2. 采用自动重合闸

电力系统中的许多故障，不少是瞬时性的。在故障发生后快速切除故障线路，待故障消失后自动将线路重新投入，不仅提高了供电可靠性，而且也有利于系统运行的稳定性。

3. 强行励磁和快速关闭汽门

这是两种从自动调节系统入手，通过减少功率或能量的差额提高动态稳定性的措施，在实践中也十分有效。

4. 电气制动和变压器中性点经小电阻接地

这些都是用消耗能量的办法，减少能量的不平衡，来提高系统动态稳定性的措施。采用这两种措施投资增加。

5. 设置解列点，异步运行后再同步

这是当系统的稳定已不可避免，为了限制事故的进一步扩大而采取的权宜措施。

复 习 题

一、名词解释

1. 电力系统发电设备的最优组合顺序
2. 发电设备的比耗量
3. 电力系统的备用容量
4. 频率调整
5. 等耗量微增率
6. 电力系统的静态稳定性和动态稳定性

二、填空题

1. 系统发电机的总容量应不小于_____、_____和发电厂_____三部分之和。



2. 系统的备用容量，如按其用途可分为_____、_____和_____。

3. 电力系统的频率调整可分为_____、_____和_____调整。

4. 电力系统的有功功率电源集中由_____供给；无功功率电源除_____外，还有_____和_____等。

5. 电力系统调压主要通过保持_____不超出一定范围。

三、问答题

1. 电力系统的有功功率平衡应遵循什么原则？

2. 电力系统为什么要调频？怎样调频？

3. 优化无功功率电源分布对系统运行有什么意义？

4. 电力系统调压有哪些方法？

5. 为什么说电力系统中的无功电流对电压降的数值有重大影响，而有功电流主要对电压的相位偏移有影响？为什么说电力系统主要通过改变无功电流分布来达到调压目的？



电力系统中性点运行方式和防止事故措施

第一节 中性点不接地系统中的单相接地故障

中性点不接地系统也称为中性点绝缘系统，多用在 $3 \sim 10\text{kV}$ 电力系统。这种运行方式的优点是当发生单相接地故障时，仍可继续短时间运行，而不致于立即中断供电。在中性点不接地系统中，如果发生一相金属性接地，则该相对地电压为零，其余两健全相的对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，等于线电压。接地故障电流是正常时任一相对地电容电流的 3 倍。

一、单相接地时的电弧及间隙性弧光过电压

对于中性点不接地系统的单相接地故障，一般继电保护不动作于跳闸，如果接地故障不是瞬间发生后立即消失，则在故障点处会产生电弧。容性接地电流与接地相正常时的相电压相差 90° ，因此，当接地电流过零时，加在电弧两端的电源电压为最大值，故障点的接地电弧很快复燃，不易熄灭。如果与接地线路有直接电气联系的电网内线路较多，电容电流较大，接地故障电流也较大，容易形成稳定的接地电弧。这种单相接地比较危险，因为电弧可能烧坏设备，或者从单相接地扩大为两相或三相弧光短路。

在线路较短时，接地电流较小，如果是临时性弧光接地，接地故障常常能够迅速熄弧，恢复正常运行。

有些接地故障，电流并不太大，不能形成稳定性的电弧，但是电弧又不能自动熄灭，而是形成熄弧与电弧重燃交替进行的不稳定状态，称为间隙性电弧。这种间隙性电弧引起电力网运行状态的瞬息改变，导致电磁能的强烈振荡，并在非故障相以及故障相中产生严重的暂态过程过电压，这就是间隙性弧光过电压，其数值一般认为可达 $2.5 \sim 3$ 倍相电压，最大可达 3.5 倍相电压。这种过电压会传输到与接地故障点有直接电气连接的整个电网上，可能在某一绝缘薄弱的部位引起另一相对地击穿，造成两相短路。电网电压越高，电气设备的绝缘裕度也越小，间隙电弧引起的过电压危险性就越大。

二、对单相接地电流数值进行限制

发生单相接地故障时，单相接地电流数值愈大，后果愈严重。当接地电流大于 $5 \sim 10\text{A}$ 时，最易发生间隙电弧，因此不同电气设备和不同电压等级的电网，对单相接地电流数值分别进行限制。

（一）有发电机和高压电动机的电网

发电机是电力系统最重要的设备之一。发电机定子单相接地是一种较常见的故障。接地电流流经故障点，如果故障电流较大，电弧不易熄灭，就有烧坏定子绕组和铁心的危险，也可能引发相间短路等其他事故。因此，发电机应装设定子单相接地保护，当单相接地故障电流超过表2-1所示的数值时，应动作于跳闸；如果不超过表2-1所示的数值，单相接地保



