

铁路职业教育教材

牵引变电所

(第二版)

郑州铁路职业技术学院

林永顺

主编

中国铁道出版社

铁路职业教育教材

牵 引 变 电 所

(第二版)

郑州铁路职业技术学院 林永顺 主编
北京铁路电气化学校 董文海 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 4 年 • 北 京

内 容 简 介

本书结合目前我国交流电气化铁道牵引变电所的实际状况,以国产典型、成熟的电气设备为主,系统地分析了开关电器、操动机构、互感器、电气主接线、高压配电装置、接地装置、二次接线装置、直流操作电源系统的结构和工作原理。介绍了设备维修的基本常识,短路电压、电流计算的基本原理和基本方法,短路电流的效应及选择电气设备的原则和基本方法。

本书是铁路职业教育学校电气化铁道供电专业的教材,亦可作为牵引供电系统技术工人的培训教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

牵引变电所/林永顺主编. —2版. —北京:中国铁道出版社,2001
ISBN 7-113-04383-6

I. 牵… II. 林… III. 牵引变电所 IV. TM922.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 068356 号

书 名: 牵引变电所

作 者: 林永顺

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)

责任编辑: 方 军 电话: (010) 51873134 (021) 73134

封面设计: 李戈晶

印 刷: 北京兴达印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 549 千

版 本: 1991年8月第1版 2002年3月第2版 2004年7月第5次印刷

印 数: 17001~20000 册

书 号: ISBN 7-113-04383-6/U·1210

定 价: 29.80 元



版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:市电(010)63545969,路电(021)73169

第二版 前 言

本书是根据铁道部科教司新颁布的中等专业学校电力铁道供电专业初中四年制“牵引变电所”课程教学大纲,在1991年出版的铁路中等专业学校教材《牵引变电所》的基础上修订的。授课总时数为140~150学时。

本书力求结合职业教育的特点,结合现场实际状况,注重基本概念、基本原理、设备基本结构的分析,注重分析问题的基本方法、基本动手能力的培养,注重素质教育。力求文字叙述上由浅入深,通俗易懂,便于自学。

根据学生毕业后工作单位不同,职业岗位不同,教学中对本教材某些章节的内容可有所侧重。应加强实践性教学环节,有些内容可结合生产实习,技能训练,课程设计,毕业设计,现场教学完成。

本书由郑州铁路职业技术学院林永顺编写绪论、第一、二、三、四、五、八、九、十章和附录。郑州铁路局郑州供电段杜庆彦编写第六、七章。全书由林永顺主编,北京铁路电气化学校董文海主审。

西安铁路运输学校薛娟,广州铁路机械学校王亚妮,内江铁路机械学校刘昊君,郑州铁路职业技术学院陶乃斌、李学武等参加审稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,教材中难免有不妥和错误之处,诚恳欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

2001年8月

第一版 前 言

本书是根据铁道部教育司颁布的中等专业学校铁道电气化专业初中四年制“牵引变电所”课程教学大纲编写的。授课总时数为140~150学时。

本书力求结合中等专业学校的特点,注重基本概念、基本原理、基本结构的分析;注重基本方法、基本动手能力的培养。

根据学生毕业后去向不同,教学中对本教材某些章节的内容可有所侧重。应加强实践性教学环节,有些内容可结合生产实习、课程设计、实验、现场教学完成。

本书由西安铁路运输学校杨扩武编写第四、五、十章;内江铁路机械学校田喜仁编写第七、八、九、十一章;郑州铁路机械学校林永顺编写绪论、第一、二、三、六章和附录。全书由林永顺主编,北京铁路电气化学校余金兰主审。

编 者

1989.12

目 录

常用文字符号及说明	1
绪 论	3
第一章 供变电系统概述	5
第一节 电力系统概述	5
第二节 电力牵引供电系统概述	12
第二章 开关电器	18
第一节 电弧的形成与熄灭的物理过程	18
第二节 高压开关电器	24
第三节 低压开关电器	56
第四节 断路器的操动机构	60
第三章 互 感 器	72
第一节 互感器概述	72
第二节 电流互感器(TA)	72
第三节 电压互感器(TV)	81
第四节 110 kV、27.5 kV互感器的基本维修常识	88
第四章 电气主接线及高压配电装置	90
第一节 电气主接线概述	90
第二节 牵引变电所110 kV侧的电气主接线	92
第三节 27.5 kV(或55 kV)侧电气主接线	98
第四节 牵引变电所主接线举例	103
第五节 高压配电装置	108
第五章 接地装置	122
第一节 接地的基本概念	122
第二节 接地电阻允许值及接地装置的敷设	126
第六章 二次接线	133
第一节 二次接线概念	133
第二节 高压断路器的距离控制、信号回路	139
第三节 电动操作隔离开关的控制和信号电路	151
第四节 中央信号装置	156
第五节 牵引变电所的安装接线	166
第六节 二次接线新技术简介	178
第七章 自用电系统	194
第一节 交流自用电系统	194
第二节 直流自用电系统概述	197

