



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育电类专业教学用书

电气化铁道供电系统

李鲁华 主编

01 010100110

01 0 0 0110

110 1010101001 0110 00

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

电气化铁道供电系统

李鲁华 主 编

王 睿 副主编

张效融 杨玉菲 主 审

江苏工业学院图书馆
藏书章

中 国 铁 道 出 版 社

2008年·北 京

内 容 简 介

本书是教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据“电气化铁道供电系统”的教学要求和现场需要而编写的。全书共分九章,内容包括:电力系统与牵引供电系统、牵引变电所、牵引变压器容量的计算和确定、牵引网阻抗、供电系统短路的分析计算、牵引供电系统的电压损失、牵引供电系统的电能损失、电气化铁道对电力系统的影响和改善措施、电气化铁道对通信线路的影响及防护措施等内容。

本书可作为高等职业院校电气化铁道供电专业电气化铁道供电系统课教材,也可作为现场技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气化铁道供电系统/李鲁华主编. —北京:中国铁道出版社,2008.4
教育部职业教育与成人教育司推荐教材
ISBN 978-7-113-08722-7

I. 电… II. 李… III. 电气化铁道-供电装置-职业教育-教材 IV. U223.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 040090 号

书 名:电气化铁道供电系统
作 者:李鲁华 主编

责任编辑:阚济存 武亚雯 电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com
封面设计:冯龙彬
责任校对:张玉华
责任印制:金洪泽 陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
印 刷:中国铁道出版社印刷厂
版 次:2008年3月第1版 2008年3月第1次印刷
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14.25 字数:356千
印 数:1~3 000册
书 号:ISBN 978-7-113-08722-7/U·2204
定 价:26.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187



前 言



本教材是根据新制定的高职学校铁道供电专业教学计划及该专业教学指导委员会教材编写计划编写的。

为了适应高职学校铁道供电专业“电气化铁道供电系统”课程的教学和生产现场职工的自学,本教材的编写力求围绕培养应用型人才的需要,体现高职教学的特点。在内容上力求加强基本理论和实践知识的阐述,在文字叙述上浅显易懂、便于自学,在内容的组织上调整了某些章节顺序,使其更加紧凑、更富有条理性,便于组织教学。

本教材共分九章。第一章主要介绍了电气化铁道电流制的种类和工频单相交流制牵引供电系统的结构和工作原理,并简介了电力机车的工作原理。第二章介绍了不同类型的牵引变压器的接线方式和工作原理。第三章主要分析牵引变压器的容量确定条件及计算方法。第四章介绍牵引网阻抗的计算方法。第五章是短路计算,采用常用的标么值计算方法分析了在不同的短路状态下的短路电流特征。第六章、第七章讲解计算牵引变电所和牵引网的电压损失及电能损失的方法以及减少损失的措施。第八章主要分析电气化铁道的牵引负荷所产生的负序电流、功率因数低、谐波电流对电力系统的影响和采取的相应措施。第九章分析了电气化铁道在通信线上产生静电感应影响和电磁感应影响的原因和改善措施,介绍了 BT、DN、AT、SC 供电方式。

本教材由李鲁华主编,王睿副主编,兰州交通大学张效融、西安铁道职业技术学院杨玉菲主审。其中第一、二、八、九章由内江铁路机械学校李鲁华编写,第三章由郑州铁路职业技术学院王程有编写,第四章由郑州铁路职业技术学院黄峰亮编写,第五、六章由郑州铁路职业技术学院王睿编写,第七章由西安铁道职业技术学院赵飞燕编写。

因编者的水平有限,书中的遗漏和错误在所难免,希望读者给予指正。

编 者

2008 年 3 月

目 录

第一章 电力系统与牵引供电系统

第一节 电力系统	1
第二节 牵引供电系统	12
第三节 电力机车简介	18
复习思考题	20

第二章 牵引变电所

第一节 单相牵引变电所	21
第二节 三相牵引变电所	25
第三节 三相一两相牵引变电所	30
复习思考题	38

第三章 牵引变压器容量的计算和确定

第一节 计算条件	39
第二节 列车电流、馈线电流和绕组有效电流	40
第三节 牵引变压器的计算容量	45
第四节 牵引变压器的校核容量	46
第五节 牵引变压器的安装容量	48
复习思考题	53

第四章 牵引网阻抗

第一节 牵引网等值电路及其阻抗	54
第二节 单线牵引网阻抗	58
第三节 复线牵引网阻抗	62
复习思考题	67

第五章 供电系统短路的分析计算

第一节 短路的基本概念	68
第二节 标么值及其应用	70
第三节 网络的变换与化简	77
第四节 三相对称短路的分析计算	85

第五节 对称分量法及其应用	98
第六节 电气元件的序阻抗与序网络	103
第七节 不对称短路的分析计算	112
第八节 牵引供电系统短路的分析计算	125
复习思考题	136

第六章 牵引供电系统的电压损失

第一节 牵引网的电压损失	139
第二节 牵引变压器的电压损失	143
第三节 电力系统的电压损失和牵引网的电压水平	150
第四节 改善牵引网电压水平的方法	150
复习思考题	154