护可带时限动作于信号。

表 2-1 发电机单相接地电流允许值

发电机额定电压 (kV)	发电机额定容量 (MW)	接地电流允许值 (A)	发电机额定电压 (kV)	发电机额定容量 (MW)	接地电流允许值 (A)
6.3	≤ 50	4	13.8 ~ 15.75	125 ~ 200	2
10.5	50 ~ 100	3	18 ~ 20	300	1

注 对于氢冷发电机接地电流允许值为 2.5A。

对于小接地电流系统的高压电动机，当容量大于 2000kW、接地电容电流大于 5A 时，以及电动机容量虽在 2000kW 以下，但接地电容电流超过 10A 时，均应装设接地保护。

(二) 6 ~ 10kV 电网

对于 6 ~ 10kV 电网，由于电气设备绝缘裕度较大，间隙电弧引起的谐振过电压对电气设备绝缘的危险程度相对较轻，但单相接地电流也不得大于 30A，否则，电弧不能自行熄灭，容易烧坏电器设备或造成相间短路。

(三) 20 ~ 66kV 电网

对于电压在 20kV 及以上，包括 35 ~ 66kV 电网，间隙电弧引起的过电压对于设备绝缘十分危险。而且电压愈高，电弧愈不易自行熄灭。所以规定单相接地电流不得大于 10A。

三、单相接地电流超过限值时应采取的措施

对中性点不接地系统，为了防止接地故障时电容电流过大引起间隙性电弧形成过电压，可通过缩小电网中有电气连接的线路长度来减少电容电流，例如可将电力网分区运行；也可以采取中性点经消弧线圈接地的方法来补偿电容电流。本书将重点介绍消弧线圈的配置原则及运行维护。

四、单相接地时的分频谐振过电压

中性点不接地系统的电气设备绝缘击穿事故，不少都与单相接地故障有关。甚至有不少相间短路事故都是在发生单相接地后引起的。例如在发生单相接地后，接地电弧使周围空气电离，引起相间击穿短路。当电缆线路发生单相接地时，如果长时间得不到处理，故障点处电缆的塑料绝缘层将过热气化，沿线蔓延，最终形成电缆火灾，后果十分严重。

此外，单相接地常常会引发过电压。上面提到的单相接地时的间隙性电弧会引起弧光过电压只是其中之一。另外还有一种分频谐振过电压也十分常见。

分频谐振过电压是中性点不接地系统发生单相接地时产生的一种铁磁谐振过电压，其常见的谐振频率为 1/2 次基频。对于频率为 50Hz 的三相交流系统，谐振频率为 25Hz。

分频谐振通常发生在中性点不接地系统单相接地故障点断开的时候。亦即，当中性点不接地系统发生单相接地故障，接地点脱离的一瞬间有可能激发分频谐振过电压。分频谐振过电压的电压并不很高，约为系统额定相电压的 2 ~ 3 倍。但是由于谐振持续时间较长，而且由于频率低，电压互感器的感抗减少，通过电压互感器的电流极大，常可使电压互感器过载 30 ~ 50 倍，引起电压互感器过热爆炸。有时也会出现避雷器爆炸。这是因为避雷器长时间通过大电流所致。在中性点不接地系统，如果同时出现多台电压互感器和阀型避雷器爆炸，这时就要想到可能发生单相接地引起分频谐振过电压。

发生分频谐振过电压时，会造成许多电压互感器和避雷器同时爆炸，使这些线路同时故



障停电，因此，危害极大。有关分频谐振发生机率，以及防治措施，在后面过电压一章中有专门叙述。

第二节 中性点经消弧线圈接地系统中消弧线圈的配置原则及运行维护

一、消弧线圈的补偿方式

(一) 全补偿

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时，使流经消弧线圈的电流 I_{Lx} 与接地点电容电流 I_{Cj} 相等的补偿方式称为全补偿，亦即完全补偿。这时

$$I_{Lx} = I_{Cj} \quad (2-1)$$

式中 I_{Lx} ——单相接地时流经消弧线圈的电感电流；

I_{Cj} ——单相接地时流经接地点的电容电流。

由于 I_{Lx} 实际上也流过接地点，而且正好与 I_{Cj} 方向相反，互相抵消，因此，流过接地点的故障电流为零。从消弧的观点来看，全补偿时故障点处的电流为零，电弧自行熄灭，效果最好。但是从其他方面来看，这种补偿方式存在严重的缺点。因为全补偿时 $\omega L_x = \frac{1}{3\omega C}$ （式中 C 为一相对地电容），正好构成串联谐振。如图 2-1 所示，当系统操作等原因，三相平衡系统被破坏时，变压器中性点对地出现一个电压偏移 $\dot{U}_0$ ，这个中性点位移电压作用在消弧线圈的电感 L_x 与系统三相对地电容 $3C$ 上，形成串联谐振，其电流大小仅决定于消弧线圈的直流电阻和系统线路的电阻。这个谐振电流可能达到很大，使中性点和各相对地产生一个很高的谐振过电压，危及电网绝缘。从图 2-1 (a) 可见，中性点位移电压加在消弧线圈和系统对地电容上，形成串联谐振。其电流、电压相量图如图 2-1 (b) 所示，消弧线圈和系统各相的对地电容上所承受的电压要远大于中性点位移电压 $\dot{U}_0$ 。图 2-1 中假设在这个谐振回路内存在电阻 $R = R_L + R_C$ 。为了画图清楚起见，并假设没有完全补偿， U_C 略大于 U_{Lx} 。