第三节	碱性蓄电池组直流系统·····	199
第四节	直流系统的绝缘监察·····	213
第八章	供电系统三相对称短路·····	219
第一节	短路的基本概念·····	219
第二节	标么值及其应用·····	221
第三节	网络化简·····	228
第四节	三相对称短路分析计算的基本方法·····	235
第五节	三相短路电流的实用计算法·····	244
第九章	供电系统三相不对称短路·····	255
第一节	对称分量法及其应用·····	255
第二节	电气元件的序阻抗和序网络的构成·····	259
第三节	各种不对称短路的分析计算·····	266
第四节	牵引供电系统短路的分析计算·····	285
第十章	短路电流的效应及电器设备选择·····	295
第一节	短路电流的效应·····	295
第二节	电气设备选择·····	304
附 录	·····	328
参考文献	·····	344

常用文字符号及说明

一、电流类文字符号

文字符号	中 文 名 称	文字符号	中 文 名 称
I_N	一次额定电流	I_0	零序电流
I_n	二次额定电流	$I_{N.K}$	额定开断电流
I_L	负荷电流 电感电流	$I_{L\max}$	最大长期负荷电流
I_W	工作电流	I_e	变压器激磁电流
I_{Lm}	负荷电流幅值	I_C	电容电流
I_K	短路电流有效值	I_L	线电流
i_k	短路电流瞬时值	I_φ	相电流
I_p	周期分量电流幅值	I_{L1}	电力系统 A 相电流
i_p	周期分量电流瞬时值	I_{L2}	电力系统 B 相电流
i_{npo}	非周期分量电流初始值	I_{L3}	电力系统 C 相电流
i_{np}	非周期分量电流瞬时值	I_{L1W}	电力系统 A 相工作电流
i_b	短路冲击电流瞬时值	I_{L1C}	电力系统 A 相电容电流
I_b	短路冲击电流有效值	I_{Nt}	额定热稳定电流
I_{Kt}	任意时刻短路全电流有效值	i_{Nst}	额定动稳定电流
i_{k0+}	短路后短路电流瞬时值	I_d	基准电流
i_{kr}	短路前负荷电流瞬时值	I_{pu}	电流标么值
I_1	正序电流	I_E	接地电流
I_2	负序电流		

二、电压类文字符号

文字符号	中 文 名 称	文字符号	中 文 名 称
U_N	一次额定电压	U_d	基准电压
U_n	二次额定电压	U_{pu}	电压标么值
$U_{N.av}$	平均额定电压	U_C	电容电压
U_W	工作电压	U_L	线电压
U_K	短路电压有效值短路残余电压	U_φ	相电压
		U_{L1}	A 相电压
U_1	正序电压 原边电压	U_{L2}	B 相电压
U_2	负序电压 副边电压	U_{L3}	C 相电压
U_0	零序电压	E	相电势有效值
U_E	接地电压	E_m	相电势幅值

三、其他类文字符号

文字符号	中文名称	文字符号	中文名称
S_N	一次额定容量	R_E	接地电阻
S_n	二次额定容量	F_1, F_2	互感器原、副边磁势
S_d	基准容量	F_e	激磁磁势
S	视在功率	θ_0	实际环境温度
P	有功功率	θ_{ON}	计算环境温度
Q	无功功率	θ_L	负荷电流稳定温度
S_K''	次暂态短路功率	θ_{Ld}	正常发热允许温度
$S_{Kl}^{(3)}$	任意时刻三相短路功率	θ_{Kd}	短路发热允许温度
S_{NK}	额定断流容量	θ_k	短路时导体温度
X	电抗	Φ_e	激磁磁通
X_L	感抗	Φ_L	负载阻抗角
X_C	容抗 计算电抗	Q_{kt}	任意时刻短路全电流发热量
X_e	激磁电抗	Q_k	周期分量电流发热量
X_0, X_1, X_2	零序、正序、负序电抗	Q_{np}	非周期分量电流发热量
X_{pu}	电抗标么值	t_0	分闸时间
X_{Cpu}	计算电抗标么值	t_{f0}	固有分闸时间
Z_d	基准阻抗	t_b	燃弧时间
Z	阻抗	t_c	合闸时间
Z_K	短路阻抗	t_a	继电保护动作时间
Z_L	负载阻抗	L_1, L_2, L_3	电力系统三相
Z_2	二次阻抗	σ_c	计算应力
Z_{2n}	二次额定阻抗	σ_N	允许应力
R	电阻	F_N	允许抗弯破坏负荷