第七章 牵引供电系统的电能损失

第一节 牵引网的电能损失	155
第二节 牵引变压器的电能损失	157
第三节 减少牵引供电系统电能损失的措施	160
第四节 接触导线截面的选择	161
复习思考题	162

第八章 电气化铁道对电力系统的影响和改善措施

第一节 负序电流	163
第二节 功率因数	176
第三节 谐波电流	183
复习思考题	188

第九章 电气化铁道对通信线路的影响及防护措施

第一节 概 述	189
第二节 电场影响和磁场影响	190
第三节 危险电压和杂音干扰	193
第四节 防护措施	195
复习思考题	211
附 录	212
参考文献	221

第一章 电力系统与牵引供电系统

第一节 电力系统

电力系统是由发电、输电、变电、配电和用电等设施所构成的整体。电力系统的组成可用图 1-1 的示意图说明。

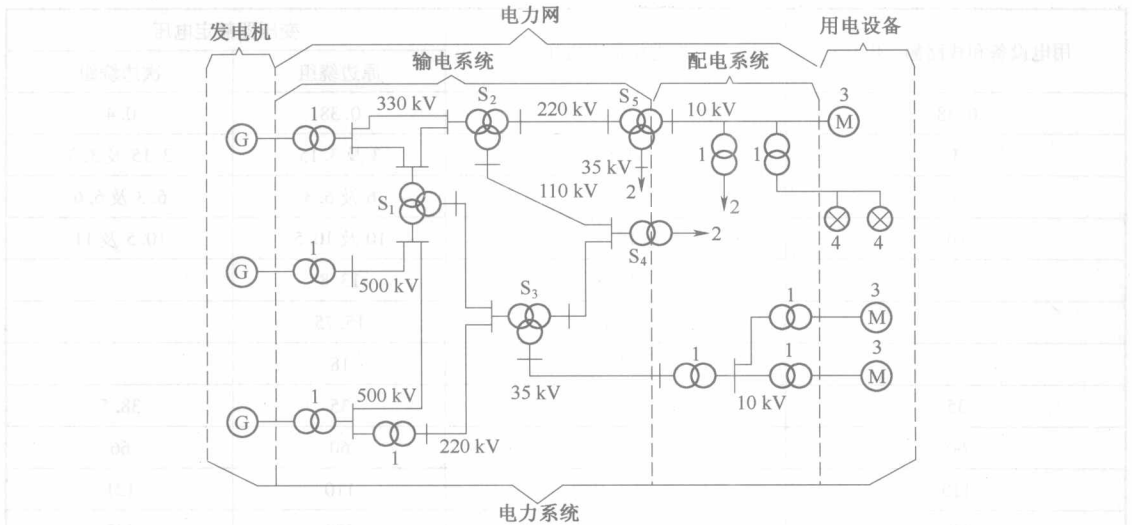


图 1-1 电力系统示意图

1—变压器;2—负荷;3—电动机;4—电灯

发电厂将其他形式的能源转变为电能。根据发电厂所取得的能源的不同,发电厂分为火电厂、水电站、核电厂等,此外还有地热电厂、风力电厂、潮汐电厂等。发电机一般采用三相同步发电机,电压多为 10.5 kV。每台发电机都有相应的升压变压器,组成发电机-变压器组。

电力网简称电网,由输电线路、配电线路和变电所组成。输电线路的作用是输送电能,其特点是电压较高、线路较长。配电线路的作用是分配电能,电压较低、线路较短。电网按其规模主要分为地区电网和区域电网。地区电网多限于一个地区或一个省,电压等级为 110 ~ 220 kV;区域电网由几个地区或几个省联合而成,电压等级为 330 ~ 500 kV。

变电所的作用是变换和调整电压、分配电能。按变电所在电力系统中的地位 and 作用,一般把变电所分为以下 3 种。

① 枢纽变电所

它通常有两个及以上电源汇集,进行电能的分配和交换,从而形成电能的枢纽,如图

1-1 中的 S_1 、 S_2 。枢纽变电所规模较大,并采用三绕组变压器以获得不同等级的电压,送到不同距离的地区。

② 区域变电所

其作用是供给一个地区用电,如图 1-1 中的 S_3 。通常也采用三绕组变压器,高压受电,中压转供,低压直配。

③ 用户变电所

此类变电所属于电力系统的终端变电所,直接供给用户电能,通常采用双绕组变压器,如图 1-1 中的 S_4 、 S_5 。电气化铁道牵引变电所就属于用户变电所。

一、电力系统的额定电压

电力系统的额定电压,包括电力系统中各种供电设备、用电设备和电网的额定电压。电气设备的额定电压,是按长期工作时具有最大经济效益所规定的电压。国家根据技术经济的合理性、电气设备的制造水平等因素,规定了电气设备统一的额定电压等级,如表 1-1 所列。

表 1-1 额定电压(线电压)等级(kV)

用电设备和线路额定电压	发电机额定电压	变压器额定电压	
		原边绕组	次边绕组
0.38	0.4	0.38	0.4
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	13.8	13.8	
	15.75	15.75	
	18	18	
35		35	38.5
60		60	66
110		110	121
220		220	242
330		330	363
500		500	550
750		750	825
25		27.5	27.5