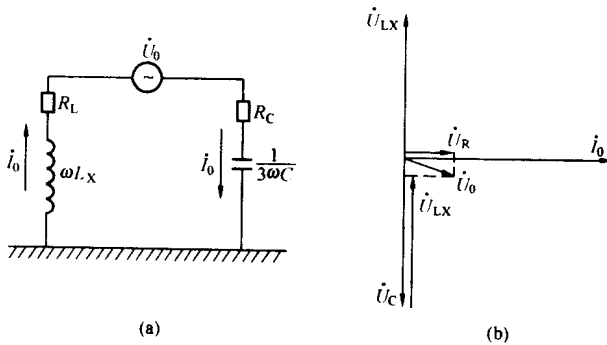


图 2-1 消弧线圈接近全补偿时的等值电路图和相量图

(a) 等值电路图；(b) 相量图

由上面介绍可见消弧线圈不宜采用全补偿方式。

(二) 欠补偿



使得补偿电流 I_{LX} 小于接地电容电流 I_{CJ} , 即 $\omega L_X > \frac{1}{3\omega C}$ 时的补偿方式, 称为欠补偿。采用欠补偿方式时, 在单相接地故障点处尚有部分未能补偿了的电容电流过。

欠补偿方式一般很少采用。在欠补偿运行情况下, 如果有部分线路退出运行, 或者发生一线断线, 则使系统对地电容减少, 这时有可能使系统接近或达到全补偿, 因而有可能出现串联谐振过电压。

(三) 过补偿

使得补偿电感电流 I_{LX} 大于接地电容电流 I_{CJ} , 即 $\omega L_X < \frac{1}{3\omega C}$ 时的补偿方式, 称为过补偿。采用过补偿运行方式时, 在单相接地故障点处流过一个感性电流。采用过补偿运行方式可避免发生串联谐振过电压的危险, 因此得到广泛采用。采用这种补偿方式时, 应注意消弧线圈的容量要选择适当, 以免故障点处流过的电感电流太大, 使电弧不能可靠地自动熄灭。通常取补偿度 $P = 5\% \sim 10\%$ 。

(四) 补偿度

为了评价补偿情况, 习惯上要计算补偿度 ρ 。补偿度 ρ 等于所在电网各消弧线圈的总电感电流 I_{LX} 与该电网接地电容电流 I_{CJ} 之差和 I_{CJ} 之比

$$\rho = \frac{I_{LX} - I_{CJ}}{I_{CJ}} \quad (2-2)$$

当 $\rho > 0$ 时, 表示消弧线圈总电流 I_{LX} 大于接地电容电流 I_{CJ} , 亦即运行在过补偿状态。

当 $\rho = 0$ 时, 即处于全补偿状态, $I_{LX} = I_{CJ}$ 。

当 $\rho < 0$ 时, 为欠补偿, $I_{LX} < I_{CJ}$ 。

(五) 调谐度

消弧线圈的总电感电流与电网接地电容电流之比, 称为调谐度, 用字母 K 表示。即

$$K = \frac{I_{LX}}{I_{CJ}} \quad (2-3)$$

(六) 脱谐度

电网接地电容电流 I_{CJ} 与消弧线圈总电感电流 I_{LX} 之差和电网接地电容电流之比, 称为脱谐度, 用 v 表示, 即

$$v = \frac{I_{CJ} - I_{LX}}{I_{CJ}} = 1 - K \quad (2-4)$$

二、消弧线圈的配置原则

在中性点经消弧线圈接地的系统中, 消弧线圈的电感量应根据系统对地电容的大小来确定。在配置消弧线圈时应注意以下事项:

(1) 有多台消弧线圈的系统, 不应把几台消弧线圈全部安装在同一个变电所内, 而应使电网中每一个独立部分都能具有足够的补偿容量。这样, 一旦出现系统解列(分网)运行时, 可使每个局部网络都能具有足够的补偿容量。

(2) 消弧线圈应尽可能装在电网的送电端, 以保证当电网内发生故障时, 消弧线圈被切除的可能性最小。

(3) 应尽量避免在一个电力网中只装设一台消弧线圈。而且, 在采用两台以上消弧线圈时, 应尽量选用额定容量不同的消弧线圈, 以扩大电感电流的可调范围。