四、一次设备类文字符号

文字符号	中文名称	文字符号	中文名称
WL	架空输电线	MA	交流电动机
WB	旁路母线	GS	发电机
W	线圈、绕组、母线	QFR	旁路断路器
T	变压器	QFB	分段断路器
TA	自耦变压器、电流互感器	QF	断路器
TV	电压互感器	QS	隔离开关
TR	整流变压器	QSR	旁路隔离开关
K_T	变压器变比	QSW	母线隔离开关
K_i	电流互感器变比	QL	负荷开关
K_V	电压互感器变比	FA	避雷器
$Y_n \cdot d_{11}$	$Y_0/\Delta-11$ 接线	FU	熔断器
$Y_n \cdot d_{11} \cdot d_1$	十字交叉接线	C	电容器
Y_{N1}/V	平衡变压器接线	LC	限流电抗器
$\perp/L$	斯科特接线	LF	滤波电抗器
M	电动机		

绪 论

1879年5月,德国西门子和哈尔斯公司建造了世界上第一条电气化铁路。100多年来,随着电机电器制造工业、电子工业和电力工业的发展,电气化铁路运输以其巨大的经济效益受到世界各国的普遍重视,得到飞速发展。据1995年有关资料统计,在世界铁路总营业里程112.43万km中,电气化铁路有22万km,平均电气化率为19.5%。世界上为数不少的国家都把铁路电气化作为国策,并优先用在客货运量大的繁忙干线上。

我国铁路电气化事业起始于1956年。1961年8月宝成铁路(宝鸡至成都)宝鸡至凤州段电气化通车;1975年6月宝成铁路全线电气化通车,成为我国第一条电气化铁路。宝成铁路电气化后,该铁路的运能、运量大幅度的增长,推动了我国铁路电气化事业的发展。目前我国铁路牵引动力的政策是:“大力发展电力牵引,合理发展内燃牵引,继续发挥蒸汽牵引的作用。要坚定不移地推进电气化建设,逐步提高电力牵引承担换算周转量的比重,到本世纪末,在三种牵引方式中,电力牵引要占主导地位。”“在繁忙干线、运煤专线、长大坡道、长隧道等线路上,应优先采用电力牵引。”牵引动力政策的改革,促进了我国铁路电气化事业的飞速发展。据1999年12月统计,我国铁路总里程6.74万km,其中有电气化铁路14 025 km,电气化率20.8%,并正以每年500~800 km的速度发展。不久,我国的电气化铁路将迈入世界先进行列。

电气化铁路运输的优越性主要体现在如下几个方面:

1. 电力牵引可节约能源,综合利用能源

能源是一个现代化国家发展的基础。在所有牵引动力形式中,以电力牵引的热效率和总功率为最高。按20世纪90年代我国水电厂容量占电力系统总容量的27%计算,交流电力牵引的总作功效率为30%,内燃牵引为20%,蒸汽牵引为6%,即电力牵引的能源消耗最少。并且电力牵引使用的是可用水力、劣质煤、核能等发出的电能。由此可见,电力牵引可节约能源并可综合利用能源。此外,电气化铁路从国家电力系统中取用的电量很少,据统计,到2000年,牵引用电量只占全国总发电量的1.1%。

2. 电力牵引可提高列车的牵引重量,提高列车的运行速度

我国各型机车的轮周功率、计算速度、在不同限制坡度上的牵引重量见表0—1。

表0—1 我国各型机车技术性能比较

机 型 项 目		电 力 机 车		内 燃 机 车		蒸 汽 机 车	
		SS ₁	SS ₄	美国 ND ₅	东风 ₄	前 进	建 设
计算起动牵引力(N)		9.8×49 700	9.8×64 000	9.8×45 900	9.8×40 900	9.8×28 400	9.8×22 300
起动牵引重量(t)	4‰	5 350	6 900	4 950	4 400	2 850	2 250
	6‰	4 200	5 400	3 850	3 450	2 200	1 700
在限坡上以计算速度匀 速运动时的牵引重量(t)	4‰	6 150	8 200	6 900	5 750	4 450	3 500
	6‰	4 450	6 050	4 950	4 100	3 150	2 450
机车轮周功率(kW)		0.735×5 700	0.735×8 700		0.735×2 710	0.735×2 980	0.735×2 270
机车计算速度(km/h)		41.2	51.0	22.2	20.0	20.0	20.0

由表 0—1 可知,电力牵引采用大功率的电力机车,可扩大、提高铁路的运输能力和运输重量。

3. 电力牵引制动功率大,运行时安全性强

电力机车既有空气制动,又有电阻制动。以国产韶山₁型电力机车为例,其最大电阻制动力为 $9.8 \times 34\ 100\text{ N}$,最大电阻制动功率为 $3\ 490\text{ kW}$,且有半电阻制动,可维持低速运行。电力牵引比内燃、蒸汽牵引的制动力、制动功率都大,可满足列车安全运行的需要。