1. 用电设备和线路的额定电压

当电力系统中通过负荷电流时,输电线路和变压器绕组上总存在一定的电压损失,线路从首端至末端的电压损失约为额定电压的 5%,变压器绕组上的电压损失也约为额定电压的 5% 左右。通常,用电设备的工作电压允许在 0.95 ~ 1.05 倍额定电压范围内变化。

为保证线路末端的用电设备的工作电压在允许范围内波动,就必须提高线路首端的电压,以补偿线路首端的变压器绕组和线路上的电压损失。因此,对于某一电压等级(例如 110 kV)的输电线路,其末端的额定电压为 110 kV,而其首端的额定电压却为 121 kV,即首端的额定电压比末端的额定电压高 10%。我们将线路首端的额定电压和线路末端的额定电压的平均值,

称为线路的平均额定电压,即

$$U_{av} = \frac{U_{N首} + U_{N末}}{2} = 1.05U_N \quad (1-1)$$

式中 U_{av} ——线路的平均额定电压, kV;

$U_{N首}$ ——线路首端的额定电压, kV;

$U_{N末}$ ——线路末端的额定电压, 即线路的额定电压, kV;

U_N ——线路的额定电压, kV。

因此,用电设备的额定电压就是输电线路的额定电压。输电线路的额定电压实际上是指线路末端的额定电压,而线路首端的额定电压要比线路的额定电压高 10%。

2. 发电机的额定电压

发电机是电源,处于线路的首端,考虑线路上的电压损失,因此发电机的额定电压比线路额定电压高 5%。

3. 变压器的额定电压

按变压器的工作原理,一台变压器既可升压运行,也可降压运行,我们称接电源的一侧为原边绕组,接负载的一侧为次边绕组。

变压器的原边绕组是接受电能的,可认为是用电设备,因此其额定电压就是输电线路的额定电压。而直接与发电机相连的升压变压器的原边绕组额定电压,应与发电机额定电压一致,故表 1-1 中变压器原边绕组的额定电压有 3 kV 及 3.15 kV、6 kV 及 6.3 kV、10 kV 及 10.5 kV 之分。

变压器的次边绕组对于负载而言,相当于电源,考虑到变压器绕组上和线路上的电压损失,所以变压器次边绕组的额定电压比线路的额定电压高 10%。若是线路较短的配电变压器,则次边绕组额定电压可只比线路额定电压高 5%,如表 1-1 中变压器次边绕组的额定电压有 3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV 的。

二、电能的质量指标

衡量电能质量的主要指标,是电压质量和频率质量。

1. 电压质量

(1) 电压偏差

电压偏差是指用电设备的实际工作电压与额定电压的差值,通常用百分数表示。

$$\frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1-2)$$

国家标准规定的供电电压允许偏差见表 1-2。

当电力系统的电压偏差超过规定的范围时,对用户设备的危害很大。对于照明用的灯泡,当电压低于其额定值时,发光效率将降低;当电压高于额定值时,发光效率虽然增加,但灯泡的寿命大大缩短。对于电动机,当电压降低时,转矩急剧下降,造成启动困难,运行中的电流增大,使绕组温升增高,加速绝缘老化,甚至烧毁电动机。

对于输电线路,当输送功率一定时,由于电压降低,则电流增大,导致电能损失增加。

(2) 电压波动

表 1-2 供电电压允许偏差

线路额定电压 U_N	电压允许偏差
10 kV 及以下	$\pm 7\%$
35 kV 及以上	$\pm 5\%$
220 kV	+7%、-10%

电压波动是指急剧的电压变化,通常用电压有效值的最大值与最小值的差值表示,一般写成百分数的形式。

$$\frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3) 三相电压的不对称性和波形的非正弦性

在电力系统的用电负荷中,有很大一部分是冲击性负荷和整流性负荷以及容量很大的单相负荷(例如轧钢机、电力机车等),它们不但引起电压的偏差和波动,而且造成三相电压不对称和电压波形畸变,直接影响电气设备的正常工作。

2. 频率质量

国家规定电力系统的额定频率为 50 Hz,允许偏差不得超过 ± 0.5 Hz,容量大于 3 000 MW 的用户;允许偏差不得超过 ± 0.2 Hz。

频率的变化对电力系统运行的稳定性影响很大。当系统低频率运行时,将会造成汽轮发电机低压级叶片振动加大而产生裂纹,甚至折断;用户的电动机转速将下降,影响企业的产品质量和数量;引起计算机计算错误和控制混乱。

三、电力负荷的分级

在国家标准《工业与民用供电系统设计规范》中,根据电力负荷的重要性和中断供电在政治上、经济上所造成的损失或影响程度,对电力负荷作了分级,并对不同等级的电力负荷提出了不同的供电要求。

1. 一级负荷

(1) 中断供电将造成人身伤亡的,如大型医院。

(2) 中断供电将在政治上、经济上造成重大损失的,如重大设备损坏,重大产品报废,用重要原料生产的产品大量报废,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。