4. 电气化铁路运输的成本费用低

由于电力机车为非自给性机车,故可采用长交路、轮乘制,机车运用效率高;减少乘务人员(比蒸汽机车减少 1 人),提高了劳动生产率;电能价格低廉(与石油、煤炭相比),可节约燃料费等,使电气化铁路运输成本费显著降低。

5. 电力牵引易于实现自动化,利于采用先进科学技术,利于改善劳动条件,利于环境保护

电气化铁路采用的最新科学技术成就如交-直-交电力机车;工频单相交流 $2 \times 27.5\text{ kV}$ 自耦变压器供电方式;微计算机技术;自动化、远动化技术;故障检测与诊断技术等。电气化铁路的优越性将更加显著。

综上所述,电力牵引显然比其他牵引形式优越,因此,电气化铁路在世界范围内获得了较快的发展。

电力牵引采用的电流、电压制式。根据各国的国情不同,主要有如下几种形式:

1. 直流牵引制

这种电气化铁路采用 0.75 kV (我国城市地铁)、 1.5 kV 、 3 kV 或 6 kV 的直流电,向直流电力机车供电。

2. 低频单相交流牵引制

这种电气化铁路采用 11 kV 、 25 Hz ; 15 kV 、 $16\frac{2}{3}\text{ Hz}$ 的单相交流电向电力机车供电。

3. 工频单相交流牵引制

这种电气化铁路采用 25 kV 工频单相交流电向电力机车供电。这是一种比较先进的电流、电压制,它已引起了世界各国的重视。据统计,在世界各国电气化铁路总里程中,该种牵引制已由原来的 4% 上升到目前的 25%,而直流制则从原来的 62% 减少到 50%。这充分说明了工频单相交流牵引制的生命力。我国的电气化铁路从开始就采用了这种工频单相交流牵引制,为我国电气化铁路的发展奠定了良好的基础。

本课程将结合我国电气化铁路的实际状况,重点介绍工频单相交流牵引变电所的结构、接线、工作原理、运行、维修的基本常识和初步设计的基本方法。

第一章 供变电系统概述

第一节 电力系统概述

一、电力系统的一般概念

电力系统是一个包括发电、输电、变电、配电、用电装置的完整工作系统。一般用单线图表示,各电气装置之间的连接关系,如图 1—1 所示。

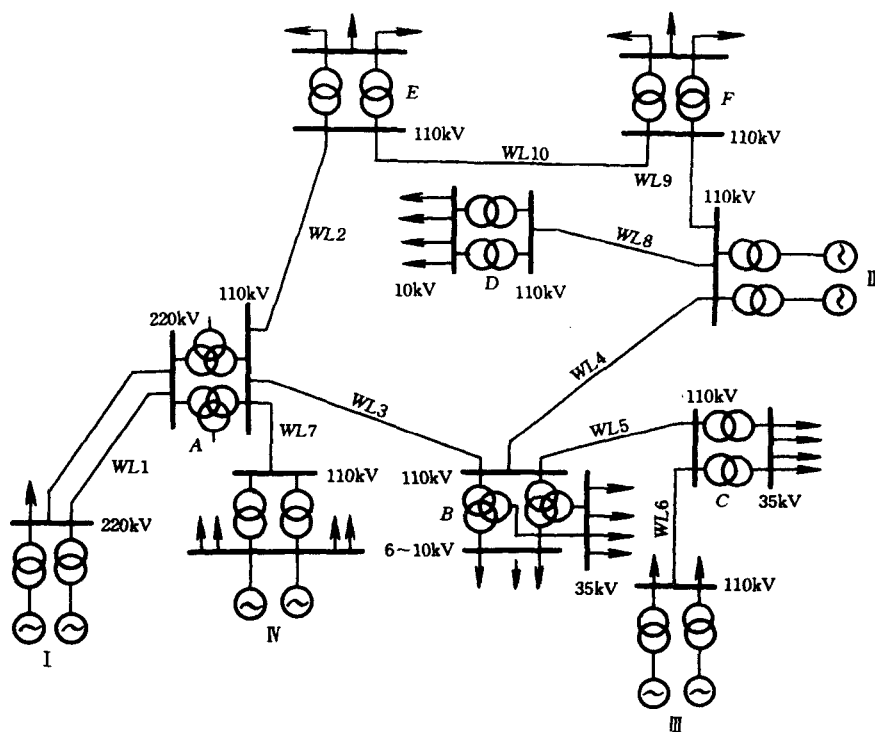


图 1—1 电力系统

图 1—1 所示的电力系统由一个大型水电站 I、两个大型火电厂 II、III 和一个热电厂 IV 构成。大型水电站一般都远离负荷中心。它生产的电能通过架空输电线路 WL1 用超高电压 (220 kV 及以上) 送至大型区域变电站 A。A 站中一般装设三相三绕组变压器或自耦变压器, 将超高电压降为 110 kV 和 35 kV 与相应电压级的网络相连, 向不同距离的用户供电。A 站供电范围较大, 是电力系统与发电厂联系的枢纽。两个大型火电厂和热电厂一般距负荷中心较近, 可用电压等级较低的架空输电线 (如 110 kV、35 kV) 以较近的距离向负荷中心的地方变电所, 如 B、C、D、E、F 供电。地方变电所多由区域变电站和本地发电厂供电, 将 35~110 kV 的

电压降为6~10 kV的电压向城市或企业供电。其供电范围较小,变电所中一般装设三相双绕组变压器。

为提高电力系统供电的可靠性,运行的灵活性,一般用一定电压等级的输电线(如110 kV或220 kV),如图 1—1 中的 WL2~WL10,将发电厂、变电站、用户互联成网。通常将不同电压等级、不同类型的输电线路和变电站构成的完整的工作系统称为电力网。它起着分配和传送电能的作用。习惯上也把各种不同电压级的输电线路称为电力网。电压在110 kV以上,供电距离在几百公里以上的电力网称为区域电力网。电压不超过110 kV、供电距离为几十公里的电力网称为地方电力网。

电力网的额定电压是考虑到电气设备的制造水平、经济技术上的合理性,经全面分析研究制定的。电力网及用电设备的标准额定电压等级规定如表 1—1 所示。

表 1—1 额定电压(线电压)标准(单位:kV)

用电设备额定电压	交流发电机 额定端电压	变压器额定电压		备 注
		原 绕 组	副 绕 组	
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 11.0	
—	15.75	15.75	—	
35	—	35	38.5	
60	—	60	66	
110	—	110	121	
154	—	154	169	
220	—	220	242	
330	—	330	363	
500	—	500	550	
25	—	27.5	27.5	仅用于牵引供电系统

由于电力网通过负荷电流时,线路及变压器线圈上总有电压损失存在,为保证电网末端的用电设备的额定电压在允许范围内波动,或者说电网末端电压等于用电设备的额定电压,必须提高电网首端电压以补偿电网首端变压器绕组及线路上的电压损失。变压器的原绕组是接受电能的,可认为是用电设备,其额定电压应为规定的标准额定电压。而直接与发电机相连的升压变压器的原绕组的额定电压应与发电机额定端电压相配合,故表 1—1 中变压器原绕组额定电压有3 kV及3.15 kV;6 kV及6.3 kV;10 kV及10.5 kV之分。变压器的副绕组相当于电源,它的空载额定电压高出用电设备额定电压 10%,这是因为变压器负载时,副绕组本身有 5% 的电压降,线路上有 5% 的电压降的缘故。但在3 kV、6 kV、10 kV电压时,由于这种变压器相应的配电线路不长,故副绕组的额定电压仅高出用电设备的额定电压 5%,或者说3.15 kV, 6.3 kV, 10.5 kV电压,适用于短路电压百分值较小的降压变压器。发电机端电压高出用电设备(如升压变压器)额定电压的 5%。

有负荷电流时,电力网的电压由于电压损失的存在,从电网首端至末端处处不等,那么在

计算网络中的电流时,究竟取哪一处的电压呢?为简化计算,选用线路的平均额定电压 $U_{N_{av}}$ 。所谓平均额定电压就是电网首端的最高工作电压和电网末端额定电压平均值,即 $U_{N_{av}} = (U_{\text{首}} + U_{\text{末}})/2 = 1.05U_N$ 。

电力系统中的用户,按其对供电连续性的要求不同,一般分为三级。

一级负荷:重要负荷,这类负荷的供电中断将给国计民生造成重大损失。故一级负荷要求有独立的双回路电源供电。

二级负荷:一般负荷,这类负荷的供电中断将给国计民生造成较大损失。这类负荷是否设备用电源,视具体条件而定。一般情况下应保证供电。

三级负荷:次要负荷,不属于一、二级负荷的用户。如附属性质的企业、车间;非生产性用户等,一般只设一回电源供电。

电力牵引负荷是电力系统中的一级负荷,牵引变电所都设独立的双回路电源供电或环形供电,以保证供电的可靠性。

电压质量对各类用电设备的安全经济运行都有直接影响。按“全国供用电规则”的规定,我国目前所规定的用户的电压容许变化范围为:

(1)由35 kV及以上电压供电的用户以及对电压质量有特殊要求的用户 $\pm 5\%$ 。

(2)由10 kV以下的电压供电的用户和低压电力用户 $\pm 7\%$ 。

(3)低压照明用户 $+5\% \sim -10\%$ 。

(4)频率的偏差将同样严重影响电力用户的正常工作。我国技术标准规定频率的允许变化偏差为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ 。