(3) 中断供电将影响重要用电单位正常工作的,如重要铁路枢纽、重要通信枢纽、重要宾馆以及经常用于国际活动的公共场所等。

一级负荷应由两个电源供电,当发生故障时,两个电源不应同时受到损坏。

2. 二级负荷

(1) 中断供电将在政治上、经济上造成较大损失,造成重点企业大量减产的,如重要设备损坏,大量产品报废,连续生产过程被打乱,需要较长时间才能恢复。

(2) 中断供电将影响重要用电单位正常工作的,如铁路枢纽、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、大型商场等人员集中的公共场所秩序混乱的。

对二级负荷的供电,应尽量做到在发生常见故障时不致中断供电或中断后能迅速恢复供电。

3. 三级负荷

不属于上述一、二级负荷的其他负荷均属三级负荷,对于三级负荷没有规定供电要求。

在铁道部标准《铁路电力牵引供电设计规范》中规定,电力牵引为一级负荷,牵引变电所应有两路电源供电;当其中任一路发生故障时,另一路应仍能正常供电。

四、电力系统中性点的运行方式

电力系统的中性点,是指三相电力系统中作星形连接的变压器或发电机的中性点。电力系统中性点的运行方式,主要有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地 3

种。前两种又称为小电流接地系统,后一种又称为大电流接地系统。

如何选择电力系统中性点的运行方式,是一个比较复杂的技术经济问题,无论采用哪一种运行方式,都涉及供电可靠性、过电压与绝缘配合、继电保护和自动装置的正确动作、系统的布置、接近故障点时对生命的危险性以及系统的稳定性等一系列问题。

(一) 中性点不接地的三相电力系统

如图 1-2 所示,在正常运行时,电力系统的中性点与地处于绝缘状态。电力系统的三相导线之间及各相导线与地之间,沿导线全长都存在分布电容。如三相导线完全对称,则各相导线对地的分布电容是相等的,可用位于线路中央的集中电容 C 代替,即 $C_A = C_B = C_C = C$;而相间电容较小,故不予考虑。

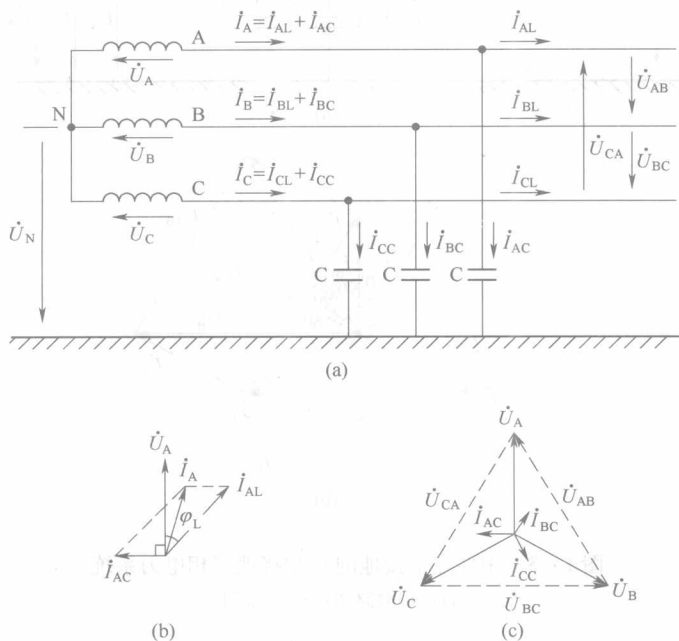


图 1-2 中性点不接地的三相电力系统的正常运行状态

(a) 原理电路图; (b) A 相电流相量图; (c) 电容电流相量图

在正常运行时,三个相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 是对称的,电源提供的三相电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 分别等于各相的负荷电流 \dot{I}_{AL} 、 \dot{I}_{BL} 、 \dot{I}_{CL} 和各相对地的电容电流 \dot{I}_{AC} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CC} 的相量和,如图 1-2(b) 所示。在三相对称电压作用下,三相对地电容电流大小相等,其数值为

$$I_{AC} = I_{BC} = I_{CC} = \frac{U_{\varphi}}{X_C} = \omega C U_{\varphi} \quad (1-4)$$

式中 U_{φ} ——电源相电压, V。

三相电流相位互差 120° ,如图 1-2(c) 所示。所以三相对地电容电流的相量和为零,即 $\dot{I}_{AC} + \dot{I}_{BC} + \dot{I}_{CC} = 0$,没有电容电流流入大地。

由此可见,正常运行状态下的中性点不接地三相电力系统,中性点电位 \dot{U}_N 为零,三相集中电容的中性点电位也为零。

当任何一相的绝缘受到破坏而接地时,各相的对地电压要发生改变,对地电容电流也将发

生变化,中性点的电位不再为零。

如图 1-3 所示,当 C 相发生金属性接地时,故障相对地电压为零,即 $\dot{U}'_C = 0$ 。这时,电源三相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 仍然对称,可列出故障相的电压方程式为