(5)电力系统供电电压的波形应为较严格的正弦波。

二、电力系统中性点运行方式

电力系统的中性点一般是指变压器、旋转电机星形绕组的中性点。中性点运行方式一般是指中性点是否接地、怎样接地。

牵引变电所中的三相主变压器,一般采用 Y_N, d_{11} 接线。牵引变压器原绕组中性点是否接地,对三相电力系统产生影响。

电力系统的中性点是否接地是一个由多方面因素(如继电保护、绝缘设计等)决定的问题,就我国电力系统而言,电力系统中性点运行方式有以下两种:

(一)小电流接地系统

1. 中性点不接地的三相电力系统

如图 1—2 所示,电力系统正常运行时,其中性点与地处于绝缘状态。

正常运行时,电网的三相导线间及三相导线与大地间,沿线路全长有分布电容存在。当电网电压较高时,分布电容将引起不可忽视的电容电流。

下面分析在这种系统中发生单相金属性接地时(接地阻抗为零),系统电压、电流的变化。

为简化分析,认为系统三相是完全对称的,沿导线全长的分布电容用一个集中在线路中部的电容 C 代替,如图 1—2 所示。忽略线间的分布电容及其引起的电容电流(因为线间电容及其引起的电容电流较小,在发生单相金属性接地时,由于线电压不变,线间电容电流也不变,故可忽略)。

三相系统正常运行时,电网各相对地电压(相电压) $\dot{U}_{L1}, \dot{U}_{L2}, \dot{U}_{L3}$ 是对称的,中性点对地

电压为零。电源各相电流 $\dot{I}_{L1}$, $\dot{I}_{L2}$, $\dot{I}_{L3}$ 分别等于各相工作电流 $\dot{I}_{L1W}$, $\dot{I}_{L2W}$, $\dot{I}_{L3W}$ 和各相与地间电容电流 $\dot{I}_{L1C}$, $\dot{I}_{L2C}$, $\dot{I}_{L3C}$ 的相量和, 如图 1—2(b) 所示。若线路经过完善的换位, 三相对地电容相等, 则各相对地电容电流也是相等的, 即 $I_{L1C} = I_{L2C} = I_{L3C} = \omega C U_{\phi}$ 。因为三相对地电容电流各自引前相电压 90° , 也是对称的 (相位差 120°), 故其相量和为零, 地中没有电容电流流过, 如图 1—2(c) 所示。

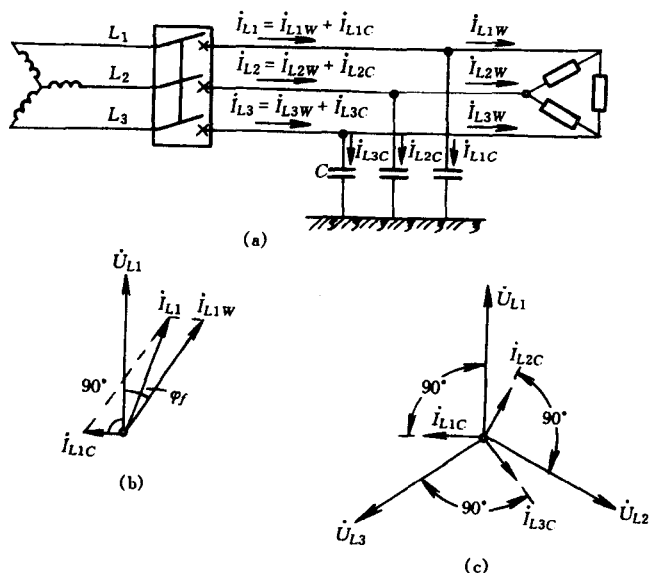


图 1—2 中性点不接地的三相系统(正常工作状态)
(a)原理接线图; (b) A 相电流相量图; (c) 电容电流相量图。

当三相系统发生单相接地故障时, 如图 1—3(a) 所示 (L_3 相接地), 由于各相对地电压改变, 相地间电容电流也发生改变。在金属性接地时, 故障相对地电压为零, 即 $\dot{U}_{L3} = 0$ 。系统中性点对地电压不再为零而变为相电压, 但方向相反, 即 $\dot{U}_0$ (中性点对地电压) $= -\dot{U}_{L3}$ 。这时非故障相 L_1 相对地电压设为 $\dot{U}'_{L1}$, 则 $\dot{U}'_{L1}$ 等于 L_1 相电压与中点对地电压的相量和, 即 $\dot{U}'_{L1} = \dot{U}_{L1} + \dot{U}_0 = \dot{U}_{L1} - \dot{U}_{L3} = \sqrt{3} \dot{U}_{L1} \angle -30^\circ$ 。非故障相 L_2 相对地电压设为 $\dot{U}'_{L2}$, 则 $\dot{U}'_{L2}$ 等于 L_2 相电压与中性点对地电压的相量和, 即 $\dot{U}'_{L2} = \dot{U}_{L2} + \dot{U}_0 = \dot{U}_{L2} - \dot{U}_{L3} = \sqrt{3} \dot{U}_{L2} \angle 30^\circ$ 。 $\dot{U}'_{L1}$ 与 $\dot{U}'_{L2}$ 之间的夹角为 60° , 如图 1—3(b) 所示。

由于非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍变为线电压, 所以非故障相对地电容电流也较正常运行时的 $\dot{I}_{L1C}$ 升高 $\sqrt{3}$ 倍。即 $\dot{I}'_{L1C} = \dot{I}'_{L2C} = \sqrt{3} \dot{I}_{L1C}$, $\dot{I}'_{L1C} = \dot{I}'_{L2C} \angle 60^\circ$ (电容电流与电压成正比)。因为故障相 L_3 相对地电压为零, 所以 L_3 相对地电容电流也变为零。若设电流正方向是由电源到电网, 则可得出通过 L_3 相接地点的电流 (简称接地电流) 为: $-\dot{I}_{L3} = \dot{I}'_{L1C} + \dot{I}'_{L2C}$ 。

由于 $\dot{I}'_{L1C}$ 和 $\dot{I}'_{L2C}$ 分别引前 $\dot{U}'_{L1}$ 和 $\dot{U}'_{L2}$ 90° , 所以 $\dot{I}'_{L1C}$ 与 $\dot{I}'_{L2C}$ 之间的夹角也为 60° , 其

相量和电流 $\dot{I}_{L3}$ 则滞后 $\dot{U}_{L3} 90^\circ$, 即引前 $-\dot{U}_{L3} 90^\circ$, 如图 1—3(b) 所示。根据余弦定理可得:
 $-\dot{I}_{L3} = \sqrt{3} \dot{I}'_{L1C} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \dot{I}_{L1C} = 3 \dot{I}_{L1C} = 3 \dot{I}_{L1C} \angle 60^\circ$ 。可见, 一相接地时, 故障相接地电流为电容电流, 且等于系统三相正常运行时, 一相对地电容电流的三倍。

若已知每相导线对地电容为 $C(\text{F})$, 相电压为 $\dot{U}_\varphi(\text{kV})$, 交流电角频率为 $\omega(\text{rad/s})$, 则接地电容电流为:

$$I_C = 3 I_{LC} = 3 \omega C U_\varphi \quad (\text{A}) \quad (1-1)$$

因为相对地的电容与电网的结构(电缆或架空线)有关, 近似计算时:

$$\text{架空线:} \quad I_C = U_N l / 350 \quad (\text{A}) \quad (1-2)$$

$$\text{电缆线路:} \quad I_C = U_N \cdot l / 10 \quad (\text{A}) \quad (1-3)$$

式中 U_N ——电网的线电压(kV);

l ——电压为 U_N 的具有电连接的线路长度(km)。

在三相系统发生单相非金属性接地时(经接地阻抗接地), 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小于线电压而大于相电压。接地电流也要小些。但考虑设备及线路的绝缘水平时, 都按发生单相金属性接地的情形处理。