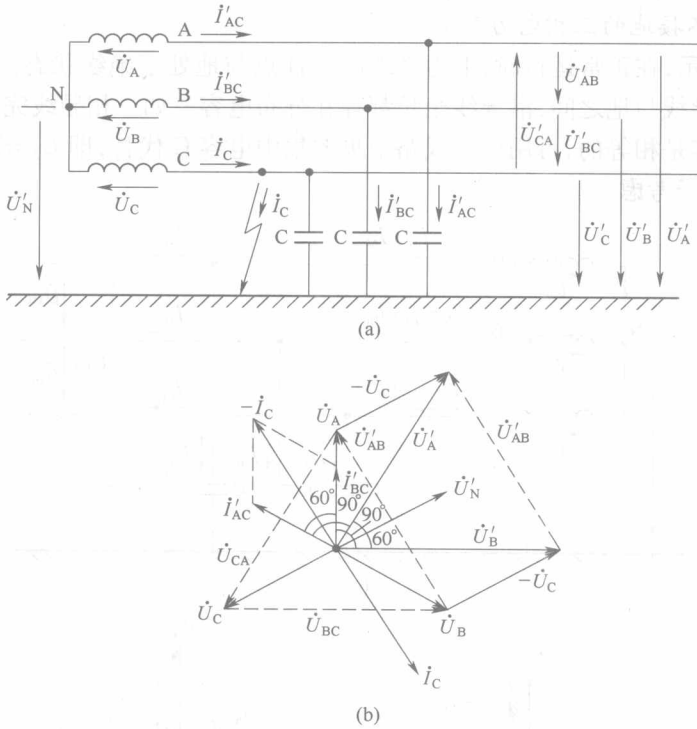


图 1-3 中性点不接地的 C 相接地三相电力系统

(a) 原理电路图; (b) 相量图

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C + \dot{U}'_N = 0$$

所以 $\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$

上式表明,当 C 相发生金属性接地时,中性点的对地电位上升到相电压,并且与接地相的电源相电压相位相反。

于是,非故障相 A 相和 B 相的对地电压分别为

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}'_N = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{AC} = -\dot{U}_{CA}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + \dot{U}'_N = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$$

其相量关系如图 1-3(b) 所示, \dot{U}'_A 和 \dot{U}'_B 之间的夹角为 60° 。A、B 两相的对地电压升高为线电压,即在对地电容上所加的电压升高为正常运行时的 $\sqrt{3}$ 倍,所以对地电容电流也升高为正常运行时的 $\sqrt{3}$ 倍,即

$$I'_{AC} = I'_{BC} = \sqrt{3}I_{AC} = \sqrt{3}\omega CU_\phi \quad (1-5)$$

由于 C 相接地,该相对地电容被短接,所以 C 相的对地电容电流 $\dot{I}'_{CC} = 0$ 。于是在接地点只流过非故障相 A 相和 B 相的对地电容电流,并经 C 相导线返回,其参考方向如图 1-3(a) 所示。

对于接地点有

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC})$$

由图 1-3(b) 可见, \dot{I}'_{AC} 、 \dot{I}'_{BC} 分别超前 \dot{U}'_A 、 \dot{U}'_B 90° , 所以 \dot{I}'_{AC} 和 \dot{I}'_{BC} 两电流之间的夹角也是 60° , 将两者相加即得 $-\dot{I}_C$ 。C 相接地电流 \dot{I}_C 为电容电流, 由相量图可知 \dot{I}_C 超前电压 \dot{U}_C 90° , 其数值为

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

因为

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

所以

$$I_C = 3 I_{AC}$$

由此可知, 单相接地时的接地电流等于正常运行时一相对地电容电流的 3 倍。

若已知每相对地电容 C 及正常运行时的相对地电压 U_ϕ 或电网额定电压 U , 可得

$$I_C = 3\omega C U_\phi = \sqrt{3}\omega C U \quad (1-6)$$

由上式可知, 接地电流 I_C 的大小与电网电压、频率及相对地电容 C 的大小有关, 而电容 C 的大小则与线路的结构(架空线或电缆)、布置方式、线路长度等因素有关。

接地电流是线路、发电机和配电装置等对地电容电流的总和。在实用中, 接地电流也可用下式近似计算

$$\left. \begin{array}{l} \text{对于架空线路} \quad I_C = \frac{Ul}{350} (\text{A}) \\ \text{对于电缆线路} \quad I_C = \frac{Ul}{10} (\text{A}) \end{array} \right\} \quad (1-7)$$

式中 U ——电网的线电压, kV;

l ——电压为 U 的具有电联系的线路长度, km。

尽管在发生金属性单相接地故障后非故障相的对地电压升高为线电压, 根据图 1-3 所示的各相电压回路及相量图, 可列出三个线电压为

$$\dot{U}'_{AB} = \dot{U}'_A - \dot{U}'_B = \dot{U}'_{AB}$$

$$\dot{U}'_{BC} = \dot{U}'_B - \dot{U}'_C = \dot{U}'_B = \dot{U}'_{BC}$$

$$\dot{U}'_{CA} = \dot{U}'_C - \dot{U}'_A = -\dot{U}'_A = -\dot{U}'_{AC} = \dot{U}'_{CA}$$

说明三个线电压仍保持对称关系, 所以对接在线电压上的电力用户并没有什么影响。因为这种系统的各种设备的绝缘是按线电压考虑的, 所以发生单相接地、相电压升高为线电压时, 设备仍然可以继续运行。

在三相电力系统中发生单相非金属性接地(经接地阻抗接地)时, 接地相的对地电压将大于零而小于相电压, 非接地相对地电压将大于相电压而小于线电压, 中性点的对地电压也介于零到相电压之间, 三个线电压仍保持不变, 接地电流比金属性接地时小。因此, 在考虑设备和线路的绝缘水平时, 一般都按单相金属性接地处理。

由上述可知, 在中性点不接地的三相电力系统中, 发生单相金属性接地或单相非金属性接地时, 电网的线电压始终保持对称关系不变。所有接在此系统中的线电压上的电力用户均不受某一相接地的影响。因此, 发生单相接地时可以继续带着接地点运行。但是不允许长期运行, 因为长期运行可能引起非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,应尽快采取措施,找出接地点且在最短时间内将故障消除。规程规定:中性点不接地的三相系统发生单相接地时,继续运行的时间不得超过 2 h,并要加强监视。

接地电流将在故障点形成电弧,这种电弧可能是稳定的或是间歇性的。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、引起两相甚至三相短路,尤其是电机或电器内部单相短路(碰壳短路)时出现电弧最危险。所以在接地电流大于 5 A 时,发电机和电动机都应装设动作于跳闸的继电保护装置。

在一定的条件下,单相接地可能出现周期性熄灭和重燃的间歇性电弧。此间歇性电弧还会导致相与地之间产生过电压,其值可达 2.5~3 倍相电压。在接地电流大于 10 A 时,最容易引起间歇性电弧。电网的电压越高,间歇性电弧引起过电压的危险性越大。因此,必须限制接地电流,以防止间歇性电弧过电压的产生,避免事故的进一步扩大。

综上所述,通常只在电压为 35~60 kV、接地电流 $I_c \leq 10$ A 或电压为 6~10 kV、接地电流 $I_c \leq 30$ A 的电网中采用中性点不接地运行方式。

(二) 中性点经消弧线圈接地的三相电力系统

在中性点不接地的三相系统中,当单相接地电流超过一定的数值时,接地点的电弧就不能自行熄灭,因此应设法减小发生单相接地时的接地电流。考虑到单相接地电流为电容电流,如果在接地回路中能有一个电感电流出现,则在同一电压作用下,利用电感电流与电容电流相位相反的特点,去抵消接地电容电流,熄灭接地点的电弧。所以,一般在发电机或变压器的中性点采用经消弧线圈接地的措施。

消弧线圈是一个具有不饱和铁芯的电感线圈。线圈的电阻很小,电抗很大。铁芯和线圈均浸在变压器油中。消弧线圈的外形和单相变压器相似,但其铁芯的结构与一般变压器的铁芯不同,消弧线圈的铁芯柱有很多间隙,间隙中填有绝缘纸板,如图 1-4(a)所示。采用带间隙的铁芯,主要是为了避免磁饱和,减少高次谐波分量,这样可以得到一个比较稳定的电抗值,使消弧线圈的电流(补偿电流)与加在它上面的电压成线性关系。

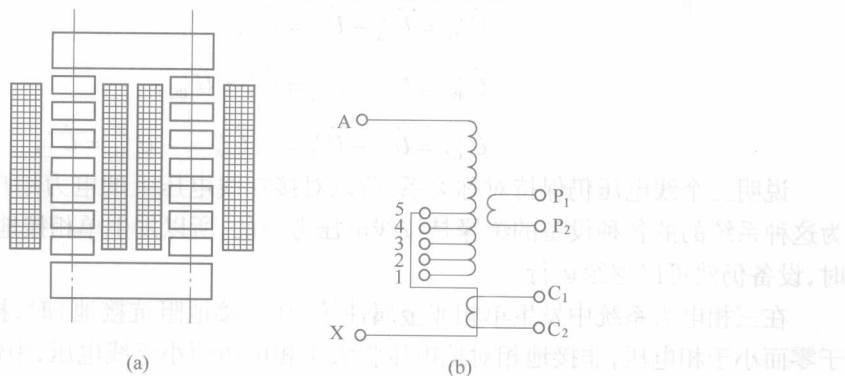


图 1-4 消弧线圈

(a) 结构图; (b) 接线图

由于三相系统中相对地的电容 C 随运行方式的变化而改变,接地电容电流也会随系统的运行方式而变化。所以要求消弧线圈的电抗值也要能作相应的调整,才能达到调整补偿电流以利于消弧的目的。为此,消弧线圈设有分接头,如图 1-4(b)所示。