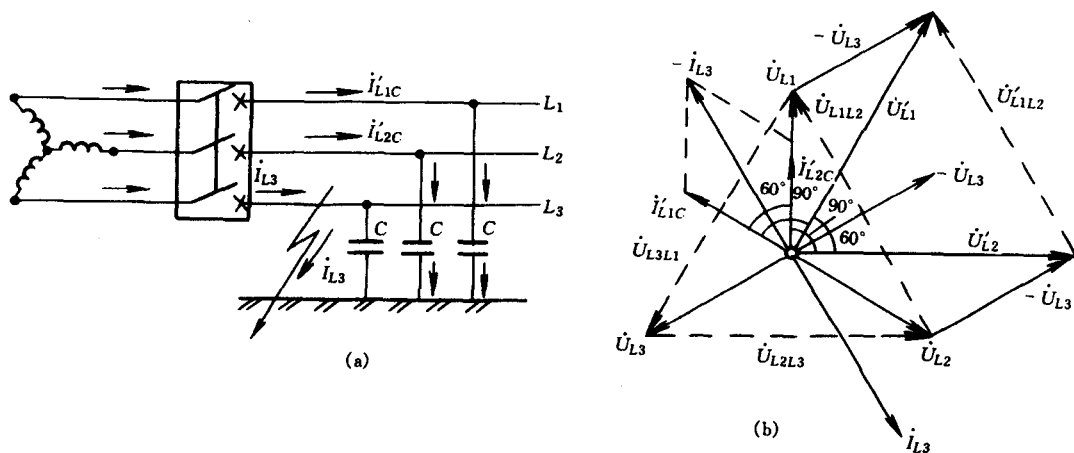


图 1—3 中性点不接地系统中, C 相接地的情形

(a) 原理接线图; (b) 相量图。

由图 1—3(b) 可知, 在中性点不接地系统中, 发生一相金属性接地时, 网络线电压的对称状态并未遭到破坏。同时, 这种系统中相对地的绝缘水平是根据线电压设计的, 因而接在线电压上的电气设备仍可继续运行, 但不允许长期运行。因为接地电流在接地处会因接触不良产生电弧。稳定电弧可能烧坏电气设备, 断续电弧有可能引起电网发生振荡, 产生过电压(过电压数值可达 2.5~3 倍的 U_N), 过电压波有可能使未故障相在绝缘薄弱处击穿而造成相间短路, 产生的短路电流将严重损坏设备。因此, 在中性点不接地系统中发生一相接地时, 一般只允许持续运行 2 h, 并且还需设置专门的绝缘监察装置或继电保护装置, 使工作人员及时知道一相接地故障的发生或者自动切除系统中的接地故障部分。

一般认为, 接地电流大于 5~10 A 时最容易发生断续电弧产生振荡过电压。在 6~10 kV 系统中, 断续电弧产生的过电压对设备绝缘危害不大, 但接地电流不得大于 30 A, 否则将产生

稳定电弧烧坏设备。20 kV以上系统中,接地电流不得超过10 A,否则断续电弧容易产生,它引起的振荡过电压数值较高,危及设备安全。

综上所述,通常只在电压6~10 kV、 $I_C \leq 30$ A;20~60 kV, $I_C \leq 10$ A和1 kV以下三相三线制电网中采用中性点不接地运行方式。

2. 中性点经消弧线圈接地的三相系统

在中性点不接地系统中,单相接地电流超过上述规定值时,应采取措施减少接地电流使其降至允许范围以内,因此三相系统中性点还可经消弧线圈接地,如图1—4所示。

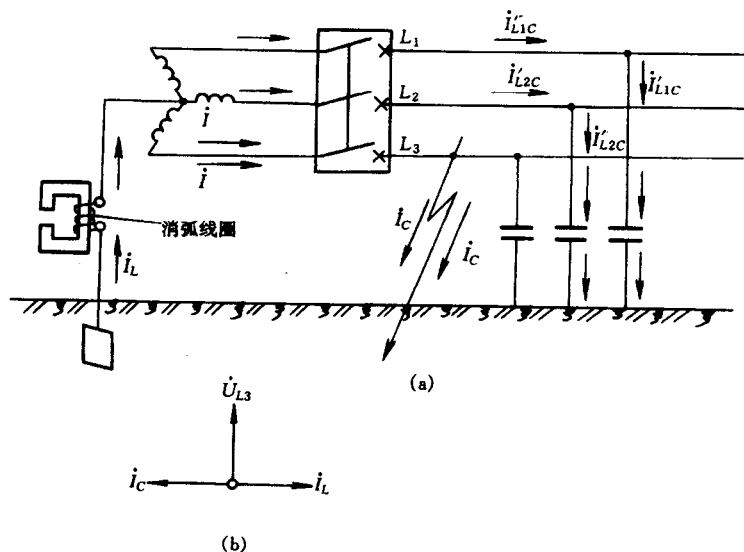


图1—4 中性点经消弧线圈接地的三相系统

(a)原理接线图;(b)相量图。

三相系统正常运行时,中性点对地电压为零,消弧线圈中无电流流过。当发生单相金属性接地时,如 L_3 相接地,中性点对地电压为相电压 $-\dot{U}_{L3}$ 。 L_3 相电流经大地、接地体、消弧线圈、中性点构成回路,消弧线圈将处于相电压下而有滞后相电压 90° 的电感电流 $\dot{I}_L$ 流过。由图1—4(b)可知, $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_C$ 方向相反,接地点通过的电流应是 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_C$ 的相量和。所以在接地点 $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_C$ 起互相抵消作用(或叫补偿作用)。若适当的选择消弧线圈的电感值,可使接地点的电流等于零或在允许范围以内。

一般来讲,消弧线圈有三种补偿状态:

(1)全补偿 适当选择消弧线圈的电感值,使 $X_L = X_C$ 时, $I_L = I_C$,接地点电流为零。消弧线圈处于全补偿工作状态。从消弧的观点来讲,全补偿状态最好,但实际上很少采用全补偿。因为当 $X_L = X_C$ 时是电流谐振关系,回路中易产生内部过电压而损坏设备。

(2)欠补偿 适当选择消弧线圈的电感值,使 $I_L < I_C$ 时,接地点尚有未补偿完的电容电流流过,此时消弧线圈处于欠补偿工作状态。这种补偿状态也很少采用,因为当切除部分线路使相地间电容减少,系统频率降低、线路发生断相(送电端断相,该相电容为零)时,均可使 $\dot{I}_C$ 减