图 1-5 为中性点经消弧线圈接地的三相电力系统。

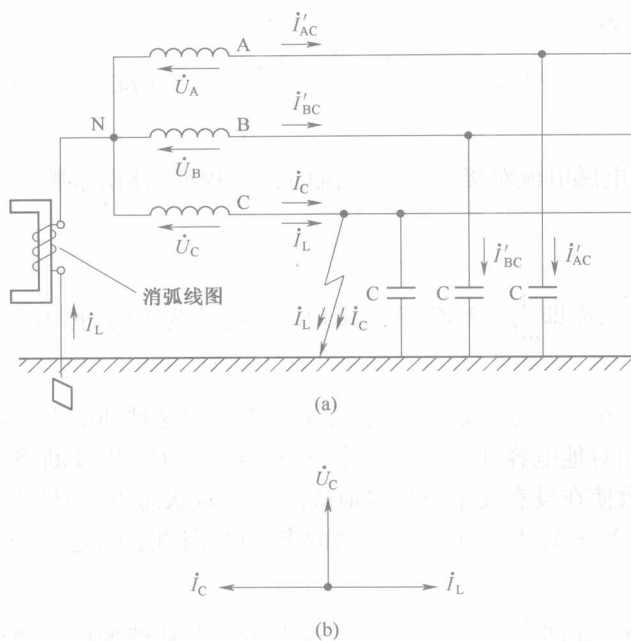


图 1-5 中性点经消弧线圈接地的三相电力系统

(a) 原理电路图; (b) 相量图

在正常运行时,三相系统是对称的,其中性点对地电位为零,即 $\dot{U}_N = 0$, 这时消弧线圈上没有电压作用,也没有电感电流流通。但应当指出,由于线路的三相对地电容不平衡,系统中性点的电位实际上并不等于零,其大小与电容不平衡的程度有关。在正常情况下,中性点的不平衡电压不应超过额定相电压的 1.5%。

当 C 相发生金属性接地时,中性点的电压变为 $\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$, 并加在消弧线圈上,此时就有一电感电流 \dot{I}_L 流过消弧线圈,由于 \dot{U}'_N 和 \dot{I}_L 的参考方向相反,且 $\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$, 所以实际电感电流 \dot{I}_L 方向上所加的电压为 \dot{U}_C , 故 \dot{I}_L 滞后于 \dot{U}_C 90°。接地点通过的是单相接地电容电流 \dot{I}_C (\dot{I}_C 超前 \dot{U}_C 90°) 和消弧线圈的电感电流 \dot{I}_L 的相量和。由于 \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 相位相反,所以在接地点 \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 相互抵消,如图 1-5(b) 所示。如果适当选择消弧线圈的分接头,可使流过接地点的电流变得很小甚至等于零,这样在接地点就不致产生电弧,消除了由电弧造成的各种危害。这就是消弧线圈的补偿作用。

需要指出的是,中性点经消弧线圈接地的三相系统和中性点不接地的三相系统一样,发生单相金属性接地时,接地相对地电压变为零,非接地相对地电压升高为正常电压的 $\sqrt{3}$ 倍,变成线电压。因此,这种系统各相对地的绝缘也是按线电压考虑的。

消弧线圈上的电流 I_L 为

$$I_L = \frac{U_C}{X_L} = \frac{U_C}{\omega L} \quad (1-8)$$

接地电容电流 I_C 为

$$I_c = 3\omega CU_c \quad (1-9)$$

补偿系数 K 定义为

$$K = \frac{\text{电容电流}}{\text{电感电流}} = \frac{I_c}{I_L} = \frac{3\omega CU_c}{\frac{U_c}{\omega L}} = 3\omega^2 LC \quad (1-10)$$

根据消弧线圈的电感电流对接地电容电流的补偿程度,补偿系数 K 的值将不同,相对应的有三种补偿方式。

(1) 全补偿

当 $K=1$, 即 $I_L = I_c$, 亦即 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$, 通过接地点的电流为零时,称为全补偿方式,此时感抗等于容抗。

从消弧的角度看,全补偿方式最好,但实际上并不采用这种补偿方式。这是因为在正常运行时,由于电网的三相对地电容并不完全相等,即 $C_A \neq C_B \neq C_C$,以及断路器操作时三相触头不能同时闭合等原因,致使在没有发生单相接地故障的正常状态下,中性点对地电位不为零,该不对称电压将引起由 $X_L = X_C$ 构成的串联电路的串联谐振过电压,危及电网的绝缘。

(2) 欠补偿

当 $K > 1$, 即 $I_L < I_c$, 亦即 $\frac{1}{\omega L} < 3\omega C$, 接地点还有未得到补偿的电容电流时,称为欠补偿方式,此时感抗大于容抗。

欠补偿方式在系统中一般也较少采用。这是因为在欠补偿的情况下,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,均可能使感抗等于容抗,而变成全补偿方式,出现串联谐振过电压。

但必须指出,为防止发电机传递过电压,发电机必须采用欠补偿方式。

(3) 过补偿

当 $K < 1$, 即 $I_L > I_c$, 亦即 $\frac{1}{\omega L} > 3\omega C$, 接地点的电容电流被电感电流全部抵消后,在接地点还有多余的电感电流时,称为过补偿方式,此时感抗小于容抗。

过补偿方式可避免上述谐振过电压的危险,因此得到广泛应用。因为当 $I_L > I_c$ 时,消弧线圈留有一定的裕度,即使将来系统发展了,对地电容增加,原来的消弧线圈还可使用。但必须指出,在过补偿方式下,接地点流过的电感电流不能超过规定值,否则故障点的电弧便不能可靠地自行熄灭。

由于中性点经消弧线圈接地的三相系统发生单相接地时,可使接地点的电流减小,这也就减小了单相接地时产生的电弧以及由它发展为多相短路的可能性。尤其在瞬时性接地时,电弧可以很快熄灭,故障线路可不切除。运行经验表明,中性点经消弧线圈接地的三相系统在发生单相接地时,可继续运行一段时间,一般为 2 h。

由于消弧线圈能有效地减小单相接地电流,迅速熄灭故障点的电弧,防止间歇性电弧过电压,所以在 35 kV、60 kV 及部分 110 kV 系统中采用中性点经消弧线圈接地的过补偿方式,部分 110 kV 系统是指雷害特别严重的电网。

(三) 中性点直接接地的三相电力系统

随着电力系统的发展,输电电压不断提高,高压和超高压电网已被采用,中性点不接地或经

消弧线圈接地的运行方式不能满足电力系统正常、安全、经济运行的要求。这是因为,对于中性点不接地或经消弧线圈接地的三相系统(二者统称为小电流接地系统),当发生单相金属性接地故障时,除故障相电压变为零、中性点对地电压升高为相电压外,非故障相电压将升高到 $\sqrt{3}$ 倍而变成线电压。所以,要求在小电流接地系统中,相绝缘必须按线电压考虑。这样,电网电压越高,则电网的绝缘水平就要求越高。例如,电网电压为 500 kV,则电网的相绝缘水平不能按 289 kV 而要按 500 kV 考虑;若电网电压为 750 kV,则电网的相绝缘水平不能按 433 kV 而要按 750 kV 考虑。很显然,这样会大大增加电气设备和线路的造价。为此,在高压和超高压系统中不能采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式,而是采用中性点直接接地的运行方式,如图 1-6 所示。

在正常运行时,由于三相系统对称,中性点对地电位为零,即 $\dot{U}_N = 0$,中性点无电流通过。

当 C 相发生金属性接地时,则 $\dot{U}'_C = 0$,而中性点的电位受其接地体固定,仍为零,即 $\dot{U}'_N = 0$,故接地相经大地、中性点接地构成了单相接地短路。由于单相接地短路电流 $I_k^{(1)}$ 很大,这样断路器就会跳闸,将接地的故障线路切除,以保证系统中非故障部分的正常运行。显然,当发生单相接地短路时,各相的电压不再是对称的,而非故障相 A、B 两相的对地电压仍为相电压,即 $\dot{U}'_A = \dot{U}_A$ 、 $\dot{U}'_B = \dot{U}_B$ 。这样,各相对地的绝缘水平就可以按相电压考虑。

对线路绝缘水平的要求降低,大大降低了电网的造价,并且系统的电压等级越高,其经济效益越显著。

为了提高中性点直接接地系统的供电可靠性,可在线路上加装自动重合闸装置。当线路发生单相接地故障时,断路器跳闸切除故障后,经过一定时间,在自动重合闸装置的作用下断路器自动重合。如果发生的是瞬态接地故障,重合都能够成功。此过程是在很短的时间内完成的,对用户没有多少影响,便可恢复供电。如果发生的是永久接地故障,则继电保护装置再次将断路器断开。对极重要的用户,为保证不中断供电,则应另外安装备用电源。

运行中为了限制单相接地短路电流,并不将系统中所有的中性点接地,而是由系统调度确定中性点接地的数量。每个电源通常有一个或几个中性点接地。

由于单相接地短路电流很大,引起电压降低,以致影响系统的稳定。从提高电力系统稳定性的角度考虑,也可以在线路的升压和降压变压器中性点经一个小阻抗(小电阻或小电抗)接地,如图 1-7 所示。

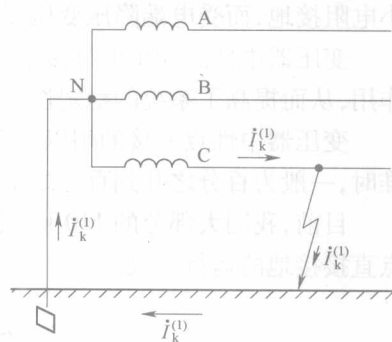


图 1-6 中性点直接接地的三相电力系统

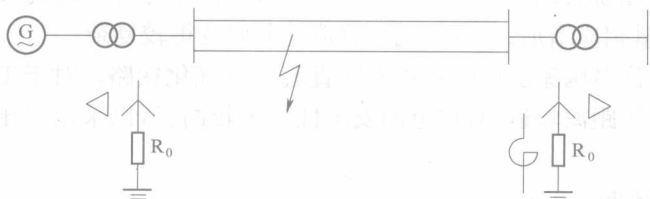


图 1-7 变压器中性点经一个小阻抗接地

这一措施,在发生对称三相短路时虽然不起作用,但在发生接地短路,如两相接地短路或